

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR ATLAS ÇALIŞMALARI  
VE  
TÜRKİYE İÇİN BİR ÖRNEK UYGULAMA

79232

Makina Mühendisi Kerem TUNÇER

F.B.E.Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında  
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Orhan DENİZ

Üye: Prof. Dr. Bahri ŞAHİN

Üye: Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR

İSTANBUL, 1998

YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. RÜZGAR ATLASI ANALİZ VE UYGULAMA PROGRAMI (WASP) ..	2
2.1 WASP'ın Temel Yapısı ve Genel Açıklamalar .....	2
2.1.1 Rüzgar verilerinin tanımlanması .....	3
2.1.2 Bir konumun tanımlanması .....	3
2.1.3 Pürüzlülük tanımlanması .....	6
2.1.4 Engellerin tanımlanması .....	11
2.1.5 Karmaşık yüzey yapılarının tanımlanması .....	11
2.2 Alt Modeller ve Kullandıkları Mantık .....	11
2.2.1 Yüzey tabaka benzerlik kanunları .....	11
2.2.2 Jeostrofik sürtünme kanunu ve jeostrofik rüzgar .....	13
2.2.3 Kararlılık düzeltmesi .....	14
2.2.4 Pürüzlülük değişimi modeli .....	17
2.2.5 Perdeleme modeli .....	19
2.2.6 Orografik model .....	21
2.2.7 Rüzgar verilerinin işlenmesi .....	23
2.2.8 Weibull dağılımı .....	28
3. BİR ÖRNEK UYGULAMA .....	32
3.1 Giriş .....	32
3.2 Gerekli Veri ve İşlenmesi .....	32
3.3 Atlas İstatistikleri ve Örnek Enerji Üretim Tahmini .....	37
4. SONUÇ .....	49
KAYNAKLAR .....	50

<b>EKLER</b> .....	<b>52</b>
<b>Ek 1 Bozcaada'nın Konumu</b> .....	<b>53</b>
<b>Ek 2 W-E ve NW-SE Doğrultularında Kıyı Şelfi</b> .....	<b>54</b>
<b>Ek 3 Jeolojik Kesit</b> .....	<b>55</b>
<b>Ek 4 Bozcaada Eşyükseklik Haritası</b> .....	<b>56</b>
<b>Ek 5 NEDWIND 50 Rüzgar Türbini</b> .....	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>58</b>



## SİMGE LİSTESİ

$z_0$	Pürüzlülük uzunluğu
$h$	Pürüzlülük elemanı yüksekliği (Eşitlik 2.1)
$S$	Pürüzlülük elemanının rüzgarı gören kesiti
$A_H$	Pürüzlülük elemanları yoğunluğu (yatay alan)
$x_1$	1.pürüzlülük değişimine olan uzaklık
$x_n$	n.pürüzlülük değişimine olan uzaklık
$z_0^R$	Alan ağırlıklı pürüzlülük uzunluğu
$u(z)$	z yüksekliğindeki rüzgar hızı
$K$	Von Karman sabiti
$u_*$	$\tau$ yüzey gerilmesine bağlı sürtünme hızı (yüzey sürtünme hızı)
$\tau$	Yüzey gerilmesi
$\rho$	Hava yoğunluğu
$z$	Yerden yükseklik
$\psi$	Amirik bir değer
$L$	Monin - Obukhov uzunluğu
$T_0$	Mutlak yüzey sıcaklığı
$H_0$	Isı akısı
$c_p$	Sabit basınçtaki havanın ısı kapasitesi
$g$	Yerçekimi ivmesi
$G$	Jeostrofik rüzgar
$\alpha$	Jeostrofik rüzgar ile yüzeye yakın rüzgar arasındaki açı
$f$	Koriolis parametresi
$A, B$	Amirik sabitler
$\mu$	Kararlılık parametresi
$dH$	Yüzey ısı akısının klimatolojik ort. değeri
$z_m$	Isı akısı modülasyonlarının etkilerinin sona erdiği yükseklik
$R_0$	Yüzeyin Rossby sayısı
$\Delta H_{off}$	Ortalama ısı akısındaki değişim
$\Delta H_{rms}$	Isı akısındaki değişim
$L_{off}$	$H_{off}$ ' a karşılık gelen Monin - Obukhov uzunluğu
$F_{rms}$	Form faktörü
$\sigma_u$	Standart sapma
$W_n$	Ağırlık faktörü
$P$	Porozite (Eşitlik 2.28)
$h$	Engelin yüksekliği (Eşitlik 2.28-2.29)
$z_a$	Dikkate alınan yükseklik (anemometre yüksekliği)
$x$	Akış doğrultusundaki mesafe
$\chi$	Potansiyel
$\vec{u}$	Üç boyutlu hız çalkantıları
$R$	Dış model yarıçapı
$K_{ij}$	Duruma bağlı bir katsayı
$J_n$	n.derece Bessel fonksiyonu
$r$	Yarıçap
$\phi$	Azimet açısı (Eşitlik 2.31)

$c_j^n$	$J_n'$ in $i$ . sıfır değeri
$W_0$	Yüzey karekteistiklerinden türeyen düşey hız
$\phi$	Başlangıç hız vektörü (Eşitlik 2.32)
$h$	Yüzey karakteristeklerinin yüksekliği (Eşitlik 2.32)
$L_j$	Yatay ölçek
$\zeta$	Salınım derinliği
$T$	Ortalama alma periyodu
$i$	Türbülans yoğunluğu
$f(u)$	$u$ ortalama hızının gözlenen frekansı
$A$	Weibull parametreleri -ölçek parametresi (Eşitlik 2.43)
$k$	Weibull parametreleri - şekil parametresi (Eşitlik 2.43)
$\Gamma$	Gama dağılımı
$E$	Güç yoğunluğu
$M$	Yıllık ortalama rüzgar hızı
$f$	Frekans (Çizelge 3.2)
$D$	Türbin pervane çapı
$V_{hub}$	Türbin pervane göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı (Şekil 3.7)
$P_{el}$	Elektriksel güç (Şekil 3.7)
$P$	Rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi (Çizelge 3.7)

## KISALTMA LİSTESİ

WASP	Wind Atlas Analysis and Application Programme
PC	Personal Computer
BZ	Kullanılan orografik model
İST	İç Sınır Tabaka
X153DJH	Bir model grubu
MP	Markatör Projeksiyon
M.İ.	Meteoroloji İstasyonu
NEDWIND 50	Aynı isimli rüzgar türbin üreticisi firmanın 1MW güçteki türbinin model adı
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	WASP analiz modelinin şematik gösterimi ..... 4
Şekil 2.2	WASP uygulama modelinin şematik gösterimi ..... 5
Şekil 2.3	Pürüzlülük uzunluğu, yüzey yapısı özellikleri ve pürüzlülük sınıfı ..... 7
Şekil 2.4	Pürüzlülük sınıfı 0' a örnek ..... 8
Şekil 2.5	Pürüzlülük sınıfı 1' e örnek ..... 8
Şekil 2.6	Pürüzlülük sınıfı 2' ye örnek ..... 9
Şekil 2.7	Pürüzlülük sınıfı 3' e örnek ..... 9
Şekil 2.8	Engellerin tanımlanması ..... 12
Şekil 2.9	Pürüzlülük değişim hatları örneği ..... 20
Şekil 2.10	Karmaşık yüzey karakteristiği durumdaki akışın hesaplanmasında kullanılan polar kafesler ..... 24
Şekil 2.11	Şekil 12' deki sonuçların alındığı yükselti perpektifi ..... 25
Şekil 2.12	Yükselti boyunca görece hız değişimi deneysel sonuçları ..... 26
Şekil 2.13	Weibull dağılımının farklı k parametrelerine karşılık gelen grafikleri .... 29
Şekil 3.1	Sektör bazında, % olarak, esme frekansları ..... 35
Şekil 3.2	Rüzgar hızı frekans histogramı ve uydurulan Weibull dağılımı ..... 36
Şekil 3.3	Bozcaada' nın topografik haritası ..... 38
Şekil 3.4	Bozcaada M.İ. çevre engelleri şeması ..... 40
Şekil 3.5	Sektör bazında, % olarak, düzeltilmiş esme frekansları ..... 43
Şekil 3.6	Düzeltilmiş frekans histogramı ve uydurulan Weibull dağılımı ..... 44
Şekil 3.7	NEDWIND 50 rüzgar türbininin güç eğrisi ..... 46
Şekil 3.8	Rüzgar türbininin konumu ..... 47

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Alan ağırlıklı pürüzlülük uzunlukları .....	10
Çizelge 3.1 Bozcaada rüzgar hızı ve yönü verileri .....	33
Çizelge 3.2 İstatiksel verilere göre hesaplanmış Weibull A, k parametreleri, %f ve %E değerleri .....	34
Çizelge 3.3 Bozcaada M.İ. anemometresi için pürüzlülük uzunlukları ve mesafeleri .....	39
Çizelge 3.4 Bozcaada M.İ. yakın çevre engelleri dökümü .....	41
Çizelge 3.5 Düzeltilmiş A,k, %f, %E ile ort. enerji yoğunluğu .....	42
Çizelge 3.6 Bozcaada için hesaplanmış rüzgar atlası istatistikleri .....	45
Çizelge 3.7 Türbin pervane göbek yüksekliğinde model sonuçları ve türbinin enerji üretimi öngörümü .....	48



## ÖZET

Belirli bir yeryüzü parçasının rüzgar ikliminin, enerji üretimi amacı ile belirlenmesine yöntem olarak geliştirilen Rüzgar Atlası çalışmalarının tanıtılması ve Türkiye için bir örnek uygulama yapılması tezin içeriğini oluşturmaktadır. Amaç, ülkemizdeki rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi yolunda katkıda bulunmaktır.

Rüzgarın, yeryüzü pürüzlülüğü, noktasal engeller ve yerçekillerinden etkilenme karakteristiğinin, teorik ve deneysel sonuçlar kullanılarak belli bir yaklaşıklıkla modellenmesi mümkün olmaktadır. Bu kapsamda, Danimarka Ulusal Laboratuvarı (RISØ) araştırmacıları tarafından geliştirilen ve 1989 yılında Avrupa Rüzgar Atlası'nın oluşturulmasında da kullanılan WASP (Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı) isimli bilgisayar programı tanıtılmıştır. WASP kullanılarak, Ege Denizi' ndeki iki adamızdan biri olan Bozcaada için, önce Rüzgar Atlası parametreleri hesaplanmış, sonra enerji üretim karakteristiği (güç eğrisi) bilinen bir ticari rüzgar türbininin, Ada üzerinde seçilen bir konumda kurulması halinde yıllık enerji üretimi öngörülmüştür. Sonuçlar, ülkemizde rüzgar potansiyeli yeterli bölgelerin vakit kaybetmeden değerlendirilmesi gerekliliğini göstermektedir.



## **ABSTRACT**

Implementation of wind energy in Turkey is very much related to the efforts of conducting organized wind studies throughout the country. Many regions with enormous potential to harness the wind should be examined with proper and applicable methods which mainly consist of wind resource assesment, site analysis, modelling the flux profiles over complex terrain conditions.

WASP (Wind Atlas Analysis and Application Programm), as a PC program that is developed by research scientists of the Danish National Laboratory (RISØ) and is used for preperation of European Wind Atlas in 1989, is introduced and applied for the statistical wind data of Bozcaada (Tenedos) island, Turkey. Aim of this application is estimating the harnessing potential of the wind blowing over the island. Results show that Turkey should take the necessary steps for determination of its wind potential (wind atlas studies) as soon as possible. Wind atlas studies should urgently be followed by planing large scale wind energy conversion capacities connected to the national grid (socalled wind farms).



## 1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin Rüzgar Atlas istatistiklerinin oluşturulmasına katkıda bulunmak ve böylece rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin (rüzgar türbinleri) kurulacakları yerin seçiminde ve enerji üretimlerinin öngörülmesinde kullanılacak verileri elde etme yöntemini açıklamaktır.

Kullanılan bilgisayar programı, Danimarka Ulusal Laboratuvarı (RISØ) araştırmacıları tarafından geliştirilmiş olan ve 1981 yılında Danimarka Rüzgar Atlası'nın, 1989 yılında Avrupa Rüzgar Atlası'nın oluşturulmasında kullanılan Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı (WASP)'dır.

Bu program farklı pürüzlülük sınıflarının etkilerini, yakın bina ve diğer engellerin durumunu, arazinin topografik yapısını dikkate alarak, meteoroloji istasyonlarında ölçülen rüzgar hızlarının yönlere göre referans değerlerini bulmakta ve bu referans değerler yardımıyla da bölgesel rüzgar atlas istatistiklerini hesaplamaktadır.

Programın temel girdileri, meteoroloji istasyonlarında ölçülen ve saatlik rüzgar cetvellerine işlenen değerler, ölçüm noktasının civarında bulunan belli başlı engeller ve istasyon çevresinin topografik yapısıdır.

Belirli bir yüzey yapısı üstünde, verili bir yükseklikteki rüzgar hızının olasılıksal dağılımı ise programın temel çıktısıdır. Rüzgar Atlası, bazı standart koşullar için rüzgar hızının olasılık yoğunluk fonksiyonunu, Weibull dağılımı olarak vermektedir.

Programın uygulanması için Bozcaada Meteoroloji İstasyonu seçilmiştir. Gerekli rüzgar hız ve yön verileri, istasyon çevre kapalılık sınıflandırmaları, topografik bilgiler ve pürüzlülük bilgileri çeşitli kaynaklardan sağlanmıştır. Toplanan tüm veriler istenilen formatta düzenlenerek WASP'a girilmiş ve Bozcaada için bölgesel rüzgar atlas istatistikleri elde edilmiştir.

## 2. RÜZGAR ATLASI ANALİZ VE UYGULAMA PROGRAMI (WASP)

WASP, rüzgarın enerji üretimi açısından değerlendirilmesi amacı ile çeşitli alt-modeller kullanarak, meteorolojik rüzgar verilerinin yatay ve düşey kıymetlendirilmesini yapan bir PC yazılımıdır. Farklı pürüzlülük koşullarının, yakındaki bina ve diğer engelleyicilerin neden olduğu perdeleme etkilerini, tepeler ve karmaşık yüzey yapısının zorlaması sonucu rüzgarda meydana gelecek değişimleri dikkate almaktadır. Böylece rüzgar türbinlerinin konuşturulmasında yöntemler sunduğu gibi, temel meteorolojik verilerin enerji amaçlı kullanılabilmesi için düzeltilmesinde de kullanıcıya olanak sağlamaktadır.

WASP, meteoroloji, klimatoloji veya akış modellemesi konularında uzmanlık gerektirmeden, rüzgar enerjisi ve ilgili alanlarda kullanılacak bir paket program olma özelliği taşımaktadır.

### 2.1. WASP'ın Temel Yapısı ve Genel Açıklamalar

WASP temel olarak, Analiz ve Uygulama olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi, belli bir noktada ölçülmüş rüzgar verilerini alt-modelleri kullanarak düzeltmekte (temizlemekte) ve bunları rüzgar atlası adı verilen, bölgenin rüzgar iklimini tanımlayan bir veri dizisine dönüştürmektedir. İkincisi, temelde aynı kuralları uygulayarak bölgedeki herhangi başka bir nokta ve yükseklikteki rüzgar koşullarının öngörümü için bu veri dizisinden yararlanmaktadır. WASP kullanılarak belli bir bölgeye ait rüzgar atlasının hazırlanması şu safhaları içermektedir:

- Zaman serisi veya bir klimatolojik tablo halindeki ölçülmüş meteorolojik veriler, standart sektörler için histogramlara dökülür.
- Ölçüm istasyonunun tanımlanması anemometre yüksekliğinin, istasyon civarındaki yüzey pürüzlülük koşullarının ve istasyona yakın perdeleyici engellerin belirlenmesi ile gerçekleştirilir.
- Ölçümlerin topografik zorlamadan etkilendiği düşünülüyorsa karmaşık yüzey yapısı modelinin (orografik model) gerektirdiği bilgiler hazırlanıp dosyalanır.
- WASP yukarıdaki bilgileri kullanarak histogramdaki her sektör için rüzgar hızı esme frekanslarını hesaplar. Bu işlemler dizisi ile başlangıç verileri, yakındaki engellerin, pürüzlülük değişimlerinin ve yüzey yapısı geometrisinden kaynaklanan pertürbasyonların etkilerinden temizlenmektedir.
- Homojen yüzey yapısı üzerindeki rüzgar ile daha yükseklerdeki geniş veya sinoptik rüzgar arasındaki ampirik ilişkiler kullanılarak veriler, verilen bölgenin jeostrofik rüzgar iklimini elde etmek üzere kıymetlendirilir. Bu işlem yüzeydeki özgün koşullardan bağımsız olarak ele alınır ve alt-modellerin sınırları ile belirlenen bir yeryüzü parçasındaki rüzgarın enerjiye dönüştürülebilme olasılığını verir.

- Daha sonra bu hesaplamanın tersi gerçekleştirilerek, ele alınan coğrafya üzerindeki belirli bir noktanın, standart yüzey pürüzlülükleri ve standart yükseklikler için, Weibull dağılımının fonksiyonu olarak rüzgar esme olasılıkları ve buna bağlı olarak da enerji üretme potansiyeli elde edilir.

Analiz ve Uygulama Kısımları, sırasıyla Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de şematik olarak verilmiştir.

### **2.1.1. Rüzgar verilerinin tanımlanması**

WASP’ın kullandığı meteorolojik veriler genelde zaman serisi veya bir klimatolojik tablo biçiminde düzenlenmiş rüzgar hız ve yön ölçümleridirler. Bu veriler elde edildikleri özel koşulları yansıtırlar. Kısacası, ölçüldükleri nokta için geçerlidirler, diğer konumlara ilişkin kıymetlendirme yapabilmek için yüzey pürüzlülük koşullarının, yakın engeller ile ölçüm istasyonu çevresindeki arazi karakterinin etkileri bilinmelidir. Bu veriler ancak temizlendikten sonra, ölçüm istasyonunun civarındaki bölgede bulunan diğer konumların rüzgar iklim öngörümü için kullanılabilirler.

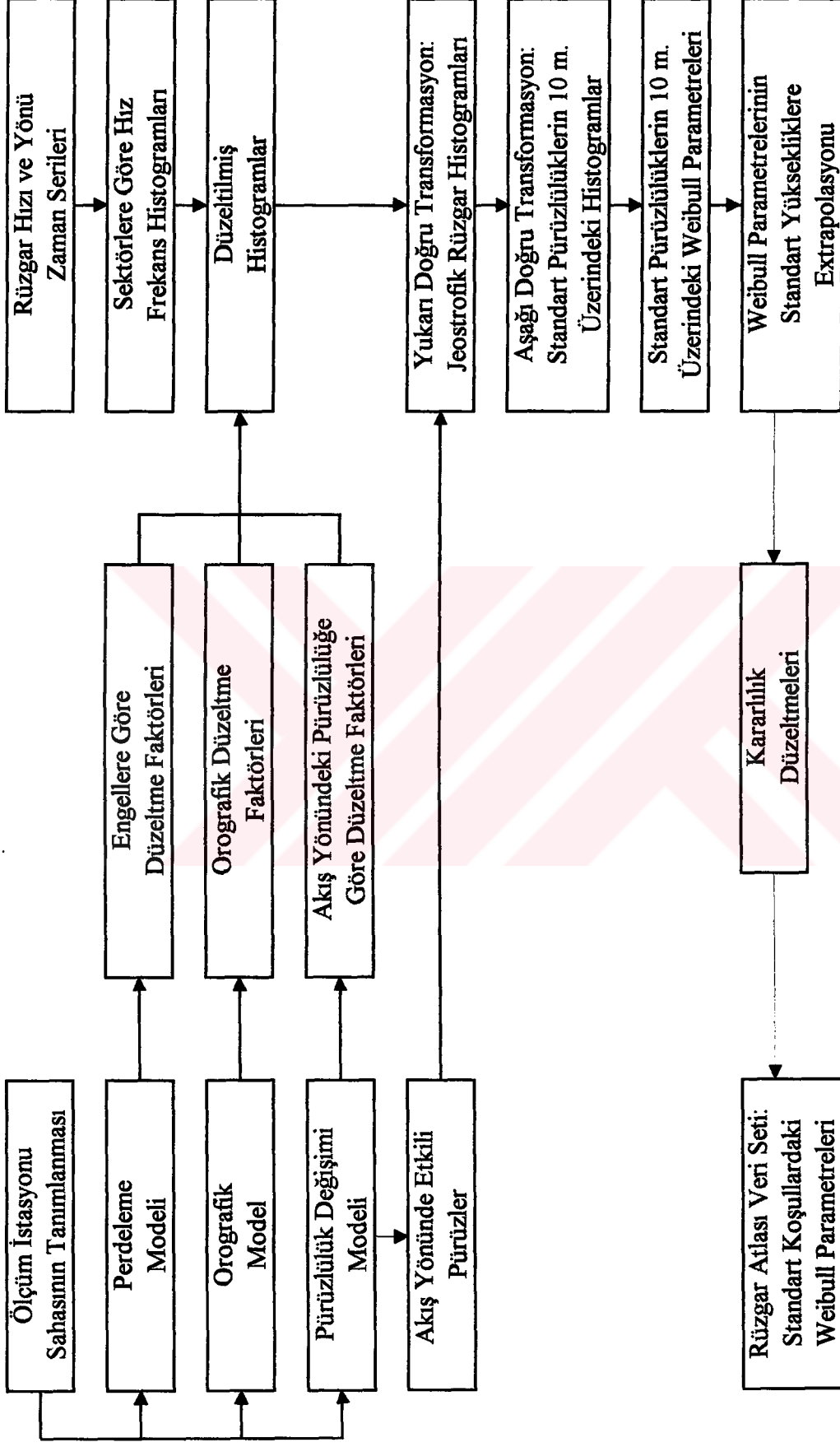
### **2.1.2. Bir konumun tanımlanması**

WASP' ın verilen bir konumda, çevrenin rüzgar üzerindeki etkilerini hesaplayabilmesi için çevrenin karakteristiklerinin sistematik olarak tanımlanması gerekmektedir.

