

**RÜZGAR VE GÜNEŞ VERİLERİNİN  
SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE  
ANALİZİ VE SİSTEM MODELLEMESİ**

Fatih Onur HOCAOĞLU  
Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Ekim, 2008

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Fatih Onur Hocaoğlu'nun “Rüzgar ve Güneş Verilerinin Sinyal İşleme Yöntemleriyle Analizi ve Sistem Modellemesi” başlıklı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 23.09.2008 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.**

<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
Üye (Tez Danışmanı) : Yard. Doç. Dr. MEHMET KURBAN	.....
Üye (II. Danışman) : Doç. Dr. ÖMER NEZİH GEREK	.....
Üye : Prof. Dr. MEMMEDAĞA MEMMEDLİ	.....
Üye : Doç. Dr. DOĞAN GÖKHAN ECE	.....
Üye : Yard. Doç. Dr. CELAL YAŞAR	.....

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.**

**Enstitü Müdürü**

# ÖZET

Doktora Tezi

## RÜZGAR ve GÜNEŞ VERİLERİNİN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE ANALİZİ ve SİSTEM MODELLEMESİ

Fatih Onur HOCAOĞLU

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Mehmet KURBAN

2. Danışman: Doç. Dr. Ömer Nezh GEREK

2008, 91 sayfa

Bu tez çalışması, yenilenebilir enerji alanında hem veri (rüzgar-güneş) modelleme hem de enerji üretim sistemi boyutlandırması konularında gerçekleştirilmiş özgün yaklaşımları içermektedir. Çalışmanın ilk aşamasında, saatlik değişen güneş ışınım şiddetleri ve rüzgar hızlarını modelleyen yeni yöntemler geliştirilmiş, ikinci aşamasında ise geliştirilen bu modelleme yöntemleri de kullanılarak hibrit (rüzgar-güneş) enerji üretim sistemlerinin boyutlandırılması için yeni bir optimizasyon algoritması oluşturulmuştur. İlk aşamada yer alan güneş ışınım şiddeti verilerinin modellenmesi çalışmasında, veriler iki boyutlu (2-B) olarak analiz edilmiştir. Bu özgün analiz yönteminin tek boyutlu analize göre üstünlükleri 1-B ve 2-B optimal katsayılı doğrusal filtreler tasarlanarak ve yapay sinir ağları (ANN) kullanılarak gösterilmiştir. Geliştirilen 2-B yaklaşım kullanılarak saatlik güneş ışınım şiddeti verilerinin yıl içindeki davranışları önerilen yeni bir yöntemle analitik olarak modellenmiştir. Yine tezin ilk aşamasındaki çalışmalarda yer alan rüzgar verilerinin modellenmesinde, Saklı Markov Modellerini (HMM) kullanan bir modelleme yöntemi geliştirilmiş ve denenmiştir. Literatürde rüzgar modelleme konusunda ilk defa uygulanan bu yöntemin var olan diğer yöntemlere olan üstünlükleri tartışılmıştır. Tezin ikinci aşamasında sunulmuş olan hibrit (rüzgar-güneş) enerji üretim sistemlerinin boyutlandırılması için önerilen yöntemde güneş ve rüzgar verilerinin yerine, ilk aşamada geliştirilen modellerden, üretilen verileri kullanan ve boyutlandırma algoritmasına sistemde bulunan bataryaların maliyetlerini de dahil eden yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Tezde geliştirilen tüm model ve metodlar Eskişehir bölgesine ait saatlik değişen bir yıllık veriler üzerinde test edilmiş, sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

**Anahtar kelimeler :** Rüzgar-Güneş Veri Modelleme, Saklı Markov Modelleri, Sinyal İşleme Teknikleri, Yenilenebilir Enerji sistemlerinin Boyutlandırılması, Güvenilirlik

## **ABSTRACT**

**PhD Dissertation**

### **ANALYSING THE WIND SPEED AND THE SOLAR RADIATION DATA USING SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES AND SYSTEM MODELING**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Program**

**Supervisor: Assistant Prof. Dr. Mehmet KURBAN  
2nd Supervisor: Associate Prof. Dr. Ömer Nezir GEREK  
2008, 91 pages**

This thesis presents novel approaches for both data modeling and system sizing topics in the renewable energy area. In the first part of this study, novel models are developed for hourly measured solar radiation and wind speed data whereas in the second part, a novel optimization algorithm for sizing wind-solar hybrid energy generation systems is composed using these novel models. While modeling solar radiation, the data are rendered in 2 dimensions (2-D). The advantages of the 2-D approach are demonstrated using 1 Dimensional (1-D) and 2-D optimal coefficient linear filters and Artificial Neural Networks. By using the 2-D approach, the behavior of hourly measured solar radiation data in the year is analytically modeled. While modeling wind data, another novel approach is developed using Hidden Markov Models and the accuracy of the model is tested. The advantages of this unique method for wind speed modeling are compared with the other known methods. In the second part of the thesis, a novel sizing algorithm for hybrid wind-solar energy generation system is developed. The algorithm considers the data generated from the developed models for wind speeds and solar radiation instead of the original data, itself. The developed algorithm not only deals with the size of energy generation units but also deals with the size of the batteries. All methods developed in this thesis are tested using the data obtained from Eskişehir region. Results are presented and discussed.

**Key words :** Wind-Solar Data Modeling, Hidden Markov Models, Signal Processing Techniques, Renewable Energy System Sizing, Reliability

## TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım sırasında bana yardımcı olan tez danıŐmanlarım Yard. Doç. Dr. Mehmet KURBAN ve Doç. Dr. Ömer Nezih GEREK'e, çalıŐmalarım sırasında manevi desteğini hiç eksik etmeyen eŐim Nisa'ya ve tüm eğitimim süresince maddi manevi yardımlarını esirgemeyen anne ve babama teşekkür ederim.

Ayrıca, tez sınavıma Yunanistan'dan gelerek katılan, çalıŐmalarımı inceleyerek beğenilerini sunan ve ileride yapacağım çalışmalar ile ilgili değerli önerilerde bulunan "TEI of Patras" Üniversitesi ([www.teipat.gr](http://www.teipat.gr)) Rektörü, Yenilenebilir Enerji Sistemleri konusunda uzman Prof. Dr. Socrates KAPLANIS'e de teşekkür ederim.

Fatih Onur HOCAOğLU  
Ekim 2008

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. RÜZGAR HIZI VERİLERİNİN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE ANALİZİ VE MODELLENMESİ</b> .....	8
2.1. Markov Süreçleri.....	8
2.1.1. Rüzgar Verilerinin Markov Süreçleriyle Modellenmesi.....	10
2.2. Saklı Markov Modeller (HMM).....	16
2.2.1. Viterbi Algoritması.....	20
2.2.2. Rüzgar Verilerinin Saklı Markov Matrisi Yaklaşımıyla Modellenmesi.....	21
2.3. Markov ve Saklı Markov Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması ..	26
<b>3. GÜNEŞ IŞINIM ŞİDDETİ VERİLERİNİN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE ANALİZİ</b> .....	27
3.1. Güneş Işınım Şiddetlerinin Analizine 2-B Bir Yaklaşım.....	28
3.2. Güneş Işınım Şiddetlerinin 2-B Yaklaşımına Tahmini.....	37
3.2.1. Optimal Katsayılı Doğrusal Filtreler ile Tahmin.....	37
3.2.2. Yapay Sinir Ağları ile Tahmin.....	40
3.3. Güneş Işınım Şiddeti Verilerinin 2-B Analitik Modellenmesi.....	48
3.3.1. Yüzey Model Yapısı ve Parametrelerinin Tanımlanması.....	49

3.2.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçlar .....	52
3.4. Dünya Dışındaki Işınım Şiddetlerini Kullanan 2-B Işınım Şiddeti Modellemesi .....	55
<b>4. HİBRİT (RÜZGAR-GÜNEŞ) ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN BOYUTLANDIRILMASI .....</b>	<b>59</b>
4.1. Hibrit Sistem Bileşenleri .....	60
4.1.1 Hibrit Sistemde Bataryalar .....	60
4.1.2. Hibrit Sistemde Güneş Panelleri .....	62
4.1.3. Hibrit Sistemde Rüzgar Türbini .....	64
4.1.4. Hibrit Sistemde Eviriciler .....	65
4.1.5. Hibrit Sistemde Yükler .....	66
4.2. Hibrit Sistemin Enerji Dengesi .....	67
4.3. Bu Çalışmada Kullanılan Enerji Modelleri .....	68
4.3.1. Güneş Panelleri İçin Kullanılan Enerji Modeli .....	68
4.3.2. Rüzgar Türbini İçin Kullanılan Matematiksel Model .....	68
4.4. Hibrit Sistemlerin Boyutlandırılması .....	69
4.4.1. Hibrit Sistemlerin Boyutlandırılmasında Kullanılan Geleneksel Metod .....	69
4.4.2. Hibrit Sistemlerin Boyutlandırılması İçin Geliştirilen Metod .....	71
4.5. Hibrit Sistemlerin Maliyet Analizi .....	75
4.6. Geliştirilen Yöntemin Denenmesi: Eskişehir Bölgesi İçin Uygulama .....	75
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>80</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>84</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2. 1. Eskişehir bölgesine ait saatlik rüzgar hızlarının yıllık değişimi .....	11
2. 2. 13 durumlu Markov model tarafından üretilen saatlik rüzgar hızlarının yıllık değişimi .....	14
2. 3. 26 durumlu Markov model tarafından üretilen saatlik rüzgar hızlarının yıllık değişimi .....	14
2. 4. İki durumlu örnek bir saklı Markov model .....	17
2. 5. Cümle üreten bir HMM.....	18
2. 6. “ARASTIRMA” kelimesinin ses sinyalinin yapısı ve altında yatan harf süreçleri .....	21
2. 7. Rüzgar verilerinin HMM durumlarına dönüştürülmesi .....	22
2. 8. Eskişehir bölgesine ait yıllık rüzgar basıncı değerlerinin saatlik değişimleri.....	23
2. 9. Model tarafından üretilen hızların ve gerçek hızların zamanla değişimi .....	24
2. 10. Günlük modelleme sonucu modelin ürettiği hızların ve ölçülmüş olan hızların zamanla değişimi .....	25
2. 11. Günlük modelleme sonucu modelin ürettiği hızların ve ölçülmüş olan hızların zamanla değişimi grafiğinden alınmış yaklaşık bir aylık kesit.....	26
3. 1. Saatlik güneş ışınım şiddetlerinin 2-B düzlemde değişimi .....	28
3. 2. İki boyutlu güneş ışınım şiddeti verilerinin üç boyutlu düzlemde çizimi .....	29
3. 3. Güneş ışınım verilerinin resim çizimi .....	30
3. 4. Saatlik ışınım şiddetleri arasındaki korelasyonlar (a) K-1 (b) K-2 (c) K-3 (d) K-4 (e) K-5 (f) K-6 (g) K-7 (h) K-8 .....	36
3. 5. 1-B optimal katsayılı doğrusal filtre yapıları .....	39
3. 6. 2-B optimal katsayılı doğrusal filtre yapıları .....	39
3. 7. ANNun genel mimarisi .....	41
3. 8. ANNlarda Sıklıkla Kullanılan Aktivasyon Fonksiyonları: a) Tan-Sigmoid, b)Log-Sigmoid, c) Doğrusal Aktivasyon fonksiyonu.....	42
3. 9. Geriye yayılım algoritması.....	44
3. 10. Bir giriş-bir çıkışlı ANN yapısı.....	45
3. 11. İki giriş-bir çıkışlı ANN yapısı .....	45

3. 12. Üç giriş-bir çıkışlı ANN yapısı .....	45
3. 13. ANNnin testi için kullanılan verilerin 2B düzlemde gösterimi .....	46
3. 14. 2-D Filtre 2 için performansın aşama sayısına göre değişimi.....	47
3. 15. Saat eksenini boyunca alınan kesit ve Gauss fonksiyonu modellenmesinin gösterimi.....	50
3. 16. Gün eksenini boyunca alınan kesit.....	50
3. 17. 2-kaynak Gauss modelinden elde edilen yüzey. ....	53
3. 18. 1-kaynak Gauss modelinden elde edilen yüzey .....	54
3. 19. Eskişehir bölgesi için dünya dışındaki ışınım şiddeti verilerinin 3B çizimi.....	56
3. 20. Eskişehir bölgesi için dünya dışındaki 2-B ışınım şiddeti verilerinin gerçek verilere normalizasyonu .....	57
3. 21. Eskişehir bölgesi için dünya dışındaki 2-B ışınım şiddeti verilerinin gerçek verilere normalizasyonu .....	58
4. 1. Tipik bir hibrit rüzgar-güneş enerji üretim sistemi bileşenleri.....	60
4. 2. Artakalan/Talep edilen enerjinin zamana göre değişimine bir örnek .....	73
4. 3. Kapasitenin LLP ile değişimi.....	74
4. 4. Geliştirilen algoritmanın özet akış şeması .....	76
4. 5. Sistemi oluşturulan bileşenlerin maliyetlerinin batarya sayısına göre değişimi ve minimum maliyetli sistem (Optimum nokta) .....	79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

2. 1. 13 durumlu Markov model için durum geçiş matrisi.....	11
2. 2. 26 durumlu Markov model'e ait durum geçiş matrisinin bir kısmı .....	12
2. 3. 13 durumlu Markov model'e ait kümülatif durum geçiş matrisi .....	13
2. 4. Markov modeller tarafından üretilen verilerin ve ölçülen verilerin bazı temel istatistikleri.....	15
2. 5. Üretilen ve ölçülen verilerin temel istatistikleri.....	24
2. 6. Üretilen ve ölçülen verilerin (günlük ortalama) temel istatistikleri .....	25
3. 1. Pikseller arasındaki korelasyon ve tanımlama katsayıları .....	32
3. 2. RMSE değerleri ve korelasyon katsayıları.....	40
3. 3. Filtrelerden ve ANN modellerinden elde edilen tahmin değerlerine göre hesaplanan RMSE değerleri ve Korelasyon katsayıları .....	48
3. 4. İlk 10 gün için Gauss parametreleri. ....	51
3. 5. İlk 10 gün için hesaplanan korelasyon katsayıları. ....	52
4. 1. Eskişehir bölgesi için 200W' lık sabit yükü $LLP < 0.02$ ile karşılayabilen konfigürasyonlar ve bu konfigürasyonların maliyetleri.....	77

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

1-B	:Bir boyutlu
2-B	:İki boyutlu
ANN	:Yapay Sinir Ağları
$H$	:Günlük global ışınım şiddetinin aylık ortalaması
$H_0$	:Dünya dışından gelen günlük global ışınım şiddetinin aylık ortalaması ( $W/m^2$ )
$S$	:Gün uzunluğu
$S_0$	:Mümkün olabilecek maksimum güneşlenme süresi ( $W/m^2$ )
a,b	:Ampirik katsayılar
$I_{gs}$	:Güneş sabiti ( $=1367W/m^2$ )
$f$	:Dışmerkezlilik katsayısı
$\lambda$	:Bölgenin enlemi
$\delta$	:Güneşin eğimi ( $^0$ )
$w_s$	:Ele alınan aya ait güneş doğuş saati açısı ( $^0$ )
$n$	:Haziran ayının başından başlayarak yılın kaçınıcı gününde olduğu
$d$	:Yılın günleri
$I_1, I_2$	:Ampirik katsayılar
RMSE	:Hata kare ortalamalarının karekökü
SSE	:Hata karelerinin toplamı
M	:Veri sayısı
$I_N$	:Gerçek ışınım değerleri ( $W/m^2$ )
$\hat{I}_N$	:Model tarafından bulunan ışınım değerleri ( $W/m^2$ )
LLP	:Yükün enerjisiz kalma olasılığı (Loss of Load Probability)
LPSP	:Sistem tarafından enerjinin karşılanamama olasılığı (Loss of Power System Probability)
HMM	:Saklı Markov modeli (Hidden Markov Model)

$n$	:Deneme sayisi
$S_i$	:Sistemin durumu
$S_i(n)$	:Sistemin $n$ geçiş sonunda $i$ .durumda olması
$P[S_i(n)]$	:Sistemin $n$ geçiş sonunda $i$ .durumda olma olasılığı
$P_{ij}$	:Sistemin herhangi bir zaman aralığında $i$ durumunda olduğu bilindiğine göre bu zaman aralığından bir sonraki zaman aralığında $j$ durumuna geçmiş olma olasılığı
$m_{ij}$	: $i$ durumundan $j$ durumuna olan geçişlerin sayısını
$t$	:Zaman
$s_b$	:Başlangıç gözlemi
$W$	:Gözlemler kümesi
$E$	:Geçişlerin kümesi
$O$	:Gözlem dizisi
$B$	:Gözlem sembol olasılık dağılımı matrisi
$O_t$	: $t$ anındaki gözlem
$b_j(o_t)$	: $o_t$ vektörünün $t$ anında $j$ . durumda gözlemlenmesi olasılığı
$\pi$	:Başlangıç durum dağılımı
$\sigma(t)$	:Olasılığı en yüksek durum geçiş dizisi
$p(s_i \xrightarrow{o_n} s_j)$	: $i$ durumundan $j$ durumuna geçişteki $o_n$ gözleminin meydana gelme olasılığı.
$n_{o_i}$	: $i$ . gözlemin görülme sayısı
$n_{o_n}$	:sistem $i$ . durumdan $j$ .duruma geçerken tüm gözlemlerin görülme sayısı
$Rad$	:Işınım şiddeti matrisi
$\sigma_x^2$	: $x$ değişkeninin varyansı
$\rho$	:İki değişken arasındaki korelasyon katsayısı
$x_{i,j}$	:Herhangi bir görüntü matrisinin $(i, j)$ . pikseli
$\hat{x}_{i+1,j+1}$	:Herhangi bir görüntünün $(i+1, j+1)$ . Pikselinin tahmini değeri

$a_1, a_2, a_3$	:Optimum filtre katsayıları
$\varepsilon_{i+1,j+1}$	:Herhangi bir görüntünün $(i+1, j+1)$ . pikselinin tahmini sonucu gerçekleşen hata değeri
$\varepsilon$	:Herhangi bir görüntünün tüm piksellerinin tahmini sonrasında ortaya çıkan hataların toplamı
$m$	:Görüntünün genişliği
$n$	:Görüntünün uzunluğu
$a$	:Optimal filter katsayıları vektörü
$w_{ij}$	:i. düğümden j. düğüme olan ağırlıklar
$c_j$	:Bir ANN yapısında bulunan j. düğümün çıkış değeri
$g_i$	:Bir ANN yapısında bulunan i. düğümün giriş değeri
Yüzey1	:Bir kaynaklı Gauss yüzeyi
Yüzey2	:İki kaynaklı Gauss yüzeyi
a (gün)	:Gauss yüzeyinin tepe uzunluğunun ‘gün’ değişkeni için değeri
c (gün)	:Gauss yüzeyinin tepe değerinin yarısındaki tam genişlik fonksiyonunun ‘gün’ değişkeni için değeri
g(x)	:Gauss fonksiyonu
$I$	:Güneş ışınım şiddeti ( $W/m^2$ )
$C$	:Güneş sabiti ( $1367 W/m^2$ )
$R$	:Güneşin yarıçap vektörü
$\sin(\varphi)$	:Güneşin yükseklik açısı
$L$	:Bölgenin enlemi
$D$	:Güneşin eğimi
$h$	:Güneş saat açısı
$h_c$	:Anlık saat
$W_L$	:Yükün enerji talebi (W)
$W_{PV}$	:Foto-Voltaik (PV) panellerin enerji üretimi (W)
$W_G$	:Rüzgar türbininin enerji üretimi (W)
$W_b$	:Bataryaları şarj eden veya bataryadan harcanan enerji

$A_m$	:PV modüllerin kapladığı toplam alan ( $m^2$ )
$\eta_m$	:Panellerin referans verimini
$P_f$	:Paketleme faktörü
$\eta_{pc}$	:Güç durum verimi
$P_r$	:Rüzgar türbininin anma gücü (W)
$V_{ci}$	:Rüzgar türbininin kesime girdiği hız (m/s)
$V_r$	:Anlık rüzgar hızı (m/s)
$V_{co}$	:Rüzgar türbininin kesimden çıktığı rüzgar hızı
$SOC(t)$	:Bataryaların $t$ anındaki şarj durumu (W)
$N_{Wg}$	:Sistemdeki rüzgar türbinlerinin sayısı
$N_{Pv}$	:Sistemdeki fotovoltaik panellerin sayısı
$E_{Gw}(t)$	: $t$ zamanında bir rüzgar türbininden üretilen enerji (W)
$E_{GP}(t)$	: $t$ zamanında bir güneş panelinden üretilen enerji (W)
$E_{LD}(t)$	: $t$ zamanında sistemdeki yükün talebi
$SOC_{Max}$	:Maksimum akü kapasitesi
$SOC_{Min}$	:Minimum akü kapasitesi
$T_f$	:Sistemin enerjisiz kaldığı toplam süre
$T$	:Sistemin boyutlandırılmasında kullanılan toplam zaman aralığı
$OC$	:Akülerin optimum kapasitesi
$C_R$	:Sistemde bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyeti (USD)
$C_{Pv}$	:Fotovoltaik panellerin maliyetleri (USD)
$C_{Wg}$	:Rüzgar türbinlerinin maliyetleri (USD)
$C_{Bat}$	:Bataryaların maliyetleri (USD)

## 1. GİRİŞ

Fosil yakıtların giderek tükenmesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili yapılan tüm çalışmalar günümüzde oldukça popülerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en yaygın kullanılanları rüzgar ve güneş enerjisidir. Rüzgar ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemlerin tasarımı, işletilmesi ve güvenilirliği açısından rüzgar hızı ve güneş ışınım şiddeti verilerinin modellenmesi ve analizi oldukça önemlidir. Ayrıca, rüzgar ve güneş enerjisi konusunu farklı amaçlarla ele alarak çalışmalar yapan farklı bilim dallarına mensup araştırmacıların da bu tür rüzgar ve/veya güneş modellerinden farklı amaçlarla faydalanacağı düşünülürse, verilerin doğru analizi ve modellenmesinin önemi daha iyi anlaşılacaktır. Rüzgar ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemlerin ilk kurulum maliyetleri günümüzde oldukça yüksektir. Bu nedenle, bu tür sistemler tesis edilmeden önce sistemin yükünü izin verilen kayıp olasılığından düşük olasılıkla karşılayabilecek maliyeti minimum olan sistemin belirlenmesini gerekir. Bu tür bir optimizasyon işlemi, literatürde “boyutlandırma” olarak bilinmektedir.

Literatür incelendiğinde rüzgar hızlarının frekanslarının modellenmesi konusunda geniş kabul gören ve sıklıkla uygulanan Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kullanıldığı görülür [1-15]. Bu tür çalışmalarda esas amaç, rüzgar verilerini modelleyerek rüzgar hızlarının ölçüldüğü bölgeye ait rüzgar rejimini araştırmaktır. Çalışmalarda, rüzgar hızlarının önceden tanımlı dilimlere düşen yıl içindeki değişimleri rüzgar hızı esiş aralığı – rüzgar hızı esiş sayısı eksenlerinde incelenmekte ve veriler Weibull ve/veya Rayleigh dağılımlarına benzetilmektedir. Çeşitli parametre tahmin metodlarıyla dağılımların parametreleri tahmin edilmektedir [16-29].

Literatürde rüzgar hızlarının genel istatistiklerini modellemeye yönelik olarak stokastik modeller de kullanılmaktadır. Şahin ve Şen tarafından Türkiyenin Marmara bölgesinden ölçülmüş olan rüzgar hızları ilk durumlu Markov zinciri yaklaşımıyla modellenmiştir [30]. Diğer bir çalışma ise Tore ve arkadaşları tarafından yine ilk durumlu Markov zincirlerini kullanarak sentetik rüzgar hızı üreten bir model oluşturulmasını içermektedir [31]. Youcef Ettoumi ve arkadaşları tarafından

gerçekleştirilen diğer bir çalışmada üç saat aralıklarla ölçülmüş rüzgar hızı ve yönü verilerini Markov zincirlerini kullanarak modellenmiştir [32]. Shamshad ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Malezya'nın çeşitli bölgelerinden ölçülen rüzgar hızı verileri üzerinde ilk durumlu ve ikinci durumlu Markov modelleri kullanılmış ve sentetik rüzgar hızı üretilmiştir. Çalışmada ikinci durumlu Markov modellerin daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ayrıca, Markov modelin durum sırası sayısının arttırılmasının modelden üretilen verilerin kalitesini olumlu yönde etkileyeceğini vurgulanmıştır [33].

Literatür incelendiğinde güneş ışınım şiddetlerini modellemede en sık kullanılan metodun Angström-PreScott-Page modeli olduğu görülmektedir [34-39]. Bu model (1.1) ile ifade edilebilir.

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (1.1)$$

Burada  $H$  günlük global ışınım şiddetinin aylık ortalaması,  $H_0$  Dünya dışından gelen günlük global ışınım şiddetinin aylık ortalaması,  $S$  gün uzunluğu,  $S_0$  olası maksimum güneşlenme süresi ve a,b ise ampirik katsayılarıdır. Yüze Dünya dışından gelen aylık ortalamalı günlük güneş ışınım şiddeti (1.2)' den bulunabilir.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{gs} f \left( \cos \lambda \cos \delta \sin w_s + \frac{\pi}{180} w_s \sin \lambda \sin \delta \right) \quad (1.2)$$

Burada  $I_{gs}$  güneş sabiti (=1367W/m<sup>2</sup>),  $f$  dışmerkezlilik katsayısı,  $\lambda$  bölgenin enlemi,  $\delta$  güneşin eğimi,  $w_s$  ise ele alınan aya ait güneş doğuş saati açısını ifade etmektedir. Dışmerkezlilik katsayısı, güneş eğimi ve güneş doğuş saati açısı sırasıyla (1.3), (1.4) ve (1.5)' ten bulunabilir.

$$f = 1 + 0.033 \left( \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right) \quad (1.3)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{360(284 + n)}{365} \right) \quad (1.4)$$

$$w_s = \cos^{-1} (-\tan \lambda \tan \delta) \quad (1.5)$$

Bu eşitliklerdeki  $n$ , Haziran ayının başından başlayarak yılın kaçınıcı gününde olunduğunu ifade etmektedir. Ele alınan bir aydaki maksimum olası güneşlenme süresi ( $S_0$ ) (1.6)' dan hesaplanabilir [34].

$$S_0 = \frac{2}{15} w_s \quad (1.6)$$

Angström-Prescott-Page modelinin [36] doğru bir şekilde kurulması ele alınan bölgeye göre a ve b ampirik katsayılarının optimizasyonu ile mümkündür. Literatürde çeşitli bölgeler için analizler yapılarak a ve b katsayıları bulunmuştur [34-39]. Örneğin Page tarafından, a ve b katsayıları sırasıyla 0.23 ve 0.48 olması durumunda modelin dünyanın herhangi bir yerindeki güneş ışınım şiddeti verilerini modellemenin mümkün olabileceğini öne sürülmüştür. Benson ve arkadaşları tarafından ise, modeldeki katsayıların yılın iki yarısında farklı seçildiğinde daha iyi bir modelleme yapılacağını gösterilmiştir. Angström-Prescott-Page modeli çok parametrelili bir modeldir ve bu modeldeki a ve b katsayılarına getirilen çeşitli yaklaşımlar ile yeni modeller oluşturulmuştur. Bu tür çok parametrelili yaklaşımlar modeli kurabilmek için güneş ışınım şiddetlerinin yanı sıra maksimum olası güneşlenme süresi, dünya dışından gelen günlük global ışınım şiddetinin aylık ortalaması, ele alınan aya ait güneş doğuş saati açısı gibi parametrelerin de hesaplanmasını gerektirir [40]. Bu çok parametrelili modelleme yöntemlerinin yanı sıra literatürde sadece güneş ışınım şiddetlerini kullanarak gün parametresini girdi olarak alan ve günlük ortalama güneş ışınım şiddetini tahmin eden modelleme yöntemleri de mevcuttur. Örneğin Bulut ve Büyükalaca tarafından gerçekleştirilen çalışmada Türkiye'nin bölgelerine ait ışınım şiddetlerinin modellenmesine (1.7) önerilmiştir [35].

$$I = I_2 + (I_1 - I_2) \left| \sin \frac{\pi}{365} (d + 5) \right|^{1.5} \quad (1.7)$$

Burada,  $I_1$  ve  $I_2$  ampirik katsayılar,  $d$  yılın günlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada (1.7) ile verilen modelin Türkiye için uygun basit bir model olduğunu gösterilmiştir. Literatürde elde edilen modeller sıklıkla (1.8)' de verilen RMSE (hata kare ortalamalarının karekökü) ve SSE (hata karelerinin toplamı) hata ölçütleri yardımıyla analiz edilir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (I_N - \hat{I}_N)^2}$$

$$SSE = \sum_{N=1}^M (I_N - \hat{I}_N)^2$$
(1.8)

Burada, M değeri verilerin sayısı (365),  $I_N$  ve  $\hat{I}_N$  sırasıyla gerçek ışınım değerlerini ve model tarafından bulunan ışınım değerlerini ifade etmektedir. Yapılan bu çalışmada güneş ışınım şiddeti verileri tek boyutlu olarak ele alınmıştır ve bir model oluşturulmuştur. Ancak, oluşturulan modelin günlük ortalama ışınım şiddeti verileri için geçerli olması da kullanımını kısıtlamaktadır.

Rüzgar ve güneş verilerinin modellenmesi, bu veriler üzerinde analizler yapan çeşitli araştırmacıların çalışmaları için hayati önem taşımaktadır. Bu modellerin enerji sistemlerinde en çok uygulama alanı bulan çalışma ise rüzgar ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemlerin tasarımı ve boyutlandırılması konusudur. Rüzgar hızlarının sürekli değişken bir davranışa sahip olması ve güneş enerjisinden günün belirli saatlerinde enerji elde edilmesinin mümkün olamaması nedeniyle rüzgar veya güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlerin tek başlarına kullanılmaları enerji güvenilirliği açısından oldukça sakıncalıdır. Diğer taraftan bu enerji sistemlerinin kombine kullanılmaları durumunda üretilen enerjinin güvenilirliği büyük ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, genellikle rüzgar ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemler hibrit kullanılmaktadırlar. Günümüzde bu tür sistemlerin ilk kurulum maliyetlerinin oldukça pahalı olması sistemin tesis edilmeden önce beslenmesi planlanan yükü karşılayacak şekilde boyutlandırılmasını zorunlu kılar. Başka bir ifadeyle, hibrit sistemlerin boyutlandırılması; sistemin yükünü en az maliyet ve yüksek güvenilirlikle karşılayabilecek sistem boyutunu belirlemek olarak tanımlanabilir.

Literatürde hibrit sistemlerin boyutlandırılması konusunda yapılmış çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: Browy ve Salameh tarafından 30 yıllık rüzgar hızı ve güneş ışınım şiddeti verisini ve yükün enerjisiz kalma olasılığı (Loss of Load Probability-LLP) kavramı kullanılarak rüzgar-güneş hibrit sistemleri için bir boyutlandırma algoritması geliştirilmiştir [42]. Bu çalışma, bu konuda gerçekleştirilmiş ilk

çalışmalardandır. Tomonobu Senjyu ve arkadaşları tarafından hibrit sitemlerin boyutlandırılmasında Japonya'da bulunan Okinawa bölgesindeki şebekeden oldukça uzak adalar için rüzgar türbini-güneş modülleri-dizel jeneratör sayıları arasında bir boyutlandırma algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma iterasyon tabanlı olmayıp genetik algoritmaları kullanmakta ve bu sayede işlemsel karmaşıklıktan kurtulup hızlı çalışmaktadır. Çalışmada kurulacak sistemin 15 yıl çalışacağını varsayarak kurulacak sistemde kullanılacak elemanların ilk kurulum ve işletme maliyetlerini dikkate alarak çalışmanın matematiksel formülasyonu gerçekleştirilmiş ve bu formülasyon kullanılarak önerilen yaklaşım test edilmiştir [43]. Ashok tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise ortak kullanılabilen hibrit enerji sistemleri için Hindistan şartlarında genelleştirilmiş bir model oluşturulmuştur. Modelde Tomonobu Senjyu ve arkadaşlarının tersine, iterasyon tabanlı bir algoritma kullanılmıştır [44]. Yine benzer biçimde, Katti ve Khedkar tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Hindistan'da bulunan Sukhalai köyü için yük tarafından talep edilen enerjiyi minimum maliyetle karşılayabilecek en iyi boyutlandırma çözümü araştırılmıştır [45]. Bu amaçla hem hibrit (rüzgar-güneş) sistemi hem de tek başına rüzgar ve tek başına güneş sistemleri tasarlanmıştır. Sistem tasarlanırken güneş modüllerinden elde edilecek enerjiyi modülün modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda modellemede kullanılacak en iyi ekipmanları seçerken üretici firmaların ürettikleri sistemlere ait özelliklerin çok önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada belirlenen zaman aralığında yükün enerji talebini karşılayabilecek numerik bir algoritma da önerilmiştir. Sonuçta kullanılacak sistem elemanlarının bölgeye uygun seçilmesinin ve sistem boyutlandırmasının doğru yapılmasının maliyet ve verim açısından oldukça önemli olacağı gösterilmiştir [45]. Kaldellis ve arkadaşları tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise Yunanistan'da bulunan şebekeden uzak yerlerdeki tüketiciler için tek başına güneş modüllerinin veya tek başına rüzgar türbinlerinin kullanımından hangisinin daha uygun olacağı araştırılmış ve sistem boyutlandırılması yapılmıştır. Çalışmada, benzer sistemlere ilişkin batarya gruplarının boşalma sürelerini de dikkate alarak saatlik enerji dengesi analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda Yunanistan'da bulunan şebekeden uzak yerlerde rüzgar veya güneş sistemlerinin tek başlarına kullanılması durumunda talep edilen enerjinin karşılanabileceği saptanmıştır [46].

