

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞ ALAN MODELLEMESİ VE İSTATİSTİKSEL ENERJİ ÖNGÖRÜSÜ:  
MASLAK ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Sevinç RÜSTEMOĞLU**

**Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji**

**OCAK 2010**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞ ALAN MODELLEMESİ VE İSTATİSTİKSEL ENERJİ ÖNGÖRÜSÜ:  
MASLAK ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Sevinç RÜSTEMOĞLU  
(301061045)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2010**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)  
Eş Danışman: Doç. Dr. Ş. Sibel MENTEŞ (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Serhat Şeker (İTÜ)  
Doç. Dr. Yurdanur S. Ünal (İTÜ)  
Yrd. Doç. Dr. Önder Güler (İTÜ)**

**OCAK 2010**

## ÖNSÖZ

Dünyada, birincil enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanılmasına devam edilirken, bunun getirmiş olduğu çevresel ve ekonomik sorunlar da gün geçtikçe artmaktadır. Bu birçok ülke tarafından fark edilmiş olup, yenilenebilir enerjinin kullanımı için çeşitli teşviklerin getirilmesini sağlamıştır. Bu teşvik ile birlikte İTÜ Enerji Enstitüsü'nde de yenilenebilir enerji kaynakları üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da Enstitü bünyesinde kurulmuş olan iki küçük güçteki rüzgar türbinin amacına uygun olarak konuşlandırılması, bölgenin rüzgar potansiyelinin analizi ve istatistik yöntemler kullanılarak, geleceğe yönelik enerji planlamaları için gerekli rüzgar tahminlerinin başarımları irdelenmiştir.

Bu çalışmada emeği geçen sayın hocalarım Yrd. Doç. Dr. Burak Barutçu ve Doç. Dr. Ş. Sibel Mentеш'e, bu çalışma boyunca olan bütün yardımları ve gösterdikleri anlayış için çok teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmam süresince fikirleri ile destek veren Doç Dr. Yurdanur Ünal'a ve Prof. Dr. Zerefşan Kaymaz'a da teşekkürlerimi borç bilirim.

Aralık, 2009

Sevinç Rüstemoğlu  
Elektrik Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b>	<b>xiii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. RÜZGAR ENERJİSİ</b>	<b>7</b>
2.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi	7
2.2 Rüzgarın Oluşumu	9
2.3 Rüzgar Karakteristikleri	10
2.3.1 Yıllar arası rüzgar değişimi.....	11
2.3.2 Yıllık rüzgar şiddeti değişimi.....	11
2.3.3 Günlük rüzgar şiddeti değişimi .....	11
2.3.4 Kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri.....	12
2.4 Rüzgar Şiddeti Değişiminin Modellenmesi	13
2.5 Düşey Rüzgar Profili	14
2.6 Rüzgar Yönünün Değişimi	15
<b>3. İSTATİSTİKSEL VE NÜMERİK YÖNTEM</b>	<b>17</b>
3.1 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi	17
3.2 Atmosferik Yüzey Tabakada Düşey Rüzgar Profili	18
3.2.1 Logaritmik profil.....	18
3.2.2 Güç kanunu .....	20
3.2.3 Pürüzlülük katsayısı .....	21
Pürüzlülük uzunluğu cinsinden bulunması	21
Hız ve yükseklik cinsinden bulunması	21
Pürüzlülük uzunluğu ve hız cinsinden bulunması	22
3.3 Rüzgar Şiddeti Dağılımı	22
3.4 Wasp ve WindPro Akış Alan Modellerinin Çalışma Prensipleri	24
3.4.1 Pürüzlülük değişim etkisi .....	26
3.4.2 Engel perdeleme etkisi.....	27
3.4.3 Topoğrafik etki.....	29
<b>4. METEOROLOJİ ÖLÇÜM İSTASYONUNA AİT RÜZGAR VE ENERJİ POTANSİYELİNİN ANALİZİ</b>	<b>31</b>
4.1 Türkiye'nin Genel Rüzgar İklim Özellikleri	31
4.2 İstanbul'un Genel Rüzgar İklim Özellikleri	32
4.3 Ölçüm İstasyonu Bölgesinin Genel Özellikleri	33
4.4 Ölçüm Verisinin Analizi ve İzlenen Yöntem	34
<b>5. İSTATİSTİK MODELLEME VE ÖNGÖRÜ PROBLEMİ</b>	<b>39</b>
5.1 İdeal Prediktörün Özellikleri	40
5.1.1 İdeal prediktörün tanımı .....	40
5.1.2 Lineerlik.....	40
5.1.3 Zamanla değişmezlik .....	41
5.1.4 Kararlılık.....	41
5.1.5 Nedensellik .....	41

5.2 Wiener ve Kalman Filtrelerinin Temelleri	43
5.2.1 Wiener filtresi.....	44
5.2.2 Ayrik wiener filtresi.....	45
5.2.3 Kalman filtresi.....	46
5.3 AR Model	52
5.3.1 AR modeli tanımı.....	53
5.3.2 AR modeli mertebesi.....	53
5.4 Yapay Sinir Ağları	54
5.4.1 İleri Yayılımlı Yapay Sinir Ağları.....	56
5.4.2 Hata fonksiyonu.....	58
5.4.3 Hatanın hesaplanması.....	58
5.4.4 Momentum Hesabı.....	59
5.4.5 Ağırlık Azaltma.....	59
5.4.6 Öğrenme.....	60
5.4.7 Hessian Matrisinin Özellikleri.....	61
5.4.8 Levenberg Marquard Metodu.....	61
<b>6. ANALİZ VE MODEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>65</b>
6.1 Ortalama Rüzgar Şiddeti ve Yön Analizi	65
6.2 Rüzgar Verisinin Günlük Analizi	69
6.3 Rüzgar Verisinin Aylık Analizi	70
6.4 Rüzgar Verisinin Yıllık Analizi	72
6.5 2m’de Ölçülen Verilerin 10m’ye Düşey Ekstrapolasyonu	74
6.6 Rüzgar Şiddeti ve Güç Yoğunluğunun Alansal Dağılımının Değerlendirilmesi	75
6.7 Wasp ve WindPro Modelleri ile Elde Edilen Üretim Sonuçlarının Değerlendirilmesi	77
<b>7. ZAMAN SERİSİ ANALİZLERİNE DAYALI KISA PERİYOTLU RÜZGAR TAHMİN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>79</b>
7.1 Kalman Filtresi ile Elde Edilen Sonuçlar	79
7.2 AR Modeli ile Elde Edilen Sonuçlar	82
7.3 Yapay Sinir Ağları ile Elde Edilen Sonuçlar	90
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>95</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>105</b>

## KISALTMALAR

<b>ABK</b>	: Akaike Bilgi Kriteri
<b>AR</b>	: Auto-Regressive (Öz-bağlanımlı)
<b>KF</b>	: Kalman Filtresi
<b>SBK</b>	: Schwarz Bilgi Kriteri
<b>SÖH</b>	: Son Öngörü Hatası
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağı
<b><math>v</math></b>	: Rüzgar Şiddeti (m/sn)
<b><math>z</math></b>	: Yükseklik (m)
<b><math>z_0</math></b>	: Pürüzlülük Uzunluğu
<b><math>\alpha</math></b>	: Pürüzlülük Katsayısı





## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 3.1:</b> Rüzgar kırıcılarının türüne göre geçirgenlik değerleri.....	28
<b>Çizelge 6.1:</b> Rüzgar Şiddeti Ortalaması ve Weibull Parametrelerinin.....	
Karşılaştırılması.....	66
<b>Çizelge 6.2:</b> Windpro Weibull Parametreleri.....	68
<b>Çizelge 6.3:</b> Weibull Parametrelerinin Yön ile Değişimleri.....	69
<b>Çizelge 6.4:</b> Aylık ve Yıllık Rüzgar Ortalamalarının Değişimi .....	73
<b>Çizelge 8.1:</b> İstatistik Model Özeti.....	97



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Sandia Laboratuvarları 17 m Darrieus, nominal gücü 12.5 m/sn'de 60 kW.....	8
Şekil 2.2: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini.....	8
Şekil 2.3: Casper, Wyoming'e ait 1975, 1976, 1977 yıllarını içeren Ocak ve Temmuz aylarına ait saatlik ortalama rüzgar şiddeti değerlerinin yıllık ortalama saatlik değerlerle karşılaştırılması .....	12
Şekil 2.4: Ayrık bir gust olayının gösterimi, Burada a,b,c,d; sırasıyla: genlik, devam süresi, maksimum değişim ve lapse-rate (değişim oranı) .....	13
Şekil 2.5: Bir rüzgar türbininin çalışma karakteristikleri. ....	14
Şekil 2.6: Düşey rüzgar profili.....	14
Şekil 2.7: Bu çalışmadaki istasyon verisinin rüzgar gülü.....	15
Şekil 3.1: Pürüzlülük uzunluğu ve yüzey yapısı özelliklerine göre pürüzlülük sınıfları.....	20
Şekil 3.2: Farklı $k$ katsayılarına göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu .....	23
Şekil 3.3: Rüzgar Atlas Modeli Metodolojisi .....	26
Şekil 3.4: Bir engelin perdeleme etkisi.....	29
Şekil 3.5: Tepenin zirvesinden olan uzaklığa göre nispi hız artış oranları.....	29
Şekil 3.6: Yamaçta ve tepenin zirvesinde akım profili.....	30
Şekil 4.1: İncelenen Rüzgar Verisi (10m ve 2m için).....	35
Şekil 4.2: Sayısallaştırılmış Yükselti Haritası .....	35
Şekil 4.3: Sayısallaştırılmış Pürüzlülük Haritası.....	36
Şekil 5.1: İdeal prediktörün $\delta(t)$ işaretine cevabı.....	43
Şekil 5.2: Filtre Optimizasyon Problemi.....	44
Şekil 5.3: İşaret ve gürültünün spektral yoğunlukları .....	44
Şekil 5.4: Ayrık ölçüm durumunda işaret ve gürültünün birleşimi .....	45
Şekil 5.5: Ayrık zaman sisteminin modellenmesi.....	47
Şekil 5.6: $z_1, z_2$ ve $\mu$ konumlarının, olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla birlikte şematik ifadesi .....	51
Şekil 5.7: Modern Nöron Modeli.....	54
Şekil 5.8: Sigmoid Fonksiyonu.....	55
Şekil 5.9: İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı.....	57
Şekil 6.1: Ölçüm İstasyonu Verisinin Rüzgar Gülü.....	66
Şekil 6.2: Windpro'da Elde Edilen Weibull Dağılımı .....	67
Şekil 6.3: Wasp programının hesaplarına göre Weibull dağılımı ve parametreleri...67	
Şekil 6.4: Günlük Rüzgar Şiddeti Değişimi (10m'de ve 2m'de).....	70
Şekil 6.5: 10m ve 2m'deki Ölçüm Verisinin Günlük Yön Değişim .....	70
Şekil 6.6: Aylara Göre Rüzgar Şiddeti Dağılımı.....	71
Şekil 6.7: Aylık Güç Yoğunluğu Değişimi.....	71
Şekil 6.8: Ortalama Rüzgar Şiddetinin Yıllara Göre Dağılımı .....	72
Şekil 6.9: Yıllık Ortalama Güç Potansiyeli Dağılımı.....	73

<b>Şekil 6.10:</b> Güç Kanunu ile 10m’ye Çıkarılan Değerlerin Ölçüm Verileri ile .....	
Karşılaştırılması .....	74
<b>Şekil 6.11:</b> Rüzgar Şiddeti Dağılımı Atlası .....	76
<b>Şekil 6.12:</b> Birim Alanda Enerji Üretim Potansiyelinin Dağılımı .....	76
<b>Şekil 7.1 :</b> Kalman Filtresi ile Rüzgar Şiddeti Ölçüm Değerlerinin Tamamının Zaman Serisi Halinde Gösterimi .....	80
<b>Şekil 7.2 :</b> Bir Aylık Rüzgar Şiddeti Verisi ile KF Tahmin Verisinin Karşılaştırılması .....	80
<b>Şekil 7.3 :</b> Kalman Filtresi ile Rüzgar Yönü Ölçüm Değerlerinin Tamamının Zaman Serisi Halinde Gösterimi. ....	81
<b>Şekil 7.4 :</b> Bir Aylık Rüzgar Yönü Verisi ile Kalman Filtresi’nin Tahminlerinin Karşılaştırılması. ....	82
<b>Şekil 7.5 :</b> AIC ile ilk 100 Mertebede Elde Edilen Sonuçlar. ....	83
<b>Şekil 7.6 :</b> FPE ile ilk 100 Mertebede Elde Edilen Hata Sonuçlar .....	83
<b>Şekil 7.7 :</b> İlk Ölçüm Serisi ile AR Modeli Serisinin Kıyaslaması ve Hata.....	84
<b>Şekil 7.8 :</b> İkinci Ölçüm Serisi ile AR Modeli Serisinin Kıyaslaması ve Hata .....	85
<b>Şekil 7.9 :</b> Mart 2003’e Ait Ölçüm Verisi ve AR Modeli ile Aralarındaki Fark.....	86
<b>Şekil 7.10:</b> AIC’ye Göre Model Mertebesi Tespiti.....	87
<b>Şekil 7.11:</b> FPE’ye Göre Model Mertebesi Tespiti.....	87
<b>Şekil 7.12:</b> Birinci Seri ile AR Model’in Birlikte Görünüşü ve Hata.....	88
<b>Şekil 7.13:</b> İkinci Seri ile AR Model’in Birlikte Görünüşü ve Hata.....	88
<b>Şekil 7.14:</b> Mart 2003’e ait Ölçüm Verisi ile AR Modeli ve Aralarındaki Hata.....	89
<b>Şekil 7.15:</b> Eğitim Seti (Ölçüm ve YSA Modeli) ile Aralarındaki Fark.....	90
<b>Şekil 7.16:</b> Kontrol Kümesi ve YSA ile Ölçüm Verisi Arasındaki Fark .....	91
<b>Şekil 7.17:</b> Mart 2003 Dönemine Ait Ölçüm Verisi ile YSA’nın Kıyaslaması ve Aralarındaki Fark (Hata) .....	92
<b>Şekil 7.18:</b> Eğitim Seti ve Ölçüm ile YSA Arasındaki Fark .....	93
<b>Şekil 7.19:</b> Kontrol Seti ve Ölçüm Verisi ile YSA Tahmini Arasındaki Fark .....	93
<b>Şekil 7.20:</b> Mart 2003 Dönemine Ait Ölçüm Verisi ve YSA Tahmini ile Aralarındaki Fark .....	94

## **AKIŞ ALAN MODELLEMESİ VE İSTATİSTİKSEL ENERJİ ÖNGÖRÜSÜ: MASLAK ÖRNEĞİ**

### **ÖZET**

Günümüzde yoğunluklu olarak kullanılan birincil enerji kaynaklarının hala fosil yakıta dayalı olması, çevreye CO<sub>2</sub> salınımları ve birim fiyatlarındaki orantısız dalgalanmalar ile sergilenen haksız fiyat artırımları ülke ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi sektörünün son yıllarda gösterdiği gelişim ve birçok ülkenin yenilenebilir enerji politikaları, doğa dostu yatırımcıların önünü açmıştır. Bu çalışmada, İTÜ Enerji Enstitüsü'nde kurulan 1.8 kW ve 30 kW'lık türbinlerin Wasp ve WindPro akış alan dağılım modelleri ile yıllık üretimleri hesaplanmış ve bölgenin rüzgar ve enerji potansiyeli analizi yapılmıştır. 10 m'deki ortalama rüzgar şiddeti 2.5 m/sn ve ortalama güç yoğunluğu 28 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. 30 kW'lık türbinin yıllık üretimi Wasp modelinde yaklaşık 10 MWh olarak hesaplanmıştır. Ayrıca 1.8 kW'lık türbinin yıllık üretimi de 500 kWh olarak bulunmuştur. Bölge, İstanbul Boğazı'na olan yakınlığı ile avantajlı olmakla birlikte, bölgedeki yüksek yapılaşmalar, rüzgar enerjisi potansiyelini büyük oranda azalttığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, incelenen bölge, ticari amaçla enerji üretimi açısından uygun bulunmamıştır. Bu çalışmada inceleme yapılan rüzgar enerjisi sisteminin, İTÜ Enerji Enstitüsü'ndeki bazı dersliklerin aydınlatmasında ve rüzgar enerjisi uygulamalı eğitimlerinde kullanılması planlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, gerçekte rüzgar enerji sisteminin kurulumundan önce önemli olan rüzgar analizi ve türbinlerin yıllık üretimleri hesaplanmıştır. Ayrıca, işletim aşamasında enerji planlaması için önemli olacağı bilinen rüzgar verisi öngörüsü için AR Model, Kalman Filtresi ve Yapay Sinir Ağları ile zaman serisi analizi yapılarak başarımları değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre, Yapay Sinir Ağının, hem rüzgar şiddeti ve hem de yönünün öngörüsünde en başarılı metod olduğu görülmüştür.



## **FIELD FLOW MODELING AND STATISTICAL ENERGY PREDICTION A CASE STUDY: MASLAK REGION**

### **SUMMARY**

The continuous usage of fossil fuels as primary energy source is the reason of the emission of CO<sub>2</sub> and powerless economy of the country affected by the great fluctuations in the unit price of energy sources. In recent years, developments in wind energy sector and the supporting new renewable energy policies of the countries allow the new wind farm owners and the firms who expect to be an owner to consider and invest on the renewable sources. In this study, the annual production of the turbines with 1.8 kW and 30 kW which are available in ITU Energy Institute is calculated by Wasp and WindPro Field Flow Models and the wind characteristics of the area are analysed. The average wind speed at 10m on the meteorological mast is found to be 2.5 m/s and the average power density is 28 W/m<sup>2</sup>. The turbine with 30 kW rated power is expected to produce nearly 10 MWh annual energy and the turbine with 1.8 kW nominal power is expected to produce 500 kWh/year. As an advantage, the region is nearly 3.5 km close to the İstanbul Bosphorous but the new buildings with an average height of 150m has a great influence on the wind flow and decrease the wind energy potential which is produced by the Bosphorous effect. Therefore, from the economical perspective, the examined area was not found to be beneficial to produce wind energy. However, the energy obtained from the turbines in this area was found to be enough to supply energy for the illumination purposes of the classrooms in the Institute. For the educational purposes, it will also be useful to be used in class-applications of wind energy carried in the university.

This study, which determines wind characteristics and expected annual production, is important for this Project Site and therefore gains importance before the construction of wind energy system. However, when the system is operating, developing the energy management skills, forecasting the wind speed and direction will become important. At this point, Kalman Filter, AR Model and Neural Networks are used to determine the success of each method for correct wind prediction.





## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusu zaman geçtikçe büyük bir hızla artışını sürdürürken, enerji tüketiminin ve bu tüketimin tetiklediği CO<sub>2</sub> salınımının büyümesi, tabiatın dengesini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Bu etkinin azaltılması için birçok çalışma başlatılmış olup, bu çalışmaların en temelinde de enerji üretim kaynakları yer almaktadır. Enerji kaynakları temelde yenilenebilir ve yenilenemez olarak ikiye ayrılmaktadır. Yenilenemez enerji kaynakları, dünya üzerinde sınırlıdır ve son yılların en çok kullanılan kaynaklarından petrol ve doğalgazın giderek azalması birim fiyatların dramatik olarak değişmesine sebep olmuştur. Özellikle gelişmekte olan ülkeler için büyük önem taşıyan enerji kaynakları, son yıllarda petrol ve doğalgaz fiyatlarının artışı ile yeni bir anlam kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları bu aşamada önemli bir çıkış yolu olarak görülmüştür ve bu kaynakları teşvik amaçlı yeni enerji politikaları geliştirilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük bir gelişme gösteren rüzgar enerjisi, doğa dostu olması ve düşük işletim maliyeti ile birçok ülkede cazip hale gelmektedir. Rüzgar sektörü, dünyada son 15 yılda ortalama %25 büyüme hızı göstermiştir. Rüzgar sanayinin olduğu ülkelerde 200,000'den fazla insan bu sektörde istihdam edilmektedir. Dünya rüzgar kaynağı 53 TWh/yıl olarak hesaplanmaktadır. Avrupa, rüzgar enerjisi kurulu gücünde en yüksek kapasiteye sahip olmakla beraber (%65), Kuzey Amerika ve Asya ülkeleri de kurulu güç kapasitesi açısından önemli bir yere sahiptirler [1]. Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyeli birçok çalışmada değerlendirilmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmalardan biri de, Türkiye'nin kuzey batısını inceleyen, Aslan ve diğ. çalışmasıdır [2] Bu çalışmada 107 istasyon verisi incelenmiş olup, bölgesel yıllık rüzgar şiddeti ve gücü analizi yapılmıştır. Aynı çalışmanın bir bölümünde de Gökçeada'nın, adadan alınan 3 istasyon verisine dayanılarak rüzgar enerjisi potansiyeli değerlendirilmiş, ve gelecek vaad ettiği görülmüştür. Ülkemizde rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için yapılmış çalışmalardan bir diğeri de Tolun ve diğ. [3] Gökçada ile ilgili çalışmasıdır. Rüzgar potansiyeli açısından oldukça iyi bir ülke olan İspanya'da Migoya ve diğ. [4] yaptığı bir çalışmada da

Madrid'de rüzgar enerjisi için elverişli olan bölgelerin tespiti yapılmıştır. İlgili bölgelere 2 MW'lık türbin konuşlandırılması durumunda enerji üretimleri değerlendirilmiştir. Son yıllarda petrol ve doğalgaz fiyatlarındaki orantısız değişimler rüzgar enerjisini cazip hale getirmiş olsa da, rüzgarın tahmin edilmesi zor yapısı büyük bir dezavantaj olup, araştırmalarda kritik bir faktör olarak yer almaktadır. Düşük rüzgar şiddeti potansiyeline sahip veya sınırlı meteoroloji verisi olan bölgeler için elektrik piyasası, rüzgar enerjisini kesintisiz üretim kaynağı olarak veya rüzgar verisi analiz edilerek öngörülen güçte üretimi kabul etmeyi göz önünde bulundurmalıdır. Knognam ve diğ. [5] de, geçmiş yıllara ait kayıtlı rüzgar verisi çok olmayan ve ortalama rüzgar şiddetinin 7 m/sn'nin altında olduğu bilinen Tayland'da belirli bir bölge için rüzgar verisindeki belirsizlikleri de hesaba katarak optimum kurulu güç analizi yapan bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bir başka ülke, Sudan'dan Ömer [6] de, Sudan'ın rüzgar enerjisi potansiyelini ve rüzgar pompalarının kullanımını ele almıştır. Kwon [7] yapmış olduğu çalışmada, bir türbine gelecek rüzgar potansiyelini, belirsizlik analizini kullanarak hesaplamıştır. Öncelikle, hava yoğunluğunu, ortalama rüzgar şiddetini, Weibull parametrelerini ve yüzey pürüzlülük katsayısını içeren olasılık modellerini kullanarak, rüzgar verisinin değişkenliğini tespit etmiştir. İkinci olarak da, Monte-Carlo temelli sayısal simülasyon prosedürü gösterilmiştir.

2009 Aralık ayı içinde Kopenhag'da yapılan Dünya İklim Zirvesi'ndeki tartışmalar göstermiştir ki Kyoto Protokolü'nün gerekli kıldığı CO<sub>2</sub> salınımı 1990 yılı değerinin altına düşmediği gibi, büyük oranda artış göstermektedir. Ülkemizde de benzer bir durum gerçekleşmekte ve hatta ülkemiz Avrupa'daki CO<sub>2</sub> salınımının yoğun olduğu ülkeler arasında yer almaktadır. Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye'nin enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum hem enerji ihtiyacını karşılayan hem de CO<sub>2</sub> salınımını azaltan yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları arayışını doğurmaktadır. Ülkemiz güneş, jeotermal, hidrolik, biyokütle, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları açısından, zengin bir potansiyele sahiptir. Üç tarafı denizlerle çevrili ve yüksek platoların bulunduğu ülkemiz 2005 yılında EİE tarafından hazırlanan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) sonuçlarından da görüldüğü gibi yaklaşık 66,000 MW'lık büyük bir potansiyele sahiptir. Bu konuda çıkarılan teşvik kanunu sonucunda ülkenin farklı bölgelerinde enterkonnekte sisteme bağlı büyük rüzgar enerjisi santralleri devreye girmiş ve halen girmektedir. Ancak bu

büyük santrallerin yanı sıra, küçük sanayi ve farklı amaçlı tüketime yönelik küçük güçlü rüzgar türbinlerini kullanan sistemlerin de devreye sokulması gerekmektedir. İTÜ bünyesinde yer alan enerji teknoloji ve kaynaklarına yönelik çalışmaları bünyesinde barındıran Enerji Enstitüsü'nün önemli bir işlevi de rüzgar enerjisi çalışmalarına öncülük yapmaktır. Bu çalışmada bu amaçla, Enstitü bünyesinde yer alacak 1.8 kW ve 30 kW'lık iki rüzgar türbininden oluşan küçük güçlü bir rüzgar enerjisi sistemi planlanmıştır. Bunun için öncelikle, kampüs içinde yer alan meteoroloji gözlem istasyonunun rüzgar verisi kullanılmıştır. Rüzgar akışı üzerinde topoğrafyanın yüzey pürüzlülüğünün ve arazide yer alan bina gibi engellerin önemli etkisi bulunmaktadır. Tüm bu etkilerin belirlenip küçük güçlü bir rüzgar türbininin yerleştirileceği alandaki akım üzerindeki etkisinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için atmosferik sınır tabaka süreçlerini dikkate alan ve Avrupa Rüzgar Atlası ve REPA çalışmalarında da kullanılan iki önemli dinamik rüzgar akış modeli (Wasp ve WindPro) kullanılmıştır. Her iki modelin sonuçları dikkate alınarak, türbin için uygun yer seçimi yapılmış ve mevcut olan 1.8 kW ve 30 kW'lık iki türbinin enerji üretimi hesaplanmıştır.

Günümüzde tüm dünyada enerji planlaması, enerji çeşitlerini yerinde kullanmak, maximum ve minimum enerji tüketimi zamanlarını belirlemek açısından önem taşımaktadır. Özellikle rüzgar enerji santrallerinde kısa periyotlu (1 saat, 6 saat, 12 saat vb.) rüzgar tahminlerinin yapılması, rüzgara dayalı tüketimin rüzgarın maximum olduğu saatlere kaydırılmasını sağlayıp, minimum olduğu saatlerde ise santralde mevcut bir hibrid sistemin devreye sokulmasını veya enterkonnekte sistemden yararlanılmasını olanaklı kılmaktadır. Kısa periyotlu rüzgar tahmini için farklı modeller kullanılmaktadır.

Dinamik modeller, mezo ölçekli sayısal hava tahmin modellerinin öngördüğü rüzgar verilerini kullanarak diagnostik akış alan modelleriyle küçük ölçekte rüzgar öngörüsü yapmaktadırlar. Farklı modellerin oluşturdukları hata miktarını elimine etmek içinse istatistiksel modellere ihtiyaç bulunmaktadır. Rüzgarın kısa süreli tahminlerinde farklı istatistiksel metodlar kullanılabilir. Bu çalışmanın diğer bir amacı da rüzgar enerjisi planlaması için gerekli olan kısa periyotlu rüzgar tahmini için istatistiksel öngörü metodlarını incelemektir. İstatistik modellerin, dinamik modellerden farklı modellenmek istenen olayın fiziksel yapısı hakkında herhangi bir ön bilgiye sahip olunmasını gerektirmemeleridir. Zaman serisi analiz metodları incelenen olayın ne

olduğundan bağımsız olarak daha önce almış olduğu değerlerden yararlanarak işaretin istatistik parametrelerini koruyacak şekilde ileriye yönelik tahmin yaparlar. Bu tahminlerin yapılmasında olayın doğası ile ilgili hiçbir deterministik bilgiye sahip olunması gerekmez. Bu nedenle istatistik modeller tamamen bilgisayar aracılığıyla yapıp çalıştırılabilirler. Bir insanın yapacağı yorumlara ve olayla ilgili fiziksel bilgiye ihtiyaç göstermezler. Bu özellikleri istatistiksel modellerin en önemli avantajını oluşturmaktadır. Modelin kullanılması açısından incelenecek büyüklüğün rüzgar hızı veya tütün fiyatı olması hiçbir şeyi değiştirmez. Bu çalışmada yüksek adaptasyonları ve her olaya uygulanabilmeleri nedeniyle çok geniş kullanım imkanları bulunan istatistiksel modeller rüzgar şiddeti ve yönünün öngörüsü amacıyla kullanılmış ve başarımları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Geleceği tahmin etme ve geçmişini anlama isteği, gözlemlenen fiziksel olayların davranışlarını açıklamak için yapılan çalışmaların başlamasını sağlamıştır. Bunun için verilebilecek örnekler kalp atışlarındaki düzensizlikten, döviz borsasının değişkenliğine kadar geniş bir aralığı kapsamaktadır. Eğer ele alınan olay için, temelde yatan deterministik ilişkiler biliniyorsa; prensipte, başlangıç koşuluna bağlı olarak, ilgili denklemler geleceği tahmin için çözülebilir. Bu denklemlerin bilinmediği durumda ise sistem evrimine hakim olan kuralların ve sistemin mevcut durumunun bulunması gerekmektedir [8].

Bu çalışmada, İTÜ Meteoroloji İstasyonu'nda 2000 - 2004'ün ilk yarısını kapsayan 4 yıllık, 2 m ve 10 m'de ölçülmüş olan saatlik rüzgar verisinin temelinde yatan deterministik denklemler bilinmeden, Yapay Sinir Ağları (YSA olarak belirtilecektir), AR Model ve Kalman Filtresi ile modellenmesi ile, geleceğe yönelik yapılan tahminlerin başarımları değerlendirilmiştir. Rüzgar şiddeti ve yön öngörüsünde en başarılı metod YSA olarak tespit edilmiştir. Yön tayininde YSA'ya alternatif olarak AR Modelin de kullanılabilirdiği görülmüştür. Hem yön tayininde hem de rüzgar şiddeti öngörüsünde Kalman Filtresi başarımları yetersiz bulunmuştur.

Elimizdeki zaman serisine uygun bir modelin bulunması serinin görsel incelenmesi, gözlem verisinin yeterliliği ve modelin kullanılma şekli gibi birçok faktöre bağlıdır [9]. Mevcut rüzgar verisinin AR modelinin oluşturulmasında iki önemli kriter, optimal mertebenin tayini ve bulunan mertebeye göre katsayıların belirlenmesi göz önünde bulundurulmuştur. Mertebe belirlenmesinde kullanılan yöntemler Akaike tarafından bulunan Son Öngörü Hatası (Final Prediction Error) ve Akaike Bilgi

Kriteri'dir (Akaike Information Criterion). Nakamura ve Akaike'nin [10] çok değişkenli AR modelinin kullanıldığı çalışmada, bir termik güç santralinde, geleneksel PID kontrollü ve çok değişkenli AR modelin kullanıldığı kontrol yöntemi ile yönetilerek santralin çalışması değerlendirilmiş ve sonuç olarak çok değişkenli AR modelin üstünlüğü belirtilmiştir. Mertebe belirlenmesinin yanında, katsayıların tayini de önemli bir aşamadır. Bu çalışmada katsayı tayini için Yule-Walker yöntemi kullanılmıştır. Billinton ve Bagen'in yaptığı bir çalışmada da, AR metodu ile rüzgar verisi modellenerek, şebekeden bağımsız olarak çalışan rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin uygun üretim kapasitelerinin tayini yapılmıştır [11].

Bu çalışmada ikinci olarak kullanılan yöntem ise Kalman Filtresi'dir. Kalman Filtresi, ölçüm verilerine bağlı olarak oluşturulan fonksiyonel bağıntı ile bağımsız verilerin tahmininde kullanılır. Ölçüm verilerinin dinamik olduğu kabul edilmektedir [12]. Kalman Filtresi'nin önemli bir özelliği Peter S. Maybeck'in de belirttiği gibi [13] , (1) sistem ve ölçüm aletinin dinamikleri hakkındaki bilgiler, (2) sistem gürültüsünün, ölçüm hatasının ve dinamik modeldeki belirsizliklerin istatistiksel tanımı, (3) başlangıç koşulu ile ilgili bütün verileri alarak öncelik tanımadan yararlanılır ve mevcut durum için bir tahmin gerçekleştirir. Örneğin, bir uçağın hızının bulunması, Doppler radarı, veya bir navigasyon sisteminden veya hava veri sisteminden statik basınç ve göreceli rüzgar hızı bilgisi alınarak gerçekleştirilebilir. Kalman Filtresi, bunların hiçbirini göz ardı etmeden bir yaklaşımda bulunmaktadır. Kalman Filtesi'nin pratikte bir uygulamasını ve kısaca Kalman Filtresi'nin çıkarımı ve tanımlamasını içeren Greg ve Gary'nin çalışması örnek olarak verilebilir [14]. Bir diğer önemli çalışma ise, Kalman Tahmin ve Kalman Kontrol'ünü öğrenen ve uygulayan geri dönüşümlü bir yapay sinir ağı oluşturmuş ve bulunan sonuçlar birbiri ile uyumlu bulunmuştur [15].

Bu çalışmada son kullanılan yöntem olan, yapay sinir ağları kavramı, insan beyninin çalışma ilkelerinin sayısal bilgisayarlarla taklit edilmesi fikri ile ortaya çıkmış ve ilk çalışmalar beyni oluşturan biyolojik hücrelerin, ya da literatürdeki ismiyle nöronların matematiksel olarak modellenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır [16]. Yapay sinir ağlarının temelini atan ilk önemli adım olarak, bir ağ içindeki nöronların hareketleri arasındaki mantıksal ilişkileri, impulslarının cevap frekanslarına göre istatistiksel bağıntılara dönüştüren bir metod geliştiren Landahl ve diğ. [17] çalışması gösterilmektedir. Biyolojik sinir ağlarından esinlenerek geliştirilen YSA'larının

model tanımlama, tahmin, optimizasyon ve kontrol problemlerine çözüm getirmesi beklenmektedir. YSA her ne kadar, belirli iyi tanımlanmış modellerde başarılı olsalar da, tanım aralıkları dışında iyi bir başarımlar gösterecek kadar esnek değillerdir [18]. YSA'lar nöroloji, psikoloji, istatistiksel fizik, istatistik ve matematik, bilgisayar bilimleri ve mühendislik gibi birçok temel bilimden oluşan, disiplinlerarası bir konudur [19].

Kısaca, tarihsel gelişiminden bahsederek, YSA araştırmalarında günümüze kadar olan dönemi üç farklı periyoda bölebiliriz. İlk önemli dönem, 1940 larda McCulloch ve Pitts'in öncü çalışması ile zirveye ulaşmıştır [17]. İkinci dönem 1960'larda Rosenblatt'ın [20] perceptron yakınsama teoremi ile Minsky ve Papert'in [21] basit bir perceptronun sınırlarını gösteren çalışması ile oluşmuştur. 1980'lerin başından itibaren YSA konusunda önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Yeniden dirilişin arkasındaki büyük gelişme, Hopfield'ın [22] 1982'deki enerji yaklaşımı ile çok tabakalı perceptronlar (çok tabakalı ileri beslemeli YSA'lar) için geri beslemeli öğrenme algoritmaları Werbos [23] tarafından sunulmuş, daha sonra birçok kez yeniden keşfedilmiş ve 1986'da Rumelhart ve diğ. [24] tarafından yaygın hale getirilmiştir. Anderson ve Rosenfeld [25] YSA'larının tarihsel gelişimlerini detaylı bir şekilde açıklamaktadır.

## 2. RÜZGAR ENERJİSİ

### 2.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgarın bir enerji kaynağı olarak insanlar tarafından kullanılması tarih öncesine dayanmaktadır. Rüzgar yüzyıllarca, yelkenlileri hareket ettirmek için kullanılmıştır. Yeni Dünya bu şekilde çalışan gemiler ile keşfedilmiştir. Watt, 18. yüzyılda buharla çalışan motoru keşfedene kadar, gemilerin tek güç kaynağı rüzgar olmuştur [28]. Kara üzerinde rüzgarın kullanımı ise yine eskiye dayanmaktadır. Babil kralı Hammurabi'nin MÖ 17. yy'da rüzgar türbinlerini sulama amaçlı kullanmayı planladığı bilinmektedir [26, 27].