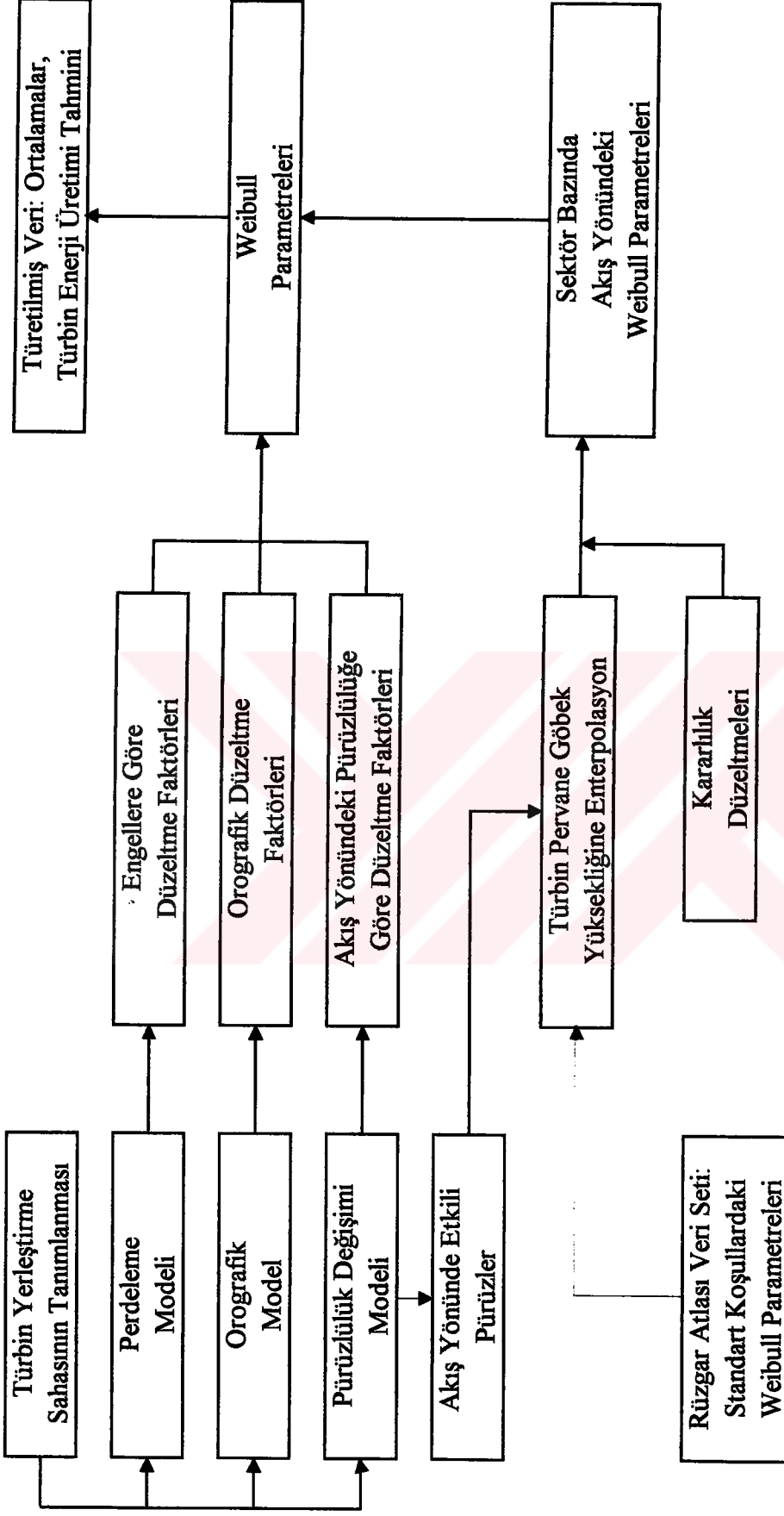
Rüzgar hızı üzerinde topografik yüzeyin toplam etkisi, genelde arazi yapısının pürüzlülüğü olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, topografik elemanların hepsi pürüzlülüğe katkıda bulunmamaktadır. Bitkiler ve evler pürüzlülük elemanı örnekleridirler. Öte yandan uzun düzgün tepeler bu kapsamda düşünülmemektedirler çünkü akışın türbülansında artışa neden olmamaktadırlar.

Yüksek tepeler, uçurumlar, sıradağlar gibi elemanlar rüzgar üzerinde daha fazla etkili olmaktadırlar. Bu tür arazi şekli veya zirve yakınlarında rüzgar hızlanmakta, eteklerde ve vadilerde yavaşlamaktadır. Bina benzeri bir engele yakın rüzgar binanın varlığından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etkilenme binanın yüksekliğinin yaklaşık üç misli yüksekliğe ve akış yönünde ise 30 - 40 misli uzaklığa kadar sürebilmektedir. Eğer ilgilenilen nokta bu şerit içinde yer alıyor ise perdeleme etkilerini gözönüne almak gerekmektedir. Eğer nokta bu kuşağın dışında ise bina bir pürüzlülük elemanı olarak değerlendirilir.

Verilen bir durum için rüzgar üzerine çevrenin üç ana etkisinden söz edilebilir: Pürüzlülük, perdeleme ve karmaşık yüzey yapılarının etkileri. Gerçekte bu etkiler birbirinden bağımsız değildirler. Program bu gerçeği gözönüne almakla birlikte kullanıcıya çevre yüzey yapılarının pürüzlülüğünü, yakın perdeleyici engelleri ve karmaşık yüzey yapısını bağımsız olarak belirleme olanağı sağlamaktadır.



Şekil 2.1 WASP analiz modelinin şematik gösterimi.



Şekil 2.2 WASP uygulama modelinin şematik gösterimi.

### 2.1.3. Pürüzlülük tanımlanması

Bir yüzey yapısının pürüzlülüğü mikro-meteorolojik literatürde pürüzlülük uzunluğu  $z_0$  parametresi olarak ifade edilir. Esas olarak  $z_0$ , rüzgar profili, yükseklik ile logaritmik bir değişim gösteriyor ise ortalama rüzgar hızının sıfır olduğu yüksekliğe verilen addır. Bu genelde orta ve kuvvetli rüzgar koşullarında gerçekleşir.

Belli bir yüzeyin pürüzlülüğü, "pürüzlülük elemanları"nın büyüklüğü ve dağılımı ile belirlenir. Bir pürüzlülük elemanı yüksekliği  $h$ , rüzgarı gören kesiti  $S$  ve rüzgar geçirgenliği ile karakterize edilir. Bir alan üzerine dengeli olarak dağılmış pürüzlülük elemanları topluluğunun yoğunluğu yatay alan  $A_H$  ile tanımlanabilir.

Bir dizi deney sonucu, yukarıda sözü edilen karakteristikler arasında basit ampirik bir ilişki Lettau (1969) tarafından kurulmuştur.

$$z_0 = 0.5 \frac{hS}{A_H} \quad (2.1)$$

Bu ilişki  $A_H \gg S$  olduğu zaman anlamlı tahmin sağlamaktadır. Pürüzlülük uzunlukları, yüzey yapısı karakteristikleri ve pürüzlülük sınıfları Şekil 2.3 'de özetlenmiştir. Şekil 2.4 ÷ Şekil 2.7 ise pürüzlülük sınıflarına örnek çizimleri içermektedir.

Bir konumu çevreleyen yüzey yapılarının pürüzlülüklerinin sınıflandırılması, en basit şekliyle konum etrafındaki değişik yüzey tiplerine uygun pürüzlülük uzunluklarının belirlenmesi işidir.

Ufuk çizgisi 30° ar derecelik 12 dilime (sektöre) bölünmekte ve sınıflandırma, sektör sektör, konumdan en az 5 km uzaklığa kadar yapılmaktadır.

Bir sektörde birden fazla yüzey pürüzlülük değişimi varsa şu kural uygulanmaktadır: Konumdan birinci değişime olan uzaklık  $x_1$ , bir sonraki  $x_2$ , ve  $n$  pürüzlülük değişimine olan uzaklık  $x_n$  olmak üzere;

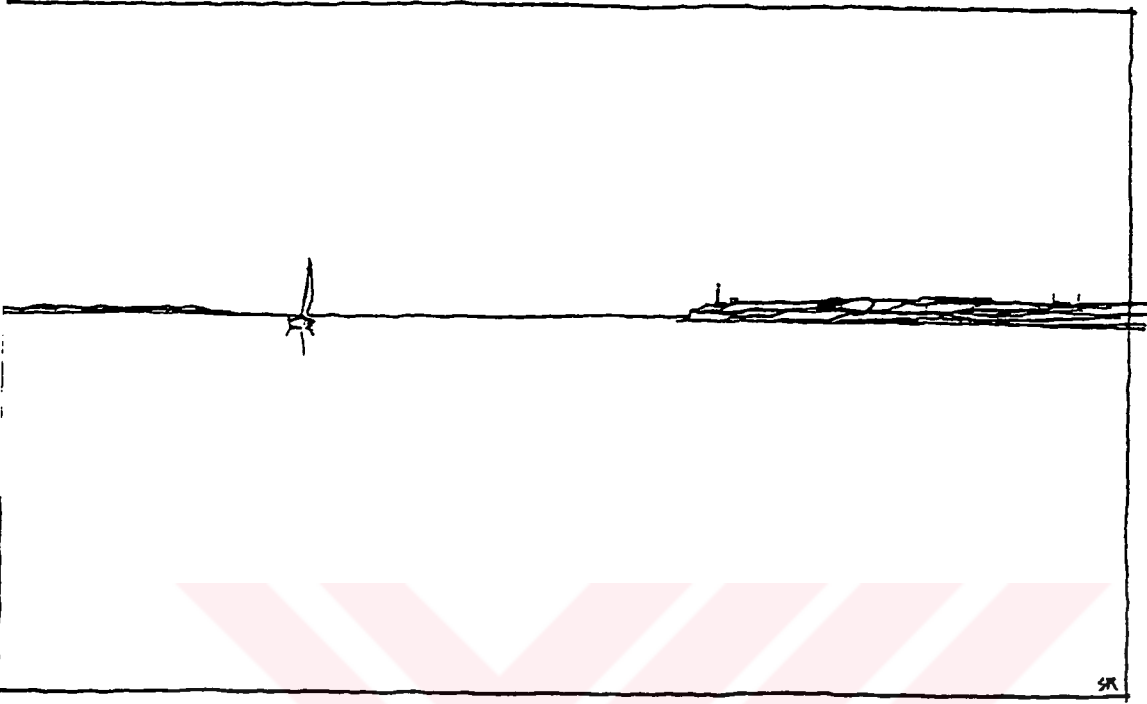
$$x_n \geq 2x_{n-1} \quad n = 2, \dots; n \leq 10 \quad (2.2)$$

Bu kuralın uygulanması pürüzlülük değişimlerinin çoğalmasını önlemektedir. WASP her sektör için on adet pürüzlülük değişimini işleyebilmektedir.

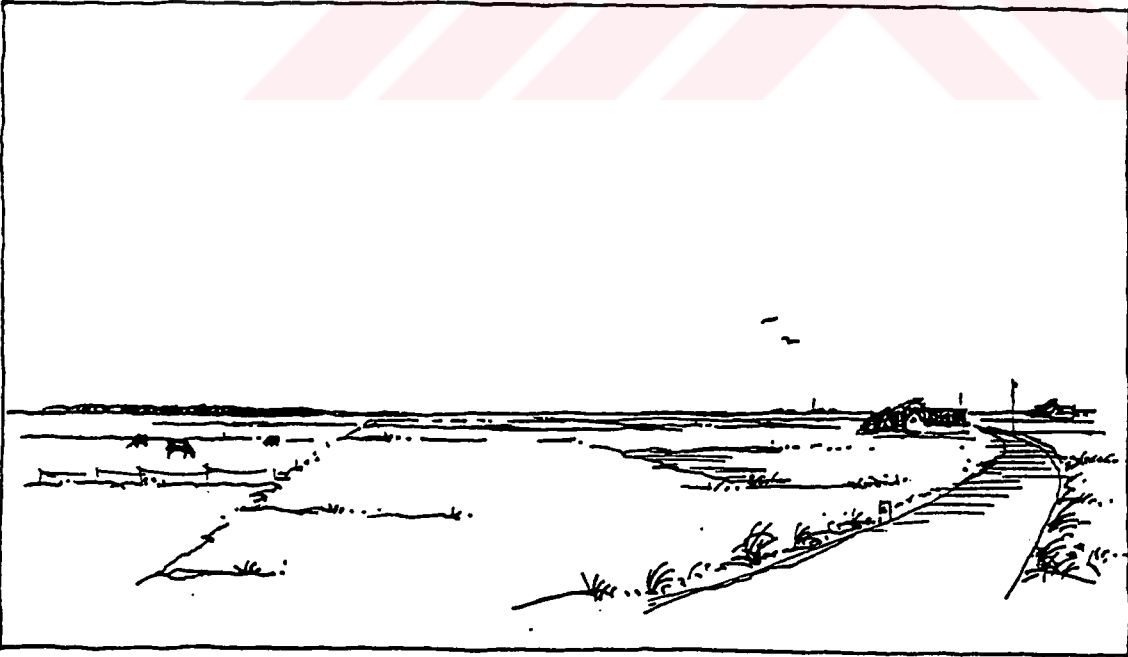
İki pürüzlülük değişimi arasındaki yüzey yapısının homojen olmaması halinde bir toplam pürüzlülük  $z_0^R$  öngörülmektedir. Söz konusu dilim yaklaşık aynı pürüzlülükteki çeyrek parçalara bölünmekte ve Çizelge 2.1 kullanılarak "dilimdeki her pürüzlülük sınıfının sayısının fonksiyonu olarak dilimin toplam pürüzlülük uzunluğu" bulunmaktadır.

$Z_0$ (m)	Yüzey Yapısı Karakteristikleri	Pürüzlülük Sınıfı
1.00		
0.40	Büyük şehirlerin varosları, taşra kentleri	3
0.30	Siper kuşakları, orman, ufak binalı şehir	
0.20	Birçok ağaç ve/veya çalılar, tek ya da iki katlı seyrek binalar	
0.10	Kapalı görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	2
0.05	Açık görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	
0.03	Çok seyrek bina ve ağaçlı çiftlik arazisi Binaları ve ağaçları ile havaalanı arazisi	1
0.02	Düz ve 0.5-1 km'de bir ağaçlık	
0.01	Havaalanı pist alanı biçilmiş çim	0
$5 \cdot 10^{-3}$	Çıplak toprak (pürüzsüz)	
$10^{-3}$	Kar yüzeyleri (pürüzsüz)	0
$3 \cdot 10^{-4}$	Kum yüzeyleri (pürüzsüz)	
$10^{-4}$	Deniz alanları (göller, fiyortlar, açık deniz)	

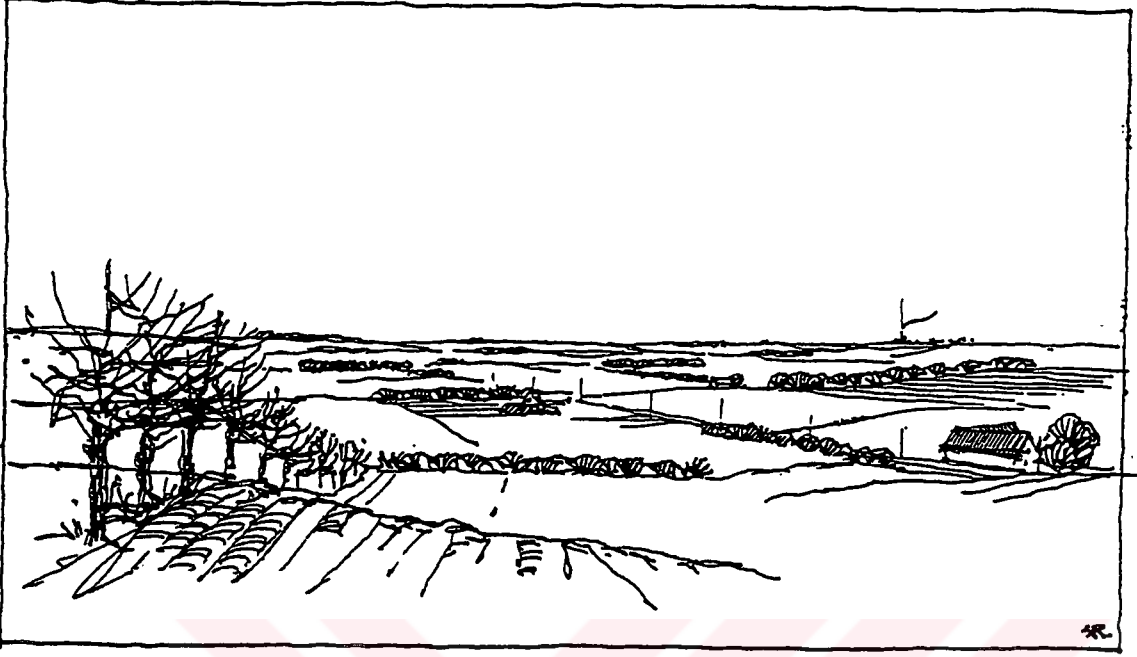
Şekil 2.3 Pürüzlülük uzunluğu, yüzey yapısı özellikleri ve pürüzlülük sınıfı.



Şekil 2.4 Pürüzlülük sınıfı 0'a örnek: Su alanları ( $z_0=0.0002$  m).  
Bu sınıf deniz, göl v.s.'yi tanımlar.



Şekil 2.5 Pürüzlülük sınıfı 1'e örnek: Geniş, açık alanlar ( $z_0=0.03$  m). Yüzey oldukça düz veya hafif ondüveli. Geniş çiftlik alanları gibi.



Şekil 2.6 Pürüzlülük sınıfı 2'ye örnek: 1000 m.'den fazla aralıklarla varolan rüzgarkırıcı nesnelere (ağaçlar, binalar v.s) içeren çiftlik alanları ( $z_0=0.10$  m).



Şekil 2.7 Pürüzlülük sınıfı 3'e örnek: Yerleşim bölgeleri, ormanlar ve birçok rüzgarkırıcı bulunan çiftlik alanları ( $z_0=0.40$  m). Birçok kapalı hacimli rüzgarkırıcılar bulunan arazi. Ortalama rüzgarkırıcı nesne açıklığı birkaç 100 m.