Barton ve Infield tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı yük durumu için enerji talebi mevcutken rüzgar türbininden ve güneş modüllerinden üretilen enerjiyle depolanan enerjiyi karşılaştıran yeni bir olasılıksal modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen model 1MW rüzgar gücü kapasitesine, 2MW güneş gücüne, %75 verimli bir enerji depolama ünitesine ve 0-3MW arasında değişken bir yük talebine sahip bir sistem için denenmiştir [47]. Rajendra Prasad ve Natarajan tarafından yapılan çalışmada ise, hibrit (rüzgar-güneş) sistemlerinin optimizasyonu için yine iteratif yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, gücün sağlanma olasılığındaki eksiklik, üretilen güce erişim, kullanılmayan enerjinin olasılığı, seviyelendirilmiş enerji maliyeti ve batarya grupları ile güç üretim biriminin kullanım ömrü maliyetini dikkate almaktadır. Ayrıca, çalışmada geliştirilen yöntemle tespit edilen optimum çözüm Hindistan'da bulunan Pompuhar bölgesi şartları için denenmiştir [48]. Diaf ve arkadaşları tarafından güneş modülleri, rüzgar türbinleri ve bataryaların karakteristiklerini daha iyi temsil eden modelleri içeren boyutlandırma algoritması önerilmiştir. Diaf ve arkadaşları tarafından önerilen bu çalışmada, sistem tarafından enerjinin karşılanamama olasılığı (Loss of Power System Probability-LPSP) ve sistem maliyeti kavramları kullanılarak yeni bir sistem boyutlandırma algoritması önerilmiştir [49]. Yang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise genetik algoritmalar kullanılarak şebekeden bağımsız olarak çalışan rüzgar-güneş enerji üretim sistemleri için yeni bir boyutlandırma algoritması geliştirilmiştir [50]. Başka bir çalışmada, Çelik tarafından, rüzgar ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten hibrit sistemlerin boyutlandırılmasında mevcut sisteme yeni bir yenilenebilir kaynak eklenmesi yerine sistemden karşılanamayan enerjinin üçüncü başka bir enerji sisteminden karşılanmasının daha ekonomik olacağı vurgulanmıştır [51]. Protogeropoulos ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise, bu tür sistemlerin boyutlandırılmasında yıllık otonomi seviyesi kavramı ilave bir tasarım parametresi olarak ele alınmıştır [52].

Yukarıda özeti verilen Rüzgar hızlarının modellenmesi konusunda gerçekleştirilmiş çalışmalarda rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimleri modellenmemiştir. Bu tez çalışmasında ise Bölüm 2'de ilk olarak rüzgar hızları literatürde yer alan Markov modeller kullanılarak modellenmiştir. Bu bölümde ayrıca

Markov zincirleri yaklaşımıyla yapılmış mevcut çalışmalarda araştırılmamış olan durum uzayı boyutunun veri kalitesine etkisi de araştırılmış ve durum uzayı boyutunun arttırılmasının veri kalitesini arttırdığı gösterilmiştir. Bölüm 2’de ayrıca saklı Markov süreçleri (HMM) ilk defa rüzgar hızı modellemesinde kullanılmıştır. Modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve rüzgar hızlarının modellenmesi konusunda HMMin, Markov modellerden daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, Bölüm 3’te anlatıldığı gibi, saatlik güneş ışınım şiddeti verileri için literatürde mevcut olmayan 2-B yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım yine Bölüm 3’te anlatılan ve literatürde görüntü işleme uygulamalarında sıklıkla kullanılan optimal katsayılı doğrusal filtreler ve yapay sinir ağlarıyla (ANN) test edilmiştir. Geliştirilen ve önerilen bu model, güneş ışınım şiddeti verisinin yıl içindeki saatlik davranışlarının kolayca algılanmasını ve anlaşılmasını da sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen bu 2-B yaklaşımı kullanılarak saatlik değişen veriler analitik olarak da modellenmiştir. Bölüm 2 ve 3’te anlatılan rüzgar hızı ve güneş ışınım şiddetleri üzerinde yapılan tüm analizler, modellemeler ilk defa bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve geliştirilen modellemeler bu konularda gerçekleştirilmiş mevcut çalışmalara alternatif olarak kullanılabilir niteliktedir.

Yukarıda rüzgar ve güneş sistemlerinin boyutlandırılması konusunda gerçekleştirilmiş önceki çalışmalar da özetlenmiştir. Özeti verilen çalışmalarda geliştirilen boyutlandırma algoritmaları, geçmiş yıllara ait güneş ışınım şiddeti ve rüzgar hızı verilerini kullanmakta ve genellikle bataryaların boyutlarını dikkate almamaktadır. Bu tez çalışmasında ise, bu tür sistemlerin boyutlandırılmasında geçmişte ölçülmüş veriler yerine bu verilerin genel davranışlarını karakterize eden ve bu tezde geliştirilmiş olan modelleri kullanan yeni bir boyutlandırma algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma ayrıca, bataryaların boyut ve maliyetlerini de dikkate alarak optimizasyon problemine dahil etmektedir. Önerilen bu algoritma detaylarıyla Bölüm 5’te anlatılmış ve tartışılmıştır. Bölüm 5’te ayrıca, önerilen boyutlandırma algoritması Eskişehir bölgesi için uygulanmış ve optimum maliyetli güvenilir sistem tespit edilmiştir.

## 2. RÜZGAR HIZI VERİLERİNİN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Rüzgar hızı verilerinin doğru analizi ve modellenmesi, herhangi bir yöreye uygun rüzgar türbinlerinin seçilmesinde önemlidir. Rüzgar verilerinin modellenmesi, Markov zinciri yaklaşımıyla yapılabilmektedir. Rüzgar hızlarının Markov zincirleriyle modellenmesi konusunda birçok çalışma mevcuttur [30-33]. Ancak, bu çalışmalarda kullanılan Markov modelin durum uzayı boyutunun arttırılmasının, kurulan modelin doğruluğuna etkisi araştırılmamıştır. Bu bölümde, ilk olarak Eskişehir bölgesine ait bir yıllık saatlik rüzgar hızı verileri ilk durumlu Markov model kullanılarak iki yaklaşımla modellenmiştir. İlk yaklaşımda durum uzayı 13 elemandan oluşacak şekilde ikinci yaklaşımda ise durum uzayı boyutu 26 elemandan oluşacak şekilde iki ayrı model kurulmuştur. Durum uzayı boyutunun, modelden üretilen veri kalitesine olan etkisi araştırılmıştır [53]. Markov zincirleri yaklaşımıyla kurulan modeller, verilerin temel istatistiklerini iyi tahmin etseler de zaman içerisindeki davranışlarını iyi tahminleyememektedirler. Bu nedenle, bu bölümde, rüzgar verileri ayrıca, sinyal işlemede özellikle de ses sinyallerinin işlenmesinde sıklıkla kullanılan ve başarılı sonuçlar veren saklı Markov modeller (HMM) kullanılarak da modellenmiştir [54, 55]. Modellemelerin detayları ve aşamaları ilerideki bölümlerde anlatılmaktadır.

### 2.1. Markov Süreçleri

Markov süreci, birbirine bağlı durumlar dizisini karakterize eden bir stokastik süreçtir. Bir Markov sürecinde sistemin  $n$  denemeden sonra  $S_i$  durumuna geçtiği varsayılırsa ve bu olay  $S_i(n)$  ile, olayın meydana gelme olasılığı da  $P[S_i(n)]$  ile gösterilecek olursa, kesikli durumlu, kesikli geçişli bir Markov sürecindeki her bir geçiş (2.1)'de verilen formdaki durumlar arası geçiş olasılıklarıyla ifade edilebilir [56].

$$P[S_j(n) / S_a(n-1)S_b(n-2)S_c(n-3)...]; 1 \leq j, a, b, c, \dots, < m; n = 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de verilen geçiş olasılıkları bir durumdan diğerine geçişteki olasılıkları ve sistemin bu geçişten öncesini, yani geçmişini ifade etmektedir. Kesikli durumlu kesikli geçişli bir Markov süreci için (2.2)'de verilen Markov şartı sağlanmalıdır.

$$P[S_j(n) / S_a(n-1)S_b(n-2)S_c(n-3)\dots] = P[S_j(n) / S_a(n-1)], \quad \forall n, j, a, b, c \quad (2.2)$$

Kesikli geçişli bir Markov süreci için durum geçiş olasılıkları (2.3)'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_{ij} = P[S_j(n) / S_i(n-1)], \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (2.3)$$

Burada  $P_{ij}$  sistemin herhangi bir zaman aralığında  $i$  durumunda olduğu bilindiğine göre bu zaman aralığından bir sonraki zaman aralığında  $j$  durumuna geçmiş olma olasılığını ifade etmektedir. Durumların birbirleri arasındaki geçişlerini ifade eden olasılıkların tamamını içeren matris durum geçiş matrisi olarak adlandırılır. Bu olasılıklar için (2.4) ve (2.5)'te verilen şartlar sağlanmalıdır.

$$0 < p_{ij} < 1 \quad (2.4)$$

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \quad (2.5)$$

$n$  tane durum içeren bir sistem için toplam  $nxn$  tane geçiş söz konusudur ve bu geçişlerin meydana gelme olasılıklarını içeren  $nxn$  boyutlu  $A$  matrisi, (2.6) formunda olmalıdır.

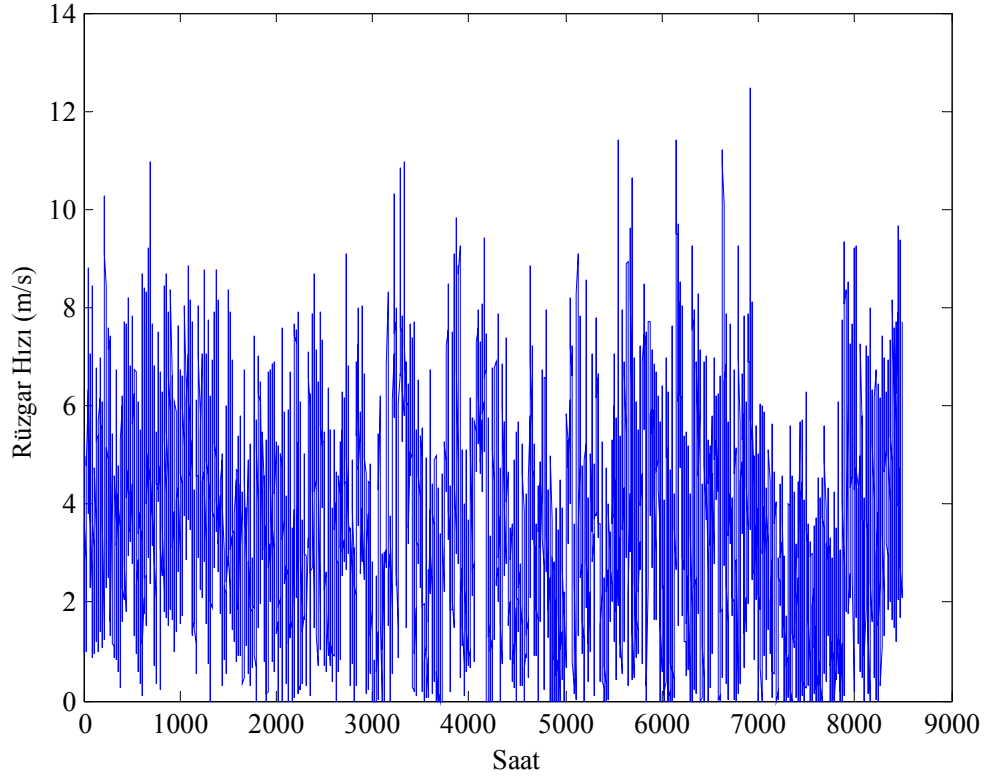
$$A = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

### 2.1.1. Rüzgar Verilerinin Markov Süreçleriyle Modellenmesi

Bir sistemin Markov süreçleriyle modellenmesinde ilk aşama, durumları ve durum sayılarını belirlemektir. Bu çalışmada, rüzgar hızlarını Markov süreçleriyle modellemek amacıyla saatlik rüzgar hızı değerleri 1m/s aralıklı en yakın tamsayılara tamamlanmak suretiyle rüzgar durumlarına dönüştürülmüştür. Yani, örneğin 0-1m/s aralığına düşen rüzgarlar 1. rüzgar duruma karşılık gelmektedir. Rüzgar durumlarının sayısı ilk olarak 13 olarak seçilmiştir (Eskişehir bölgesinde 10m yükseklikten ölçülmüş olan saatlik rüzgar hızları 0-13m/s aralığında değişmektedir). Rüzgar hızları bu şekilde rüzgar durumlarına dönüştürüldükten sonra durumlar arası geçiş olasılıkları, (2.7) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$p_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_j m_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'deki  $m_{ij}$   $i$  durumundan  $j$  durumuna olan geçişlerin sayısını ifade etmektedir. Burada anlatılan yöntem Eskişehir bölgesine ait 1 yıllık rüzgar hızı verisi üzerinde gösterilmiştir. Bölgeye ait rüzgar hızlarının saatlik değişimleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



**Şekil 2. 1.** Eskişehir bölgesine ait saatlik rüzgar hızlarının yıllık değişimi

Denklem (2.7) yardımıyla sistemin durum geçiş matrisi Çizelge 2.1’de verildiği gibi hesaplanmıştır.

**Çizelge 2. 1** 13 durumlu Markov model için durum geçiş matrisi

0.61	0.29	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.18	0.47	0.28	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.04	0.20	0.46	0.23	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.05	0.20	0.45	0.22	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.06	0.26	0.42	0.20	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.01	0.07	0.28	0.41	0.18	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.01	0.01	0.07	0.29	0.39	0.21	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.09	0.30	0.38	0.17	0.03	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.12	0.33	0.39	0.09	0.02	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.18	0.27	0.37	0.08	0.06	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.09	0.23	0.41	0.09	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.00	0.00	0.15	0.31	0.08	0.30	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00

Çizelge 2.1 incelendiğinde, rüzgar hızlarının esiş olasılıklarının bu matrisin köşegeni etrafında toplandığı görülmektedir. Ayrıca köşegenden uzaklaşıldığında olasılıkların sıfır olduğu da görülmektedir. Aslında bu durum, rüzgar hızlarının genel karakteristiğidir ve literatürde rüzgar hızlarının Markov zincirleriyle modellenmesi çalışmalarında kullanılan rüzgar verilerinde de gözlenmektedir [33,34]. Rüzgar verilerinin bu karakteristiği önemli bir bilgi içermektedir. Çizelge 2.1’deki matrisin içerdiği bilgi şu şekilde okunabilir: Herhangi bir  $t$  zamanında sistem  $i$  durumunda ise büyük bir olasılıkla  $t+1$  zamanında yine  $i$  durumunda ya da bu durumun 2 veya 3 komşuluğunda başka bir durumda olacaktır. Daha uzak durumlara geçmiş olma olasılığı ise yoktur. Markov zincirlerini kullanarak rüzgar hızlarını modellemede bu bilgi başlangıç noktasıdır. Bundan sonraki aşamalar aslında bu bilgiyi nasıl kullanabiliriz sorusunun cevabını içermektedir. Bu bölümde, benzer çalışmalarda araştırılmamış olan durum uzayı boyutunun modellemeye etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 0.5m/s aralıklı rüzgar hızları Markov durumlarına dönüştürülmüştür, böylece 26 durumlu başka bir Markov süreci tasarlanmıştır. Bu durumda da olasılıklar yine (2.7) yardımıyla hesaplanmıştır. Böylece kurulan modele ait durumlar arası geçiş olasılıklarından oluşan 26X26 boyutlu bir matris elde edilmiştir. Elde edilen bu matrisin bir kısmı Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2. 2** 26 durumlu Markov model’e ait durum geçiş matrisinin bir kısmı

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.....
0.00	0.61	0.18	0.10	0.05	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.....
0.00	0.25	0.24	0.24	0.14	0.06	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.....
0.00	0.12	0.18	0.28	0.23	0.11	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	.....
0.00	0.05	0.11	0.15	0.23	0.19	0.12	0.07	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	.....
0.00	0.02	0.04	0.10	0.18	0.30	0.16	0.10	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	.....
0.00	0.01	0.03	0.05	0.10	0.17	0.28	0.17	0.10	0.04	0.02	0.01	0.00	.....
0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.10	0.20	0.25	0.18	0.11	0.05	0.02	0.00	.....
0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.12	0.23	0.25	0.13	0.10	0.05	0.00	.....
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.12	0.22	0.25	0.18	0.07	0.00	.....
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.13	0.22	0.23	0.16	0.00	.....
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.05	0.15	0.22	0.21	0.00	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

İkinci aşamada (2.8) yardımıyla kümülatif olasılıklar hesaplanmıştır. 13 durumlu sistem için kümülatif olasılık matrisi Çizelge 2.3’te verilmiştir.

$$P_{ik} = \sum_{j=1}^k p_{ij} \quad (2.8)$$

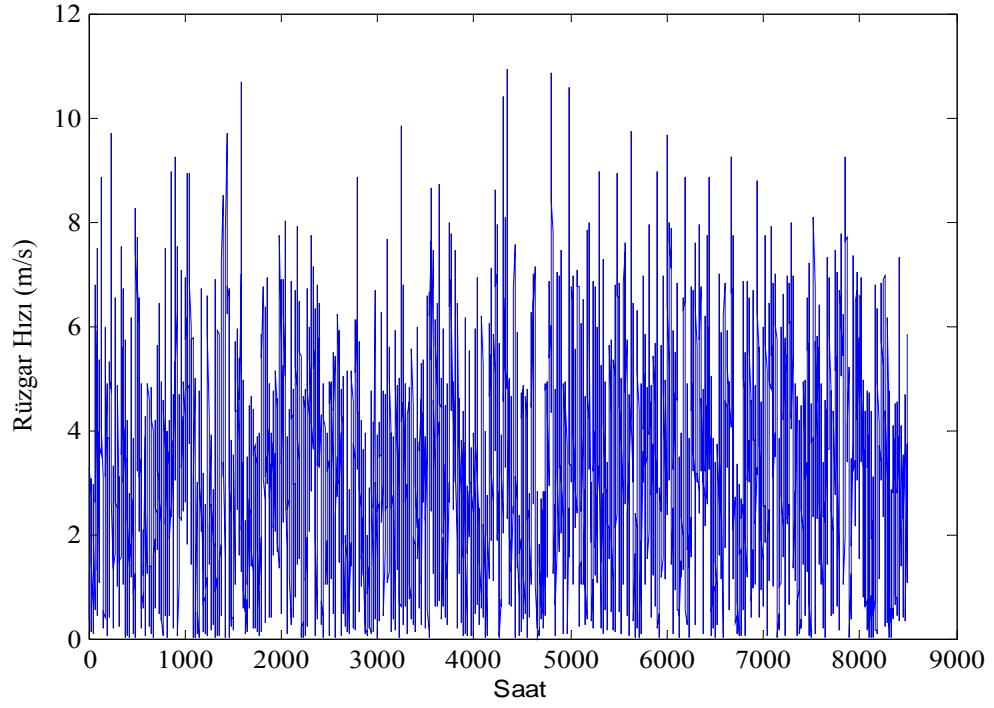
**Çizelge 2. 3** 13 durumlu Markov model'e ait kümülatif durum geçiş matrisi

0.61	0.90	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.18	0.64	0.92	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.04	0.23	0.69	0.92	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.01	0.06	0.26	0.72	0.93	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.06	0.32	0.75	0.95	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.01	0.08	0.36	0.77	0.95	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.01	0.02	0.09	0.38	0.76	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.12	0.42	0.80	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.17	0.50	0.89	0.97	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.22	0.49	0.86	0.95	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.27	0.50	0.91	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.15	0.15	0.15	0.31	0.62	0.69	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00

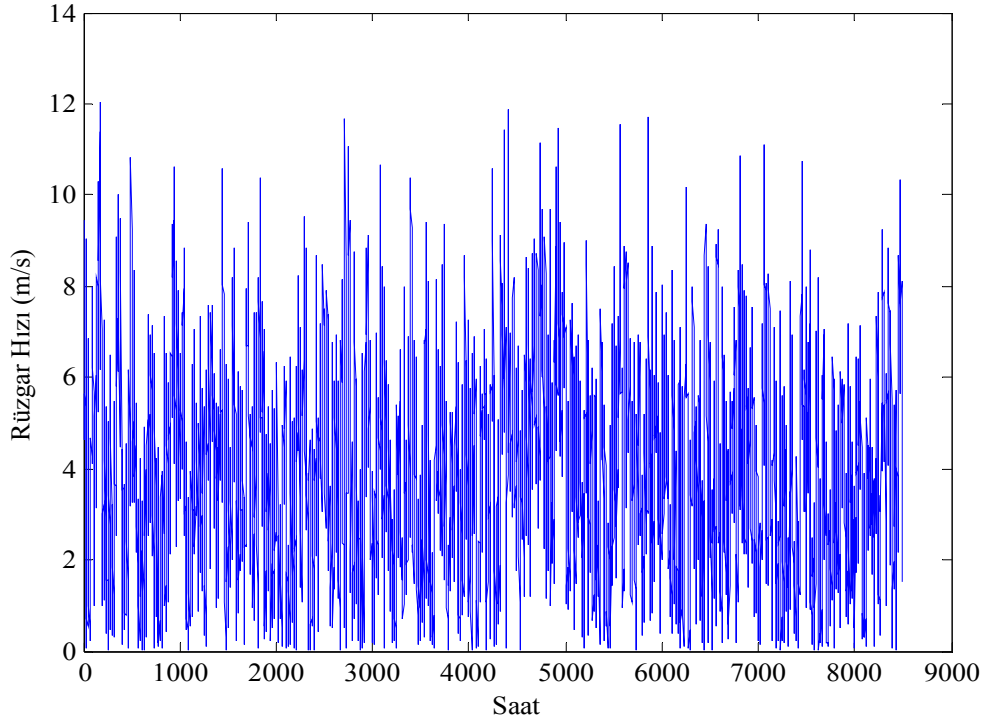
Bu aşamadan sonra aşağıda verilen algoritma yardımıyla ve hesaplanan durum geçiş matrisleri kullanılarak rüzgar hızları üretilmiştir:

1. Sistem rastgele bir durumdan başlatılır.
2. Sistemin o anki durumu neyse o durumla ilgili kümülatif olasılıklarla ilgilenilir.
3. 0-1 arasında düzgün dağılan rastsal bir sayı üretilir.
4. Kümülatif olasılık vektöründe bu rastsal sayının karşılık geldiği aralık bulunur ve sistemin yeni durumu bu aralığın üst sınırı olarak tespit edilir.
5. Algoritma istenilen sayıda rüzgar hızını üretene kadar 2-5 adımları tekrarlanır.

Üretilen rüzgar hızlarının gerçek hız değerleriyle doğrudan karşılaştırılabilmesi amacıyla yukarıda anlatılan algoritma kullanılarak 1 yıllık rüzgar hızı 13 durumlu ve 26 durumlu modeller tarafından üretilmiştir. Üretilen rüzgar hızlarının zamana göre değişimleri Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te verilmiştir.



**Şekil 2. 2.** 13 durumlu Markov model tarafından üretilen saatlik rüzgar hızlarının yıllık değişimi



**Şekil 2. 3.** 26 durumlu Markov model tarafından üretilen saatlik rüzgar hızlarının yıllık değişimi

Model tarafından üretilen verilerin ve ölçülmüş verilerin temel istatistikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

**Çizelge 2.4** Markov modeller tarafından üretilen verilerin ve ölçülen verilerin bazı temel istatistikleri

	Ölçülmüş veri	Model-1* tarafından üretilmiş veri	Hata (%)	Model-2** tarafından üretilmiş veri	Hata (%)
Minimum (m/s)	0.00	0.02	0	0.00	0
Maksimum (m/s)	12.47	11.44	8.26	12.77	2.4
Ortalama (m/s)	3.52	3.16	10.22	3.61	2.6
Medyan	3.35	2.95	11.9	3.47	3.6
Standart Sapma	2.11	1.91	9.5	2.02	4.3

\*13 durumlu Markov model, \*\*26 durumlu Markov model

Çizelge 2.4 incelendiğinde 26 durumlu Markov modelin, temel istatistikleri daha iyi tahminlediği görülmektedir. Bu da rüzgar hızlarının Markov modeller ile modellenirken durum uzayı boyutunun artırılmasının üretilen verinin kalitesini arttırdığını göstermektedir. Bu sonuç, durum uzayı boyutunun artırılmasının Markov durum geçiş matrisinin boyutunu artırarak kurulan modelden daha doğru bilgi okunmasının sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Başka bir ifadeyle durum uzayı boyutunun artırılması kurulan modeldeki çözünürlüğü arttırmakta bu da modelden üretilen veri kalitesini olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle, durum uzayı boyutunun daha da artırılması kurulan modelden üretilen verilerin kalitesini arttırmaya devam edecektir.

## 2.2. Saklı Markov Modeller (HMM)

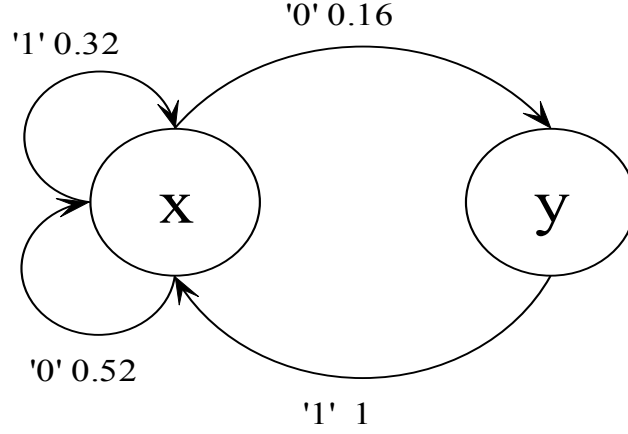
HMM, ses sinyali işleme uygulamalarında kullanılan temel yöntemlerden biridir. Rastsal bir süreç olarak kabul edilen ve parametrelerinin iyi tanımlanmış yöntemlerle doğru olarak tahmin edilebileceği bu modelde, çerçevelenen ses sinyalinin spektral özellikleri istatistiksel yöntemlerle karakterize edilir. Markov modelde belirli olan durumlar saklı Markov modellerde belirsizdir ancak, durumların tetiklediği gözlemler bilinmektedir. Başka bir ifadeyle, saklı Markov süreçleri adından da anlaşılacağı üzere durumların gizli olduğu ancak durumların arasındaki geçişler esnasında ortaya çıkan gözlemlerin dizisinin bilindiği stokastik süreçlerdir. Örneğin bir ses sinyali bir durumdan diğer bir duruma geçişte kelimeler üretilecek şekilde modellenabilir. Benzer bir şekilde bir ses tanıma sistemi bir kelimeyi, bu durumlar arasındaki geçiş esnasında tanıyabilir. HMMler üretici veya yorumlayıcı olarak düşünülebilirler.

Saklı Markov süreçler ve bunların uzantıları, sinyal işleme ve ses tanıma gibi uygulamalar için oldukça kullanışlıdır. HMM ler, doğal bir süreci modellemenin iyi bir yoludur. Çok hızlı çalışabilmeleri ve en çok karşılaşılan saklı Markov süreçlerindeki problemlerin çözülmesi için çok kullanışlı algoritmaların varlığı ses tanıma gibi gerçek zamanlı çalışan uygulamalarda bile başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Bir HMM genel olarak  $\langle s_b, S, W, E \rangle$  şeklinde 4 sembolle tanımlanabilir. Bu semboller sırasıyla, başlangıç gözlemi, durumlar kümesi, gözlemler kümesi ve geçişlerin kümesini göstermektedir [57-59].

Örnek olarak;

$\langle s_2, \text{fatih}, s_3, 0.3 \rangle \implies P(s_2 \xrightarrow{\text{'fatih'}} s_3) = 0.3$  gösterimi, sistemin  $s_2$  durumundan  $s_3$  durumuna geçerken 'fatih' kelimesini üretmiş olma olasılığının 0.3 olduğunu ifade etmektedir. Bir sistem HMM ile modellenirken sistemin başlangıç durumu bilinmiyor dahi olsa bu duruma ait bir olasılık yoğunluk fonksiyonu biliniyor olmalıdır. Şekil 2.4.'te basit bir HMM örneği verilmiştir.

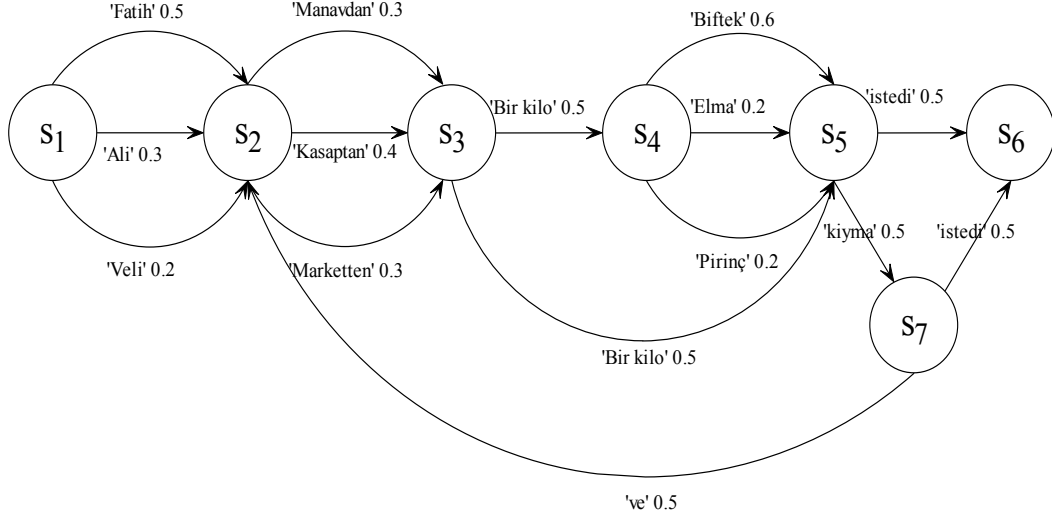


**Şekil 2. 4.** İki durumlu örnek bir saklı Markov model

Bir HMM’de Şekil 2.4’ten de görülebileceği gibi bir durumdan olası diğer tüm durumlara geçişlerin olasılıklarının toplamı 1 dir. Ayrıca, bir durumdan başka bir duruma geçişte aynı semboller gözlenebilir. Şekil 2.4’te x durumundan y durumuna geçişte ‘0’ sembolü gözlenebileceği gibi aynı sembol aynı zamanda x durumundan x durumuna geçişte de gözlenebilir. Başka bir ifadeyle, bilinen herhangi bir gözlem için sistemin hangi durumda olacağı kesin olarak belli değildir. Aslında, modelin “saklı Markov” ismi buradan gelmektedir.

Şekil 2.4’teki örnekte  $s_t = x$ ,  $S = \{x, y\}$ ,  $W = \{0,1\}$  ve  $E = \{ \langle x, '1', x, 0.32 \rangle \langle x, '0', x, 0.52 \rangle \langle x, '0', y, 0.16 \rangle \langle y, '1', x, 1 \rangle \}$  olarak tanımlanabilir.

Saklı Markov süreçlerin daha iyi açıklanması için Şekil 2.5’te daha detaylı bir HMM tasarlanmıştır. Tasarlanan HMM cümle üretici olarak kullanılmaktadır.