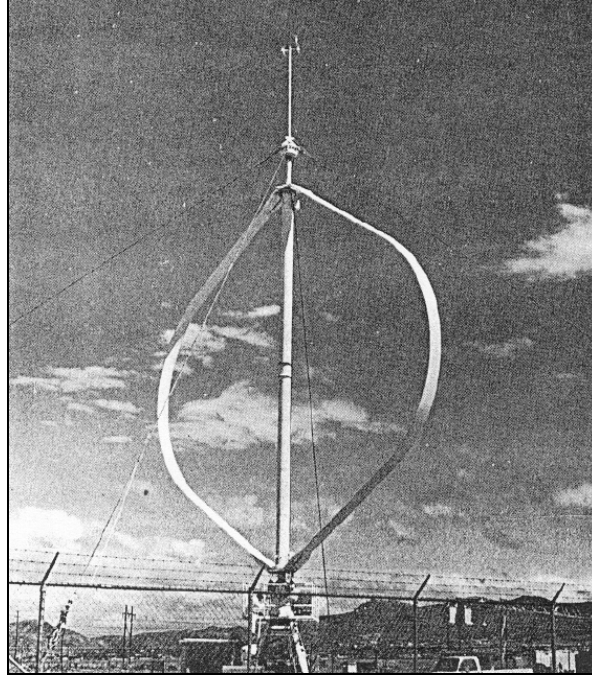
İranlılar, 17. yy'ın ortalarına kadar düşey eksenli rüzgar türbinlerini yaygın olarak kullanmışlardır [26, 27].

İngiltere'de kullanılan ilk rüzgar türbininin 1191'de yapıldığı bilinmektedir. Hollanda'da ise buğday öğütme amaçlı ilk rüzgar türbini 1439'da kullanılmıştır. Hollanda'da 1600'lü yıllara kadar kullanılan bu rüzgar türbinleri bina ile iç içedir. Bu rotor tipleri günümüzde kullanılsa da, döneminin şartlarına göre yüksek kalitede aerodinamik mühendisliğinin temsilcileridirler. 1700'lerin ortalarında Hollanda'lı göçmenler, bu tip rüzgar türbinlerini Amerika'ya taşımışlardır. Birkaç örnek yapılmışsa da, Avrupa'dakilerin sayısına ulaşamamıştır. 1800'lerin ortalarına doğru su pompalamak amacıyla yeni bir rüzgar türbini geliştirilmiştir. Batı Amerika'da tarım için geniş bir arazi bulunmasına rağmen, suyun birkaç metre aşağıda yer alması sebebiyle bu yeni türbin yaygın bir uygulama alanı bulmuştur [26].

Rüzgardan elektrik üreten ilk ülke Danimarka'dır. 1890 yılında, Danimarkalılar elektrik üretmek için 23 m çapında bir rüzgar türbini kullanıyorlardı. 1910 yılı itibarıyla de gücü 5 ile 25 kW arasında değişen birkaç yüz türbin Danimarka'da kullanım halindeydi [26].

Günümüzde rüzgar türbinleri, dönme eksenlerine göre yatay (Şekil 2.2) ve düşey (Şekil 2.1) eksenli olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Düşey eksenlilerin en çok bilineni Darrieus Türbinidir, Şekil 2.1.





**Şekil 2.1:** Sandia laboratuvarları 17 m Darrieus, nominal gücü 12.5 m/sn'de 60 kW [26].

Yatay eksenli türbinlerden en popüler olanı 3 kanatlı bir rüzgar türbini Şekil 3.6'da görülmektedir.



**Şekil 2.2:** Yatay eksenli rüzgar türbini [28].

## 2.2 Rüzgarın Oluşumu

Yer yüzeyindeki farklı sıcaklık dağılımı rüzgarın oluşturan temel faktördür. Ana enerji kaynağı güneştir. Bu nedenle rüzgar dünyanın eğriliği, dönme ekseninin eğimi ve yer yüzeyinin homojen olmayan yapısı nedeniyle güneş enerjisinin yüzey tarafından farklı alınmasına bağlı olarak atmosfer basıncında ortaya çıkan yatay doğrultudaki fark havanın hareketinin oluşmasına neden olur. Rüzgar, atmosferdeki potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur [29].

Ekvator bölgesinin güneş ışınlarının dik gelmesi nedeniyle aşırı ısınması, buna karşın ışınların kutup bölgelerine eğik gelmesi ve radyasyon kaybına bağlı olarak aşırı derecede soğuması sonucunda ortaya çıkan bu kuvvetli sıcaklık farkı atmosferin genel sirkülasyonunu oluşturmaktadır. Bu sirkülasyonla ekvator bölgesinin sıcak havası kutba taşınırken, kutup bölgesinin soğuk havası ise ekvatora taşınmaktadır. Ancak dünyanın dönmesi, yeryüzeyinin homojen olmaması gibi dinamik faktörler bu sirkülasyonu daha karmaşık bir hale getirmekte ve sirkülasyon tek bir hücreli yapı yerine üç hücre ile gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak, dünyanın farklı enlem bölgelerinde farklı yön, şiddet ve karakteristiklere sahip sürekli rüzgar bölgeleri oluşmaktadır (Ticaret Rüzgarları, Batılı Akımlar vb.) [29].

Yeryüzeyinin homojen olmayan yapısı, kara ve denizlerin dağılımı, tepeler ve dağlar gibi yüksek bölgelerin, ovalar ve denizler gibi düz arazilerin varlığı, farklı ısınmalara ve bu nedenle de, sürekli rüzgar bölgelerinin yanısıra coğrafi yapıya göre değişen yerel rüzgar karakteristiklerinin oluşumuna neden olmaktadır[30].

Tepeler ve dağlar, yerel rüzgar şiddetinin artmasını sağlamaktadırlar. Dağ ve vadi alanlarındaki günlük ısınma farklılığının sonucu gündüz vadiden dağa, gece ise dağdan vadiye olacak şekilde genel akıma ilave olarak bir akım bileşeninin eklenmesi sıkça görülür (vadi ve dağ meltemleri). Kıyı bölgelerinde de termal etki önemlidir. Kara ve denizin farklı ısınması nedeniyle, bu kısımlar genelde rüzgarlıdır. Deniz sıcak iken, yüzey hava akışı karadan denize doğru olacak şekilde lokal bir sirkülasyon meydana gelir. Kara daha sıcak olduğunda ise, bu sirkülasyonun tersi meydana gelir (kara ve deniz meltemleri) [30]. Bu çalışmanın yapıldığı bölge de, kara - deniz etkileşim alanı içinde yer almaktadır.

Bu bilgiler doğrultusunda kuvvetli ve zayıf rüzgar alanlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [31].

Kuvvetli rüzgar alanları;

- 1- Kuvvetli basınç gradyanının bulunduğu bölgeler,
- 2- Yüksek ova ve platolar,
- 3- Sürekli inici akış bölgeleri,
- 4- Hakim rüzgar yönüne paralel vadiler,
- 5- Tepe ve dağ zirveleri,
- 6- Jeostrofik rüzgar ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri.

Zayıf rüzgar alanları;

- 1- Hakim rüzgar yönüne dik vadiler,
- 2- Engebelerle gölgelenmiş arazi,
- 3- Kısa, dar vadi veya kanyonlar,
- 4- Pürüzlülük yüksekliğinin büyük olduğu alanlar

Herhangi bir bölgedeki rüzgar potansiyelinin saptanması ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerine uygun yer seçilebilmesi için bu kuvvetli ve zayıf rüzgar alanlarının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir.

### **2.3 Rüzgar Karakteristikleri**

Rüzgarlar genel (planeter) ve lokal olarak iki sınıfa ayrılır. Planeter rüzgarlar daha üst atmosfer seviyelerinde görülen, lokal rüzgarlar ise yer yüzeyine yakın olan rüzgarlardır.

Diğer enerji kaynakları ile (hidro-elektrik, kömür veya doğal gaz gibi) karşılaştırıldığında rüzgar yersel ve zamansal değişim gösteren bir enerji kaynağıdır. Yersel değişimler lokal coğrafi şartlara bağlıdır. Rüzgar enerjisi çalışmalarında ve özellikle rüzgar türbininin yerleşim alanının belirlenmesinde rüzgarın karakteristiklerinin ve bu karakteristiklerin zaman içindeki dağılımının hassasiyetle belirlenmesi gerekir. Verilen herhangi bir yerde rüzgarın zaman içindeki değişimi yıllar arası, yıllık, günlük ve kısa periyotlu olmak üzere dört sınıfa ayrılır [30].

### **2.3.1 Yıllar arası rüzgar değişimi**

Hava veya iklim parametrelerinin uzun dönem tespiti için yaklaşık 30 yıllık verinin gerekli olduğu kabul edilmektedir. Bir istasyon için kabul edilebilir yıllık ortalama rüzgar şiddeti değerini dikkate almak için yaklaşık 5 yıllık bir veri gerekir. Ortalama değerler üzerinde, yıl sayısı kadar bir bölgede bulunan istasyon sayısı da önem taşır. Birbirine yakın istasyonlar arasında da büyük farklar mevcut olabilir [30].

Bir türbinden üretilen güç rüzgar şiddetinin küpü ile doğru orantılıdır. Bu nedenle yıllık ortalama güç çıktısı veya yıllık enerji çıktısı (kWh/yıl) rüzgar şiddetine göre yıldan yıla daha büyük bir değişim gösterir. Örneğin rüzgar şiddetindeki % 15 lik bir değişim durumunda, 100,000 kWh/yıl üretmesi beklenen bir türbin 61,000 ile 150,000 kWh/yıl arasında üretim yapılabilir.

### **2.3.2 Yıllık rüzgar şiddeti değişimi**

Bir bölgede türbin kurmak veya bölgeler arasında en uygun alanı seçmek için yıllık ortalama rüzgar şiddeti en önemli faktörlerden biridir. Yıllık ortalama rüzgar şiddeti 10m seviyede 1-2m/s gibi küçük bir değer olabildiği gibi yüksek bir değerde olabilir. Rüzgar enerjisi açısından 5m/s lik bir değer bir türbin için kabul edilebilir bir değerdir. Yıllık rüzgar şiddet değişimi analiz için önemli bir faktördür. Rüzgar şiddeti mevsimsel veya aylık olarak da analiz edilebilir [29].

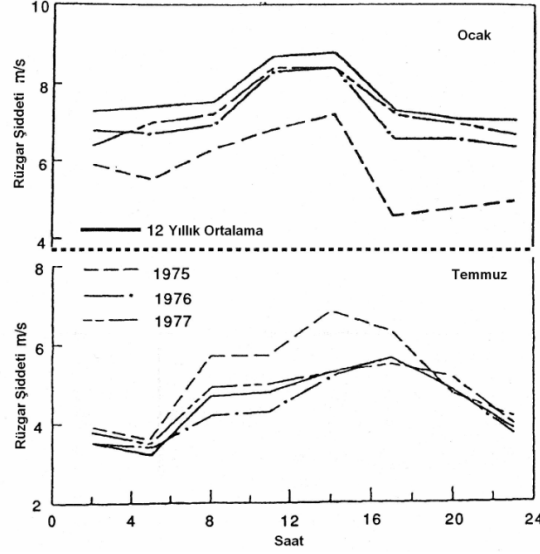
### **2.3.3 Günlük rüzgar şiddeti değişimi**

Yer yüzeyinin farklı ısınması nedeniyle günlük rüzgar şiddeti değişimleri meydana gelir. Gece yarısından güneş doğuşuna kadar olan saatler boyunca rüzgar şiddeti en düşük değerinde iken, gün boyunca rüzgar şiddeti artış gösterir (Özellikle yazın karasal bölgelerde). Bu günlük değişim, yer yüzeyinin üzerindeki daha yüksek seviyelerde farklı olabilir.

Rüzgarın gün içindeki davranışında yıldan yıla olan farklar özellikle rüzgarlı bölgelerde önemli olabilir (Şekil 2.3).

Her ne kadar gündün geceye günlük çevrimin temel özellikleri tek bir yıllık data ile tanımlanabilse de, günlük salınımların genliği ve gün içinde maksimum rüzgarın olduğu zaman gibi daha detaylı karakteristikler belirlenemeyebilir.

Rüzgar şiddetinin mevsimsel ve günlük değişimleri ve rüzgar gücü, rüzgar türbininin kurulmasına karar vermeden önce dikkatle analiz edilmelidir.

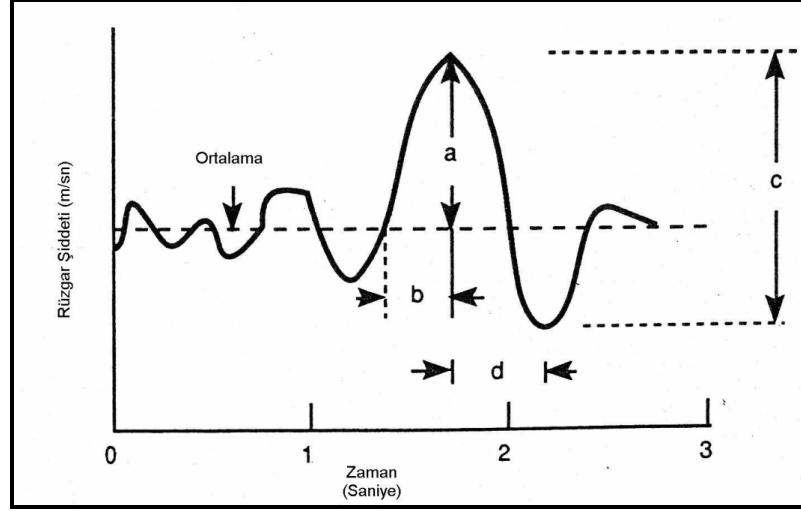


**Şekil 2.3:** Casper, Wyoming'e ait 1975, 1976, 1977 yıllarını içeren Ocak ve Temmuz aylarına ait saatlik ortalama rüzgar şiddeti değerlerinin 12 yıllık ortalama saatlik değerlerle karşılaştırılması [32].

### 2.3.4 Kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri

Rüzgar şiddeti değişiminde genellikle iki aralık vardır. 10 dakika ve 3 saniye. İlki 1 s civarındaki bir örnekleme periyodu kullanılarak tahmin edilir ve 10 dakikalık aralık için ortalaması alınır. 10 dakikalık aralık ortalaması, enerji çıktısı vasıtası ile rüzgar türbininin performansını tahmin etmek için kullanılır. Diğer taraftan 3 saniyelik bir aralıktaki kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri pik hamle (gust) ve türbülans datasını verir. Rüzgardaki türbülans, rüzgar türbinlerinin özellikle kanatlardaki yorulma süresini tahmin etmek için kullanılır [29].

Gust türbülans içinde süreksiz bir olaydır. Bir gust'ın dört karakteristiği vardır. Genliği, devam süresi, maksimum gust değişimi ve değişim süresi genellikle gust yapısı olarak adlandırılır (Şek. 2.4). Gust yapısı bir rüzgar türbininin davranışını etkiler. Örneğin bir gust genliğinden bir rüzgar türbini için ihtiyaç duyulan yapısal gerilmeler tahmin edilebilir. Bir ekstrem gust olayı türbinin kanat gibi bir elemanın veya tüm yapının dayanıklılığını belirler. Sisteme giriş bu nedenle süreklilikten çok ayrıktır. Ekstrem yüklemeler, bir türbin elemanının muhtemel bir kullanılabilir yaşam süresini sağlayan şiddetli gust değerine duyarlılığını belirleyerek, analiz edilir [30].

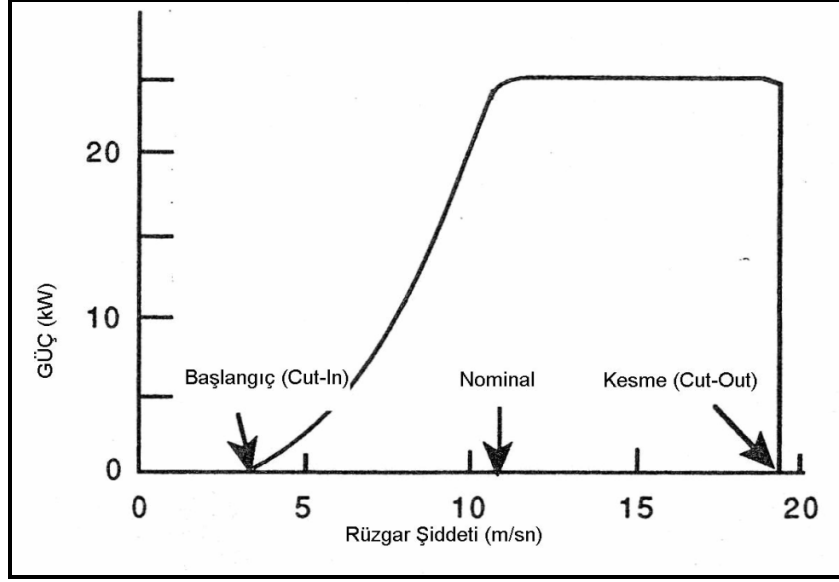


**Şekil 2.4:** Ayrık bir gust olayının gösterimi, Burada a,b,c,d; sırasıyla: genlik, devam süresi, maksimum değişim ve lapse-rate (değişim oranı) dır [30].

## 2.4 Rüzgar Şiddeti Değişiminin Modellenmesi

Yıllık ortalama rüzgar şiddeti birim alandaki rüzgar enerjisi ( $\text{kWh/m}^2$ ) veya rüzgar güç potansiyelini ( $\text{W/m}^2$ ) tahmin etmek için kullanılabilir. Türbin yer seçimi için bir öngörü imkanı sunsa da, yıllık değişimlerini yansıtmaz. Aynı yıllık ortalama rüzgar enerjisine sahip iki farklı türbin alanı farklı enerji potansiyeline sahip olabilir. Bu nedenle rüzgar enerji potansiyeli hesaplamalarında saatlik ortalama rüzgar şiddeti değerleri kullanılır. Hesaplamalarda mevsimsel değişimleri gösterebilmesi için en az iki yıllık rüzgar şiddeti değerleri kullanmak önemlidir. Rüzgar şiddeti değişkenliğinin tam olarak belirlenmesi için beş yıllık verinin değerlendirilmesi tercih edilmelidir [31].

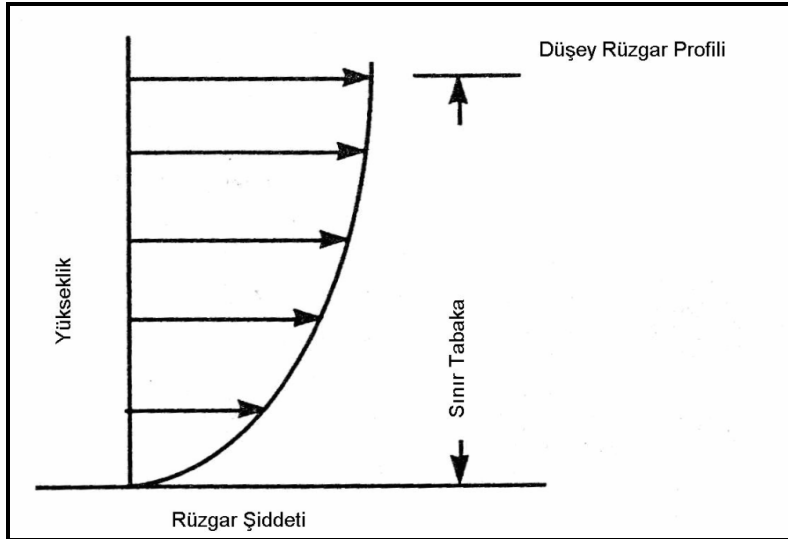
Rüzgar şiddeti frekans eğrisi o bölgede kullanılacak olan bir rüzgar türbininin çalışma karakteristiklerinin belirlenmesi açısından da büyük önem taşır. Bir rüzgar türbininin karakteristik güç eğrisi, türbinin üretime başladığı rüzgar şiddet değeri (cut in), maksimum güç elde edilen minimum rüzgar şiddet değeri (rated wind speed), türbinin devreden çıktığı değeri (cut out) kapsar (Şekil 2.5). Türbinin çalışmaya başladığı hız ile maksimum güç elde ettiği hız arasında güç eğrisi sürekli artış gösterir. Bu değerlerin üzerinde ise pitch (adım) kontrol mekanizması ile türbin maksimum güç üretmeye devam eder. Kullanılan türbin için çıkış rüzgar şiddeti değerinde ise türbin üretimi durdurur [31].



Şekil 2.5: Bir rüzgar türbininin çalışma karakteristikleri [30].

## 2.5 Düşey Rüzgar Profili

Rüzgar, yeryüzüne yakın bölgelerde yüzey sürtünmesi nedeniyle yavaşlar, yükseklikle de artış gösterir. Rüzgarın yükseklikle değişimi düşey rüzgar profili olarak bilinmektedir (Şekil 2.6). Bu aynı zamanda rüzgarın düşey kaymasının ifadesidir [31].

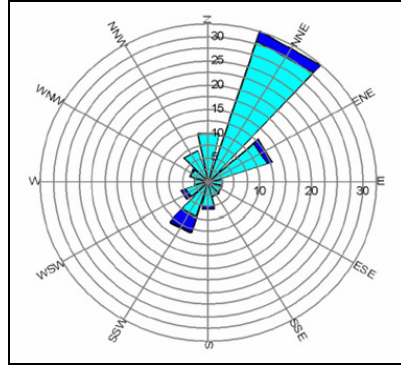


Şekil 2.6: Düşey rüzgar profili [30].

## 2.6 Rüzgar Yönünün Değişimi

Rüzgar yönü Atmosferin genel sirkülasyonuna bağlı olarak mevsimsel ve lokal etkiler nedeniyle de günlük ve kısa süreli değişim gösterir. Sürekli akım bölgelerinde (ticaret rüzgarları), mevsimsel olarak yön değişimleri küçüktür. Orta enlemler dereceleri gibi geçiş bölgelerinde ise değişim büyüktür. Ancak günlük ve kısa süreli değişimler bir türbinin çalışması ve performansı üzerinde daha önemli etkiye sahiptir [33].

Rüzgar yönündeki değişimlerin frekansı ve büyüklüğü, özellikle yatay eksenli türbinlerin farklı bileşenleri üzerinde dayanıklılık testleri ve oluşan gerilmeler açısından hayati önem taşır. Bir türbinden maksimum güç elde etmek ve gerilme etkisini minimize etmek için yön değişiminin davranışı (Şekil 2.7 gibi) ve persistans bilgisi gereklidir. Genelde bir rüzgar türbini, 30-60 saniyelik bir aralıkta rüzgar yönündeki her 5-10 derecelik değişim durumunda rüzgara doğru yönelerek uyum sağlar [33].



**Şekil 2.7:** Bu çalışmadaki istasyon verisinin rüzgar gülü.





### 3. İSTATİSTİKSEL VE NÜMERİK YÖNTEM

#### 3.1 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Rüzgar hareket halindeki bir hava akımı olduğu için kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik enerji eşitliği,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

ile verilmektedir. Burada  $m$  hareket halindeki cismin kütlesi,  $v$  de hızıdır. Özgül kütle  $\rho$  ile gösterilmek üzere eşitlikteki  $m$  kütlesi yerine

$$m = \rho V \quad (3.2)$$

yazılır. Burada  $V$  hacmi göstermektedir. Rüzgarın düşey bileşeni yatay bileşenin yanında ihmal edilir ve rüzgar esme yönüne göre dik alan  $S$  ile, rüzgar yönündeki uzunluk da  $l$  ile gösterilirse hacim,

$$V = Sl \quad (3.3)$$

ile ifade edilir.  $v$  rüzgar hızında ve  $t$  süresinde katedilecek mesafe ise,

$$l = vt \quad (3.4)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadeleri (3.1)'de yerine koyup düzenlersek

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow E = \frac{1}{2}\rho Stv^3 \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $t = 1$  ve  $S = 1$  alınırsa birim zamanda birim alandaki enerji

$$\text{elde edilir} \left( P = \frac{1}{2}\rho v^3 \right)$$

Eşitlikte kullanılan  $\rho$ , deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında  $\rho = 1.223$   $\text{kg/m}^3$  değerini alır.  $v$  ise yatay rüzgar şiddetidir.

Rüzgar enerjisi analizinde kullanılan birimler,  $\rho = 1.223 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ,  $v: \text{[m/s]}$ ,

$P = \frac{1}{2} \rho v^3$ ,  $P: \text{[W/m}^2\text{]}$  olarak ifade edilmektedir.

Rüzgar enerji potansiyeli özellikle düşey rüzgar profilinin değişimine bağlıdır. Rüzgar enerjisi ise rüzgar şiddetinin, hava yoğunluğunun, rüzgarın tutulacağı rotor alanının ve rotorun bulunduğu yüksekliğin bir fonksiyonu olup rüzgar şiddetin küpü ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

$C_p$  güç katsayısı ve  $A$  rotor tarama alanı olmak üzere türbinden elde edilen enerji:

$$E = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.6)$$

İdeal bir türbinin sahip olabileceği güç katsayısı maximum 0.59 olup, Betz Limiti olarak bilinmektedir.

Rüzgar enerjisi tahmin teknikleri farklı gruplarda incelenebilir.

- Atmosferik sınır tabakanın ele alındığı kompleks eşitlikleri içeren mezo ölçekli nümerik modeller
- Rüzgar tünelineki arazi modeli üzerindeki hava akımının fiziksel modeli
- Ampirik modeller (rüzgar karakteristiklerini belirlemek için ekonomik bir metoddur).

## 3.2 Atmosferik Yüzey Tabakada Düşey Rüzgar Profili

### 3.2.1 Logaritmik profil

Monin – Obukhov benzerlik teorisine göre,  $L$  Monin – Obukhov uzunluğu kararlılık kriteri olmak üzere;

$$v(z) = \left[ \frac{U_*}{k} \right] \cdot \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi \left( \frac{z}{L} \right) \right] \quad (3.7)$$

Şeklinde elde edilebilir. Burada,

$k$  von Karman Sabiti (0.4),

$U_*$  sürtünme hızı ( $0.1 < U_* < 1 \text{ m/sn}$ ).

$\psi$  düşey rüzgar profili ifadesinde kararlılık fonksiyonu olup,

$$X = \left(1 - 15 \frac{Z}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.8)$$

Olmak üzere kararlı ve kararsız koşullarda sırasıyla

$$\psi\left(\frac{Z}{L}\right) = -4.7 \frac{Z}{L} \quad (\text{kararlı}) \quad (3.9)$$

$$\psi\left(\frac{Z}{L}\right) = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \arctan x + \frac{\pi}{2} \quad (\text{kararsız}) \quad (3.10)$$

Şeklindedir [35].

Logaritmik profil engebeli arazide (şehir veya ormanlık bölgelerde) geçerli değildir.

a) Z yüksekliği yaklaşık olarak  $z_0$  mertebesinde olduğunda

b)  $\frac{Z}{L} \gg 1$  iken

(3.10) eşitliği kullanılmaz. Bu durumda (3.12) ile verilen üstel ifade geçerlidir.

Bir arazinin pürüzlülük uzunluğu  $z_0$  parametresi ile tanımlanır. Pürüzlülük elemanları ile pürüzlülük uzunluğu arasındaki ilişki, ilk defa Lettau tarafından 1969 yılında ortaya çıkarılmıştır. Bu bağıntı aşağıdaki şekildedir:

$$z_0 = 0,5 \frac{hS}{A_h} \quad (3.11)$$

Bu denklemdeki;  $z_0$ : Pürüzlülük uzunluğu parametresi,  $h$ : Pürüzlülük elemanının yüksekliği,  $S$ : Rüzgara karşı gelen dikey kesit alanı,  $A_h$ : Arazi üzerindeki ortalama kesit alanı'nı ifade etmektedir.

Bu matematiksel eşitlikte ortalama yatay kesit alanının, rüzgara karşı gelen dikey kesit alanından çok daha büyük olduğu durumlarda, daha gerçekçi pürüzlülük uzunluğu değerleri elde edilebilir (Şekil 3.1).

Z <sub>0</sub> (m)	Yüzey Yapısı Karakteristikleri	Pürüzlülük Sınıfı
1.00		
0.50	Büyük şehirlerin varoşları, taşra kentleri	3
0.30	Siper kuşakları, orman, küçük binalı şehir	
0.20	Birçok ağaç ve/veya çalılar, tek ya da iki katlı seyrek binalar	
0.10	Kapalı görünümlü çiflik arazisi, seyrek ağaçlık	2
0.05	Açık görünümlü çiflik arazisi, seyrek ağaçlık	
0.03	Çok seyrek bina ve ağaçlı çiflik arazisi	1
	Havaalanları (binaları ve ağaçları ile birlikte)	
0.01	Havaalanı pistleri	
	Biçilmiş çim	
0.005	Pürüzsüz çıplak toprak	
0.001	Pürüzsüz kur yüzeyleri	
0.0003	Pürüzsüz kum yüzeyleri	0
0.0001	Su yüzeyleri (göller, fiyortlar, denizler)	

**Şekil 3.1:** Pürüzlülük uzunluğu ve yüzey yapısı özelliklerine göre pürüzlülük sınıfları [29].

### 3.2.2 Güç kanunu

Çeşitli bölgelerdeki rüzgar verilerini karşılaştırmak için verilerin standart bir yüksekliğe göre değerlendirilmesi gerekir. Bir bölgedeki uzun süreli ortalama rüzgar şiddetinin incelenmesinde güç kanununa göre interpolasyon yönteminin kullanılması uygundur [31].

$$\frac{\bar{v}_r}{v_a} = \left( \frac{Z_r}{Z_a} \right)^\alpha \quad \text{veya} \quad \frac{\bar{P}_r}{P_a} = \left( \frac{Z_r}{Z_a} \right)^{3\alpha} \quad (3.12)$$

Burada  $v_a$  ve  $v_r$  sırasıyla anemometrenin bulunduğu seviyede ve referans seviyesindeki ortalama rüzgar şiddetini,  $P_a$  ve  $P_r$  ise anemometre ve referans seviyesindeki rüzgar gücünü belirtmektedir. (3.12)'deki  $\alpha$  üssü,  $z_0$  ve kararlılığa bağlı olarak değişir. Küçük  $z_0$  değerleri için  $\alpha = 1/7$  olarak alınır. Logaritmik

ekstrapolasyonda  $z_0$  ve atmosferik sınır tabaka kalınlığı beraberce göz önüne alınmalıdır.

### 3.2.3 Pürüzlülük katsayısı

Yukarıda gösterilen pürüzlülük sınıflarına göre, belirli bir yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızı kullanılarak, farklı yüksekliklerdeki hızları hesaplamak mümkündür. Bu işlem için kullanılacak eşitlik:

$$\frac{v}{v_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha_1} \quad (3.13)$$

$\alpha$  en genel halde 1/7 alınabilir.  $\alpha$  değerini daha doğru belirlemek için başka yollarda kullanılabilir. Bunlar;

- a) Pürüzlülük uzunluğu cinsinden
- b) Hız ve yükseklik cinsinden
- c) Pürüzlülük uzunluğu ve hız cinsindedir.

#### a) Pürüzlülük uzunluğu cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

Pürüzlülük katsayısı

$$\alpha = 0.096 \log_{10} z_0 + 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilir [33].

#### b) Hız ve yükseklik cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

Pürüzlülük katsayısı

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(v_{ref})}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{z_{ref}}{10}\right)} \quad (3.15)$$

olarak ifade edilir [34].

#### c) Pürüzlülük uzunluğu ve hız cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

Pürüzlülük katsayısı için NASA tarafından önerilen bağıntı aşağıdaki gibidir [35].

$$\alpha = z_0 \left[ 1 - 0.55 \log(v_{ref}) \right] \quad (3.16)$$

### 3.3 Rüzgar Şiddet Dağılımı

Belirli bir yerdeki rüzgar şiddetinin karakteristiğinin uzun dönemde yavaş bir değişim gösterdiği kanıtlanmıştır. Bir yıldan diğer bir yıla ortalama rüzgar şiddetindeki değişimi tahmin etmek zor olsa da, rüzgar verisi bulunan yılın olasılık dağılım fonksiyonu tanımlanarak, gelecek yılki varyasyon iyi bir şekilde tahmin edilebilir. Birçok bölgede, saatlik rüzgar verisinin yıllık değişimini göstermek için Weibull dağılımı iyi bir gösterge olarak kabul edilir [36]. Weibull dağılım fonksiyonu,

$$F(v) = \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.17)$$

(3.17)'de belirtilen  $F(v)$  fonksiyonu,  $v$  rüzgar şiddetini aşan verilerin sayısını verir. (3.17)'de yer alan iki önemli parametreden biri olan  $k$  katsayısı olup “şekil parametresi” olarak da bilinmektedir. (3.18)'den görüldüğü gibi şekil parametresi doğrudan rüzgar hızı persistansı ile ilişkilidir. Böylece  $k$ 'nın yüksek değerleri yüksek rüzgar şiddeti persistansına, düşük değerleri ise düşük rüzgar şiddeti persistansına karşılık gelir. Diğer parametre ise  $c$  katsayısı “ölçek parametresi” dir.  $c$  katsayısı ile  $\bar{U}$  yıllık ortalama rüzgar şiddeti ile arasında (3.19)'da belirtildiği gibi bir ilişki bulunmaktadır [36].

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086} \quad (3.18)$$

$$\bar{v} = c\Gamma(1+1/k) \quad (3.19)$$

$\Gamma$  gamma fonksiyonudur. Gamma fonksiyonu, (3.20)'de belirtilen olasılık yoğunluk fonksiyonunun formülünden çıkarılabilmektedir.

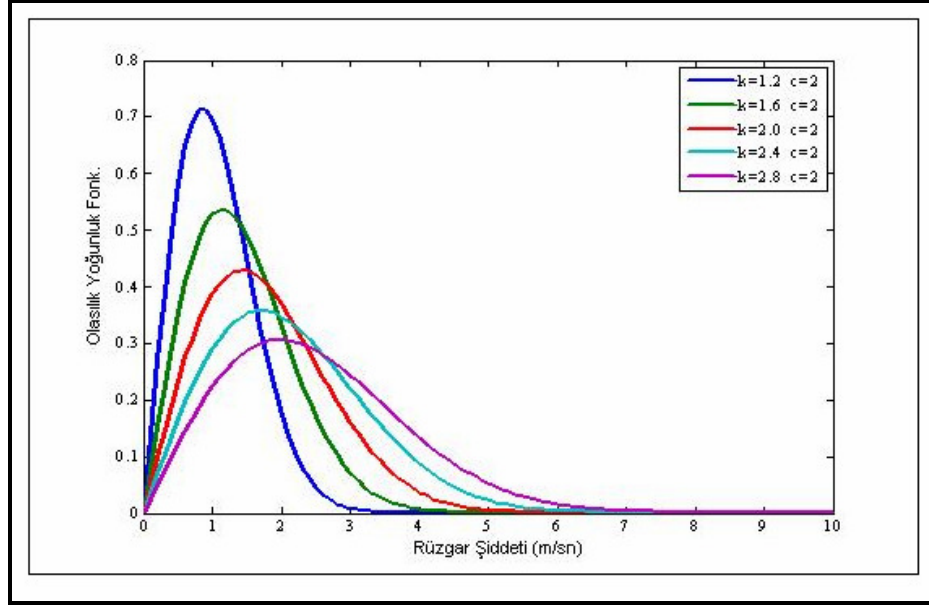
$$f(v) = -\frac{dF(v)}{dv} = k \frac{v^{k-1}}{c^k} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.20)$$

Ortalama rüzgar şiddetinin formülü ise,

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} vf(v)dv \quad (3.21)$$

Şeklinde elde edilir.

Weibull dağılımının özel bir durumu da Rayleigh dağılımıdır. Rayleigh dağılımında  $k$  parametresi 2 değerini almaktadır. Şekil 3.2’de farklı  $k$  değerlerine göre olasılık yoğunluk fonksiyonunun değişimi gösterilmektedir [32].