Çizelge 2.1 Alan ağırlıklı pürüzlülük uzunlukları,  $z_0^R$ 

Sınıf:	0	1	2	3	$z_0^R$ (m)
$Z_0$ (m)	0.0002	0.03	0.10	0.40	
3		1			0.001
3			1		0.002
3				1	0.003
2		2			0.004
2		1	1		0.006
2		1		1	0.010
2			2		0.009
2			1	1	0.015
2				2	0.025
1		3			0.011
1		2	1		0.017
1		2		1	0.027
1		1	2		0.024
1		1	1	1	0.038
1		1		2	0.059
1			3		0.033
1			2	1	0.052
1			1	2	0.079
1				3	0.117
		3	1		0.042
		3		1	0.064
		2	2		0.056
		2	1	1	0.086
		2		2	0.127
		1	3		0.077
		1	2	1	0.113
		1	1	2	0.163
		1		3	0.232
			3	1	0.146
			2	2	0.209
			1	3	0.292

#### 2.1.4. Engellerin tanımlanması

WASP engelleri dikdörtgen kesitli "kutular" olarak değerlendirmektedir. Her engelin konuma bağlı pozisyonu, boyutları belirtilmeli ve bir geçirgenlik değeri verilmelidir. Şekil 2.8'de tek bir engeli tanımlayan ve WASP'a girilmesi gereken bilgiler gösterilmektedir. Bu konunun detayı 2.2.5 nolu başlık altında açıklanmıştır.

#### 2.1.5. Karmaşık yüzey yapılarının tanımlanması

WASP yüksek tepeler veya daha karmaşık yüzey yapıları benzeri topografik özelliklerden kaynaklanan hız pertürbasyonlarını hesaplamak üzere "BZ" modelini kullanmaktadır. Bir konum etrafındaki yüzey yapısını tanımlamak için 200 yükseklik eğrisinde en fazla 10.000 adet nokta tanımlanabilmektedir. Detaylar 2.2.6 nolu başlık altında verilmiştir.

### 2.2. Alt Modeller ve Kullandıkları Mantık

#### 2.2.1. Yüzey tabaka benzerlik kanunları

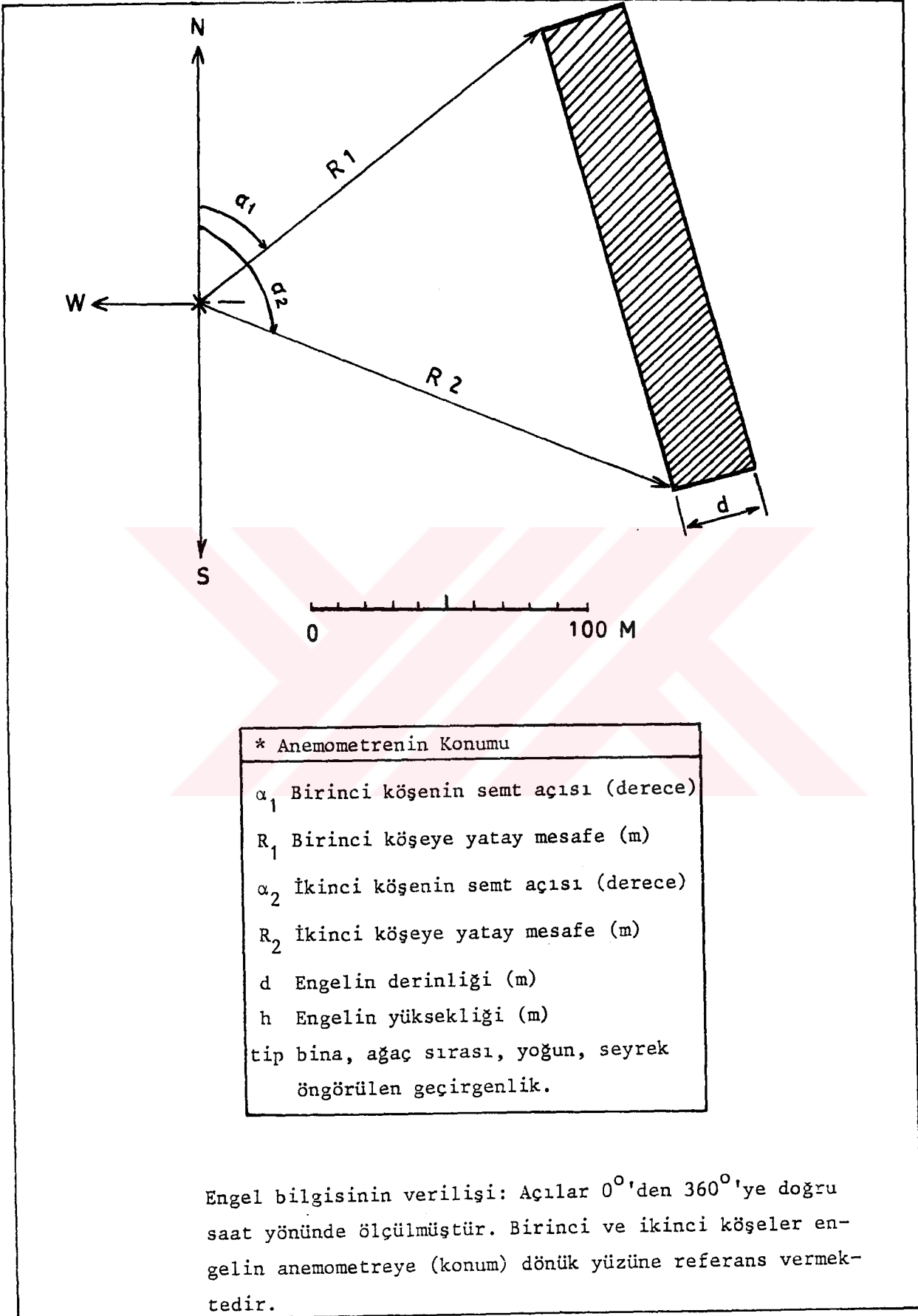
Yeryüzeyine yakın atmosferik tabaka Atmosferik Sınır Tabaka olarak adlandırılmaktadır. Sınır tabakanın yere yakın, % 10'luk kısmına yüzey tabaka denmektedir. Bu tabakanın kalınlığı, rüzgar hızının düşük olduğu gecelerde 100 m.'den, sıcak bir yaz günü 2000 m.'ye kadar değişebilmektedir. Bununla beraber rüzgarın enerji amaçlı kullanımında iklim belirlenmesi için düşük rüzgar hızları ihmal edilerek, atmosferik sınır tabakanın 1000 m.'ye ulaştığı ve yüzey tabaka fiziğinin ilk 100 m.'ye uygulandığı durum esas alınmaktadır. Yüksek rüzgar hızlarına, düzgün ve yeterli derecede homojen yüzey yapısına sahip bölgeler üzerindeki rüzgar profili, aşağıdaki gibi logaritmik kanun yardımıyla iyi modellenebilmektedir.

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.3)$$

Burada  $u(z)$ ,  $z$  yüksekliğindeki rüzgar hızı,  $z_0$ , yüzeyin pürüzlülük uzunluğu,  $K$ , von Karman sabiti (burada 0.40) ve  $u_*$  ise  $\tau$  yüzey gerilmesinden türeyen sürtünme hızıdır.

$$|\tau| = \rho u_*^2 \quad (\rho : \text{hava yoğunluğu}) \quad (2.4)$$

Yüksek olmayan rüzgar hızlarında bile,  $z$  birkaç on metreyi aştığı zaman logaritmik profilden sapma olur. Bu sapmalara türbülans dinamiğindeki buoyancy kuvvetlerinin etkisi olmaktadır. Bu durumda modele yüzey pürüzlülüğünün yanısıra, yüzeydeki ısı akısını açıklayan parametrelerinde eklenmesi gerekmektedir. Geceleri yüzeyin soğuması ile azalan türbülans, rüzgar profilinin yükseklikle hızlı bir şekilde değişmesine neden olurken, bunun aksine, gündüz ısınma, artan türbülansa ve yükseklikle daha az değişen bir rüzgar profiline neden olmaktadır. Bu değişimleri tanımlamak üzere aşağıdaki ifade kullanılır.



Şekil 2.8 Engellerin tanımlanması.

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (2.5)$$

Burada  $\psi$ , ampirik bir deęerdir (Businger, 1973; Dyer, 1974). L ise Monin-Obukhov uzunluğu olup, aşağıdaki eşitlik ile belirlenir.

$$L = \frac{T_0 c_p u_*^3}{Kg H_0} \quad (2.6)$$

Burada  $T_0$  ve  $H_0$  mutlak yzey sıcaklığı ve ısı akısıdır.  $c_p$ , sabit basınçtaki havanın ısı kapasitesi,  $g$ ; yerçekimi ivmesidir. Bu modeldeki yzey ısı akısı etkilerinin kapsamı kararlılık dzyeltmesi başlığı altında detaylı olarak anlatılmıştır.

### 2.2.2. Jeostrofik srttlenme kanunu ve jeostrofik ruzgar

Atmosferik sınır tabakadaki ruzgarların, alçak ve yksek basınç sistemlerinin geçişi gibi sinoptik aktivitelerin neden olduğu basınç farklılıklarından oluştuğu dzyntlebilir. Sınır tabaka, basınç kuvvetlerindeki değişimlere hızlı cevap verdiğinden, basınç gradyanı kuvveti ile yeryzndeki srttlenme kuvveti arasında yaklaşık bir denge bulunabilir. Bu denge, ideal, yani stasyoner, homojen ve barotropik (sınır tabaka boyunca basınç gradyanı sabit) koşullarda teorik olarak turetilebilir. Ntr kararlılık koşullarında bu denge Rossby ve Montgomery (1935) tarafından aıçklanmıştır. Sonuç, yzey srttlenme hızı;  $u_*$  ve jeostrofik ruzgar;  $G$  arasında jeostrofik srttlenme kanunu diye adlandırılan bir ilişkiyle aıçklanabilir.

$$G = \frac{u_*}{K} \sqrt{\left[ \ln\left(\frac{u_*}{fz_0}\right) - A \right]^2 + B^2} \quad (2.7)$$

$$\text{Sin}\alpha = -\frac{Bu_*}{KG} \quad (2.8)$$

$\alpha$  : Yzeye yakın ruzgar ile jeostrofik ruzgar arasındaki aı,

$f$  : Koriolis parametresi,

A ve B ampirik sabitler ( $A=1.8$ ,  $B=4.5$ )' dir.

Jeostrofik ruzgar yzey basınç gradyanından hesaplanabilmekte ve genellikle sınır tabaka zzerinde radyosondeden elde edilen ruzgar hızına oldukça yakın olmaktadır. Jeostrofik srttlenme kanunu ntr olmayan koşullar iin de elde edilebilir. Bu durumda, yukarıdaki A ve B sabitlerinin kararlılık parametresi  $\mu$ ' n n bir fonksiyonu olduğu hal s zkonusudur.

$$\mu = \frac{Ku_*}{fL} \quad (2.9)$$

### 2.2.3. Kararlılık düzeltmesi

Logaritmik rüzgar profilindeki kararlılık düzeltmeleri rüzgar enerjisiyle ilgili problemlerde genellikle ihmal edilmektedir. Bunun nedeni düşük rüzgar hızlarında görece önemsiz olmalarıdır. Bu model temel nötr durum, için küçük çalkantılar gibi kararlılık düzeltmeleri yapmaktadır. Aynı ayrı her rüzgar profilini detaylı olarak modelleme ihtiyacı olmadan, yüzey ısı akısındaki değişimlerin etkisini yaklaşık bir yöntemle dikkate almak için, sadece iklimsel ve yüzey ısı akıları ortalamalarının karesinin karekökü formunda veriye gerek duyan, basit bir prosedür uygulanmaktadır.

Model, nötr durumdaki yüzey ısı akısının birinci dereceden genişletilmesi, jeostrofik sürtünme kanunu ve rüzgar hızı profilinden türetilmiştir. (2.7) numaralı eşitliğin  $G$ ,  $z_0$  ve  $f$  sabit tutularak türevi alınırsa,

$$dG = 0 = \frac{du_*}{u_*} G - \frac{u_*^2}{K^2 G} \left[ \left( \ln \frac{u_*}{fz_0} - A(\mu) \right) \left( \frac{du_*}{u_*} - \frac{dA}{d\mu} d\mu \right) + B \frac{dB}{d\mu} d\mu \right] \quad (2.10)$$

(2.6) ve (2.7) eşitliklerindeki katsayıların nötral değerleri kullanılarak,

$$A(0) \cong 1.8 \quad B(0) \cong 4.5$$

$$\frac{dA}{d\mu} \cong -0.2 \quad \frac{dB}{d\mu} \cong +0.2$$

ve en küçük terimler ihmal edilerek aşağıdaki ilişki yazılır:

$$\frac{du_*}{u_*} \cong \left( \frac{cg}{fT_0 c_p \rho G^2} \right) dH \quad (c \cong 2.5) \quad (2.11)$$

Bu eşitlik, yüzey ısı akısının klimatolojik ortalama değerini  $dH$  olarak alıp,  $u_*$ ' in nötral değerinden olan farkını ve ayrıca  $dH$  için ısı akısı ortalamalarının karesinin karekökünü alıp,  $u_*$ ' in çalkantılarının ortalama karelerinin karekökünü bulmak için kullanılır. Bu uygulamada jeostrofik rüzgar hızı  $G$ , rüzgar hızı frekans değişiminin enerji yoğunluğu bakımından maksimum olduğu yerdeki değere eşit alınmıştır. Bu durumda rüzgar profilinin türevi ((2.5) nolu eşitlik)

$$du(z) = \frac{du_*}{K} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi \left( \frac{z}{L} \right) \right] - \frac{u_*}{K} \frac{d\psi}{dL} \frac{dL}{dH} dH \quad (2.12)$$

şeklini alır. Katsayılarının nötral değeri ve (2.10) numaralı eşitlik kullanılarak yüzey ısı akısı modülasyonlarının birinci derece etkilerinin sona erdiği yer olan  $z_m$  yüksekliği (yeryüzünden itibaren) için bir ifade elde edilir. Burada, ayrıca rüzgar hızı varyansı için bir minimum vardır ( $du(z_m)=0$ ).

$$\frac{z_m}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} = \left(\frac{c}{aK}\right) \frac{u_*^3}{fG^2} \quad (2.13)$$

Buradaki  $a$  sabiti havanın kararlı veya kararsız oluşuna bağlı olarak 4 ile 5 arasında değişen bir değerle,  $\psi$  fonksiyonunun nötral durumdaki eğimidir. Basitleştirilmiş nötral sürtünme kanunu kullanılarak (Jensen, 1984);

$$\frac{u_{*0}}{G} = \frac{0.5}{\ln(R_0) - A(0)} \quad (2.14)$$

yazılabilir. (2.13) numaralı eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{z_m/z_0}{\ln(z_m/z_0)} \cong \text{sabit} \cdot R_0 [\ln(R_0) - A(0)]^{-3} \quad (2.15)$$

Buradaki 'sabit' yaklaşık olarak 0.1'dir. Yüzeyin Rossby sayısı da şöyle tanımlanır:

$$R_0 = \frac{G}{fz_0} \quad (2.16)$$

Son olarak bu ifadeye bir güç kanunu ile yaklaşılabilir.

$$\frac{z_m}{z_0} \cong \alpha R_0^\beta \quad (2.17)$$

$$\alpha = 2.0 \cdot 10^{-3}$$

$$\beta = 0.9$$

$z_m$  yüksekliğinin geniş alanlar boyunca sabit olduğunu belirtmekte yarar vardır. Bunun nedeni  $z_0$ 'ın zayıf bağımlılığıdır ( $\sim z_0^{0.1}$ ). Farklı durum sadece kıyılarda gözlenmektedir. Çünkü  $z_0$ 'ın,  $z_m$ 'nin deniz üzerindeki değerinin yaklaşık yarısı kadar olduğu belirlenmiştir.

Nötr olmayan kararlılık koşullarının etkileri, yukardaki eşitlikler kullanılarak, rüzgar hızının klimatolojik ortalamalarının ve standart sapmalarının düşey profile olan etkileri şeklinde modellenmiştir.

$z_m$ 'nin minimum varyans yüksekliği (2.17) numaralı eşitlikle belirlenmektedir. Bu yükseklikte rüzgar hızının nötral değerine göre bağlı salınımı,  $\Delta H_{\text{off}}$  ile gösterilen ortalama ısı akısı denge durumundan olan sapmaların toplamı ve ısı akısı  $\Delta H_{\text{rms}}$ 'nin değişimi ile belirlenir.

$$\frac{\Delta u(z_m)}{u_0(z_m)} = \frac{\Delta u_s}{u_{s,0}} - \frac{\psi(z_m/L_{\text{off}}) + \psi(z_m/L_{\text{rms}})}{\ln(z_m/z_0)} \quad (2.18)$$

Burada  $L_{\text{off}}$ ,  $\Delta H_{\text{off}}$  ve  $L_{\text{rms}}$ 'ye, dolayısıyla  $F_{\text{rms}}$  ve  $\Delta H_{\text{rms}}$ 'ye karşılık gelen Monin-Obukhov uzunluğudur.  $F_{\text{rms}}$  faktörü,  $\psi$  fonksiyonunun kararlı ve kararsız koşullarda,  $z_m$  seviyesinde, yüksek rüzgar hızlarına doğru meyillenmesinden kaynaklanan farklı formlarını ortaya koyan bir form faktörüdür. Bu aşağıdaki ifadelerden anlaşılabilir (Jensen, 1984).

$$\psi\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{1/4} - 1 \\ -4.7\frac{z}{L} \end{cases} \quad (2.19)$$

Kararsız koşullara ait profilde çok daha küçük olan  $z$ 'ye göre değişim,  $z_m$  seviyesindeki rüzgarın ortalama olarak kararsız tarafta yer almasına neden olur. Bu, ortalama yüzey ısı akısının sıfır olması durumunda bile böyledir. Efektif pozitif ısı akısının ortalamalarının karesinin karekökü değeriyle yani  $F_{\text{rms}}$  faktörüyle bağıntılı olduğu kabul edilmiştir. Burada 0.6 değeri kullanılmıştır.

Sonuç olarak, ortalama hız  $u$ 'nun ortalamadan görece sapmasının ve standart sapma  $\sigma_u$ 'nin düşey değişimleri şu şekilde belirtilmektedir.

$$u(z) = u_0(z) \left\{ \left[ \left(1 + \frac{\Delta u(z_m)}{u_0(z_m)}\right) (1 - f(z)) \right] + \frac{\Delta u_{s,\text{off}}}{u_{s,0}} \right\} \quad (2.20)$$

$$\sigma_u(z) = \sigma_{u0}(z) \left( 1 + \frac{\Delta u_{s,\text{off}}}{u_{s,0}} |f(z)| \right) \quad (2.21)$$

Hız profili fonksiyonu  $f(z)$ ,  $u(z)$ 'in birinci dereceden açılımıyla türetilmektedir.

$$f(z) = 1 - \frac{z \ln(z_m/z_0)}{z_m \ln(z/z_0)} \quad (2.22)$$

Bu ifadeler, girdi olarak kullanılacak verideki kararlılık etkilerinin neden olduğu sapmaların derecesini hesaplamak ve değişik yükseklikler ile farklı yüzey koşullarına ait durumları belirlerken uygun sapma verileri kullanabilmek için analiz kısmına dahil edilmiştir. Özellikle, deniz istasyonlarından alınan veri seti, kara ve deniz üzerindeki ısı akısı parametrelerindeki farkların dikkate alınması ile, kara üzerindeki rüzgar koşullarının belirlenmesinde

kullanılabilir. Bu bağlamda kıyı şeritleri, kara ve deniz arasındaki başlangıç noktası olarak alınmaktadır. Bu işlem, rüzgarüstü doğrultusundaki kıyıya olan uzaklık (x) gözönüne alınarak, kara ve deniz üzerindeki koşullarla ilgili olan kararlılık düzeltmelerini, ağırlıklı w faktörüyle birlikte kullanarak yapılmaktadır.

$$w = \frac{\min(x, c)}{c} \quad (2.23)$$

Burada c, kıyı şeridinin genişliğidir.

#### 2.2.4. Pürüzlülük değişimi modeli

Logaritmik rüzgar profili, sadece rüzgarüstü bölgenin yüzey karakteristiklerinin belli derecede homojen olması durumunda uygulanmaktadır. Eğer farklı bir durum sözkonusu ise, salınımlar gözlenecek ve yüzey karakteristiklerini tek bir pürüzlülük uzunluğu ile ifade etmek mümkün olmayacaktır. Efektif pürüzlülük uzunlukları farklı yöntemlerle belirlenmekle birlikte, bunlar, gözlemin yapıldığı yüksekliğe bağlıdır. İstisna olarak, efektif pürüzlülük uzunluğu kesin bir şekilde jeostrofik sürüklenme kanunu ile belirlenmektedir.