**Şekil 2. 5.** Cümle üreten bir HMM

Şekil 2.5'te  $s_3$  durumunda “Bir kilo” ifadesinin üretilebileceği iki durum söz konusudur. Modelde,  $s_1$  durumundan başlayarak ‘Fatih manavdan bir kilo’ kelimelerinin üretildiğini düşünelim. Bu kelimelerin üretildiği biliniyorsa bu, sistemin başlangıçta  $s_1$  durumunda daha sonra  $s_2$  durumunda ve sonra da  $s_3$  durumunda olduğunun bilindiği anlamına gelir. Ancak bu durumdan sonra sistemin  $s_4$  durumunda mı yoksa  $s_5$  durumunda mı olacağı verilen olasılıklar birbirine eşit olduğu için henüz bilinmemektedir. Bu durum, ancak bir sonraki kelime üretildikten sonra kesinleşecektir. Örneğin, eğer bir sonraki kelime ‘Biftek’ ise artık sistemin o anki durumunun  $s_5$  olduğu söylenebilir ve sistem bu duruma ancak  $s_4$  durumundan geçmiş olabilir. Böylece sistemin bir önceki durumunun  $s_3$  olduğu kesinlik kazanır. Şekil 2.5'teki HMM örnek olarak aşağıdaki cümleleri üretebilir;

- C1 : Fatih kasaptan bir kilo kıyma istedi
- C2 : Ali manavdan bir kilo elma istedi
- C3 : Veli marketten bir kilo pirinç istedi

Durumlar arası geçişlerin birbirlerinden bağımsız oldukları kabul edilirse (Bu durum yukarıda verilen örnekteki cümle üreticinin ‘Fatih kasaptan bir kilo elma istedi’ cümlesini de üretebildiği anlamına gelmektedir) bu durumda HMM den bu cümlelerin üretilme olasılıkları önceki olasılıklar çarpılarak hesaplanabilir. Örnek olarak, C3 ün sistemden üretilme olasılığı;

$$P(C3) = 0.2 \times 0.3 \times 0.5 \times 0.2 \times 0.5 = 0.003 \text{ şeklinde hesaplanabilir.}$$

HMM, kesikli, sürekli veya yarı sürekli model gibi her bir duruma tahsis edilen gözlenebilir olayların sürekli, kesikli veya her ikisi birden olmasına göre sınıflandırılabilir. Bu tez çalışmasında saatlik olarak ölçülmüş rüzgar verileri kesikli durumlara dönüştürülmüş ve kesikli saklı Markov modeli oluşturulmuştur. Bu nedenle bu bölümde kesikli saklı Markov modeller üzerinde daha detaylı durulmuştur. Durumlar, herhangi bir zaman anında herbir durumdan herhangi bir duruma geçiş içerecek biçimde ergodik olarak tasarlanabilir. Durumların diziyi sonlandırabilmesi için durum dizilişlerine göre soldan sağa veya sağdan sola tasarlanabilir.

Saklı Markov sürecinin uygulanması iki aşamadan oluşur: İlk aşamada sistem de sunulan verilere göre model kurulur ve model parametreleri bulunur. Bu aşamaya eğitim aşaması denilir. İkinci aşamada ise kurulan model parametreleri ve gözlemler modele sunulur modelden olasılığı en yüksek durum vektörü elde edilir.

Eğitim aşaması süresince temel alınacak referans modelin parametreleri tahmin edilir. Bu modelde tahmin edilecek üç parametre vardır. Bunlardan biri, t anında i. durumda ve t+1 anında j. durumda olma geçiş olasılıklarını gösteren  $a_{ij}$  elemanlarını içeren durum geçiş olasılığı matrisi, A'dır.  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$  olan bir gözlem dizisi tanımlandığı zaman bu vektör dizisinin her bir elemanı konuşma uygulamalarında konuşmacı tanıma sistemlerinde kullanılan öznitelik vektörlerini gösterir. Rüzgar verilerinin modellenmesi sırasında ise gözlem dizisi, saatlik ölçülüp kaydedilmiş olan basınç verileri olarak seçilmiştir.  $B = [b_j(o_t)]$  gözlem sembol olasılık dağılımı matrisidir.  $b_j(o_t)$ ,  $o_t$  vektörünün t anında j. durumda gözlemlenmesi olasılığını gösterir.  $\pi = \{\pi_i\}$  vektörü, başlangıçta i. durumda olma olasılığını belirten başlangıç durum dağılımını gösterir.

Bir HMM oluşturulduktan sonra üç farklı problemin çözümü ile ilgilenilebilir:

- 1- Model ve gözlem sırası biliniyorsa bu gözlem dizisinin görülme olasılığının etkin bir biçimde nasıl hesaplanabileceği
- 2- Model ve gözlem sırası biliniyorsa bazı kriterlere göre uygun durum dizisinin nasıl seçilebileceği
- 3- Bu gözlemin oluşma olasılığını maksimize edecek model parametrelerinin nasıl ayarlanacağıdır.

Rüzgar verilerinin modellenmesi amacıyla bu tez çalışmasında, 2. problemin çözümü araştırılmıştır. Bu problemin çözümü için, bilinen t-1 uzunluğundaki gözlem dizisi için t uzunluğundaki olasılığı en yüksek olan durum geçiş dizisinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu tahminleme işlemi için en çok bilinen ve uygulamalarda en yaygın bir şekilde kullanılan yöntem, Viterbi algoritmasının uygulanmasıdır.

### 2.2.1. Viterbi Algoritması

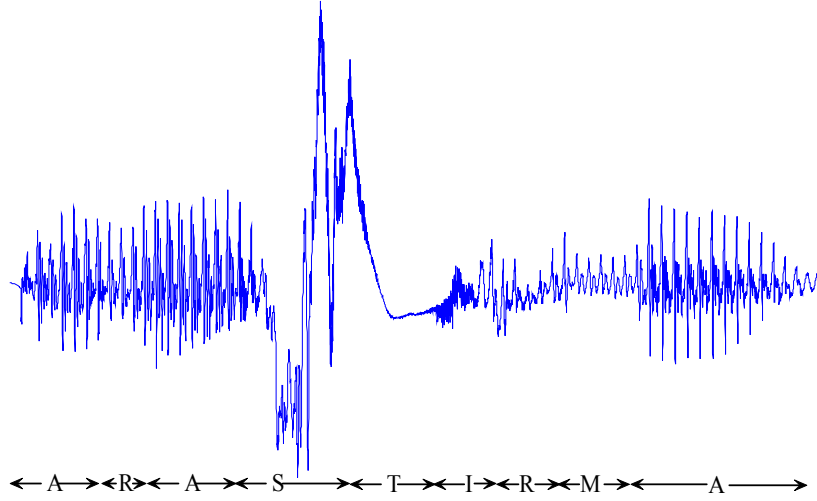
t-1 tane bilinen (veya gözlemlenen) gözlem dizisi  $w^{1,t-1}$  ile gösterilsin. En olası t durum geçiş dizisi de  $\sigma(t)$  ile gösterilecek olursa  $\sigma(t)$ , (2.9) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\sigma(t) = \arg \max_{s^{1,t}} P(s^{1,t} / w^{1,t-1}) \quad (2.9)$$

Viterbi algoritmasının amacı olasılığı en yüksek durum dizisini bulmaktır. Bunu yaparken  $P(s^{1,t} / w^{1,t-1})$  olasılığını maksimize eder. Algoritma, olası her durum arası geçiş sırasında meydana gelen gözlem durumunun maksimum olasılığını hesaplamak suretiyle çalışır. En son adımda maksimum olasılıklı durum seçilir ve en olası durum vektörünün sonuna eklenir. Böylece meydana gelebilecek olan durum geçişleri, bir önceki geçiş dizisinin sonuna eklene eklene algoritma gözlem dizisinin son elemanı olan gözlem görülünceye kadar devam eder.

## 2.2.2. Rüzgar Verilerinin Saklı Markov Matrisi Yaklaşımıyla Modellenmesi

Rüzgar verilerinin de dahil olduğu çeşitli sinyaller, verinin doğrudan işlenmesini zorlaştırmaktadır. Öte yandan, bu tür kaotik görünümlü verileri oluşturan ana etmenler daha durağan ve yavaş değişimli süreçlerdir. Bu tür süreç–veri ilişkisine en tipik örnek, konuşmadaki kayıtlı sesi işlemede karşımıza çıkmaktadır. Konuşmada çıkan seslerin doğrudan kaydı sonucunda yüksek hızla, hatta rastgele değişim gösteren sinyal şekilleri ortaya çıkmaktadır. Bu sinyal şekillerinin tek tek analizi ve yorumlanması mümkün değildir. Şekil 2.6’da, “ARAŞTIRMA” kelimesinin ses kaydı görülmektedir. Bu sinyalin örneklerinin tek tek bir anlamı yoktur. Oysa ki, bu rastgele görünümlü sinyalin altyapısında son derece kurallı, durağan ve anlaşılır bir süreç vardır. Bu süreç “ARAŞTIRMA” kelimesine karşılık gelmektedir.

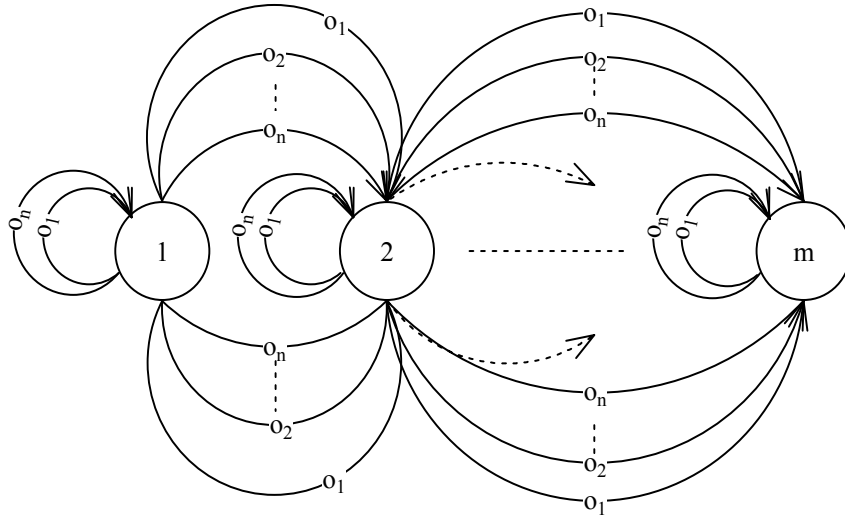


Şekil 2. 6. “ARASTIRMA” kelimesinin ses sinyalinin yapısı ve altında yatan harf süreçleri

Buna benzer şekilde, rüzgar verileri de, temelde yavaş değişim gösteren makroskopik iklimsel hareketlerin, yerel fiziksel şartlara göre şekillenmesi ile oluşmaktadır. Bu durum, örneğin, konuşma işlemedeki “A” harfinin gırtlak ve ağızda bir sinyal oluşturmasına benzemektedir. Bu durumda, sinyal verilerinin altında yatan asıl süreci bulmak, rüzgar verilerini daha “doğru” okumak ve değerlendirmek anlamına gelecektir. Bu tez çalışmasında, konuşma işlemede bu amaca yönelik olarak

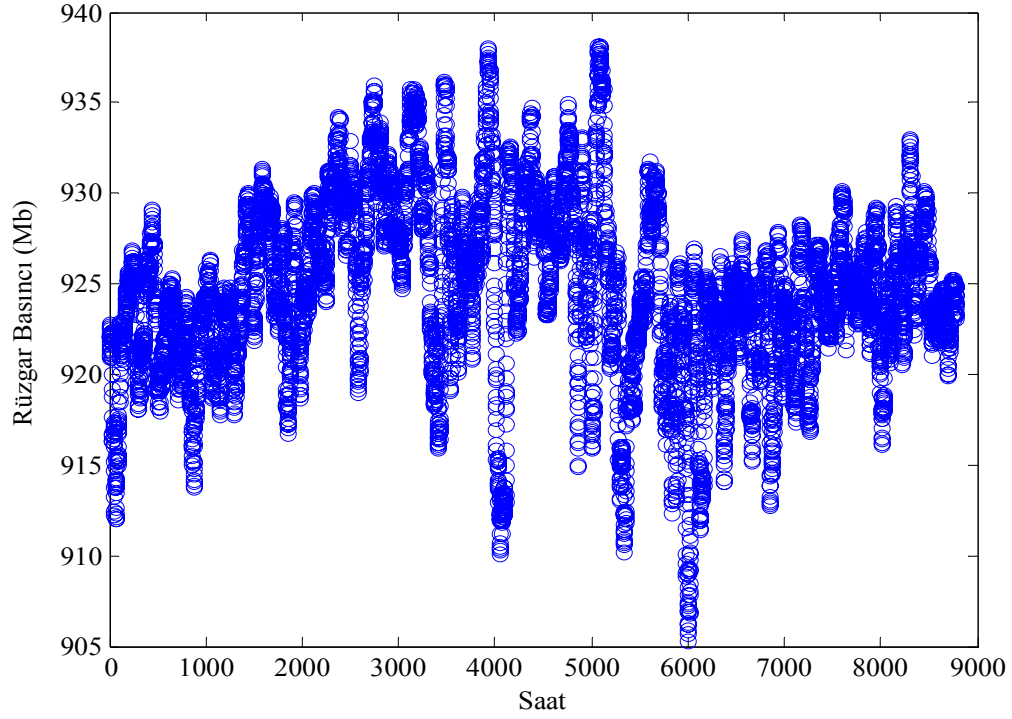
yüksek başarı ile uygulanan HMM denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ortaya çıkartılacak modelin “durum” parametrelerinin, bölgesel basınç ile ilişkili olduğu düşünülerek saatlik basınç verilerinin yıllık değişimleri de modelleme de kullanılmıştır.

Rüzgar verilerinin HMM ile modellenmesi için ilk olarak, rüzgar hızları kendisine en yakın tam sayılara tamamlanması suretiyle rüzgar durumları oluşturulmuştur. Rüzgar hızları, hem saatlik hem de günlük ortalamalar şeklinde modellenmiş ve her iki durum için de HMM'nin başarısı tartışılmıştır. Oluşturulan HMM Şekil 2.7 de görülmektedir.



Şekil 2. 7. Rüzgar verilerinin HMM durumlarına dönüştürülmesi

Önceki bölümlerde anlatılan modelleme yöntemi Eskişehir bölgesine ait 1 yıllık rüzgar hızı verisi üzerinde daha detaylı olarak bu bölümde gösterilmiştir. Eskişehir bölgesine ait rüzgar hızları ve basınç verilerinin yıl içindeki saatlik değişimleri Şekil 2.1 ve Şekil 2.8’de verilmiştir.



**Şekil 2. 8.** Eskişehir bölgesine ait yıllık rüzgar basıncı değerlerinin saatlik değişimleri

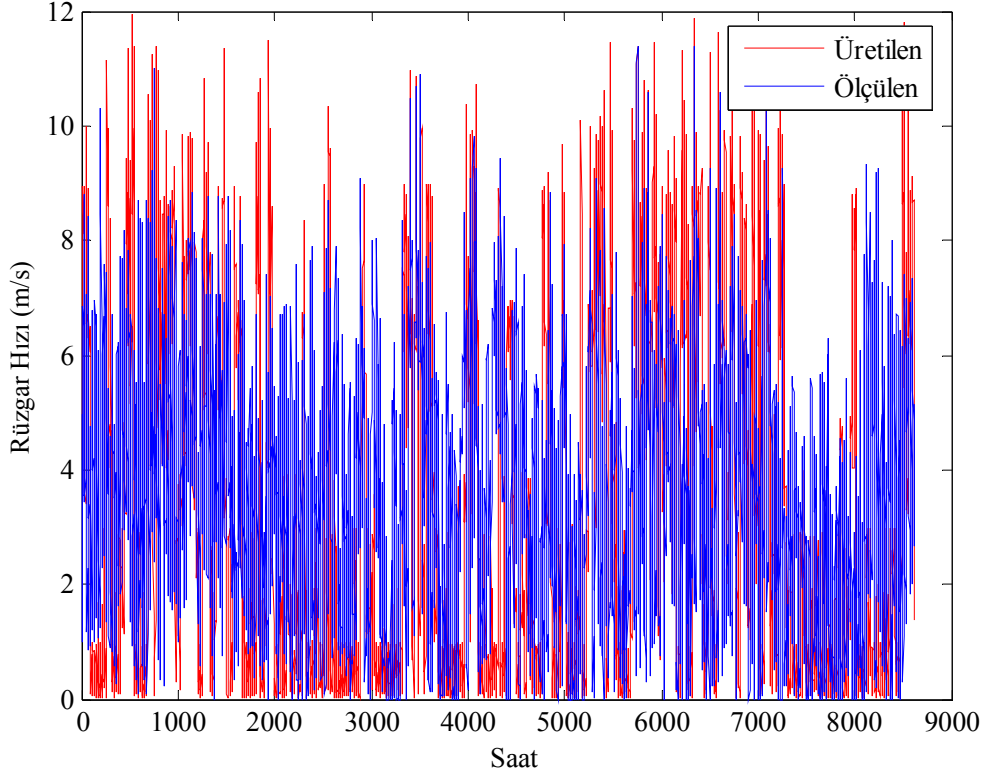
Rüzgar durumlarının sayıları  $(1,2,\dots,m)$ , her ay için rüzgar verilerinin maksimum değerlerinin en yakın tamsayıya tamamlanması sonucu bulunmuştur.

$i$  durumundan  $j$  durumuna geçişteki  $o_n$  gözleminin meydana gelme olasılığı  $p(s_i \xrightarrow{o_n} s_j)$  ile gösterilirse  $p(s_i \xrightarrow{o_n} s_j)$  denklem (2.10)'dan hesaplanabilir.

$$p(s_i \xrightarrow{o_n} s_j) \approx \frac{n_{o_i}}{n_{o_n} \cdot p_{ij}} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'da  $o_i$  ;  $i$ . gözlemi göstermektedir. Bu çalışma için  $o_i$ ,  $i$ . saatteki ölçülmüş hava basıncı değeridir.  $n_{o_i}$ ,  $i$ . gözlemin görülme sayısı ve  $n_{o_n}$  ise sistem  $i$ . durumdan  $j$ . duruma geçerken tüm gözlemlerin görülme sayısını ifade etmektedir. Yıllık veriler üzerinde yapılan modelleme sonucunda HMM tarafından üretilen verilerin ve ölçülmüş olan verilerin zamana göre değişimleri, Şekil 2.9'da

gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde kurulan modelin verilerin zaman içerisindeki değişimlerini de yakalayabildiği anlaşılmaktadır.



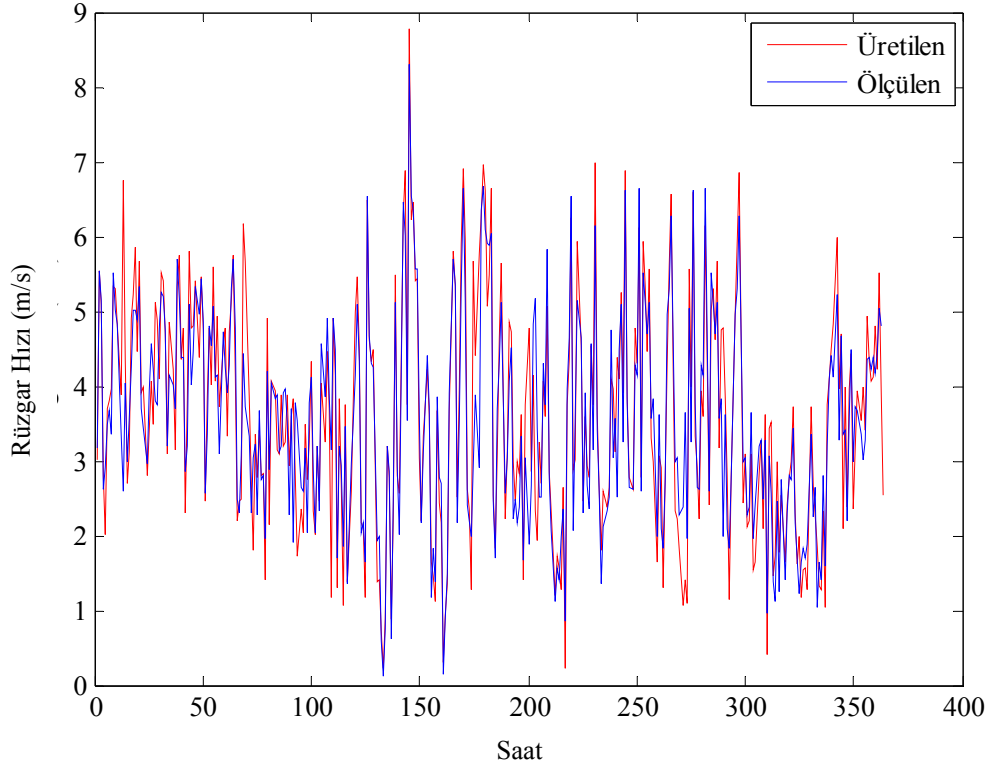
**Şekil 2. 9.** Model tarafından üretilen hızların ve gerçek hızların zamanla değişimi

Çizelge 2.5’te model tarafından üretilen ve ölçülmüş olan rüzgar hızı verilerinin bazı temel istatistiklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

**Çizelge 2. 5** Üretilen ve ölçülen verilerin temel istatistikleri

	Minimum hız (m/s)	Maksimum hız (m/s)	Ortalama hız (m/s)	Medyan	Standart sapma
Ölçülen	0	11.4000	3.5277	3.3500	2.1279
Üretilen (saatlik)	0	11.9523	3.3191	1.8253	3.1638

Şekil 2.10.'da ise günlük olarak modellenen verilerin ve ölçülmüş olan verilerin zamanla değişimleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

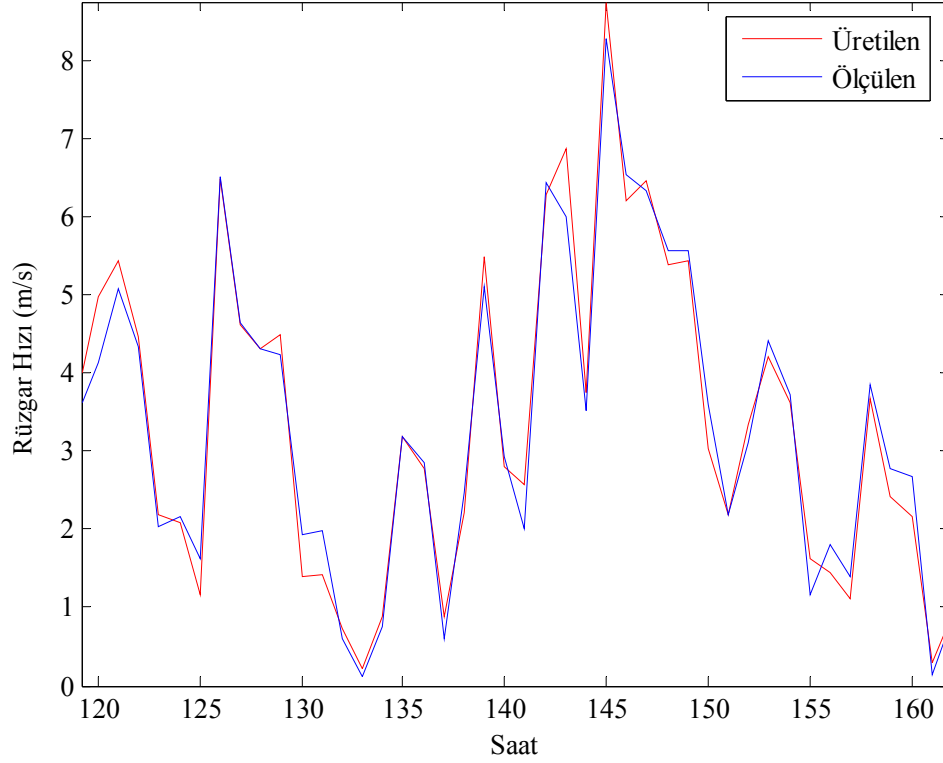


**Şekil 2. 10.** Günlük modelleme sonucu modelin ürettiği hızların ve ölçülmüş olan hızların zamanla değişimi

Kurulan modelin verilerin zaman içerisindeki davranışlarını da iyi yakaladığını daha açık göstermek amacıyla Şekil 2.10'daki grafiğin herhangi bir yerinden yaklaşık bir aylık kesit alınmış ve Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Çizelge 2.6'da ise günlük modelleme sonucu üretilen ve ölçülmüş olan verilerin bazı temel istatistiklerin karşılaştırılması verilmiştir.

**Çizelge 2. 6** Üretilen ve ölçülen verilerin (günlük ortalama) temel istatistikleri

	Minimum hız (m/s)	Maksimum hız (m/s)	Ortalama hız (m/s)	Medyan	Standart sapma
Ölçülen	0.11	8.2954	3.5277	3.4525	1.3917
Üretilen	0.2224	8.7660	3.5964	3.6058	1.5205



**Şekil 2. 11.** Günlük modelleme sonucu modelin ürettiği hızların ve ölçülmüş olan hızların zamanla değişimi grafiğinden alınmış yaklaşık bir aylık kesit

### 2.3. Markov ve Saklı Markov Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Markov zincirleri yaklaşımıyla yapılan modellemeler verilerin temel istatistiklerini ve olasılık yoğunluklarını doğru tahmin edebilmektedir. Ancak, bu modeller verilerin zaman içindeki değişimlerini (Başka bir ifadeyle gerçek değerlerini) doğru tahmin edememektedir. Diğer yandan, bu tez çalışmasında geliştirilen HMM yaklaşımı sonucu modelden üretilen veriler, hem verilerin istatistiklerini iyi tahminlemekte hem de verilerin yıl içindeki saatlik veya günlük değişimlerini de iyi modelleyebilmektedir (Bkz. Şekil 2.9-11 ve Çizelge 2.5,6). Diğer taraftan, saatlik verilerin HMM ile modellenmesinin, günlük verilerin modellenmesine nazaran daha kötü sonuçlar verdiği Şekil 2.9 ve 2.10 dan anlaşılmaktadır.

### 3. GÜNEŞ IŞINIM ŞİDDETİ VERİLERİNİN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE ANALİZİ

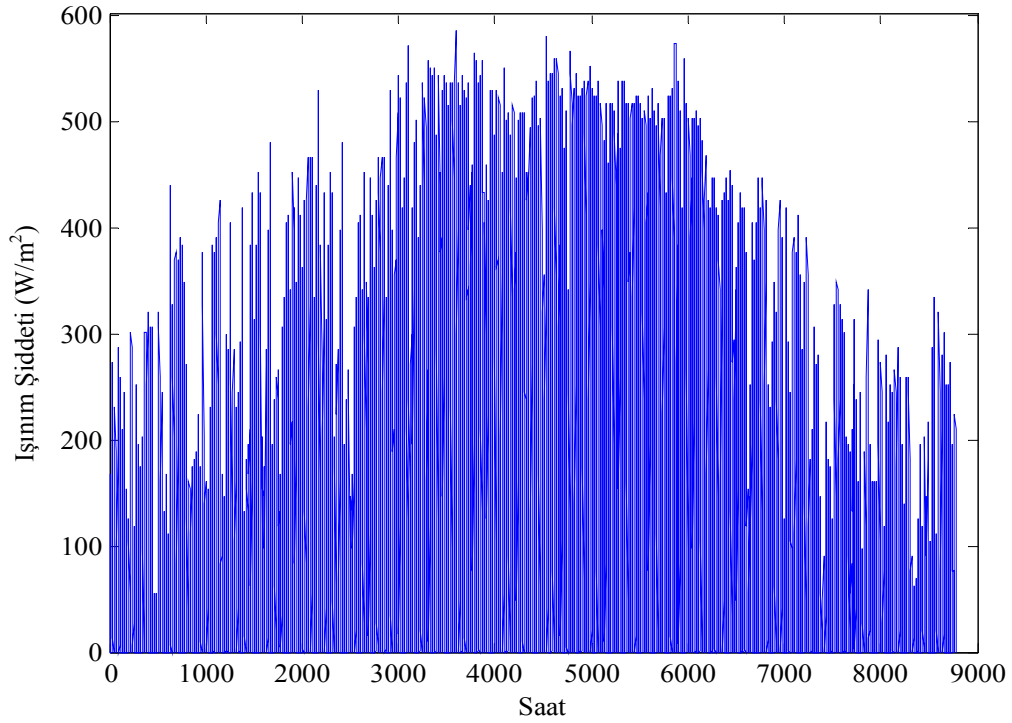
Herhangi bir yörede, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten bir sistem tesis edilmeden önce, yörenin güneş ışınım şiddeti verileri analiz edilmeli, modellenmeli ve istenilen yükü karşılayabilecek güneş panellerinin boyutları tespit edilmelidir [60]. Literatürde güneş ışınımının modellenmesiyle ilgili yapılmış olan çalışmalar dünya dışından gelen ışınım şiddetinin teorik hesaplanması ve bu teorik ışınım şiddeti üzerine bazı rastsal, mevsimsel olayların eklenmesi ile oluşturulmuştur. Bu modellerin bir çoğu modellemenin yapılacağı yöreye ait bulutluluk indeksi, güneşlenme süresi ve ozon kalınlığı gibi parametrelerin de bilinmesini gerektirir [61-64]. Güneş ışınım şiddetinin modellenmesine ilişkin ANN veya benzeri akıllı modelleme yöntemleri de kullanılmaktadır. Kalagirou tarafından gerçekleştirilen çalışmada ANNlerin enerji sistemlerine uygulamaları ile ilgili yapılmış mevcut çalışmalar derlenmiştir [65]. Mellit ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise ANN ve Markov geçiş matrisleri yaklaşımı ile güneş ışınım verisi üreten basit bir model önerilmiştir [66]. Hocaoglu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Eskişehir bölgesinin güneş potansiyelinin tahmini için geriye yayılım algoritması kullanılmıştır [67]. Bu çalışmalarda ve benzerlerinde, güneş ışınım şiddeti verileri 1-B vektör olarak analiz edilmekte ve tahminleme modelleri kurulmaktadır.

Bu bölümde, güneş ışınım şiddeti verileri için yeni bir gösterim ve analiz yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem, var olan analiz yöntemlerine alternatif olarak, yıl içinde saatlik olarak değişen güneş ışınım şiddeti verilerinin 2-B olarak analiz edilmesini içermektedir. Bu yöntemle oluşturulan 2-B veriler, daha sonra örüntüye dönüştürülmüştür. Bu örüntünün pikselleri, sinyal işlemede, özellikle görüntü sinyallerinin işlenmesinde ve kodlanmasında, sıklıkla kullanılan ve başarılı sonuçlar veren, optimal katsayılı doğrusal filtreler kullanılarak tahmin edilmiştir. Böylece, güneş ışınım şiddeti verileri için yeni bir tahminleme yöntemi geliştirilmiştir [68-70]. Ayrıca, yine pekçok sinyal işleme uygulamasında kullanılan, veriler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri de dikkate alarak başarılı sonuçlar veren ANN,

geliştirilen 2-B analizle kurulan tahminleme modelinin doğruluğunu test etmek amacıyla denenmiş ve yine başarılı sonuçlar elde edilmiştir. ANN ve optimal katsayılı doğrusal filtrelerden elde edilen sonuçlar geliştirilen 2-B analiz yönteminin etkinliğini göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen bu 2-B gösterim yöntemi kullanılarak saatlik değişen güneş ışınım şiddeti verilerinin yıl içindeki genel davranışları analitik olarak modellenmiştir [71-74]. Verilerin genel davranışlarının modellenmesi, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemlerin boyutlandırılmasında kullanılmaktadır.

### 3.1. Güneş Işınım Şiddetlerinin Analizine 2-B Bir Yaklaşım

Tez çalışması kapsamında geliştirilen 2-B analiz yöntemi, 1 Ağustos 2005-30 Temmuz 2006 tarihleri arasında Anadolu Üniversitesi İki Eylül kampüsünden ölçülüp kaydedilmiş olan saatlik güneş ışınım şiddeti verileri üzerinde gösterilmiştir [60]. Geliştirilen yöntemlerin gösterilmesi amacıyla veriler ilk olarak, Ocak -Aralık ayları arasında dağılacak şekilde organize edilmiş ve 2-B çizimi Şekil 3.1'de verilmiştir.

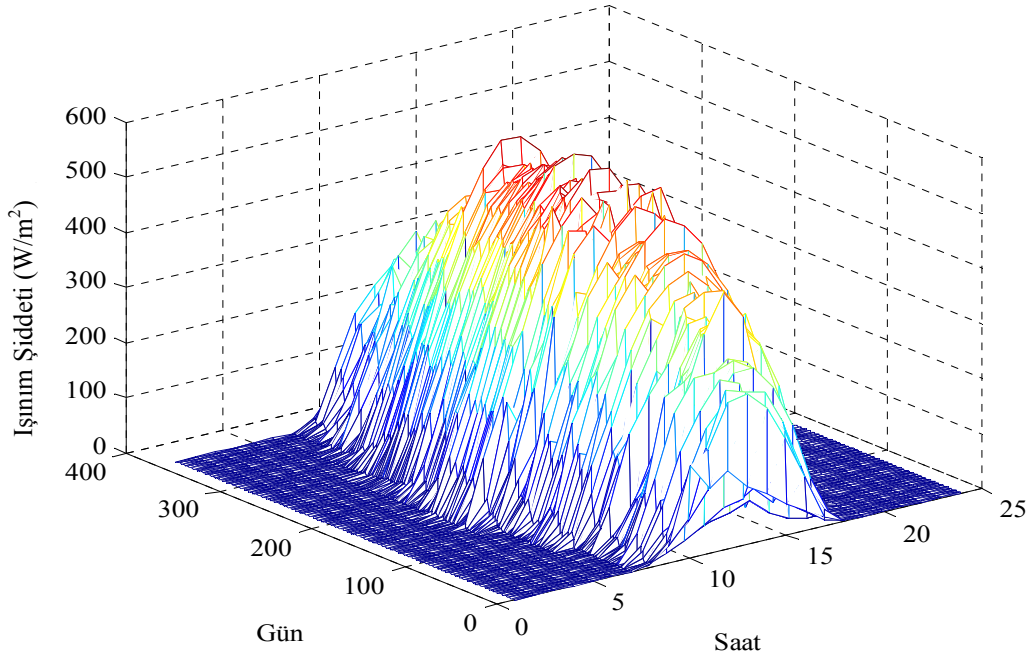


Şekil 3.1. Saatlik güneş ışınım şiddetlerinin 2-B düzlemde değişimi

Güneş ışınım şiddetlerinin saatlere bağlı değişimleri görüldüğü gibi verilerin karakteristikleri ile ilgili tam bir bakış açısı verememektedir. Literatürde, güneş ışınım şiddetlerinin tahminleri ile ilgili mevcut çalışmalardan sadece güneş ışınım şiddetlerini girdi olarak gerçekleştirilenlerde, ışınım şiddetleri tek boyutlu zaman serisi olarak düşünülmüştür. Bu tez çalışmasında ise, ışınım şiddetlerinin gün içindeki değişimlerinin sadece o günden önceki saatlerden değil, o günden önceki günlerdeki ışınım şiddetlerinden de etkileneceği öngörülmüştür. Bu nedenle, tek boyutlu vektörden oluşan ışınım şiddeti verileri, (3.1)'de verilen matris formuna dönüştürülmüştür. Burada  $Rad$  ile ifade edilen matriste  $m$  günlere karşılık gelirken  $n$  ise saatlere karşılık gelmektedir. Denklem (3.1)'deki  $x_{mn}$  ise  $m$ . gün,  $n$ . saatteki güneş ışınım şiddetini göstermektedir.