**Şekil 3.2:** Farklı  $k$  katsayılarına göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu [36].

Birçok saha için Weibull dağılımı bölgedeki rüzgar rejimini iyi yansıtsa da, bu bütün sahalar için geçerli değildir. Örneğin, yaz ve kış aylarında birbirinden çok farklı rüzgar klimatolojisine sahip bir bölge, “bi-Weibull” olarak bilinen iki tepeli bir olasılık dağılım fonksiyonu ile daha iyi modellenebilmektedir [36].

$$F(v) = F_1 \exp\left(-\left(\frac{v}{c_1}\right)^{k_1}\right) + (1 - F_1) \exp\left(-\left(\frac{v}{c_2}\right)^{k_2}\right) \quad (3.22)$$

### 3.4 WAsP ve WindPro Akış Alan Modellerinin Çalışma Prensipleri

Rüzgar enerjisi potansiyellerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların en önemlileri WAsP ve WindPro Akış Alan Modelleridir. Bu modeller, klimatolojik rüzgar istatistiğinin dikey ve yatay ekstrapolasyonunu yapan bilgisayar programlarıdır. Değişik bölgelerde, yakın engellerin gölgeleme etkisini de hesaba katarak rüzgar akışını tanımlamaktadırlar. Genel olarak, WAsP beş ana hesap grubundan oluşur. Bu program Danimarka’da Riso Ulusal Laboratuvarının rüzgar enerjisi bölümünde hazırlanmış ve geliştirilmiştir. Son yıllarda WAsP programını kullananların sayısı 100 ülkede 1600 kullanıcıyı aşmıştır. Aynı zamanda, bu



modeller farklı pürüzlülük şartlarının etkilerini, yakın bina ve diğer engeller sebebiyle perdeleme etkilerini ve topografik şartlara bağlı olarak zorlanan rüzgarın değişimini temel alır. Böylece rüzgar türbinlerinin yerleşimini ayrıntılarıyla ortaya koymak için temel meteorolojik datayı düzelterek kullanımını sağlar. Rüzgar atlasıyla herhangi bir lokal yer ve yükseklikte temel yüzey istatistikleri gösterilir. Ayrıca rüzgar enerji uygulamalarına göre ortalama rüzgar istatistiklerinin ekstrapolasyonu, rüzgar enerji değerlendirmesine ilişkin istatistiksel ve mikrometeorolojik teknikle incelenmektedir. Bu işlemler rüzgar türbinlerinin yer seçimi için doğru bilgiye sahip olmamızı sağlar ve rüzgar enerjisi uygulamaları konusunda rüzgar iklim tahmini yapılmasını sağlar. Bu modellerin amaçları, ham datanın analizi, rüzgar atlasının oluşturulması, rüzgar iklim değerlendirilmesi ve rüzgar güç potansiyelinin tahminidir. Rüzgar verisi serisinin analizi, ilk aşama olarak sahada alınmış olan ölçüm verileri analiz edilerek, sahanın klimatolojik rüzgar özeti yapılmaktadır. Bu analiz, WAsP'ta "Observed Wind Climate Wizard" ve WindPro'da "Meteo" hesabı ile yapılmaktadır. Ham verinin analizi; histogram içerisindeki ham datayı toplayarak rüzgar ölçümlerinin bir zaman serisi şeklinde analizine olanak verir. Aynı zamanda Weibull parametreleri de bu veriden hesaplanır. Rüzgar atlası datasının oluşturulması için rüzgar şiddet histogramları, rüzgar atlas dizisine dönüştürülebilir. Rüzgar iklim değerlendirilmesi yapılırken; modeller tarafından hesaplanan bir rüzgar atlası data dizisi veya başka bir kaynaktan sağlanan data dizisi kullanarak, herhangi bir lokal noktada rüzgar iklimi değerlendirilebilir. Rüzgar güç potansiyelinin tahmininde ise ortalama rüzgarın toplam enerji içeriği WAsP ve WindPro modellerinde hesaplanır. Ayrıca bir rüzgar türbinin yıllık ortalama güç üretiminin gerçek bir değerlendirmesi, söz konusu türbinin güç eğrisi ile modeller yardımıyla elde edilebilir [31].

Bu modeller, veri analizlerini yaparken rüzgar hız verilerinin iki parametrelili Weibull dağılımına uygun dağılım gösterdiğini varsayarlar. Ayrıca dört farklı girdiyi değerlendirerek lokal rüzgar atlası istatistiklerini hesaplarlar.

Bu temel dört girdi aşağıdaki gibidir:

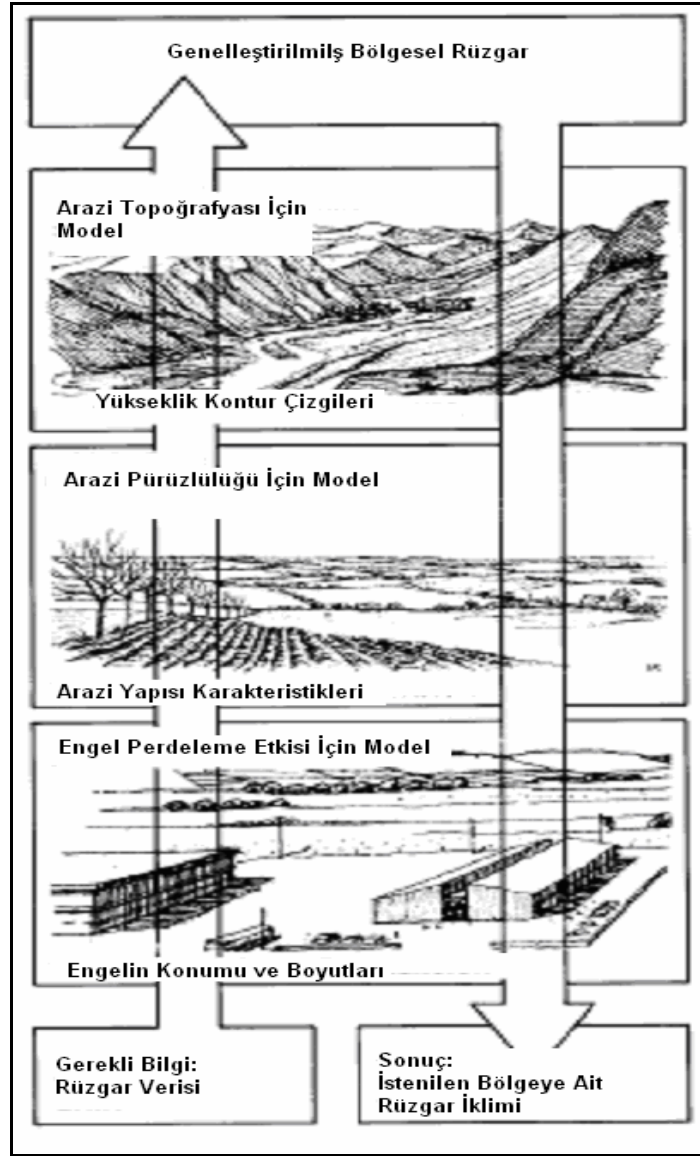
- ◆ Saatlik rüzgar verisi,
- ◆ Lokal pürüzlülük bilgileri,
- ◆ Perdeleme etkisi,

- ◆ Bölgenin topografyası.

Modeller, yukarıdaki girdileri değerlendirmek için üç tane alt model kullanır:

- ◆ Pürüzlülük değişim modeli,
- ◆ Engel perdeleme modeli,
- ◆ Topografik model.

Saatlik rüzgar verisi ile üç alt model kullanılarak oluşturulan lokal rüzgar atlasının hesabı Şekil 3.3'te özetlenmiş olarak görülmektedir.



Şekil 3.3: Rüzgar atlas modeli metodolojisi [37].

### 3.4.1 Pürüzlülük değişim etkisi

Pürüzlülük, rüzgar hızı profili üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu nedenle rüzgar enerjisi incelemelerinde alan pürüzlülüğü önemli bir parametredir. Bir bölgenin yüzey pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülük elemanlarının boyutları ve alan içindeki dağılımına bağlıdır. Kara yüzeyleri için pürüzlülük elemanları olarak bitki örtüsü, yapılaşma alanları ve toprak yüzeylerini örnek verebiliriz. Rüzgar atlas uygulamalarında, farklı alanlar üzerindeki pürüzlülük elemanları tarafından karakterize edilen dört farklı tipe ayrılır. Her bir arazi tipi pürüzlülük sınıfı olarak tanımlanır.

Pürüzlülük sınıfları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- 1) Pürüzlülük sınıfı 0 olan araziler ( $z_0=0.0002m$ ): Su alanları, deniz ve göller .
- 2) Pürüzlülük sınıfı 1 olan araziler ( $z_0=0.03m$ ): Açık, düz alanlar ve hafif eğimli arazi, ağaç ve çalılık gibi basit şekilleri de kapsar .
- 3) Pürüzlülük sınıfı 2 olan araziler ( $z_0=0.10m$ ): Birbirinden yaklaşık 1000 m`den fazla uzakta rüzgar kırıcılara ve dağınık binalardan oluşan arazi .
- 4) Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi ( $z_0=0.40m$ ): Ormanlık ve yerleşim alanları .

### 3.4.2 Engel perdeleme etkisi

Arazi üzerindeki bir engelden dolayı, rüzgar hızında ortaya çıkan azalmaya perdeleme denilmektedir. Engelin perdeleme etkisi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- a) Hesaplama noktasının engelden olan uzaklığı ( $x$ )
- b) Engelin yüksekliği ( $h$ )
- c) Hesaplama noktasının yüksekliği ( $H$ )
- d) Engelin uzunluğu ( $L$ )
- e) Engelin geğirgenliği ( $p$ )

Perdeleme etkisinden dolayı, geğirgenliği sıfır olan bir engelin rüzgar hızında ortaya çıkan azalma Şekil 3.4'te görülmektedir. Engelin geğirgenliğindeki artış ve engel uzunluğunun azalması perdeleme etkisini azaltır. Perdeleme etkisinde engel

geometrisinin de önemi vardır. Bunu, engellerin doruk noktalarında rüzgar şiddetindeki artıştan anlayabiliriz.

Genellikle, binalar için geçirgenlik “0”, ağaçlar için “0.5” alınmaktadır. İki bina arasındaki uzaklık, binaların birinin yüksekliğinin üçte birine eşitse, geçirgenlik “0.33” olarak alınabilir. Ayrıca, geçirgenlik ağaçların yoğunluklarına göre de değişebilmektedir. Rüzgar kırıcılarının engel türüne göre geçirgenlikleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

**Çizelge 3.1** Rüzgar kırıcılarının türüne göre geçirgenlik değerleri

Engel Türü	Geçirgenlik, $\rho$
Katı (duvar)	0
Çok yoğun	$\leq 0.35$
Yoğun	0.35 - 0.50
Açık	$\geq 0.50$

Perdeleme etkisi ile ortalama rüzgar şiddetindeki azalma ( $R_2$ ) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır [38].

$$R_2 = \begin{cases} \left(1 + 0.2 \frac{x}{L}\right)^{-1} \text{ for } \frac{L}{x} \geq 0.3 \\ 2 \frac{L}{x} \text{ for } \frac{L}{x} \leq 0.3 \end{cases} \quad (3.23)$$

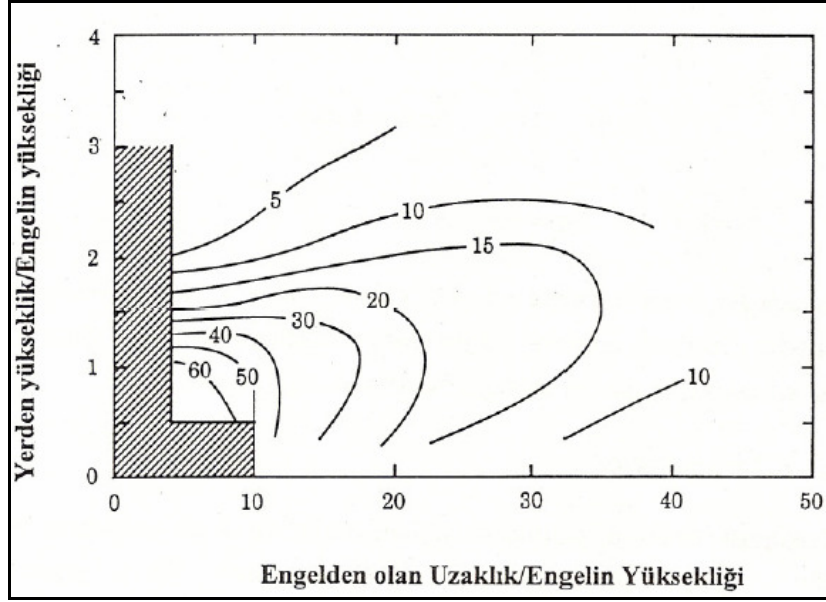
$$u_{cor} = u(1 - R_2 R_1 (1 - P)) \quad (3.24)$$

Bu bağıntıda;

$R_1$ :  $\left(R_1 = \frac{\Delta u}{u}\right)$  ile ifade edilip Şekil 3.4’ten elde edilen oransal rüzgar şiddetindeki

azalma,  $R_2$ : Ortalama rüzgar şiddetindeki azalma,  $u$ : Ortalama rüzgar şiddeti,

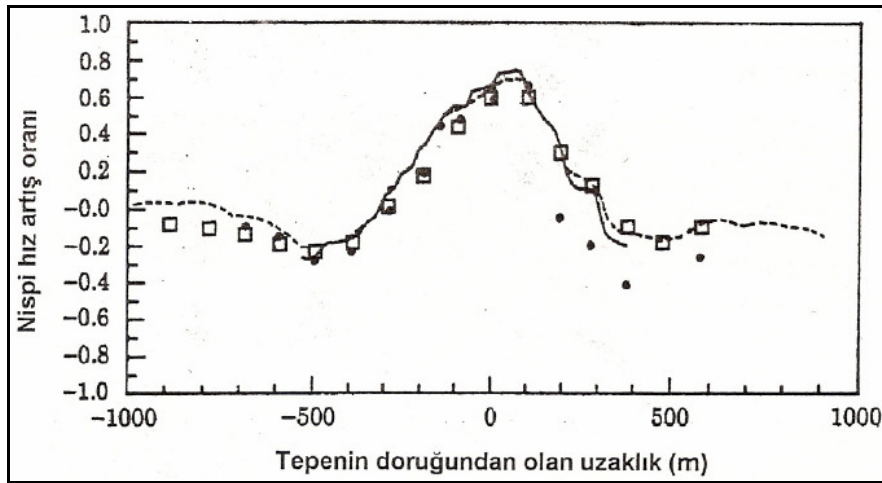
$u_{cor}$ : Düzeltilmiş ortalama rüzgar şiddeti olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Bir engelin perdeleme etkisi [39].

### 3.4.3 Topografik etki

Topografik modelin temel yapısını, rüzgar profili üzerinde arazideki yükseklik değişimlerinin etkisi oluşturmaktadır. Yamaçtaki yukarıya doğru akım profili yükseklikle logaritmiktir, buna karşılık tepenin zirvesinde profil, bağıl şiddetin maksimum olduğu  $l$  yüksekliğinde bir kavis oluşturur. Profil bu seviyenin üzerinde yükseklikle sabittir.  $2L$  yüksekliğinde ise her iki profilde yükseklikle şiddet değişimi eşit olur. Burada,  $L$  tepenin karakteristik yüksekliğidir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Tepenin zirvesinden olan uzaklığa göre nispi hız artış oranları [39].

$\Delta S$  ve  $l$ , aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

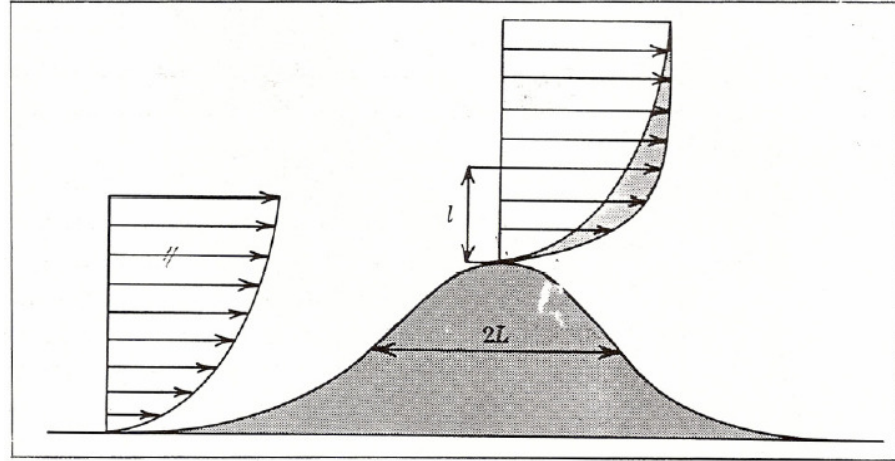
$$\Delta S \cong \frac{h}{L} \quad (3.25)$$

$$l \cong 0.3z_0 \left( \frac{L}{z_0} \right)^{0.67} \quad (3.26)$$

Deneyden alınan sonuçlara göre;

◆ Yamaçtan tepeye doğru esen bozulmamış ortalama rüzgar şiddeti ile karşılaştırıldığında zirvedeki şiddet artışı %80'dir.

◆ Tepenin rüzgar alan ve almayan yamaçlarındaki aşağı doğru rüzgar şiddeti yukarı doğru bozulmamış ortalama rüzgar şiddeti ile karşılaştırıldığında rüzgar şiddeti düşüşleri %20 ve %40'tır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Yamaçta ve tepenin zirvesinde akım profili [39].



#### **4. METEOROLOJİK ÖLÇÜM İSTASYONUNA AİT RÜZGAR VE ENERJİ POTANSİYELİNİN ANALİZİ**

Bir bölgenin rüzgar rejimi, geniş ölçekli atmosferik hareketlerin yanısıra o bölgenin yüzey karakteristiklerine bağlı olarak gelişen lokal akımların ortak etkisi ile belirlenir. Bir bölgenin rüzgar rejiminin iyi belirlenmesi, rüzgar enerjisinden alınacak verim açısından önem taşır. Bunun için incelenen alanı kapsayan uzun dönemli rüzgar analizlerinin ve mevsimsel, aylık, günlük değişimin istatistiksel olarak incelenmesi gerekir.

##### **4.1 Türkiye'nin Genel Rüzgar İklim Özellikleri**

Türkiye, genelde Akdeniz iklim rejimi olarak tanımlanan subtropical iklim rejiminde yer almaktadır. Coğrafi konumu açısından, Türkiye, kışın polar yazın tropikal orjinli hava kütlelerinin etkisi altında olur. Türkiye'nin içinde yer aldığı orta enlem bölgesi, sonbahar ve kış aylarında bu farklı iki hava paterninin karşılaşma sahasıdır. Buna bağlı olarak oluşan polar cephe orta enlemler ve üzerinde etkili olur. [40]

Geniş ölçekli atmosferik hareketler, yüzey karakteristiklerinin farklılığı nedeniyle lokal hava şartlarını oluşturur. Kara – deniz dağılımı, yüzeyin topoğrafik özellikleri (plato, ova, vadi, dağ vb.), yükseklik gibi termik ve dinamik özellikler taşıyan lokal şartlar, o bölge için lokal iklim yapısında değişime neden olur. [40]

*Yaz Mevsimi.* Deniz ve kara orjinli kutupsal hava kütlelerinin, orta enlem karasal alanın bu mevsimde kuvvetli ısınmasından dolayı kuzeye doğru yüksek enlemlere çekilmesi nedeniyle Türkiye'nin de içinde yer aldığı bu bölge tropikal orjinli hava kütlelerinin etkisinde bulunur. Azor yüksek basıncı avrupa üzerinde merkezlenir ve Marmara, Kuzey Ege ve Batı Karadeniz Bölgeleri'nde Karadeniz üzerinden gelen kuzey, kuzeydoğulu rüzgarları oluşturur. Karasal tropik hava kütesinin (Arabistan orjinli alçak basınç merkezi), Türkiye'nin güney ve güneydoğusundan itibaren etki



alanını genişletmesi ile de Marmara, Kuzey Ege ve Batı Akdeniz’de oluşan kuvvetli basınç gradyanı bu bölgeler üzerindeki kuzeydoğulu rüzgarların özellikle Ağustos ve Temmuz aylarında oldukça kuvvetlenmesine neden olur [40].

*Kış Mevsimi.* Akdeniz Ülkeleri’ni içine alan orta enlem bölgeleri, sonbahardan itibaren alçak basınç ve bununla ilişkili polar cephe sistemlerinin etkisi altında bulunurlar. Tropikal ve kutupsal orjinli hava paternlerinin karşılaştığı bir konverjans zonu özellikle Akdeniz üzerinde oluşur. Bu zonda oluşan geçici siklonlar ve bununla ilişkili cephesel sistemler, doğuya doğru hareket ederek farklı yörüngeler ile Türkiye üzerinde etkili olur. Bu sistemler, Türkiye üzerinde iki farklı yörünge izler. İlki, doğuya doğru hareketle ülkenin güney bölgelerini etkiler. İkincisi ise kuzeydoğuya doğru hareketle, kuzeybatı, kuzey ve iç bölgeleri etkilemektedir. Bu sistemin hareketine bağlı olarak, bu bölgelerde sonbahar ve kış boyunca kuvvetli hamleli kuzeydoğulu ve güneybatılı rüzgarlar etkili olmaktadır. [40]

Orta enlem siklonlarının ve bununla ilişkili cephe sistemlerinin Türkiye’yi etkileyen diğer bir yörüngesi ise Trakya – Marmara – Batı Karadeniz üzerinden güneydoğuya doğrudur. Bu yörüngedeki sistemler, Anadolu platosu üzerinde kuzeyli ve kuzeybatılı rüzgarları oluşturur. Türkiye’nin üç tarafı denizlerle çevrili olmasının yanı sıra kıyı boyunca uzanan dağlık yapı ve iç kesimlerinin yüksek plato yapısı bu sistemler nedeniyle oluşan rüzgar rejiminin diğer mikro-iklim parametrelerinden daha fazla lokal değişime uğramasına neden olmaktadır. Karadeniz kıyı kesimindeki dağların, denize paralel uzanması, kuzeyli akımların içeri doğru girmesini engellemektedir. Bu durum batıda daha farklıdır. Batı kıyısındaki dağlar, denize dik uzandıkları için, batılı akımlara etkin bir şekilde engel olamazlar. Türkiye’nin özellikle kıyı bölgelerindeki bu topoğrafik yapısı ve deniz ve kara sınırlarındaki termal etkileşim, yukarıda açıklanan sinoptik ölçekli sistemlerin oluşturduğu genel akışı kıyı bölgelerinde daha da kuvvetlendirmekte ve Marmara, Ege, Batı Karadeniz ve Akdeniz kıyılarında yüksek rüzgar enerjisi potansiyelinin oluşmasını sağlamaktadır [40].

#### **4.2 İstanbul’un Genel Rüzgar İklim Özellikleri**

İstanbul ve Boğaz bölgesi, kendisini çevreleyen denizlerin üzerinde hareket eden değişik tipte hava sistemlerinin etkisi altında kalarak, sıcaklık ve bu nedenle de

rüzgar şiddetinin büyük oranda değişim göstermesine neden olur. Birçok sinoptik hava sisteminin İstanbul, etkisi bulunmaktadır. Bunlardan bir kısmı, İzlanda alçak basınç sistemi ve göçebe Akdeniz siklonik sistemi ve bununla bağlantılı frontal sistemler ve Sibirya yüksek basınç sistemidir. Bunlar, İstanbul'u kış dönemlerinde etkilemektedirler. İzlanda alçak basınç sistemi, Azor yüksek basınç sisteminin olduğu ve geliştiği yere bağlı olarak kuzey veya kuzeybatı üzerinden etkili olmaktadır. Alçak basınç sistemleri ile ilişkili olarak gelişen frontal sistemler, bölge üzerindeki sıcaklık ve rüzgarın düşey profilini değiştirirler. İlkbaharın ikinci yarısından itibaren lokal faktörler geniş ölçekli bozunumlara göre daha baskın olmaya başlar. Yaz döneminde İstanbul başlıca iki hava kütesinin etkisi altındadır. Bunlardan birincisi Afrika ve Arabistan kaynaklı sıcak hava kütleleridir. Bu hava kütleleri Akdeniz'i geçerek taşıdıkları nemli ve sıcak havayı güneybatıdan İstanbul'a taşırlar. İkincisi ise Azor yüksek basınç sistemidir. Bu basınç sistemi ise Avrupa'nın güney batısında merkezlenerek kuzey ve kuzeydoğulu kuvvetli hava akışı ile İstanbul üzerinde etkili olur. Bu mevsimde ayrıca kuzeyden Karadeniz ve güneyden Marmara Deniz'i ile kuşatılan İstanbul üzerinde deniz ve kara meltemlerinin ve kara üzerindeki yüzey ısınmasının sonucuna bağlı olarak gelişen konvektif hareketlerin etkisi altındadır. Büyük ve lokal ölçekli bu bozunumların etkisi ile özellikle Temmuz ve Ağustos ayları süresince gün boyunca kuvvetli hamleli kuzeykuzeydoğulu (NNE) rüzgarlar görülmektedir [41].

#### **4.3 Ölçüm İstasyonu Bölgesinin Genel Özellikleri**

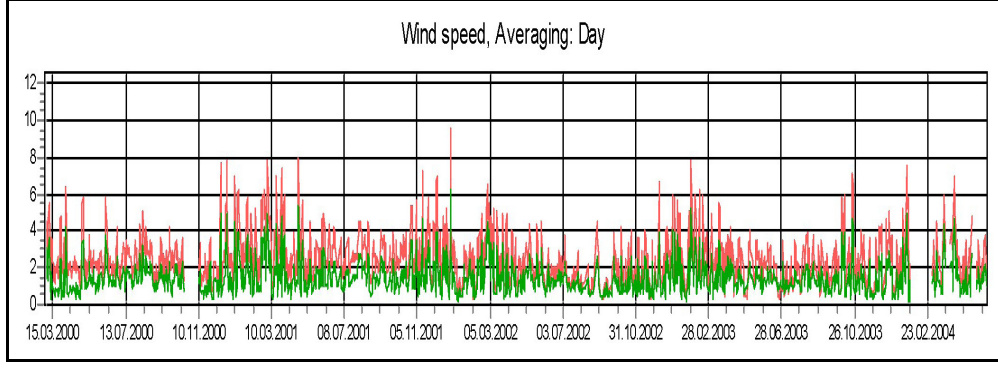
Üniversitenin kampüs alanı içinde yer alan Maslak Meteoroloji Ölçüm İstasyonu (  $29^{\circ} 01' 31,97''$  ;  $41^{\circ} 06' 30,89''$  ) koordinatlarında ve deniz seviyesinden 124 m yükseklikte olup farklı yönlerde bulunan fakülte ve endüstri binaları ile çevrelenmiştir. Arazi yoğun ağaçlık bir bölgede yer almaktadır. Maslak kampüsünün kuzey ve kuzeybatısında, 250 m ilerisinde ortalama yüksekliği 150 m olan sıralı büyük gökdelen şeklindeki yapılaşma ve hemen kuzeykuzeydoğusunda yer alan ve istasyondan daha yüksek konumda bulunan ağaçlık bir tepe bulunmaktadır. Doğusunda ise yaklaşık 2.8 km mesafede İstanbul Boğazı yer almaktadır. Rüzgar verisi 2 m ile 10 m'de kurulu bulunan ölçüm istasyonundan elde edilmiştir. Bu topoğrafik yapı ve yapılaşma nedeniyle bölgenin hakim rüzgarı olan kuzeykuzeydoğulu akımlar ayrışarak istasyon üzerinde zayıflamaktadır. İstasyon

civarında önemli bir eğim farkı olmamakla birlikte güneyde yer alan Kanlıkavak Deresi'nin bulunduğu bölgeye göre bir eğim bulunmaktadır [29].

Çalışmanın ana amaçlarından biri kampüs içinde yer alan İTÜ Enerji Enstitüsü'ndeki mevcut dersliklerin bir bölümünün aydınlatmasını sağlamak üzere belirlenen potansiyele uygun bir türbinin konuşlandırılmasıdır. Bunun içinde bölgede rüzgar akımının alansal dağılımı belirlenmiştir. Yapılan rüzgar akış alan modellemesinin sonuçlarından görüleceği üzere (Şekil 6.11 ve Şekil 6.12), türbinlerin kurulduğu alan kampüs içindeki potansiyelin en uygun olduğu alan değildir. Ancak bölge için elde edilen ortalama rüzgar şiddetine (2.4 m/s) uygun olarak seçilecek küçük güçteki bir rüzgar türbinin üreteceği güç, Enstitü dersliklerini aydınlatabilmesi için enerji kaybına uğramadan Enstitü'ye ulaşması gerekmektedir. Kablolar boyunca iletilecek enerjinin kaybı, kablo iletkenin direnci ve mesafe ile doğru orantılı olup, enerji kaybını azaltmak için yapılacak en iyi çözüm mesafeyi azaltmaktır. Enstitünün bulunduğu yükseklik ve konuşlandırma civarındaki eğimin az olması da dikkate alınarak seçilen türbin yerleri bu şartlar düşünülerek kararlaştırılmıştır. Türbin konuşlandırma yerleri, meteoroloji istasyonuna yaklaşık 120 m uzaklıkta ve 5 m'lik bir kot farkı ile ölçüm verisinin seçilen bölgeyi temsil edebileceği yakınlıkta yer almaktadır [29].

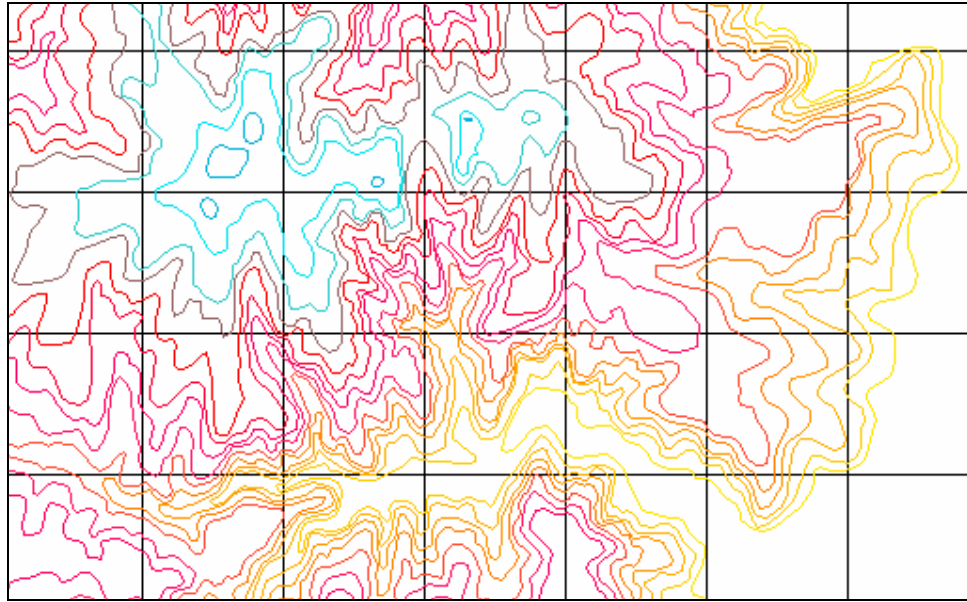
#### **4.4 Ölçüm Verisinin Analizi ve İzlenen Yöntem**

Bu çalışmada, Maslak İTÜ Kampüsü, Meteoroloji İstasyonu'nun ( $29^{\circ} 01' 31,97''$  ;  $41^{\circ} 06' 30,89''$ ), rüzgar ölçüm verileri 02.03.2000 ile 31.05.2004 periyodunu kapsamakta olup, 2 m ve 10 m yükseklikte olmak üzere iki farklı seviyede saatlik olarak elde edilmiştir. Ölçüm istasyonunda, NRG Rüzgar Ölçüm Sistemi (Anemometre) kullanılmaktadır. Verinin alınma aralığı boyunca zaman serisi olarak gösterimi Şekil 4.1'de görülmektedir.

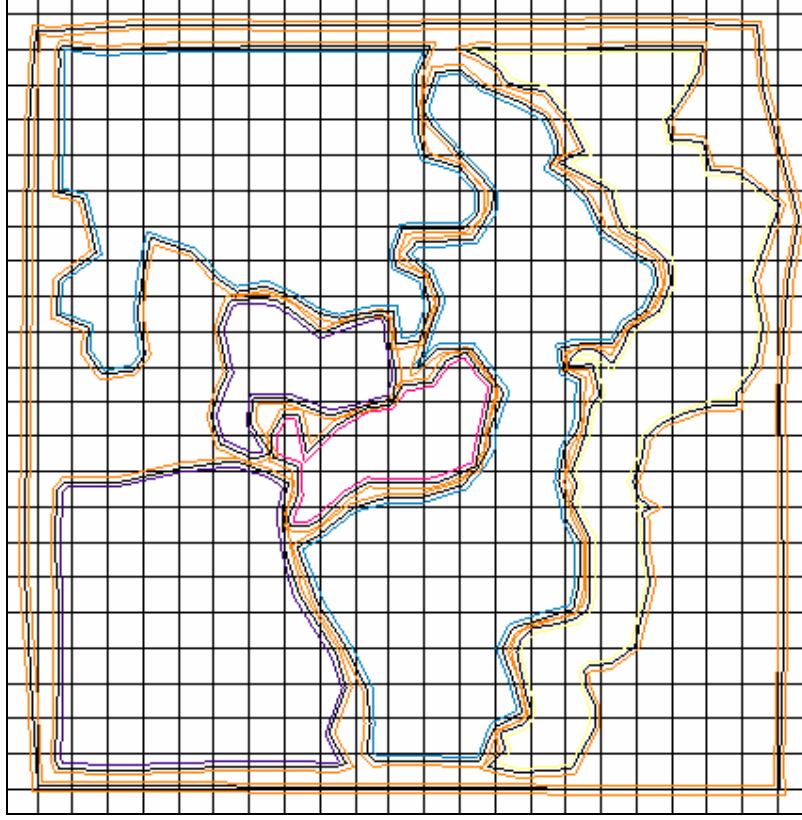


**Şekil 4.1:** İncelenen rüzgar verisi (10 m ve 2 m için).

Analiz için toplamda 35409 veri kullanılmıştır. Belirtilen aralıktaki verinin %95.1'i analize elverişli bulunmuştur. Bölgenin topoğrafik tanımı için 1/25000 ölçekli ve İstanbul-F22-d4 numaralı Harita Genel Komutanlığı'nın hazırlamış olduğu yükseklik haritası kullanılmıştır. (29° 0' 0" - 29° 07' 30") Doğu meridyenleri ve (41° 07' 30" - 41° 0' 0") Kuzey enlemlerini kapsayan harita, JPEG formatında kayıt edilmiş, WindPro'da sayısallaştırılarak, Wasp Map Editor 9.0'da da kullanılacak şekilde vektör haritası hazırlanmıştır (Şekil 4.2).



**Şekil 4.2:** Sayısallaştırılmış yükselti haritası



**Şekil 4.3:** Sayısallaştırılmış pürüzlülük haritası

Harita verileri (yükseklik, Şekil 4.2 ve pürüzlülük, Şekil 4.3) WindPro ve WaSP programlarında tanıtıldıktan sonra, rüzgar şiddet ve yön bilgileri WindPro ve Observed Wind Climate (WaSP) alt programlarında işlenmiş ve sayısallaştırılmış harita üzerinde 6.84 km<sup>2</sup>'lik kaynak ızgara tanımlanmıştır. Girilen bu bilgiler ile birlikte, 18 m hub (göbek) yüksekliğine göre, rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerlerinin alansal modellemesi WindPro ve WaSP programlarında 10 m'lik çözünürlükte elde edilmiştir. Program rüzgar şiddetinin Weibull dağılım fonksiyonuna uygun dağılım gösterdiği prensibine dayanarak çalışmaktadır. Rüzgar verisinin istatistik hesabında Weibull dağılımı ve ilgili parametreleri hesaplanmıştır.

İlk aşama olarak 10 m'deki 02.03.2000 ile 31.05.2004 dönemlerine ait saatlik rüzgar şiddeti ve yön verisi kullanılarak aylık ortalama, maximum ve minimum rüzgar şiddetleri, güç yoğunluğu değerleri, mevsimsel rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerleri ile gece ve gündüz periyotlarındaki rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, 2 m'deki rüzgar şiddeti verisi Güç Kanunu kullanılarak 10 m'ye ekstrapole edilerek 10 m'deki rüzgar değeri hesaplanmıştır. Bu işlem esnasında  $\alpha$  pürüzlülük katsayısı hız ve yüksekliğin fonksiyonu olarak **(3.15)**

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Elde edilen değerler, 10 m'deki ölçüm verisi ile karşılaştırılmıştır.

İkinci aşamada ise her iki akım modeli kullanılarak, incelenen bölgenin rüzgar ve ortalama güç yoğunluğu haritası çıkarılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır



## 5. İSTATİSTİK MODELLEME VE ÖNGÖRÜ PROBLEMİ

Belirgin ve olası sistem çıkışlarının gözlemlerinden, bir sistemin gelecekteki çıkışlarını önceden kestirebilmeye prediksyon denir. Nedensellik ilkesine aykırı düştüğünden prediksyonu tam olarak gerçeklemek imkansızdır. Ancak belirli bir “nedensellik kaybı” göze alınırsa yaklaşık bir “ideal prediktör”ü gerçekleştirme olanağı vardır [42].