Ortalama yüzey gerilmesi ve yüzey rüzgarı hızları, belli bir yüksekliğe kadar yüzey karakteristiklerine bağlıdır. Yoğun bir şekilde bulunan perdeleyici engeller, sınır tabakanın basınç gradyanı kuvvetleri ve sürtünme arasında bir denge meydana getirmeye olan eğilimlerinden dolayı, burada gözardı edilmektedir. Kullanılan uzaklık ölçeği 10-100 km. mertebesinde olup, Rossby yarıçapı  $G/f$  ile orantılıdır. Rüzgar hızının frekans dağılımı için, 10 km. mertebesindeki uzaklıklara ait yüzey koşullarının dikkate alınmasının yeterli güvenilirliğe sahip olduğu kabul edilmiştir. Yüzey tabaka ile ilgili, basit belirlemelerde rüzgar,  $z_{01}$  pürüzlülük uzunluğu ile karakterize edilen bir yüzeyden  $z_{02}$  pürüzlülük uzunluğuna sahip diğer bir yüzeye doğru eserken, yüzey gerilmesinde meydana gelen değişikliğin küçük-ölçekte modellenmesi mümkün olmaktadır. Bu durumda, pürüzlülük değişimi rüzgaraltı bölgesinde bir İç Sınır Tabaka (İST) oluşturur. Pürüzlülüğün değişim bölgesinden rüzgaraltı doğrultusunda, x mesafesinde bir nokta gözönüne alındığı zaman İST, h ile gösterilen bir yüksekliğe kadar gelişir.

$$\frac{h}{z_0} \left( \ln \frac{h}{z_0} - 1 \right) = \text{sabit} \cdot \frac{x}{z_0} \quad z_0' = \max(z_{01}, z_{02}) \quad (2.24)$$

Rüzgar profili h seviyesinin altında düzensizlik gösterirken, bu seviyenin üzerinde herhangi bir değişiklik gözlenmemektedir. Buradaki 'sabit' in değeri 0.01'den 1.0'a kadar değişir.

Burada  $u_{*2}$ , dikkate alınan noktadaki yüzey sürtünme hızı ve  $u_{*1}$ , değişimin rüzgarüstü bölgesindeki yüzey gerilimidir. İST'da rüzgar profili bozulduğundan yüzey sürtünme hızı logaritmik hız profili kullanılarak belirlenen rüzgar hızlarından hesaplanamaz. Ancak deneysel çalışmalar, sayısal modellerden elde edilen sonuçlar, bozulmuş profilin üç logaritmik bölüme modellenebileceğini göstermiştir.

$$u(z) = \left\{ \begin{array}{ll} u' \frac{\ln(z/z_{01})}{\ln(c_1 h/z_{01})} & , z \geq c_1 h \\ u'' + (u' - u'') \frac{\ln(z/c_2 h)}{\ln(c_1/c_2)} & , c_2 h \leq z \leq c_1 h \\ u'' \frac{\ln(z/z_{02})}{\ln(c_2 h/z_{02})} & , z \leq c_2 h \end{array} \right\} \quad (2.26)$$

Burada,

$$u' = \left( \frac{u_{*1}}{K} \right) \ln \left( \frac{c_1 h}{z_{01}} \right),$$

$$u'' = \left( \frac{u_{*2}}{K} \right) \ln \left( \frac{c_2 h}{z_{02}} \right),$$

$$c_1 = 0.3 \quad , \quad c_2 = 0.09$$

'dur. Bu eşitlik ve (2.25) numaralı eşitlik yardımıyla ölçülmüş bir rüzgar hızına karşılık gelen  $u_{*2}$  yüzey sürtünme hızı, akışın geldiği doğrultudaki pürüzlülüğe karşılık gelen sürtünme hızıyla ilişkilendirilebilir. Daha fazla pürüzlülük değişimi için (2.25) numaralı eşitlik ardışık olarak kullanılabilir. Böylece ölçülen bir rüzgar hızı, daha gerilerde akışı etkileyen, yüzey sürtünme hızlarını hesaplamakta kullanılabilir. Ancak, ardışık pürüzlülük değişimleri çok kısa mesafelerde meydana gelmemelidir. Bu nedenle, "eğer  $x_n$ , yüzey pürüzlülüğündeki n.değişim ise, daha gerideki pürüzlülük, dikkate alınan azimut sektöründe  $x_n$  ile  $2x_n$  arasında ortalama bir alanı kaplar", şeklinde bir mesafe kuralı uygulanır. Buradaki 2 faktörü farklı pürüzlülükler sahip bölgeler arasındaki kesişim (geçiş) bölgesinin durumuna göre değişmektedir.

Buraya kadar anlatılan pürüzlülük değişimi modeli gerçeklerden farklı sonuçlar vermektedir. Çünkü, yukarıda bahsedilen sınır tabakanın dengeye gelme eğilimini içermektedir. Kararlılık düzeltmelerinde olduğu gibi sapmalar, çok küçük çalkantılar olarak dikkate alınmış ve asimptotik davranış temeline dayalı olarak basit bir model geliştirilmiştir. Akışın çok gerisindeki yüzey koşulları  $x/D$  oranı büyüdükçe önemini yitirmelidir. Burada D seçilen denge mesafesidir (10 km.) ve üst yüzey tabaka ilişkileri  $x \ll D$  için uygulanmalıdır. Bu koşul, pürüzlülük değişiminin  $W_n$  ağırlık faktörü ile ağırlıklı hale getirilmesi sonucunda sağlanır.

$$W_n = \exp\left(-\frac{x_n}{D}\right) \quad (2.27)$$

$X_n$  mesafesinde  $z_{0n}$ 'de  $z_{0n+1}$ 'e bir değişimi dikkate almak yerine

$$\ln(z_{0n}) + W_n \ln\left(\frac{z_{0n+1}}{z_{0n}}\right)$$

değeri,  $\ln(z_{0n+1})$  değerinin yerine konulmaktadır. Bu ağırlıklı hale getirme ardışık olarak kullanılarak, akışın çok gerisindeki yüzey sürtünme hızlarının değeri, jeostrofik sürüklenme kanununun sağlandığı eşdeğer yüzey pürüzlülüğüne karşılık gelen bir değerle birlikte elde edilir. Pürüzlülük değişimi hatlarının belirlenmesine ait bir örnek Şekil 2.9'da verilmiştir.

### 2.2.5. Perdeleme modeli

Toprak üzerindeki sürtünme etkisine, yüzey üzerindeki bireysel kum taneleri, yapraklar, otlar v.b.'den, büyük ağaçlara ve binalara kadar değişen çeşitli engeller neden olmaktadır. Bunların tamamının etkisi yüzey pürüzlülük uzunluğu ile modellenmektedir. Bir engelin yüksekliği kadar bir uzaklıkta ve engelin yüksekliğinin iki katı yüksekliklerde, özellikle engelin rüzgaraltında kalan iz bölgesinde rüzgar profili bozulmaktadır. Bu nedenle engeller tek tek incelenmektedir. Bina veya ağaç dizisi gibi perdeleyici nesnelere hemen arkasında oluşan iz bölgesinde (rüzgaraltı tarafında, nesne yüksekliğinin 5 katı bir uzaklıkta ve 2 katından biraz daha az bir yükseklikte) nesnenin özellikleri önemli etkilere sahiptir. Bir binanın arkasındaki iz bölgesi, örneğin binanın çatısının geometrisine ve rüzgarın geliş yönüne bağlıdır. Buna ek olarak yakındaki diğer nesnelere de etkisi altında kaldığı durumlarda problem son derece karmaşıklaşmaktadır.

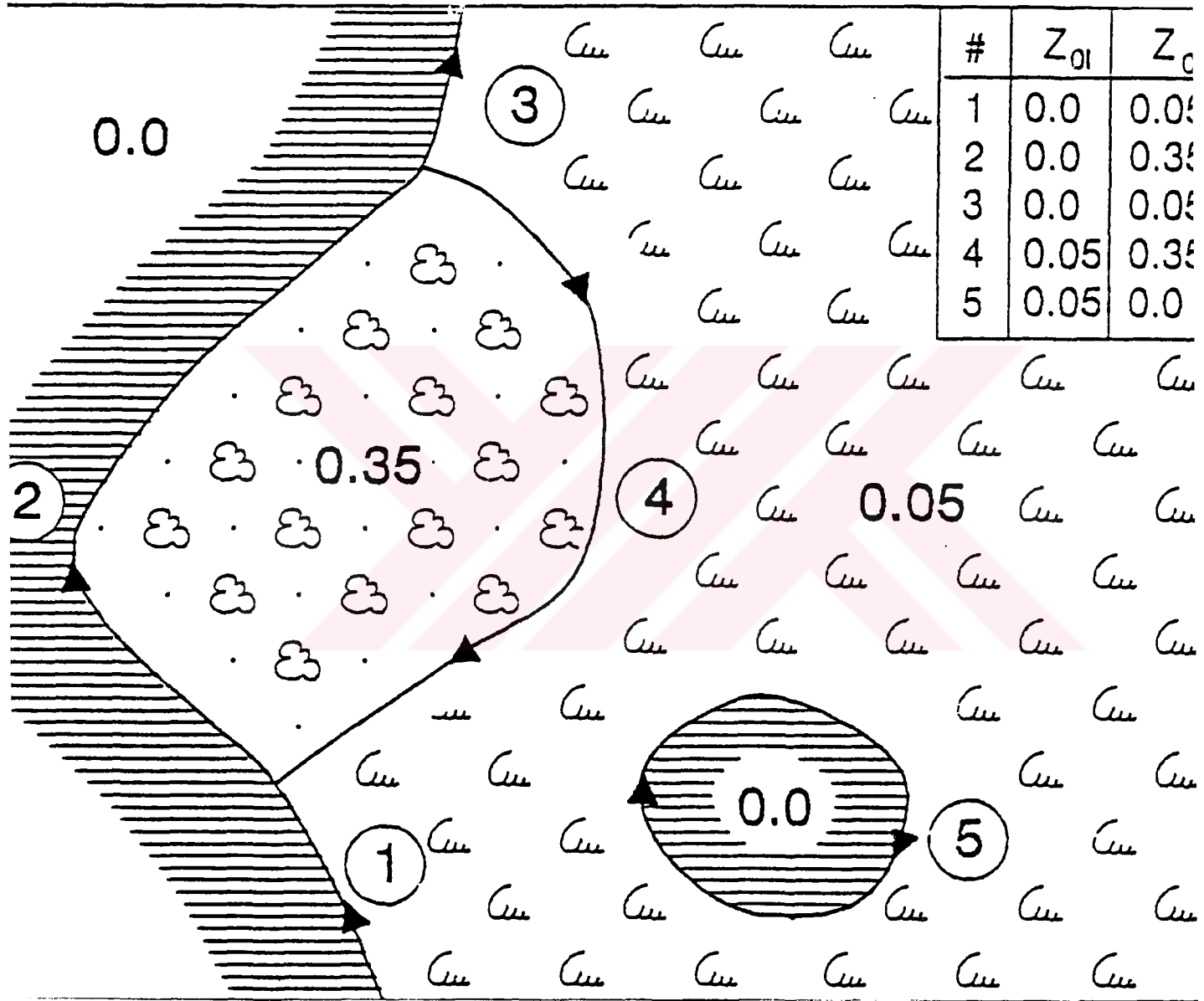
Bu problemin kaynağı, verilerin, çoğu zaman, yakın çevresinde perdeleyici engeller bulunan istasyonlardan elde edilmesidir.

Bu açıklamalar ışığında perdeleme modeli, perdeleyici engellerin neden olduğu bozulmaları belirlemek ve yakındaki iz bölgelerinin meydana getirdiği karışıklıktan kurtulmak için kullanılacak bir araç olarak geliştirilmiştir. İki boyutlu yarı sınırsız engeller (ağaç dizileri, duvarlar veya çitler gibi) için Perera (1981) tarafından rüzgar tüneli deneylerinden elde edilen aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$\frac{\Delta u}{u} = 9.8 \left(\frac{z_a}{h}\right)^{0.14} \frac{x}{h} (1 - P) \eta \exp(-0.67 \eta^{1.5}) \quad (2.28)$$

Burada,

$$\eta = \frac{z_a}{h} \left( \frac{0.32}{\ln(h/z_0)} \frac{x}{h} \right)^{-0.47} \quad (2.29)$$



Şekil 2.9 Pürüzlülük değişim hatları örneği. Her hat bir başlangıç noktası, bitiş noktası ve iki pürüzlülük uzunluğu değeri ile temsil edilir.

$P$  = Porozite = (geçirgen alan / toplam alan),  
 $h$  = engelin yüksekliği,  
 $z_a$  = dikkate alınan yükseklik (anemometre yüksekliği),  
 $x$  = akış doğrultusundaki mesafedir.

Sonlu engel uzunluklarında ve çarpık gelen rüzgar durumlarında engelin meydana getirdiği perdeleme genellikle daha farklı olmaktadır.

Dikkate alınan noktadan radyal olarak çizilen bir çizginin engelleri kestiği mesafeler ve bu engellerin yükseklikleri not edilir. Eğer bir çizgi birçok engeli kesmekte ise, bu kesişimlerin herbiri başlangıçta yarı-sınırsız bir engel olarak dikkate alınır. En fazla kesişime sahip olan çizgiden başlayarak, akış doğrultusundaki tüm engellerin neden olduğu perdeleme ardışık olarak hesaplanır.

Engellerin gözönüne alınan nokta üzerindeki ardışık olarak yarattığı perdeleme etkilerinin hesaplanmasından sonra her çizgideki perdeleme, komşu çizgilerin perdelemeleriyle birleştirilmiştir. Bu, iz bölgesi kenarındaki momentum açığının aktüel karışımını modellemek için yapılmıştır. Sonuçta, her azimut sektörü içinde kalan çizgiler üzerinde hesaplanan perdeleme miktarları toplanarak, her azimut sektörü için bir ortalama perdeleme değeri belirlenir. Burada her 30°'lik azimut sektörü için 8 çizgi ve 12°'lik bir açı üzerinde efektif bir yanal dağılım kullanılmıştır.

### 2.2.6. Orografik Model

Pürüzlülük değişimi ve perdeleme modellerinde olduğu gibi, orografik model de bölgesel yüzey karakteristiğindeki homojen olmayan etkilere göre rüzgar verilerini düzeltmek için kullanılmaktadır. Söz konusu durumda bu, ölçüm istasyonu çevresindeki yüzey karakteristiklerinin yüksekliklerindeki farklılıklar anlamına gelmektedir. Özellikle yatay ölçeği birkaç 10 km. olan yüzey karakteristiği dalgalanmaları üzerinde durulmuş ve model bu amaca hizmet edecek şekilde geliştirilmiştir. Jackson ve Hunt (1975) tarafından tepeler üzerindeki akış analizine dayanan MS3DJH model grubuyla çok büyük benzerlikler göstermektedir. Ancak orografik model bazı açılardan farklılıklar göstermektedir. En önemli fark, yüksek çözünürlüğü ve polar gösterimidir.

Modeldeki ilk adım, yüzey karakteristiklerinden kaynaklanan ve bozulmamış rüzgar yönündeki birim rüzgar vektörüne karşılık gelen potansiyel akış çalkantılarının hesaplanmasıdır. Bu işlem, hız çalkantısının potansiyelle ilişkisinden yola çıkılarak yapılır.

$$\bar{u} = \nabla\chi \quad (2.30)$$

Burada  $\chi$  potansiyeli,  $\bar{u}$  üç boyutlu hız çalkantılarını;  $\bar{u} = (\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$  göstermektedir. Eğer bir dış model yarıçapında ( $R$ ), potansiyelin kayb olduğu kabul edilirse potansiyel akış probleminin polar koordinatlardaki genel çözümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\chi_j = K_{nj} J_n \left( c_j^n \frac{r}{R} \right) \exp(i n \phi) \exp \left( -c_j^n \frac{z}{R} \right) \quad (2.31)$$

Burada  $K_{nj}$  duruma bağlı rastgele bir katsayı,  $J_n$  n. derece Bessel fonksiyonu,  $r$  yarıçap,  $\phi$  azimut açısı,  $z$  yükseklik ve  $c_j^n$  de  $J_n$ 'in i.sıfır değeridir. Öznel bir durumda katsayılar sınır koşullarıyla belirlenmektedir. Buradaki sınır koşulları kinematik sınır koşullarıdır.

$$w_0 = \frac{\partial}{\partial z} \chi_j \Big|_{z=0} = \bar{u}_0 \cdot \nabla h(r, \phi) \quad (2.32)$$

Bu eşitlikteki  $w_0$  terimi yüzey karakteristiklerinin neden olduğu düşey hız,  $\phi$  başlangıç hız vektörü ve  $h$  ise yüzey karakteristiklerinin yüksekliğidir.  $J_n \left( c_j^n \frac{r}{R} \right)$  her  $n$  için radyal fonksiyonlardan (Fourier -Bessel serileri) oluşan bir ortogonal set oluşturur. Azimut gösterimi  $\exp(i n \phi)$ , sözedilene benzer bir ortogonal set (Fourier serileri) oluşturur. O halde  $K_{nj}$  katsayıları, (2.32) numaralı eşitliğin sağ tarafını bu fonksiyonların temeline uydurarak, bağımsız olarak hesaplanabilir. Bu dönüşümlerin matematik detayı Orberheltinger (1973) tarafından belirlenmiştir.

Polar gösterim diğer modellerde kullanılan kartezyen gösterime göre birçok avantaja sahiptir. Aynı zamanda ışın dağılımına ait ayrışmayı da içermektedir. Model merkezini, dikkate alınan nokta ile çakıştırmak kaydıyla model kararlılığını bu noktada yoğunlaştırmak ve bu noktadaki hesaplamaları çalkantı hesaplamalarıyla sınırlandırmak da mümkün olmaktadır. Merkez nokta için ( $r = 0$ ) aşağıdaki çözüm bulunur:

$$\nabla \chi_j = \frac{1}{2} (1, i) K_{1j} \frac{c_j^1}{R} \exp \left( -c_j^1 \frac{z}{R} \right) \quad (2.33)$$

Böylece, modelin ilk adımındaki son netice, potansiyel akış çalkantılarının çözümünün (2.33) numaralı eşitlikteki terimlerin toplamı şeklinde verildiği  $K_{1j}$  katsayılarının bir serisidir. Her terim aynı zamanda, çalkantının karakteristik derinliği olan ortak bir yatay ölçeğe,  $L_j = R / c_j^1$  sahiptir.

Modelin ikinci adımı, yüzey sürtünmesinin etkisini yaklaşık bir hassasiyetle potansiyel akış çözümüne dahil eden bir düzenlemeyi içermektedir.

Potansiyel akış, momentum ve azalan türbülanslı momentum transferi eşitliklerinde, basınç gradyanı kuvvetiyle momentum adveksiyonu arasında bir denge ifade etmektedir. Yüzey yakınında türbülans transferi ihmal edilemez. Potansiyel akış durumuna göre olan salınımlar, derinliği  $\xi$  ile  $\xi \ll L_j$  olan bir tabakayla sınırlandırılmıştır. Kullanılan bu modelde  $\xi$ 'nin değeri Jensen (1984) tarafından önerilen aşağıdaki formülle belirlenmiştir.

$$\xi = 0.3 z_{0j} \left( \frac{L_j}{z_{0j}} \right)^{0.67} \quad (2.34)$$

Burada  $z_{0j}$  gözönüne alınan ölçekteki pürüzlülük uzunluğudur. Homojen koşullarda  $z_{0j} = z_0$  olarak alınmaktadır. Homojen olmayan durumlar için yüzey pürüzlülük uzunluğu, rüzgarüstü bölgede  $r = 0$ 'dan  $r = 5L_j$ 'ye kadar üstel ağırlıklı ortalama olarak alınır (ağırlık  $\ln(z_0)$ )).

Yüksekliğin  $\xi$ 'den çok küçük olduğu durumlarda türbülans transferi gerilme ile rüzgar kayması arasındaki hız çalkantısının logaritmik profiline neden olan bir denge oluşturmaya çalışır. Maksimum akış çalkantısı,  $\xi$  ile kıyaslanabilir yüksekliklerde meydana gelir. Bu çalkantı, potansiyel akıştan kaynaklanan değeri aşmaktadır. Orografik modelde çalkantı profili,  $z$  yüksekliğinde genliği  $\Delta u_j$  olan bir çalkantı varsayılarak, yukarıdaki açılımın her bir terimi için modellenmiştir.