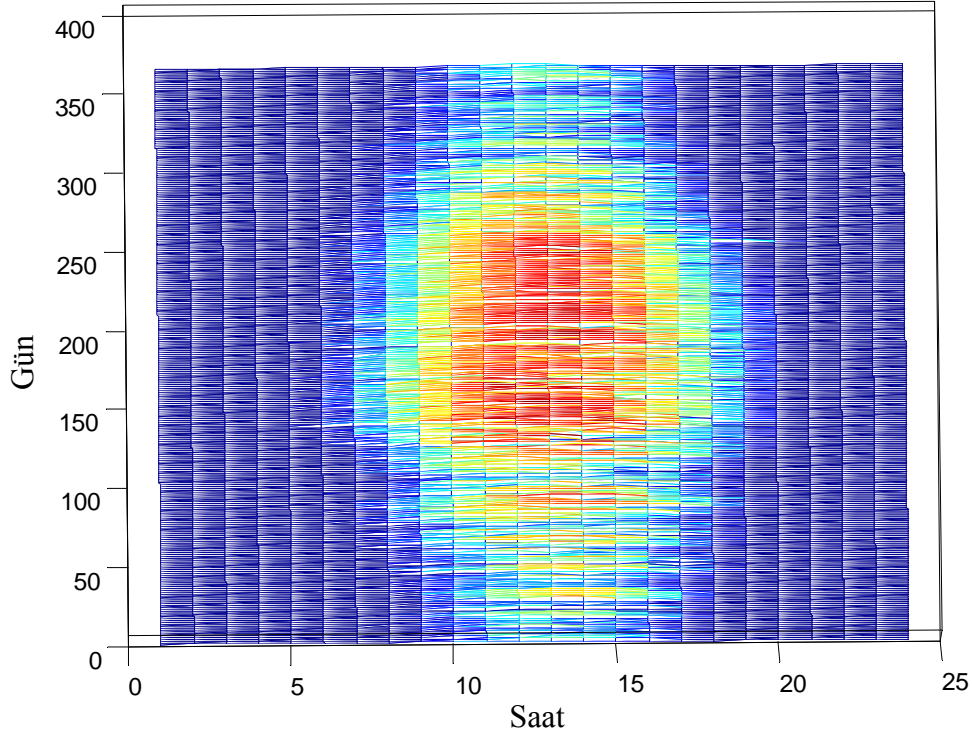
$$Rad = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Oluşturulan  $Rad$  matrisinin 3 boyutlu uzayda gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3. 2. İki boyutlu güneş ışınım şiddeti verilerinin üç boyutlu düzlemde çizimi

Şekil 3.2 incelendiğinde verilerin, Şekil 3.1’de tam olarak anlaşılması mümkün olmayan davranışlarının belirginleştiği açıkça görülmektedir. Ancak, yine de tam olarak yorumlanması ve bir tahmin modeli kurulmasında hangi verilerin daha fazla bilgi taşıdığına anlaşılması mümkün değildir. Bu nedenle Şekil 3.2’de gösterilen çizimden de faydalanılarak Şekil 3.3’te verilen resim oluşturulmuştur.



**Şekil 3. 3.** Güneş ışınım verilerinin resim çizimi

Şekil 3.3 kolayca yorumlanabilir. Şöyle ki; koyu mavi kısımlar güneşin hiç olmadığı zamanlara, yani gece vakitlerine karşılık gelmektedir. Güneş ışınları sabah saatlerinde az şiddetli iken öğlene doğru şiddetini arttırmakta ve öğlen saatlerinde yüzeye dik gelmektedir. Şekildeki örüntünün orta kısmına yaklaşıldıkça kırmızıya dönüşmesi bunu göstermektedir. Şekil 3.3’e enlemesine bakıldığında koyu mavi renkten açık renk tonlarına, gittikçe açılan ve şeklin orta kısımlarında kırmızıya dönüşen renkler dikkat çekmektedir. Bunun nedeni ışınım şiddetinin giderek arttığını göstermektedir. Ayrıca, şekle boylamasına bakıldığında ise, ışınım şiddetlerinin

mevsimsel davranışları da kolayca yorumlanabilmektedir. Şeklin ortasındaki örüntünün dar kısımları günlerin kısa olduğu sonbahar ve kış aylarına karşılık gelirken, örüntünün geniş olduğu kısımlar ise (açık renklerin hakim olduğu) günlerin uzun olduğu ilkbahar ve yaz aylarına karşılık gelmektedir. Şekil, o kadar çok bilgi taşımaktadır ki havanın bulutlu olduğu günler dahi şekle bakılarak açıkca belirlenebilir. Şeklin ortasında bulunan örüntünün orta kısımlarının bazı noktaları kırmızı olması gerekirken, maviye yakın daha açık renkte olması bulutlanmayı göstermektedir.

Ele alınan bu şekil, güneş ışınım şiddeti için kurulacak tahminleme modelinin ne şekilde olması gerektiği konusunda ciddi bir fikir içermektedir. Herhangi bir saatteki ışınım şiddetinin bir önceki gün aynı saatteki ve bir önceki günün daha önceki saatlerindeki ışınım şiddetleriyle ilişkili olduğu Şekil 3.3 ten görsel olarak anlaşılmaktadır. Şeklin görsel olarak incelenmesiyle sezgisel olarak ortaya atılan bu görüş denklem (3.1)'deki *Rad* matrisinin satır ve sütun elemanları arasındaki ilişkinin hesaplanmasıyla da belirlenmiştir. Bu korelasyon, ele alınan iki değişkene ait bazı temel istatistiksel niteliklerin hesaplanmasıyla elde edilebilir. *X* ve *Y* gibi iki değişken düşünelim bu değişkenlerin varyansları sırasıyla (3.2) ve (3.3) yardımıyla hesaplanabilir

$$\sigma_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n} - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n^2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2}{n} - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n^2} \quad (3.3)$$

*X* in *Y* ile kovaryansı ise (3.4)'ten hesaplanabilir

$$\sigma_{XY} = \frac{\sum XY}{n} - \frac{\sum X \sum Y}{n^2} \quad (3.4)$$

Bu temel istatistiksel kavramlar kullanılarak X ve Y değişkenleri arasındaki  $\rho$  korelasyon katsayısı (3.5) ile hesaplanabilir.

$$\rho = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \cdot \sqrt{n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2}} \quad (3.5)$$

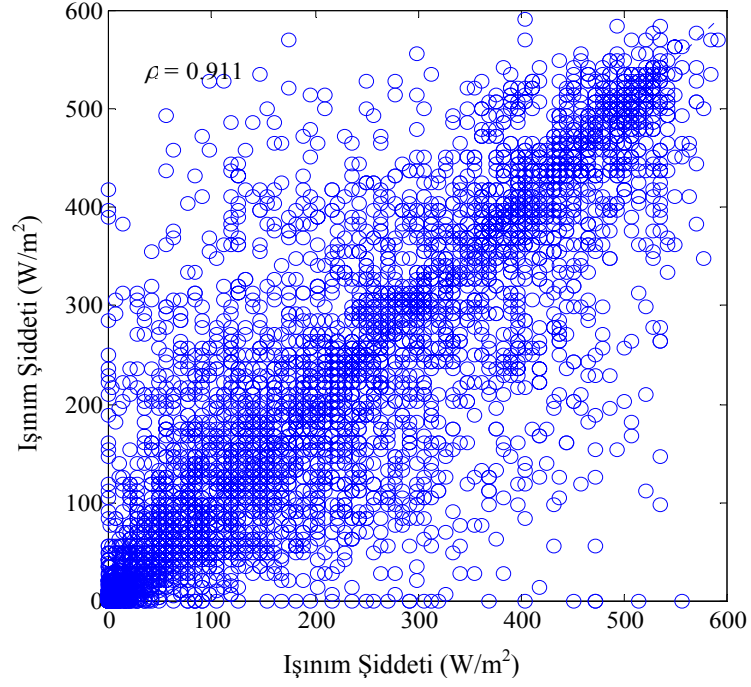
Denklem (3.1)'de verilen matrisin elemanları arasındaki korelasyon katsayıları ve korelasyon katsayılarının karesiyle ifade edilen, tanımlama katsayısı olarak bilinen kavramlar hesaplanmış ve Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ayrıca, herhangi bir saatteki güneş ışınım şiddetlerinin geçmiş zamanlardaki ışınım şiddetleri ile değişimleri çizdirilmiş ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Pikseller arasındaki korelasyon ve tanımlama katsayıları

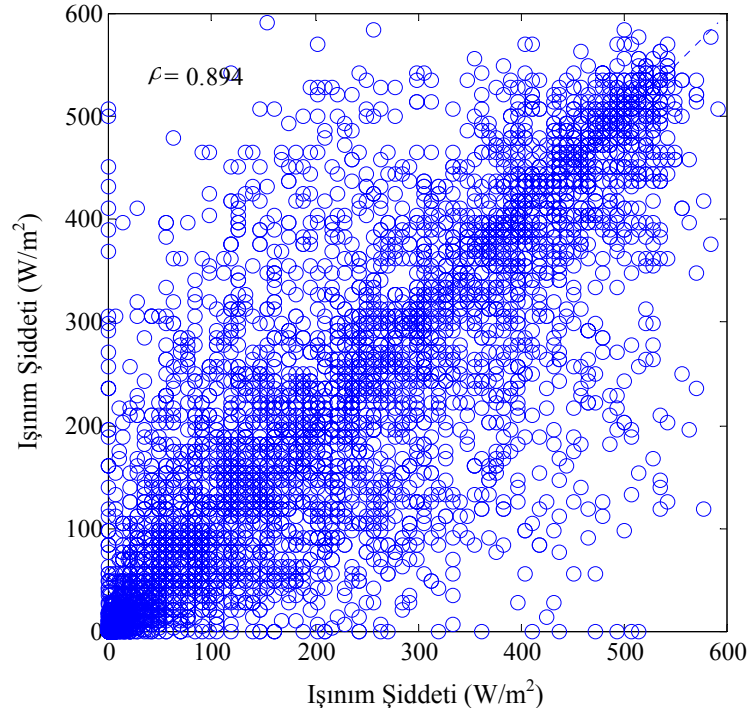
KOD	PİKSEL	$\rho$	$\rho^2$
K-1	$x_{44} - x_{34}$	0.911	0.830
K-2	$x_{44} - x_{24}$	0.894	0.799
K-3	$x_{44} - x_{14}$	0.894	0.806
K-4	$x_{44} - x_{43}$	0.938	0.879
K-5	$x_{44} - x_{42}$	0.807	0.651
K-6	$x_{44} - x_{41}$	0.630	0.397
K-7	$x_{44} - x_{33}$	0.870	0.760
K-8	$x_{44} - x_{22}$	0.740	0.548

Çizelge 3.1'de yer alan  $x_{ij}$  Şekil 3.3'te yer alan görüntünün  $(i, j)$ . pikseline (ışınım şiddetine) karşılık gelmektedir. Çizelge 3.1 ve Şekil 3.4 incelendiğinde aslında, herhangi bir günün herhangi bir saatindeki ışınım şiddetinin, ele alınan günün o anki saatinden 3 saat önceki ışınım şiddeti ile arasındaki korelasyonun (0.630) zayıf olduğu, diğer yandan herhangi bir günün herhangi bir saatindeki güneş ışınım şiddetinin, bu günden önceki gün aynı saatte ölçülmüş olan ışınım şiddetiyle arasında korelasyonun ise oldukça güçlü (0.911) olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, herhangi bir günün herhangi bir saatindeki güneş ışınım şiddetinin o günden bir gün ve bir saat

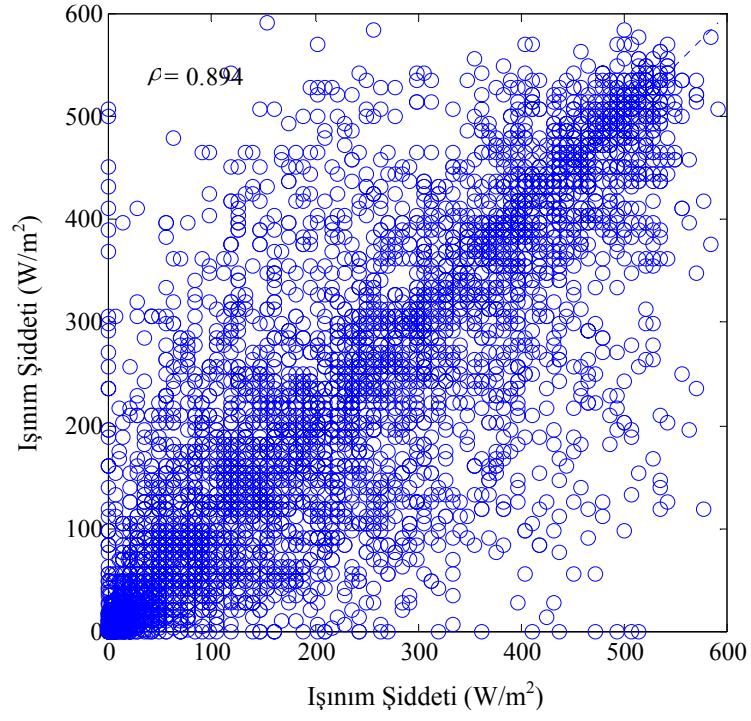
önceki güneş ışınım şiddetiyle de ilişkili (aralarındaki korelasyon katsayısı 0.870) olduğu açıkça görülmektedir.



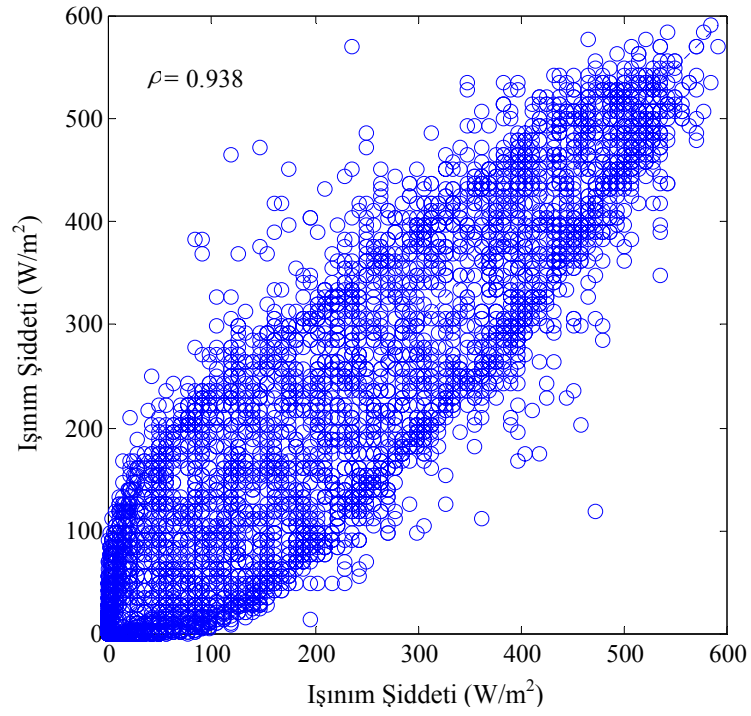
(a)



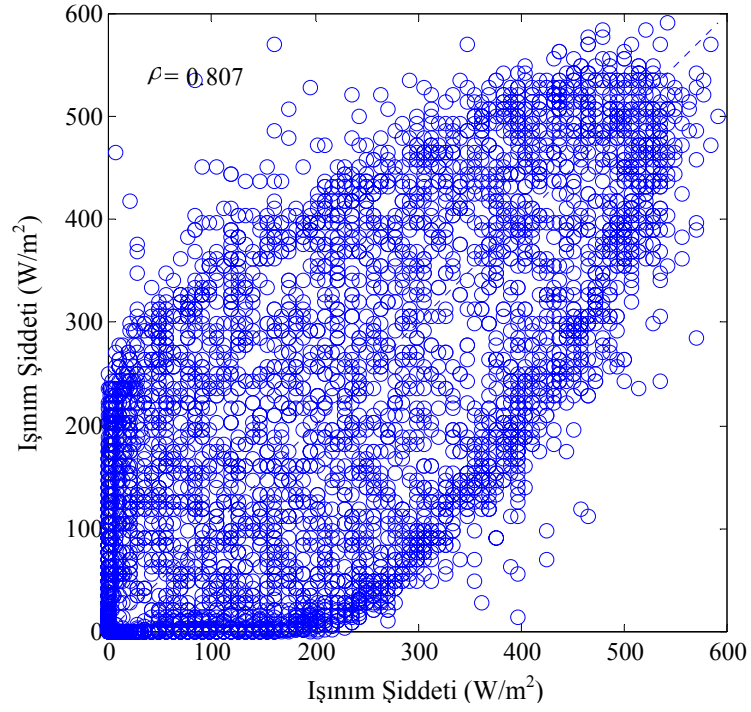
(b)



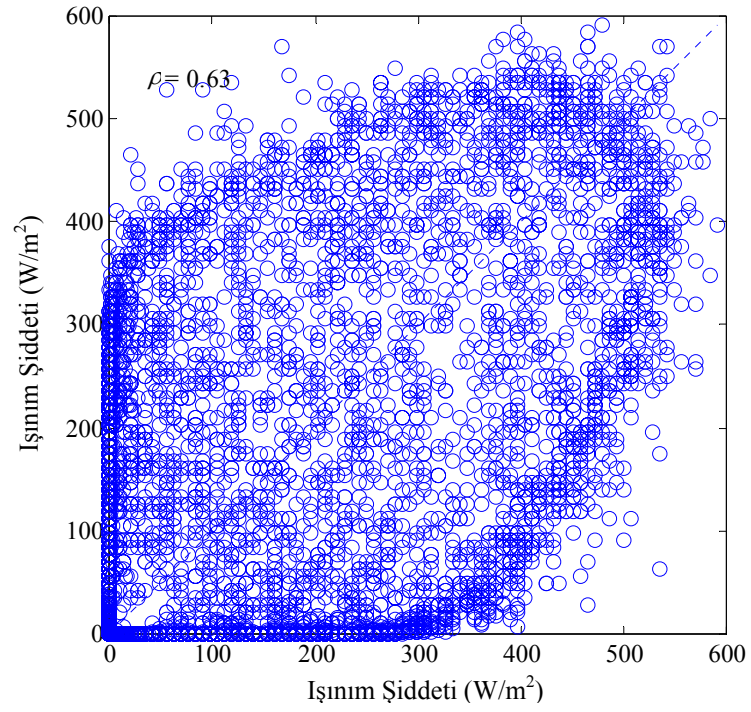
(c)



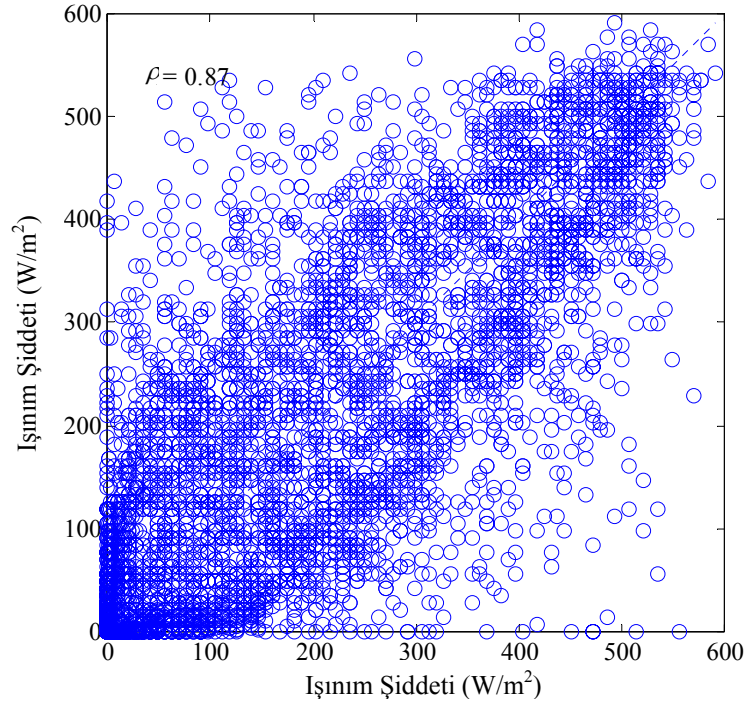
(d)



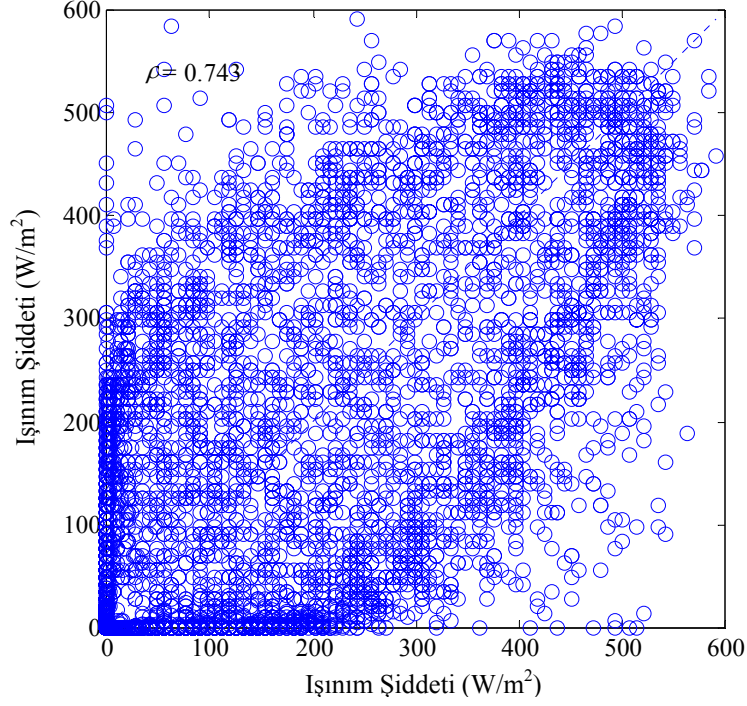
(e)



(f)



(g)



(h)

**Şekil 3. 4.** Saatlik ışı nım şiddetleri arasındaki korelasyonlar (a) K-1 (b) K-2 (c) K-3 (d) K-4 (e) K-5 (f) K-6 (g) K-7 (h) K-8

## 3.2. Güneş Işınım Şiddetlerinin 2-B Yaklaşımına Tahmini

Bölüm 3.1’de güneş ışınım şiddeti verilerinin tahmin edilmesi amacıyla kurulacak tahminleme modelinin girdilerinin neler olacağı veriler üzerinde geliştirilen görüntü yaklaşımıyla öngörülmüştü. Bu bölümde ise bu öngörünün doğruluğu görüntü işleme tekniklerinde sıklıkla kullanılan optimal katsayılı filtreler tasarlanarak denenmiştir. Tasarlanan filtrelerin optimal katsayıları hesaplanmıştır. Güneş verilerinin optimal katsayılı filtreler yardımıyla tahminlenmesi yeni bir yöntem olup ilk defa bu tez çalışmasında kullanılmıştır. Ayrıca, geliştirilen analiz yönteminin etkinliği veriler arasındaki doğrusal olmayan korelasyonları da dikkate alan ve birçok uygulamada başarılı tahminleme sonuçları veren ileri beslemeli ANNların kullanımıyla da gösterilmiştir.

### 3.2.1. Optimal Katsayılı Doğrusal Filtreler ile Tahmin

Görüntü kodlama literatürü incelendiğinde, 2-B matristen oluşan bir görüntünün doğrusal katsayılı filtreler kullanılarak verimli bir şekilde modellenebileceği görülebilir. Denklem (3.6)’da verilen üç katsayılı tahminleme filtre yapısı düşünülecek olursa lineer filtre katsayıları,  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  optimize edilir ve tahmin sonucu olan  $\hat{x}_{i+1,j+1}$  (3.7)’den bulunur ve bu durumda yapılan hata (3.8) ile elde edilebilir.

$x_{i,j}$	$x_{i,j+1}$
$x_{i+1,j}$	$\hat{x}_{i+1,j+1} = ?$

(3.6)

$$\hat{x}_{i+1,j+1} = x_{ij} \cdot a_1 + x_{i(j+1)} \cdot a_2 + x_{(i+1)j} \cdot a_3 \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{i+1,j+1} = \hat{x}_{i+1,j+1} - x_{i+1,j+1} \quad (3.8)$$

Denklem 3.6-8'de yer alan  $x_{i,j}$ ,  $x_{i,j+1}$  ve  $x_{i+1,j}$  sırasıyla görüntünün  $(i,j)$ ,  $(i,j+1)$  ve  $(i+1, j)$  piksellerine karşılık gelen değerlerdir. Burada aslında,  $i$  ve  $j$  güneş ışınım şiddeti tahmin modelinde sırasıyla gün ve saate karşılık gelen indislerdir. Bu nedenle  $x_{i,j}$ ,  $x_{i,j+1}$  ve  $x_{i+1,j}$  sırasıyla yılın  $i$ . gün,  $j$ . saatindeki,  $i$ . gün,  $(j+1)$ . saatindeki ve  $(i+1)$ . gün,  $j$ . saatindeki ışınım şiddeti değerine karşılık gelmektedir. Bu durumda  $\hat{x}_{i+1,j+1}$  ise yılın  $(i+1)$ . gün,  $(j+1)$ . saatindeki ışınım şiddetinin tahmini değerini ifade etmektedir (Görüntünün  $(i+1, j+1)$  pikselinin optimal katsayılı doğrusal filtre tarafından bulunan tahmini değeri).

Tüm resmin tahminlenmesi işlemi sonucu yapılan toplam hata ise (3.9)'dan hesaplanabilir.

$$\mathcal{E} = \sum_{i=2}^m \sum_{j=2}^n \mathcal{E}_{ij}^2 \quad (3.9)$$

Burada  $m$  ve  $n$  sırasıyla resmin genişliği ve uzunluğudur (güneş ışınımları verileri için bu değerler sırasıyla, 365 ve 24 tür). Bu hata fonksiyonunu minimize eden optimum filtre katsayıları (3.10)'un çözümü ile elde edilebilir.

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a_1} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a_2} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a_3} = 0 \quad (3.10)$$

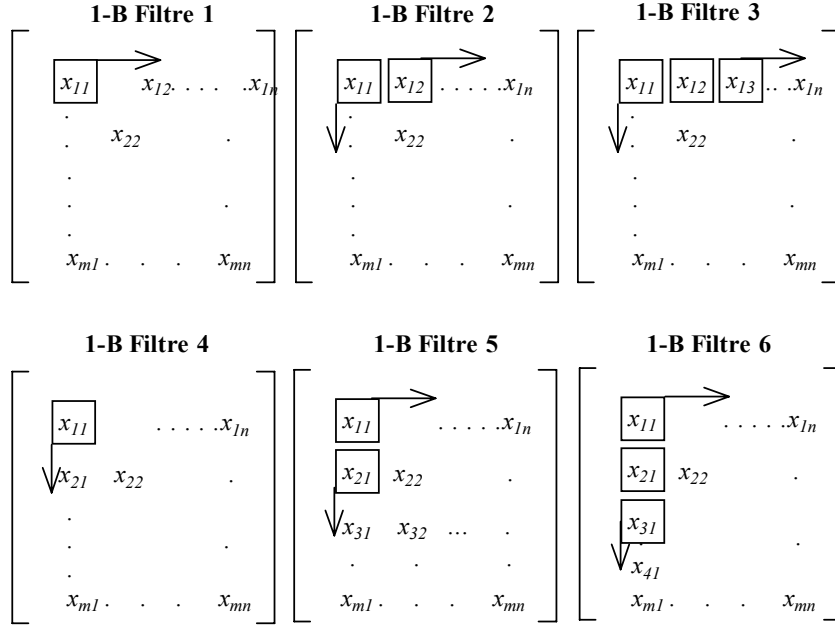
Denklem (3.10)'un çözümünden (3.11) ile ifade edilen matris-vektör eşitliği bulunur.

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

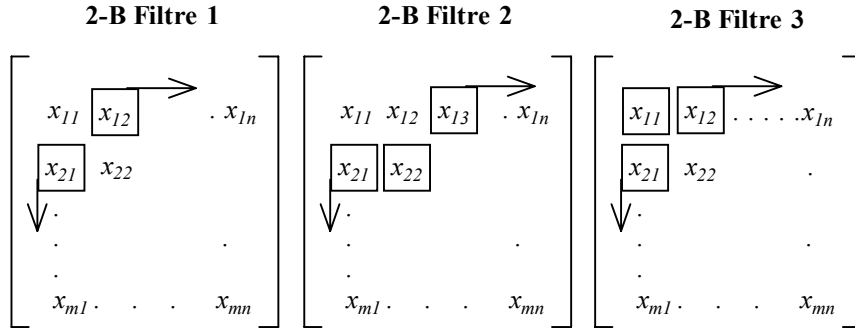
Sonuç olarak optimal filtre katsayıları;

$$[a] = [R^{-1}][r] \quad (3.12)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada,  $a_i$ ,  $i=1,2,3$  filtrenin optimal katsayılarını ifade etmektedir [75]. Güneş verilerinin anlatılan filtrelerle tahminlenmesi amacıyla ilk olarak, Şekil 3.5'te verilen 1-B doğrusal filtreler, daha sonra da Şekil 3.6'da verilen 2-B doğrusal optimal katsayılı filtreler tasarlanmıştır.



**Şekil 3. 5.** 1-B optimal katsayılı doğrusal filtre yapıları



**Şekil 3. 6.** 2-B optimal katsayılı doğrusal filtre yapıları

1-B filtreler, güneş verilerinin tek boyutlu vektör olarak ele alınıp tahminlenmesini temsil ederken 2-B filtreler, verilerin 2-B analizini temsil etmektedir. Tasarlanan filtrelere ilişkin optimal katsayılar bulunmuş ve bu katsayılar kullanılarak güneş ışınım şiddeti verileri tahmin edilmiştir. Tahminleme sonucu filtreler tarafından bulunan çıktılarla gerçek değerler arasındaki ilişki bulunmuş ve (3.13) ile verilen ortalama hata karekök kriterine göre filtrelerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Tahminleme sonucu bulunan değerler ile gerçek

değerler arasındaki korelasyon katsayıları ve RMSE değerleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (Rad(i, j) - \hat{Rad}(i, j))^2} \quad (3.13)$$

**Çizelge 3. 2.** RMSE değerleri ve korelasyon katsayıları

	RMSE	$\rho$
1-B Filtre 1	58.530	0.938
1-B Filtre 2	45.015	0.962
1-B Filtre 3	96.250	0.955
1-B Filtre 4	67.053	0.911
1-B Filtre 5	61.936	0.924
1-B Filtre 6	76.490	0.881
2-B Filtre 1	46.563	0.958
2-B Filtre 2	40.230	0.969
2-B Filtre 3	39.370	0.970

Çizelge 3.2 incelendiğinde, 2-B filtrelerin, 1-B filtrelere göre RMSE hata kriteri ele alındığında daha doğru sonuçlar verdiği açıktır. Bu sonuç, geliştirilen yaklaşımın daha etkin olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca, optimum katsayılı filtrelerin optimumu 2-B Filtre 3 olarak bulunmuştur. Geliştirilen yaklaşım ayrıca ANNlar ile de test edilmiştir.

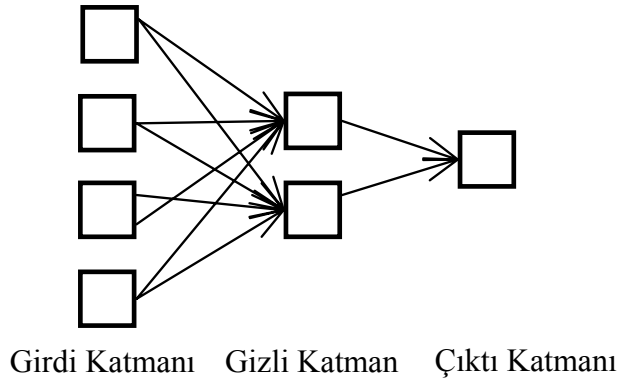
### 3.2.2. Yapay Sinir Ağları (ANN) ile Tahmin

ANN, beynin çalışma prensibinden yola çıkılarak gerçekleştirilmiş yapılardır. Bu yapılar, aralarında ağırlık vektörü diye bilinen bağlantılar bulunan yapay sinirlerden oluşmaktadır. ANN, yapay sinir hücrelerinin birbirleri ile çeşitli şekilde bağlanmasından ortaya çıkmakta ve katmanlar şeklinde düzenlenmektedir. Hücre çıkışları, ağırlıklar üzerinden diğer hücrelere ya da kendisine giriş olarak bağlanmakta ve bağlantılarda bias terimi olarak bilinen gecikme birimi de kullanılmaktadır.