Radar sistemlerinin gelişmesi ile birlikte İkinci Dünya Savaşı başlangıcında ortaya çıkan ünlü “prediksyon sorunu” savaş sırasında birbirlerinden habersiz olarak Rusya’da A. N. Kolmogoroff [43] ve Amerika’da N. Wiener [43, 44] tarafından çözülmüştür.

Genel olarak N. Wiener geçmişe ilişkin informasyonda, geleceğe ilişkin informasyonun ne derece var olduğunu araştırmıştır. Wiener’in kurmuş olduğu teori, prediksyon sorunu yanında, haberleşme sistemlerinde işaretin gürültüden süzülmesi gibi çok önemli başka bir soruna da uygulanabilir. Bugün Wiener’in ilk çalışmaları geliştirilmiş, bu çalışmaları özel hal olarak içine alan geniş teoriler kurulmuştur [45 - 49].

N. Wiener 1942’de Ulusal Savunma Komisyonu’na sunduğu raporda [42] haberleşme tekniği için çok önemli olan düzleştirme (smoothing) ve prediksyon teorisinin matematiksel temellerini vermiştir. Savaş yıllarının sınırlı haberleşme olanakları ve sonraları teorisinin çok geniş bir matematik önbilgiyi gerektirmesi nedeni ile Wiener ve Kolmogoroff’un teorileri uzun bir süre değerlendirilememiştir. Mühendislerce, renginden dolayı, “sarı bela” (The yellow peril) adı verilen rapor ancak gizli askeri projelere uygulanmıştır [50].

Prediksyon teorisinde ilk teorik geliştirmeler, sınırlı bellek kavramı ile birlikte Zadeh ve Ragazzini’nin 1950 yılında yayınladığı makale ile başlamıştır [51]. Bundan bağımsız olarak Bode ve Shannon bu teoriyi basitçe yorumlayarak, bu teorisinin temellerinin anlaşılması ve uygulanması yönünden çok yararlı olmuşlardır [52].



Klasik Wiener teorisinin tamamı ile geliştirildiği ve uygulamalar için gerekli matematiksel metotlar olgunlaştırıldığı bir sırada, 1961 yılında Kalman ve Bucy [46 - 48] sistem modelini, giriş ve çıkış büyüklükleri yerine, durum denklemleriyle belirleyerek, klasik teorinin eriştiği sonuçlara kısa ve güzel çözümlerle varmış, bunun ötesinde dualite ilkesini vererek optimum kontrol ve prediksyon sorunlarını bir çatı altında birleştirmeyi başarmıştır [48].

## 5.1 İdeal Prediktörün Özellikleri

### 5.1.1 İdeal prediktörün tanımı

$x(t)$  girişine karşılık  $y(t)$  cevabını veren bir sistem olsun. Sistemin girişiyile çıkışı arasında

$$y(t) = T\{x(t)\} \quad (5.1)$$

şeklinde bir bağıntı verebiliyorsak, sistemi tamamen belirlemiş oluruz.

İdeal prediktörde girişe  $x(t)$  büyüklüğü uygulandığında  $y(t)$  çıkışının, girişin  $\tau$  zamanı kadar sonraki  $x(t + \tau)$  değerini alması söz konusudur. Buna göre ideal prediktöre ilişkin dönüşüm kuralı

$$y(t) = x(t + \tau) \quad (5.2)$$

biçimindedir [42].

### 5.1.2 Lineerlik

Sistemleri belirtmede hesap kolaylığı sağlayan en önemli özellik lineerliktir. Bir sistem  $x_1(t)$  girişine karşılık  $y_1(t)$  çıkışını ve  $x_2(t)$  girişine karşılık  $y_2(t)$  çıkışını veriyorsa, bu sistemin lineer olabilmesi için,  $a_1$  ve  $a_2$  herhangi iki reel sabit olmak üzere:

$$y(t) = T\{a_1x_1(t) + a_2x_2(t)\} = a_1T\{x_1(t)\} + a_2T\{x_2(t)\} = a_1y_1(t) + a_2y_2(t) \quad (5.3)$$

denkleminin sağlanması gerekir ve yeter. Bu durumda  $T$  dönüşüm kuralına  $L$  lineer dönüşüm kuralı denir [42].

İdeal prediktörde  $y(t) = T\{x(t)\} = x(t + \tau)$  olduğundan, lineerlik koşulu:

$$\begin{aligned} y(t) &= T\{a_1x_1(t) + a_2x_2(t)\} = a_1x_1(t + \tau) + a_2x_2(t + \tau) \\ &= a_1T\{x_1(t)\} + a_2T\{x_2(t)\} = x(t + \tau) = L\{x(t)\} \end{aligned} \quad (5.4)$$

denkleminde görüldüğü gibi sağlanmaktadır.

### 5.1.3 Zamanla değişmezlik

Dönüşüm kuralında, zamana bağlı bir katsayı bulunmayan sisteme zamanla değişmeyen sistem denir [52 - 55]. Buna göre zamanla değişmeyen bir sistemin  $x(t)$  girişine cevabı  $y(t)$  ise,  $x(t - \lambda)$  girişine cevabı  $y(t - \lambda)$  olmalıdır [42].

$$y(t - \lambda) = T\{x(t - \lambda)\} \quad (5.5)$$

İdeal prediktör:

$$L\{x(t - \lambda)\} = x(t - \lambda + \tau) = y(t - \lambda) \quad (5.6)$$

eşitliğinden görüldüğü gibi zamanla değişmeyen bir sistemdir.

**Teorem 1.** Dönüşüm kuralı  $y(t) = x(t + \tau)$  olan ideal prediktör lineer ve zamanla değişmeyen bir sistemdir.

### 5.1.4 Kararlılık

Lineer ve zamanla değişmeyen bir sistemde,  $A$  ve  $k$  iki reel sayı olmak üzere, eğer  $|x(t)| < A$  biçiminde sınırlı bir giriş işaretine karşılık  $y(t)$  çıkış işareti  $|y(t)| < kA$  biçiminde sınırlı ise, bu sistem kararlıdır denir [42].

Bu tanımları prediktörün dönüşüm kuralına uygularsak:

$$|x(t + \tau)| \text{ ve } |x(t)| < A \quad (5.7)$$

olacağından, çıkış işaretinin mutlak değeri:

$$|y(t)| < A \quad (5.8)$$

biçiminde sınırlıdır.

**Teorem 2.** ideal prediktör kararlı bir sistemdir.

### 5.1.5 Nedensellik

Uygulanan herhangi bir giriş işaretine bir sistemin yanıtı, giriş işaretinin gelecekte alabileceği değerlere bağlı değilse, bu sisteme *nedensel* ya da *fiziksel* bir sistem denir

[42]. Buna göre lineer ve zamanla değişmeyen bir sistemin nedensel olabilmesi için gerek ve yeter koşul, herhangi bir  $t_0$  zamanı ve  $x_1(t)$  ve  $x_2(t)$  giriş işaretleri için, eğer  $t \leq t_0$  zamanında  $x_1(t) = x_2(t)$  ise, bunlara ilişkin yanıtlar  $t \leq t_0$  zaman aralığında eşit olmalıdır:

$$y_1(t) = L\{x_1(t)\} = L\{x_2(t)\} = y_2(t), \quad t \leq t_0 \quad (5.9)$$

Prediktör girişine,  $a$  reel bir sabit olmak üzere, zamana göre:

$$x_1(t) = \frac{e^{-t^2/a}}{\sqrt{a\pi}} \quad (5.10)$$

biçiminde değişen bir  $x_1(t)$  işaretinin uygulandığını düşünelim. Prediktör çıkışında:

$$y_1(t) = x_1(t + \tau) = \frac{e^{-(t+\tau)^2/a}}{\sqrt{a\pi}} \quad (5.11)$$

işareti elde edilecektir.

Eğer prediktöre giriş işareti olarak ( $u(t)$  birim basamak fonksiyonunu göstermek üzere):

$$x_2(t) = \frac{e^{-t^2/a}}{\sqrt{a\pi}} u(t_0 - t) \quad (5.12)$$

uygulanırsa çıkış işareti:

$$y_2(t) = x_2(t + \tau) = \frac{e^{-(t+\tau)^2/a}}{\sqrt{a\pi}} u(t_0 - \tau - t) \quad (5.13)$$

elde edilir. Bu çıkış işareti  $t \leq t_0$  için,  $t - \tau < t \leq t_0$  aralığında 0 olmaktadır. Buna göre  $t \leq t_0$  zaman bölgesinde:

$$y_1(t) \neq y_2(t) \quad (5.14)$$

olduğundan prediktörün nedensel olmadığı görülür.

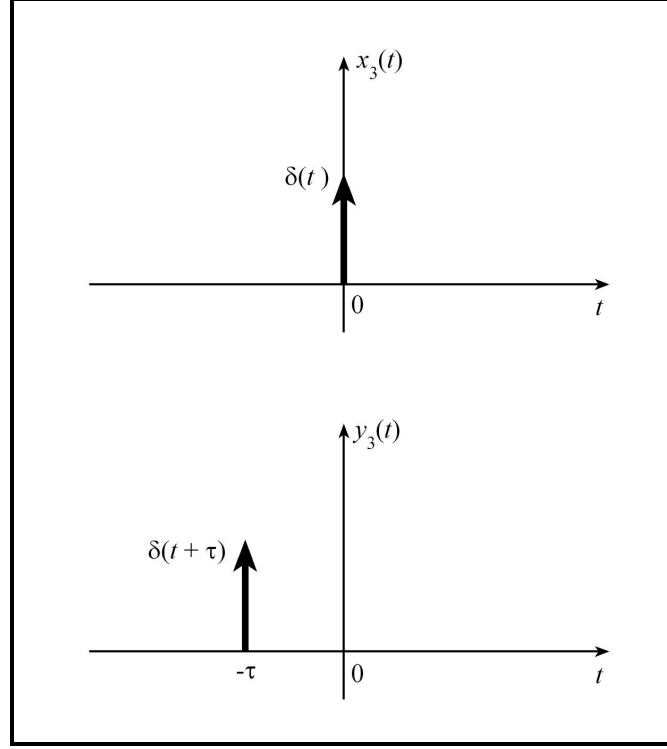
Özel bir durumu saptamak üzere prediktör girişine  $x_1(t)$  işaretinin  $a \rightarrow 0$  için elde edilen limitini veren

$$x_3(t) = \lim_{a \rightarrow 0} x_1(t) = \delta(t) \quad (5.15)$$

biçiminde bir işaret uygulanırsa, buna ideal prediktörün karşılığı:

$$y_3(t) = \lim_{a \rightarrow 0} y_1(t) = \delta(t + \tau) \quad (5.16)$$

biçiminde olur (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: İdeal prediktörün  $\delta(t)$  işaretine cevabı [41].

Doğal olarak,  $t = 0$  anında sisteme uygulanacak olan bir distribüsyonu  $\tau$  zaman önce haber verebilecek fiziksel bir sistemin yapılması mümkün değildir.

Genel olarak bir sistem cevabının  $t_1$  anına ilişkin değeri, ancak giriş işareti bütün  $t$  zamanları için verilmişse belirlenebilir. Eğer sistem nedensel ise,  $t = t_0$  zamanına ilişkin  $y(t)$  çıkışı,  $x(t)$  girişinin sadece  $-\infty < t < t_1$  aralığındaki değerlerinin bilinmesiyle belirlenir. Nedensellik ilkesinin sağlanması bir sistemi fiziksel olarak gerçekleminin gerek koşuludur. İdeal prediktöre ilişkin dönüşüm kuralı nedensellik ilkesine aykırı olduğundan fiziksel olarak gerçekleştirilemez [42].

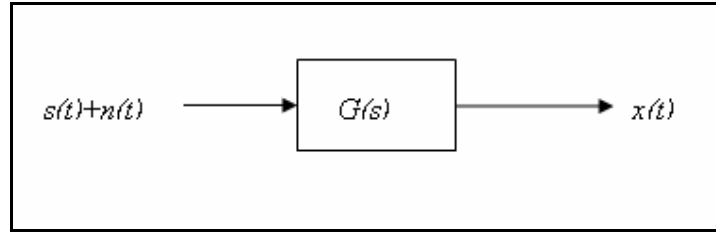
## 5.2 Wiener ve Kalman Filtrelerinin Temelleri

Filtrelemenin amacı bir büyüklüğü diğerinden ayırmaktır. Elektriksel bir filtrenin belirlenen bir frekans bandını geçirip bandın dışında kalan frekansları geçirmemesi

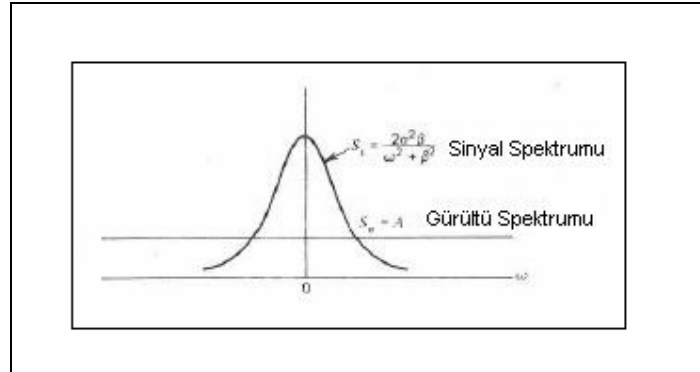
bu konuda iyi bir örnektir. Filtreleme teorisinin başlangıcı, istenilen frekans cevabına sahip elektronik devrenin dizaynı problemine dayanmaktadır [55].

### 5.2.1 Wiener filtresi

Dünya Savaşı sırasında Norbert Wiener başka bir filtreleme problemi üzerinde durmuştur: “Gürültüyle karışmış, gürültü karakterli bir işaretin gürültüden ayrılması”. Dolayısıyla temeldeki soru “Gürültülü bir işareti giriş olarak alıp işareti gürültüden en iyi şekilde ayıracak lineer işlem nedir?” sorusuydu. Burada “en iyi” ile ifade edilmek istenen ortalama karesel hatanın minimum olması durumudur. Filtrelemenin bu dalı ilk defa Wiener’in çalışmalarıyla başlamıştır [44, 45, 48]. R. E. Kalman aynı probleme durum-denklemleri yaklaşımıyla yeni bir çözüm getirerek önemli bir katkıda bulunmuştur [46, 48].



Şekil 5.2: Filtre optimizasyon problemi [56].



Şekil 5.3: İşaret ve gürültünün spektral yoğunlukları [56].

Wiener filtre teorisinin (Şekil 5.2) temelleri olarak da bilinen karakteristikler :

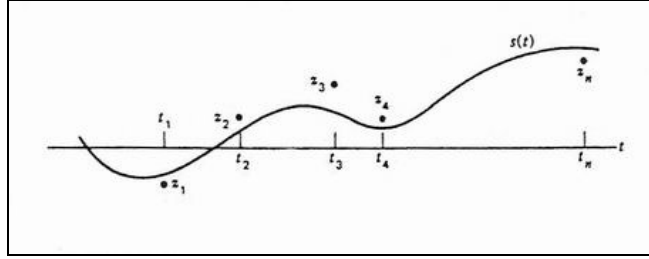
- İşlenen rasgele işaret ve gürültünün spektral karakteristikleri (örneğin Şekil 5.3) ve yine aynı şekilde öz ve çapraz-ilişki fonksiyonlarının bilindiği farz edilir.
- En iyi başarımla için minimum ortalama karesel hata ele alınır.

- Çözüm, optimal filtre ağırlıklandırma fonksiyonuna öncülük eden skaler metodları baz almaktadır.

### 5.2.2 Ayrık Wiener filtresi

Wiener'in en küçük kareler filtrelemesine olan yaklaşımı temelde ağırlıklandırma fonksiyonu yaklaşımı olarak bilinmektedir. Bu açıdan bakıldığında, problem temelde "İlgili verinin şu andaki tahmininin en iyi şekilde yapılabilmesi için giriş verileri nasıl ağırlıklandırılmalıdır?" sorusuna indirgenebilir [56].

Filtre girişini Şekil 5.4'de belirtilen sıralı ayrık gürültülü ölçümleri,  $z_1, z_2, \dots, z_n$  ve ilgili çıkış işaretleri  $x_1, x_2, \dots, x_n$  olarak değerlendirelim. Giriş işaretleri, Şekil 5.4'de de görüldüğü gibi işaret ve gürültünün birleşimidir [56].



**Şekil 5.4:** Ayrık ölçüm durumunda işaret ve gürültünün birleşimi [56].

$$z_1 = s_1 + n_1, \quad z_2 = s_2 + n_2, \quad \dots, \quad z_n = s_n + n_n \quad (5.17)$$

$$x_n = k_1 z_1 + k_2 z_2 + \dots + k_n z_n \quad (5.18)$$

$x_n, t_n$  anındaki çıkış işaretidir.

Filtre hatası,

$$e_n = s_n - x_n$$

$$e_n = s_n - (k_1 z_1 + k_2 z_2 + \dots + k_n z_n) \quad (5.19)$$

şeklinde ifade edilir.

Buradan, ortalama-karesel-hata,

$$\begin{aligned}
E(e_n^2) &= E[s_n - (k_1 z_1 + k_2 z_2 + \dots + k_n z_n)]^2 \\
&= E(s_n^2) + [k_1^2 E(z_1^2) + k_2^2 E(z_2^2) + \dots + k_n^2 E(z_n^2) \\
&\quad + 2k_1 k_2 E(z_1 z_2) + 2k_1 k_3 E(z_1 z_3) + \dots] \\
&\quad - [2k_1 E(z_1 s_n) + 2k_2 E(z_2 s_n) + \dots + 2k_n E(z_n s_n)]
\end{aligned} \tag{5.20}$$

bulunur.

$E(e_n^2)$ 'yi minimize etmek için  $k_1, k_2, \dots, k_n$  değerlerini bilmemiz gerekmektedir. İşaret ve gürültünün öz ve çapraz-ilişki fonksiyonlarının bilindiği kabul edilirse (5.20)'de belirtilen denklem,  $k_1, k_2, \dots, k_n$  ağırlıkları için çözülebilir.

$$\begin{bmatrix} E(z_1^2) & E(z_1 z_2) & \dots \\ E(z_2 z_1) & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ E(z_n z_1) & \dots & E(z_n^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \dots \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(z_1 s_n) \\ E(z_2 s_n) \\ \dots \\ E(z_n s_n) \end{bmatrix} \tag{5.21}$$

$n$  değeri, zaman içinde ölçüm değerleri arttıkça artış gösterecektir ve bu nedenle, (5.21)'de belirtilen denklemin çözümü büyük yer kaplayacaktır [56, 57].

### 5.2.3 Kalman filtresi

Ne yazık ki Wiener Filtresi, daha komplike zaman değişkenli, çoklu giriş ve çıkış işaretlerini kapsayan problemlere çözüm getirmemektedir. Kalman, 1960 yılında durum denklemleri metodunu kullanarak, ortalama karesel hatayı minimum yaparak, alternatif bir formülasyon bulmuştur. Özellikle navigasyon alanında çalışan mühendisler, Wiener metodu ile çözüm bulunamamış birçok problemin pratik çözümünü bu yaklaşımda bulmuşlardır [56].

R. E. Kalman'ın, ayrık işaretlerin lineer filtrelenmesi ve öngörü problemi üzerine ünlü makalesinde [46] açıkladığı özyineli (recursive) algoritma (Kalman Filtresi: KF) genelde sadece Kalman'ın adıyla anılmakla birlikte Kalman ve Bucy tarafından geliştirilmiştir [48]. KF'nin iki ana özelliği rastgele prosesin vektörel modellenmesi ve gürültülü ölçümün özyineli işlenmesidir [47]. Bu bölümde sadece, bu çalışmada kullanılmış olan ayrık zaman Kalman Filtrelemesi incelenecektir.

Durum (state) ve cevap (output) denklemleriyle ifade edilmiş bir ayrık zaman sistemi

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Delta u_k \quad (5.22)$$

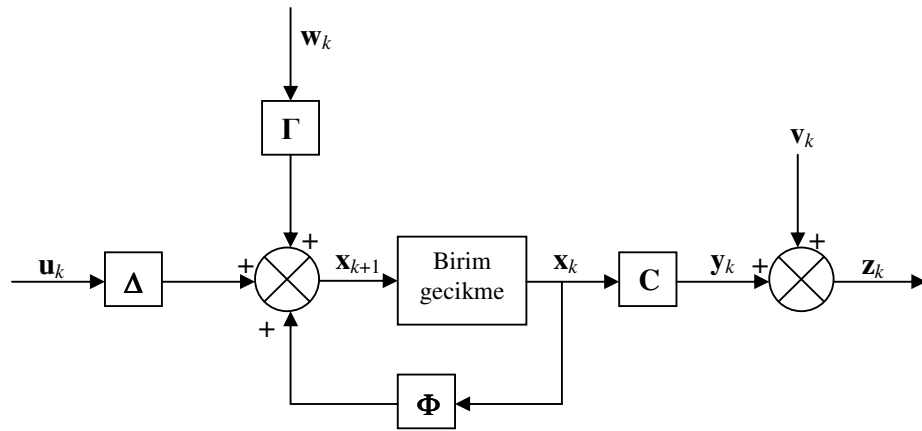
$$y_{k+1} = C x_{k+1} \quad (5.23)$$

şeklinde tanımlansın. Ayrıca sisteme, sistemden ve modellemeden kaynaklanan hatalar için bir  $w(t)$  rastgele gürültü işareti vektörü ile ölçme hataları ve ayrıklaştırmadan kaynaklanan hatalar için de bir  $v(t)$  rastgele gürültü işareti vektörü eklensin.  $w(t)$  vektörünün sistemle ilgili bütün gürültü kaynaklarını içermesinden dolayı bunu sisteme ekleyebilmek için bir  $\Gamma$  katsayılar matrisi kullanmak gerekir.  $v(t)$  ise her çıkış için bir gürültü faktörü içersin. Bu ayrık zaman sistemi şöyle ifade edilir:

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Delta u_k + \Gamma w_k \quad (5.24)$$

$$z_{k+1} = C x_{k+1} + v_{k+1} \quad (5.25)$$

(5.24) ve (5.25) denklemleri ile modellenen bir sistemin şeması Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5: Ayrık zaman sisteminin modellenmesi [56].



Bir ayrık zaman sisteminde belli bir  $k+1$  adımda elde sadece  $\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_k, \mathbf{u}_{k+1}$  ve  $\mathbf{z}_0, \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_k, \mathbf{z}_{k+1}$  değerleri olduğunu yani sistemin sadece girişinin ve çıkışta ölçülen değerlerin bilindiği varsayalım. Amaç bu bilgiden yola çıkarak  $\mathbf{x}_{k+1}$  (öngörülen değer ' $\hat{\mathbf{x}}$ ' şeklinde gösterilecektir) değerini öngörmektir.

$\hat{\mathbf{x}}_{ij} = E[\mathbf{x}_{ij}]$ ,  $j$ . adıma kadar verilen değerler kullanılarak,  $i$ . adımda  $\mathbf{x}$  için öngörülen değeri gösterebilir. Bu durumda amaç  $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$  değerini bulmaktır.

$\hat{\mathbf{x}}_{0|0}$  başlangıç değerini belirledikten sonra her bir  $k+1$  adımı için  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  değeri belirlenebilir. Sisteme eklenen rastgele gürültü vektörlerinin ortalama değerleri  $E[\mathbf{w}_k] = E[\mathbf{v}_k] = 0$  seçilecektir.

(5.24)'den  $\mathbf{x}$ 'in öngörülen değeri:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k \quad (5.26)$$

ve bir sonraki adımda öngörülen ölçüm değeri de:

$$\hat{\mathbf{z}}_{k+1} = C \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = C(\Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k) \quad (5.27)$$

olarak bulunur.  $k+1$ . zaman adımında  $\mathbf{z}_{k+1}$  değeri ölçülebilir. Buradan öngörü hatası:

$$\tilde{\mathbf{z}}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1} - \hat{\mathbf{z}}_{k+1} \quad (5.28)$$

bulunur. Bu öngörü hatasını sıfıra götürmek için uygulanabilecek yollardan biri, durum vektörünün elemanlarına, öngörü hatasını çeşitli oranlarda eklemektir. Bunu ifade etmek için (5.25)'ten

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k + \mathbf{K} \tilde{\mathbf{z}}_{k+1} \quad (5.29)$$

eşitliği yazılabilir.  $\mathbf{K}$  matrisi hatanın, durum denklemleri katsayıları içinde dağılımını belirler. 'Filtre Kazanç Matrisi', 'Kalman Kazanç Matrisi' veya kısaca 'Kalman Kazancı' olarak adlandırılır. (5.27) ve (5.28), (5.29)'da yerine konursa:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k + \mathbf{K} [\mathbf{z}_{k+1} - C(\Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k)] \quad (5.30)$$

düzenlenirse:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}C] [\Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k] + \mathbf{K} \mathbf{z}_{k+1} \quad (5.31)$$

elde edilir. (5.31)'den görüldüğü gibi  $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$  sadece, ölçülen çıkış ( $\mathbf{z}_{k+1}$ ), önceki adımda öngörülen değer ( $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ ) ve önceki adımdaki girişe ( $\mathbf{u}_k$ ) bağlıdır.

$\mathbf{K}$  matrisinin seçimi filtrenin performansını belirler.

Öngörü hatası:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} \quad (5.32)$$

şeklinde ve hatanın kovaryans matrisi de

$$\mathbf{P}_k = E[\tilde{\mathbf{x}}_k \tilde{\mathbf{x}}_k^T] \quad (5.33)$$

olarak tanımlansın. KF'si, kovaryans matrisi  $\mathbf{P}_k$ 'yi minimize etmek için uygun Kalman Kazanç Matrisi  $\mathbf{K}$ 'yi belirler.

$\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ :  $k$ . adımda öngörülen en küçük varyansa sahip  $\mathbf{x}$  değeri,  $\tilde{\mathbf{x}}_k = (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k})$ : Öngörü hatası,  $\mathbf{P}_k = \text{cov}(\tilde{\mathbf{x}}_k)$ : Hatanın kovaryans matrisi (minimize edilen değer),  $\mathbf{Q} = \text{cov}(\mathbf{w}_k)$ : Sistem gürültüsünün kovaryansı,  $\mathbf{R} = \text{cov}(\mathbf{v}_k)$ : Ölçme gürültüsünün kovaryansı olmak üzere  $k+1$ . adım için KF algoritması:

$$\mathbf{P}_k^* = \Phi \mathbf{P}_k \Phi^T + \Gamma \mathbf{Q} \Gamma^T \quad (5.34)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_k^* \mathbf{C}^T [\mathbf{C} \mathbf{P}_k^* \mathbf{C}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (5.35)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{C}] [\Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k] + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{z}_{k+1} \quad (5.36)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{C}] \mathbf{P}_k^* \quad (5.37)$$

şeklinde ifade edilir [58].

KF'nin kullandığı tek bilgi -önceden belirlenmesi gereken- sistem ve ölçme gürültüsü bilgilerini taşıyan  $\mathbf{Q}$  ve  $\mathbf{R}$  matrisleridir. Bu matrisler (ve  $\Gamma$  matrisi) Kalman Kazanç Matrisi  $\mathbf{K}$ 'nin dolayısıyla öngörü hatası kovaryans matrisi  $\mathbf{P}_k$ 'nin alacağı değerleri belirler.

KF'nin performansı  $\mathbf{Q}$  ve  $\mathbf{R}$  matrislerinin belirlenmesindeki doğruluğa sıkı bağlıdır.

Ölçme gürültüsünü modellemek için kullanılan kovaryans matrisi  $\mathbf{R}$ , sistemin işaretlerinden belirlenebilir.

Sistem gürültüsünü modellemek için kullanılan kovaryans matrisi  $\mathbf{Q}$ 'nun belirlenmesi zordur. Pratikte gürültü vektörü  $\mathbf{w}$ , sadece beyaz gürültüden oluşturulabilir. Farklı kaynaklardan gelen gürültülerin ilintisiz (uncorrelated) olduğu kabul edilirse, kovaryans matrisi  $\mathbf{Q}$  diagonal bir matris olur.

KF'nin genel karakteristiği  $\mathbf{Q}$  ve  $\mathbf{R}$  matrisleriyle belirlenir.  $\mathbf{Q}$  kovaryans matrisinin elemanları küçültüldükçe veya  $\mathbf{R}$  kovaryans matrisinin elemanları büyütüldükçe öngörü, tersi durumda ölçme ağırlık kazanır.

Kalman Kazanç Matrisi  $\mathbf{K}$  sıfır matrisine doğru gideceğinden  $\mathbf{Q}$  kovaryans matrisinin diyagonal elemanlarının tamamı sıfır olamaz.

Kalman filtresinin nasıl çalıştığını daha iyi açıklamak için geceleyin denizde kaybolmuş bir tekne gözönüne alınabilir. Başlangıçta teknenin konumu hakkında hiç bir bilgi olmasın. Konumu tayin etmek için bir yıldız seçilsin (problemi basitleştirmek için tek boyutlu bir uzay göz önüne alınsın). Bir  $t_1$  anında konum  $\mathbf{z}_1$  olarak belirlensin. Ölçüm cihazının hatalarından ve insan hatasından dolayı belirlenen konum bir belirsizlik taşıyacaktır. Konumu belirlemede yapılan hatanın varyansı  $\sigma_{z_1}^2$  olsun. Daha sonra  $t_2 \cong t_1$  anında daha iyi navigasyon bilgisine sahip bir diğer kişi konumu tekrar belirlesin ( $t_2 \cong t_1$  olduğu için henüz konum değişmemiş kabul edilebilir). İkinci belirlenen,  $\mathbf{z}_2$  konumundaki hatanın varyansı da  $\sigma_{z_2}^2$  olsun. İkinci kişi daha iyi bir navigasyon bilgisine sahip olduğundan  $\mathbf{z}_2$  konumunun belirlenmesinde yapılan hata daha küçük olacaktır ( $\sigma_{z_2}^2 < \sigma_{z_1}^2$ ).

Şimdi konumu belirlemek için kullanılacak iki ölçüm değeri var. Kalman filtresi, “konumu en iyi şekilde belirlemek için bu iki veriden nasıl yararlanılabilir?” sorusuna verilmiş bir cevaptır.  $t_2 \cong t_1$  anında verilen  $\mathbf{z}_1$  ve  $\mathbf{z}_2$  konumlarından ortalama değeri  $\boldsymbol{\mu}$  ve varyansı  $\sigma^2$  olan en doğru konum öngörüsü:

$$\boldsymbol{\mu} = \left[ \frac{\sigma_{z_2}^2}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} \right] \mathbf{z}_1 + \left[ \frac{\sigma_{z_1}^2}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} \right] \mathbf{z}_2 \quad (5.38)$$

$$1/\sigma^2 = (1/\sigma_{z_1}^2) + (1/\sigma_{z_2}^2) \quad (5.39)$$

şeklinde yapılabilir. (5.39)'dan görüldüğü gibi öngörülen konumun standart sapması  $\sigma$ , birinci belirlenen konumun standart sapmasından da ( $\sigma_{z_1}$ ) ikinci belirlenen konumun standart sapmasından da ( $\sigma_{z_2}$ ) küçüktür. Dolayısıyla iki değer

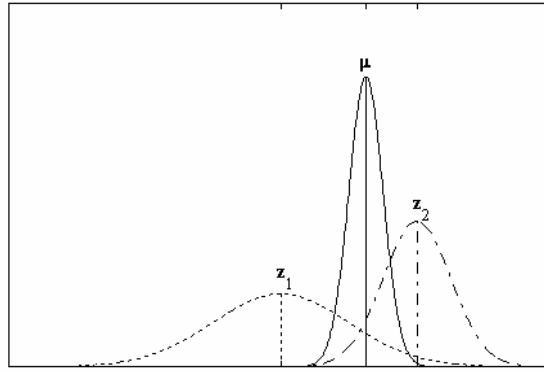
kombinasyonundan elde edilen konum bilgisinin istatistik belirsizliği daha küçük olur.

Bulunan olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre optimal konum öngörüsü

$$\hat{\mathbf{x}}(t_2) = \boldsymbol{\mu} \quad (5.40)$$

olacaktır.

$z_1$ ,  $z_2$  ve  $\boldsymbol{\mu}$  konumlarının olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla birlikte şematik ifadesi Şekil 5.6'da görülmektedir.



**Şekil 5.6:**  $z_1$ ,  $z_2$  ve  $\boldsymbol{\mu}$  konumlarının, olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla birlikte şematik ifadesi [28].

Eğer  $\sigma_{z_1} = \sigma_{z_2}$  ise yani ölçümler eşit hataya (precision) sahipse denklem (5.38)'de görüleceği gibi optimal öngörü iki ölçüm değerinin ortalaması olacaktır. Eğer  $\sigma_{z_1} > \sigma_{z_2}$  ise bir diğer deyişle  $z_1$  ölçümündeki belirsizlik  $z_2$  ölçümündekinden büyükse  $z_2$ 'nin ağırlığı  $z_1$ 'den büyük olacaktır yani öngörülen konum değeri  $z_2$ 'ye daha yakın olacaktır.

(5.38)  $\hat{\mathbf{x}}(t_2)$  için tekrar yazılırsa:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(t_2) &= \left[ \frac{\sigma_{z_2}^2}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} \right] \mathbf{z}_1 + \left[ \frac{\sigma_{z_1}^2}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} \right] \mathbf{z}_2 \\ &= \mathbf{z}_1 + \left[ \frac{\sigma_{z_1}^2}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} \right] [\mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_1] \end{aligned} \quad (5.41)$$

veya Kalman Filtresi'nin gösteriminde kullanılan genel şekliyle ( $\hat{\mathbf{x}}(t_1) = \mathbf{z}_1$  olduğundan):

$$\hat{\mathbf{x}}(t_2) = \hat{\mathbf{x}}(t_1) + \mathbf{K}(t_2) [\mathbf{z}_2 - \hat{\mathbf{x}}(t_1)] \quad (5.42)$$

$$\mathbf{K}(t_2) = \sigma_{z_1}^2 / (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2) \quad (5.43)$$

şeklinde yazılır.

$t_2$  anındaki optimal öngörü  $\hat{\mathbf{x}}(t_2)$ ,  $\mathbf{z}_2$  ölçülmeden önceki optimal öngörü  $\hat{\mathbf{x}}(t_1)$  terimine; optimal ağırlık değeri düzeltme terimi  $\mathbf{K}(t_2)$ 'nin,  $\mathbf{z}_2$  ile ölçümden önceki optimal öngörü  $\hat{\mathbf{x}}(t_1)$ 'in farkıyla çarpımının eklenmesiyle bulunur. Bu KF'nin öngörü-düzeltilme yaklaşımıdır. Dolayısıyla öngörülen değerle ölçüm sonuçlarından belirlenen bir düzeltme terimi, takip eden ölçüm alındığı zaman hesaplanmakta ve ölçüm alındıktan sonra yapılan öngörü düzeltmek için kullanılmaktadır.

(5.43)'deki  $\mathbf{K}(t_2)$  denklemini (5.39)'da yerine konularak tekrar yazılırsa

$$\sigma_x^2(t_2) = \sigma_x^2(t_1) - \mathbf{K}(t_2)\sigma_x^2(t_1) \quad (5.44)$$

Elde edilir [13].

### 5.3 AR Model

AR modeli basitliği ve model katsayılarının belirlenmesinde kullanılan etkin algoritmaların varlığı sebebiyle çok kullanılan bir metottur [59]. 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 modeldeki değişkenlerin gecikme sayılarını hatasız bir şekilde belirlemek gerekmektedir [60]. Model mertebesinin seçiminde en çok olabilirlik yöntemi her zaman model için olabilecek en büyük dereceyi seçmektedir. Dolayısıyla bu yöntem ile derece seçimi hatalı sonuçlara neden olmaktadır. En çok olabilirlik yönteminin geliştirilmiş biçimi Akaike [61] tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde farklı sayıda parametreye sahip olan farklı modeller arasından seçim yapılmaktadır. Bu yöntem, herbir modelin ayrı ayrı en çok olabilirlik fonksiyonunu bulup olabilirlik fonksiyonunun değeri en büyük olan modeli en uygun model olarak seçmektedir [62]. 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) [62 - 65].

### 5.3.1 AR modeli tanımı

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

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t - i\Delta t) + x(t) \quad (5.45)$$

şeklinde ifade edilebilir. (5.45)'de belirtilen  $a_i$  katsayıları Yule-Walker Metodu ile belirlenmektedir.  $n$  değerine ise modelin mertebesi denir [65].