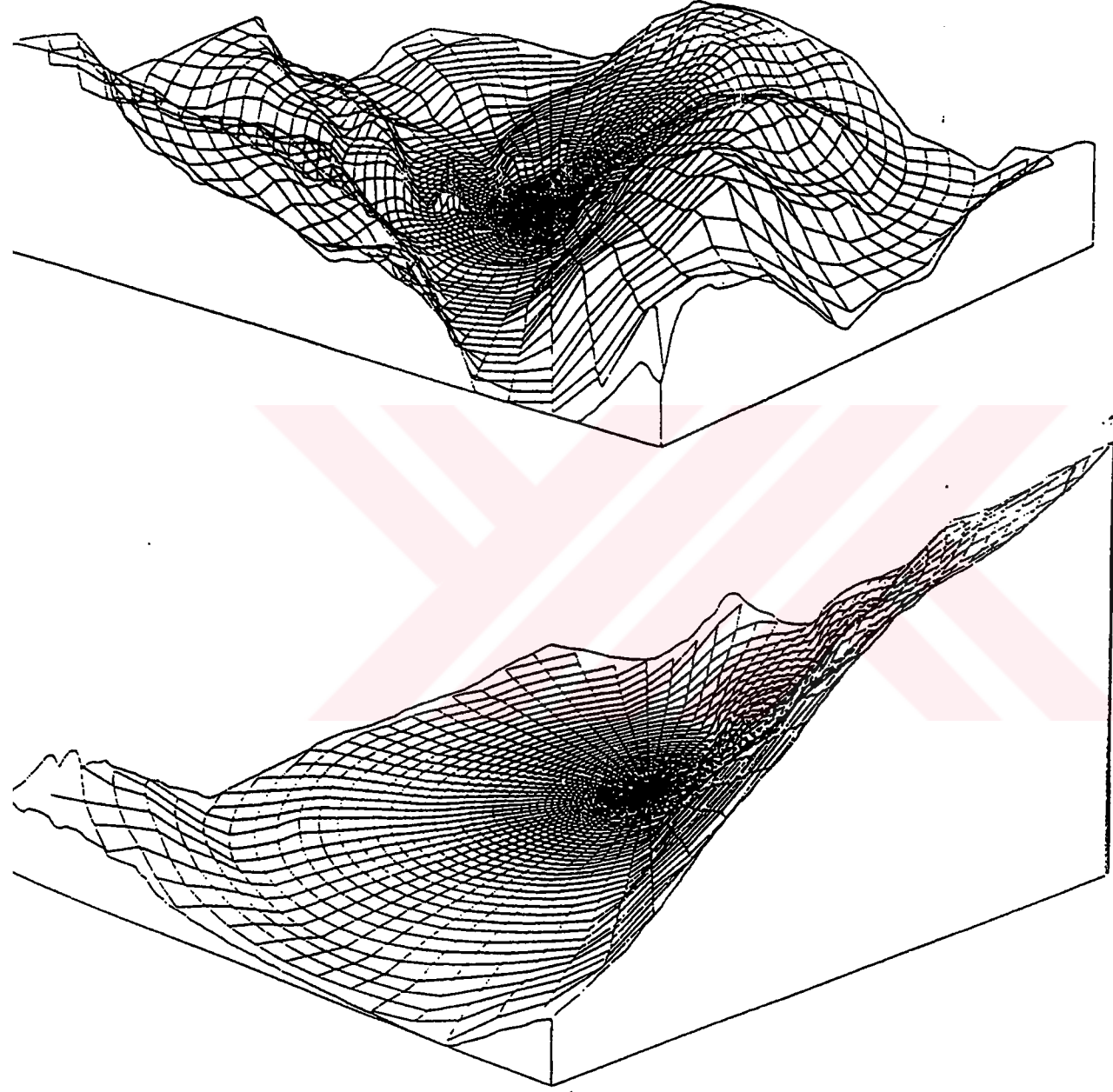
$$\frac{\Delta \bar{u}_j(z)}{|u_0(z)|} = \frac{|u_0(L_j)|^2}{|u_0(z'_j)|^2} \nabla \chi_j \quad (2.35)$$

Burada  $u_0(z)$   $z$  yüksekliğindeki temel durum hızı ve  $z'_j$  ise maksimum  $(z, \xi)$ 'dir.

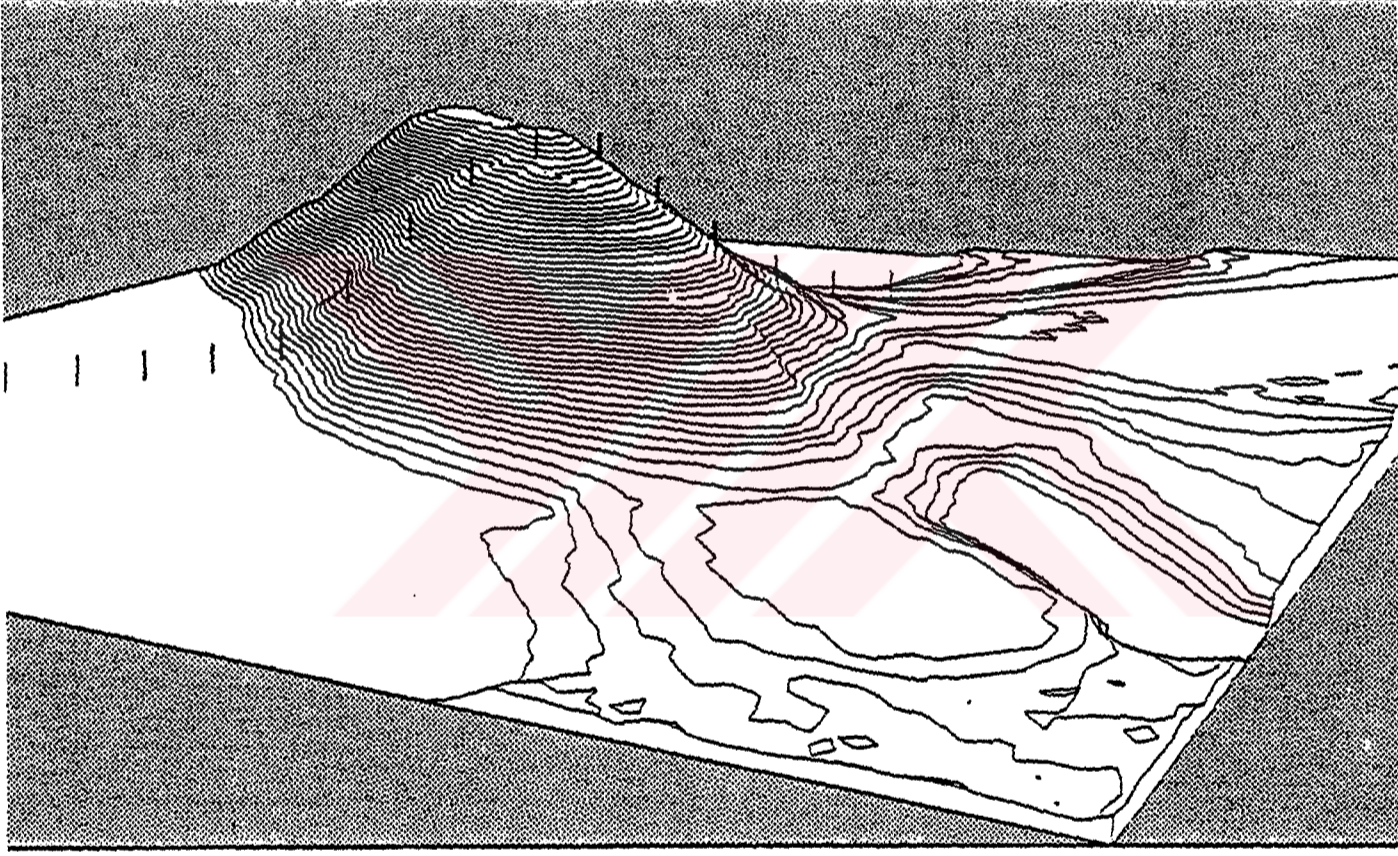
Yansıtma metoduyla  $K_1$  katsayılarının hesaplanması azimut açısı ve yarıçapa bağlı sayısal integral işlemlerini içermektedir. Bu işlemler Şekil 2.10'da gösterilen kafesler üzerinden yapılmıştır. Radyal kafes büyüklüğü merkezde en küçüktür ve dışa doğru sabit bir oranda (1.06) artmaktadır. Prensipite gerekli olan veri, her kafes noktasında yüzey karakteristiğinin yüksekliğidir. Ancak yüzey karakteristiklerinin daha iyi bir sunumu topoğrafik haritalarda gösterilen eşyükseklik eğrileridir. Bu yüzden model, rastgele seçilmiş kontur çizgilerini veri olarak kabul edip, kafes noktası değerlerini belirleyip birleştirecek ve sayısal integrasyonları bir aşamada yapacak şekilde tasarlanmıştır. Kafes sistemi 100 radyal istasyondan oluşmuştur. Merkezde gerçekleşen çözünürlük  $R = 10$  km. için 2 m. ve 50 km. için yaklaşık 10 m.'dir. Sonuç olarak çözünürlük, pratikte topoğrafik haritalardaki kontur verilerinin doğruluğu ve sıklığı (yoğunluğu) ile sınırlanmıştır. Bir yükselti çevresindeki rüzgar profili değişiminin deneysel sonuçları Şekil 2.11 - Şekil 2.12'de verilmiştir.

### 2.2.7. Rüzgar verilerinin işlenmesi

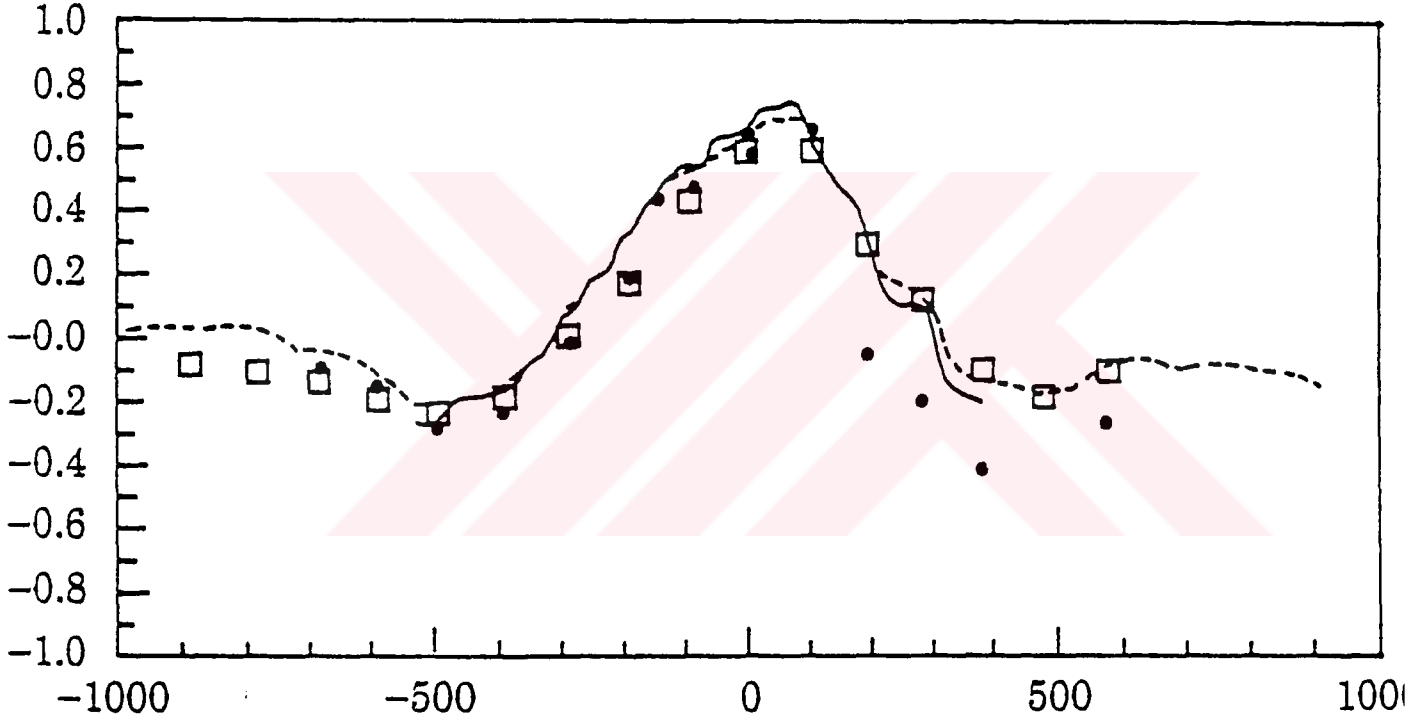
Rüzgarın esmesine yolaçan mekanizmaların, hava olayları gibi, zamanla çok yavaş değişmesine karşın, rüzgar hızı yerel ve gözönüne alınan bir noktada zamanla çok hızlı değişim göstermektedir. Rüzgardaki bu değişimin nedeni atmosferik sınır tabakadaki türbülanstır. Ölçülen rüzgar hızına bir anlam kazandırmak için rüzgar hızının bir ortalama alma T periyoduna referans edilmesi gerekmektedir. İdeal durumlarda ölçümler hızlı okuma yapan bir cihazla yapılmalı ve ortalama değer ( $\bar{u}$ ) integrasyonla hesaplanmalıdır.



Şekil 2.10 Karmaşık yüzey karakteristiği durumundaki akışın hesaplanmasında kullanılan polar kafesler.



Şekil 2.11 Şekil 2.12'deki deneysel sonuçların alındığı yükselti perspektifi.



Şekil 2.12 Şekil 2.11'deki yükselti üzerinde belirlenmiş olan noktalardan (yerden 10 m. yüksekten) alınan ölçümler ile, yükselti boyunca görece hızı değişimi. Noktalar; ölçülen değerleri, kareler; orografik model sonuçlarını göstermektedir. Başka iki modelden alınan sonuçlar ise düz ve kesikli çizgi ile belirtilmiştir. Yatay eksen; tepe doruğundan metre olarak uzaklığı, düşey eksen; görece hız değişimini göstermektedir.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (2.36)$$

Pratikte ölçüm aletinin teknik özelliklerine ve çalıştırma ayarlarına bağlı olarak, veri raporlarının hazırlanmasında kullanılan ortalama alma periyotları birkaç dakikadan saatlik değerlere kadar değişmektedir. Rüzgar Atlası'nda kullanılan verilerin ortalama alma zamanları 10 dakika veya bir saattir. Böylece veri setindeki her gözlem bir ortalama hız ( $u$ ) değeri verecektir. Bu çalışmada, elde edilen ortalamaların frekans tabloları ve Weibull dağılımları şeklindeki istatistiksel ifadeleri kullanılmaktadır.

Veri, ortalamanın alındığı  $T$  periyodundan küçük zamanlı hız salınımları hakkında herhangi bir bilgi içermemektedir. Bu hızlı türbülans salınımları yine de teorik rüzgar gücü yoğunluğu değerini etkilemektedir. Dolayısı ile rüzgar gücü potansiyeli hesaplamalarında dikkate alınmaları gerekmektedir.  $T$  zaman aralığında mevcut olan rüzgar gücü yoğunluğu:

$$\bar{E} = \overline{\frac{1}{2} \rho u^3} = \frac{1}{2} \frac{1}{T} \int_0^T \rho u^3(t) dt \quad (2.37)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada hava yoğunluğu  $\rho$ , çok küçük bir yüzde hata miktarıyla sabit olarak kabul edilebilir. Böylece eşitlik aşağıdaki hale dönüşür.

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad (2.38)$$

Enstantane rüzgar hızı ( $u$ ), ortalama değerle, ortalamadan sapmanın toplamı şeklinde yazılabilir.

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.39)$$

Doğrudan işlemler sonucunda aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{u}' &= 0 \\ \overline{u'^2} &= \overline{u^2} - (\bar{u})^2 \\ \overline{u^3} &= (\bar{u})^3 + \overline{u'^3} + 3\overline{u'^2} \bar{u} \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}\sigma_u^2 &\equiv \overline{u^2} \\ i &\equiv \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \\ \bar{E} &\equiv \frac{1}{2} \rho (\bar{u})^3 (1 + 3i^2)\end{aligned}\quad (2.41)$$

ifadeleri yazılabilir. Ortalama hız  $\bar{u}$ 'nin frekans dağılımı, düzeltme terimi  $3i^2$  hariç  $\bar{E}$ 'yi belirlemektedir. Türbülans yoğunluğu yüzey koşullarına ve yüksekliğe bağlıdır. Homojen yüzey pürüzlülüğü hali ve nötr koşullarda basit bir ilişki kurulabilir:

$$i = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (2.42)$$

(2.41) numaralı eşitlikteki düzeltme terimi % 10'dan daha az bir katkı sağlamaktadır. ( $z = 30$  m. ve  $z_0 = 0.03$  m. için % 6). Elde edilen bu sonucun sadece gözönüne alınan nokta için temsili olduğunu ve rüzgar türbininden elde edilecek gücün bulunmasında rotor seviyesindeki rüzgar hızlarının ve türbin veriminin etkili olduğunu belirtmekte yarar vardır.

### 2.2.8. Weibull Dağılımı

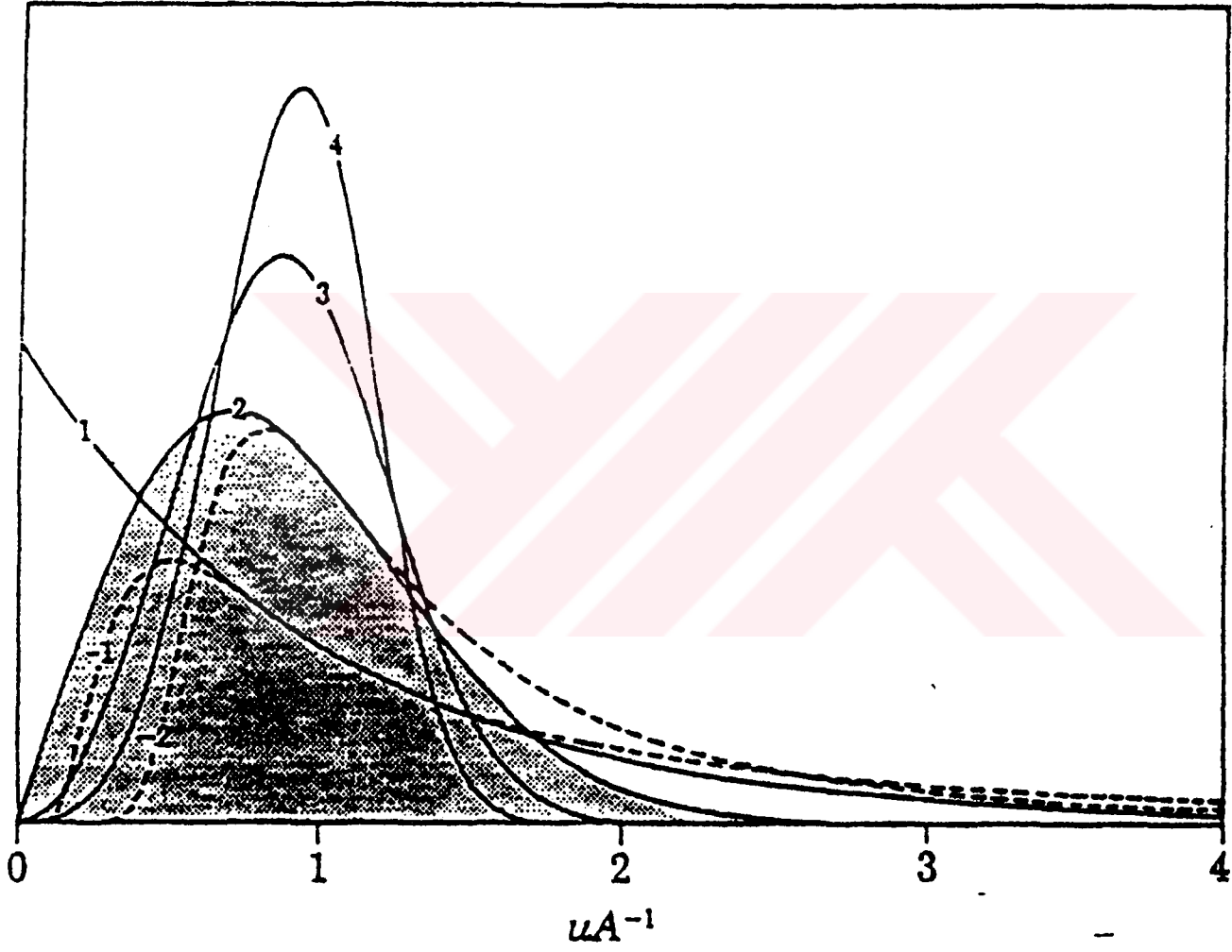
Weibull dağılımı, rüzgar hızı frekans dağılımını kısa bir biçimde sunmak için bir araç olarak kullanılmıştır. İki parametrelili Weibull dağılımı matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right] \quad (2.43)$$

Burada  $f(u)$ ,  $u$  ortalama hızının gözlenen frekansını göstermektedir. Weibull parametreleri  $A$  ve  $k$  sırasıyla ölçek ve şekil parametreleridir. Şekil 2.13'de  $k$  parametresinin  $f(u)$ 'ya etkileri görülmektedir.  $k > 1$  için maksimum değer (mod)  $u > 0$ 'dadır.  $0 < k \leq 1$  için ise fonksiyon tekdüze bir şekilde azalmaktadır.