Yapay sinirlerden oluşan birimlere katman adı verilir. Genellikle, bir yapay modelde girdi katmanı, çıktı katmanı ve gizli katman olarak bilinen 3 adet katman vardır. Bu katmanlardaki sinirlerin sayısı, çözülecek probleme göre değişebilir. Şekil

3.7’de bir yapay sinir ağının genel mimarisi görülmektedir. Giriş katmanı, giriş veri gruplarının ağa sunulduğu katmandır. Bu katmanda nöron sayısı, giriş veri sayısı kadardır ve her bir giriş nöronu bir veri alır. Burada veri, işlenmeden bir sonraki katman olan gizli katmana geçer. Gizli katman, ağın temel işlevini gören katmandır. Bu katman, giriş katmanından aldığı ağırlıklandırılmış veriyi probleme uygun bir fonksiyonla işleyerek bir sonraki katmana iletir. Bu katmanda gereğinden az nöron kullanılması, giriş verilerine göre daha az hassas çıkış elde edilmesine sebep olur. Benzer şekilde, gerektiğinden daha çok sayıda nöron kullanılması durumunda ise işlem karmaşıklığı artarak, yeni tip veri gruplarının işlenmesinde zorluklar ortaya çıkmasına neden olur. Kullanılacak nöron sayısı, genellikle deneme yanılma yoluyla probleme göre tespit edilir. Çıkış katmanı, ağın en son katmanıdır. Gizli katmandan gelen veriyi, ağın kullandığı aktivasyon fonksiyonuyla işleyerek çıktısını verir. Çıkış katmanındaki nöron sayısı, ağa sunulan her verinin çıkış sayısı kadardır. Bu katmandan elde edilen değerler, ANNun söz konusu problem için çıkış değerleridir.

ANN, girdi katmanına verilen girdiler ve ağın çıktıları arasında bir ilişkilendirme yapar. Sinir hücrelerinin aralarındaki bağlantılar ağırlık vektörleriyle gerçekleştirilir ve bu vektörler kullanılarak ağın çıktısı (3.14)’ten hesaplanır. [76].



**Şekil 3. 7.**      ANNun genel mimarisi

$$c_j = \sum_j g_i w_{ij} \quad (3.14)$$

Burada  $w_{ij}$ , i. düğümünden j. düğüme olan ağırlıklardır.  $c_j$ , j. düğümün çıkışı ve  $g_i$  ler de  $c_j$  düğümünün girişleridir. Denklem (3.14) ile önce, gizli katman çıktıları hesaplanır. Daha sonra, yine aynı denklem kullanılarak ağ çıkışı hesaplanır. Ağın

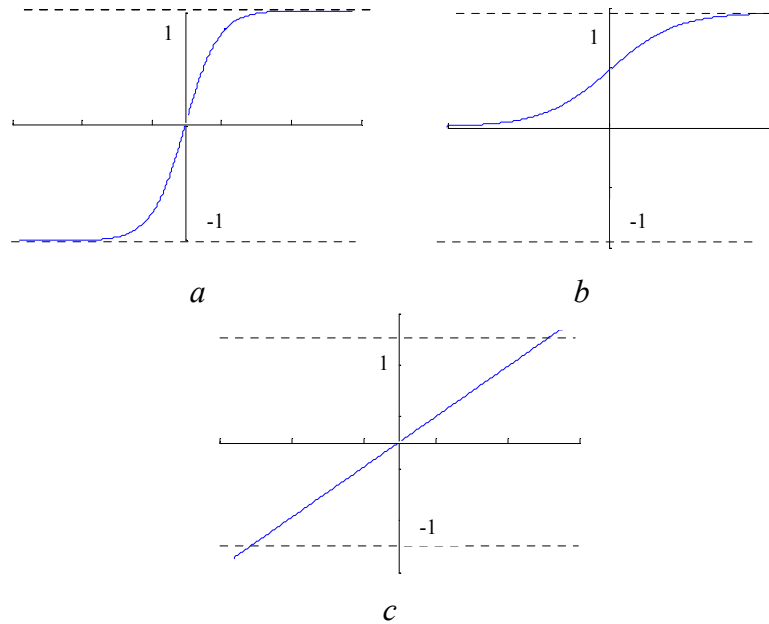
çıktısı gerçek verilerle kıyaslanır ve gerçek verilere çok yakın sonuçlar elde edilinceye kadar ağırlıklar güncellenir. Genellikle hata (3.15)'ten hesaplanır.

$$E = \frac{1}{2} \sum (y_i - d_i)^2 \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'e göre hata, gerçek veriler ile ağırlık çıktıları arasındaki farkın karesi olarak bilinir ve hatanın belli bir değerin altına düşürülmesi istenir. Bu hatanın düşürülmesi işlemine ağırlık eğitimi denir.

Genellikle sinir hücrelerinin aralarındaki bağlantılar olarak kabul edilen ağırlıkların değerleri eğitim süresince değiştirilir. Gizli katman ve çıktı birimlerinde bulunan sinir hücrelerinin her birinin çıkışında bir aktivasyon fonksiyonu bulunur. ANN'de sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonları Şekil 3.8'de verilmiştir. Burada oluşturulan ve güneş verilerinin tahmininde kullanılan ANN modelleri ileri beslemelidir. Ancak geri beslemeli ANNlar da vardır.

Karmaşık verilerin sınıflandırılmasında ve tahmininde kullanılan etkin ANN algoritmalarından en çok bilineni geri yayılım algoritmasıdır.



**Şekil 3. 8.** ANNlarda Sıklıkla Kullanılan Aktivasyon Fonksiyonları: a) Tan-Sigmoid, b)Log-Sigmoid, c) Doğrusal Aktivasyon fonksiyonu

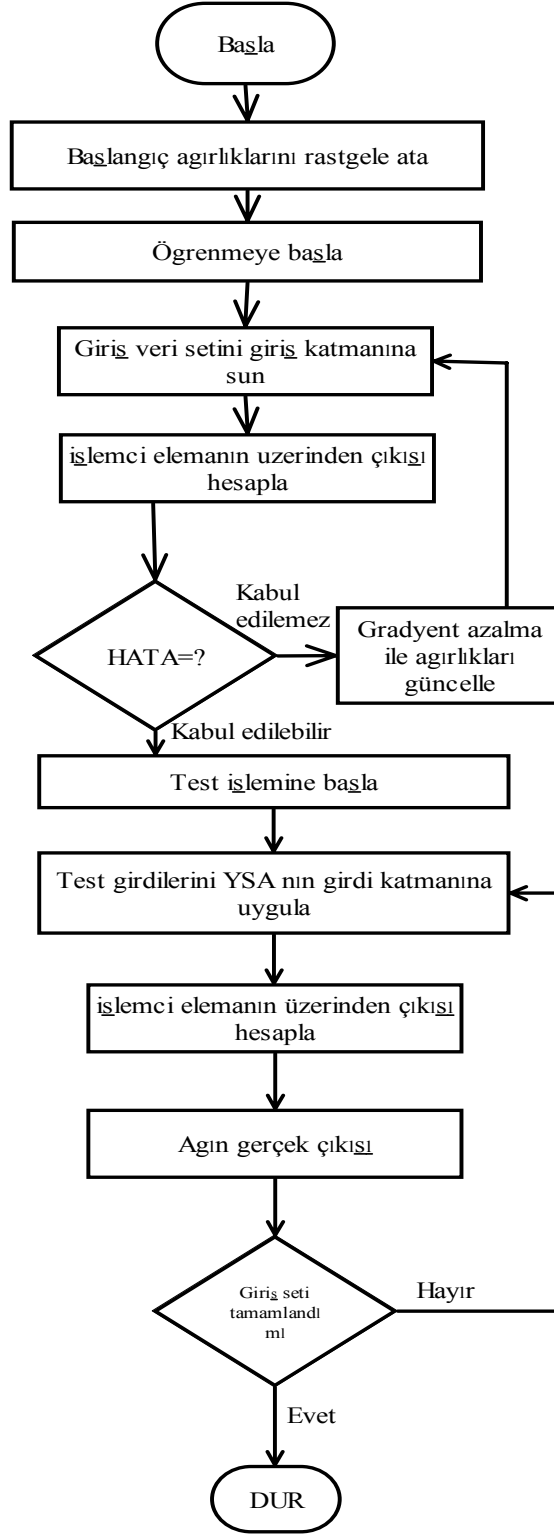
Yayımla ve adaptasyon olmak üzere iki aşamada işlemleri gerçekleştiren geri yayılım algoritması, katmanlar arasında tam bir bağlantının bulunduğu; Çok Katmanlı, İleri Beslemeli ve Denetimli olarak eğitilen bir ANN modelidir. Bu algoritma, hataları geriye doğru (çıkıştan girişe) azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır. Geri yayımlı öğrenme kuralı, ağ çıkışındaki mevcut hata düzeyine göre her bir tabakadaki ağırlıkların yeniden hesaplanmasını içermektedir.

Geriye yayılım ağında, bir katmandan bir başka katmana, aradaki katmanı atlayarak geçebilmek mümkün değildir. Bir giriş verisi, ağıdaki nöronların o anki değerleriyle çarpılarak ve kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından geçerek ağı çıkış katmanının sonucunu oluşturur. Bu işlemlerin sonucunda, ağ tarafından hesaplanan çıktı, her katmanın çıktısı ile karşılaştırılır. Hesaplanan ve olması gereken değerler arasındaki fark, her çıktı düğümü için bir hata sinyali olarak hesaplanır. Hesaplanan hata sinyalleri, her çıktı düğümüne karşı gelen ara katmandaki düğümlere aktarılır. Böylece ara katmandaki düğümlerin her biri, toplam hatanın sadece hesaplanan bir kısmını içerir. Bu süreç, her katmandaki düğümler toplam hatanın belirli bir kısmını içerecek şekilde giriş katmanına gelene kadar tekrarlanır. Elde edilen hata sinyalleri temel alınarak, bağlantı ağırlıkları her düğümde yeniden düzenlenir ve bu işleme ağı eğitimi de denilir. Bu düzenleme işlemi, toplam hata izin verilen değerden küçük oluncaya kadar devam ettirilir.

Yukarıda anlatıldığı gibi, ileri besleme safhasında, giriş tabakasındaki nöronlar, veri değerlerini doğrudan gizli katmana iletirler. Gizli katmandaki her bir nöron, kendi giriş değerlerini ağırlandırarak toplam değer hesaplanır ve bunları bir aktivasyon fonksiyonu ile işleyerek bir ileriki tabakaya veya doğrudan çıkış katmanına iletir. Katmanlar arasındaki ağırlıklar, başlangıçta rastgele küçük rakamlardan seçilir.

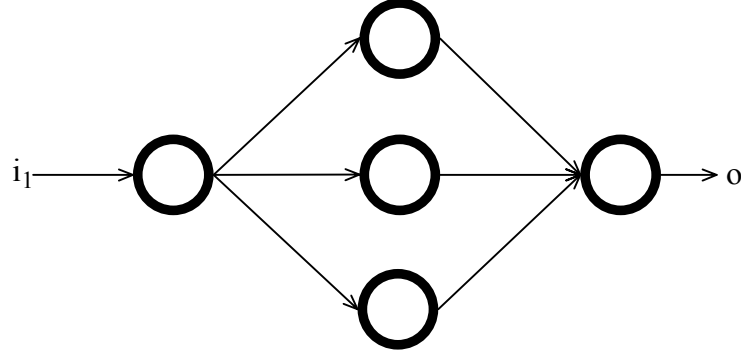
Çıkış katmanındaki her bir nöronun ağırlıklandırılmış değeri hesaplandıktan sonra, bu değer yine taşıma fonksiyonu ile karşılaştırılarak mevcut hata minimize edilmeye çalışılır. Hata değeri belli bir değere ininceye kadar iterasyon işlemine devam edilir ve böylece ağı eğitim aşaması tamamlanmış olur. Katmanlar arasındaki bağlantılardaki ağırlık değerleri, eğitimi tamamlamış ağdan alınarak deneme

safhasında kullanılmak üzere saklanır. Geriye yayılım algoritmasının blok şeması Şekil 3.9’da verilmiştir.

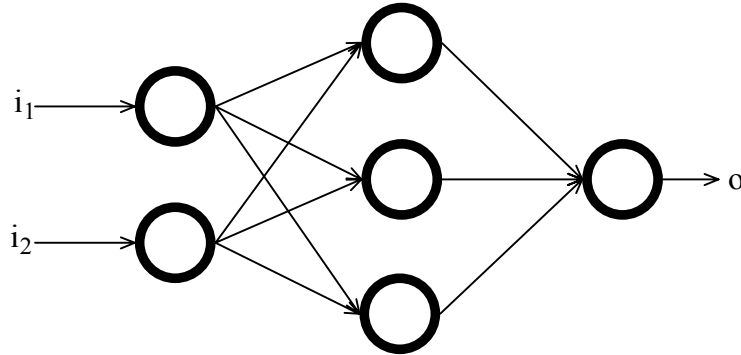


Şekil 3.9. Geriye yayılım algoritması

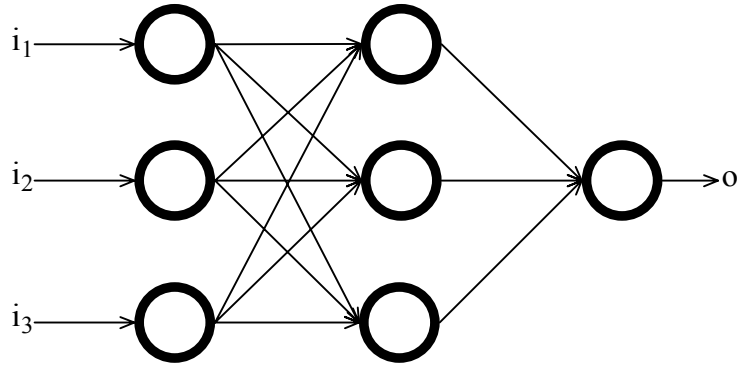
Önerilen 2-B analiz yönteminin 1-B'ye göre daha iyi sonuçlar verdiğini kanıtlamak için tasarlanan filtreler ile aynı çıkışlara sahip bir giriş-bir çıkışlı, iki giriş-bir çıkışlı ve üç giriş-bir çıkışlı üç tip sinir ağı yapısı tasarlanmış ve tasarlanan yapılar sırasıyla Şekil 3.10-11 ve 12'de verilmiştir.



Şekil 3. 10. Bir giriş-bir çıkışlı ANN yapısı

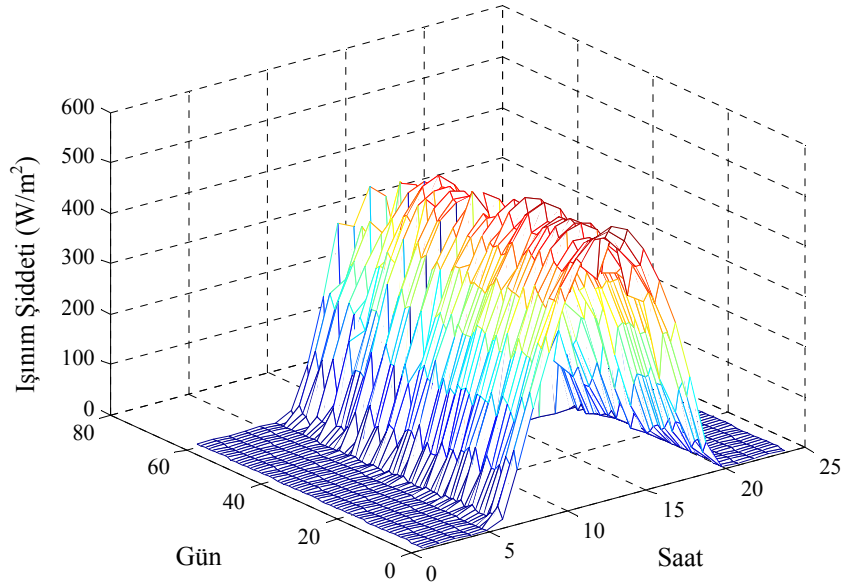


Şekil 3. 11. İki giriş-bir çıkışlı ANN yapısı



Şekil 3. 12. Üç giriş-bir çıkışlı ANN yapısı

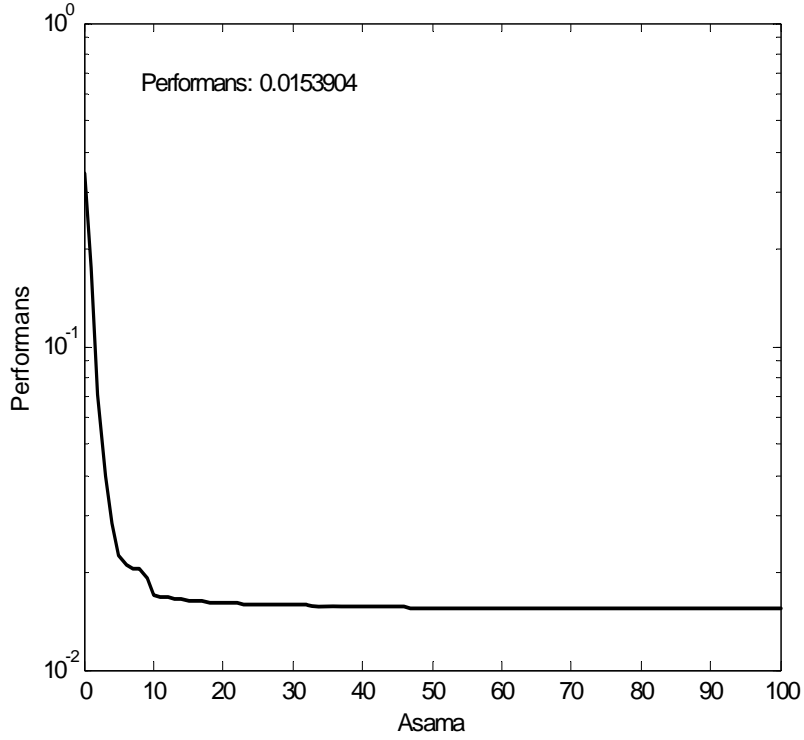
Şekil 3.10-11 ve 12’ deki  $i$ ’ler sistemin girdilerini,  $o$ ’lar ise çıktılarını göstermektedir. Oluşturulan bu yapılar kullanılarak girdileri ve çıktıları Bölüm 3.2.1’de anlatılan filtrelerin girdileri ve çıktıları ile aynı olan toplam 9 adet model oluşturulmuştur. Oluşturulan her bir yapı, Levenberg-Marquart modifikasyonlu geriye yayılım algoritması ile eğitilmiş ve tahmin değerleri elde edilmiştir [70]. Ayrıca, oluşturulan yapılardan elde edilen tahmin piksellerinin gerçek piksel değerlerine göre değişimleri çizdirilmiş, doğrusal regresyon analizi yapılmış ve bu değişimleri en iyi ifade eden doğru denklemleri bulunmuştur. ANNnin bulduğu tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki korelasyon katsayıları, filtrelerde olduğu gibi burada da hesaplanmıştır. Tüm ANN yapıları 10 aylık veri ile eğitilmiş ve geriye kalan iki aylık veri ile de test edilmiştir. Test için kullanılan veriler 2-B grafik üzerinde Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3. 13. ANNnin testi için kullanılan verilerin 3B düzlemde gösterimi

ANNnin eğitimi için 10 aylık güneş ışınım şiddeti verisi kullanılmış ve başlangıçta rastgele seçilen ağırlıkların her aşama sonunda RMSE kriterine göre güncellenmiş ve tüm yapıları standart bir biçimde değerlendirebilmek için ANN yapılarına sunulan tüm veri setlerine göre başlangıçta rastgele başlatılan algoritmalar 100 aşama eğitilmiştir. Hemen hemen tüm yapılar için öğrenmenin 10 aşama sonunda

gerçekleştiği gözlenmiştir. En iyi sonuç “2-D Filtre 2” için oluşturulan veri setini kullanan ANN modelinden elde edilmiştir. Bu model için eğitim süresindeki performans ölçütünün aşama sayısına göre değişimi Şekil 3.14’te verilmiştir.



**Şekil 3. 14.** 2-D Filtre 2 için performansın aşama sayısına göre değişimi

Şekil 3.14’te gösterilen performans değeri ANN yapısına sunulan verilerin ilk olarak 0-1 arasında normalize edilmiş olması nedeniyle oldukça küçük bir değerdedir. Verilerin denormalize edilerek gerçek değerlerinin elde edilmesi sağlandığında elde edilen performans değerleri ise Çizelge 3.3’te verilmiştir. Çizelge 3.3’te ayrıca, eğitim ve test verileri için tüm ANN modellerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplanan RMSE değerleri, gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki korelasyon katsayıları ve bu katsayıların kareleri hesaplanmıştır. Filtrelerin bulunduğu sonuçlarla da doğrudan kıyaslama yapılabilmesi için ANN modellerinden elde edilen sonuçlar tablo haline getirilmiş ve yine Çizelge 3.3’te sunulmuştur.

**Çizelge 3. 3.** Filtrelerden ve ANN modellerinden elde edilen tahmin değerlerine göre hesaplanan RMSE değerleri ve korelasyon katsayıları

	DOĞRUSAL FİLTRELER		YAPAY SİNİR AĞLARI			
	RMSE	$\rho$	Eğitim Verisi		Test Verisi	
	RMSE	$\rho$	RMSE	$\rho$	RMSE	$\rho$
1-B Filtre 1/NN1	58.53	0.94	58.80	0.93	62.64	0.94
1-B Filtre 2/NN2	45.02	0.96	41.86	0.97	39.79	0.98
1-B Filtre 3/NN3	96.25	0.96	44.70	0.96	43.73	0.97
1-B Filtre 4/NN4	67.05	0.91	69.30	0.90	74.32	0.91
1-B Filtre 5/NN5	61.94	0.92	63.95	0.92	67.63	0.92
1-B Filtre 6/NN6	76.49	0.88	60.83	0.93	63.64	0.93
2-B Filtre 1/NN7	46.56	0.96	45.58	0.96	47.98	0.96
2-B Filtre 2/NN8	40.23	0.97	35.42	0.98	34.57	0.98
2-B Filtre 3/NN9	39.37	0.97	42.15	0.97	43.15	0.97

Çizelge 3.3, 2-B görüntü üzerinden yapılan tahminlerin 1-B'ye göre daha iyi sonuçlar verdiğini açıkça göstermektedir. Şöyle ki; 2-B filtrelerden elde edilen tahmini değerler ile gerçek değerler arasındaki RMSE değerleri daha düşük, korelasyon değerleri ise daha yüksektir. Ayrıca ANN modellerinden elde edilen sonuçların, veriler arasındaki doğrusal olmayan korelasyonları da dikkate alması nedeniyle doğrusal filtrelerden daha iyi tahminleme yaptığı yine Çizelge 3.3'teki RMSE ve korelasyon değerlerinin karşılaştırılmasından anlaşılmaktadır.

### 3.3. Güneş Işınım Şiddeti Verilerinin 2-B Analitik Modellenmesi

Bölüm 3.1 ve 3.2'de 1-B zaman serisi olarak ele alınan güneş ışınım şiddeti verilerinin iki boyutta değerlendirilmesinin üstünlükleri incelenmişti. Bu bölümde ise, 2-B yaklaşım üzerinde analizler yapılmış ve veriler, bu tez çalışmasında geliştirilen analitik bir yaklaşımla matematiksel olarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, ele alınan verilerin enine ve boyuna kesitlerinin alınarak analizin yapılmasını kapsamaktadır.

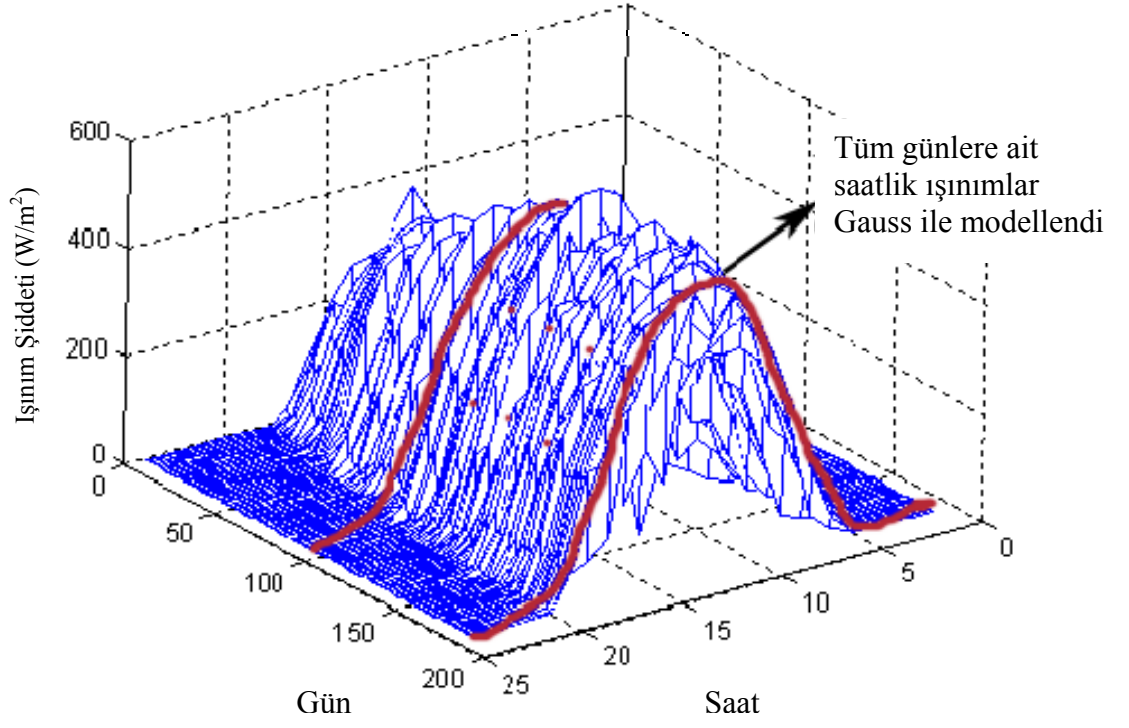
Verilerin matematiksel olarak modellenebilmesi, ihtiyaç duyan kişilerin kolaylıkla modele istedikleri gün ve saati girdi olarak vererek o gün ve saatteki güneş ışınım şiddeti verilerine ulaşmaları anlamına gelmektedir. Güneşin yıl içinde belli bir düzene göre hareket etmesi, ışınım şiddetlerinin genel davranışlarının yıldan yıla

değişmemesi anlamını taşımaktadır. Ancak, atmosferik olaylar, güneş ışınım şiddeti verilerinin davranışları üzerinde harmonikler oluşturmaktadır ve bu olayların rastsal olması, yıldan yıla verilerin genel davranış üzerindeki etkilerini değiştirmektedir. Bu durum ise verilerin farklılığını oluşturmaktadır. Ancak, verilerin genel davranışlarının modellenmesi, o bölgeye ait tüm yıllardaki veriler için de yaklaşık geçerli olacaktır. Ayrıca, geliştirilen analitik yaklaşımla bulunan matematiksel model, parametrelerinin uyarlanmasıyla kolaylıkla kutup bölgelerinin haricindeki herhangi bir bölgeye de uygulanabilir bir niteliktedir. Bu nedenle evrensel bir özellik taşımaktadır.

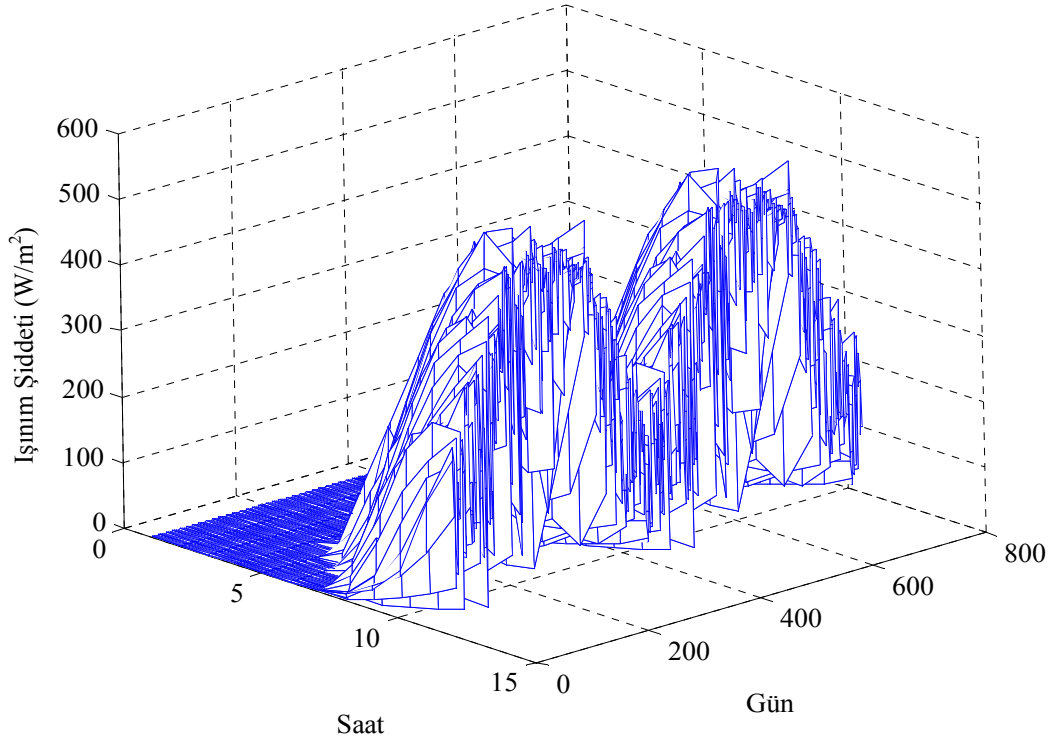
### **3.3.1. Yüzey Model Yapısı ve Parametrelerinin Tanımlanması**

Verilere uygun modelin belirlenmesinde en önemli aşama, verilerin karakteristiğine uygun basit matematiksel fonksiyonların seçimidir. Matematiksel model belirlendikten sonraki ikinci aşama ise modelin parametrelerinin tahmin edilmesidir. Burada Bölüm 3.2’de 1-B yaklaşıma göre üstünlükleri gösterilen 2-B yaklaşımından yola çıkılarak güneş ışınım şiddetleri analitik olarak modellenmiştir.

Bu çalışma, 3-B düzlemde Şekil 3.2’de verilen Eskişehir bölgesine ait 1 Ağustos 2005 - 30 Temmuz 2006 tarihleri arasında ölçülmüş ve Ocak-Aralık ayları arasında dağılacak şekilde sıralanmış olan 1 yıllık saatlik güneş ışınım şiddeti verileri üzerinde gösterilmiştir. Veriler ilk olarak Şekil 3.15 ve 3.16’te gösterildiği gibi enine ve boyuna kesitler alınarak incelenmiştir. Saat eksenini boyunca verilerin Gauss fonksiyona benzediği Şekil 3.15’ten görülmektedir. Gün eksenini boyunca davranışın daha açık gösterilmesi amacıyla yıllık veriler Şekil 3.16’da iki defa ardarda çizdirilerek gösterilmiştir. Şekil 3.16’nın incelenmesi sonucu verilerin yıllık davranışının sinüs fonksiyonuna benzediği düşünülmüştür.



Şekil 3. 15. Saat eksenı boyunca alınan kesit ve Gauss fonksiyonu modellemesinin gösterimi



Şekil 3. 16. Gün eksenı boyunca alınan kesit

### 3.3.2. Gauss Fonksiyonunun Parametrelerinin İncelenmesi ve Tahmini

Bir kaynaklı ve iki kaynaklı Gauss fonksiyonları sırasıyla (3.16) ve (3.17)'deki gibi ifade edilebilir:

$$g(x) = ae^{-(x-b)^2/c^2} \quad (3.16)$$

$$g(x) = a_1e^{-(x-b_1)^2/c_1^2} + a_2e^{-(x-b_2)^2/c_2^2} \quad (3.17)$$

Denklem (3.16)'da  $a$ , Gauss tepesinin uzunluğu,  $b$ , tepe noktasının merkezinin pozisyonu ve  $c^2$  ise varyansa karşılık gelmektedir. Denklem (3.17)'de ise iki Gauss fonksiyonunun toplamı ile elde edilen ifade gösterilmektedir. Her güne ait saatlik ışıma şiddeti verileri (3.16) ve (3.17) ile verilen Gauss fonksiyonlarıyla modellenmiş ve her gün için söz konusu parametrelerin tahmini değerleri elde edilmiştir. Böylece toplam 365 tane parametre kümesi bulunmuştur. Parametrelerin tahmini aşamasında Trust-region optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Denklem (3.16) ile yapılan modelleme sonucu bulunan parametre kümelerinden ilk 10 güne ait olanlar Çizelge 3.4'te örnek olarak verilmiştir [68].

**Çizelge 3. 4.** İlk 10 gün için Gauss parametreleri.

	a	b	c
G1	285.6000	12.9500	2.7280
G2	226.7000	13.4000	2.8410
G3	301.8000	12.9500	2.7710
G4	235.1000	12.1700	2.8930
G5	201.1000	14.5600	1.8690
G6	229.7000	12.7800	3.0010
G7	134.3000	13.2700	3.2470
G8	122.9000	12.9200	3.4460
G9	298.9000	12.1100	2.8850
G10	103.1000	12.3000	3.3970

Denklem (3.16) ve (3.17)'den elde edilen parametrelere göre gün içindeki saatlik değişimlerin modellenmesi sonucu, gerçek verilerle modeller tarafından bulunan veriler arasındaki korelasyonlar hesaplanmıştır. Denklem (3.17) ile yapılan

modellemenin yılın hemen hemen tüm günlerinde (3.16) ile yapılan modellemeden daha iyi sonuç verdiği saptanmıştır. Çizelge 3.5'te örnek olarak ilk on gün için (3.16) ve (3.17)'deki Gauss modellemelerinden hesaplanan korelasyon katsayısı değerleri verilmiştir.

**Çizelge 3. 5.** İlk 10 gün için hesaplanan korelasyon katsayıları.

	1kaynak Gauss	2kaynak Gauss
G1	0.9907	0.9981
G2	0.9820	0.9971
G3	0.9881	0.9986
G4	0.9596	0.9949
G5	0.9242	0.9974
G6	0.9136	0.9889
G7	0.9293	0.9907
G8	0.9561	0.9964
G9	0.9882	0.9899
G10	0.9155	0.9978

Her ne kadar tek gün için 2 kaynaklı Gauss modeli iyi sonuç veriyor olsa da, Bölüm 3.2.3'te de gösterildiği gibi, günler arasındaki osilasyonu sürekli bir yüzey şekli içinde sağlayan 2 kaynaklı Gauss modeli, hata kare ortalamalarının karekökü (RMSE) değerlerine göre tek kaynaklı Gauss'a nazaran daha kötü sonuç vermektedir.

### 3.2.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçlar

Gauss fonksiyonlarının tepe yüksekliği ve varyans değeri ile ilgili parametrelerin yıl içinde gün eksenini boyunca değişimi, sinüs fonksiyonu ile modellenmiştir. Modelleme sonucunda elde edilen yüzeylerin denklemleri (3.18)-(3.25)'te verildiği gibi bulunmuştur.

1 kaynaklı Gauss yüzeyi için:

$$a(\text{gün}) = 364 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times \text{gün}}{720}\right) + 162.1 \quad (3.18)$$

$$c(\text{gün}) = 2.117 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times \text{gün}}{712}\right) + 2.644 \quad (3.19)$$

$$Yüzey1(gün, saat) = a(gün) \times e^{-\frac{(saat-12.5)}{c(gün)}} \quad (3.20)$$

2 kaynaklı Gauss yüzeyi için:

$$a_1(gün) = 276 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times gün}{720}\right) + 122.9 \quad (3.21)$$

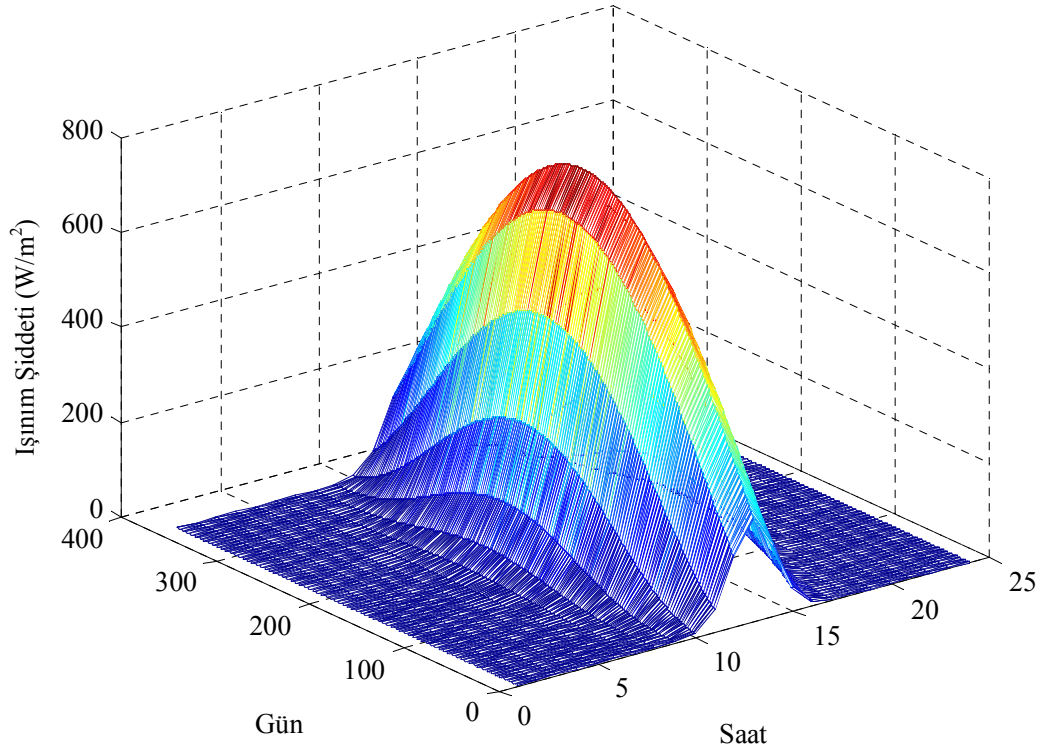
$$c_1(gün) = 1.234 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times gün}{720}\right) + 1.715 \quad (3.22)$$

$$a_2(gün) = 302.5 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times gün}{720}\right) + 85.9 \quad (3.23)$$

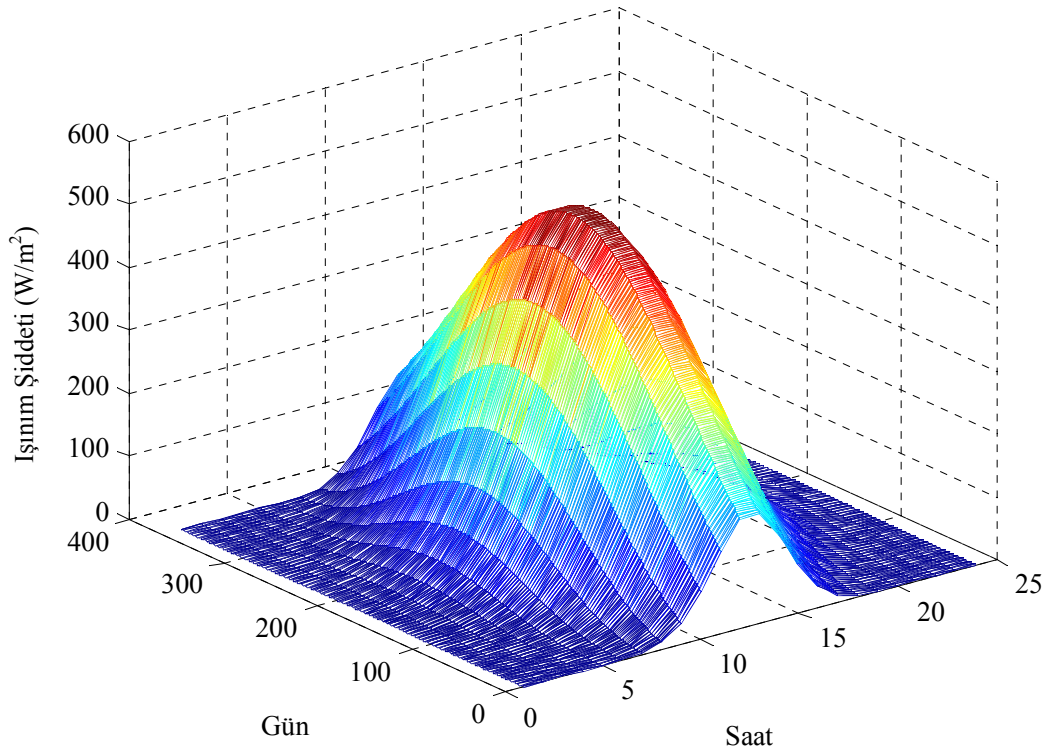
$$c_2(gün) = 1.537 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times gün}{720}\right) + 1.465 \quad (3.24)$$

$$Yüzey2(gün, saat) = a_1(gün) \times e^{-\frac{(saat-12.5)}{c_1(gün)}} + a_2(gün) \times e^{-\frac{(saat-12.5)}{c_2(gün)}} \quad (3.25)$$

2 kaynaklı Gauss modelinden elde edilen yüzey ve 1 kaynaklı Gauss modelinden elde edilen yüzey sırasıyla Şekil 3.17 ve 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3. 17. 2-kaynak Gauss modelinden elde edilen yüzey.



**Şekil 3. 18.** 1-kaynak Gauss modelinden elde edilen yüzey

Sinüzoid yüzey denklemlerinde bulunan sabitler, Gauss fonksiyonlarının tepe uzunlukları ve tepe uzunluğunun yarısındaki genişliklere karşılık gelmektedir. İki yüzey arasındaki RMSE değeri hesaplatılmıştır. Gerçek veriler ile modellerden elde edilmiş veriler arasındaki RMSE değerleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Yüzeylerin RMSE kriterine göre karşılaştırılması

	1-kaynak Gauss	2-kaynak Gauss
RMSE	57.20	105.25

Çizelge 3.6’dan da anlaşılacağı üzere 2-kaynak Gauss yüzey modeli verilerin gün eksenindeki yıllık davranışlarını iyi modelleyememektedir. Buradan, 1-kaynak Gauss modelinin veriler için daha uygun olduğu sonucuna varılabilir.

### 3.4. Dünya Dışındaki Işınım Şiddetlerini Kullanan 2-B Işınım Şiddeti Modellemesi

Güneş ışınım şiddetlerinin modellemesi, enerji sistem tasarımı, meteorolojik tahmin ve mimari dizayn çalışmaları gibi pek çok çalışma alanı için önemlidir. Dünyanın atmosferinde var olan ışınım şiddeti dünya ve güneşin hareketlerine bağlıdır. Güneş geometrisi adı altında yapılmış çalışmalarla atmosferdeki ışınım şiddeti verileri bölgesel olarak çıkarılmış analitik ifadelerle hesaplanabilmektedir. Dünya dışındaki güneş ışınım şiddeti verileri (3.26)'dan kolaylıkla hesaplanabilir [77].

$$I = C \sin(\varphi) / 24R^2 \quad (3.26)$$

Burada,  $I$  atmosferin dışındaki ışınım şiddeti,  $C$  güneş sabiti (bu çalışmada  $1367\text{W/m}^2$  kabul edilmiştir),  $R$  güneşin yarıçap vektörü (bu çalışmada 1 olarak alınmıştır),  $\sin(\varphi)$  ise güneşin yükseklik açısını ifade etmektedir. Yükseklik açısı (3.27)'den hesaplanabilir.

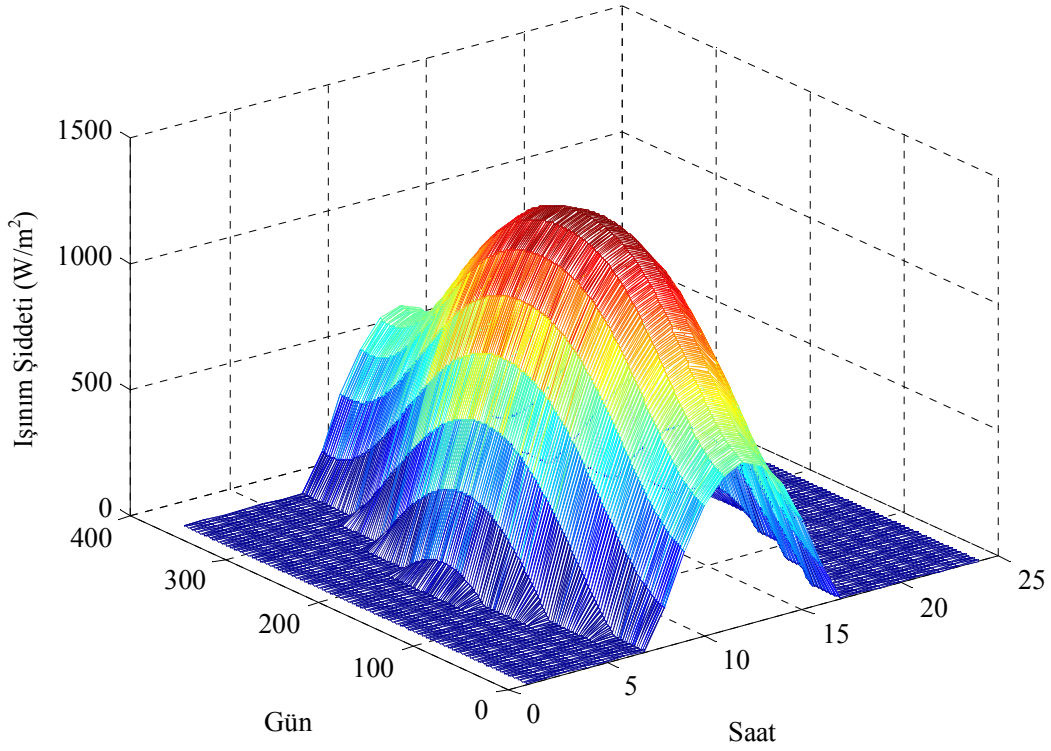
$$\sin(\varphi) = \sin(L)\sin(D) + \cos(L)\cos(D)\cos(h) \quad (3.27)$$

Denklem (3.27)'de  $L$  bölgenin enlemini,  $D$  güneşin eğimini,  $h$  güneş saat açısını göstermektedir. Güneş saat açısı (3.28)'den hesaplanabilir.

$$h = 15(h_c - 12) \quad (3.28)$$

Denklem (3.29)'daki  $h_c$  anlık saati ifade etmektedir.

Dünya dışından gelen ışınım şiddeti verilerinin yıllık değişimleri de geliştirilen 2-B yaklaşımla kolayca Şekil 3.19'daki gibi gösterilebilir.

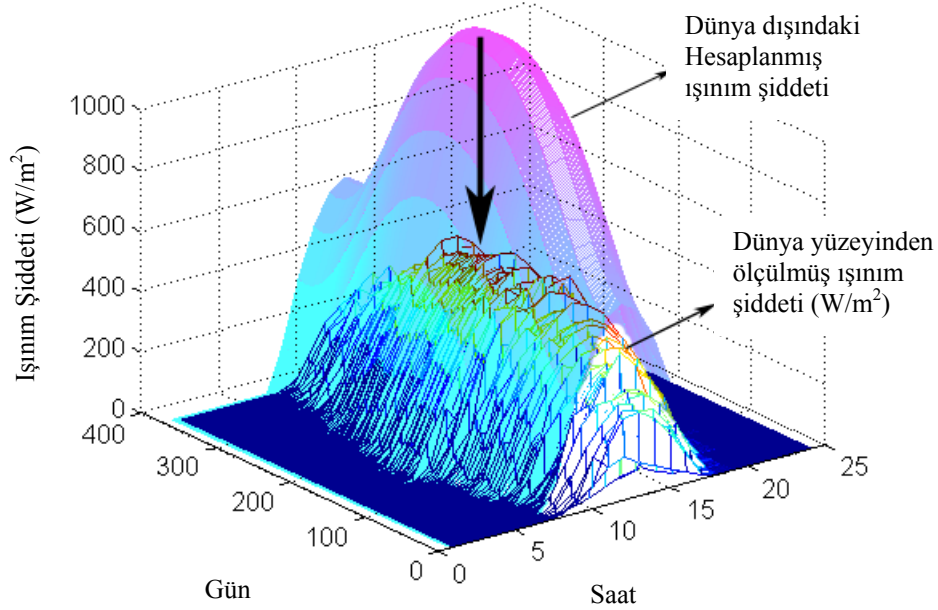


**Şekil 3.19** Eskişehir bölgesi için dünya dışındaki ışınım şiddeti verilerinin 3B çizimi

Herhangi bir bölgede yüzeydeki ışınım şiddeti verileri atmosferik olaylar, dünya yüzeyinden yansımalar gibi faktörlerden dolayı Şekil 3.19'dan farklıdır. Ancak genel karakteristik, Şekil 3.19'a benzemektedir. Bu nedenle atmosferdeki (dünya dışındaki) ışınım şiddeti verilerinin oluşturduğu yüzey gerçek ışınım şiddeti verilerinin oluşturduğu yüzeye normalize edilebilir. Normalizasyon yapılarak bulunacak katsayı sayesinde (3.26)'da verilen formda analitik bir ifade elde edilebilir.

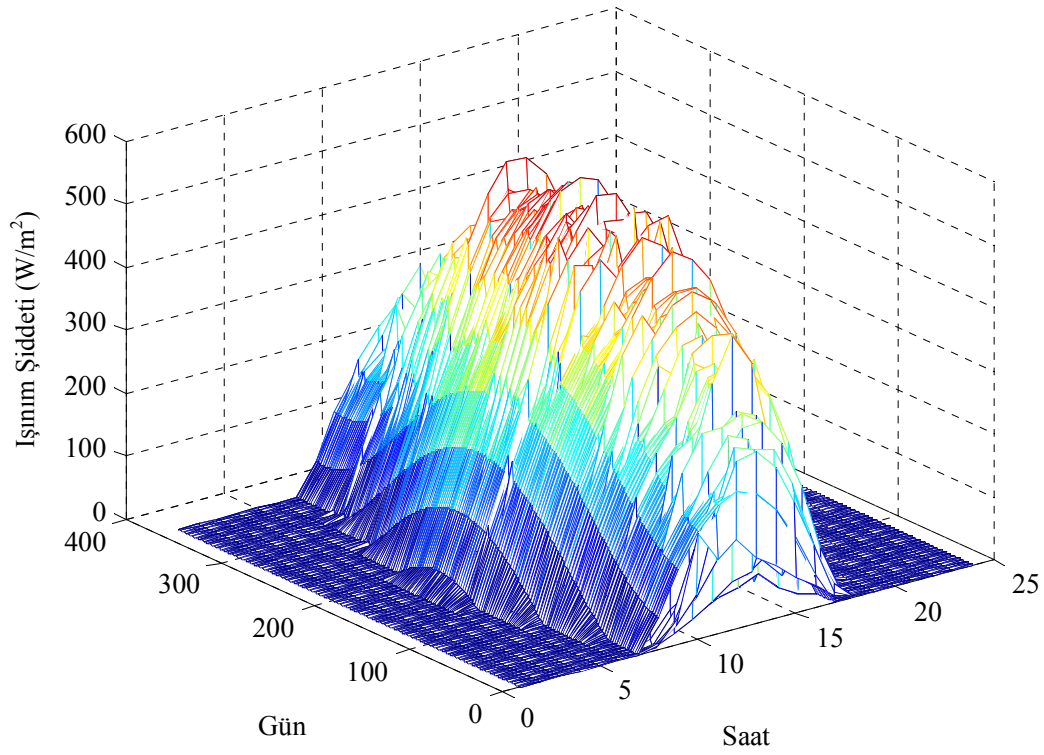
Bu çalışmada, dünya yüzeyindeki ışınım şiddeti verilerinin analitik ifadesini elde etmek için gereken normalizasyon sırasında basit iteratif bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma, normalizasyon katsayısının ilk değerini 1 almakta, her iterasyonda katsayı değerini 0.0001 kadar azaltarak yüzeydeki veriler ile normalize edilmiş atmosferdeki veriler arasındaki RMSE değerini hesaplamaktadır. Yüzeydeki veriler ile atmosferdeki veriler arasındaki RMSE minimum olana kadar iterasyon sürdürülmektedir. Sonuçta yüzeydeki verilere ait 2-B analitik bir yüzey elde

edilmektedir. Anlatılan algoritmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Eskişehir bölgesi için teorik olarak hesaplanan dünya dışındaki ışınım şiddeti değerleri ile bölgeden ölçülmüş ışınım şiddeti verileri Şekil 3.20’de aynı grafik üzerinde çizilerek gösterilmiştir.



**Şekil 3. 20.** Eskişehir bölgesi için dünya dışındaki 2-B ışınım şiddeti verilerinin gerçek verilere normalizasyonu

Güneş ışınım şiddeti verilerinin, yıl içerisindeki genel davranışları benzer olduğu için geliştirilen normalizasyon algoritması, kolaylıkla dünya üzerindeki herhangi bir bölgeye de uyarlanabilir niteliktedir. Şekil 3.21’de normalizasyon sonucu elde edilmiş olan 2-B yüzey ile Eskişehir bölgesinden ölçülmüş olan veriler aynı grafikte çizdirilmiştir. Şekil 3.21 incelendiğinde, atmosferdeki verilere ait normalize edilmiş yüzeyin, ölçülmüş verilerin genel karakteristiklerini yakaladığı ancak tepe noktalarda ölçülmüş verilerin model tarafından bulunan verilerin üzerinde kaldığı görülmektedir.



**Şekil 3. 21.** Eskişehir bölgesi için dünya dışındaki 2-B ışınım şiddeti verilerinin gerçek verilere normalizasyonu

Geliştirilen normalizasyon algoritması tarafından normalizasyon katsayısı 0.335 bulunurken, bu normalizasyon katsayısı kullanılarak hesaplanan normalize ışınım şiddeti verileri ile yüzeyden ölçülmüş veriler arasındaki RMSE değeri 69.92 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, normalize veriler ile yüzeyden ölçülen veriler arasındaki korelasyon katsayısı 0.9119 olarak hesaplanmıştır. Verilerin arasındaki bu yüksek korelasyon, geliştirilen yöntemin etkinliğini de göstermektedir. Ancak, bu bölümde geliştirilen yöntem, Bölüm 3.3'te geliştirilmiş olan yöntemden daha kötü modelleme sonucu vermiştir. Ayrıca, bu bölümde geliştirilen yöntem uzun dönem veri toplama gerektirmektedir. Bu nedenle hibrit sistemlerin boyutlandırılmasında ışınım şiddeti için, Bölüm 3.3'te geliştirilen analitik yöntemin kullanılmasının daha uygun olacağı söylenebilir.

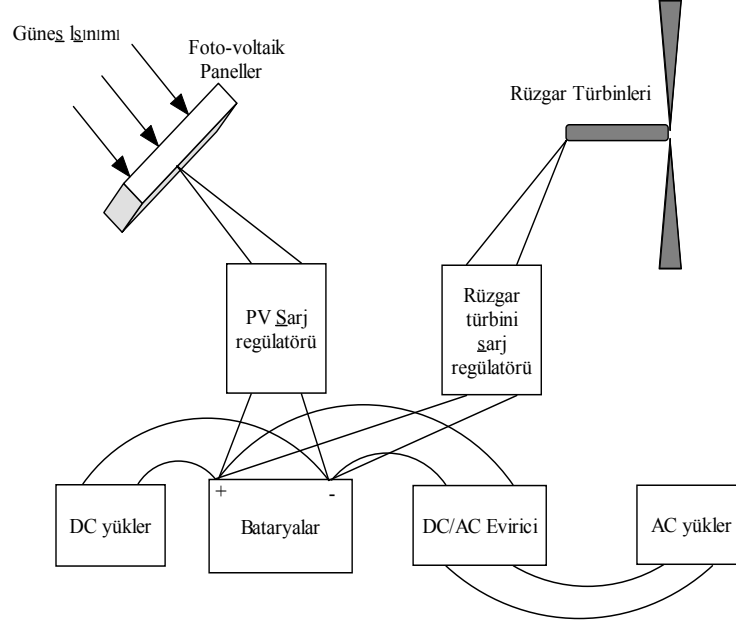
#### 4. HİBRİT (RÜZGAR-GÜNEŞ) ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN BOYUTLANDIRILMASI

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın giderek artması ve fosil kaynaklı yakıtların giderek tükenmesi, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından kullanımı en yaygın olanları rüzgar ve güneş enerjisidir. Ancak, bu enerji kaynakları sürekli olmadıkları için ayrı ayrı kullanılmaları durumunda güvenilir kaynaklar değildir. Diğer taraftan, bu kaynaklardan enerji üreten sistemlerin birlikte kullanımları halinde üretilen enerjinin güvenilirliği büyük ölçüde artmaktadır. Bu tür sistemlerden üretilen enerjinin birim maliyeti, günümüzde halen şebekeden üretilen enerji maliyetine nazaran oldukça pahalıdır. Bu nedenle, herhangi bir yöreye bu tür kanaklardan enerji üreten bir sistem tesis edilmeden önce, sistemin besleyeceği yükün gereksinimleri ile yörenin rüzgar ve güneş potansiyellerini dikkate alarak optimum sistem boyutları bulunmalıdır. Optimum sistem, yükün enerji ihtiyacını izin verilen enerjisiz kalma olasılığından daha küçük olasılıkla karşılayan (güvenilirlik şartı), minimum maliyetli sistem olarak tanımlanabilir.

Bu bölümde, hibrit (rüzgar-güneş) enerji üretim sistemlerinin boyutlandırılması konusunda yeni bir algoritma ve prosedür önerilmiştir. Bu konuda yapılmış olan çalışmalarda sistemin kurulması, planlanan bölgeye ait rüzgar hızı ve güneş ışınım şiddeti verileri kullanılmakta ve sistem boyutlandırılması yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında ise, rüzgar ve güneş verilerinin kendisi yerine verileri karakterize eden Bölüm 3'te anlatılmış olan modeller kullanılmaktadır. Ayrıca bu bölümde, optimizasyon algoritmasına sistemde bulunan bataryaların da boyutlandırılmasını hedefleyen yeni bir prosedür geliştirilmiştir. Geliştirilen prosedürde, algoritmanın çözüm uzayının taranmaya başlanacağı nokta tespit edilmektedir. Bataryaların zaman içinde değişen kapasitesinin tespiti için yeni bir matematiksel sistematik geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma, prosedür ve sistematik detaylarıyla anlatılmaktadır.

## 4.1. Hibrit Sistem Bileşenleri

Tipik bir hibrit sistemin blok şeması Şekil 4.1’de verilmiştir .



Şekil 4. 1. Tipik bir hibrit rüzgar-güneş enerji üretim sistemi bileşenleri

Şekil 4.1’den de görüleceği üzere bir hibrit enerji üretim sistemi genel olarak; Bataryalar, rüzgar türbinleri, foto-voltaik (PV) paneller, şarj regülatörleri, eviriciler ve AC/DC yüklerden oluşmaktadır. Sistemde bulunan Bataryalar sistemde üretilen enerjinin fazlasının depolanması amacıyla kullanılırken, şarj regülatörleri rüzgar ve güneşten üretilen enerjiyi dengelemek amacıyla, eviriciler ise sistemde üretilen enerjiyi AC yüklerin çalışması için Alternatif akıma çevirmek amacıyla kullanılmaktadır [52].

### 4.1.1 Hibrit Sistemde Bataryalar

Bataryalar, enerjiyi kimyasal olarak depolayan elemanlar olarak tanımlanabilirler. Herhangi bir enerji üretim sisteminden üretilen enerjinin sistemde üretildiği anda tüketilmeyen kısmını depolamaları, bu fazla üretimin daha sonra kullanılmasına olanak sağlar. Hibrit enerji üretim sistemlerinde en yaygın kullanılan batarya tipi, derin boşaltmaya izin veren kurşun-asit tipli bataryalardır. Bunların

dışında nikel-kadmiyum, nikel-demir, ve demir-hava gibi daha başka batarya türleri de vardır fakat, bu bataryalar pratik uygulamalar için güvenilir değildirler. Kurşun-asit tip bataryaların en büyük dezavantajları aşırı şarj ve deşarjlardan korunmalarının gerekmesi ve ayrıca uzun süreli düşük şarj seviyesinde tutulamamaları nedeniyle ilave regülatörlere ihtiyaç duymalarıdır. Genellikle hibrit sistemde kullanılacak olan rüzgar türbinleri ve güneş panellerini üreten firmalar bu regülatörleri de üretmektedir.

İşletme koşullarına göre kurşun-asit bataryaların ortalama ömrü 3 ile 15 yıl arasında değişmektedir. Ancak, performanslarının düşmesi nedeniyle genellikle 5 yılda bir değiştirilmeleri gerekir. Bu nedenle, ilk yatırım maliyetleri düşük olmasına rağmen bakım ve yenileme maliyetleri yüksektir. Bataryaların seri bağlanarak gerilimleri, paralel bağlanarak kapasiteleri arttırılabilir. Bataryalar, genelde 2V'luk hücreler dizisinin seri bağlanması ile elde edilir. Her bir hücre elektrolitin içerisine daldırılmış iki plakadan oluşur. Deşarj sırasında plakalar ile elektrolit arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon, yük üzerinden elektrik akımı geçmesini sağlar. Şarj sırasında ise bu kimyasal reaksiyon tersine çevrilir. Bataryanın plakalarının kalınlığı ne kadar fazla olursa bataryaya zarar vermeden yapılabilecek derin deşarj o kadar yüksek olabilir. Arabalarda kullanılan geleneksel bataryalar, kısa sürede yüksek akım çekilmesine izin verecek şekilde ince plakalardan yapılmışlardır. Bu tür bataryalar, %10-%20'den daha derin boşalmaya izin vermediğinden hibrit sistemlerde kullanılmaları uygun değildir. Derin boşalmaya izin veren sabit tesis bataryalarında plakalar daha kalındır ve kapasitelerinin %70 - %80'i kadar uzun sürede deşarj edilebilirler [53].

Batarya kapasiteleri Ah (Amper-Saat) veya nominal gerilimlerinin çarpımı sonucu elde edilen kWh (Kilowatt-Saat) olarak ifade edilir. Bataryaların saklama kapasiteleri genellikle plakalarında yazılıdır. Ancak, saklama kapasitesi aslında, yaşa, çalışma şekline ve işletme koşullarına da bağlıdır. Bu nedenle, bataryaların plakalarında yazan kapasite gerçek kapasitelerinden genellikle farklılık gösterir. Bataryalar, şarj edilen enerjiyi belirli bir süre saklayabilirler. Bir çok batarya üreticisi, bu sürenin minimum 20, maksimum 100 saat olduğunu belirtirler. Verilen bu süre içerisinde deşarj edildiğinde saklanan enerjinin %70- %80'i geriye alınabilir. Başka bir ifadeyle, bataryaların ortalama verimleri %70- %80 aralığındadır. Bataryaların

kullanım süreleri deşarj edilebilen enerjiye, plakaların ve elektrolitin yapısına bakılarak tespit edilebilir. Yaşlanan veya kötü kullanılan (sürekli aşırı şarj ve/veya deşarjlara maruz kalan) batarya plakaları sülfatlanır ve belirli bir süre sonra parçalar halinde elektrolitin içerisine dökülür. Bu parçalar, zamanla dipte birikerek kısa devrelere neden olabilir ve bataryanın şarj verimi giderek düşer. Hibrit sistemlerdeki bataryalar, saklama kapasitesinin nominal kapasitesinin %80'ine düştüğünde veya şarj veriminin %60'ın altına düştüğünde değiştirilmelidir [78].

Bataryaların kullanım sürelerini ve verimlerini etkileyen diğer bir etken de ortam sıcaklığıdır. Ortam sıcaklığındaki her 10 °C artış bataryanın kullanım süresini yarı yarıya azaltır. Diğer taraftan, negatif sıcaklıkta şarj verimi düşük olur. Kurşun-asit sabit tesis akülerinin 20 °C sıcaklıktaki kullanım süreleri 5 ile 10 yıl arasında değişir.

#### **4.1.2. Hibrit Sistemde Güneş Panelleri**

Foto-voltaik (PV) hücreler, güneş ışığını foton ışıması prensibiyle doğrudan doğru akıma dönüştürürler ve yeterli ışık olduğu sürece elektrik üretimine devam ederler. En büyük avantajları, işletme giderlerinin çok düşük, güvenilirliklerinin de çok yüksek olmasıdır. Günümüzde, birkaç WP gücünden 500WP gücüne kadar değişik ölçülerde güneş panelleri üretilip satılmaktadır. Güneş panellerinin en büyük dezavantajı ise, ilk yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek, verimlerinin düşük olmasıdır. Ancak kullanımlarının giderek yaygınlaşması ve teknolojideki gelişmelere paralel olarak verimlerinin yükseltilmesi nedeniyle yakın gelecekte maliyetlerin önemli ölçüde düşeceği öngörülebilir. Güneş pilleri, özellikle şebekeden uzak küçük ve orta ölçekli yüklerin beslenmesi için ekonomik bir seçenektir [60].

Güneş panelleri, birden fazla seri bağlanmış fotovoltaik hücrelerden oluşur. Panellerin güçleri standart test koşullarında elde edilen güce göre belirlenir. 25°C hücre sıcaklığı, 1 m/s rüzgar hızı ve 1000 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımı altında elde edilen çıkış gücü maksimum güç (WP) olarak adlandırılır. Güneş panelleri kendine özgü akım gerilim ilişkisine sahiptir ve bu ilişki IV (Akım-Gerilim) eğrileri ile gösterilir. Güneş paneli üreten firmalar, bu eğriyi etkileyen üç değişkenden rüzgar ve sıcaklığı

sabit tutarak ışıını ile değişimini, rüzgar ve ışıını sabit tutarak sıcaklık ile değişimini IV eğrilerinde gösterirler. Panelden maksimum gücün elde edilebilmesi için çalışma noktasının doğru seçilmesi gerekir. ışıınıın gün içerisinde değişmesi ile veya yükte oluşabilecek değişimlerden dolayı çalışma noktası değişebilir. Bu değişimlerin etkisini en aza indirmek için PV sistemlerde maksimum güç noktası izleyicisi (MPPT) kullanımı tercih edilebilir. MPPT aslında panel tarafından görülen empedansı ayarlayarak, IV eğrisi üzerindeki optimum çalışma noktasını belirler. Güneşin doğal olarak gün içerisinde değişmesi ve belirli saatlerde tamamen kaybolması PV enerji üretim sisteminin bağımsızlığını engeller. Mevsimlere göre de ışıını seviyesinin çok fazla değişmesi nedeniyle güneş panelleri, kendi başlarına tüm yıl boyunca güvenilir bir güç kaynağı olarak kullanılamaz. Bu nedenle, genellikle bataryalarla ve rüzgar türbinleri gibi ikinci bir yenilenebilir enerji kaynağı ile birlikte kullanılırlar. Batarya şarjı sırasında, yük de besleneceği ve mevsimsel değişimlerden sistemin olumsuz etkilenmemesi için PV panel adedinin artırılması gerekir. Sistem boyutunun büyütülmesi sistem maliyetini arttıracaktır [78].

Güneş panellerinden enerji üreten sistemler tesis edilmeden evvel sistemin kurulacağı yer seçilmelidir. Bu aşamada en önemli husus, kısmi veya tam gölgelemenin olmadığı yerlerin tespitidir. Güneş paneli sistemlerinin en büyük dezavantajlarından bir tanesi de kuruldukları yerde bulunan bitki örtüsünü güneşten mahrum kalmasına sebep olarak olumsuz yönde etkilemesidir. Bu nedenle bu tür sistemlerin bitki örtüsünün bulunmadığı kurak yerlere veya bina çatılarına kurulması daha doğrudur.

Güneş ışıınıının geliş açısının mevsimlere göre değişmesi, panellerden elde edecek verimi etkileyecektir. Panellerin kurulması sırasında mevsimlere göre ayarlanabilir yapılması gerekir. Güneş panelleri için bu ayarları, otomatik yapan kontrol ünitelerinin kullanılması verimi olumlu yönde etkileyecektir. Ancak, bu tür sistemlerin kullanımı, maliyeti arttıracaktır. PV paneller doğrudan DC yükleri besleyebilirler veya invertör kullanılarak AC yükleri beslemeleri sağlanabilir. PV paneller bataryaya doğrudan bağlanmaz, bataryaların ömrünü uzatmak için bir şarj regülatörü kullanılır. Bu sayede bataryalar aşırı şarjdan ve aşırı deşarjdan korunmuş olur.

### 4.1.3. Hibrit Sistemde Rüzgar Türbini

Rüzgar türbinleri, hareket halindeki havanın kinetik enerjisinin ilk olarak mekanik enerjiye dönüştürülmesi, daha sonra bu mekanik enerjinin, asenkron makine sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine göre çalışırlar. Rüzgar türbinlerinin bakım maliyetleri, PV panellere göre daha yüksektir. Ancak, her ne kadar sistemlerin kurulacakları yörelerdeki rüzgar ve güneş rejimi, maliyetleri doğrudan etkilese de genellikle rüzgar türbininden üretilen enerjinin birim maliyeti PV panelden üretilen enerjinin birim maliyetine nazaran daha düşüktür. Birden fazla farklı büyüklükte rüzgar türbini, üretilen enerjiyi arttırmak amacı ile paralel bağlanabilir. Rüzgar türbinlerinden üretilen enerji, rüzgar hızına bağlıdır. Bu nedenle türbinin tesis edileceği yerin, rüzgar hızının yüksek olması ve hava akışını engelleyecek yükseltilerin çevresinde yer almamasına dikkat edilmesi gereklidir [79].

Rüzgar hızı çok değişken olduğu için üretilen enerji de değişkendir. Eğer, rüzgar türbini yeteri kadar yükseğe kurulursa, rüzgar hızındaki değişim azalır ve daha yüksek rüzgar hızında enerji üretimi yapılabilir. Kanatlara çarpan hava akımı kanatların dönmesini ve dolayısıyla kanatların bağlı olduğu milin dönmesini sağlar. Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde mil doğrudan, büyük ölçeklilerde ise dişli kutusu yolu ile jeneratöre bağlanır. Jeneratör mekanik hareketi elektrik enerjisine dönüştürür. Düşük güçlü rüzgar türbinlerinde jeneratör olarak genellikle sabit mıknatıslı alternatörler kullanılırken, yüksek güçlülerde ise asenkron veya senkron jeneratör kullanılır.

Şebekeden bağımsız çalışan sistemlerde frekansı sabit tutmak, rüzgar hızındaki değişimlerden dolayı zor olduğundan jeneratör çıkışı genellikle DC' ye dönüştürülür. Bir çok rüzgar türbini, 3 veya 2 kanatlı olarak üretilir. 2 kanatlı rüzgar türbinleri, rüzgar hızı yüksek olan bölgeler için daha uygundur ve fiyatları daha ucuzdur. Daha düşük rüzgar hızı olan bölgelerde 3 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgar türbininden elde edilebilecek güç, rüzgar hızının küpüyle ve kanat süpürme alanı ile doğrudan orantılıdır [78].

Üretici firmalar, türbinin üretime başladığı rüzgar hızını, üretimi durdurduğu rüzgar hızını ve rüzgar hızı-güç eğrisini kullanıcılara verirler. Rüzgar türbinini

tanımlarken maksimum çıkış gücü veya optimum çıkış gücü gibi terimler kullanmak, rüzgar hızının sürekli değişken olması nedeniyle çoğu durumda anlamsızdır. Bu nedenle bu kavramlar yerine kanat çapının verilmesi daha uygun bir ölçü olacaktır. Rüzgar türbininin kurulacağı alanın yıllık ortalama rüzgar hızının yüksek olması gerekir. Rüzgar türbinin boyutu, besleyeceği yükün enerji talebine ve bölgenin rüzgar rejimine göre belirlenir. Gereğinden fazla boyutlandırma, rüzgar türbinin düşük rüzgar hızlarında bile kesime gitmesine neden olacaktır. Gereğinden daha küçük boyutta seçilmesi durumunda ise, çok yüksek rüzgar hızlarında ancak üretime başlayacaktır. Her iki durum da istenilmeyen durumlardır. Rüzgar türbinlerinde tüketimden fazla üretim, sistem geriliminin yükselmesine neden olur. Ortaya çıkan artık enerji, gerilim regülatörleri veya mekanik sistemlerle yok edilebilir. Genellikle bu tür sistemlerde, bu fazla gerilimler sisteme bağlı rezistanslar üzerine verilir. Mekanik sistemler, kanat açılarını değiştirerek kanatların daha az rüzgar enerjisine maruz kalmalarını sağlar. Mekanik sistemler daha çok büyük ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılırlarken, küçük tip rüzgar türbinlerinde gerilim regülatörleri kullanılır. Bu regülatörler, genellikle türbin gövdesi içerisine yerleştirilmiştir. Batarya şarjında kullanılacak türbinlerde aynı zamanda şarj regülatörü olarak da çalıştırılırlar. Rüzgar türbinleri de güneş panelleri gibi tek başlarına kullanıldıklarında çıkış güçleri rüzgar hızına bağlı olduğundan güvenilir bir güç kaynağı olarak kullanılamazlar. Ancak, batarya ve bir başka enerji kaynağı ile birlikte kullanıldığında daha düzenli çıkış veren bir güç kaynağı haline gelirler. Özellikle PV sistemle birleştirildiğinde üretilen enerjinin güvenilirliği önemli ölçüde artmaktadır [80].

#### **4.1.4. Hibrit Sistemde Eviriciler**

Hibrit sistemde bulunan AC yüklerin beslenmesi amacıyla invertör kullanılması gereklidir. Invertörler DC batarya veya jeneratör çıkışını 50 Hz AC gerilime dönüştüren güç elektroniği devreleridir. Küçük ölçekli yükleri beslemek için kurulan hibrit sistemlerde genellikle tek fazlı invertör kullanılır. Büyük ölçekli hibrit sistemlerde ise yükler 3 faz ile beslendiğinden 3 fazlı invertörler kullanılmaktadır. Şebekeden bağımsız çalışan enerji üretim sistemlerinde sinüs, kare ve merdiven sinüs

çıkış veren invertör çeşitleri kullanılmaktadır. Sinüs çıkış veren invertörler şebeke kalitesinde enerji sağlar.

Diğer yandan, kaliteli bir enerjiye gerek duyulmayan aydınlatma amaçlı uygulamalarda, kare dalga çıkışı veren invertörler kullanılır. Kare dalga çıkışlı invertörlerin maliyetleri, tam sinüs invertör maliyetine nazaran oldukça düşüktür. Merdiven basamaklı sinüs çıkışlı invertörler ise, hassas olmayan elektronik cihazların ve bazı motor içeren cihazların çalıştırılmasında kullanılır. İntertör çıkışındaki harmonik kirliliği bilgisayar, buzdolabı ve motor içeren cihazların düzensiz çalışmalarına neden olur. Bu tür cihazlar, tam sinüs çıkışlı invertör ile çalıştırılmalıdır. Özellikle, indüktif ve kapasitif yüklerin ilk çalıştırılma anında yüksek akım çekmeleri, bir çok invertörün korumaya geçmesine neden olmaktadır. Yeni üretilen invertörler nominal çıkış güçlerinin 6 katı çıkış gücünü kısa süreli verebilecek şekilde tasarlanmaktadır. İntertörlerin verimleri, düşük güçte çalışmada düşüktür; en iyi verim, nominal çıkış gücünün %80-%90'ında çalışmada elde edilir. İntertörler yüksüz çalışmada da belirli bir enerji tüketeceklerdir. Bu nedenle, yükün enerji talep etmediği durumlarda kapatılmaları sağlanmalıdır [78].

İntertörleri maksimum verimde kullanmak için, yüke göre invertör tasarlayarak, onları maksimum verimin elde edildiği çalışma noktasında çalıştırmak gerekir. İkinci bir yük için ikinci bir invertör tasarlanmalıdır. İntertörlerin bu şekilde paralel bağlanmalarında herhangi bir sakınca yoktur. Şebekeye bağlı çalışan invertörlerde frekansın, şebekeden alınan örnekle sabit kalması sağlanır. Şebekeye enerji satmak için tasarlanan invertörlerde, şebekenin reaktif gücünün de dikkate alınması gerekir. İntertör seçimi yapılırken sürekli yükün maksimum gücü dikkate alınır. Bir çok invertör, kısa süreli olarak nominal güçlerinin 6 katına kadar çıkış gücünü sağlayabilir.

#### **4.1.5. Hibrit Sistemde Yükler**

Günlük yaşamda kullanılan bir çok elektrikli cihaz 12 veya 24V DC veya 220/380 V AC gerilim ile çalışır. Hibrid sistemde kullanılan kaynakların hepsi DC çıkış veren türdendir. Özellikle bataryanın kullanıldığı sistemlerde sistem çıkışı DC

olacaktır. DC ile çalışan cihazlar özel üretim olduğu için genellikle pahalıdır, AC ile çalışan cihazlar diğerlerine göre daha ucuzdur ve kolaylıkla temin edilebilirler. DC'yi AC'ye dönüştüren inverter kullanmak da diğer bir çözüm yöntemidir. Hibrit sistemlerde özellikle rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin tüketilmesi için sisteme yük eklenmesi gerekir; aksi halde sistem gerilimi aşırı derecede yükselecektir. Sisteme eklenen yükler, elektrik enerjisini çoğunlukla ısı enerjisine dönüştürürler. Bazı sistemlerde sıcak su elde etmek için de kullanılır [78].

#### 4.2. Hibrit Sistemin Enerji Dengesi

Hibrit enerji üretim sistemlerinde sistemden beklenen, yükün enerjisiz kalma olasılığının minimize edilmesidir. Başka bir ifadeyle, güvenilirliklerinin maksimize edilmesidir. Bir hibrit enerji üretim sistemin  $\Delta t$  zaman aralığındaki enerji denge denklemi (4.1)'deki gibi yazılabilir.

$$W_L \leq W_{PV} + W_G + W_B \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de  $W_L$ , yükün tüketimini,  $W_{PV}$ , PV panellerin üretimini,  $W_G$ , rüzgar türbininin üretimini ve  $W_B$  ise bataryada depolanan veya bataryadan kullanılan enerjiyi göstermektedir. Denklem (4.1)'in istenilen zaman aralığında doğrulanması durumunda yük, enerjisiz kalmayacaktır ve sistem güvenirliliği maksimum (1) olacaktır.

Bir enerji üretim sisteminin güvenirliliği, herhangi bir zaman aralığında, yükün talepte bulunduğu enerjinin kesintisiz olarak sağlanabildiği süre ile ilişkilidir. Güvenirliliğin yüksek olması, sistemin beslediği yükün talebinin daha az kesintiyle karşılandığı anlamına gelmektedir. Özellikle, alternatif enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üreten sistemlerde, üretim ile tüketim zamanları arasında büyük farklılıklar vardır. Yeterli büyüklükte depolama elemanı seçilmediğinde, güvenirlilik büyük ölçüde azalacaktır. Güvenirliliği arttırmak için, depolama elemanın büyütülmesinin yanı sıra sisteme yardımcı dizel jeneratör gibi üçüncü bir enerji kaynağı da eklenebilir. Bu seçenekler, güvenirliliği arttırırken enerjinin maliyetini de yükseltmektedir. Boyutlandırma aşamasında, güvenirlilik ile maliyetin optimum noktada buluşturulması gerekir.

### 4.3. Kullanılan Enerji Modelleri

Bu çalışmada, hibrit sistemlerin boyutlandırılmasında, sistemdeki güneş panelleri ve rüzgar türbinlerinden üretilen enerjinin, sistemin kurulacağı bölgenin rüzgar ve güneş potansiyellerine göre hesaplanması gerekir [79]. Hesaplama konusunda çeşitli parametreleri kullanan birçok model vardır. Bu çalışmada, mevcut olan basit enerji modelleri kullanılmıştır.

#### 4.3.1. Güneş Panelleri İçin Kullanılan Enerji Modeli

Temel olarak sistemde bulunan güneş panellerinden üretilen güç denklem (4.2)'den hesaplanabilir,

$$P_{PV} = A_m \eta_m P_f \eta_{pc} I \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de  $A_m$ , PV modüllerin kapladığı toplam alanı,  $\eta_m$ , panellerin referans verimini (bu çalışmada 0.11 varsayılmıştır),  $P_f$ , paketleme faktörü (bu çalışmada 0.9 varsayılmıştır),  $\eta_{pc}$ , ise güç durum verimidir (bu çalışmada 0.86 varsayılmıştır), ve  $I$ ,  $Wm^{-2}$  olarak güneş ışınım şiddetini göstermektedir [80]. Denklem 4.2, istenilen zaman için sistemde bulunan PV modüllerden üretilen enerjinin hesaplanması amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışmada, benzetimler saatlik olarak gerçekleştirildiğinden, (4.2)'den hesaplanan güç değerleri aynı zamanda sistemden üretilen enerjiye de karşılık gelmektedir.

#### 4.3.2. Rüzgar Türbini İçin Kullanılan Matematiksel Model

Rüzgar türbinleri, farklı güç performans eğrilerine sahip oldukları için performanslarını tanımlamak için kullanılan modeller de farklıdır. Doğru modeli seçmek benzetimlerin doğruluğu açısından önemlidir. Rüzgar türbininden üretilen çıkış gücü basitçe (4.3) kullanılarak hesaplanabilir [80,81].

$$P_w = \begin{cases} P_r \frac{V - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_r & V_{ci} \leq V \leq V \\ 0 & V \leq V_{ci} \text{ ve } V \geq V_{co} \end{cases} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'te bulunan  $P_r(W)$ , türbinin anma gücü;  $V_{ci}$  (m/s), türbinin kesime girdiği hız;  $V_r$  (m/s), anlık rüzgar hızı ve  $V_{co}$  (m/s), kesimden çıktığı rüzgar hızını göstermektedir.

#### 4.4. Hibrit Sistemlerin Boyutlandırılması

Bir yenilenebilir enerji uygulamasında, bataryaların ömürleri ve kapasiteleri oldukça önemlidir. Doğru bir boyutlandırma için doğru bir batarya modeli kullanılmalıdır. İlerleyen bölümlerde bataryaların boyutlandırılmasıyla ilgili önceden yapılmış çalışmalarda geliştirilmiş mevcut yöntemler ve bu tez çalışmasında geliştirilen yöntem sunulmuştur.

##### 4.4.1. Hibrit Sistemlerin Boyutlandırılmasında Kullanılan Geleneksel Metod

Bataryaların herhangi bir  $t$  zamanındaki şarj durumları;  $(t-1)$  zamanındaki enerjilerine,  $t$  zamanında sistemde bulunan rüzgar türbinleri ve güneş panellerinden üretilen enerjilerin eklenmesi ve bu  $t$  zamanında sistemin yükü tarafından talep edilen enerjinin çıkarılması suretiyle tespit edilebilir. Bu durum (4.4) ile ifade edilmiştir.

$$SOC(t) = SOC(t-1) + (N_{wg} E_{Gw}(t) + N_{pv} E_{GP}(t) - E_{LD}) \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'te bulunan  $SOC(t)$  ve  $SOC(t-1)$  sırasıyla bataryaların  $t$  ve  $t-1$  anlarındaki şarj durumlarını göstermektedir. Denklem (4.4)'teki  $N_{wg}$ , sistemdeki rüzgar türbinlerinin sayısını,  $N_{pv}$ , sistemdeki foto-voltaik panellerin sayısını,  $E_{Gw}(t)$  ve  $E_{GP}(t)$ , sırasıyla  $t$  zamanında bir rüzgar türbininden ve bir güneş panelinden üretilen enerjiyi göstermektedir.  $E_{LD}(t)$  ise sistemdeki yüklerin  $t$  zamanındaki talebini göstermektedir.

Sistem çalışırken herhangi bir zaman diliminde aşağıdaki 3 durum meydana gelebilir:

1-) Türbinlerden ve panellerden üretilen toplam enerji, yükün talebinden daha büyük olabilir. Bu durumda, talepten geriye kalan enerji bataryaları şarj edecektir. Ancak bu durumda, (4.5)'te verilen enerji kısıtı sağlanmalıdır.

$$SOC(t) \leq SOC_{Max} \quad (4.5)$$

2-) Hibrit sistemden üretilen toplam enerji yükün talebine eşit olabilir. Bu durumda sistem dengededir. Yük enerjisiz kalmaz ancak aküler de şarj olmaz.

3-) Yükün talep ettiği enerji, sistem tarafından üretilen enerjiden daha büyük olabilir. Bu durumda, sistemden karşılanamayan enerji, bataryalardan talep edilir. Ancak bu durumda da bataryaların fiziksel özelliklerinden dolayı şarj durumu ile ilgili (4.6) kısıtı dikkate alınmalıdır.

$$SOC(t) \geq SOC_{Min} \quad (4.6)$$

Sistem optimize edilirken dikkate alınacak diğer bir kısıt ise, sistemin en fazla ne kadar enerjisiz kalmasına izin verileceğidir. Bu kavram, sistemin enerjisiz kalma olasılığı (LLP) ile tanımlanır. Sistemin enerjisiz kalma olasılığı (4.7)'den hesaplanabilir.

$$LLP = T_f / T \quad (4.7)$$

Denklem (4.7)'deki  $T_f$ , sistemin enerjisiz kaldığı toplam süreyi,  $T$  ise sistemin boyutlandırılmasında kullanılan toplam zaman aralığını ifade etmektedir [52].

#### 4.4.2. Hibrit Sistemlerin Boyutlandırılması İçin Geliştirilen Metod

Geleneksel optimizasyon algoritmalarında, bataryaların kapasitelerinin optimizasyonu üzerinde durulmamaktadır. Sadece yükü, sistemden hiç enerji üretilmediği varsayımında belli bir zaman besleyebilecek akü kapasitelerine göre benzetimler yapılmaktadır. Bu bölümde, geliştirilen yöntemle, hibrit sistemin çalışma noktalarına, bataryaların sayısı da dahil edilmekte ve sistem bir bütün olarak optimize edilmektedir. Optimizasyonun ilk aşamasında, geleneksel boyutlandırma algoritmalarında kullanılan  $SOC(t) \leq SOC_{Max}$  kısıtı ihmal edilerek, benzetimlerde kullanılan yükün talebini karşılayacak güneş panellerinin ve rüzgar türbinlerinin optimum sayısı ve bu sisteme karşılık gelen batarya kapasitesi tespit edilmektedir. Bu aşamada (4.8) dikkate alınmaktadır.

$$Q(N_{Pv}, N_{Wg}, N_{bat}) = F(N_{Pv}, N_{Wg}) \quad (4.8)$$

Burada  $N_{bat}$ , batarya kapasitesidir. Başka bir ifadeyle, batarya boyutudur.

Sınırsız batarya kapasitesi varsayımında algoritma tarafından bulunan optimum PV ve rüzgar turbini sayısı ve bulunan bu sistem için gereken akü kapasitesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

1-) PV'lerin herhangi sayısı için;  $N_{Pv}$  ve rüzgar türbinlerinin herhangi sayısı için;  $N_{Wg} \quad \forall_t \quad E_{Gw}(t) + E_{GP}(t) - E_{LD}(t)$  hesaplanmakta ve  $E_{Gw}(t) + E_{GP}(t) - E_{LD}(t)$  nin  $t$  (zaman) ile değişimleri incelenmektedir. Bu değişimleri içeren grafikler artakalan-talep edilen enerji karakteristikleri olarak adlandırılacaktır.

2-) Her  $t$  zamanı için (4.9)'daki toplamlar hesaplanmaktadır,

$$\sum_{t=1}^{\tau} (E_{Gw}(t) + E_{GP}(t) - E_{LD}(t)) \quad (4.9)$$

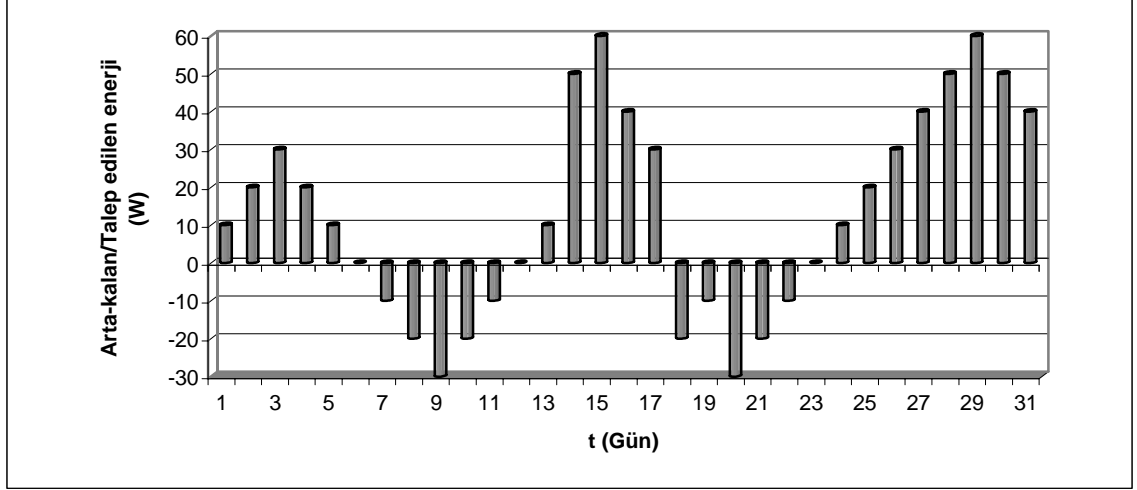
3-) Denklem (4.9)'u negatif yapan zaman dilimleri sayılmaktadır.

4-) 3. adımdan elde edilen zaman periyodu sayısı LLP yi hesaplamakta kullanılmaktadır. Geliştirilen yöntemle LLP (4.10)'dan hesaplanmaktadır;

$$LLP = \frac{\#(\sum_{t=1}^{\tau} (E_{Gw}(t) + E_{GP}(t) - E_{LD}(t))) < 0}{T} \quad (4.10)$$

Denklem (4.10)'daki  $T$  yıllık analiz için yıl içindeki saat sayısı olarak düşünülebilir (8760 saat). Algoritma iteratif olarak ilerler ve izin verilen LLP değerinin altındaki çözüm taranır. İzin verilen LLPden düşük değer elde edildiğinde bataryaların kapasitesi karakteristik eğri yaklaşımı ile hesaplanmaktadır. Daha açık bir ifadeyle, bu kısımda yapılan işlem şu şekilde özetlenebilir:

Algoritmaya istenilen LLP değeri önceden girilir. Algoritma, verilen yük karakteristiğini istenilen LLP kısıtından daha küçük LLP ile gerçekleştiren çözümleri hesaplar. Bu çözümler, aslında  $N_{Pv}$  ve  $N_{Wg}$  sayılarıdır. Daha sonra, bulunan çözümlerin maliyetlerini hesaplayarak, bu maliyetlerden en düşük maliyete sahip olan sistemi seçer. İkinci aşamada ise, bu sistemle beraber kullanılacak batarya kapasitesinin hesaplanması işlemine geçilir. Batarya kapasitesinin hesaplanmasında, arta kalan enerjilerin hiç israf edilmeden tamamının depolanabileceği varsayılmaktadır. Algoritmanın, optimum  $N_{Pv}$  ve  $N_{Wg}$  yi bulduktan sonra bu  $N_{Pv}$ ,  $N_{Wg}$  sayılarına göre sistemde kullanılması gereken batarya kapasitesini nasıl hesapladığı aşağıda verilen basit bir örnek üzerinde açıklanmıştır. Bir aylık günlük verinin analiz edilerek yukarıda anlatılan 4 adımın işletilmesi sonucunda Şekil 4.2'de verilen karakteristik eğrinin (Arta-kalan/ Talep edilen enerji eğrisi) elde edildiğini varsayalım. Bu örnek eğri, her gün için sistemdeki yükün talep ettiği enerjinin karşılanmasından sonra arta kalan enerjileri veya sistemden üretilen enerjinin, yükün talebini karşılayamadığı kısımları göstermektedir.



Şekil 4.2. Artakalan/Talep edilen enerjinin zamana göre değişimine bir örnek

Artakalan-talep edilen enerjii  $x[t]$  ile gösterecek olursak, algoritma, batarya kapasitesini (4.11) ve (4.12)'den hesaplamaktadır.

$$NUM = \arg \max_N \sum_{t=0}^N x[t] \geq 0 \quad (4.11)$$

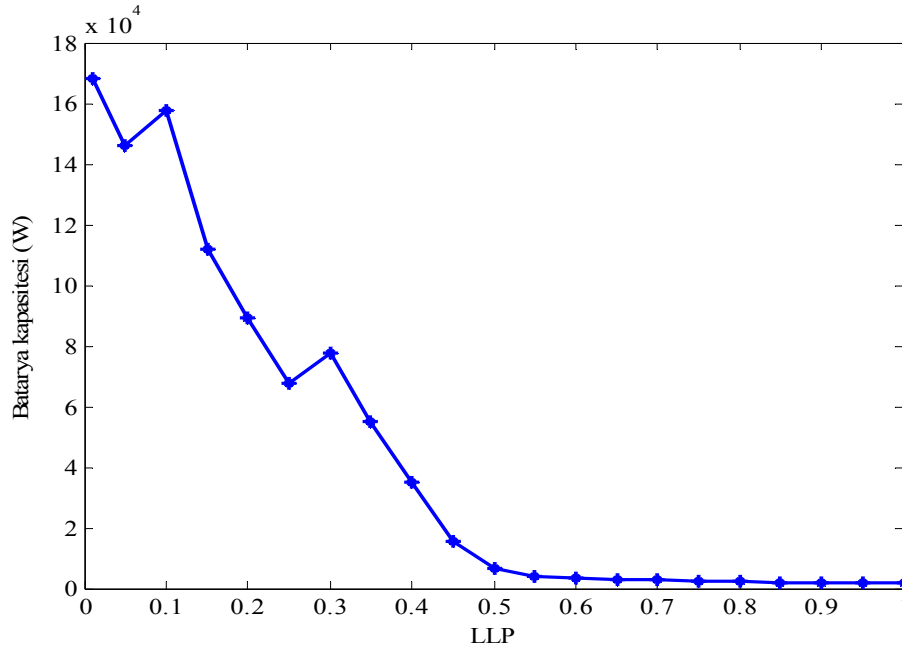
$$OC = \sum_{t=0}^N x[t] \quad (4.12)$$

Denklem (4.11) ve (4.12)'de,  $OC$  bataryaların optimum kapasitesi,  $N$ ,  $\sum_{t=0}^N x[t]$  nin sıfırdan büyük olduğu  $x[t]$  dizisinin uzunluğudur. Yukarıda verilen örnek için  $OC$  400W olarak (4.11) ve (4.12)'den hesaplanmıştır. Anlatılan prosedürle, aslında çözüm uzayının taranmaya başlanacağı nokta tespit edilmektedir.

Algoritma, üretilen enerjinin hiç israf edilmeden depolanması durumundaki kapasiteyi hesapladığı için küçük LLP değerlerinde çok büyük kapasiteler (Bu durum ekonomik olmadığı için istenilmeyen bir durumdur.) bulmaktadır. Ancak istenilen LLP'nin yukarıya kaydırılması (büyütülmesi) durumunda bulunacak minimum maliyetli çözümlerden artakalan-talep edilen enerji eğrisinin negatifte kalmasına daha

fazla izin verilmiş olacaktır. Bu durum ise, sonrasında hesaplanacak batarya kapasitesinin makul değerlerde bulunmasını sağlayacaktır.

Bu durumun gösterilmesi için, Eskişehir bölgesine ait yıllık rüzgar hızı ve güneş ışınım şiddeti verileri kullanılarak, yukarıda anlatılan algoritma farklı LLP ler için denenmiştir. Bunun sonucunda LLP'nin algoritma tarafından bulunan kapasiteye göre değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Burada yapılan benzetimde, yük 200W sabit olarak alınmıştır. Benzetimler, farklı yükler için de denenmiş benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Kapasitenin LLP ile değişimi

Algoritma, bu aşamadan sonra düşük LLP ler için optimum akü kapasitesinin de hesaplanabilmesi için geliştirilmiştir. Elde edilen bu kapasite, sistemde kullanılacak olan bataryaların özelliklerine göre batarya sayısına dönüştürülmüş ve sonraki aşamada algoritmanın başlayacağı maksimum kapasite olarak kullanılmıştır. Algoritma, bu kapasiteden başlayarak çözüm uzayını taramaktadır. Tarama işlemini yaparken bataryaların maliyetleri de dikkate alınmaktadır. Her iterasyonda bataryaların sayısı bir azaltılmakta ve çözüm uzayı tekrar taranmaktadır. Her tarama sonucunda, sistemi minimum maliyetle gerçekleyen çözümler bir sonraki bölümde anlatılacak maliyet hesabıyla tespit edilmekte ve bu çözümlere karşılık gelen batarya,

rüzgar türbini ve güneş panellerinin sayıları hesaplanmaktadır. Böylece bu üç bileşenin sayısı da optimize edilmektedir.

#### 4.5. Hibrit Sistemlerin Maliyet Analizi

Hibrit sistemlerin boyutlandırılmasında ilk aşama, sistemin yükünün enerji gereksinimini izin verilen LLP değerinden küçük olasılıkla sağlayabilen çözümlerin tespit edilmesidir. Bu aşama, Bölüm 4.4'te anlatılmıştır. Sonraki aşama ise, sistemi bu olasılıklardan küçük olasılıklarla karşılayan bu çözümlerin arasından maliyeti minimum olanının seçilmesidir. Hibrit sistemlerin maliyeti, temel olarak (4.13) ile ifade edilebilir.

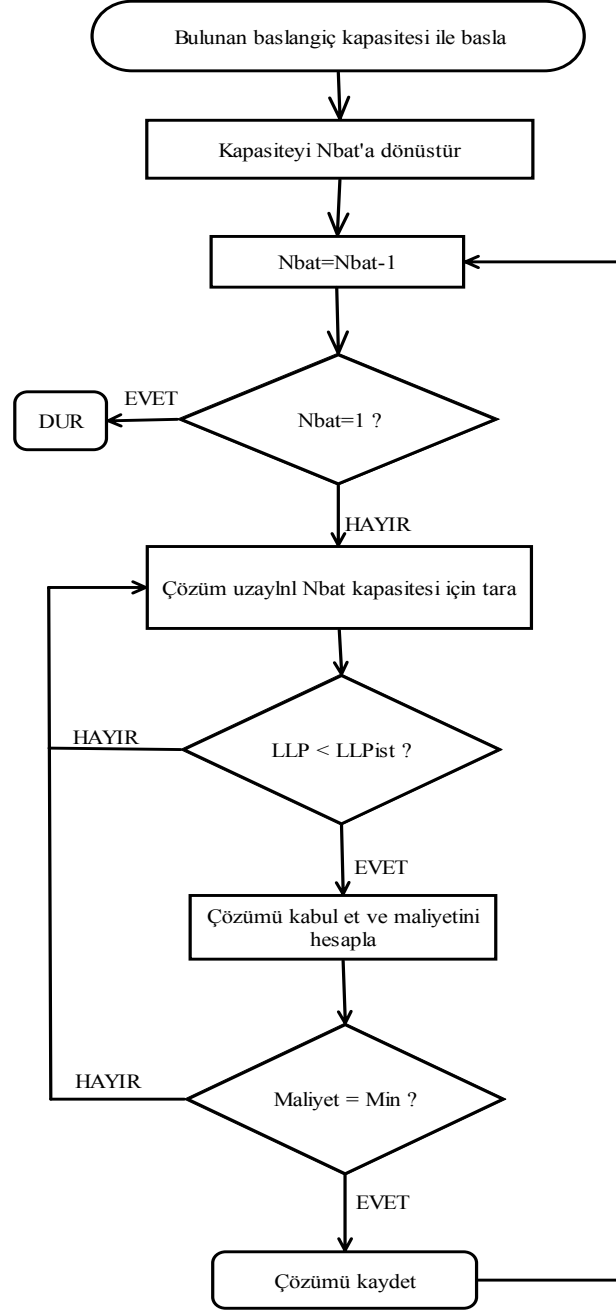
$$C_{toplam} = \sum_{i=1}^3 C_i = C_R + C_{Bat} = C_{Pv} + C_{Wg} + C_{Bat} \quad (4.13)$$

Denklem (4.13)'te  $C_R$ , sistemde bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetini ( $C_{Pv}$  fotovoltaik panellerin,  $C_{Wg}$  ise rüzgar türbinlerinin maliyetleri),  $C_{Bat}$  ise bataryaların maliyetlerini göstermektedir. Maliyete, sistem kullanımında olduğu süre boyunca yapılacak bakım, onarım ve işçilik giderleri gibi diğer harcamalar da dahil edilip daha detaylı bir maliyet analizi gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, sadece ilk kurulum maliyetleri dikkate alınmıştır.

#### 4.6. Geliştirilen Yöntemin Denenmesi: Eskişehir Bölgesi İçin Uygulama

Geliştirilen yöntem, Şekil 4.4'deki akış şemasında özetlenmiştir. Bu yöntem, Eskişehir bölgesine ait rüzgar hızı ve güneş ışınım şiddeti verileri yerine bu verilerin genel davranışlarını karakterize eden modeller (Bölüm 2 ve 3'te verilen modeller) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sırasında yükün talebi 200W sabit kabul edilmiştir. Kurulacak olan sistemin, 85W güce sahip güneş panellerinden ve 1KW güce sahip rüzgar türbinlerinden oluşacağı düşünülmüştür (Bu özelliklerde bir sistem Anadolu Üniversitesi İki Eylül Kampüsü'nde tesis edilmiştir). Sistemin maliyet hesabı yapılırken fotovoltaik paneller için 4.86 USD/W ve rüzgar türbinleri için 3.0 USD/W maliyetler kullanılmıştır [52]. Böylece fotovoltaik panellerin ve

rüzgar türbinlerinin birim maliyetleri 413.1USD ve 3000USD olarak hesaplanmıştır. Bataryaların (120Ah) birim fiyatı ise 350USD kabul edilmiştir. Analizler sırasında LLP sınırları 0.02 olarak seçilmiştir.



Şekil 4. 4. Geliştirilen algoritmanın özet akış şeması

Algoritmanın rüzgar ve güneş modellerinden elde edilen veriler girdi alınarak işletilmesi sonucunda sistemi, istenilen LLP sınırının altında gerçekleştiren konfigürasyonlar ve konfigürasyonların maliyetleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

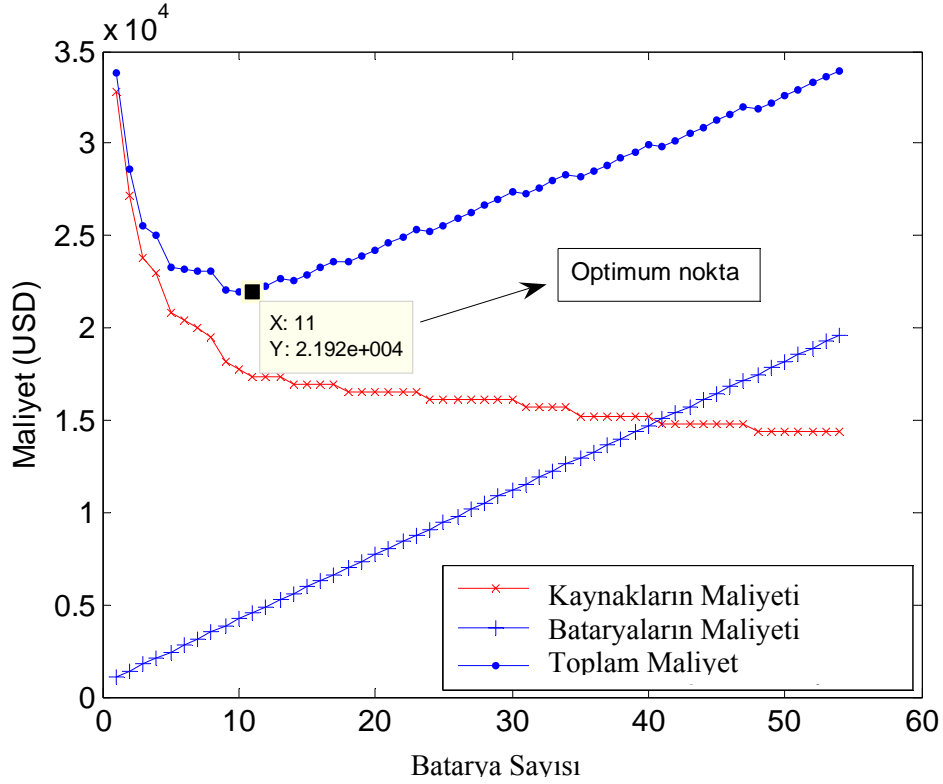
**Çizelge 4.1.** Eskişehir bölgesi için 200W’ lık sabit yükü  $LLP < 0.02$  ile karşılayabilen konfigürasyonlar ve bu konfigürasyonların maliyetleri.

Türbin Sayısı	PV Sayısı	Batarya Sayısı	Toplam Maliyet (USD)
3	13	56	33970
3	13	55	33620
3	13	54	33270
3	13	53	32920
3	13	52	32570
3	13	51	32220
3	13	50	31870
3	14	49	31933
3	14	48	31583
3	14	47	31233
3	14	46	30883
3	14	45	30533
3	14	44	30183
3	14	43	29833
3	15	42	29897
3	15	41	29547
3	15	40	29196
3	15	39	28847
3	15	38	28497
3	15	37	28146
4	9	36	28318
4	9	35	27968
4	9	34	27618
4	9	33	27268
4	10	32	27331
4	10	31	26981
4	10	30	26631
4	10	29	26281
4	10	28	25931
4	10	27	25581
4	10	26	25231
4	11	25	25294
4	11	24	24944
4	11	23	24594

Çizelge 4.1'in devamı

Türbin Sayısı	PV Sayısı	Batarya Sayısı	Toplam Maliyet (USD)
4	11	22	24244
4	11	21	23894
4	11	20	23544
4	12	19	23607
4	12	18	23257
4	12	17	22907
4	12	16	22557
4	13	15	22620
4	13	14	22270
4	13	13	21920
4	14	12	21983
4	15	11	22047
5	11	10	23044
5	12	9	23107
5	13	8	23170
5	14	7	23233
6	12	6	25057
6	14	5	25533
7	15	4	28596
9	14	3	33833

Bu çözümler içindeki minimum maliyetli sistem de ayrıca Çizelge 4.1'de işaretlenmiştir. Boyutlandırma sonucunda elde edilen konfigürasyonların maliyetlerinin sistemde kullanılan batarya sayılarına göre değişimleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Şekil 4.5 sistemi oluşturan yenilenebilir kaynakların maliyelerinin batarya maliyetleri ile değişimini de içermektedir. Yenilenebilir kaynakların maliyet eğrisinin bataryaların maliyet eğrisi ile toplanması sonucunda sistemin toplam maliyet eğrisi elde edilmiştir. Şekil 4.5'te kırmızı çizgi ile gösterilen bu toplam maliyet eğrisini minimum yapan değer optimum sistem konfigürasyonuna karşılık gelmektedir (Çizelge 4.1'de gri renkle işaretlenen satır). Sistemin bileşenlerinin maliyetlerle değişiminin bu şekilde bir grafikte gösterimi ve optimum maliyetin tespit edilmesi de ilk defa bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.5.** Sistemi oluşturulan bileşenlerin maliyetlerinin batarya sayısına göre değişimi ve minimum maliyetli sistem (Optimum nokta)

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, sistemde bulunan bataryaların sayısı, doğrusal bir şekilde artırılırken sistemi oluşturan yenilenebilir kaynakların maliyeti doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Sistemin toplam maliyeti ise belli bir noktaya kadar azalmakta daha sonra da sürekli artmaktadır. Optimum boyutlu sistem ise, sistemin toplam maliyetini minimum yapan sistemdir. Bu sistemin maliyeti, Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi 21920 USD olarak bulunmuştur. Bulunan bu sistem 4 rüzgar türbini, 13 fotovoltaik panel ve 13 batarya içermektedir. Başka bir ifadeyle, kullanılan enerji modellerine göre, bölgede 200Wlık sabit bir yük, bu boyutlarda bir sistem tesis edilerek 0.02 den daha düşük bir enerjisiz kalama olasılığı ile karşılanabilir. Daha hassas ve doğru bir boyutlandırma için kullanılan enerji modelleri değiştirilebilir. Bu tez çalışmasında geliştirilen algoritmanın ele alınan örnek için gösterilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen algoritma, olası yük karakteristikleri için işletilebilir. Sistem bileşenlerinin maliyetleri, birim kapasiteleri ve sistemin kurulacağı bölgeye ait meteorolojik parametreler güncellenerek herhangi bir bölge için de uygulanabilir.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışması, yenilenebilir enerji alanında; hem veri (rüzgar–güneş) modelleme hem de enerji üretim sistemi boyutlandırması konularında gerçekleştirilmiş özgün yaklaşımları içermektedir.

Rüzgar verilerinin modellenmesi konusunda yapılmış önceki çalışmalarda genellikle Markov durum geçiş matrisi yaklaşımı kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda, Markov modellerin durum uzayı boyutunun arttırılmasının modelden üretilen veri kalitesine etkisi araştırılmamıştır. Bu tez çalışmasında ilk olarak rüzgar verileri Markov yaklaşımıyla modellenmiş ve durum uzayı boyutunun arttırılmasının üretilen veri kalitesini olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir. Markov yaklaşımı verilerin temel istatistikleri ve olasılık yoğunluk fonksiyonlarını tahminlemekte başarılıdır. Ancak, bu yaklaşım verilerin zaman içindeki değişimlerini tahmin etmekte yetersiz kalmaktadır. Başka bir ifadeyle Markov yaklaşımı sadece istatistikleri ölçülmüş verilere benzeyen stokastik veriler üretebilmektedir. Bu ise, Markov modelin kısa dönem enerji planlamasında kullanılmasını mümkün kılmamaktadır.

Rüzgar hızı verileri, temelde yavaş değişim gösteren makroskopik iklimsel hareketlerin, yerel fiziksel şartlara göre şekillenmesi ile oluşmaktadır. Bu durumda, sinyal verilerinin altında yatan asıl süreci bulmak, rüzgar verilerini daha “doğru” okumak ve değerlendirmek anlamına gelecektir. Bu çalışmada, konuşma işleme bu amaca yönelik olarak yüksek başarı ile uygulanan Saklı Markov Modeli (Hidden Markov Model – HMM) ilk defa rüzgar hızı verilerinin modellenmesinde denenmiştir. Ortaya çıkartılan modelde “durum” parametreleri, bölgesel basınç ile ilişkilendirilmiştir. Bu modelin uygulanması sonucunda, saatlik öngörü yapmaktan ziyade, rüzgar sisteminin “ne” durumda olacağı bilgisinin elde edilmesi sağlanmıştır. Böylece, yeni ve daha doğru bir model kurulmuştur. Kurulan bu yeni modelin Markov modeline göre üstünlükleri araştırılmıştır. Saklı Markov model ile üretilen verilerin, bölgeden ölçülen verilerin temel istatistiklerini doğru tahminlemenin yanı sıra, aynı zamanda verilerin zaman içindeki değişimlerinin de doğru bir şekilde tahmin edilebilmesine olanak sağladığı tespit edilmiştir. Bu nedenle önerilen saklı Markov modeli hem yörenin rüzgar potansiyelinin belirlenmesinde hem de kurulu

rüzgar türbinlerinden elde edilebilecek güçlerin kısa dönem tahmininde de kullanılabilir niteliktedir.

Güneş ışınım şiddeti verileri, güneşin yıl içindeki genel davranışının değişmemesi nedeniyle rüzgar verilerine nazaran daha durağandır. Ancak atmosferik olaylar verilerin bu genel davranıştan sapmasına neden olur. Kısa dönem enerji planlamasında güneş ışınım şiddeti verilerinin bu sapsmaları da içeren değerlerinin doğru tahmin edilmesi gerekir. Ancak, güneş sistemlerinin boyutlandırılmasında güneş verilerinin genel davranışlarını karakterize eden modellerin kullanılması daha doğru sonuçlar verecektir. Bu çalışmada, saatlik güneş ışınım şiddeti verilerinin yıllık değişimleri için iki boyutlu bir analiz yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen iki boyutlu analiz yöntemi, verilerin saat ve gün eksenlerinde ele alınmasını içermektedir. Geliştirilen yöntemin üstünlükleri veriler üzerinde tasarlanan optimal katsayılı doğrusal filtreler ve yapay sinir ağlarıyla gösterilmiştir. Daha sonra bu iki boyutlu analiz yöntemi kullanılarak güneş ışınım şiddeti verileri analitik olarak modellenmiştir. Böylece, verilere ait matematiksel bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model verilerin yıl içindeki genel davranışlarını başarılı bir şekilde temsil edebilmektedir. Ayrıca, önerilen model, güneş ışınım şiddeti verisinin uzun süreli değişiminin kolayca ilişkilendirilebilecek şekilde algılanmasını ve anlaşılmasını da sağlamaktadır. Saatlik değişim gösteren güneş ışınım şiddetleri ayrıca, yine geliştirilen 2-B analiz yönteminden faydalanılarak ve dünya dışındaki teorik ışınım şiddetleri kullanılarak ta modellenmiştir. Böylece alternatif olarak, ışınım şiddeti verilerinin yıl içindeki davranışlarını karakterize eden basit ve sistem boyutlandırılması çalışmaları için kullanışlı yüzey denklemleri elde edilmiştir.

Rüzgar ve Güneş verileri için geliştirilen modeller Eskişehir bölgesinden saatlik olarak ölçülüp kaydedilmiş olan yıllık veriler üzerinde gösterilmiştir. Ancak, geliştirilen modelleme yöntemleri bölgeden ve veriden bağımsızdır. Başka bir ifadeyle, bu modeller parametrelerinin değiştirilmesi sayesinde kutuplar haricinde dünyadaki tüm bölgelerde rüzgar ve güneş verileri için kullanılabilir niteliktedir.

Bu çalışmada ayrıca, hibrit rüzgar güneş enerji üretim sistemlerindeki üretim/tüketim fenomenini açıklayan yeni bir yöntem ve yeni bir boyutlandırma algoritması da önerilmiştir. Önerilen algoritma ile yükün talebini izin verilen kayıp

olasılığı ile karşılayabilecek (yüksek güvenilirliğe sahip) optimum rüzgar türbini ve güneş paneli boyutunun yanısıra optimum batarya kapasitesi de doğru bir şekilde tespit edilebilmektedir. Önerilen algoritma tarafından, ilk olarak bataryanın üst sınır kısıtını dikkate almadan sistemi minimum enerji kaynağı ile izin verilen LLP sınırında karşılayabilecek çözümü tespit edilmektedir. Daha sonra bu çözüm için batarya kapasitesi hesaplanmaktadır. Yapılan benzetimler göstermiştir ki, izin verilen LLP sınırının yüksek tutulması durumunda makul batarya kapasitesi ve optimum yenilenebilir enerji kaynağı ile sistemin boyutları tespit edilebilmektedir. LLP sınırının aşağı çekilmesi (sistemin enerjisiz kalmasına izin verilen zaman diliminin kısaltılması) durumunda ise algoritma çözüm uzayını önceden tespit edilen batarya kapasitesinden başlayarak taramakta ve izin verilen LLP sınırının altında kalan optimum maliyetli sistem tespit edilebilmektedir. Önerilen algoritmada ayrıca, geçmiş yıllarda ölçülmüş veriler yerine bu verilerin genel davranışlarını karakterize eden modeller kullanılmaktadır. Bu ise verilerin üzerindeki bulutlanma gibi düzensiz dalgalanmaları minimize ederek daha doğru enerji hesabı yapılmasına olanak vermektedir.

Çalışmanın analiz, modelleme ve boyut tespiti yaklaşımları sadece özgün olmakla kalmayıp, yöntemsel olarak farklı bakış açıları ve anlamlandırmalar da içermektedir. Çalışmalarında bu verilere ihtiyaç duyan araştırmacıların veya tüzel kişilerin hem fiziksel ışınım ve rüzgar fenomenini algılamasının kolaylaşacağı, hem de geliştirilen yöntemi kullanarak yenilenebilir enerji üretim sistemi tasarımı konusunda daha doğru ve verimli analizler yapacakları düşünülürse çalışmanın yaygın bir etkiye de sahip olduğu anlaşılabilir.

Bu çalışmada güneş verileri üzerinde yapılan analizlerle geliştirilen modellerde bulutlanma etkisi gibi veriler üzerinde stokastik dalgalanmalara neden olan dış etmenler dikkate alınmamıştır. Geliştirilen modeller, sistem boyutlandırmasında kullanılabilir niteliktedir. Ancak, enerji planlamasında kullanılmaları diğer dış etmenlerin dikkate alınmamış olması nedeniyle doğru olmayacaktır. Verilerin üzerinde stokastik değişimlere sebep olan dış etmenlerin de geliştirilen analitik modellerle entegre edilmesi ileriki çalışmalar olarak düşünülebilir. Ayrıca, rüzgar verileri için geliştirilen HMM yaklaşımında basınç dışındaki diğer

meteorolojik etmenlerin de modele dahil edilmesi modelin başarısını arttırabilir. Bu etmenlerin HMM modeline dahil edilmesi bu konuda gerçekleştirilebilecek ileriki çalışmalar olarak düşünülebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Akpınar, E.K. ve Akpınar, S. (2004), “Determination of the wind energy potential for Maden, Turkey,” *Energy Conversion and Management*, 45, 2901-2914.
- [2] Kose, R., (2004), “An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kütahya, Turkey,” *Energy Conversion and Management*, 45, 1631-1641.
- [3] Akpınar, E.K., ve Akpınar, S., (2005), “An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics,” *Energy conversion management*, 46, 1848-1867.
- [4] Weisser, D., (2003), “A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the ‘Weibull’ density function,” *Renewable Energy*, 28, 1803-1812.
- [5] Al-Nassar, W., Alhajraf, S., Al-Enizi, A. ve Al-Awadhi, L., (2005) “Potential wind power generation in the State of Kuwait,” *Renewable Energy*, 30, 2149-2161.
- [6] Haralambopoulos, D.A., (1995), “Analysis of wind characteristics and potential in the east Mediterranean-the Lesvos case,” *Renewable Energy*, 6, 445-54.
- [7] Çelik, A.N., (2004), “A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at southern region of Turkey,” *Renewable Energy*, 28, 593-604.
- [8] Ulgen, K., Hepbaşlı, A., (2002), “Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of İzmir, Turkey,” *Int J Energy Res*, 26, 495-506.
- [9] Bowman, K.O., Shendon, L.R. (2000) “Maximum likelihood and Weibull distribution,” *Far East J. Theory Statist.*
- [10] Weisser, D. (2003), “A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the ‘Weibull’ density function,” *Renewable Energy*, 28, 1803-1812.
- [11] Eskin, N., Artar, H., Tolun, S., (2008), “Wind energy potential of Gokceada Island in Turkey,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12, 839-851.
- [12] Justus, C.G., Hargraves W.R., Mikhail A., Graber D., (1978), “Methods for estimating wind speed frequency distribution,” *J. Appl Meteorol*, 17, 350-353.

- [13] Genç, A., Esiroglu, M., Pekgor, A., Oturanc, G., Hepasli, A., Ulgen, K., (2005), “Estimation of the wind power potential using Weibull distribution,” *Energy Sources* 27, 809-822.
- [14] Atsu, S.S. D., (2002), “Estimating wind speed distribution,” *Energy Conversion and Management*, 43, 2311-2318.
- [15] Kurban, M., Mert Kantar, Y. ve Hoccoğlu, F. O., (2006). Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Araştırılmasında Weibull Ve Rayleigh Dağılımlarının Kullanılması, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* , cilt 10, sayı 1, sayfa 14-21, 2006.
- [16] Seguro, J.V., Lambert, T.W., (2000), “Modern estimation of the parameters of the Weibull probability density distribution,” *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 85, 75-84.
- [17] Stevens, MJM., Smulder, PT., (1979), “The estimating parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilizations purposes,” *Wind Eng.*, 3, 132-145.
- [18] Kaminskiy, M.P., Krivtsov, V.V., (2005), “A simple procedure for Bayesian estimation of the Weibull distribution,” *Reliability, IEEE Transactions on*, 54, 612-616.
- [19] Montanari, G. C., Mazzanti, G., Cacciari, M., Fothergill, J. C., (1997), “In search of convenient techniques for reducing bias in the estimation of Weibull parameters for uncensored tests,” *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 4, 306-313.
- [20] Gallagher, M.A., Moore, A.H., (1990), “Robust minimum-distance estimation using the 3-parameter Weibull distribution,” *Reliability IEEE Transactions on*, 39, 575-580.
- [21] Khan, M.S.A., Khalique, A., Abouammoh, A.M., (1989), “On estimating parameters in a discrete Weibull distribution,” *Reliability, IEEE Transactions on*, 38, 348-350.
- [22] Cran, G.W., (1998), “Moment estimators for the 3-parameter Weibull distribution,” *Reliability, IEEE Transactions on*, 37, 360–363.

- [23] Cacciari, M., Mazzanti, G., Montanari, G.C., (1996), "Comparison of maximum likelihood unbiasing methods for the estimation of the Weibull parameters," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 3, 18–27.
- [24] Farnum, N.R., Booth, P., 1997, "Uniqueness of maximum likelihood estimators of the 2-parameter Weibull distribution," *Reliability, IEEE Transactions on*, 46, 523-525.
- [25] Sinha, S.K., Sloan, J.A. , (1988), "Bayes estimation of the parameters and reliability function of the 3-parameter Weibull distribution," *Reliability, IEEE Transactions on*, 37, 364-369.
- [26] Ling, J., Pan, J., (1998), "A New Method for Selection of population distribution and parameter estimation," *Reliability Engineering and System Safety*, 60, 247-255.
- [27] Hobbs, J.R., Moore, A.H., Miller, R.M., (1988), "A Bayes estimation of the parameters and reliability function of the three parameter Weibull distribution," *IEEE Trans. Reliability*, 37, 364-369.
- [28] Ross, R., (1994), "Formulas to Describe the Bias and Standard Deviation of the ML-estimated Weibull Shape Parameter," *IEEE Trans. Dielectrics EI*, 1, 247-253.
- [29] Mert Kantar, Y., Kurban, M. and Hocaoglu, F. O., (2006). The Statistically Comparison of Different Parameter Estimation Methods for the Rayleigh Distribution, Application: Estimation of Wind Power Potential in the Iki Eylul Campus of Anadolu University, Turkey, *World Renewable Energy Congress IX (WREC IX)*, Florence, Italy, 19-25 August 2006.
- [30] Şahin, A.D., Şen, Z., (2001), "First order Markov chain approach to wind speed modeling," *J. of Wind Eng. and Ind. Aero.*, 89, 263-269.
- [31] Tore, MC., Poggi, P., ve Louche, A., (2001), "Markovian model for studying wind speed time series in Corsica," *Int. J. of Ren. Energy Eng.*, 3, 311-319.
- [32] Youcef Ettoumi, F., Sauvageot, H., Adane, A.H.E., (2003), "Statistical bivariate modeling of wind using first order Markov chain and Weibull distribution," *Renewable Energy*, 28, 1787-1802.

- [33] Shamshad, A., Bawadi, M.A., Wan Hussin, W.M.A., Majid, T.A., Sanusi, S.A.M., (2005), "First and Second order Markov Chain Models for Syntetic Generation of Wind Speed Time Series," *Energy* 30, 693-708.
- [34] Menges, H.O., Can, Ertekin, C., Sonmete, M.H., (2006), "Evaluation of global solar radiation models for Konya, Turkey," *Energy Conversion and Management*, 47, 254-267.
- [35] Bulut, H., Büyükalaca, O., (2007), "Simple model for the generation of daily global solar-radiation data in Turkey" *Applied Energy*, 84, 477-491.
- [36] Myers, D.R., (2005), "Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality," *Energy*, 30, 1517-1531.
- [37] Zakšek, K., Podobnikar, T., Oštir, K., (2005), "Solar radiation modeling", *Computers & Geosciences*, 31, 233-240.
- [38] Iziomon, M.G., Mayer, H., (2001), "Performance of solar radiation models-a case study," *Agricultural and Forest Meteorology*, 110, 1-11.
- [39] Wong, L.T. and Chow, W.K., (2001), "Solar radiation model," *Applied Energy*, 69, 191-224.
- [40] Page, J., (1997), Proposed quality control procedures for the Meteorological Office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in the UK. Report submitted to CIBSE Guide Solar Data Task Group, Chartered Institute of Building Services Engineers, 222 Balham High Road, London, UK; 1997.
- [41] Hocaoğlu, F. O., Başaran, Filik Ü. ve Kurban, M., (2007). Güneş Işınımının Belirlenmesinde Kullanılan Modelleme Yöntemleri ve Eskişehir Bölgesi İçin Uygulama, *III. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, Mersin, 09-10 Haziran 2007.
- [42] Browy, B.S., Salameh, Z.M., (1996), "Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11, 367-365.
- [43] Senjyu, T., Hayashi, D., Yona, A., Urasaki, N., Funabashi, T., (2007), "Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy", *Renewable Energy*, 32, 1917-1933.

- [44] Ashok, S., (2007), "Optimised model for community-based hybrid energy system", *Renewable Energy*, 32, 1155-1164.
- [45] Pradeep, K. Katti, and Mohan, K. Khedkar, (2007), "Alternative energy facilities based on site matching and generation unit sizing for remote area power supply," *Renewable Energy*, 32, 1346-1362.
- [46] Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A., Koronakis, P.S., (2007), "Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 57-77.
- [47] Barton, J.P., Infield, D.G., (2006), "A probabilistic method for calculating the usefulness of a store with finite energy capacity for smoothing electricity generation from wind and solar power", *Journal of Power Sources*, 162, 943-948.
- [48] Prasad, R.A., Natarajan, E., (2006), "Optimization of integrated photovoltaic-wind power generation systems with battery storage," *Energy*, 31, 1943-1954.
- [49] Diaf, S., Diaf, D., Belhamel, M., Haddadi, M.A., Louche, A., (2007), "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, 35, 5708-5718.
- [50] Yang, H., Zhou, W., Lu, L., Fang, Z., (2008), "Optimal sizing method for stand alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm," *Solar energy*, 82, 354-367.
- [51] Çelik, A.N., (2003), "Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods," *Energy Conversion and Management*, 44, 1951-1968.
- [52] Protogeropoulos, C., Brinkworth, B.J., Marshall, R.H., (2007), "Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage," *International journal of energy research*, 21, 465-479.
- [53] Hocaoğlu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2008), "The Effect of Markov Chain State Size for Synthetic Wind Speed Generation", *the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS2008)*, Rincón, Puerto Rico, May 25-29, 2008.

- [54] Rabiner, L.R., (1989), “A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition”, *Proceedings of the IEEE* 77, 257-286.
- [55] Rabiner, L.R., Juang, B.H., (1986), “An Introduction to Hidden Markov Models,” *IEEE ASSP Magazin*, 3, 4-16.
- [56] Drake, A.W. (1967) *Fundamentals of Applied Probability Theory*, McGraw-Hill, New York A.B.D.
- [57] Stark, H., (2002). Probability and random processes with applications to signal processing, John W. Woods. – 3rd ed. – Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.
- [58] Papoulis, A., (2002). Probability, random variables and stochastic processes, S. Unnikrishna Pillai. – 4th ed. – Boston McGraw-Hill.
- [59] Grimmett, G. R. and Stirzaker, D., (2001). Probability and random processes, – 3rd ed. – Oxford : Oxford University Press.
- [60] Hocaoğlu, F. O. ve Kurban, M., (2006). Anadolu Üniversitesi İki Eylül Kampusu’ndeki Güneş Enerjisi Çalışmaları, *1. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi (UGHEK2006)*, Eskişehir, 21-23 Haziran 2006.
- [61] Belcher, B. N., DeGaetano, A. T., (2007), “A revised empirical model to estimate solar radiation using automated surface weather observations,” *Solar Energy*, 81, 329-345.
- [62] Muneer, T., Younes, S., Munawwar, S., (2007), “Discourses on solar radiation modeling,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 551-602.
- [63] Kaplanis, S. N., (2006), “New methodologies to estimate the hourly global solar radiation; Comparisons with existing models,” *Renewable Energy*, 31, 781-790.
- [64] Wong, L.T., Chow, W.K., (2001), “Solar Radiation Model,” *Applied Energy*, 69,191-224.
- [65] Kalogirou, S. A., (1999), “Applications of artificial neural networks in energy systems A review,” *Energy Conversion & Management*, 40, 1073-1087.
- [66] Mellit, A., Benghanem, M., Arab, A.H., and Guessoum, A., (2005), “A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach,” *Solar Energy*, 79, 469-482.

- [67] Hocaoglu, F. O. ve Kurban, M., (2006). Geriye Yayılım Algoritmasının Tahmin Problemlerinde Kullanımı, Uygulama: Eskişehir Bölgesi Güneş Potansiyeli Tahmini, *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları (ASYU2006) Sempozyumu*, İstanbul, 31 Mayıs-2 Haziran 2006.
- [68] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2007). “A Novel 2-D Model Approach for the Prediction of Hourly Solar Radiation”, *LNCS Springer*, vol. 4507, pp. 741-749 (2007).
- [69] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2008). “Solar Radiation Forecasting Model,” *Encyclopaedia of Artificial Intelligence, IGI-Information Science*, May 2008.
- [70] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2008). “Hourly solar radiation forecasting using optimal coefficient 2-D linear filters and feed-forward neural networks”, *Solar Energy* 82 (2008) 714–726.
- [71] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2008). “Solar Radiation Data Modeling with a Novel Surface Fitting Approach”, *LNCS Springer*, vol. 4985/2008- pp 460-467. DOI:10.1007/978-3-540-69162-4\_48
- [72] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2008). “2 Boyutlu Bir Güneş Işınım Şiddeti Modeli”, *SİU2008 IEEE 16. Sinyal İşleme, İletişim ve Uygulamaları Kurultayı*, Didim-Aydın, 20-22 Nisan 2008.
- [73] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2007). “Solar Radiation Data Modeling with a Novel Surface Fitting Approach” , *Proceedings of ICONIP2007*, November 2007, Kitakyushu, Japan.
- [74] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., (2008). A Novel Solar Radiation Model Using Extraterrestrial Radiations, *World Renewable Energy Congress X (WREC X)*, Glasgow, Scotland, UK, 19-25 July 2008.
- [75] Gonzalez, R.C., Woods, R.E., (2002), *Digital Image Processing*, Second ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 461–463.
- [76] Haykin, S., (1999). *Neural networks : a comprehensive foundation* / Simon Haykin. – 2nd ed. – Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, XXI, 842 s.

- [77] Hocaoglu, F. O., Gerek, Ö. N., and Kurban, M., 2008. A Novel Solar Radiation Model Using Extraterrestrial Radiations, World Renewable Energy Congress X (WREC X), Glasgow, Scotland, UK, 19-25 July 2008.
- [78] Engin M. (2002), *Fotovoltaik-Rüzgar hibrid enerji sistemlerinin İzmir koşullarında tasarımı ve denenmesi*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [79] Hocaoglu, F. O. ve Kurban, M., (2006). Eskişehir Bölgesinde Kurulmuş Olan Hibrid (Rüzgar-Güneş) Enerji Sistem Modeli Bileşenlerinin Tanıtılması, Performans ve Güvenilirliğinin Tartışılması, *III. Ege Enerji Sempozyumu*, Muğla, 24-26 Mayıs 2006.
- [80] Hocaoglu, F. O. and Kurban, M., 2006. A Preliminary Detailed Study on Constructed Hybrid (Wind-Photovoltaic) System under Climatically Conditions of Eskişehir Region in Turkey, PECON 2006, *IEEE First International Power and Energy Conference*, Malaysia,.28-29 November 2006.
- [81] Hocaoglu, F. O., Kurban, M. and Mert Kantar, Y., (2006). The First Application of Hybrid (Wind-Photovoltaic) Power Generation Systems in Eskişehir Region and Discussion about Its Performance, *World Renewable Energy Congress IX (WREC IX)*, Florence, Italy,.19-25 August 2006.