### 5.3.2 Mertebe belirlenmesi

Düşük model mertebeleri yumuşatılmış (smooth) bir spektral öngörü yapar. Çok yüksek mertebeden modeller spektral öngöründe gerçek olmayan (suni) 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 [61 - 65] iki farklı kriter önermiştir. Birincisi, Final Prediction Error ( Son Öngörü Hatası ) Kriteridir. Bir AR modeli için FPE:

$$FPE_n = \hat{\sigma}_x^2 \left( \frac{N+n-1}{N-n-1} \right) \quad (5.46)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $N$  örneklenen işaret 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 Information Criterion ( Akaike Bilgi Kriteri ) :

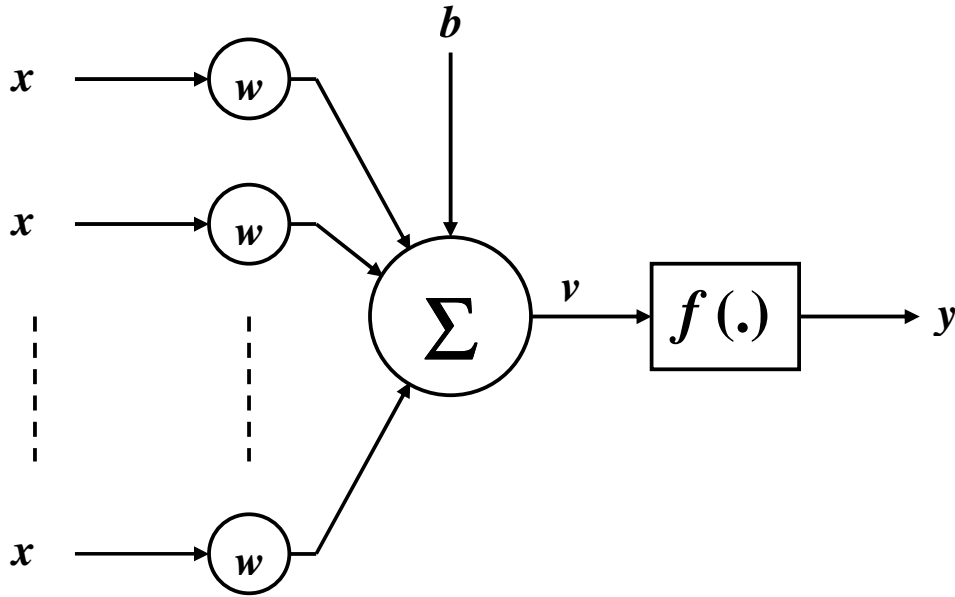
$$AIC_n = \ln(\hat{\sigma}_x^2) + \frac{2n}{N} \quad (5.47)$$

şeklinde tanımlanır. Model mertebesi arttıkça, ifadenin ikinci terimi AIC'nun büyümesine sebep olurken birinci terimi de monoton olarak azalır [65].

Her iki kriter için de belirli sayıdaki mertebenin, son aşamasına gelene kadar (5.45), (5.47)'e göre hesaplanarak bulunan değerler not edilir ve mertebeler arasında en küçük değeri veren  $n$ . mertebe tespit edilir.

#### 5.4 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağlarında bulunan basit bir işletim elemanı kendi başına çok güçlü olmayıp, sistemin gücü ağdaki birçok ünitenin birleşiminden gelmektedir. Ağ, bağlantı topolojisini ve ilgili ağırlıkları değiştirerek, değişik fonksiyonları gerçekleştirmede kullanılabilir. Bağlantı şekillerine bağlı olarak, birçok kompleks fonksiyon gerçekleştirilebilir. Ayrıca, yeteri kadar büyük olan bir ağ, uygun bir yapı ve düzgün seçilmiş ağırlıklar ile istenilen doğrulukta bir fonksiyona yakınsayabilir. Birçok ağın cevabı Şekil 5.7'deki gibi olmaktadır [66, 67].

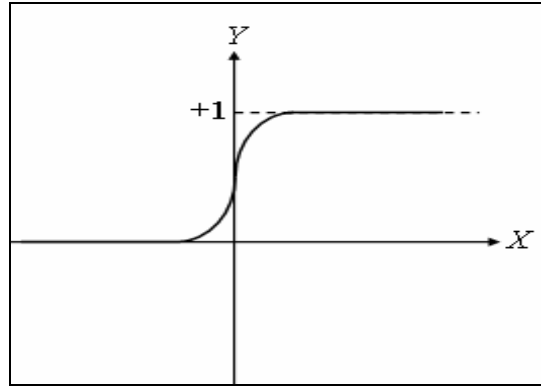


Şekil 5.7: Modern nöron modeli [28].

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k\right) \quad (5.48)$$

Burada,  $x_j$  sistem girdisi veya diğer düğümlerden gelen verilerdir.  $w_{kj}$ , ise sistem girdilerinin çarpıldığı ağırlık değerleri olup,  $f(\cdot)$  aktivasyon fonksiyonu adı verilen basit bir nonlinear fonksiyondur. Sistemin yaptığı işlem, sistem girdilerini ilgili ağırlıklar ile çarpıp sonucu  $f$  fonksiyonunun geçirek skaler bir değer elde etmektir. Genel olarak,  $f$  sınırlandırılmış ve azalmayan nonlinear bir fonksiyondur. Buna örnek olarak, bu çalışmada da kullanılmış olan Şekil 5.8 'de verilen sigmoid fonksiyonu gösterilebilir.

$$f(\mu) = \frac{1}{1+e^{-\mu}} \quad (\text{sigmoid fonksiyonu}) \quad (5.49)$$



Şekil 5.8: Sigmoid fonksiyonu [67].

$f$  fonksiyonu için diğer alternatifler  $\tanh$  ve  $\text{basamak}$  fonksiyonlarıdır.  $f$  bazen, çok büyük pozitif ve negatif sayıları sınırladığı için “squashing fonksiyonu” olarak da tanımlanmaktadır [67].

Yapay sinir ağı istenen bir yapıda olabilir, tabakalı mimariler genellikle çok popülerdir. Bu yapıda, üniteler tabakalar içinde yapılanmış olup, böylece  $L$ . tabakada bulunan üniteler  $L-1$ 'den gelen girdileri alıp, çıkış değerlerini  $L+1$ 'e verirler. Giriş işaretlerinin bulunduğu tabaka giriş tabakası, çıkış işaretlerinin bulunduğu tabaka ise çıkış tabakası olarak adlandırılmaktadır. Giriş ve çıkış dışındaki diğer bütün tabakalara gizli tabaka denilmektedir [67].

Yapay sinir ağlarının diğer bir özelliği “örneklerden öğrenme” özelliğidir. Girdi değerleri ve çıkışta istenen değerlerine göre, ağırlıklarını değiştirerek ağ eğitilir. Pratikte, eğitim setinin başarılı olamaması gibi zorluklar olmasına rağmen, prensip olarak, “iyi davranımlı” bir veri kümesi için uygun bir yapay sinir ağı, her zaman bulunmaktadır. Eğer her şey yolunda giderse, sistem sadece eğitim örneklerine değil



aynı zamanda bunların altında yatan bağıntıyı kurup, yeni girdilere karşı doğru cevaplar verir [67].

Bir yapay sinir ağı tasarımında ilk düşünülmesi gerekenlerden biri, kaç tabakalı olması gerektiğidir. Bu konuda birçok çalışma yapılmış olup, bunlardan biri istenilen sınıflandırma bölgesini oluşturmak için iki gizli tabakanın uygun olduğunu gösteren Lippmann'ın [68] çalışmasıdır. Diğer yandan, Kolmogorov [69 - 70], evrensel yaklaşımlar için tek gizli tabakanın uygun olacağını göstermiştir.

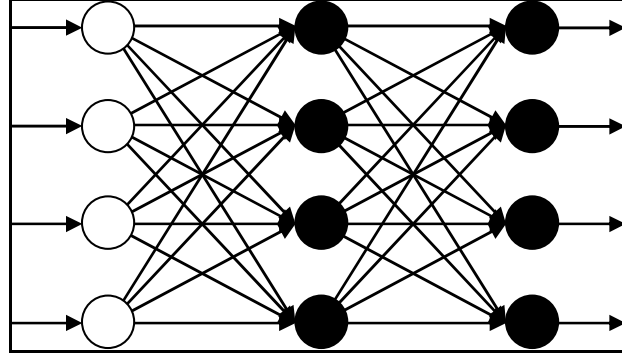
Yapay sinir ağlarının bir özelliği de “offline” algoritmalarından oluşmasıdır. Bunun anlamı, eğitim ve normal işletimin farklı zamanlarda oluşudur. Eğitim safhası, bir ürünün fabrikasyonu olarak da düşünülebilir. Ürün fabrikadan çıktıktan sonra uygun bulunan amaçta kullanılabilir ancak ürünün bir daha değişme imkanı olamaz. Aynı şekilde, eğitim sonrası bir ağın yeni bir şeyi öğrenmesi mümkün değildir. İzlenen işaretin doğasında bir değişiklik meydana gelmesi durumunda YSA doğru cevaplar vermemeye başlarsa tekrar eğitilir ve kullanılmaya devam edilir.

Bir ağı eğitmek için gerekli olan elemanlar, girdi verileri ve bu giriş bilgileri ile üretilen veya ölçülen çıkış verileri ile ilgili hata fonksiyonudur. Hata fonksiyonu, ağın bulduğu çıkış verileri ile gerçekte olması gereken çıkış verileri arasındaki fark değerini belirlemektedir. Sonuç olarak, bir ağ oluşturmak için takip edilmesi gereken adımlar şu şekilde gösterilebilir;

- Giriş verileri tanıtarak, ağın çıkış verilerini üretmesi sağlanır
- İstenilen çıkış verileri ile ağın verdiği veriler karşılaştırılarak hata hesaplanır
- Hatanın ağırlıklara göre türevi hesaplanır
- Ağırlıklar, hatayı minimize edecek şekilde ayarlanır
- Hata kabul edilebilecek kadar azaldığında veya zaman aşımına kadar bu işlem tekrar edilir

#### **5.4.1 İleri yayımlı yapay sinir ağları**

Şekil 5.11'de görünen ağ, hiçbir geri besleme yapısı içermeyen, ileri beslemeli bir YSA'dır. İleri beslemeli ağlarda işlemler sadece güncel girdi değerlerine bağlıdır ve bundan önceki sistem durumlarından bağımsızdır. Geri beslemeli ağlarda, geniş bir davranış aralığı olmasına rağmen analiz ve eğitim daha zordur.



**Şekil 5.9:** İleri beslemeli yapay sinir ağı [28].

Şekil 5.9'daki ağın bir diğer özelliği de tam bağlantılı olmasıdır. Bunun anlamı,  $L$  tabakadaki her nöron,  $L-1$ 'deki her nörona ve  $L+1$ 'deki her nörona bağlı olmalıdır. Burada dikkat edilmesi gereken aynı tabaka içindeki nöronların asla birbirleri ile bağlantısı olmayacağıdır.

İleri geçişlerde, ağ mevcut giriş değerlerine bağlı olarak çıkış değerlerini üretir. Her nöron bir önceki tabakadan gelen ağırlıklı toplamı hesaplayıp, nonlinear bir filtreden geçirerek,  $y_k$  değerinin elde edilmesini sağlar.

$$a_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (5.50)$$

$$y_k = f \left( \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k \right) \quad (5.51)$$

Normalde,  $f$  *tanh* ve *sigmoid* gibi sınırlandırılmış, monotonik bir fonksiyondur. Aktivasyon fonksiyonu olarak, istenilen herhangi bir türevlenebilir fonksiyon kullanılabilir fakat yaygın olarak *sigmoid* benzeri “squashing” fonksiyonları tercih edilir.

$j$  bir önceki tabakada bulunan ve  $k$ . nörona giriş yapan veri sıralamasıdır. Eğer  $j$  ve  $k$  arasında herhangi bir bağlantı yoksa  $w_{kj} = 0$  olarak alınmaktadır. Her nörona olan girişler bu şekilde hesaplanıp, bir sonraki tabakaya aktarılır [67].

#### 5.4.2 Hata fonksiyonu

Hata fonksiyonu, ağın ürettiği değer ile gerçekte olması gereken değer farkını belirler. En sade kullanılan yöntemlerden biri karesel hataların toplamı fonksiyonudur,

$$E_{SSE} = \sum_p \sum_i (d_{pi} - y_{pi})^2 \quad (5.52)$$

$P$ , eğitim setindeki verileri,  $i$  çıkış nöronlarını,  $d_{pi}$  ve  $y_{pi}$  ise sırayla hedeflenen ve gerçekte ortaya çıkan  $p$ . giriş verisine karşı  $i$ . nörona ait ağ çıkış verileridir.

Diğer bir yöntem ise ortalama karesel hatadır,

$$E_{MSE} = \frac{1}{PN} E_{SSE} \quad (5.53)$$

Bu fonksiyon ile  $E_{SSE}$ 'nin  $P$  (giriş modelindeki veri sayısı) ve  $N$  (çıkıştaki veri sayısı)'ye göre normalizasyonu yapılır [67].

### 5.4.3 Hatanın hesaplanması

Ağ, mükemmel bir şekilde eğitilmediği sürece, mevcut çıkış değeri ile olması gereken değer arasında her zaman bir fark olacaktır. Bu farkı belirlemek için karesel hataların toplamı ifadesi,

$$E = \frac{1}{2} \sum_p \sum_i (d_{pi} - y_{pi})^2 \quad (5.54)$$

$$E = \sum_p E_p \quad (5.55)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_i (d_{pi} - y_{pi})^2 \quad (5.56)$$

kullanılır.

Yukarıda yapılan hesaplar doğrultusunda, hata değeri istenilen aralığın dışında çıkarsa, çıkış değerlerini veren ağırlıklar yeniden gözden geçirilip, yeni değerler alırlar. Bu yeni değerler iki farklı metoda göre belirlenmektedir [67].

### 5.4.4 Momentum hesabı

Ağırlık güncelleme kurallarından biri, momentum teriminin eklenmesidir. Bunun temelindeki fikir, ağırlık değişiminin azalan eğim terimi ve önceki ağırlığın bir parçasının birleşimi ile ağırlık eğrisini durağan hale getirmektir. Azalan terim ile ifade edilen,  $E$ 'yi minimize etmek için  $E$ 'nin gradyanının negatif yönünde ağırlıkları ayarlayan formüldür.

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (\text{Azalan Terim}) \quad (5.57)$$

$\eta$ : Öğrenme Oranı (İleriki bölümlerde açıklanacaktır)

Yenilenmiş ağırlık değişim formülü:

$$\Delta w(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w}(t) + \alpha \Delta w(t-1) \quad (5.58)$$

Ağırlık değişimi,  $E$ 'nin gradyanının negatifini ile  $0 \leq \alpha < 1$  olacak şekilde önceki ağırlığının birleşimi ile ifade edilmektedir.  $\alpha$  (Momentum Terimi) için tipik değer aralığı  $0 \leq \alpha < 0.9$  dur. Bu formül ile ağırlık vektörüne,  $E$ 'nin gradyanı yönünde devam etmemesi için bir eylemsizlik verilmiştir.

Kısacası, momentum ağırlık eğrisi yönünde salınımlar meydana getirerek,  $E$ 'nin  $w$ 'ye göre kısmi türevinin küçük olduğu yerde öğrenmede hızlanma meydana getirir [67].

#### 5.4.5 Ağırlık azaltma

Ağırlık güncelleme kurallarından sık kullanılan biri de ağırlık azaltma terimidir. Ağırlık azaltma yöntemi ayrıca, ağırlık kompleks yapısını problemin zorluğuna göre ayarlama imkanı vermektedir. Burada ana fikir, network aşırı kompleks ise hatanın belirgin bir şekilde artmasına neden olmadan birçok ağırlığın kaldırılması mümkün olmalıdır, şeklinde ifade edilebilir. Bunu yapmak için, ağırlıklara gittikçe sıfıra yaklaşacak şekilde, her iterasyonda bir öncekine göre azalan değerler verilmektedir. Böylece, ağırlık azaltma yöntemi için güncelleme formülü,

$$\Delta w(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w}(t) - \rho w(t) \quad (5.59)$$

$0 \leq \rho \ll 1$  (Ağırlık azaltma parametresidir)

Eğer  $\frac{\partial E}{\partial w_i} = 0$  belirli  $w_i$  değerleri için geçerli ise,  $w_i$  eksponansiyel olarak sıfıra gidecektir. Ya da eğer ilgili ağırlık gerçekten gerekli ise  $\frac{\partial E}{\partial w_i}$  değeri sıfır dışında bir değer alacaktır ve iki terim bir noktada dengeye ulaşarak ağırlığın sıfıra gitmesini engelleyecektir [67].

### 5.4.6 Öğrenme

Öğrenme, aklın temel özelliği olup, tanımının kesin olarak formüle edilmesi zordur. YSA'da öğrenme kısacası, özel bir amaca yönelik olarak verimli bir şekilde işlem görmesini sağlayacak şekilde, ağ mimarisinin ve ağırlıkların güncellenmesi olarak ifade edilebilir. Ağın performansı, iteratif olarak hesaplanan ağırlıkların güncellenmesi ile gelişmektedir. YSA'ların otomatik olarak örneklerden öğrenmesi, onları çekici kılan en önemli özelliklerden biridir.

Öğrenme işlemini gerçekleştirmek için öncelikle, problemi temsil eden ve YSA'da çalışacak bir modelin tasarımı gerekmektedir. İkinci olarak, ağırlıkların güncellenmesinde kullanılan öğrenme algoritmasının tayini gerekmektedir.

Genel olarak üç öğrenme paradigması bulunmaktadır. Bunlar, öğreticili, öğreticisiz ve hibrit öğrenme olarak bilinmektedir. Öğreticili öğrenmede, YSA her giriş sinyali için doğru çıkış verilerini üreten bir öğretici ile çalışmaktadır. Ağırlıklar, YSA'nın doğru cevaba mümkün olduğu kadar yakın bir cevap vermesini sağlayacak şekilde ayarlanır. Öğreticisiz öğrenmede ise çıkış verilerinin birebir doğru cevapları vermesi beklenmemektedir. Bu öğrenme şeklinde, verinin altında yatan yapıyı veya veri içindeki örnekler arasındaki korelasyon araştırılmaktadır. Hibrit öğrenme şekli ise öğreticili ve öğreticisiz öğrenmenin bir kombinasyonudur. Ağırlıkların ayarlanması, öğreticili öğrenmeye göre yapılmakta olup, geri kalan işlemler öğreticisiz öğrenme doğrultusunda gerçekleştirilmektedir [67].

Öğrenme teorisinin sağlaması gereken temel üç madde: kapasite, örnek kompleksliği ve hesaplama kompleksliğidir. Kapasite ile kastedilen, ne kadar örnek veri kaydedilebileceği, hangi fonksiyonların kullanılabilmesi ve hangi sınırlamaların göz önünde bulundurulması gerektiğidir.

Hesaplama kompleksliği öğrenme algoritmasının eğitim modelinden hareketle çözüm tahminine ulaşması için gereken süreyi göstermektedir. Birçok öğrenme algoritması yüksek hesaplama kompleksliği içermektedir [20].

### 5.4.7 Öğrenme oranı

$$\Delta w(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w}(t) + \alpha \Delta w(t-1) \quad (5.60)$$

Yukarıdaki formülden de görüldüğü gibi öğrenme oranı ve momentum terimlerinin eğitim işlemine doğrudan etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, bu iki parametrenin uygun değerlerde seçilmesi çok önemlidir [66]. Bunlar için uygun aralıklar:

$$0.05 \leq \eta \leq 0.75 \quad (5.61)$$

$$0 \leq \alpha \leq 0.9 \quad (5.62)$$

olarak verilebilir.

Bu aralıklar aşılamaz olmayıp, burada sadece yol göstermek amacıyla verilmiştir. Her ne kadar  $\eta = 0.1$  genelde tavsiye edilse de, her problem için uygun olmayabilir. Kısaca öğrenme oranı tayinini etkileyen diğer faktörler:

- Eğitim verisinin dağılımı
- Momentum. Momentum efektif öğrenme oranını  $\eta_{eff} = \frac{\eta}{(1-\alpha)}$  formülünde belirtildiği şekilde etkiler. Büyük momentum değerleri genelde küçük öğrenme oranlarına denk gelir.
- Ağırlık büyüklükleri. Eğer ağırlıklar çok küçük değerlerden başlıyorsa, hesaplanan türevler küçük olacaktır ve eğitim hızını sabit tutmak için büyük öğrenme oranlarına ihtiyaç duyulacaktır. Ancak, ağırlık değerleri büyüdükçe doymayı önlemek için öğrenme oranının küçültülmesi gerekecektir [67].

#### 5.4.8 Hessian matrisinin özellikleri

Hessian matrisi hata fonksiyonunun ağırlıklara göre 2. türevi olup, aşağıdaki şekilde tanımlanır,

$$h_{ij} = \frac{\partial^2 E}{\partial w_i \partial w_j} \quad (5.63)$$

- Birçok optimizasyon algoritması Hessian matrisi tarafından sınırlandırılmaktadır. İkinci derece optimizasyon metodlarında, matris araştırma yönlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.
- Bazı “Pruning” algoritmalarında hangi ağırlığın kaldırılması gerektiğine karar verebilmek için Hessian matrisi kullanılmaktadır.
- Hessian matrisinin tersi ağ çıktılarında güvenlik aralığının hesaplanması için kullanılmaktadır.

- Hata fonksiyonunun yersel minimumunda, Hessian matrisi kesin pozitif olacaktır. Böylece, fonksiyonun öğrenmeyi bırakıp bırakmadığı veya ağın doğru minimuma ulaşıp ulaşmadığına karar verilir [67].

#### 5.4.9 Levenberg Marquard metodu

Newton metodunun bir özelliği, algoritmanın sadece  $\mathbf{H}$  matrisinin kesin pozitif olduğu yerde yakınsamasıdır. Fakat  $\mathbf{H}$  nonlineer bir fonksiyon için minimumdan uzak bir noktada kolayca tanımsız hale gelebilir. Levenberg-Marquard yöntemi minimumda hızlıca yakınsayan fakat diğer her yerde ıraksayan Newton metodu ile her yerde yakınsayan fakat çok yavaş olan gradyent metodunun bir birleşimi sayılmaktadır. Araştırma yönü, en dik azalma yönü  $\mathbf{g}$  ile Newton yönü  $\mathbf{H}^{-1}\mathbf{g}$ 'in lineer kombinasyonudur [67].

$$\mathbf{g} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{w}} \quad (5.64)$$

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - (\mathbf{H} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{g} \quad (5.65)$$

Bu formül ile istenen büyüklükte bir birim matris eklenerek  $(\mathbf{H} + \lambda \mathbf{I})$ 'in mutlak pozitif olması sağlanır.  $\lambda$ 'nın minimum değeri,  $\mathbf{H}$  matrisinin özdeğerlerine bağlıdır. Algoritma  $\lambda$ 'nın büyük bir değeri ile başlar ve bu değeri dinamik olarak ayarlayarak hatanın küçülmesini sağlar. Genelde  $\lambda$  değeri hatanın azalmasını sağlayan minimum değerinde kalmaktadır.  $\lambda$ 'nın büyük olduğu aşamada, sistem efektif olarak gradyent azaltma yöntemini kullanmaktadır. Daha sonraki aşamalarda,  $\lambda$  sifıra ulaştığında, sistem Newton metoduna geçerek son yakınsamayı gerçekleştirmektedir.

Böylece Newton metodunun ıraksama problemi çözülmüş olur ancak hala  $N \times N$ 'lik bir matrisin hafızada depolanması ve tersinin alınması gerekmektedir [67].

Levenberg - Marquardt methodu, bir lineer denklem takımının çözümü olan bir arama doğrultusu kullanır [71, 72]. Levenberg - Marquardt methodu, Gauss - Newton doğrultusu ile en dik yokuşun arasında bir çaprazlama arama yönü kullanmaktadır.

Bütün Quasi - Newton metotları gibi, Levenberg - Marquardt algoritması da, ikinci derece eğitim hızına Hessian Matrisini hesaplamadan yaklaşmak üzere tasarlanmıştır. Başarım fonksiyonu toplamların karesi formuna (ileri-beslemeli YSA'ların

eğitilmesinde genelde olduğu gibi) ulaştığı zaman, Hessian Matrisi tahmin edilebilmekte ve gradyan bir Jakobiyen Matrisi olarak hesaplanabilmektedir. Jakobiyen Matrisi, ağırlıklara ve bias'lara bağlı olan ağ hatalarının birinci dereceden türevlerini içermekte, ve  $\mathbf{e}$  de ağ hatalarının bir vektörü olmaktadır. Jakobiyen Matrisi, standart bir geri - yayılım tekniği ile Hessian Matrisinin hesaplanmasına göre çok daha basit bir şekilde hesaplanabilmektedir. Levenberg - Marquardt Algoritması aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Algoritma: Öngörü hatalarının toplamı olan bir  $J(w)$  fonksiyonu verildiğinde

$$J(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K [y(k) - \hat{y}(k)]^2 \quad (5.66)$$

Minimize edici parametreler

$$\hat{w} = \arg \min_{\theta} J(w) \quad (5.67)$$

aşağıdaki algoritma kullanılarak hesaplanabilir:

1. Başlangıç koşullarını ata:

İterasyon indeksini  $l=1$ 'e ayarla.

$\hat{w}(1)$  ve  $\mu(1)$ 'e başlangıç değerlerini ata ve  $\eta$ 'yi belirle

2. Modeli ve rezidüleri tayin et:

Tüm  $k$  örüntüleri ve  $p$  parametreleri için  $\hat{y}(k)$  ve  $\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial w_p}$ 'yi tayin et. Rezidüel vektör

$\mathbf{R}$ 'yi hesapla:

$$r_k = \hat{y}(k) - y(k) \quad (5.68)$$

ve  $J(\hat{w}(l))$ 'yi hesapla:

$$J(\hat{w}(l)) = \frac{1}{2} \mathbf{R}^T \mathbf{R} \quad (5.69)$$

Jakobiyen Matrisi  $\mathbf{G}$ 'yi hesapla:

$$g_{k,p} = \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \theta_p} \quad (5.70)$$

3. Parametreleri yenile:



$$\Delta \hat{w}(l) = -[\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mu(l) \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{R} \quad (5.71)$$

4.  $\hat{w}(l)$  yerine  $\hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l)$  kullanarak ikinci adımı tekrarla.  $J(\hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l))$ 'yi hesapla.

Eğer  $J(\hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l)) < J(\hat{w}(l))$  ise adım büyüklüğünü arttır:

$$\mu(l+1) = \mu(l) / \eta \quad (5.72)$$

ve parametreleri güncelle

$$\hat{w}(l+1) = \hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l) \quad (5.73)$$

değilse adım büyüklüğünü küçült:

$$\mu(l+1) = \eta \mu(l) \quad (5.74)$$

5.  $l = l + 1$  olarak ata ve ikinci basamağa dön, ya da çık.

Levenberg-Marquardt Algoritmasının en büyük sorunu, bazı problemlerde çok büyük boyutlara ulaşan birkaç matrisin hafızada saklanmasına gerek göstermesidir.

## 6. ANALİZ VE MODEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

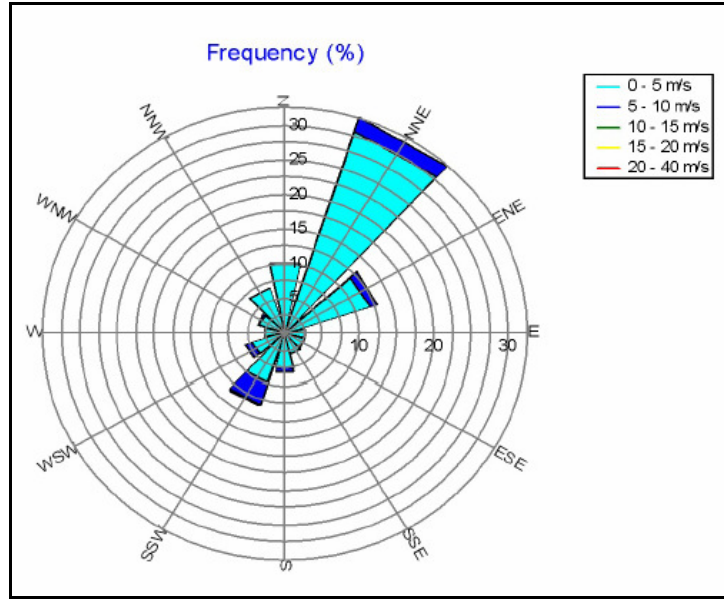
### 6.1 Ortalama Rüzgar Şiddeti ve Yön Analizi

Çizelge 6.1’de görüldüğü üzere, 02.03.2000 – 31.05.2004 aralığındaki rüzgar verisinin WindPro ile hesaplanan ortalama rüzgar şiddeti 2.45 m/sn, Weibull dağılımından elde edilen ortalama rüzgar şiddeti 2.61 m/sn ve aralarındaki sapma %6.13 olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde ortalama güç yoğunluğu  $27.9 \text{ W/m}^2$ , Weibull dağılım fonksiyonu kullanılarak elde edilen ortalama güç yoğunluğu  $26.2 \text{ W/m}^2$  ve aralarındaki sapma %6.09 olarak bulunmuştur. Dört yıllık periyodu kapsayan ortalama değer ölçüm bölgesinin kuzeyinde bulunan ve Karadeniz’e açık konumda olan Kumköy Meteoroloji Gözlem İstasyonu’nun 4.5 m/sn’lik (10m yükseklikte) ortalama rüzgar şiddeti değeri ve  $123 \text{ W/m}^2$ ’lik rüzgar güç yoğunluğu değerleriyle karşılaştırıldığında rüzgar şiddetinde 2 katı, güç yoğunluğunda ise 4 katı kadarlık bir fark görülmektedir. Bu durum Maslak’taki ölçüm istasyonunu çevreleyen yüksek yapılaşmanın akımı engelleyici etkisinden kaynaklanmaktadır. Şekil 6.1’de görülen rüzgar gülüne göre, bölgenin hakim rüzgar yönü  $24.74^\circ$  (NNE) olarak tespit edilmiştir. Bu yön, İstanbul’un genel hakim rüzgar yönü olup, büyük ölçekteki atmosferik hareketlerin bölge üzerindeki genel etkisinin bir sonucudur. Bu büyük ölçekteki hareketlere ilave olarak yazın deniz meltemleri bileşeninin katkısı söz konusudur. Bu nedenle bölgedeki en kuvvetli rüzgarların da güneygüneybatılı (SSW) akışın ardı sıra hakim rüzgar yönünde (NNE) olduğu görülmektedir. Şekil 6.2’de WindPro ile elde edilen Weibull dağılımı görülmektedir. Çizelge 6.1’de de görüldüğü gibi WindPro sonuçlarına göre ölçek parametresi  $A=2.92 \text{ m/sn}$  ve şekil parametresi  $k=1.63$  dir. WAsP sonuçlarına göre ise, ölçüm dönemine ait ortalama rüzgar şiddeti  $2.55 \text{ m/sn}$ , Weibull dağılımından elde edilen rüzgar şiddeti  $2.58 \text{ m/sn}$  ve aralarındaki sapma da %1.16 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde sırasıyla ölçüm verisinin ortalama güç yoğunluğu  $26 \text{ W/m}^2$  ve Weibull dağılımına göre ise  $27 \text{ W/m}^2$  bulunmuştur. Aralarındaki sapma %3.7’dir. WAsP ile elde edilen Weibull ölçek parametresi  $A=2.9 \text{ m/sn}$  ve şekil parametresi  $k=1.58$  dir. Bu sonuçlara göre, Weibull dağılımına göre hesaplanan ortalama rüzgar şiddetleri arasındaki %1’lik

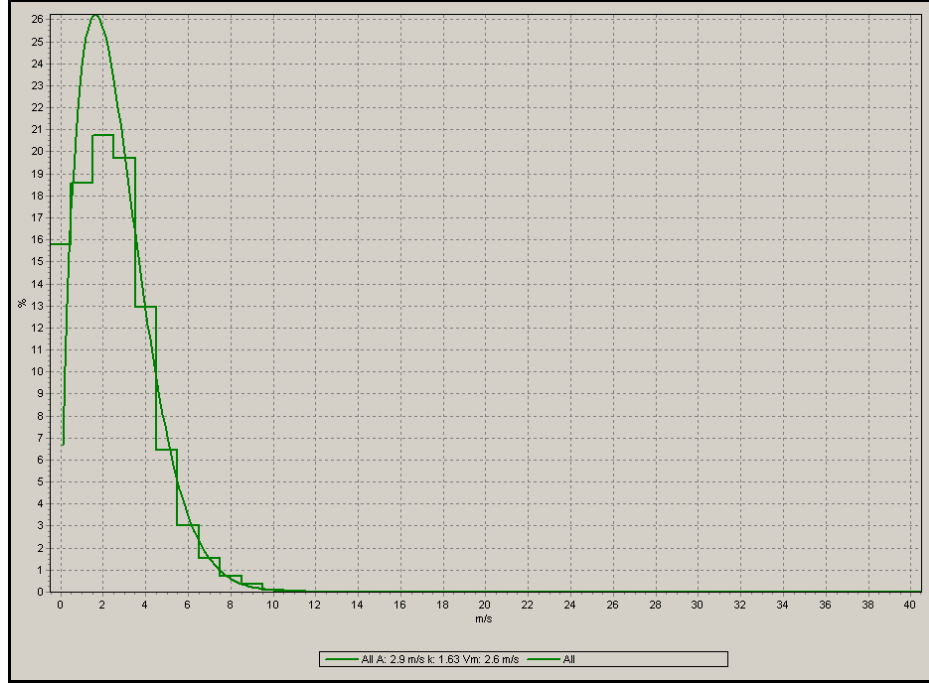
fark, yine Weibull dağılımına göre güç yoğunluğunda yaklaşık %3'lük bir farka neden olmaktadır. Her iki programda elde edilen Weibull dağılımları (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3) incelendiğinde, dağılımının sola, küçük değerlere doğru yatık olduğu görülmektedir.

**Çizelge 6.1 :** Rüzgar şiddeti ortalaması ve Weibull parametrelerinin karşılaştırılması.

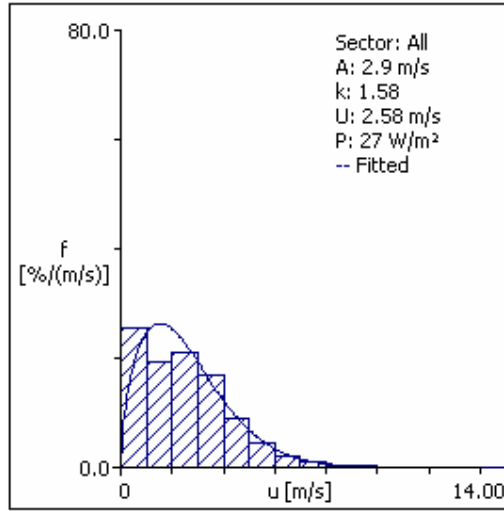
	Ortalama	Weibull Ort.	Sapma	Weibull A	Weibull k	Güç Yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> )	Güç Yoğunluğu Weibull(W/m <sup>2</sup> )
WAsP	2.55	2.58	1.16	2.9	1.58	26	27
WindPro	2.45	2.61	6.13	2.92	1.62	27.9	26.2
Sapma	3.92	1.15		0.68	2.47	6.81	2.96



**Şekil 6.1:** Ölçüm istasyonu verisinin rüzgar gülü



**Şekil 6.2:** Weibull dağılımı (WindPro).



**Şekil 6.3:** Weibull dağılımı (Wasp).

Çizelge 6.2’de 2 m ve 10 m’de ölçülen rüzgar şiddeti verileri ile WindPro akım modelinde hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin ayrıntıları gösterilmektedir. Çizelge irdelendiğinde, 10 m’de gözlenen maximum rüzgar şiddeti 12.6 m/sn ve 2 m’de gözlenen maximum rüzgar şiddeti 9.1 m/sn’dir.