Weibull dağılımı iki özel dağılım fonksiyonuna dönüşebilmektedir.  $k = 1$  için üstel dağılım ve  $k = 2$  için Rayleigh dağılımı. Rüzgar verileri, genelde Rayleigh dağılımı ile ifade edilmekle birlikte WASP'ta daha genel bir ifade olan Weibull dağılımı kullanılmıştır. Özellikle kuzey Avrupa iklimindeki istasyonlarda  $k$  parametresinin 2 değerine çok yakın olduğu tesbit edilmiştir.

Kümülatif Weibull dağılımı  $F(u)$ , rüzgar hızının oluşma olasılığını vermektedir.



Şekil 2.13 Weibull dağılımının farklı  $k$  şekil parametrelerine karşılık gelen grafikleri.

$$F(u) = \exp\left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right] \quad (2.44)$$

Weibull dağılımı, Weibull-dağılımlı üst kuvvetler oluşturur; u hızı, A ve k parametrelerinin Weibull-dağılımlısı ise,  $u^m$  de,  $A^m$  ve  $k/m$  parametrelerinin Weibull dağılımlısıdır. Weibull dağılımlarının moment ve diğer karakteristiklerinin türetilmesi kolayca yapılabilmektedir. Bazı karakteristikler aşağıda sıralanmıştır (  $\Gamma$ : Gamma Dağılımı ).

$$\begin{aligned} \text{ortalama değer} & : A\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \\ \text{ortalamanın karesi} & : A^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \\ \text{ortalamanın kübü} & : A^3\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \\ \text{ortalamanın m. kuvveti} & : A^m\Gamma\left(1 + \frac{m}{k}\right) \\ \text{varyans} & : A^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right] \\ \text{mod değeri} & : A\left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} \\ \text{medyan} & : A(\ln 2)^{1/k} \end{aligned} \quad (2.45)$$

Rüzgarın sahip olduğu güç yoğunluğu, rüzgar hızının kübü ile orantılıdır.

$$E = \frac{1}{2}\rho A^3\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2.46)$$

Burada E güç yoğunluğu ( $W/m^2$ ),  $\rho$  havanın yoğunluğu ( $\sim 1.2 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $15^\circ\text{C}$  sıcaklık ve 1013 mb standart basınç altında)'dur. Elde edilebilecek en fazla güç yoğunluğu değerinin karşılık geldiği rüzgar hızı, şu şekilde bulunmaktadır:

$$u_m = A\left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (2.47)$$

Her rüzgar hızı aralığına karşılık gelen frekans değerlerini gösteren histogramlara Weibull parametrelerini uydurmak için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Eğer gözlenen veri Weibull dağılımına iyi uyuyorsa, uydurma işlemi istenildiği gibi seçilebilir. Burada, yüksek rüzgar hızları dikkate alınmış ve moment uydurma yöntemi kullanılmıştır. Bunun nedeni ağırlığın, yüksek fakat ekstrem olmayan rüzgar hızlarına verilmek istenmesidir.

Weibull parametreleri, uydurulan Weibull dağılımındaki ve gözlenen dağılımdaki toplam rüzgar enerjisinin eşit olmasının yanısıra, her iki dağılımda gözlenen rüzgar hız frekanslarının, gözlenen ortalama rüzgar hızlarından büyük olması gereksinimlerini karşılayacak şekilde belirlenmiştir. Bu iki gereksinimin kombinasyonu sadece  $k$ 'ya bağlı bir eşitliğin bulunmasını sağlamaktadır. Bu eşitlik de basit kök bulma algoritması ile çözülmektedir.



### 3. BİR ÖRNEK UYGULAMA

#### (BOZCAADA RÜZGAR ATLASININ HAZIRLANMASI VE 1 MW KURULU GÜÇTE BİR TÜRBİN İLE ENERJİ ÜRETİM ÖNGÖRÜMÜ)

##### 3.1. Giriş

Kuzey Ege Denizi'nde, Çanakkale Boğazı' nın 20 km kadar güneybatısında yer alan Bozcaada 36 km<sup>2</sup> yüzölçümüne sahip olup, anakaradan en dar yerinde 6 km uzaklıktadır (Ek 1). Bozcaada, Anadolu Kıta Sahanelığı üzerindedir; jeolojik yapısı ve jeomorfolojisi ile onun bir uzantısıdır (Ek 2).

Adanın daha yüksek ve daha engebeli olan doğu yarısı, güney kesiminde pleozoyik yaşlı mermerlerden, kuzey kesiminde eosen oluşuklarıyla bunları kesen andezitlerden oluşur (Ek 3).

Adanın en yüksek noktası olan Göztepe de (191m) burada, kuzey kıyıları yakınında yer alır. Adanın daralarak uzanan batı yarısı neojen oluşuklarıyla kaplı yüksekliğı 50-70 m. arasında kuru bazı vadilerle yarılmış bir plato görünümündedir. Bu kesimin en batı ucu, büyük kısmı bitkilerle sabitleşmiş kumullarla kaplıdır. Kıyıları çoğunlukla yalıyarlar halindedir. Şiddetli fırtınalara açık olan kuzey kıyısı önünde bazı adacıklar (Mavna adası, Gökçeada) ve deniz içi kayalıklar vardır.

Akdeniz ikliminin etkisinde olan adanın doğal bitki örtüsünü yer yer görülen kızıl çamlar ve kumcul bitkiler dışında maki ve garig meydana getirir. Az nüfuslanmış olan adanın tek yerleşim birimi ilçenin merkezi olan Bozcaada kasabasıdır (1990 sayımında 1903 kişi).

Yıllık elektrik ihtiyacı yaklaşık 1 GWh olan Bozcaada' nın elektrik ihtiyacı deniz altından döşenmiş olan 34.5 kV' luk bir iletim hattıyla sağlanmaktadır.

Fazla karmaşık olmayan bir topoğrafik yapıya sahip olmasının yanısıra (Ek 4), istatistiksel rüzgar hızı ortalamasının görece yüksek olması nedeniyle, Bozcaada, çalışmamızda pilot bölge olarak seçilmiştir.

##### 3.2. Gerekli Veri ve İşlenmesi

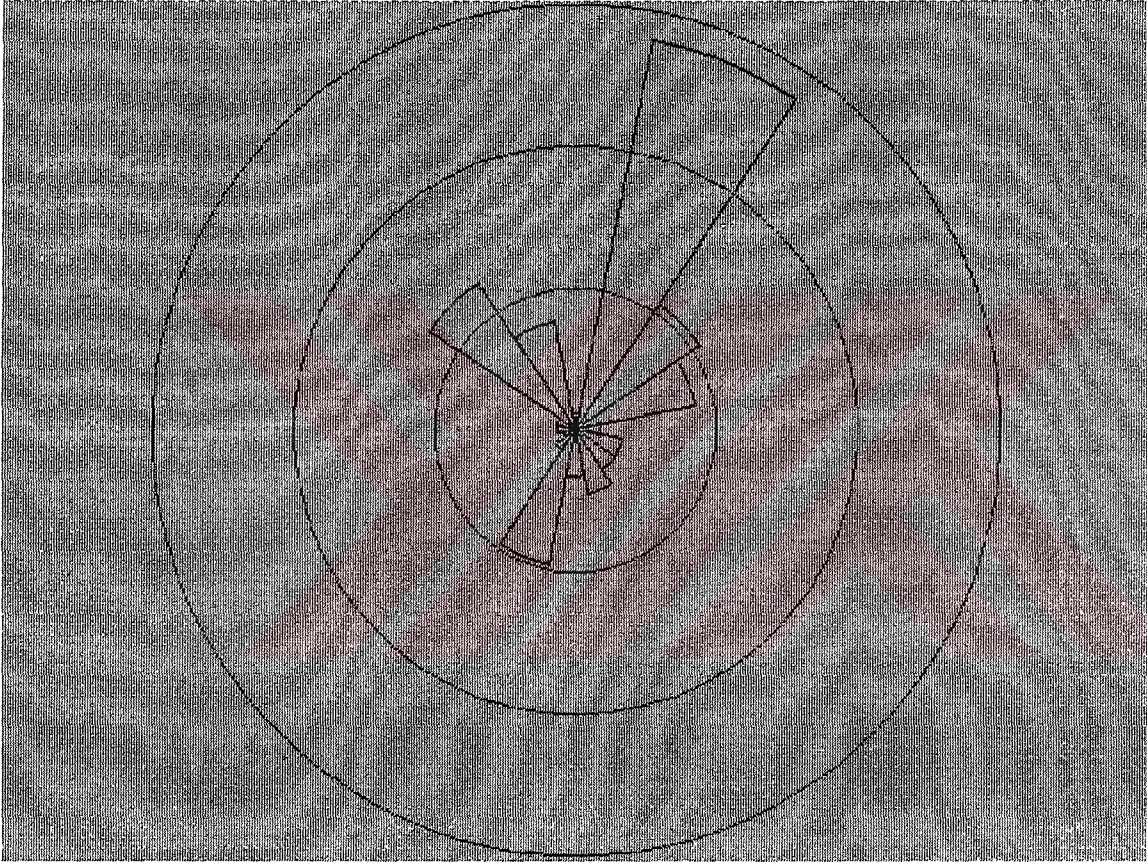
Bozcaada Meteoroloji İstasyonunda, yer seviyesinden 10 m yüksekliğe kurulu mekanik anemograf yardımıyla ölçülen 1981-1983 yıllarına ait (toplam 3 yıllık) rüzgar hız ve yön değerleri kullanılarak (Çizelge 3.1), Çizelge 3.2'de görülen sektörel frekans ve Weibull A, k parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca rüzgar enerji yoğunluğu hesaplanmıştır. Bunlar, düzeltmeler (topoğrafya, pürüzlülük ve perdeleme) yapılmadan önceki değerlerdir.

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de sırasıyla rüzgar yönlerinin sektörel dağılımı ve genel frekans histogramı ile uydurulan Weibull dağılımı verilmiştir.

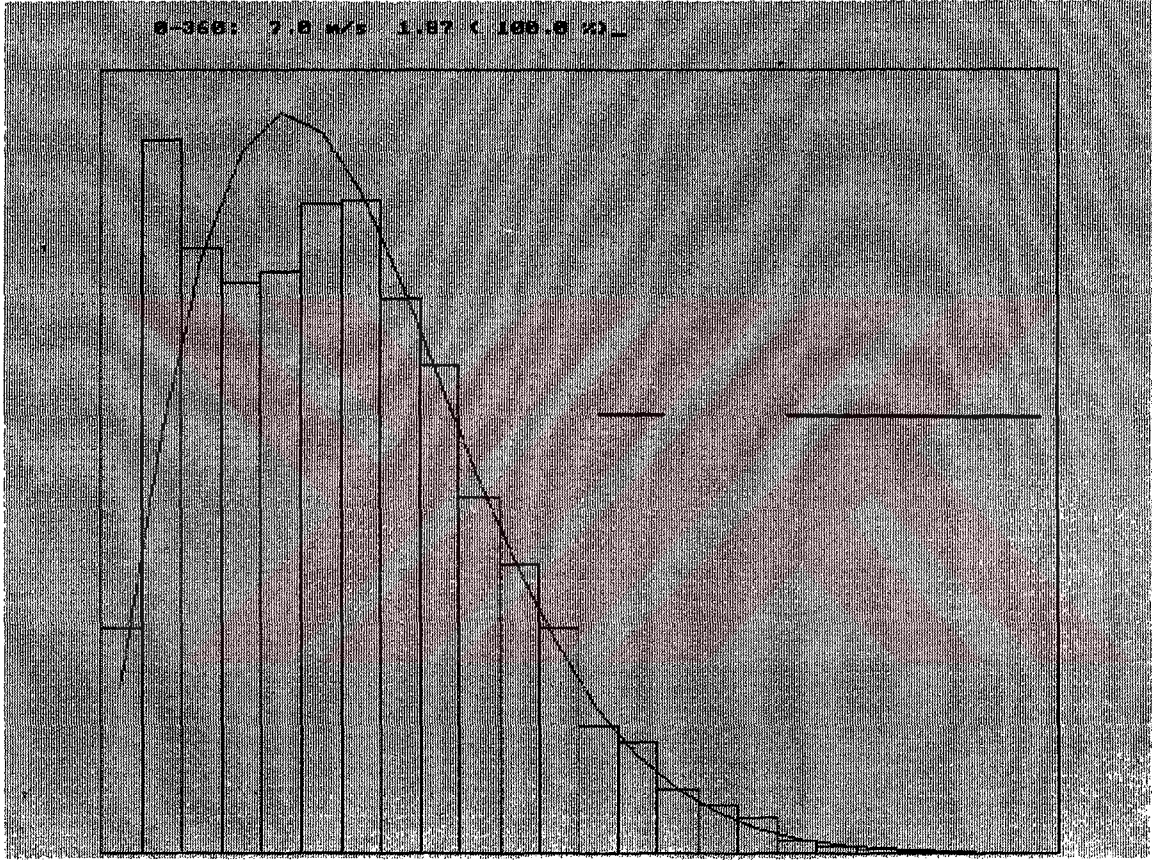


Çizelge 3.2 İstatistiksel verilere göre hesaplanmış Weibull A, k parametreleri, % f ve % E değerleri.

Sektör	A	k	% f	% E
0	7,8	2,22	7,1	8,3
30	8,4	2,37	28,6	39,8
60	7,1	2,14	12,5	11,3
90	4,2	1,46	3,8	1,2
120	3,1	1,14	4,5	1
150	5,7	1,41	5,5	4,8
180	8,5	2,26	5,7	8,5
210	8,6	2	8,9	15,5
240	4,6	1,15	1,6	1,2
270	3,4	1,53	1,6	0,2
300	4,8	2,2	7,4	2
330	5,9	2,28	12,8	6,3
M= 6,2 m/s		E= 301 W/m <sup>2</sup>		



**Şekil 3.1** Sektör bazında, % olarak, esme frekansları.  
(Çemberler 10 birimlik artımlarla çizilmiştir.)



Şekil 3.2 Rüzgar hızı frekans histogramı ve uydurulan Weibull dağılımı.

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görüldüğü gibi hakim rüzgar yönü  $30^\circ$  sektöründe olup, en yüksek frekansa sahip hız aralığı  $7 \text{ ms}^{-1}$ ’dir.

Rüzgar verisinin yüzey karakteristiklerine göre düzeltilmesi için, 1/25000 - 1/50000 ölçekli topoğrafik haritalardan yararlanılarak, bilgisayar ortamında, Bozcaada’nın üç boyutlu eş yükseklik eğrileri haritası hazırlanmıştır (Şekil 3.3).

Yüzey pürüzlülüğü’nün rüzgar verisi üzerindeki etkilerini değerlendirip, işlemek için Çizelge 3.3’de verilen pürüzlülük uzunluğu değerleri ve göz önüne alınan noktaya (anemografin bulunduğu yere) olan uzaklıkları girdi olarak kullanılmıştır.

Rüzgar atlası oluşturulması işleminde gerekli olan diğer girdi, meteoroloji istasyonunun yakın çevresinde bulunan bina, ağaç v.b. gibi perdeleyici engellerin boyutları, uzaklıkları ve geçirgenlikleridir (porozite).

Bozcaada Meteoroloji İstasyonu çevresinde bulunan perdeleyici engeller Şekil 3.4’de şematik olarak, Çizelge 3.4’de liste halinde verilmiştir.

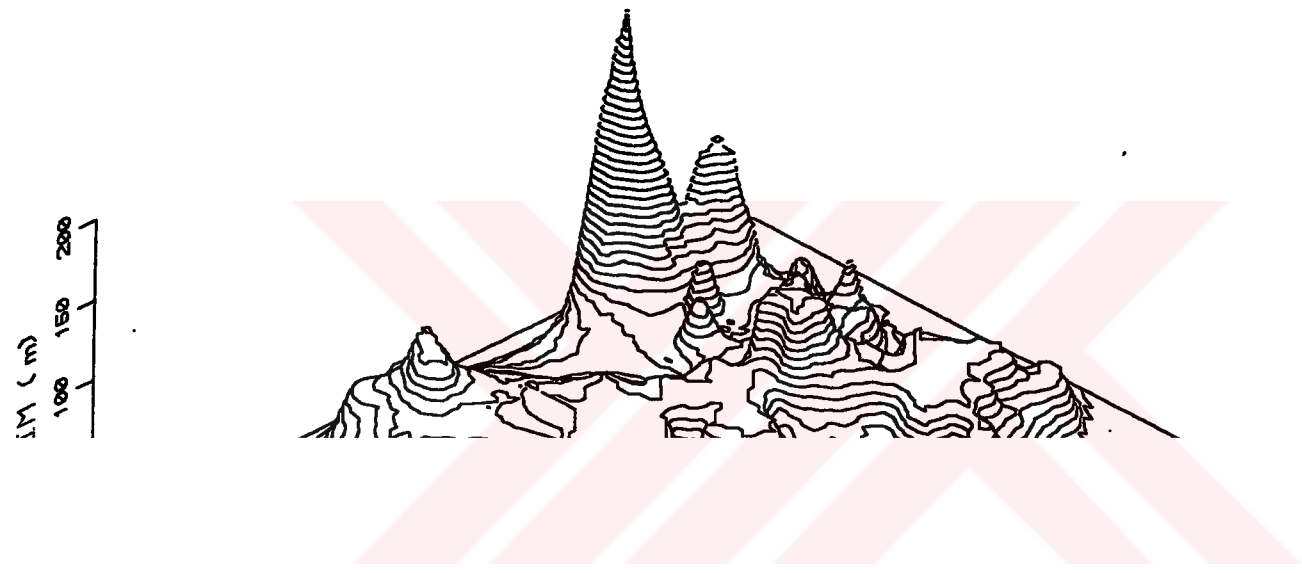
### 3.3. Atlas İstatistikleri ve Örnek Enerji Üretim Tahmini

Bütün bu işlemler sonucunda pürüzlülük, perdeleyici engeller ve topoğrafya (orografi)’nin, gözlenen rüzgar istatistikleri üzerindeki etkileri hesaplanarak, düzeltilmiş A, k, % f ve % E değerleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Düzeltilmiş rüzgar yönü dağılımı Şekil 3.5’de ve düzeltmelerden sonra elde edilen rüzgar hızı frekans histogramı Şekil 3.6’da görülmektedir. Çizelge 3.6 ise, sonuç olarak elde edilen 4 pürüzlülük sınıfına, 5 yükseklik seviyesine ve 12 sektöre ait Weibull A ve k parametreleri şeklindeki rüzgar atlası istatistiklerini içermektedir.

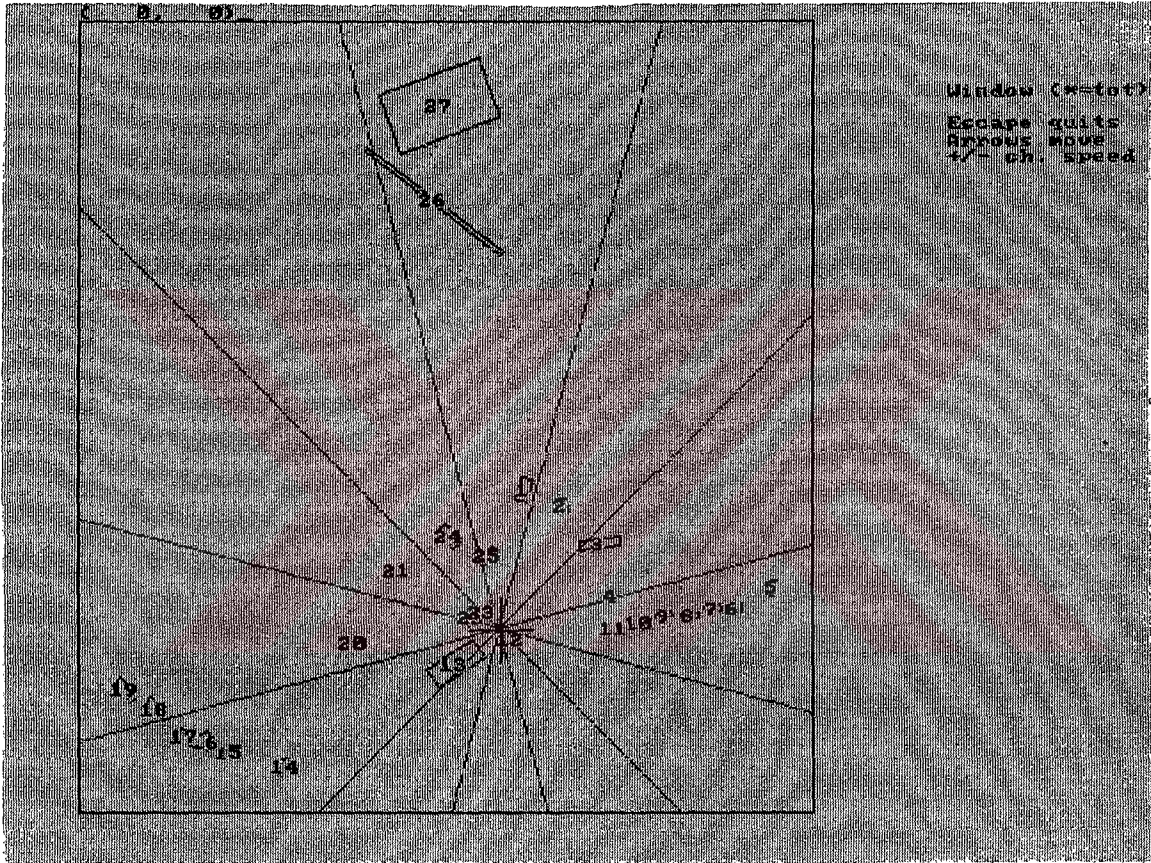
Bir örnek olması açısından; Şekil 3.7’de verilen güç eğrisine, 52.60 m. pervane çapına ve 55 m. pervane göbek yüksekliğine sahip, 1000 kW’lık bir rüzgar türbininin (Ek 5), Şekil 3.8’de gösterilen konuma kurulması halinde, yıllık enerji üretimi hesaplanmıştır.

Türbin için seçilen konumda ve 55 m yükseklikteki pürüzlülük, perdeleyici engeller ve orografinin etkileri Weibull A ve k parametreleri ile frekans ve enerji yüzdeleri sektörel olarak Çizelge 3.7’de sunulmuştur.



Çizelge 3.3 Bozcaada M.İ. anemometresi için pürüzlülük uzunlukları ve mesafeleri.

Sektör	$z_{01}$	x	$z_{02}$	x	$z_{03}$	x	$z_{04}$
0 :	0.30	140	0.00	250	0.08	500	0.00
30 :	0.30	130	0.00				
60 :	0.05	250	0.00				
90 :	0.05	220	0.00				
120 :	0.03	150	0.00				
150 :	0.00	1250	0.00				
180 :	0.05	1100	0.02	4500	0.00		
210 :	0.05	4700	0.00				
240 :	0.04	300	0.03	5500	0.00		
270 :	0.30	250	0.15	500	0.03		
300 :	0.30	500	0.03	2700	0.00		
330 :	0.30	600	0.03	1200	0.00		



Şekil 3.4 Bozcaada M.İ. çevre engelleri şeması.  
(Engel detayları, numaraları ile Çizelge 3.4'den izlenebilir.)

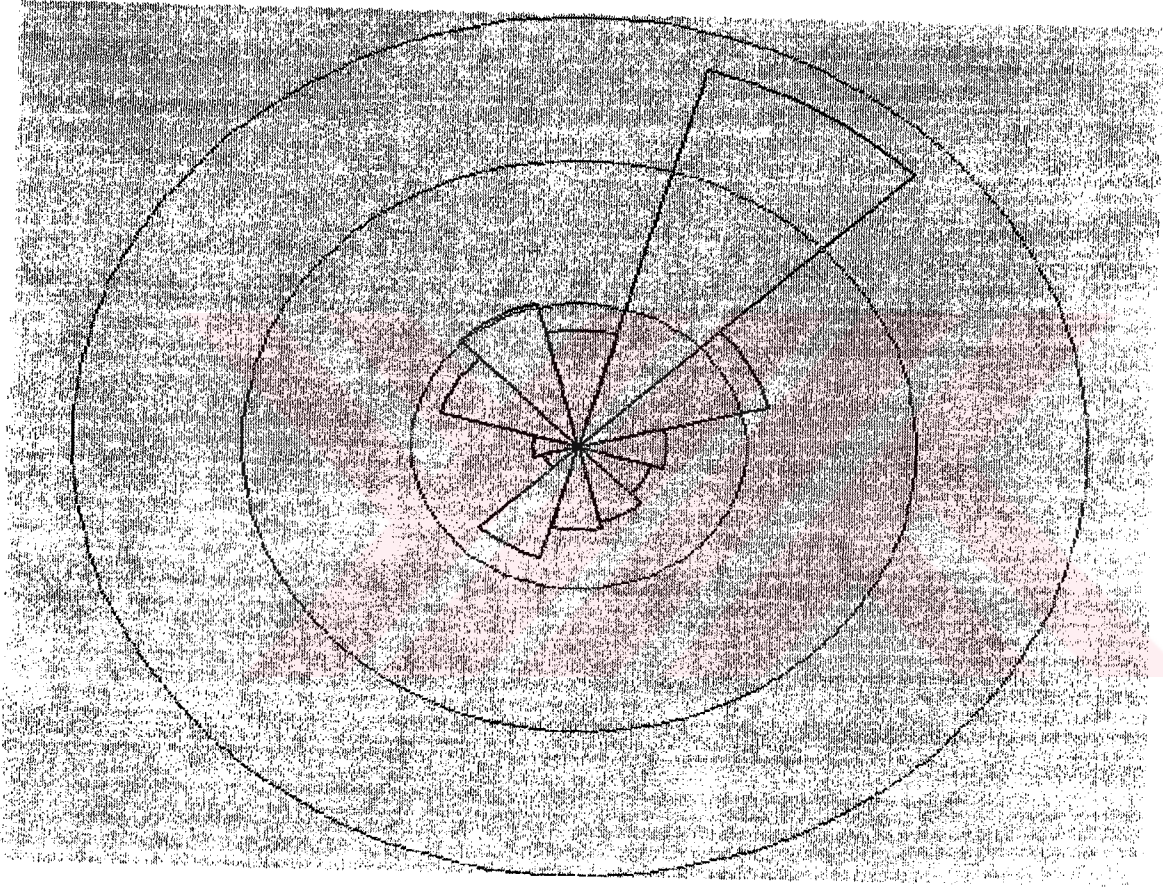
Çizelge 3.4 Bozcaada M.İ. yakın çevre engelleri dökümü.  
(Şematik gösterimi Şekil 3.4'dedir.)

BOZCAADA İSTASYONU YAKIN ÇEVRE ENGELLERİ

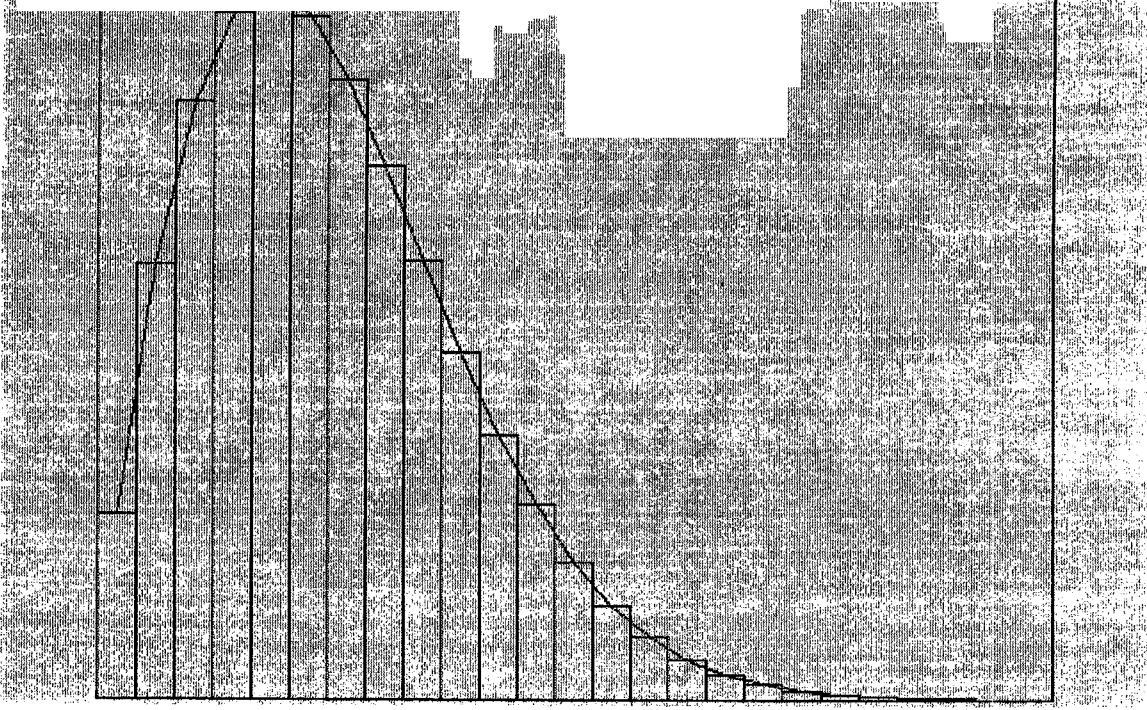
Engel No	A1 (Derece)	F1 (m)	A2 (Derece)	R2 (m)	h (n)	d (m)	Gecirgenlik
1	7	105	12	104	9	18	0.00
2	26	104	30	109	8	10	0.00
3	45	90	55	117	9	7	0.00
4	71	90	76	90	7	5	0.00
5	80	215	83	216	5	8	0.00
6	84	180	86	180	4	13	0.00
7	84	163	86	164	4	13	0.00
8	85	145	87	145	4	13	0.00
9	85	123	87	126	4	13	0.00
10	86	105	89	105	4	13	0.00
11	87	84	91	85	4	13	0.00
12	97	10	154	6	5	10	0.00
13	209	25	251	23	7	44	0.00
14	236	198	239	197	4	10	0.00
15	244	229	246	226	3	16	0.00
16	248	243	251	246	3	8	0.00
17	251	255	253	264	3	9	0.00
18	256	270	259	281	3	8	0.00
19	260	290	263	302	3	10	0.00
20	262	116	266	113	3	6	0.00
21	297	93	301	90	3	6	0.00
22	275	25	308	19	7	6	0.00
23	308	13	331	20	3	6	0.00
24	330	74	336	76	12	19	0.00
25	345	53	359	57	3	10	0.00
26	344	394	360	295	7	4	0.00
27	348	384	360	405	13	50	0.00

Çizelge 3.5 İstatistiksel verilerin yerel koşullarla işlenmesi sonucu düzeltilmiş A, k, %f, %E değerleri ile ort.enerji yoğunluğu.

<b>BOZCAADA Meteoroloji İstasyonu</b>								
<b>BOZCAADA</b>				<b>Yükseklik : 10 m. (yer seviyesinden)</b>				
Sektör	Pürüzlülük	% Engel	%- Orografi -o	A	k	% f	% E	
0	3	-34,5	12,8	4	7,2	2,17	8,1	7,6
30	1	-14,4	8,5	-7	8,5	2,34	27,5	40,3
60	1	-13,1	-7,6	-9	7,1	2,03	11,7	11,4
90	1	-8	-15,6	-3	5,2	1,67	5,2	2,5
120	1	-2,9	-14,2	5	3,3	1,16	4,5	1,2
150	1	-1,2	-3	8	5,9	1,46	5,4	5
180	2	0	12,8	4	8,5	1,94	5,8	10
210	1	-25	8,5	-7	8,2	1,98	8,1	12,6
240	2	-40,4	-7,6	-9	4,2	1,17	2,1	1,2
270	2	-25,2	-15,6	-3	4,4	1,82	2,7	0,7
300	2	-38,6	-14,2	5	4,6	2,17	8,5	2,1
330	2	-30,9	-3	8	6	2,23	10,2	5,3
<b>M= 6,1 m/s</b>		<b>E=298 W/m<sup>2</sup></b>		<b>6,9</b>	<b>1,81</b>			



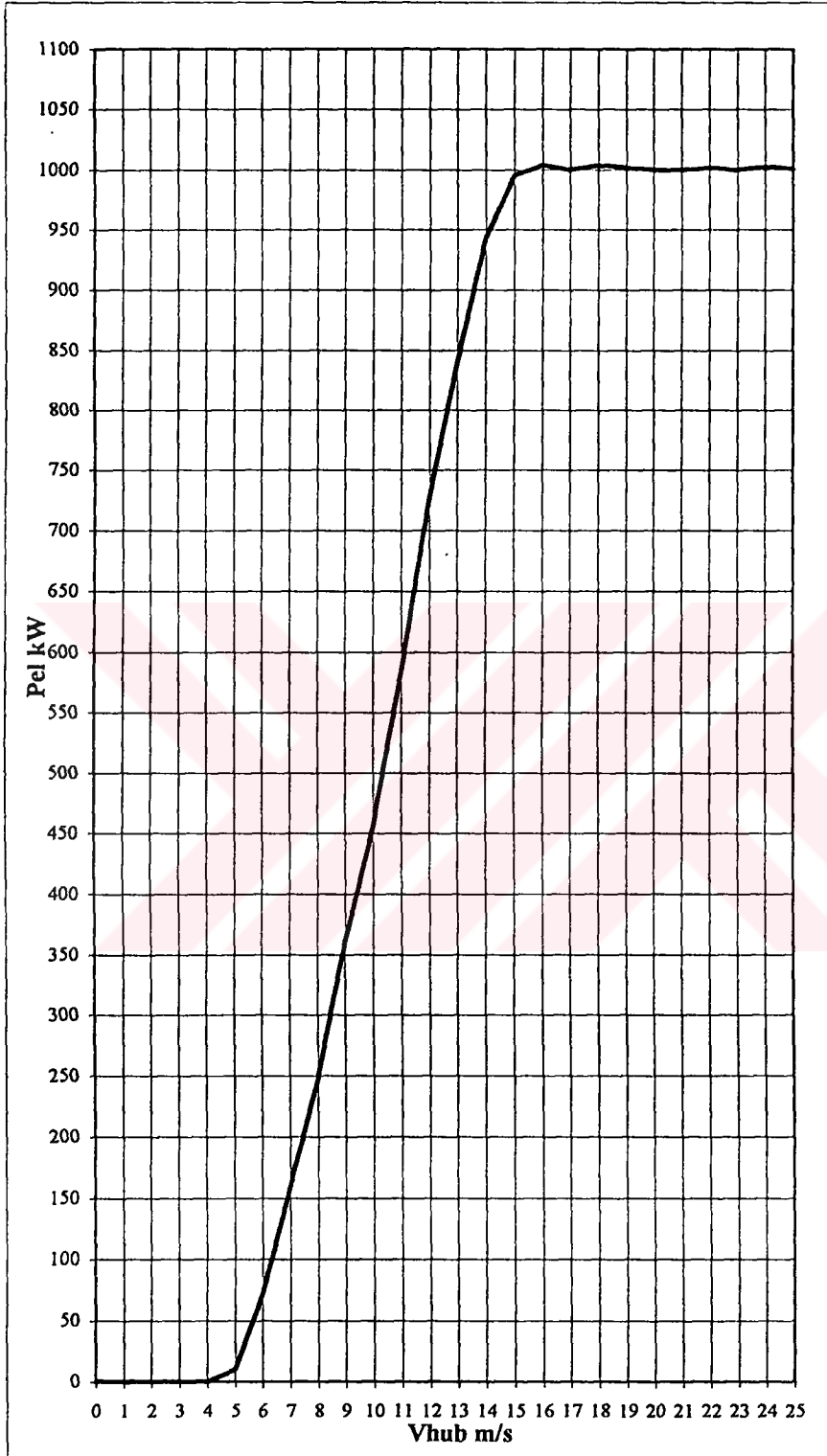
Şekil 3.5 Sektör bazında, % olarak, düzeltilmiş esme frekansları.



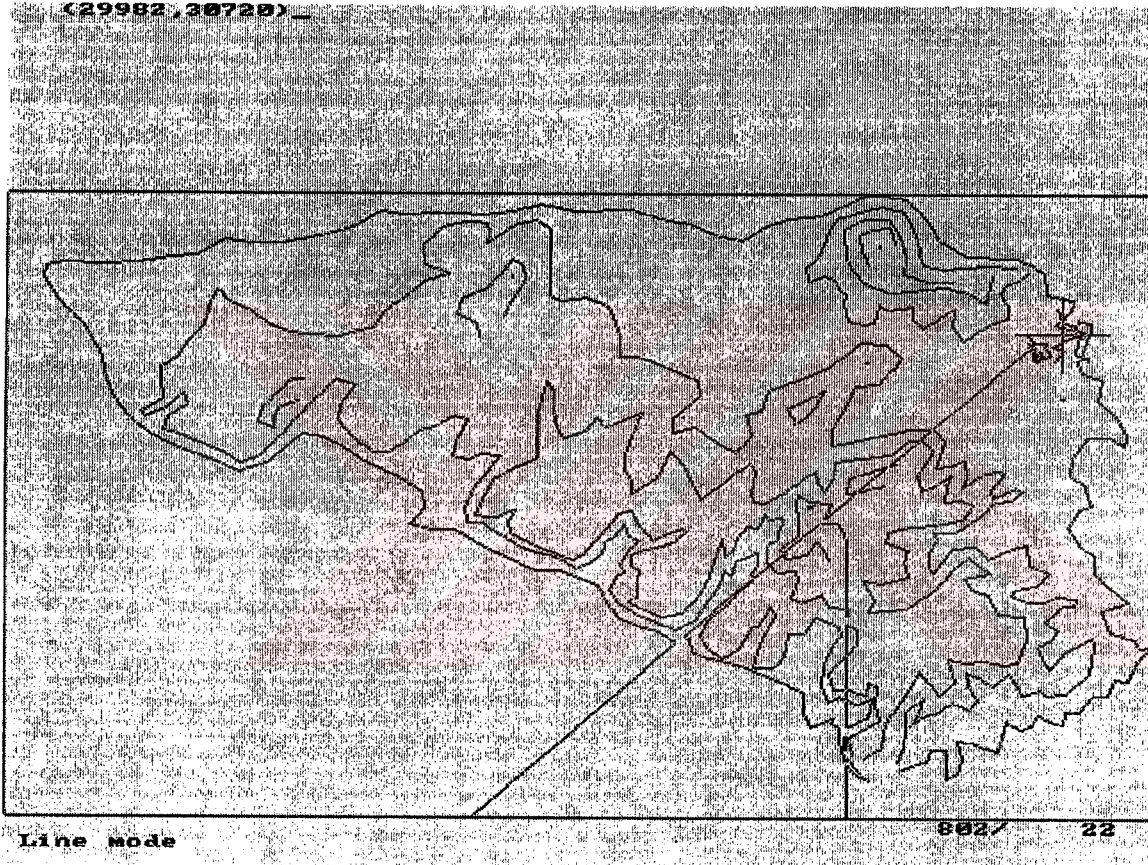
Şekil 3.6 Düzeltilmiş frekans histogramı ve uydurulan Weibull dağılımı.

Çizelge 3.6 Bozcaada için hesaplanmış rüzgar atlası istatistikleri.