**Çizelge 6.2: Windpro Weibull parametreleri**

	Veri	Birim	Top. Veri Sayısı	Period	Ortalama	Min	Max	Weibull Ort.	Weibull A	Weibull k
2m	Rüzgar Şid.	m/sn	35409	%95.1	1.46	0.2	9.07	1.62	1.8	1.53
2m	Rüzgar Yön.	Derece	35409	%95.1	18.8	0	359.9			
10m	Rüzgar Şid.	m/sn	35409	%95.1	2.45	0.2	12.58	2.61	2.9	1.62
10m	Rüzgar Yön.	Derece	35409	%95.1	24.7	0	359.9			

Çizelge 6.3'te ise ölçek parametresi, şekil parametresi, ortalama rüzgar şiddeti ve frekansın yönlere göre aldığı değerler görülmektedir. Ölçek parametresinin en yüksek olduğu değer 4.77 m/sn ile SSW yönünde olup, en düşük değer ise 0.94 m/sn ile ESE'dir. En fazla tekrarlanan değer ise %32.5 ile NNE'dur. Hakim yöndeki ortalama rüzgar şiddetinin değeri ise 2.83 m/sn'dir. İkinci hakim yöndeki (SSW) rüzgar şiddeti ise 4.23 m/sn'dir. İstasyonun kuzeyinin (NNW, N ve NNE) yapılaşma nedeniyle akım ayrışma bölgesinde olması, buna karşın güneyinin ise açık olması her iki yönden esen rüzgar şiddeti değerleri arasındaki büyük farka neden olmaktadır. Hakim rüzgar yönü NNE olmakla birlikte Çizelge 6.3'te görüldüğü üzere, SSW ve WSW'dan gelen akımların enerji üretimi açısından daha uygun olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise ağırlıklı rüzgar yönü olan NNE'ya istasyonun kapalı konumda olması nedeniyle hakim yönden gelen rüzgarın azalarak gelmesi sonucu güç yoğunluğu istasyona geldiğinde azalmıştır. İstasyon SSW ve WSW yönlerine açık olması ile, bu yönlerden esen kuvvetli rüzgarın da etkisiyle güç yoğunluğu yüksek olmaktadır.

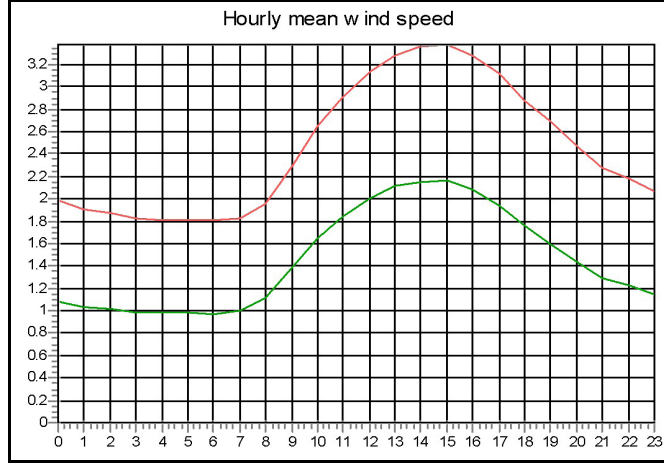
**Çizelge 6.3:** Weibull parametrelerinin yön ile değişimleri

	A(m/sn)	k	f	Ortalama Rüzgar Şiddeti (m/sn)	Ortalama Güç Yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> )
<b>0-N</b>	2.04	1.812	10.29	1.81	3.59
<b>1-NNE</b>	3.20	2.239	32.59	2.83	13.72
<b>2-ENE</b>	3.24	2.054	13.06	2.87	14.31
<b>3-E</b>	1.06	1.414	2.69	0.96	0.54
<b>4-ESE</b>	0.94	1.224	2.91	0.88	0.41
<b>5-SSE</b>	1.45	1.210	3.05	1.36	1.52
<b>6-S</b>	2.62	1.510	5.56	2.36	7.96
<b>7-SSW</b>	4.77	2.089	10.95	4.23	45.83
<b>8-WSW</b>	3.68	1.866	5.43	3.27	21.17
<b>9-W</b>	2.24	1.584	2.78	2.01	4.92
<b>10-WNW</b>	2.04	1.563	3.79	1.83	3.71
<b>11-NNW</b>	2.28	1.836	6.91	2.03	5.07
<b>Ortalama</b>	2.92	1.627	8.30	2.61	10.77

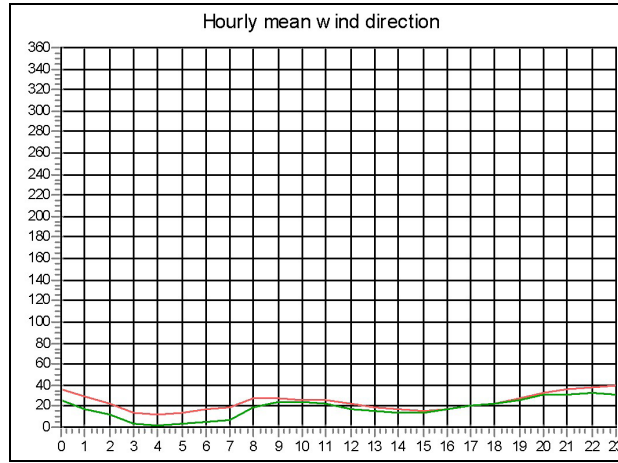
## 6.2 Rüzgar Verisinin Günlük Analizi

*Verinin Günlük Değişimi.* İTÜ Maslak Kampüsünde 2 m ve 10 m'den alınan, 02.03.2000 ve 31.05.2004 yılları arasındaki ölçüm verisinin model sonuçlarına göre günlük değişim eğrisi Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te verilmektedir. Buna göre, sabah 08:00'den itibaren rüzgar şiddeti artarak 14:00 ile 15:00 arasında 3.4 m/sn'lik (10 m yükseklik için) bir değer ile maximuma ulaşmakta ve daha sonra azalmaktadır. Gündüz saatlerindeki ısınmanın etkisi ile gelişmeye başlayan konvektivite genel akıma bir bileşen katkısı nedeniyle rüzgar şiddetinde artış görünmektedir. Gün içerisindeki 1.8 m/sn'lik en düşük değerine ise 04:00 – 06:00 saatleri arasında ulaşmaktadır.

Gündüz saatlerinde rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerlerinin maximum değerlerini alması gün boyunca ısınma nedeniyle artan konvektivitenin bir sonucu olarak gerçekleşir. Gece ise tam tersi bir durum gözlemlenir.



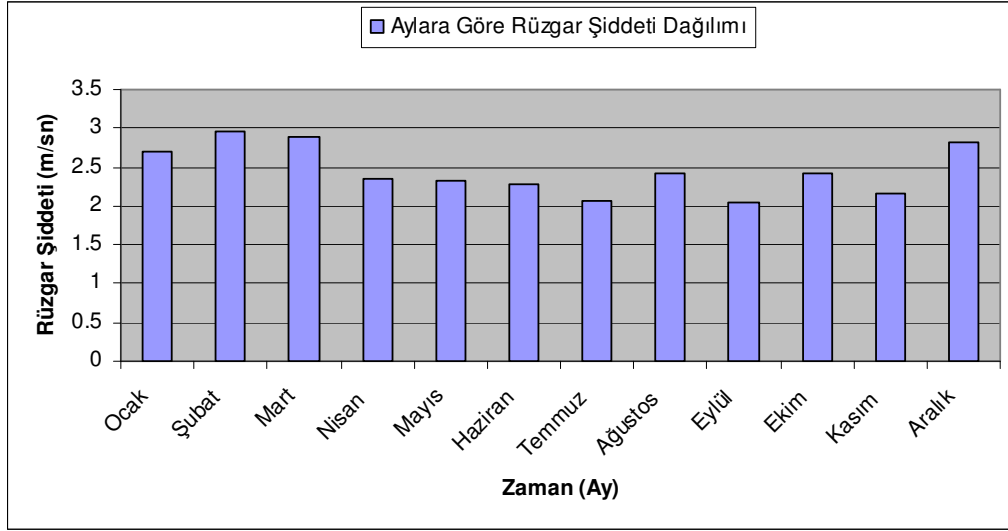
Şekil 6.4: Günlük rüzgar şiddeti değişimi (10 m’de ve 2 m’de).



Şekil 6.5: 10 m ve 2 m’deki Ölçüm verisinin günlük yön değişimi

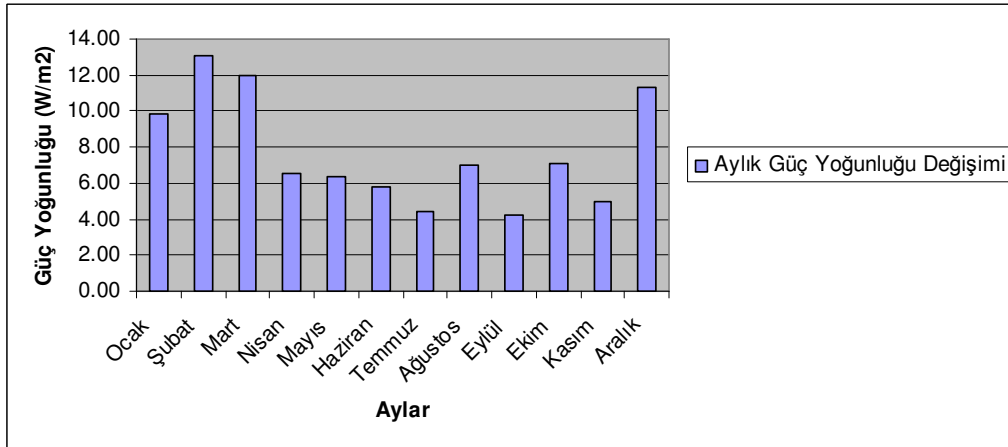
### 6.3 Rüzgar Verisinin Aylık Analizi

*Verinin Aylık Değişimi.* Aylık bazda veri incelendiğinde, kış aylarında rüzgar şiddetinin arttığı, yaz aylarında ise en az değerine ulaştığı görülmektedir. Rüzgar şiddeti Şubat ayında, 10 m’de 2.97 m/sn ortalama ile en yüksek ortalama değere ulaşmıştır. Temmuz ve Eylül’de de 10 m’de sırasıyla 2.07 m/sn ve 2.04 m/sn değerleri ile rüzgar potansiyelinin en düşük olduğu aylardır (Şekil 6.6).



**Şekil 6.6:** Aylara göre rüzgar şiddeti dağılımı.

Şekil 6.7’den görüldüğü gibi güç yoğunluğu değerleri incelendiğinde en yüksek güç yoğunluğu değerlerinin  $13.10 \text{ W/m}^2$  ile Şubat ayında olmak üzere sonbaharın ikinci yarısı, kış ve ilkbaharın ilk periyodunu kapsayan dönemde daha yüksek değerler almaktadır. Buna karşın yaz mevsimi ve sonbaharın ilk yarısında Eylül ayında en düşük değer ( $4.24 \text{ W/m}^2$ ) olmak üzere daha düşük güç yoğunluğu değerleri gözlemlenmektedir.



**Şekil 6.7:** Aylık güç yoğunluğu değişimi

İstanbul sonbahar periyodundan itibaren, bahar aylarının ilk periyoduna kadar Orta Avrupa ve Akdeniz üzerinden gelen alçak basınç paterni ve bununla ilişkili cephesel sistemler ile Doğu Avrupa ve Rusya üzerindeki yüksek basınç paternlerinin genel etkisi altındadır. Bu paternlerin yönlendirdiği güneybatılı ve kuzeydoğulu akımlar

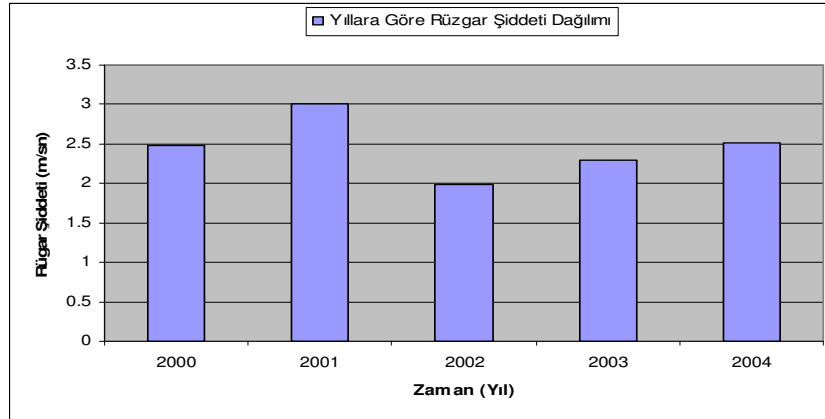


İstanbul'un kuzey ve güneyinde yer alan Karadeniz ve Marmara Deniz'i üzerinden etkili olmaktadır. Bu da, bu aylarda (sonbahar başlangıcından ilkbahar başlangıcına kadar) rüzgarın daha şiddetli esmesine neden olmaktadır. Yaz aylarında ise sinoptik ölçekteki paternler daha kuzey enlemlerde etkili olmakta, buna karşılık bölgede lokal etkiler önem kazanmaktadır. Avrupa üzerinde merkezlenen yüksek basınç paterni ile Türkiye'nin güneydoğusundan itibaren kuzeybatıya doğru yönelen alçak basınç paterninin oluşturduğu kuvvetli basınç gradyanı bölge üzerinde kuvvetli kuzeydoğulu akımların oluşmasına neden olmakta, özellikle gündüz saatlerinde Karadeniz üzerinden deniz meltemleri bileşeninin katkısı da buna eklenmektedir. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi inceleme bölgesinin kuzeyinin kapalı olması kuvvetli kuzeyli akımların ölçüm alanında ayrışarak zayıflamasına neden olmaktadır.

#### 6.4 Rüzgar Verisinin Yıllık Analizi

02.03.2000 ile 31.05.2004 periyotlarını kapsayan rüzgar ve güç yoğunluğu değerlerinin yıllar bazındaki dağılımı sırasıyla Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterilmektedir.

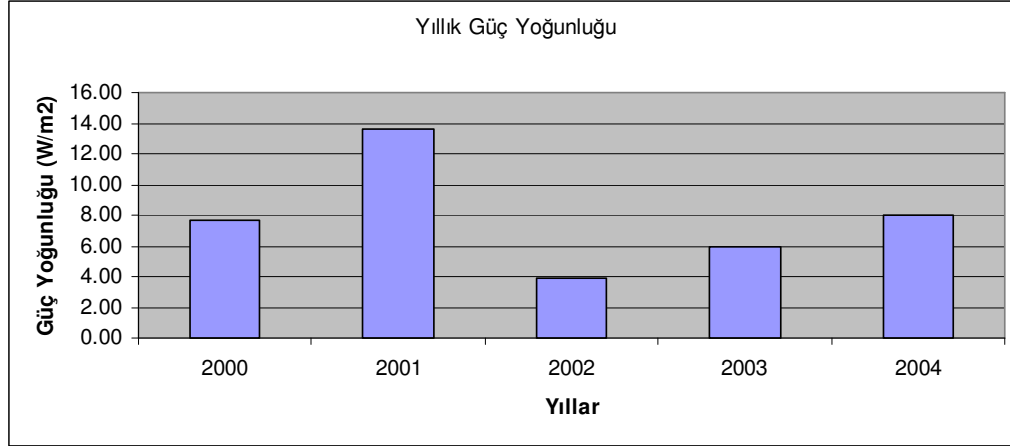
Buna göre, en yüksek yıllık ortalama rüzgar şiddeti 2001 yılında (3.01 m/sn) gözlemlenmiş, en düşük değer ise 2002 yılında (1.99 m/sn) görülmektedir.



Şekil 6.8 : Ortalama rüzgar şiddetinin yıllara göre dağılımı.

Buna paralel olarak en yüksek güç yoğunluğu değeri  $13.64 \text{ W/m}^2$  ile 2001 yılına, en düşük güç yoğunluğu değeri ise  $3.94 \text{ W/m}^2$  ile 2002 yılında görülmüştür

Rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerlerindeki, yıldan yıla görülen değişimi bölge üzerinde etkili olan geniş ölçekteki basınç paternlerinin farklı yıllarda yörlümlerindeki değişim ile açıklamak mümkündür.



**Şekil 6.9:** Yıllık ortalama güç potansiyeli dağılımı.

Rüzgar verilerinin aylık ve yıllık özeti kısaca Çizelge 6.4'te görölmektedir.

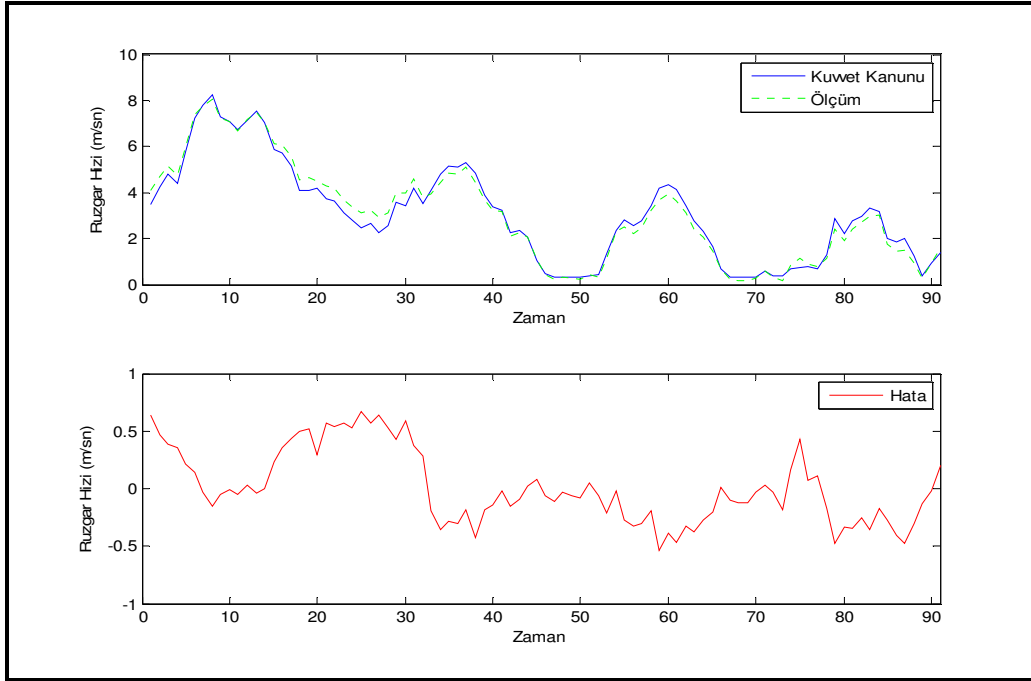
**Çizelge 6.4:** Aylık ve yıllık rüzgar şiddeti ortalamalarının değişimi (özet tablo).

Ay	2000	2001	2002	2003	2004	Ortalama	Ay için Toplan Ortalama	Ortalama Güç Yoğunluğu (W/m²)
Ocak		3.39	1.83	2.86	2.7	2.69	2.7	9.84
Şubat		3.26	2.53	3.11		2.97	2.97	13.10
Mart	2.76	3.96	2.71	2.53	2.42	2.91	2.88	11.94
Nisan	2.3	2.83	1.94	2.16	2.59	2.36	2.36	6.57
Mayıs	2.42	2.27	2.47	2.18	2.32	2.34	2.33	6.32
Haziran	2.57	2.93	1.71	1.88		2.27	2.27	5.85
Temmuz	2.42	2.57	1.72	1.58		2.07	2.07	4.43
Ağustos	2.8	2.9	1.69	2.23		2.41	2.41	7.00
Eylül	2.38	2.59	1.21	1.97		2.04	2.04	4.24
Ekim	2.54	2.79	1.71	2.65		2.41	2.42	7.09
Kasım	1.97	3.15	1.7	1.78		2.16	2.15	4.97
Aralık	2.63	3.52	2.66	2.51		2.83	2.83	11.33
Bütün Verinin Ortalaması	2.49	3.01	1.99	2.28	2.52			
Ayların Ortalaması	2.48	3.01	1.99	2.29	2.51		2.45	7.72
Yıllık Enerji Potansiyelleri (W / m²)	7.72	13.64	3.94	5.93	8.00			

## 6.5 2 m’de Ölçülen Verilerin 10 m’ye Düşey Ekstrapolasyonu

Rüzgar enerjisi çalışmalarında en önemli konulardan biri mevcut rüzgar ölçüm sistemlerinde belli bir yükseklikte ölçülen rüzgar şiddetinde kurulması planlanan türbinin hub yüksekliğindeki değerinin doğrulukla hesaplanmasıdır. Kullanılan akım model çalışmalarında logaritmik profil veya güç kanunu ile düşey ekstrapolasyon yapılmaktadır.

Özellikle karmaşık topografik özellik gösteren alanlarda düşey ekstrapolasyon güç kanununa göre yapılmaktadır. Bu çalışmada güç kanununa göre yapılan ekstrapolasyonun hata payını belirlemek üzere 2 m’de ölçülen rüzgar verisi 10 m’ye ekstrapole edilmiş ve mevcut 10 m’deki ölçüm verisi ile kıyaslanmıştır. Güç kanunu bağıntısında pürüzlülük katsayısı (3.15) eşitliğine göre hesaplanmıştır. Şekil 6.10’da tüm aralık için hesaplanan ekstrapolasyon değerlerinin (grafiksel olarak hata oranını daha iyi göstermek amacıyla), Mayıs 2000 ile Temmuz 2000 arasındaki 3 aylık kısım gösterilmektedir. İki veri arasındaki benzerlik oranı %96.5 olarak bulunmuştur. Güç Kanunu ile bulunan 10 m’deki ortalama rüzgar şiddeti 2.33 m/sn iken, gerçekteki ortalama 2.44 m/sn’dir. Bölgedeki yüksek pürüzlülük değerlerinin benzerlik oranını düşürdüğü söylenebilir.

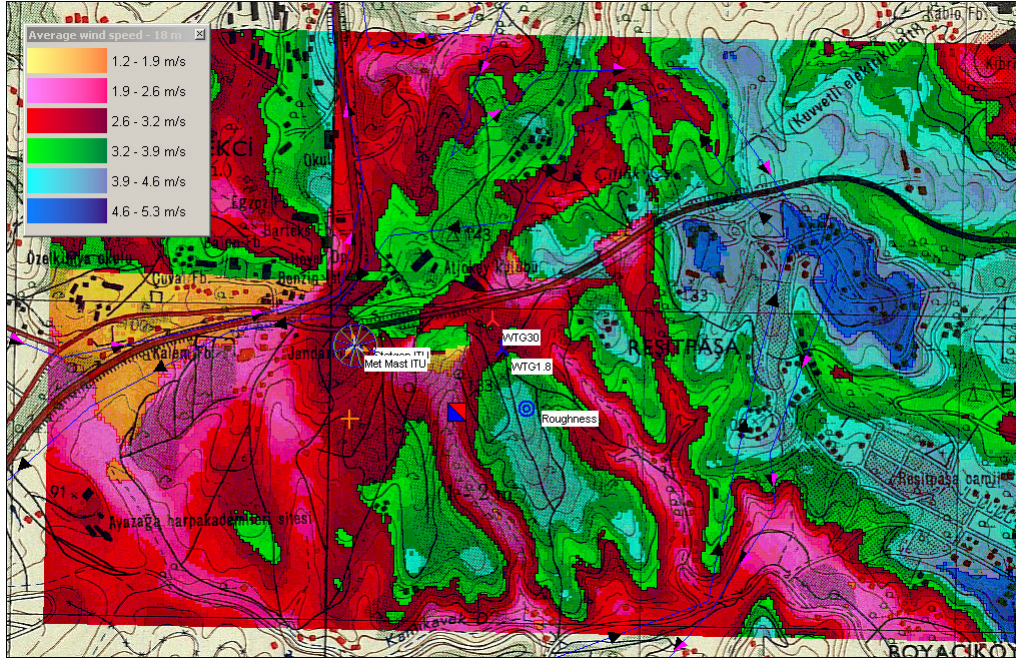


**Şekil 6.10:** Güç kanunu ile 10 m’ye çıkarılan değerlerin ölçüm verileri ile karşılaştırılması

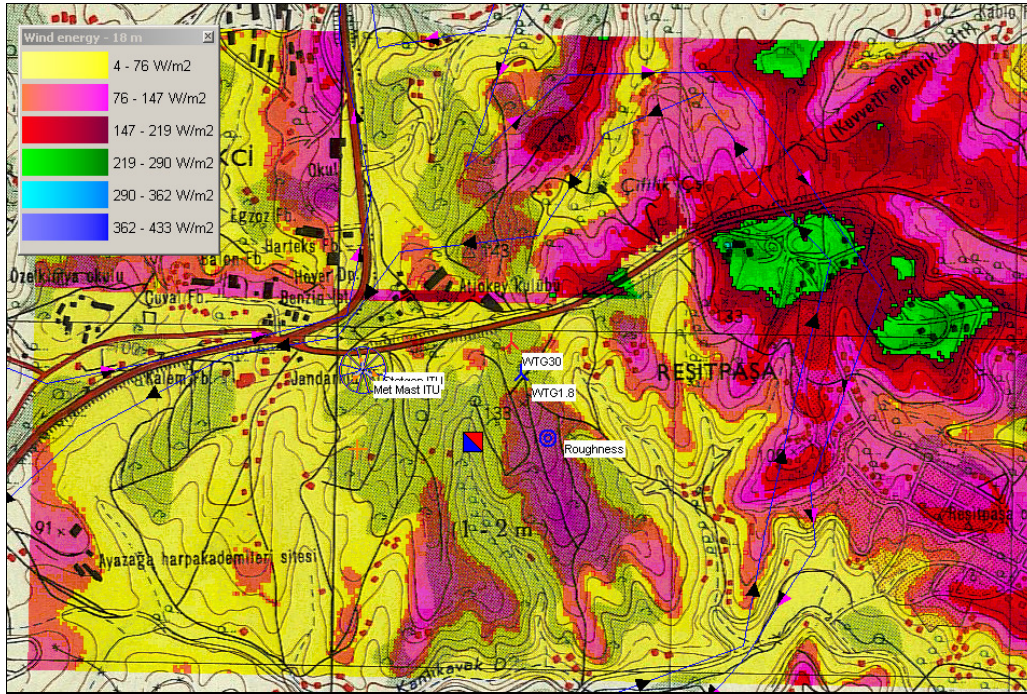
## 6.6 Rüzgar Şiddeti ve Güç Yoğunluğunun Alansal Dağılımının Değerlendirilmesi

Wasp ve WindPro akış alan modellerinde Bölüm 3.4'te bahsedildiği üzere orografi, pürüzlülük ve gölgeleme etkileri hesaba katılarak rüzgar ve güç yoğunluğunun alansal dağılımı belirlenmektedir. Wasp ve WindPro modellerinde eşyüksele ve pürüzlülük eğrileri 1.9 x 3.6 km'lik bir alanı kapsayacak şekilde çizilerek, arazi bilgileri sayısal olarak programa tanıtılmıştır. Arazi bilgisinin yanında, bölgedeki yapılaşmanın tanıtılması için ölçüm istasyonu ve türbin bölgelerindeki engel bilgileri harita üzerinde işlenmiştir. Bunun işlemlerin sonucunda meteoroloji ölçüm istasyonundan alınan 10 m'deki rüzgar hızı da programa girdi olarak verilerek, tanımlanan alana ait rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerlerinin alan üzerindeki dağılımları hesaplanmıştır. Şekil 6.11 ve 6.12'de topoğrafya üzerindeki ortalama rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu dağılımları görülmektedir. Şekil 6.11'de belirtilen skalada sarıdan maviye doğru, artan rüzgar şiddeti dağılımı görülmektedir. Buna göre rüzgar şiddetinin en kuvvetli olduğu bölgeler, ölçüm istasyonunun doğusunda ve kuzeydoğusunda yer almaktadır. Bu bölgelerin topoğrafik konumu irdelendiğinde, hakim rüzgar yönüne (NNE-NE) ve denize açık, termal etkileşimin hissedildiği bölge özelliği taşımaktadır. Rüzgar şiddetinin kuvvetli olduğu ikinci bölge kampüs içinde gözlemlenmektedir. Bu bölge gölet alanı civarındadır ve etrafında yüksek bir yapılaşma bulunmamaktadır. Yeşil skala ile tanımlanan ve istasyonun kuzeydoğusundaki bölgede ise istasyon civarına göre daha yüksek rüzgar şiddeti görülmektedir. Bu bölge istasyona göre daha yüksek topoğrafik konumdadır. En düşük rüzgar şiddetinin görüldüğü bölge ise (sarı renkli skala), istasyonun batı, kuzeybatısında yer alan yoğun yapılaşmanın bulunduğu bölgedir. Yapılaşmanın olduğu bölgede görülen yer yer daha yüksek rüzgar şiddeti değerleri, binaların oluşturduğu kanal ve türbülans etkisinin sonucu olarak değerlendirilebilir.

Şekil 6.12'da güç yoğunluğu bölge üzerinde güç yoğunluğunun dağılımı görülmektedir. Güç yoğunluğu değerleri, rüzgar şiddeti değerleri ile paralel bir dağılıma sahiptir. En yüksek güç yoğunluğu değerleri, 219-290 W/m<sup>2</sup> ile istasyonun doğu ve kuzeydoğusunda yer alan denize açık bir yamaçta bulunmaktadır.



Şekil 6.11: Rüzgar şiddeti dağılımı atlası.



Şekil 6.12: Birim alanda enerji üretim potansiyelinin dağılımı.

## **6.7 Wasp ve WindPro Modelleri ile Elde Edilen Üretim Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

30 kW'lık türbinin Wasp ile yapılan hesabında, yıllık 10.76 MWh'lik bir üretim değeri hesaplanmış olup WindPro ile bulunan değer 18.5 MWh'tir. 19 m'lik hub yüksekliğine ekstrapole edilmiş, türbine gelen tahmini rüzgar şiddeti Wasp'ta 2.47 m/sn'dir. WindPro'da bulunan rüzgar şiddeti ise 3.2 m/sn'dir. İki model arasındaki fark, bu aşamada ortaya çıkmıştır. Ekstrapolasyonda izlenen yöntemlerin farkı ile belirtilen hub yüksekliğinde yaklaşık 10 W/m<sup>2</sup>'lik güç yoğunluğu farkı bulunmaktadır. Bu iki modelin sonuçları arasında dikkate değer bir fark görülmektedir. Hangi modelin daha doğru sonuçlar verdiğini anlamak için iki farklı istasyondan eş zamanlı alınmış veri veya bahsedilen türbinlerin enerji üretim değerleri gerekmektedir.



## 7. ZAMAN SERİSİ ANALİZLERİNE DAYALI KISA PERİYOTLU RÜZGAR TAHMİN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### 7.1 Kalman Filtresi ile Elde Edilen Sonuçlar

Kalman Filtresinin algoritması MATLAB’de yazılmış olup, filtre sonuçları MATLAB’de incelenmiştir. Filtreye 02.03.2000 ile 31.05.2004 tarihleri arasındaki rüzgar şiddet ve yön verileri girilmiştir.  $\Phi$  geri besleme matrisi 5. mertebeden AR modelin katsayıları kullanılarak belirlenmiştir.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.0336 & -0.0794 & 0.0346 & -0.0319 & 0.0183 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

Sistem gürültüsünün kovaryans matrisi,  $Q$ ,

$$Q = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5000 \end{bmatrix} * 10^{-4}$$

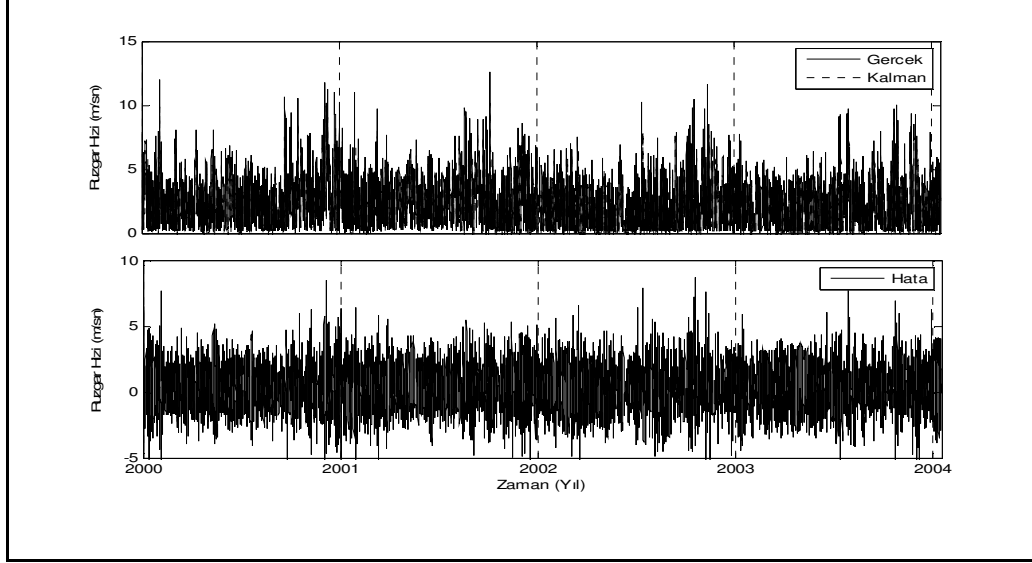
olarak seçilmiştir.

Ölçme gürültüsünün kovaryans matrisi  $R$  değeri 0.001,  $C$  geri besleme katsayısının değeri ise  $1 \times 5$ ’lik bir matris olarak,  $[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$  alınmıştır.

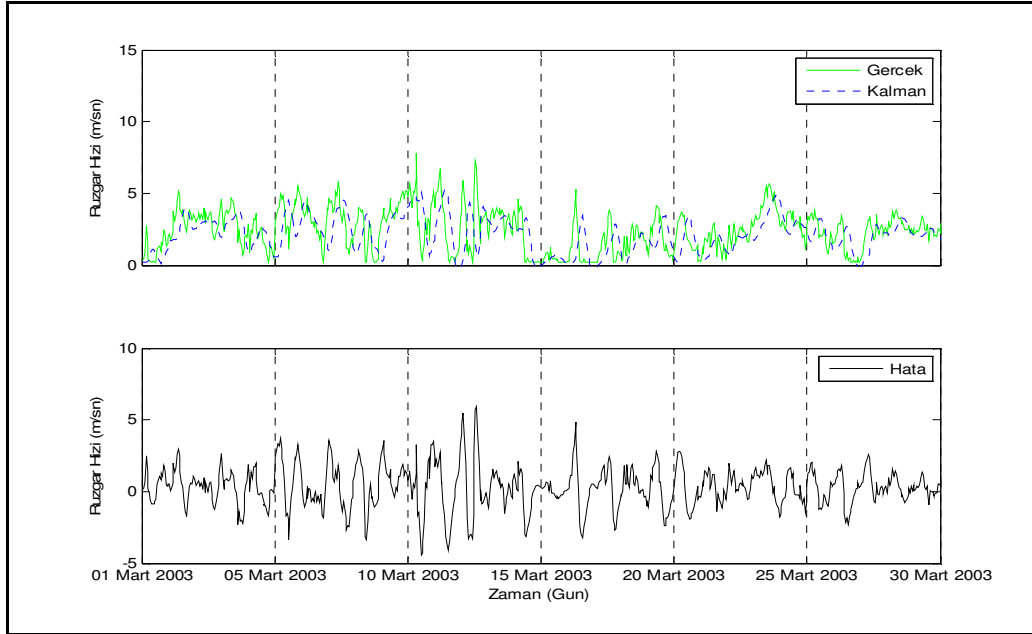
Kalman filtresi ile önceki değerlerden yola çıkarak bir sonraki anın tahmini yapılmış ancak, ölçüm serisi ile tahmin serisi karşılaştırıldığında elde edilen sonuç, filtrenin tek başına tahmin için kullanılmasının yeterli olmayacağını göstermiştir.



*Rüzgar Şiddeti Verisi:* Ölçüm verisi ile tahmin verisi arasındaki  $R^2$  % 24.7 olarak bulunmuştur. Bütün verinin filtre sonuçları ile hata payını gösterdiğimizde, Şekil 7.1'de de görüldüğü gibi zaman serisinin uzunluğu nedeniyle açık olarak gerçek ile tahmin arasındaki fark görülmemektedir. Daha net görülmesi için 1 aylık veri içeren Şekil 7.2 incelenebilmektedir.

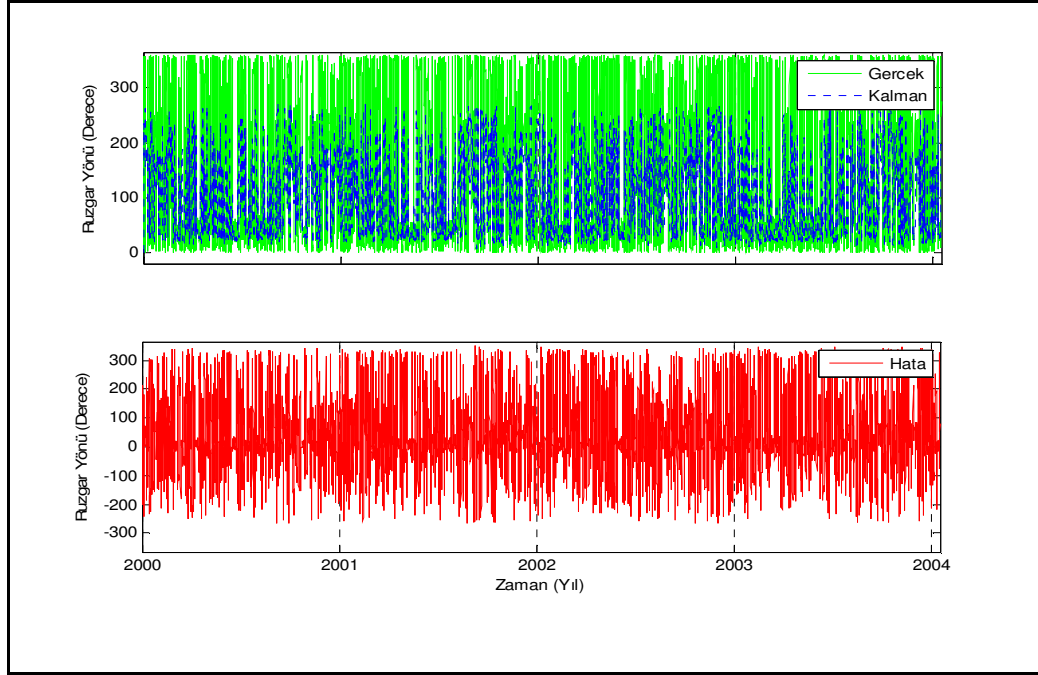


**Şekil 7.1:** Kalman filtresi ile rüzgar şiddeti ölçüm değerlerinin tamamının zaman serisi halinde gösterimi

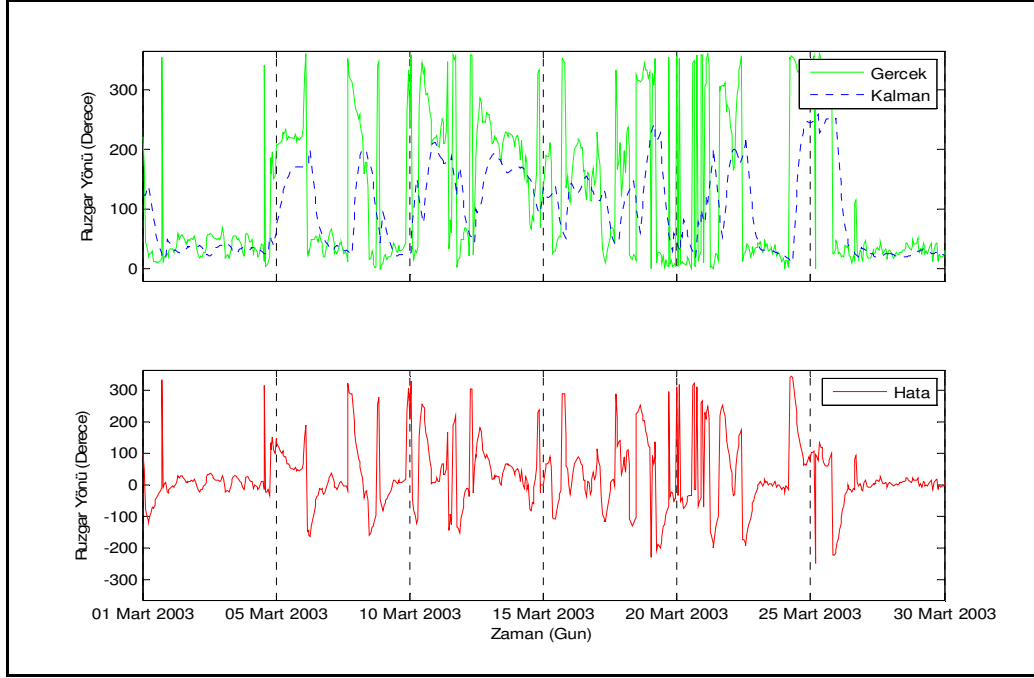


**Şekil 7.2:** Bir aylık rüzgar şiddeti verisi ile KF tahmin verisinin karşılaştırılması

*Rüzgar Yönü Verisi:* Ölçüm verisi ile tahmin verisi arasındaki  $R^2$  % 25.4 olarak bulunmuştur. Rüzgar şiddeti tahmini için bulunan değerden %0.7 daha yüksek bir  $R^2$  olduğu görüldüğü için, KF'nin yön tayininde az bir oranla da olsa, daha uygun sonuçlar verdiği söylenebilir. Şekil 7.3 ve 7.4'de yön için koşulmuş olan KF ve ölçülen yön verilerinin kıyaslaması ve aralarındaki hata payının gösterimi görülmektedir.



**Şekil 7.3:** Kalman filtresi ile rüzgar yönü ölçüm değerlerinin tamamının zaman serisi halinde gösterimi.

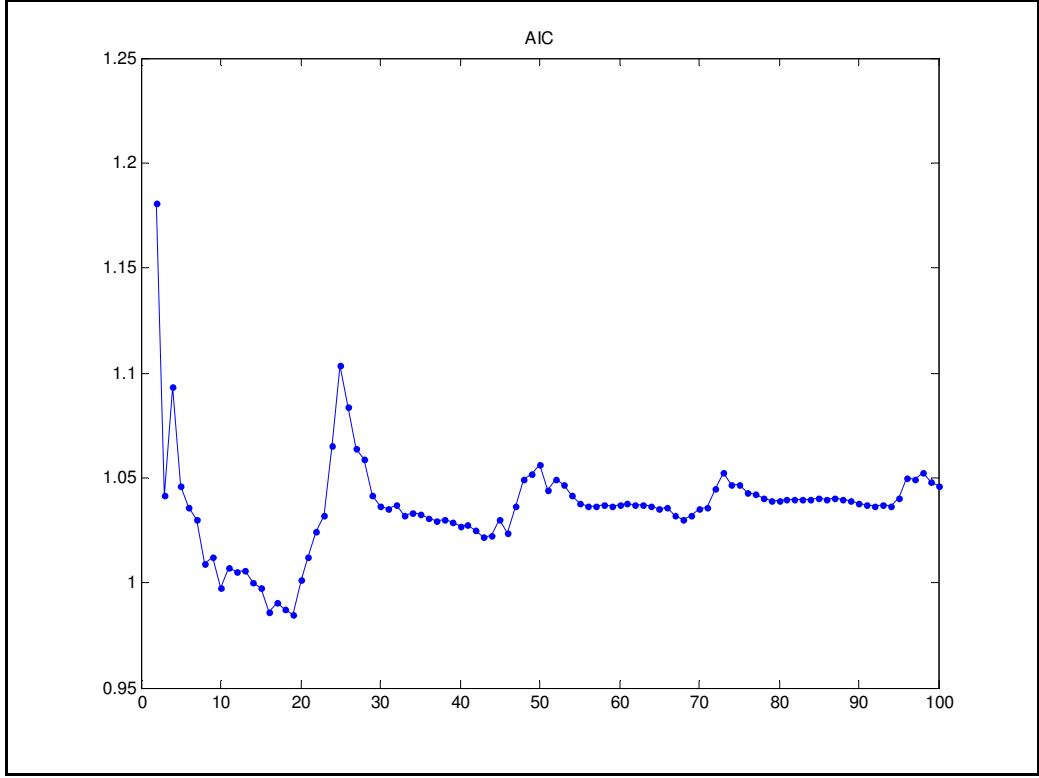


**Şekil 7.4:** Bir aylık rüzgar yönü verisi ile Kalman Filtresi'nin tahminlerinin karşılaştırılması.

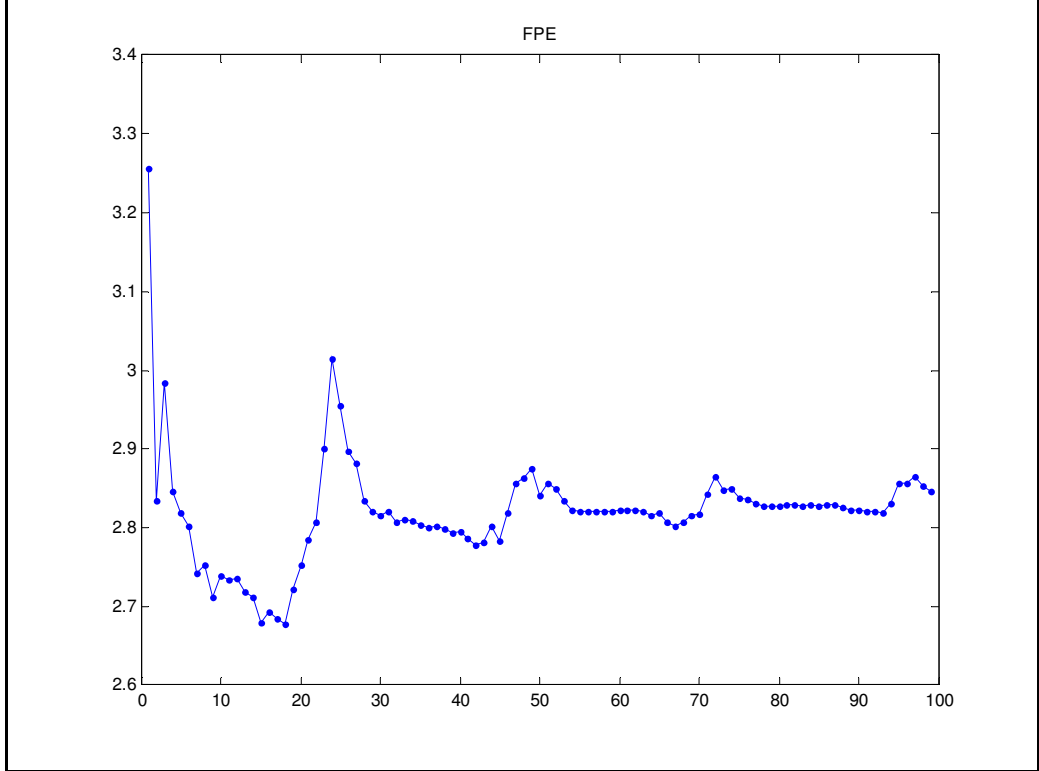
Şekil 7.2 ve Şekil 7.4'ten de görüldüğü gibi, KF zaman serisini takip etmekte başarılıdır ancak anlık veriden hareketle bir sonraki verinin tahmininde yeterince başarılı olmamaktadır. KF işaretin  $t$  ve  $t-1$  anındaki değerlerinden hareket ederek,  $t+1$  anında alacağı değeri tahmin etmektedir. Bu nedenle, Şekil 7.2'de de görüldüğü gibi, genel olarak KF işarete iyi adapte olur ancak, işaretin karakteristiğini öğrenmez.

## 7.2 AR Modeli ile Yapılan Tahminin Sonuçları

*Rüzgar Şiddet Verisi:* AR Modeli iki ayrı zaman serisi için yapılmıştır. Öncelikle, 02.03.2000 ile 01.03.2003 arasındaki rüzgar şiddeti verisi, model mertebesinin ve katsayılarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Model Mertebesi, 1'den 100'e kadar belirtilen aralıktaki veri kümesi için denenmiş ve ilk 100 mertebede *Akaike Information Criterion* AIC ve *Final Prediction Error* FPE'a göre en küçük hatanın 19. mertebede elde edildiği görülmüştür (Sırasıyla Şekil 7.5 ve Şekil 7.6).



Şekil 7.5: AIC ile ilk 100 mertebede elde edilen sonuçlar.



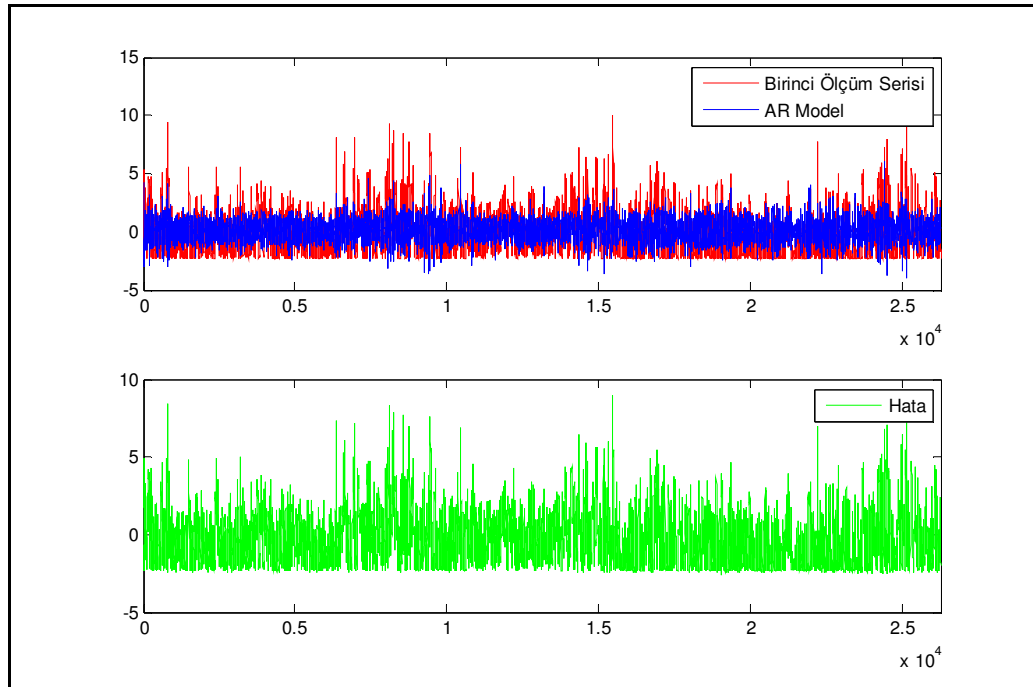
Şekil 7.6: FPE ile ilk 100 mertebede elde edilen hata sonuçlar

AIC ve FPE ile model mertebesi (19. Mertebe) belirlendikten sonra, elimizdeki 3 yıllık veriden belirlenen model mertebesine göre, Yule-Walker Metodu ile modelin katsayılar matrisi tespit edilmiştir. MATLAB’da koşulan algoritma ile hesaplanan katsayılar matrisi,

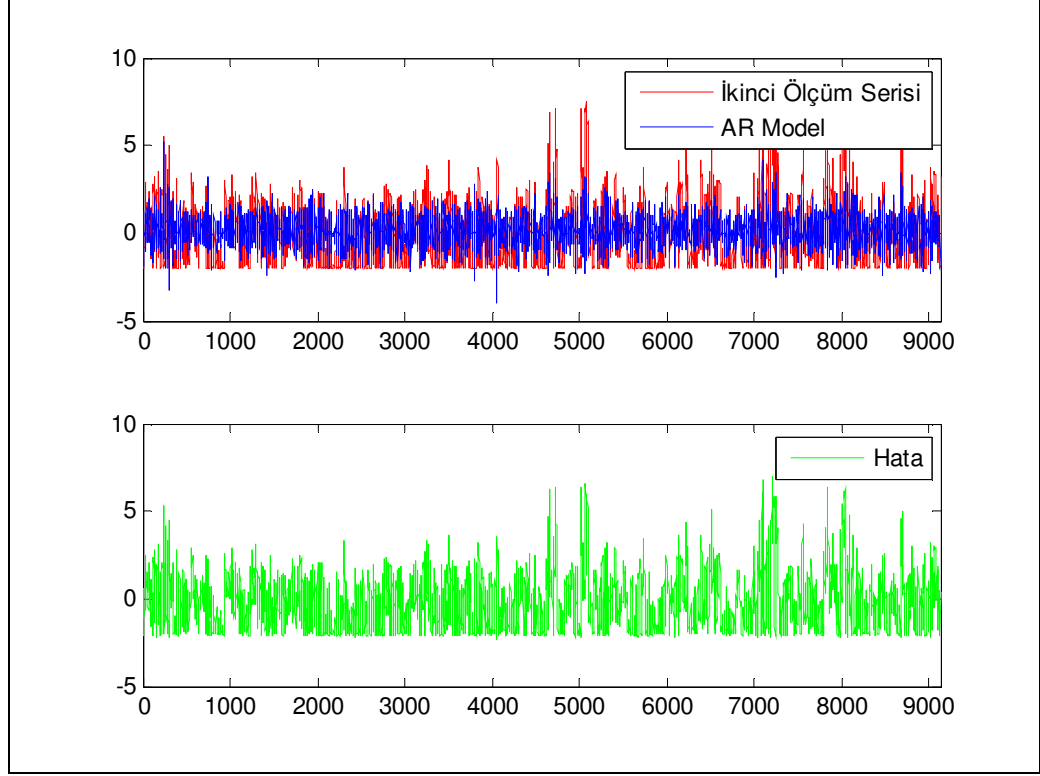
$$A = \begin{bmatrix} -0.9873 & 0.0730 & -0.0329 & 0.0256 & 0.0049 & 0.0014 & 0.0176 & -0.0050 \\ 0.0157 & -0.0131 & 0.0013 & -0.0035 & 0.0067 & 0.0006 & 0.0145 & -0.0114 & -0.0015 \\ 0.0001 & -0.0560 & & & & & & & \end{bmatrix}$$

olarak bulunmuştur.

Model mertebesinin belirlenmesi ve bulunan model mertebesine göre katsayıların hesaplanması için kullanılan 02.03.2000 ile 28.02.2003 aralığındaki ortalama değeri çıkarılmış veri ile bulunan AR modeli serisi Şekil 7.7’de görülmektedir. AR Modeli ile ölçüm verisi arasındaki  $R^2$  %15.78 olarak tespit edilmiştir. 01.03.2003 ile 31.05.2004 aralığındaki ortalama değeri çıkarılmış ölçüm verisi ile, bulunan AR Modeli’ne ilgili aralığın tahminine ilişkin iki zaman serisi Şekil 7.8’de görülmektedir. Ölçüm verisi ile tahmin verisi arasındaki  $R^2$  ise %15.39 dur.

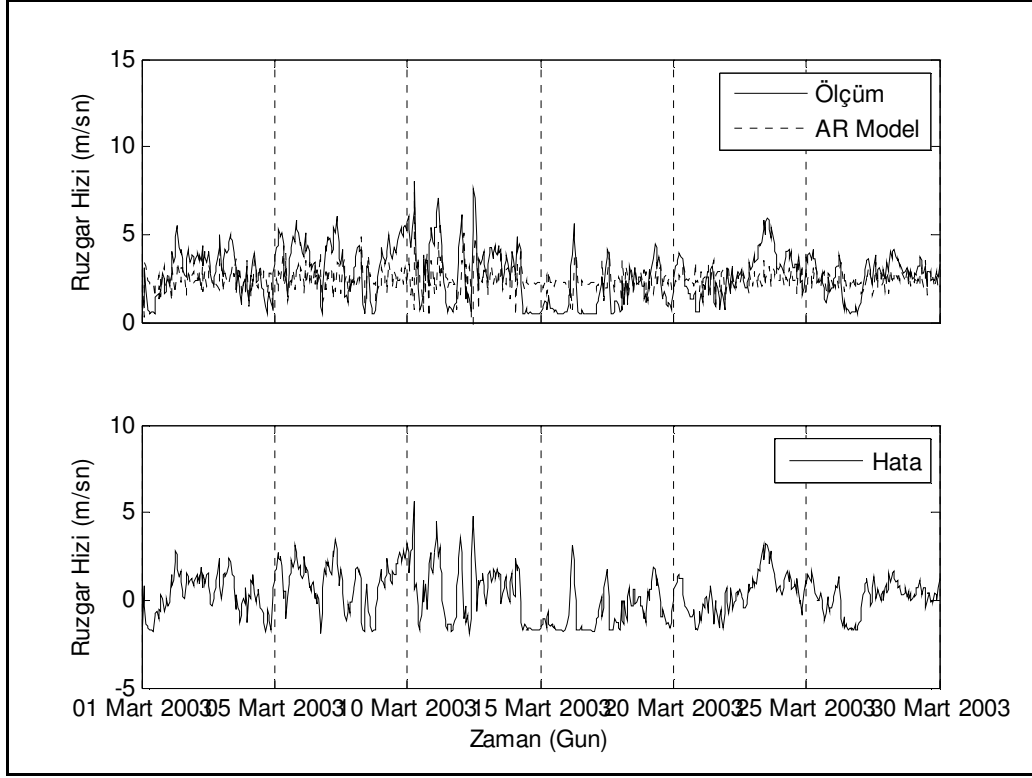


**Şekil 7.7:** İlk ölçüm serisi ile AR Modeli serisinin kıyaslaması ve hata.



**Şekil 7.8:** İkinci ölçüm serisi ile AR modeli serisinin kıyaslaması ve hata.

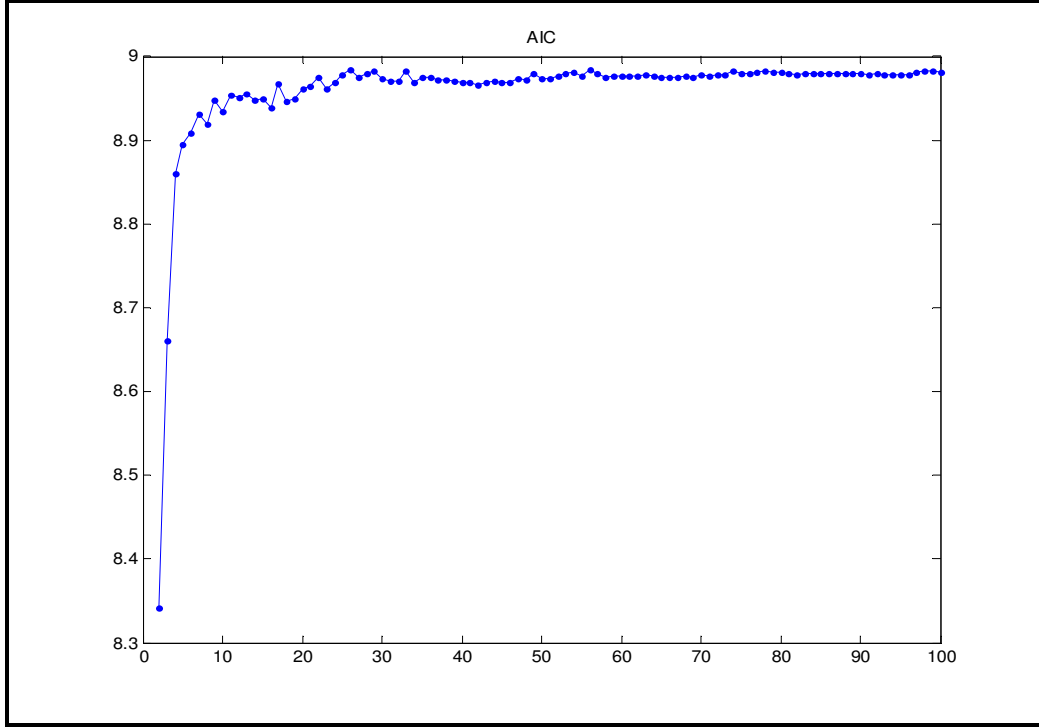
Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'den de görüldüğü gibi, verinin uzunluğu nedeniyle ölçüm serisi ile AR Modeli arasındaki fark tam olarak görülememektedir. KF'de alınan kıyaslama aralığı olan 01.03.2003 ile 30.03.2003 aralığı, ölçüm verisi ile AR Model arasındaki fark Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Daha net olması açısından, Şekil 7.9'daki veriler rüzgar şiddetinin ortalamasını içermektedir.



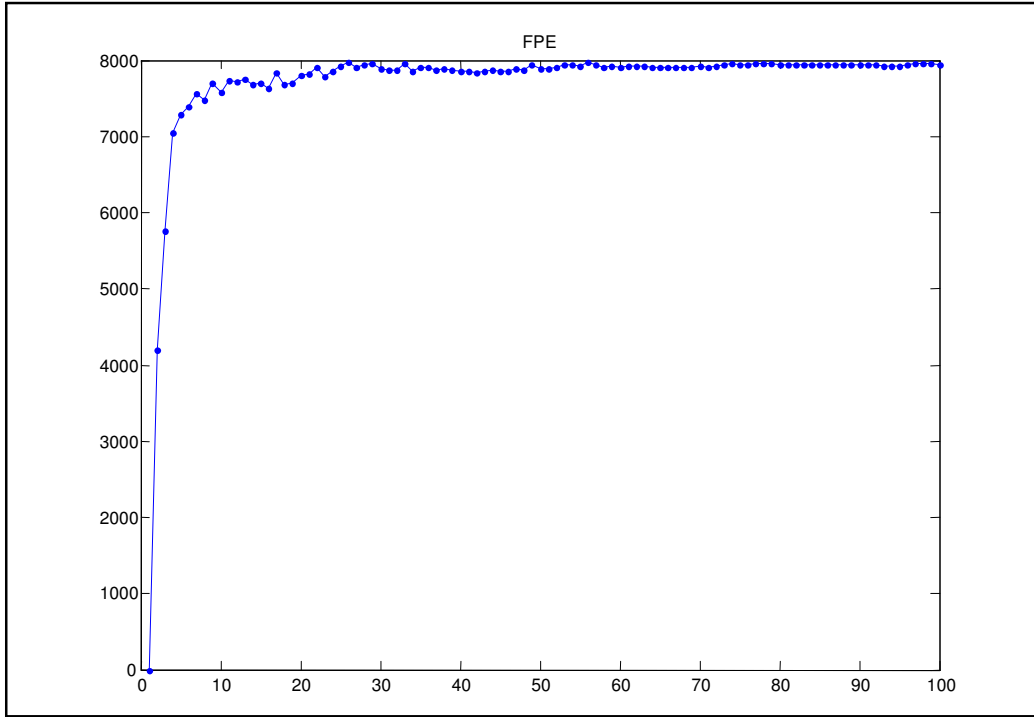
**Şekil 7.9:** Mart 2003'e ait ölçüm verisi ve AR modeli ile aralarındaki fark.

Girişinde beyaz gürültü olan bir sistemin modellendiği varsayılarak geliştirilen AR Modelinin başarımı, modellenmek istenilen işaretin beyaz gürültüye olan yakınlığına bağlıdır. AR Modeli ile ölçüm serileri arasındaki  $R^2$  değerlerinin %15.78 ile %15.39 olarak bulunmasının sebebi, ölçüm serisinin beyaz gürültüden uzak olmasıdır. Bu çalışmada da yapıldığı gibi, işaretin modellenmesi için ortalama değer işareten çıkarılarak beyaz gürültüye yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Kalman Filtresi ile yapılan tahmin için  $R^2$  %24.7, AR Modeli için ise %15.58 tespit edilmiştir. Bu sonuca göre Kalman Filtresinin, AR Modeli'ne göre daha uygun olduğu söylenebilir.

*Yön Verisi.* Rüzgar şiddeti için koşulmuş aynı algortima, yön verisi için de MATLAB'de koşulmuştur. Bulunan sonuçların, rüzgar şiddeti için bulunan sonuçlardan çok farklı olduğu görülmüştür. Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de sırayısla görünen AIC ve FPE kriterlerinin sonuçlarına göre bulunan model mertebesi 2'dir.



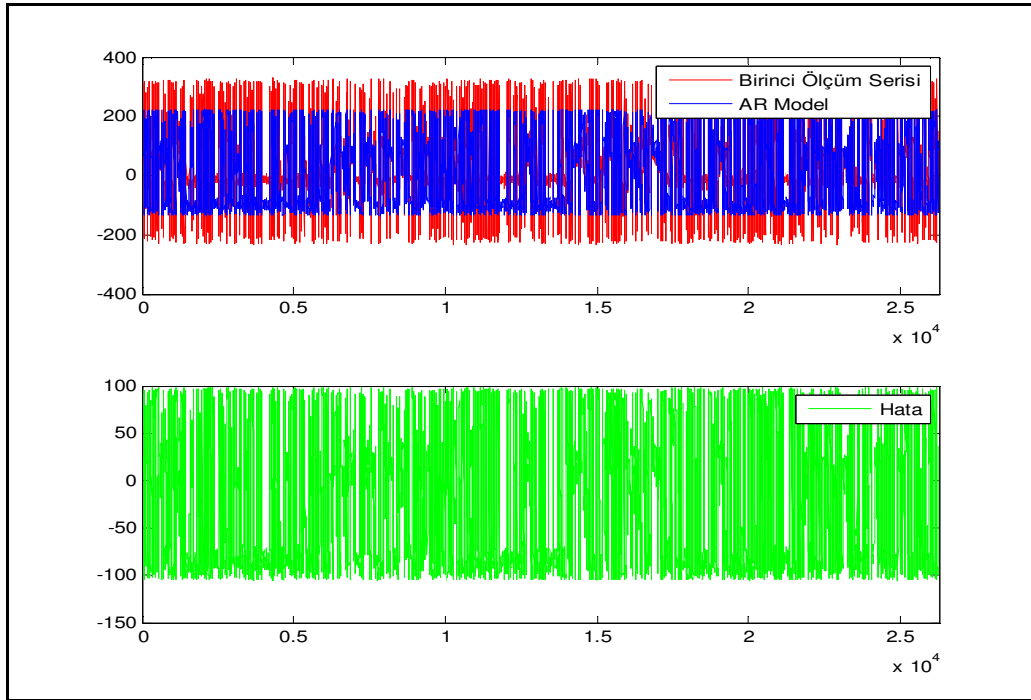
Şekil 7.10: AIC'ye göre model mertebesi tespiti.



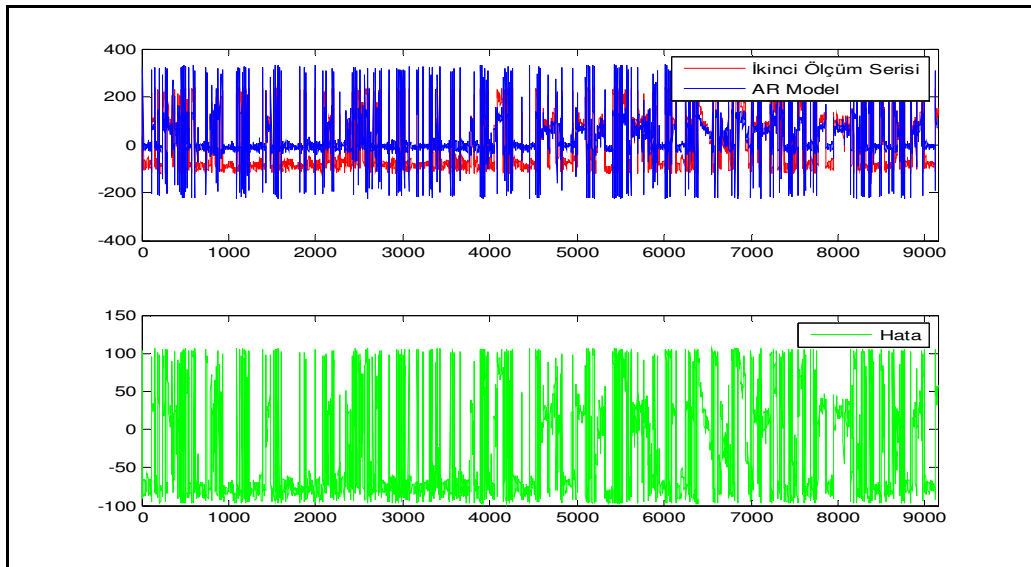
Şekil 7.11: FPE'ye göre model mertebesi tespiti.



İkiye bölünmüş zaman serisinden birinci seri ile AR Model'in  $R^2$ 'si %61.78, ikinci seri ile AR Model'inki ise %61.65 olarak bulunmuştur. Ölçüm serisi ile AR Model'in ortalama değerlerinin çıkarılarak birlikte Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'te verilmiştir.

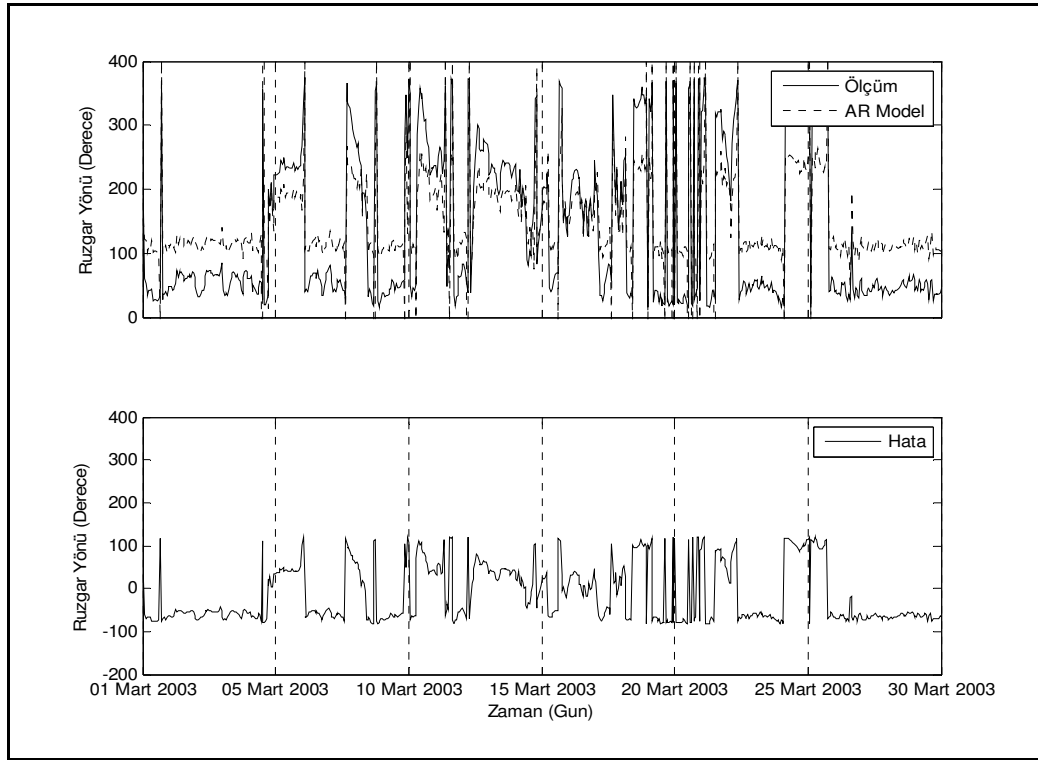


**Şekil 7.12:** Birinci seri ile AR model'in birlikte görünüşü ve hata.



**Şekil 7.13:** İkinci seri ile AR model'in birlikte görünüşü ve hata.

AR Model ile ölçüm serisi arasındaki farkın daha iyi görülebilmesi için, Mart 2003'e ait ölçüm verisi ve bu döneme ait AR Model'i tahmini Şekil 7.14'te verilmiştir.

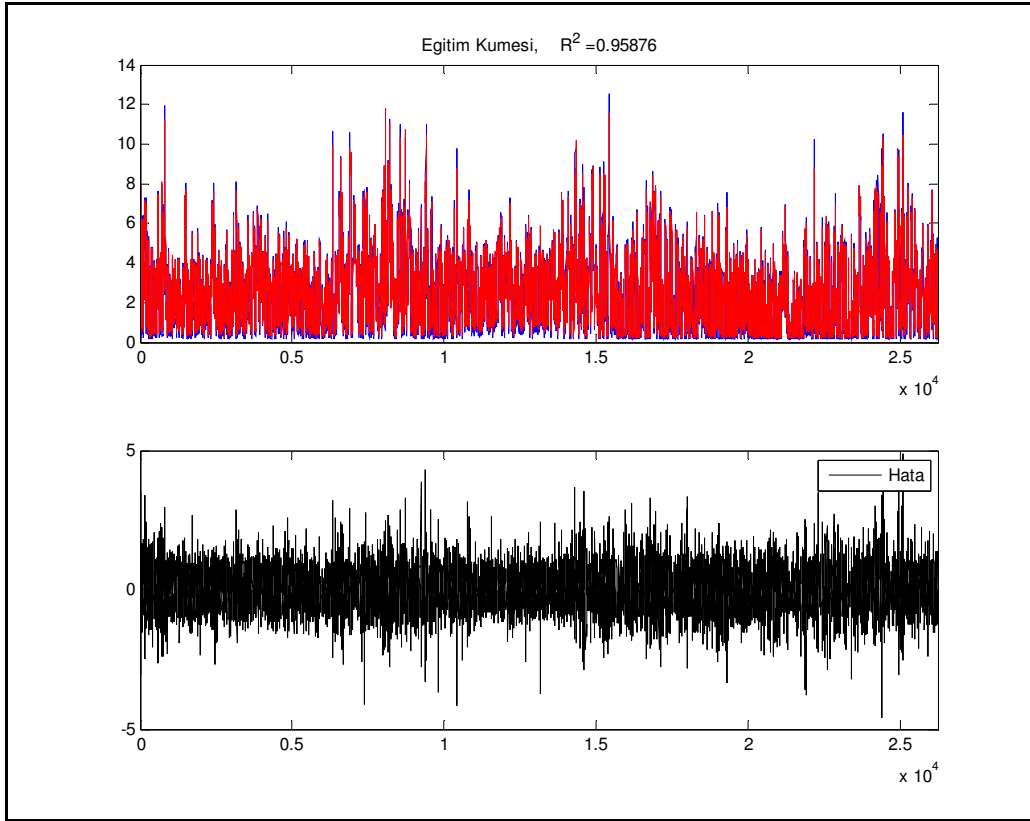


**Şekil 7.14:** Mart 2003'e ait ölçüm verisi ile AR modeli ve aralarındaki hata.

AR Modeli, şiddet tayininde ortalama %15.58'lik bir uyum yakalamış ancak yön tayinindeki uyum ortalama %61.71'e yükselmiştir. Bu da AR Model'in rüzgar şiddeti tayininde yeterli olmadığı ancak yön tayininde kullanılabileceğini göstermiştir. Yön tayini için kullanılan KF'ndeki uyumluluk ise %25.4 olup, AR Modeli'nden çok daha az uyum sağladığı söylenebilir. Bu sonuçta, rüzgar yön verisinin şiddet verisine göre beyaz gürültüye olan benzerliğinin de daha yüksek olmasının etkisi vardır.