PURUZZLULUK SINIF 0												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
10	7.60	7.90	8.80	7.08	3.86	7.22	8.98	12.51	11.08	11.60	15.04	8.49
	2.291	2.420	3.075	1.729	1.186	1.709	3.436	2.205	1.248	2.127	2.424	2.311
25	8.25	8.57	9.55	7.67	4.18	7.89	9.74	13.56	12.09	12.54	16.31	9.21
	2.291	2.420	3.075	1.729	1.186	1.709	3.436	2.205	1.248	2.615	2.424	2.311
50	8.73	9.08	10.11	8.13	4.43	8.30	10.31	14.37	12.81	13.29	17.27	9.75
	2.291	2.420	3.075	1.729	1.186	1.709	3.436	2.205	1.248	2.615	2.424	2.311
100	9.22	9.58	10.68	8.58	4.68	8.76	10.89	15.17	13.52	14.03	18.23	10.30
	2.291	2.420	3.075	1.729	1.186	1.709	3.436	2.205	1.248	2.615	2.424	2.311
200	9.71	10.09	11.24	9.03	4.92	9.22	11.46	15.97	14.23	14.77	19.20	10.84
	2.291	2.420	3.075	1.729	1.186	1.709	3.436	2.205	1.248	2.615	2.424	2.311
Frek	3.56	25.04	13.99	7.55	5.57	5.37	3.35	8.56	2.38	2.46	17.51	4.67
PURUZZLULUK SINIF 1												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
10	5.70	5.64	6.55	5.22	2.76	5.32	6.73	9.28	7.81	8.59	11.15	6.36
	1.889	1.998	1.717	1.439	0.998	1.416	1.979	1.791	1.025	1.764	1.982	1.900
25	6.52	6.51	7.43	5.82	2.92	5.93	7.71	10.59	8.42	9.96	12.79	7.27
	1.561	1.650	1.420	1.197	0.842	1.182	1.666	1.510	0.885	1.787	1.650	1.572
50	7.21	7.53	8.23	6.46	3.26	6.53	8.52	11.71	9.40	11.00	14.13	8.04
	1.600	1.689	1.455	1.225	0.861	1.205	1.705	1.545	0.904	1.830	1.689	1.611
100	7.91	8.26	9.05	7.14	3.66	7.23	9.35	12.87	10.51	12.04	15.50	8.83
	1.682	1.775	1.529	1.283	0.900	1.268	1.791	1.627	0.943	1.924	1.775	1.693
200	8.64	9.00	9.93	7.91	4.18	8.06	10.18	14.07	11.93	13.10	16.90	9.64
	1.889	1.998	1.717	1.439	0.998	1.420	2.014	1.826	1.049	2.166	1.998	1.904
Frek	3.56	25.04	13.99	7.55	5.57	5.37	3.35	8.56	2.38	2.46	17.51	4.67
PURUZZLULUK SINIF 2												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
10	4.98	5.18	5.72	4.56	2.46	4.63	5.87	8.06	6.80	7.48	9.68	5.54
	1.896	2.006	1.732	1.443	1.021	1.416	1.985	1.799	1.029	1.775	1.982	1.903
25	5.90	6.16	6.73	5.27	2.71	5.34	6.98	9.54	7.60	8.97	11.51	6.56
	1.568	1.554	1.436	1.201	0.861	1.182	1.670	1.513	0.889	1.799	1.650	1.580
50	6.65	6.94	7.60	5.97	3.09	6.04	7.87	10.76	8.64	10.11	12.97	7.40
	1.604	1.597	1.467	1.229	0.881	1.205	1.709	1.553	0.904	1.842	1.689	1.515
100	7.42	7.74	8.50	6.71	3.52	6.30	8.77	12.02	9.83	11.26	14.46	8.26
	1.686	1.733	1.541	1.287	0.920	1.263	1.799	1.631	0.947	1.939	1.775	1.701
200	8.22	8.55	9.44	7.53	4.06	7.64	9.69	13.32	11.31	12.41	15.98	9.14
	1.896	2.006	1.732	1.443	1.021	1.420	2.025	1.834	1.053	2.182	1.998	1.912
Frek	3.56	25.04	13.99	7.55	5.57	5.37	3.35	8.56	2.38	2.46	17.51	4.67
PURUZZLULUK SINIF 3												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
10	3.91	4.08	4.43	3.60	1.89	3.65	4.59	6.34	5.36	5.87	7.57	4.35
	1.896	2.014	1.740	1.455	0.998	1.424	1.979	1.818	1.041	1.779	1.982	1.916
25	4.97	5.20	5.66	4.46	2.22	4.51	5.85	8.04	6.42	7.54	9.64	5.53
	1.568	1.662	1.439	1.209	0.842	1.186	1.666	1.533	0.896	1.803	1.650	1.584
50	5.81	6.08	6.63	5.24	2.63	5.30	6.84	9.41	7.59	8.81	11.28	6.47
	1.604	1.701	1.475	1.236	0.861	1.213	1.705	1.568	0.916	1.846	1.689	1.623
100	6.67	6.97	7.63	6.05	3.09	6.13	7.85	10.81	8.88	10.10	13.34	7.43
	1.686	1.791	1.549	1.299	0.900	1.271	1.791	1.650	0.959	1.943	1.775	1.705
200	7.55	7.88	8.67	6.95	3.65	7.04	8.87	12.24	10.43	11.33	14.62	8.41
	1.896	2.014	1.740	1.455	0.998	1.428	2.014	1.854	1.064	2.186	1.998	1.920
Frek	3.56	25.04	13.99	7.55	5.57	5.37	3.35	8.56	2.38	2.46	17.51	4.67



Şekil 3.7 NEDWIND 50 rüzgar türbininin güç eğrisi.



Şekil 3.8 Rüzgar türbininin konumu (Sol üst köşede parantez içindeki değerler türbin yerleştirilen noktanın koordinatlarını göstermektedir.).

türbinin enerji üretimi öngörümü.

<b>Rüzgar Türbini Konumu</b>								
<b>BOZCAADA</b>				<b>Yükseklik : 55 m. (yer seviyesinden)</b>				
Sektör	Pürüzlülük	% Engel	%- Orografi -o	A	k	% f	% E	
0	3	-1,1	4,3	1	13,7	2,23	5,6	7,2
30	1	0	2,1	-2	11,3	2,5	26,2	27,7
60	1	0	-3,2	-3	10,7	2,18	13,3	12,7
90	1	0	-5,5	-1	7,7	1,76	5,9	3,1
120	1	0	-4,7	2	4,6	1,22	5	1,1
150	1	0	-0,5	3	7,8	1,6	5,7	3,2
180	2	0	4,3	1	11,1	2,15	4,7	4,7
210	1	0	2,1	-2	14,1	2,06	8,1	10,2
240	2	-0,1	-3,2	-3	10,5	1,19	2,1	1,6
270	2	-0,1	-5,5	-1	9,9	1,95	3,1	2,6
300	2	0	-4,7	2	12,9	2,22	9,5	11,6
330	2	-0,1	-0,5	3	14,6	2,31	10,6	14,5
<b>M= 10 m/s</b>		<b>E= 1238 W/m2</b>		<b>P=3918 GWh/yıl</b>				



#### 4. SONUÇ

Yapılan çalışmalar ve WASP sonuçları göstermektedir ki, Bozcaada'da konuşlandırılacak 1 MW kurulu güçte bir tek türbin, yıl boyunca, Ada kullanımının yaklaşık dört katı elektrik enerjisi üretmektedir.

Bozcaada'da birkaç türbin ile oluşturulabilecek bir rüzgar çiftliği sözkonusu bölgenin enerji ihtiyacının önemli bir kısmını sağlayabilecektir. Adanın batı bölgesinde, yaklaşık 30 m. yükseklikli, yerleşim olmayan ve görece düşük pürüzlülük sınıfındaki açık alanlar, rüzgar çiftliği tasarımına oldukça elverişlidir. Türbinlerin hakim rüzgar yönü olan N-NE yönünde birbirlerinin iz etkisinde kalmadan, yeterli açıklıkla ( $\sim 3D$ ; D: türbin pervane çapı), kıyı boyunca bir hat üzerinde dizilmeleriyle bir çiftlik tasarlanması mümkündür. Türbinlerin altında kalan alanlarda halen mevcut olan bağcılık faaliyetleri aynen sürdürülebilecektir.

Adanın 1989 yılında, bir Japon şirketi tarafından yapılmış anakaraya bağlantı kablosu, geri beslemeye uygun ve yeterli kapasitededir. Ayrıca hattın anakaradaki trafo bağlantısı, Mahmudiye TEDAŞ İşletmesi'nden olup, bu trafo aynı zamanda, bölgedeki en büyük sanayi tesisi olan Çanakkale Çimento'nun da enerjisini vermektedir. Dolayısı ile, ada kullanımının fazlası olan enerjinin iletim kaybı olmaksızın kullanımı da önemli bir avantaj oluşturmaktadır.

Ülkemiz, bu çalışmada esas alınan Bozcaada ilçemizde olduğu gibi, birçok rüzgar potansiyeli enerji üretimine elverişli bölge ve konuma sahiptir. Enerjinin bunca değer taşıdığı ve ulusal gelişmenin temel parametrelerinden biri olduğu çağımızda, doğal kaynaklarımızdan olabildiğince yararlanılması mantığı ile, rüzgar enerjisi ile ilgili potansiyel belirleme ve enterkonnekte şebekeye bağlı çiftlik kurma çalışmalarına hız verilmelidir.

Rossby, C.G. ve Montgomery, R.B., (1935), "The Layer of Frictional Influence in Wind and Ocean Currents", Papers in Physics of Oceanography and Meteorology, MIT and Woods Hole Oceanography Institute, Vol. III, No. 3: 101.

Jensen, N.O., Petersen, E.L. ve Toren, I., (1986), "Extrapolation of Mean Wind Statistics with Special Regard to Wind Energy Applications", World Meteorological Organization, WPC'86, 85.

Perera, M.D., (1981), "Shelter Behind Two-Dimensional Solid and Porous Fences", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 8: 93-104.

Jackson, P.S. ve Hunt, J.C.R., (1975), "Turbulent Flow Over a Low Hill", Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, No. 101: 929-955.

Oberhettinger, F., (1973), Fourier Expansions, A Collection of Formulas, Academic Press, New York, 64.

Gumbel, E.J., (1958), Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York, 375.

Heister, F.R. ve Pennell, W.T., (1981), The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory, Richland Washington.

Tunçer, K.K. ve Ekren, H., (1993), "Offshore Wind Energy Utilization Possibilities for Black Sea Coast of Türkiye", TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi Seminerleri, Gebze, Kocaeli, Ocak 1993.

Tunçer K.K., (1993), Çanakkale İli, Bozcaada İlçesi için Rüzgar Santrali Teklifi, Enerji Bakanı ile görüşmek üzere hazırlanan özel rapor, Ankara, Mart 1993.

Türksoy, F., (1995), "Investigation of Wind Power Potential at Bozcaada, Turkey", Renewable Energy, Vol. 6, No. 8: 917-923.

Uyar, T.S., Yazar, A. ve Alpay, M.N., (1988), Bozcaada, Çeşme, Fethiye ve Sultanhisar için Hesaplanan Rüzgar Atlas İstatistikleri, TÜBİTAK, MAM, MESAB Proje No: 0630018701, Rapor No: 4.

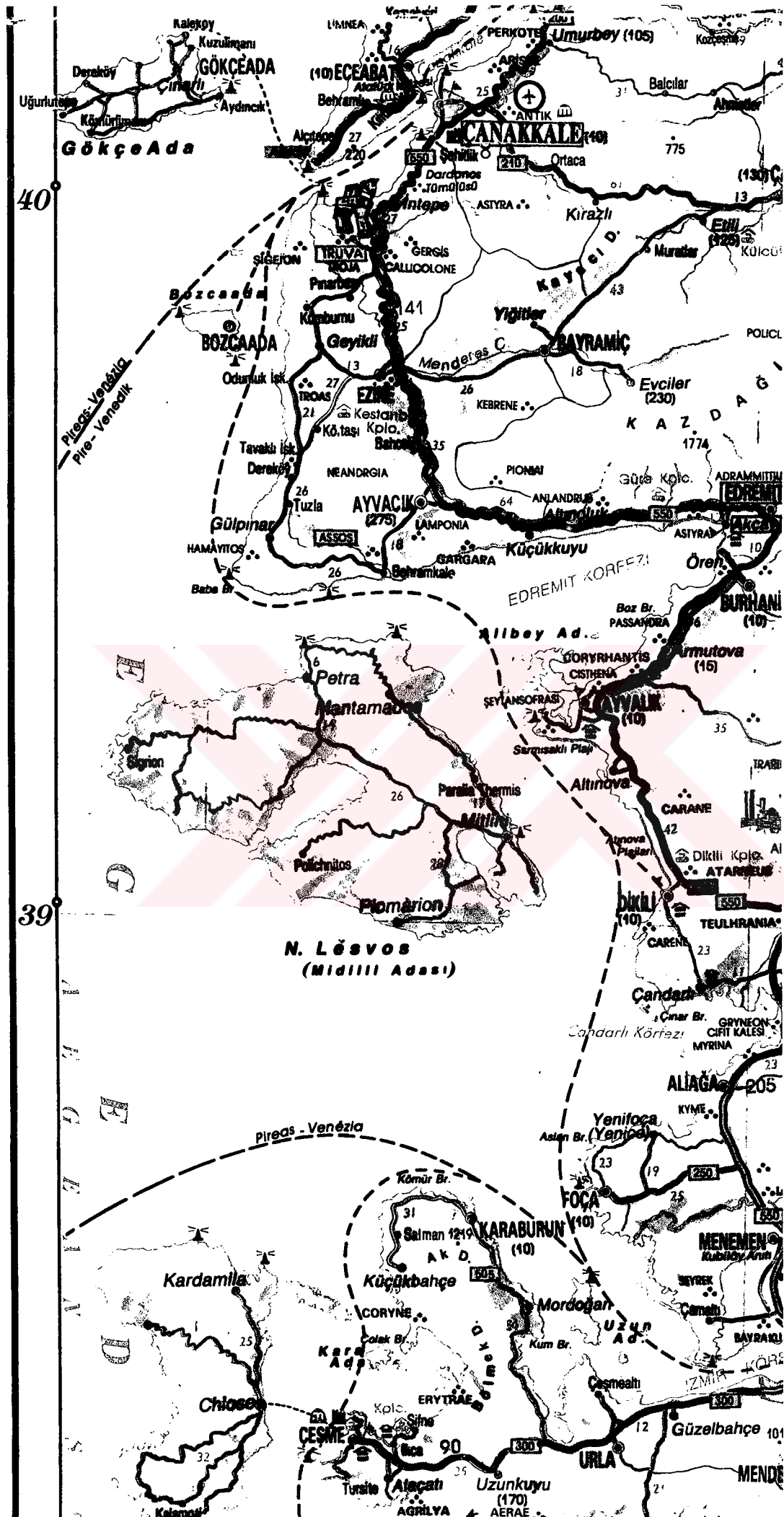
Aygen M.S., (1985), Bütün Yönleriyle Bozcaada, Türkeli Yayınları, 12, Afyon.



**EKLER**

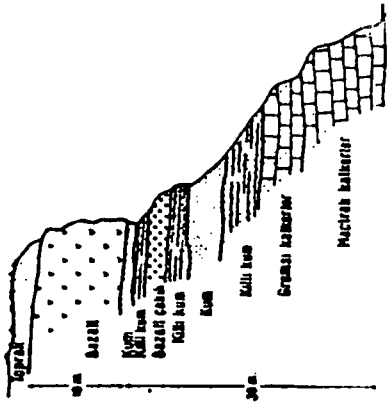
- Ek 1 Bozcaada'nın Konumu
- Ek 2 W-E ve NW-SE Doğrultularında Kıyı Şelfi
- Ek 3 Jeolojik Kesit
- Ek 4 Bozcaada Eşyükseklik Haritası
- Ek 5 NEDWIND 50 Rüzgar Türbini





Ek 2 W-E ve NW-SE Doğrultularında Kıyı Şelfi



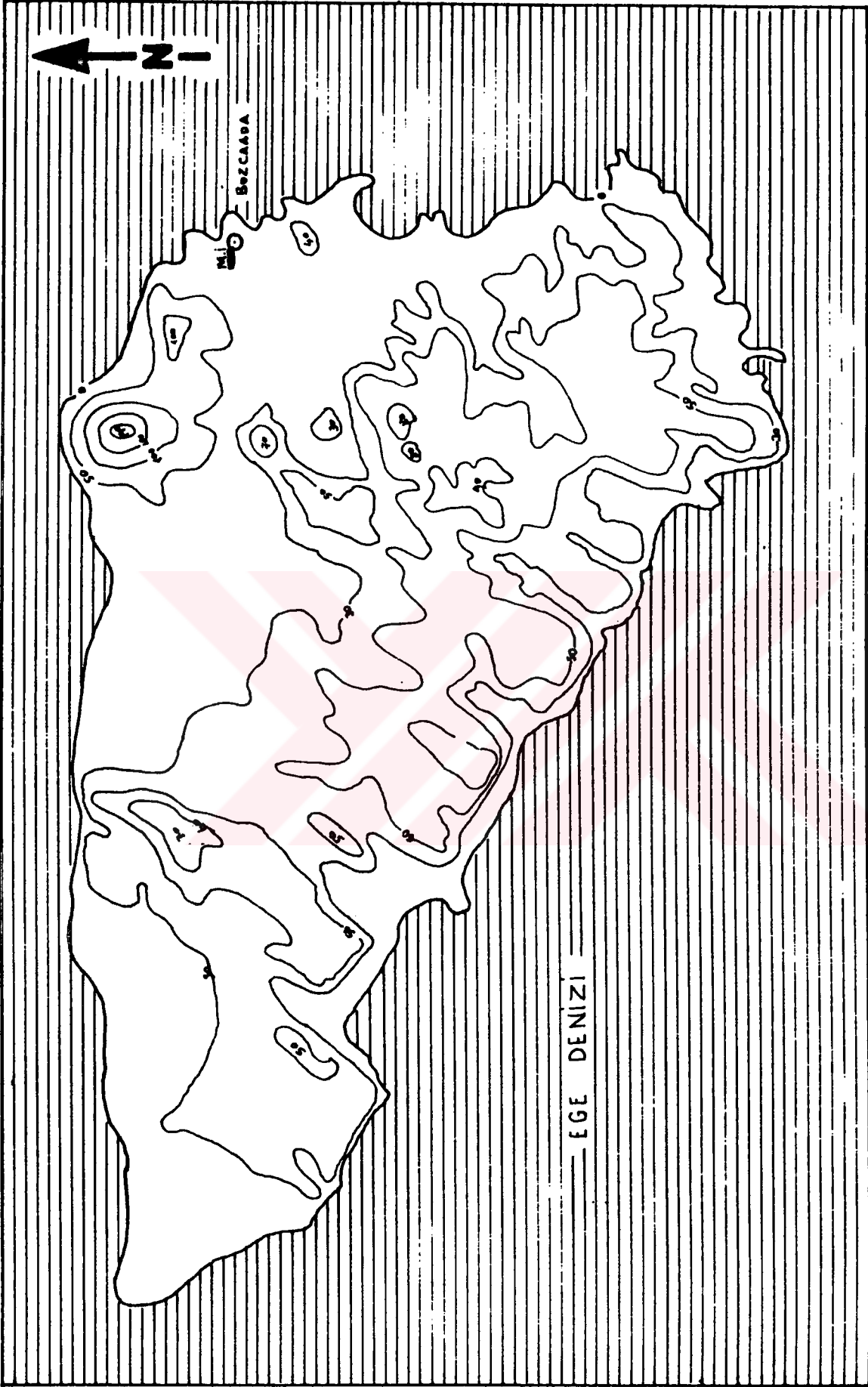


Bozcaada, kesit

Kıyısında, tahezim kesit



Ek 4 Bozcaada Eşyükseklik Haritası





dWind 50

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 24.01.1967

Doğum yeri İstanbul

Lise 1977-1983 Fenerbahçe Lisesi

Lisans 1983-1988 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makina Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

1990-1993 TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi  
1993-1997 Emre Mühendislik San.Tic.Ltd.Şti.  
1997-Devam ediyor EVCEĞİZ OTEL

T.C. MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI  
MİLLÎ EĞİTİM AKADEMİK PERSONELİ