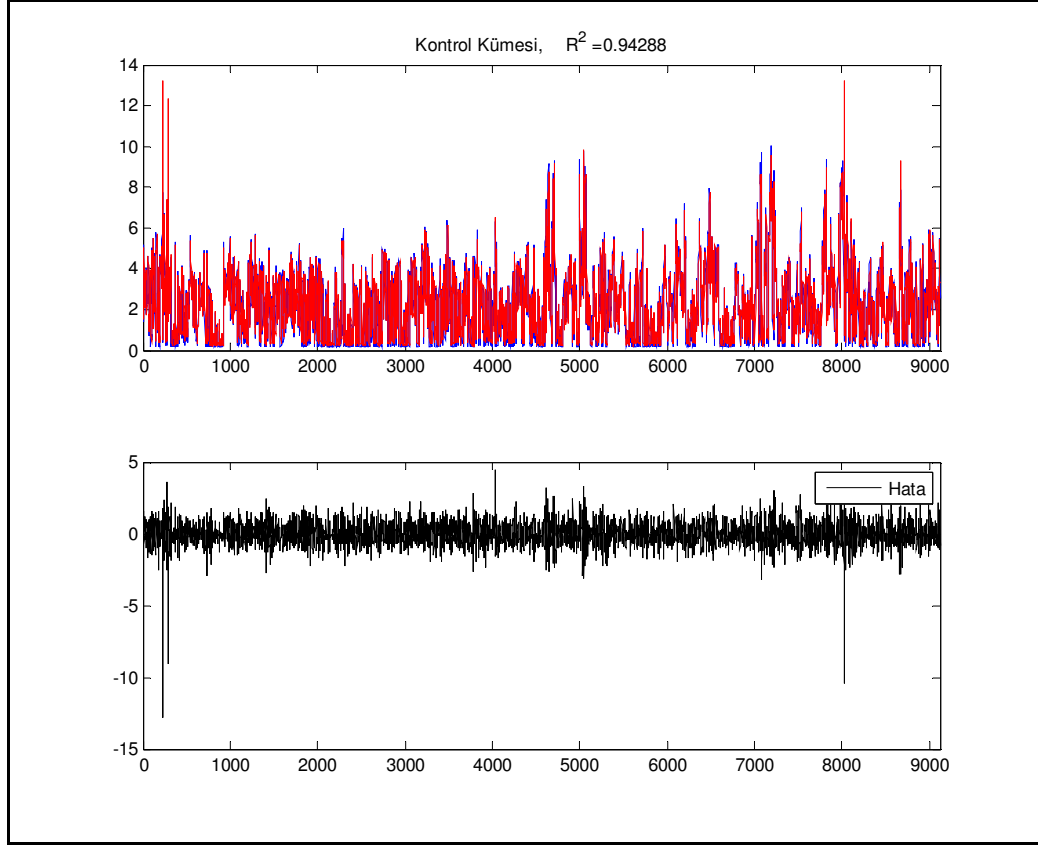
### 7.3 Yapay Sinir Ağları ile Yapılan Tahminin Sonuçları

Bu çalışmada kullanılmış olan yapay sinir ağı (YSA) ileri beslemeli ve tek gizli tabaka içeren bir ağıdır. YSA'nın giriş tabakasındaki nod sayısı, AR Modeli'nde AIC ve FPE ile belirlenen kriter doğrultusunda bulunan model mertebesi sırayla 19 ve 18 olarak bulunmuş, hesaplarda 19. mertebe dikkate alınmıştır. Bu nedenle giriş tabakasındaki nod sayısı 19'dur. Gizli tabakada, ileri doğru azalan bir geometri seçildiğinden dolayı  $(\text{nod sayısı} + 1) / 2 = \text{gizli tabakadaki nöron sayısı}$  olacak şekilde, nöron sayısı 10'dur. Çıkış tabakasında ise bir nöron bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan eğitim algoritması, yaygın bir kullanımı olan Levenberg-Marquard Metodu'dur. Sonuç değerleri MATLAB'de koşulan algoritma ile 500 iterasyon sonucunda bulunmuştur. Ölçüm serisi Kalman ve AR Modeli'nde ikiye ayrılan ölçüm serisi, olduğu gibi ikiye ayrılmıştır. İlk 3 yılı kapsayan veri, eğitim kümesi olarak kullanılmıştır. Eğitim kümesinin gerçek ölçüm ile olan  $R^2$  değeri %95.87 olarak hesaplanmıştır. Eğitim kümesi ile ölçüm serisinin kıyaslanması ve aralarındaki fark Şekil 7.15'te görülmektedir.



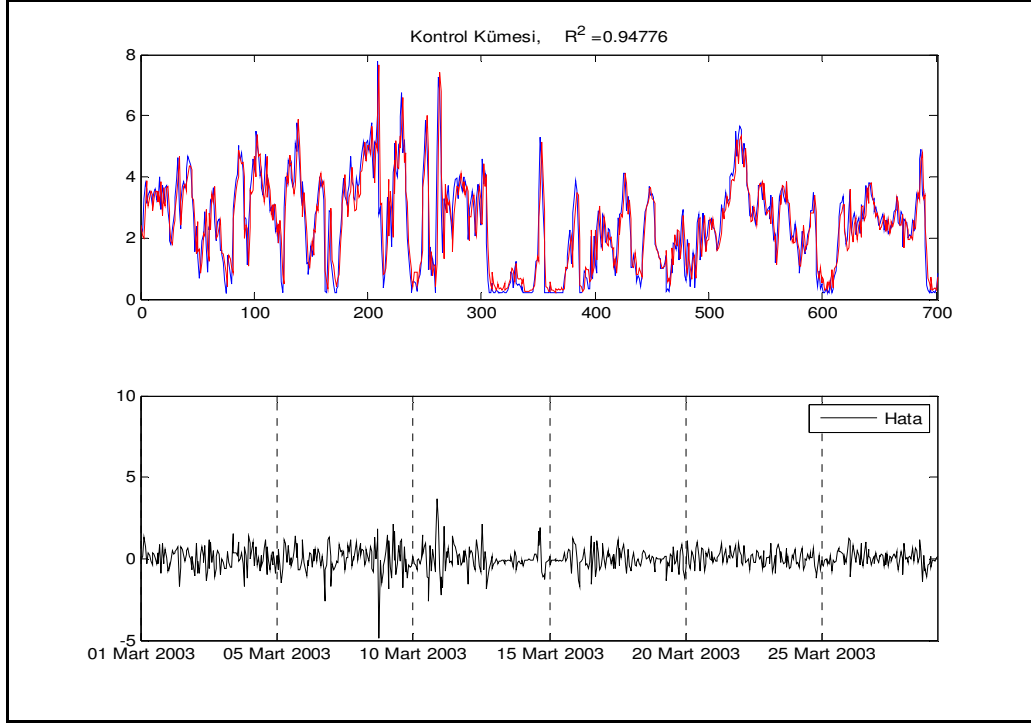
Şekil 7.15: Eğitim seti (ölçüm ve YSA modeli) ile aralarındaki fark.

Eğitim kümesindeki veriler ile eğitilen YSA Modeli, kontrol kümesindeki verilerle karşılaştırılarak %94.28 başarıml gösterdiği görülmüştür Şekil 7.16.



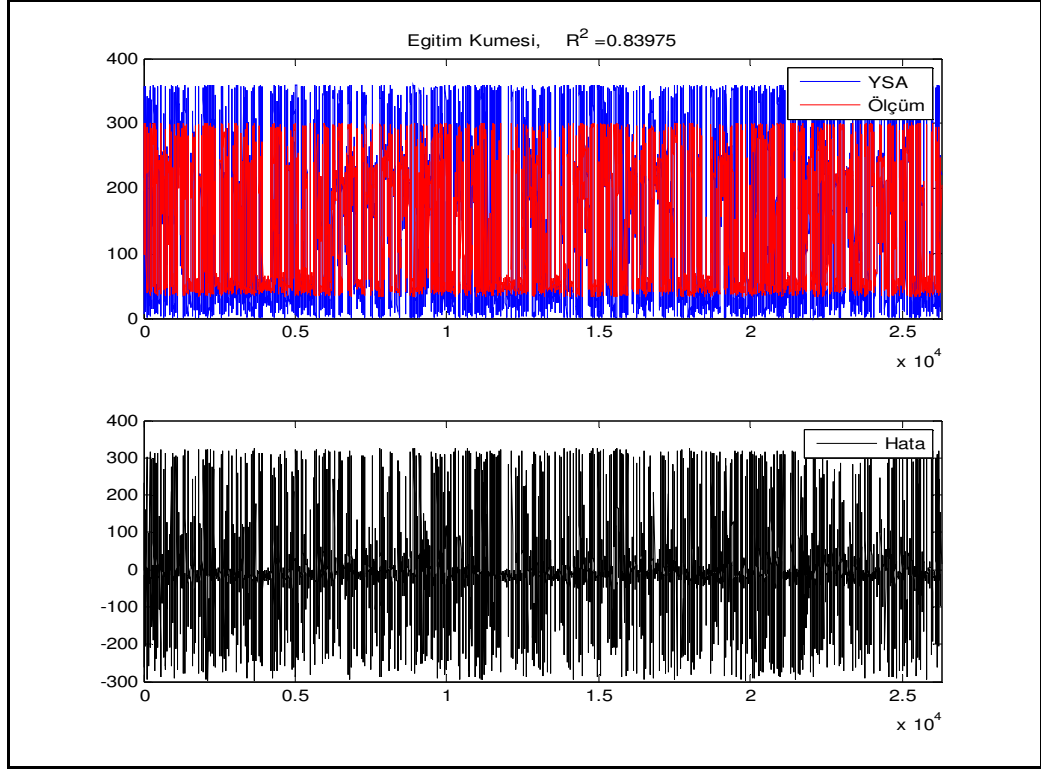
**Şekil 7.16:** Kontrol kümesi ve YSA ile ölçüm verisi arasındaki fark.

Kalman ve AR Model için yapıldığı gibi, YSA'da da daha iyi görülmesi için, Mart 2003 dönemine ait ölçüm verisi ile YSA ve aralarındaki fark (hata) Şekil 7.17'de verilmiştir.

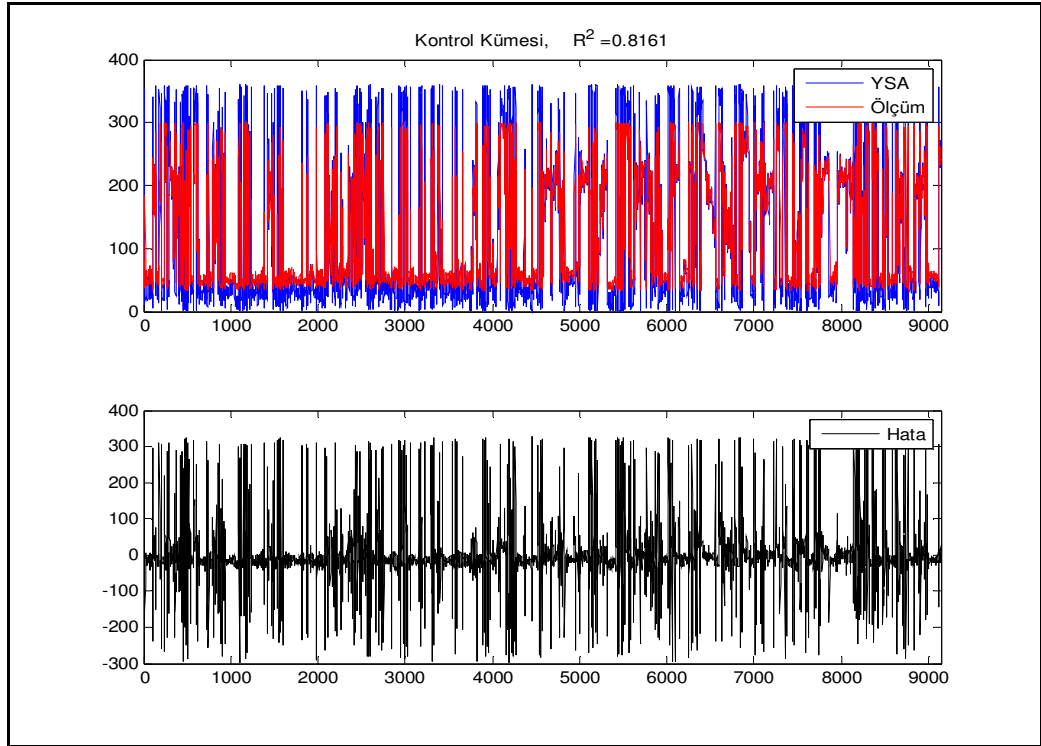


**Şekil 7.17:** Mart 2003 dönemine ait ölçüm verisi ile YSA'nın kıyaslaması ve aralarındaki fark (hata).

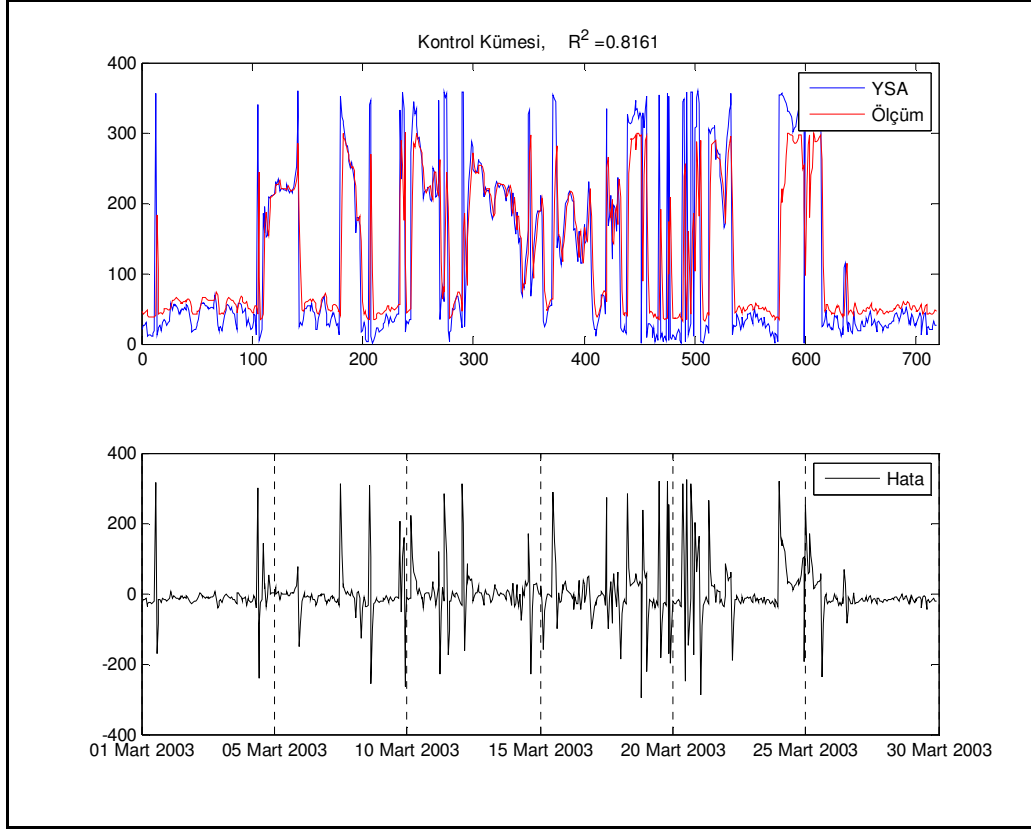
Rüzgar şiddeti için yapılan bu çalışma, aynı şekilde rüzgar yönü için de yapılmıştır. Rüzgar yönü ölçüm verisi ile eğitim setindeki YSA arasındaki  $R^2$  %83.97 olarak, kontrol seti ile  $R^2$  ise % 81.61 olarak bulunmuştur. Kontrol setindeki ölçüm verisi ile YSA ve eğitim setindeki ölçüm verisi ile eğitim setinde oluşturulan YSA tahmin serisi, sırasıyla Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da gösterilmektedir. Ayrıca, kontrol kümesi için Mart 2003 dönemine ait ölçüm verisi ile YSA ve arasındaki fark (hata) Şekil 7.20'de verilmiştir.



Şekil 7.18: Eğitim seti ve ölçüm ile YSA arasındaki fark.



Şekil 7.19: Kontrol seti ve ölçüm verisi ile YSA tahmini arasındaki fark.



**Şekil 7.20:** Mart 2003 dönemine ait ölçüm verisi ve YSA tahmini ile aralarındaki fark.

Yapay sinir ağları işaretin doğasını (karakteristiğini) öğrendikleri için istatistik yapısı az değişen zaman serilerinin öngörüsünde daha yüksek başarımlar gösterirler. YSA'lar AR Modelleri gibi bir sistem modeli olmadıkları için girişlerinin beyaz gürültüye yakın olması ve işaretin ortalama değerinin sıfır olmasına ihtiyaç göstermezler. Bütün bu özelliklerinin yanı sıra nonlineer yapılarından kaynaklanan yüksek gürültü toleransları da sinir ağlarına büyük bir avantaj sağlamaktadır.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. İTÜ Maslak Meteoroloji İstasyonuna ait rüzgar verisi incelendiğinde, 10m'de ortalama rüzgar şiddetinin 2.5 m/sn, Weibull dağılımı dikkate alınarak ortalaması 2.61 m/sn şekil parametresi (k) 1.63 ve ölçek parametresi 2.92 m/sn olarak bulunmuştur. 18 m Hub yüksekliğinde ortalama güç yoğunluğu  $28 \text{ W/m}^2$  dir. Bu değerler bölgeye yakın Kumköy Meteoroloji İstasyon verisi ile karşılaştırıldığında (4.5 m/sn,  $123 \text{ W/m}^2$ ) arada büyük fark olduğu görülmektedir. Seçilen bölgenin yoğun yapılaşma alanında bulunmasının yüksek rüzgar potansiyelini engellediği görülmektedir.
2. Ölçüm istasyonundaki hakim rüzgar yönünün kuzeykuzeydoğu (NNE) yönünde ve bu yönde esme sıklığının %32 olduğu görülmektedir.
3. Arazi yüksek ormanlık ve yoğun yüksek yapılaşma bölgesi olduğu için gölgeleme etkisi ve pürüzlülük faktörü ileri seviyededir. Bu nedenle akım önemli oranda ayrışmakta ve profilde bozunumlara neden olmaktadır.
4. Saatlik rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerlerinin, ısınmanın maksimum olduğu gündüz saatlerinde gece saatlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.
5. Aylık dağılım incelendiğinde kış aylarında rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu değerlerinin yaz aylarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Maksimum, Şubat 2.97 m/sn  $13.10 \text{ W/m}^2$ ; Minimum, Eylül 2.04 m/sn  $4.24 \text{ W/m}^2$ ). Yaz ayları içinde ise Ağustos ayında diğerlerine göre daha yüksek ortalama (2.41 m/sn,  $7 \text{ W/m}^2$ ) gözlemlenmektedir. Bu durum geniş ölçekli basınç paternlerinin sonbahar-kış döneminde içinde bulunduğu enlemler üzerindeki etkisi nedeniyledir.
6. İstanbul'un her iki tarafı denizle çevrili olması nedeniyle yazın termal etkileşime bağlı olarak oluşan deniz meltemi bileşeni katkısına rağmen incelenen ölçüm bölgesinde yüksek yapılaşma nedeniyle bu etki görülmemektedir.



7. 2000-2004 yılları arasındaki dağılım farkı bölgeyi etkileyen meteorolojik sistemlerdeki değişimlerle ilişkilidir.
8. Ölçüm seviyesindeki rüzgar şiddetinin düşey dağılımını belirlemek için güç kanununa göre yapılan ekstrapolasyon, ölçüm sonuçları ile %96.5'lik bir uyum göstermektedir.
9. Akış alan modeli kullanılarak oluşturulan rüzgar ve güç dağılım haritalarına göre, rüzgar ve güç yoğunluğu değerlerinin termal etkileşimin görüldüğü ve akım bozulmasına neden olan yapılaşmanın olmadığı bölgelerde daha yüksek olduğu görülmektedir.
10. İncelenen bölge, rüzgar enerjisinden ticari amaçlı elektrik üretimi açısından elverişli bir bölge değildir. Enerji üretimi açısından ortalama rüzgar şiddetinin minimum 6.5 m/sn olması beklenmektedir. Ancak, bu çalışmada İTÜ Enerji Enstitüsü'nde yer alan iki küçük ölçekli türbinin üretimleri hesaplanmış olup, kurulu sistemin amacı dersliklerin bir kısmının aydınlatılması ve küçük rüzgar türbinlerinin uygulamalı eğitim çalışmalarının yürütülmesidir. Bu nedenle, bu çalışmanın kapsamında tahmini yıllık üretim değerleri hesaplanmış ancak ticari bir kaygı ile hareket edilmemiştir.
11. Akış alanını modellemek üzere kullanılan WAsP ve WindPro modelleri arasında rüzgar şiddeti açısından 0.8 m/sn, güç yoğunluğu açısından ise  $10 \text{ W/m}^2$  lik bir fark mevcuttur. Her iki modelin performansının belirlenmesi seçilen iki farklı ölçüm istasyonunda eş zamanlı ölçümü gerektirir. Bu duyarlılık testleri türbinin kurulduğu sahadaki ölçüm verisi olmadığı için bu çalışma yapılamamıştır. İleride yapılması planlanmaktadır.
12. Hem rüzgar şiddetinin hem de yönünün öngörüsünde en iyi model olarak YSA bulunmuştur. Bu yüksek başarımın sebebi, YSA'nın yüksek gürültü toleransı ve işaretin doğasını öğrenmesidir.
13. AR Model rüzgar yönünün öngörüsünde %61.65'lik bir başarımlı gösterirken rüzgar şiddetinde ancak %15.39'luk bir başarımlı göstermektedir. Bunun sebebi rüzgar şiddetinin yeterince beyaz gürültü karakterli bir işaret olmamasıdır. Rüzgar yönü beyaz gürültüye çok daha yakındır.
14. Kalman Filtresi hem şiddet hem de yön öngörüsünde birbirine yakın başarımlı göstermiştir. Başarımlının yüksek olmamasının sebebi filtrenin işaretin doğasını

öğrenmemesi, sadece bir önceki ve o anki işarete bakarak değişime adapte olmasıdır.

15. AR Modelinde işaretin ortalama değerinin sıfır olması gerektiği için işareten ortalama değeri çıkartarak modele vermek gerekir. YSA ve Kalman Filtresi bu işlemi gerektirmezler. Bu durum da AR Model için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu çalışmada kullanılmış olan AR model, YSA ve Kalman Filtresi'nin rüzgar şiddeti ve yönü için öngörü başarımları ( $R^2$ ) değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

**Çizelge 8.1:** Modellerin başarımı

	$R^2$	
	Rüzgar Şiddeti	Rüzgar Yönü
Kalman	24.70%	25.40%
AR	15.39%	61.65%
YSA	94.28%	81.61%

Dinamik modelleri kullanmak için mezo ölçekli hava tahmin modellerinin hassasiyetle çalıştırılması gerekmektedir. Bunun için insan ve bilgisayar alt yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Model sonucunda alınan veriler anlık olarak küçük ölçekte sonuç veren diagnostik akış alan modellerinde girdi verisi olarak kullanılmaktadır. Oysa, bu tür diagnostik modeller (WAsP, WindPro) akımın Weibull dağılımını esas alan iklimsel veriyi kullanmaktadır. Sayısal tahmin modelinden alınan anlık verinin diagnostik modellere uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada istatistiksel tahmin yöntemleri kullanılmıştır.

Enerji planlamalarının sağlıklı yapılabilmesi için kısa ve uzun periyotlu rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğu tahminlerinin hem dinamik modeller ve hem de istatistiksel modeller birlikte kullanılarak yapılmasını gerektirmektedir. Bu ise daha kapsamlı bir çalışmanın ürünü olacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Malkoç Y.**, 2007. Türkiye Elektrik Enerjisinin Karşılmasında Rüzgar Enerjisinin Yeri, EİE İdaresi Genel Müdürlüğü, Sayı 3, Sayfa 45-50.
- [2] **Aslan, Z., Menteş, S., Tolun, S. ve Yükselen, M. A.**, 1994. Global Wind Energy Assessment of Turkey and A Case Study in the Northwest, *Energy with All Aspects in 21<sup>st</sup> Century Symposium*, İstanbul, Nisan 28-30.
- [3] **Tolun, S., Menteş, S., Aslan, Z. ve Yükselen, M. A.**, 1995. The Wind Energy Potential of Gökçeada in the Northern Aegen Sea, *Renewable Energy*, **6**, Issue 7, pp 679-685.
- [4] **Migoya E., Crespo A., Jimenez A., Garcia J., Manuel F.**, 2007. Wind Energy Resource Assessment in Madrid Region, *Renewable Energy*, **32**, pp. 1467-1483.
- [5] **Kongnam, C., Nuchprayoon S., Premrudeepreechacharn, S., Uatrongjit, S.**, 2009. Decision Analysis on Generation Capacity of a Wind Park. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, pp. 2126-2133.
- [6] **Omer, M.,A.**, 2006. On The Wind Energy Resources of Sudan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, pp. 2117–2139.
- [7] **Kwon S.D.**, 2010. Uncertainty Analysis of Wind Energy Potential Assessment, *Applied Energy*, **87**, pp. 856–865.
- [8] **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.
- [9] **Chatfield C.**, 1996. The Analysis of Time Series An Introduction, Fifth Edition, Reader in Statistics The University of Bath UK Chapman and Hall/CRC, London.
- [10] **Nakamura H., Akaike H.**, 1981. Statistical Identification for Optimal Control of Supercritical Thermal Power Plants, *Automatica*, **17**, Issue 1, pp. 143-155.
- [11] **Billinton R., Bagen**, 2002. A Sequential Simulation Method for the Generating Capacity Adequacy Evaluation of Small Stand-Alone Wind Energy Conversion Systems, *Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical&Computer Engineerin*, **0-7803-7514-9/02**.
- [12] **Grewal M.S., Andrew A.P.**, 2001. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB, 2<sup>nd</sup> Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, Inc. New York.
- [13] **Maybeck P.S.**, 1979. Stochastic Models, Estimation and Control, Vol.1. Academic Press, New York.

- [14] **Welch G., Bishop G.** 2006. An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041 Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC 27599-3175 July 24.
- [15] **Linsker R.**, 2008. Neural Network Learning of Optimal Kalman Prediction and Control. [www.elsevier.com/locate/neunet](http://www.elsevier.com/locate/neunet)
- [16] **Efe M.Ö., Kaynak O.**, 2000. Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları. Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [17] **Landahl H.D., McCulloch W.S. and Pitts W.**, 1943. A Statistical Consequence of the Logical Calculus of Nervous Nets, Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol 5.
- [18] **Jain A.K., Mao J.**, 1996. Artificial Neural Networks: A Tutorial. 0018-9162/96/-IEEE, March.
- [19] **Haykin S.** 1994. Neural Networks, Prentice Hall, NJ.
- [20] **Rosenbalt R.**, 1962. Principles of Neurodynamics, Sparton Books, New York.
- [21] **M. Minsky and S. Papert**, 1969. Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry, MIT Press, Cambridge, Mass.
- [22] **Hopfield J.J.**, 1982. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. In Proc. Nat'l Academy of Sciences, USA 79, pp.2, 554- 2,558.
- [23] **Werbs P.**, 1974. Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences. PhD. Thesis, Dept of Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge, Mass.
- [24] **Rumelhart D.E. and McClelland J.L.**, 1986. Parallel Distributed Processing – Exploration in the Microstructure of Cognition, MIT Press, Cambridge, Mass.
- [25] **Anderson J.A., Rosenfeld E.**, 1988. Nuerocomputing: Foundations of Research. MIT Press, Cambridge, Mass.
- [26] **Johnson G.L.**, 2001. Wind Energy Systems. Electronic Edition, Manhattan KS, November 21.
- [27] **Golding E.**, 1976. The Generation of Electricity by Wind Power, Halsted Press, New York.
- [28] **Barutçu, B.**, 2009. Ders Notları, İTÜ.
- [29] **Menteş, Ş.S.**, 2009. Ders Notları, İTÜ.
- [30] **Rohatgi J.S. and Nelson V.**, 1994. Wind Characteristics, An Analysis of Generation of Wind Power, West Texas A&M University Canyon, Texas, USA.
- [31] **Öztürk Z.**, 2007. Tekirdağ Muratlı Bölgesindeki Rüzgar Akış Alan Modellenmesi, Rüzgar Enerji Potansiyeli Açısından Fizibilite Çalışması ve Mevcut Rüzgar Türbinleri ile Simülasyon, Bitirme Tezi, İTÜ, Mayıs 21.
- [32] **Hiester T.R. and Pennell W.T.**, 1981. The Meteorological Aspects of Siting Large Wind Turbines, U.S. Dept. of Energy, Report PNL-2522.

- [33] **Justus, C. C.** 1978. Winds and Wind System Performance, Franklin Institute Press, Philadelphia, PA.
- [34] **Counihan, J.** 1975. Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data Collected from the Period 1880- 1972. *Atmospheric Environment*, **9**, 871-905.
- [35] **Spera, D. A. (ed.)** 1994. Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, ASME Press, New York.
- [36] **Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E.,** 2001. Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, LTD. England.
- [37] **N. G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen and E. L. Petersen,** 1993. Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP). Vol. 2: User's Guide, Riso-I- 666(v.2)(EN), Ris\_ National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- [38] **Perera, M. D.,** 1981. Shelter Behind Two-Dimensional Solid And Porous Fences, J. Wind Engin, And Industrial Aerodyn. **8**.
- [39] **Katic I., Sanderholl P.** 1990. Park PC Program for Calculation of Wind Turbine Park Performance User's Guide, Department of Meteorology Riso National Laboratory.
- [40] **Tatlı H., Dalfes H.N., Menteş Ş. S.,** 2004. A statistical Downscaling Method for Monthly Total Precipitation Over Turkey. *International Journal of Climatology*, **24**, pp. 161-180.
- [41] **Menteş Ş. S. and Kaymaz Z.,** 2007. Investigation of Surface Duct Conditions over Istanbul, Turkey. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **46**, pp 318-337, March.
- [42] **Bir, A.,** 1975. "Belirgin ve Olasıl Kontrol Sistemlerinde Prediksiyon", Dr Tezi, İTÜ Elektrik Fakültesi.
- [43] **Kolmogoroff, A.,** 1941. "Interpolation und extrapolation von stationären folgen", Bull. Acad. Sci. (URSS), Ser. Math **5**, pp 11-14.
- [44] **Wiener, N.,** 1944. "The Interpolation, Extrapolation and Smoothing of Stationary Time Series", National research Committee, New York, John Wiley.
- [45] **Wiener, N.,** 1948. "Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine", New York, John Wiley.
- [46] **Kalman, R.E.,** 1960. "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Trans ASME, Series D, Journal of Basic Engineering, **82**, pp. 35-45.
- [47] **Kalman, R.E.,** 1960. "On the General Theory of Control Systems", Proceedings First International Conference on Automatic Control Systems, Moscow, USSR.

- [48] **Kalman, R.E. and Bucy, R.S.**, 1961. “New Results in Linear Filtering and Prediction Theory”, Trans ASME, Series D, *Journal of Basic Engineering*, **83**, pp. 95-108.
- [49] **Sorenson, H.W.**, 1966. “Kalman Filtering Technics” in Advances in Control Systems, C.T. Leondes ed., Academic Press, **3**, pp. 219-297.
- [50] **Phillips, R.S. and Weiss, P.R.**, 1944. “Theoretical Calculation on Best Smoothing of Position Data for Gunnery Prediction”, (Report 532), Rad. Lab. MIT, February.
- [51] **Zadeh, L.A. and Ragazzini, J.R.**, 1950. “An Extention of Wiener’s Theory of Prediction”, *Journal of Applied Physics*, **21**, pp. 645-655.
- [52] **Bode, H.W. and Shannon, C.E.**, 1950. “A Simplified Derivation of Linear Least-Squares Smoothing and Prediction Theory”, *Proceedings IRE*, **38**, pp. 417-425.
- [53] **Papoulis, A.**, 1962. *The Fourier Integral and its Applications*, McGraw – Hill.
- [54] **Schwarz, R.J. and Friedland, B.**, 1965. *Linear Systems*, McGraw – Hill.
- [55] **Kuo, B.C.**, 1967. *Automatic Control Systems*, Prentice – Hall.
- [56] **Brown R.G., Hwang P. Y.C.**, 1997. *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering With Matlab Exercises and Solutions*. Third Edition, John Wiley & Sons, Canada.
- [57] **Wiener N.** 1949. *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*, MIT Press. Massachusetts, USA.
- [58] **Dutton K., Thompson S., Barraclough B.**, 1997. *The Art of Control Engineering*. Addison-Wesley, Dorchester, England.
- [59] **Cohen, A.**, 1986. *Biomedical Signal Processing I*, CRC Press Inc., Florida.
- [60] **Shibata, R.**, 1976. Selection of the Order of an Autoregressive Model by Akaike’s Information Criterion, *Biometrika*, **63**, Issue 1, pp.117-126.
- [61] **Akaike, H.**, 1974. A New Look at the Statistical Model Identification, *IEEE Trans. Autom. Control.*, **19**, Issue 6, pp. 716-723.
- [62] **Schwarz, G.**, 1978. Estimating the Dimension of a Model, *Ann. of Stat.*, **6**, pp. 461-464.
- [63] **Kadılar, C. ve Erdemir, C.**, 2000. Vektör Otoregresyon Modellerinin Derecesinin Seçiminde Kullanılan İstatistiksel Kriterler, *Uludağ Ün. İktisadi ve İdari Bil. Fak. Dergisi*, **18**, p. 2.
- [64] **Thie, J.A.**, 1981. *Power Reactor Noise*, American Nuclear Society, Illinois, USA.
- [65] **Akaike, H.**, 1969. Power Spectrum Estimation Through Autoregressive Model Fitting, *Ann. Inst. Stat. Math.*, **21**, pp. 407-419.
- [66] **Mitra, S.K. and Kaiser, J.F. (ed.)**, 1993. *Handbook for Digital Signal Processing*, John Wiley & Sons, New York.
- [67] **Reed, R. D. and Marks II, R. J.**, 1999. *Neural Smithing: Supervised learning in feedforward artificial neural networks*, A Bradford Book, MIT Press, USA.

- [68] **Lippman R.P.**, 1987. An Introduction to computing with neural nets. *ASSP Magazine*, pp. 4-22, April.
- [69] **Kolmogorov, A. N.**, 1957. On the Representation of Continuous Functions of Several Variable by Superpositions of Continuous Functions of one Variable and Addition. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 114(5):953-956.
- [70] **Kolmogorov, A. N.**, 1957. On the Representation of Continuous Functions of Several Variable by Superpositions of Continuous Functions of one Variable and Addition. *American Mathematical Society Translations* 28, pp.55-59.
- [71] **Levenberg, K.**, 1944. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares, *Quarterly Applied Math.*, 2, pp. 164-168.
- [72] **Marquardt, D.**, 1963. An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *SIAM Journal Applied Math.*, 11, pp. 431-441.





## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad: Sevinç Rüstemoğlu**

**Doğum Yeri ve Tarihi: Kırcaali 31.10.1983**

**Adres: İstanbul**

**Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği**