

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKİYE’DE HAZNELİ POMPALI RÜZGAR-HİDRO  
SANTRALLERİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN  
BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Bahtiyar DURSUN**

**Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği  
Danışman: Yrd.Doç.Dr. Bora ALBOYACI**

**KOCAELİ, 2010**

**TÜRKİYE’DE HAZNELİ POMPALI RÜZGAR-HİDRO  
SANTRALLERİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN  
BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Bahtiyar DURSUN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 21 Ocak 2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 24 Mart 2010**

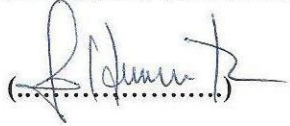
**Tez Danışmanı**

**Yrd. Doç. Dr. Bora ALBOYACI**

  
(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK**

  
(.....)

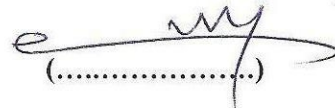
**Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAYRAK**

  
(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU**

  
(.....)

**Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Nuran YÖRÜKEREN**

  
(.....)

**KOCAELİ, 2010**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Elektrik enerjisinin üretiminin büyük bir çoğunluğu fosil kökenli yakıtlardan sağlanmaktadır. Fakat son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından da elektrik enerji üretimi sıkça gündeme gelmektedir. Bu durum, CO ve türevlerinin emisyonlarının artması, fosil yakıtlarda sona yaklaşılması gibi sebeplere dayanmaktadır. Yenilebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre birtakım avantajlarından dolayı dikkatleri üzerine çekmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Marmara bölgesinde yer alan Kırklareli, Tekirdağ ve Edirne illerinin enerji gereksinimini karşılamak için pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemle, enerji talebinin etkin biçimde ve optimum koşulların dışına çıkılmadan sürekli olarak karşılanması sağlanmıştır. Ana enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi kullanılmakta olup, enerji ihtiyacının karşılanamadığı durumda pompalı depolamalı hidro sistem kullanılmaktadır. Her iki durumda da enerji ihtiyacı karşılanmadığı zaman şebeke devreye girerek ihtiyaç karşılanmaktadır.

Tez çalışmam sırasında her konuda beni destekleyen ve yol gösteren danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Bora ALBOYACI'ya en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmamda yardımlarından dolayı başta Öğr. Gör. Cihan GÖKÇÖL olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma, maddi ve manevi anlamda her daim yanımda olan, destekleri ve yapıcı eleştirileriyle tezin sürecine ayrı bir anlam katan sevgili eşim Sibel DURSUN'a ve son olarak tez çalışmam sürecinde dünyaya gelerek hayatımıza renk katan oğlum Ömer Kayra DURSUN'a teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....                                                                  | i    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                       | ii   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                    | iv   |
| TABLOLAR DİZİNİ .....                                                                   | vii  |
| SEMBOLLER .....                                                                         | viii |
| ÖZET .....                                                                              | xi   |
| ABSTRACT .....                                                                          | xii  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                          | 1    |
| 2. RÜZGAR TÜRBİN TEKNOLOJİSİ VE RÜZGAR GÜCÜ .....                                       | 8    |
| 2.1.Giriş.....                                                                          | 8    |
| 2.2.Rüzgar Türbin Tipleri ve Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler .....         | 15   |
| 2.2.1.Sabit hızlı rüzgar türbinleri (Tip –A) .....                                      | 16   |
| 2.2.2.Sınırlı değişken hızlı rüzgar türbinleri (Tip –B) .....                           | 18   |
| 2.2.3.Değişken hızlı rüzgar türbinleri (Tip–C) .....                                    | 19   |
| 2.2.4.Tam skalalı frekans konverterli değişken hızlı rüzgar türbinleri (Tip–D) .....    | 20   |
| 2.3.Rüzgar Enerjisi Potansiyeli .....                                                   | 21   |
| 3. İSTATİSTİKSEL MODELLER İLE RÜZGAR POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....             | 31   |
| 3.1. Giriş.....                                                                         | 31   |
| 3.2.Rüzgar Datalarının Analizi .....                                                    | 31   |
| 3.2.1.Ortalama rüzgar hızı.....                                                         | 32   |
| 3.2.2.Rüzgar hızının dağılımı.....                                                      | 33   |
| 3.3.Rüzgar Veri Analizi İçin İstatistiksel Modeller .....                               | 35   |
| 3.3.1.Weibull dağılımı .....                                                            | 36   |
| 3.3.1.1.Grafik metodu .....                                                             | 40   |
| 3.3.1.2.Standart sapma metodu .....                                                     | 42   |
| 3.3.1.3.Moment metodu .....                                                             | 43   |
| 3.3.2 Rayleigh dağılımı .....                                                           | 43   |
| 3.4.Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi .....                                           | 45   |
| 3.5.Rüzgar Gücünün Yükseklikle Değişimi .....                                           | 46   |
| 3.6.Rüzgar Karakteristiğinde Kapasite Faktörü, Güç ve Enerji Yoğunluğu.....             | 46   |
| 3.7.Rüzgar Güç Performansının Değerlendirilmesi .....                                   | 48   |
| 4. HİDROLİK ENERJİ VE POTANSİYELİ .....                                                 | 50   |
| 4.1.Giriş.....                                                                          | 50   |
| 4.2.Türkiye'nin Su Kaynakları ve Su Potansiyeli .....                                   | 51   |
| 4.3.Hidroelektrik Enerji .....                                                          | 54   |
| 4.3.1.Dünyada ve Türkiye'de hidrolik enerjinin mevcut durumu, kullanımı .....           | 55   |
| 4.3.2.Küçük güçlü hidroelektrik santraller.....                                         | 58   |
| 4.3.3.Pompalı depolamalı hidrolik santraller .....                                      | 59   |
| 4.3.3.1.Pompalı depolamalı santrallerin potansiyeli, kullanımı ve mevcut durumu..       | 62   |
| 4.3.3.2.Pompalı depolamalı hidrolik santrallerin gelişim süreci.....                    | 63   |
| 4.3.3.3.Pompalı depolamalı hidroelektrik santraller ile ilgili yapılmış çalışmalar .... | 64   |
| 5. TÜRKİYE DE RÜZGAR KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ .....                               | 67   |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.Giriş.....                                                                                            | 67  |
| 5.2.Bölgenin Rüzgar Karakteristiğinin Belirlenmesi .....                                                  | 67  |
| 5.2.1.Rüzgar türbini yer seçimi .....                                                                     | 68  |
| 5.2.2.Frekans dağılımlarının belirlenmesi.....                                                            | 69  |
| 5.2.3.Hakim rüzgar yönünün belirlenmesi .....                                                             | 70  |
| 5.2.4.Weibull dağılımı parametrelerinin hesaplanması.....                                                 | 72  |
| 5.2.5.Ortalama rüzgar hızları .....                                                                       | 74  |
| 5.2.6.Güç yoğunluğu dağılımları .....                                                                     | 75  |
| 5.2.7.Rüzgar hızının yükseklikle değişimi .....                                                           | 77  |
| 5.3.Optimum Rüzgar Türbin Seçimi.....                                                                     | 79  |
| 5.4.Rüzgar Güç Üretim Sistemi Yük Eğrilerinin Oluşturulması .....                                         | 85  |
| 5.5.Her Bir Rüzgar Türbini İçin Birim Enerji Hesabı.....                                                  | 93  |
| 5.6.Optimizasyon Probleminin Oluşturulması, Optimum Rüzgar Türbini Ve Türbin Sayısının Belirlenmesi ..... | 93  |
| 6. POMPALI DEPOLAMALI RÜZGAR - HİDRO SİSTEMLERİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....                             | 99  |
| 6.1.Giriş.....                                                                                            | 99  |
| 6.2.Pompaalı Depolamalı Rüzgar - Hidro Sistemlerin Modellenmesi .....                                     | 99  |
| 6.3.Optimum Rüzgar Türbin Tipi Ve Modelinin Belirlenmesi.....                                             | 102 |
| 6.4.Optimum Su Türbininin Belirlenmesi.....                                                               | 102 |
| 6.5.Optimum Su Pompasının Belirlenmesi .....                                                              | 105 |
| 6.6.Hazne Boyutlarının Belirlenmesi .....                                                                 | 107 |
| 6.6.1.Üst hazne kapasitesinin belirlenmesi .....                                                          | 108 |
| 6.6.2.Alt hazne kapasitesinin belirlenmesi.....                                                           | 109 |
| 6.7.Pompaalı Depolamalı Rüzgar - Hidro Sistemlerin Simülasyonu .....                                      | 110 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                                                             | 120 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                           | 124 |
| EKLER.....                                                                                                | 132 |
| KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....                                                                         | 136 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                            | 137 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1: Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinin temel aşamaları .....                                            | 8  |
| Şekil 2.2: Yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri .....                                                       | 9  |
| Şekil 2.3: Rüzgar enerji dönüşüm sistemi bileşenleri .....                                                      | 10 |
| Şekil 2.4: Rüzgar türbinlerinin geçmişten günümüze gelişimi ve boyutları.....                                   | 11 |
| Şekil 2.5: Farklı pitch açılarında güç katsayısı ve uç hız oranı.....                                           | 13 |
| Şekil 2.6: Vestas V90-3MW'lık rüzgar türbini güç eğrisi .....                                                   | 13 |
| Şekil 2.7: Rüzgar türbini çalışma hızları.....                                                                  | 14 |
| Şekil 2.8: Rüzgar türbin kanadının dönüş hareketi .....                                                         | 16 |
| Şekil 2.9: Sabit hızlı rüzgar türbinleri.....                                                                   | 17 |
| Şekil 2.10: Sınırlı değişken hızlı rüzgar türbinleri.....                                                       | 18 |
| Şekil 2.11: Değişken hızlı rüzgar türbinleri .....                                                              | 19 |
| Şekil 2.12: Tam skalalı frekans konverterli değişken hızlı rüzgar türbinleri.....                               | 21 |
| Şekil 2.13: Dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücüne eklenen kapasite miktarları.....                              | 22 |
| Şekil 2.14: Dünyada rüzgar enerjisi kurulu kapasitenin yıllara göre değişimi .....                              | 22 |
| Şekil 2.15: 2008 yılında eklenen rüzgar enerjisi kurulu kapasitenin kıtasal dağılımı .....                      | 23 |
| Şekil 2.16: Rüzgar enerjisi kurulu güce eklenen kapasitelerin kıtasal bazda dağılımı .....                      | 23 |
| Şekil 2.17: Rüzgar enerjisi üretim santrallerinin son durum.....                                                | 29 |
| Şekil 3.1: Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu.....                                                            | 38 |
| Şekil 3.2: Weibull kümülatif yoğunluk dağılım fonksiyonu.....                                                   | 39 |
| Şekil 3.3: Farklı şekil faktörleri için Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu.....                               | 40 |
| Şekil 3.4: Grafik metodu kullanılarak k ve c parametrelerinin belirlenmesi .....                                | 42 |
| Şekil 3.5: Kırklareli ilinin Weibull ve Rayleigh dağılımları.....                                               | 45 |
| Şekil 4.1: Türkiye’de hidrolojik havzaların dağılımı .....                                                      | 53 |
| Şekil 4.2: Türkiye’nin kurulu gücü ve bu gücün enerji türlerine göre dağılımı .....                             | 56 |
| Şekil 4.3: Hidroelektrik enerji projelerinin dağılımları.....                                                   | 57 |
| Şekil 4.4: Pompalı depolamalı hidroelektrik santralin genel yapısı.....                                         | 60 |
| Şekil 5.1: Ergene havzası ve Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çorlu ve Çerkezköy bölgeleri ..... | 68 |
| Şekil 5.2: Altı farklı bölge için frekans hız dağılımları .....                                                 | 70 |
| Şekil 5.3: Her bir bölge için rüzgar yön frekans dağılımları .....                                              | 71 |
| Şekil 5.4: Her bir bölge için Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonları.....                              | 73 |
| Şekil 5.5: Her bir bölge için kümülatif yoğunluk dağılım fonksiyonları.....                                     | 74 |
| Şekil 5.6: Her bir bölge için olasılık güç yoğunluk dağılım fonksiyonları.....                                  | 76 |
| Şekil 5.7: Her bir bölge için 10m yükseklikte güç yoğunluk değerleri .....                                      | 77 |
| Şekil 5.8: Her bir rüzgar türbinine ait güç performans eğrileri.....                                            | 80 |
| Şekil 5.9: Her bir bölge için beş farklı rüzgar türbini için hesaplanan kapasite faktörleri.....                | 82 |
| Şekil 5.10: Her bir bölge için 100m yükseklikteki beş farklı türbinden elde edilen enerji çıkışları.....        | 84 |
| Şekil 5.11: Her bir bölgenin saatlik ortalama rüzgar hızları .....                                              | 85 |
| Şekil 5.12: Her bir bölge için günlük ortalama rüzgar hızları.....                                              | 86 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.13: Her bir bölge için aylık ortalama rüzgar hızları.....                                                  | 86  |
| Şekil 5.14: Her bir bölge için ortalama mevsimsel rüzgar hızları.....                                              | 87  |
| Şekil 5.15: Vestas 850kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri.....           | 88  |
| Şekil 5.16: Vestas 1650kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri.....          | 89  |
| Şekil 5.17: Vestas 1800kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri.....          | 90  |
| Şekil 5.18: Vestas 2000kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri.....          | 91  |
| Şekil 5.19: Vestas 3000kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri.....          | 92  |
| Şekil 6.1: Hidrolik enerji üretim sistemi akış diyagramı .....                                                     | 101 |
| Şekil 6.2: Modellenen pompalı depolamalı rüzgar –hidro sistem.....                                                 | 101 |
| Şekil 6.3: Rüzgar güç sistemlerinin Ergene Havzası üzerinde dağılımı .....                                         | 110 |
| Şekil 6.4: Ocak ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....     | 111 |
| Şekil 6.5: Ocak ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                                 | 111 |
| Şekil 6.6: Şubat ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....    | 111 |
| Şekil 6.7: Şubat ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                                | 112 |
| Şekil 6.8: Mart ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....     | 112 |
| Şekil 6.9: Mart ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                                 | 112 |
| Şekil 6.10: Nisan ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....   | 113 |
| Şekil 6.11: Nisan ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                               | 113 |
| Şekil 6.12: Mayıs ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....   | 114 |
| Şekil 6.13: Mayıs ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                               | 114 |
| Şekil 6.14: Haziran ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları ..... | 114 |
| Şekil 6.15: Haziran ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                             | 115 |
| Şekil 6.16: Temmuz ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....  | 115 |
| Şekil 6.17: Temmuz ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                              | 115 |
| Şekil 6.18: Ağustos ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları ..... | 116 |
| Şekil 6.19: Ağustos ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                             | 116 |
| Şekil 6.20: Eylül ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....   | 116 |
| Şekil 6.21: Eylül ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                               | 117 |
| Şekil 6.22: Ekim ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....    | 117 |
| Şekil 6.23: Ekim ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi.....                                | 117 |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 6.24: Kasım ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları .....  | 118 |
| Şekil 6.25: Kasım ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi...                                | 118 |
| Şekil 6.26: Aralık ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları ..... | 118 |
| Şekil 6.27: Aralık ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi...                               | 119 |
| Şekil 6.28: Rüzgar, hidro ve şebekenin enerji ihtiyacını karşılama durumları .....                                | 119 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 2.1: Rüzgar türbin konfigürasyonları.....                                                                                                                       | 16  |
| Tablo 2.2: Ülkeler bazında 2008 yılı sonunda rüzgar enerjisi kurulu kapasiteler .....                                                                                 | 25  |
| Tablo 2.3: Avrupa ülkelerinin teknik rüzgar enerjisi potansiyeli .....                                                                                                | 26  |
| Tablo 2.4: Bölgelerin ortalama rüzgar yoğunluğu ve ortalama rüzgar hızları.....                                                                                       | 26  |
| Tablo 3.1: Ortalama rüzgar hızının iki farklı türde hesaplanması .....                                                                                                | 33  |
| Tablo 3.2: Çorlu bölgesi rüzgar hızlarının yıllık frekans dağılımları, standart sapmaları ve ortalama hız değeri.....                                                 | 35  |
| Tablo 3.3: Grafik metodunun uygulanması .....                                                                                                                         | 41  |
| Table 4.1: Türkiye'nin hidrolojik havzaları ve teknik özellikleri.....                                                                                                | 53  |
| Table 4.2: Türkiye'nin su potansiyeli .....                                                                                                                           | 54  |
| Tablo 4.3: Dünyanın hidroelektrik potansiyeli .....                                                                                                                   | 56  |
| Tablo 4.4: Hidroelektrik santral projelerinin mevcut durumu .....                                                                                                     | 57  |
| Tablo 4.5: GAP projesi kapsamında kurulacak santraller.....                                                                                                           | 58  |
| Tablo 4.6: Düşülerine göre KGHS'ler .....                                                                                                                             | 58  |
| Tablo 4.7: Türkiye'de KGHS'lerin potansiyeli ve mevcut durumu .....                                                                                                   | 59  |
| Tablo 4.8: Yakıt türüne göre santrallerin devreye giriş süreleri .....                                                                                                | 61  |
| Tablo 4.9: ERE grubu tarafından geliştirilen pompalı depolamalı hidroelektrik santraller.....                                                                         | 64  |
| Tablo 5.1: Her bir bölgenin k ve c parametreleri.....                                                                                                                 | 72  |
| Tablo 5.2: Her bir bölgenin ortalama hızının aritmetik ve istatistiksel olarak hesaplanması .....                                                                     | 75  |
| Tablo 5.3: Her bir bölge için ortalama rüzgar hızı, rüzgar hızlarının standart sapması, en muhtemel rüzgar hızı ve maksimum enerji taşıyan rüzgar hız değerleri ..... | 75  |
| Tablo 5.4: Her bir bölge için farklı yüksekliklerde elde edilmiş rüzgar hız değerleri .....                                                                           | 78  |
| Tablo 5.5: Rüzgar türbinlerinin özellikleri.....                                                                                                                      | 79  |
| Tablo 5.6: Farklı yükseklikler için hesaplanan Weibull parametreleri.....                                                                                             | 83  |
| Tablo 5.7: Rüzgar türbin maliyetleri ve birim enerji maliyeti .....                                                                                                   | 93  |
| Tablo 5.8: Senaryolar ve optimum türbin sayıları ve optimum maliyetler .....                                                                                          | 98  |
| Tablo 6.1: Su türbin tipleri ve özellikleri .....                                                                                                                     | 103 |
| Tablo 6.2: Su türbin tipleri ve maliyetler .....                                                                                                                      | 104 |
| Tablo 6.3: Su pompa tipleri ve özellikleri.....                                                                                                                       | 106 |
| Tablo 6.4: Su pompa tipleri ve maliyetler.....                                                                                                                        | 106 |

## SEMBOLLER

|                |                                                                   |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|
| $A_{rez}$      | : Hazne kesit alanı ( $m^2$ )                                     |
| $c$            | : Skala faktörü (m/s)                                             |
| $C_p$          | : Güç performans katsayısı                                        |
| $C_{pompa}$    | : Su pompası fiyatı (€)                                           |
| $CP$           | : Kapasite faktörü                                                |
| $C_{turbini}$  | : Su türbini fiyatı (€)                                           |
| $d$            | : Talebin sadece hidroelektrik santralden sağlandığı gün sayısı   |
| $E$            | : Rüzgar enerji yoğunluğu ( $Wh/m^2$ )                            |
| $e$            | : Yerçekimi ivmesi ( $kN/m^3$ )                                   |
| $E_{total}$    | : Talep edilen toplam yıllık enerji miktarı (Wh)                  |
| $f_i$          | : Frekans                                                         |
| $H$            | : Hazne yüksekliği (m)                                            |
| $h_{ist}$      | : İstenilen yükseklik değeri (m)                                  |
| $H_p$          | : Su pompasının basacağı yükseklik (m)                            |
| $h_{ref}$      | : Referans yükseklik (m)                                          |
| $H_t$          | : Su türbininin üreteceği yükseklik (m)                           |
| $k$            | : Weibull şekil faktörü                                           |
| $m$            | : Yüzey pürüzlülüğüne ve atmosferik kararlılığa bağlı katsayı     |
| $n$            | : Rüzgar hız veri sayısı                                          |
| $n_g$          | : Generatör verimi                                                |
| $N_0$          | : Bölgenin potansiyeline en uygun rüzgar türbini anma gücü (W)    |
| $n_{pompa}$    | : Su pompası sayısı                                               |
| $n_{sturbini}$ | : Su türbini sayısı                                               |
| $n_t$          | : Türbin verimi                                                   |
| $P$            | : Herhangi bir hub yükseklikteki güç yoğunluğu değeri ( $W/m^2$ ) |
| $P_{e,ave}$    | : Türbin ortalama gücü (W)                                        |
| $P_{eR}$       | : Türbin çıkış gücü (W)                                           |
| $P_m$          | : Ortalama rüzgar güç yoğunluğu ( $W/m^2$ )                       |
| $P_{pompa}$    | : Su pompası gücü (W)                                             |
| $P_R$          | : Rayleigh güç yoğunluğu ( $W/m^2$ )                              |
| $P_{ref}$      | : Referans noktadaki referans güç yoğunluğu değeri ( $W/m^2$ )    |
| $P_{sturbini}$ | : Su türbini gücü (W)                                             |
| $P_W$          | : Weibull ortalama güç yoğunluğu ( $W/m^2$ )                      |
| $P_{wind}$     | : Seçilen türbinden üretilen saatlik güç miktarı (W)              |
| $P_{yük}$      | : Saatlik yük talebi (W)                                          |
| $R$            | : Rotor yarıçapı (m)                                              |
| $T$            | : Periyot                                                         |

|            |                                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $u$        | : Rüzgar hızı (m/s)                                                   |
| $u_B$      | : Rotor hızının ulaşabileceği izin verilen maksimum rüzgar hızı (m/s) |
| $u_c$      | : Türbinin enerji üretebilmesi için gerekli minimum rüzgar hızı (m/s) |
| $u_F$      | : Türbini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızı (m/s)         |
| $u_R$      | : Türbinin anma rüzgar hızı (m/s)                                     |
| $U_{ref}$  | : Referans rüzgar hızı (m/s)                                          |
| $V_c$      | : Türbinin üretime geçebilmesi için gereken rüzgar hızı (m/s)         |
| $V_F$      | : Türbini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızı (m/s)         |
| $V_i$      | : İki rüzgar hız aralığının orta değeri (m/s)                         |
| $V_{ist}$  | : İstenilen yükseklikteki rüzgar hız değeri (m/s)                     |
| $V_m$      | : Ortalama rüzgar hızı (m/s)                                          |
| $V_{MaxE}$ | : Maksimum enerji taşıyan rüzgar hızı (m/s)                           |
| $V_{MP}$   | : En muhtemel rüzgar hızı (m/s)                                       |
| $V_R$      | : Anma rüzgar hızı (m/s)                                              |
| $V_{ref}$  | : 10m yükseklikteki referans rüzgar hızı (m/s)                        |
| $V_{rez}$  | : Hazne hacmi (m <sup>3</sup> )                                       |
| $z$        | : Ortalama rüzgar türbin sayısı                                       |
| $z_{max}$  | : Maksimum rüzgar türbin sayısı                                       |
| $z_{min}$  | : Minimum rüzgar türbin sayısı                                        |
| $Q_p$      | : Su pompasının debisi (m <sup>3</sup> /s)                            |
| $Q_t$      | : Su türbininin debisi (m <sup>3</sup> /s)                            |
| $\delta E$ | : Her bir yıl için toplam talebin artış miktarı (%)                   |
| $\beta$    | : Rotor kanatlarının pitch açısı (°)                                  |
| $w_r$      | : Açısal hız (rpm)                                                    |
| $\lambda$  | : Uç hız oranı                                                        |
| $\sigma_v$ | : Standart sapma                                                      |
| $\rho$     | : Havanın yoğunluğunu (kg/m <sup>3</sup> )                            |
| $\Gamma$   | : Gamma fonksiyonu                                                    |
| $\mu_2'$   | : Popülasyonun ikinci hassas nokta momenti                            |
| $\eta$     | : Enerji dönüşüm katsayısı                                            |
| $\eta_p$   | : Su pompasının verimi (%)                                            |
| $\eta_t$   | : Su türbininin verimi (%)                                            |

## Kısaltmalar

|       |                                               |
|-------|-----------------------------------------------|
| ÇBAG  | : Çift Beslemeli Asenkron Generator           |
| DGM   | : Dalga Genişlik Modülasyonu                  |
| DSİ   | : Devlet Su İşleri                            |
| EPDK  | : Elektrik Piyasası ve Denetleme Kurumu       |
| GAP   | : Güneydoğu Anadolu Projesi                   |
| HES   | : Hidroelektrik santraller                    |
| KGHS  | : Küçük Güçlü Hidroelektrik Santraller        |
| PDHES | : Pompalı Depolamalı Hidroelektrik Santraller |

|       |                                          |
|-------|------------------------------------------|
| REPA  | : Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası      |
| RSAG  | : Rotoru Sargılı Asenkron Generatör      |
| SKAG  | : Sincap Kafesli Asenkron Generatör      |
| TEİAŞ | : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi |
| UCTE  | : Avrupa Elektrik İletim Sistemi         |
| YİD   | : Yap İşlet Devret                       |

# **TÜRKİYE’DE HAZNELİ POMPALI RÜZGAR-HİDRO SANTRALLERİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

**Bahtiyar DURSUN**

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar güç sistemleri, Pompalı depolamalı rüzgar-hidro güç santralleri, Sistem optimizasyonu ve modelleme

## **ÖZET**

Günümüzde fosil kökenli yakıtların bitme noktasına gelmesi, bu tür yakıtların çevreye saldıkları gazların insanlara, bitkilere, hayvanlara ve çevreye verdiği zararların geçmişe nazaran çevre duyarlılığı artmış olan ülkeler tarafından daha özenle ele alınıyor olması, dünya üzerindeki ülkeleri alternatif enerji kaynaklarından olan yenilenebilir enerji kaynaklarını araştırmaya sevk etmiştir. Ülkeler, özellikle fosil kökenli yakıt üretimi açısından fakir sayılabilecek ülkeler, enerji gereksinimlerini tedarik ederken kendi iç kaynaklarına yönelmeye başlamışlardır. Bu ülkelerden biri de Türkiye’dir. Enerji kaynakları açısından oldukça zengin konumda bulunan Türkiye dünya üzerinde enerji ile alakalı meydana gelen radikal değişmelere ayak uydurmaya başlamıştır. Son zamanlarda, Türkiye’de, özellikle rüzgar enerjisine verilen önem gözle görülür biçimde artmıştır. Şu ana kadar çok fazla kullanılmayan, atıl durumda olan rüzgar enerjisi kullanılmaya başlanmıştır. Enerji türlerinin tek bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesinin yanında çoklu kullanılarak değerlendirilmesi de son zamanlarda popülerlik kazanmıştır. Böylece enerjinin daha etkin olarak elde edilmesi sağlanabilmektedir. Bu tür kullanımlardan biri de, hazneli pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemlerdir. Bu sistemde, rüzgardan elde edilen enerji ile talep karşılandıktan sonra fazla olan enerji pompalar vasıtasıyla alt haznedeki suyu üst hazneye pompalamak için kullanılır. Talebin karşılanamadığı yani rüzgarın yetersiz olduğu durumda, üst haznede tutulan sudan türbinler vasıtasıyla elektrik üretilip, talep karşılanmaktadır. Bu sistemler dünya genelinde kullanılıyor olmasına karşın Türkiye’de böyle bir sistem uygulaması gerçekleştirilmemiştir.

Bu çalışmada, Türkiye’nin Marmara bölgesinde yer alan Kırklareli, Tekirdağ ve Edirne illerinin enerji gereksinimini karşılamak için hazneli pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemle, enerji talebinin etkin biçimde ve optimum koşulların dışına çıkılmadan sürekli olarak karşılanması sağlanmıştır.

# **ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THE PUMPED WIND-HYDRO PLANTS IN TURKEY**

**Bahtiyar DURSUN**

**Keywords:** Wind power systems, Pumped storage wind-hydro power plants, System optimization and modelling

## **ABSTRACT**

Because fossil fuel sources are limited and many countries which have started to be more sensitive to environment, are now aware of the negative impacts of this kind of fuels sources (having the emission of poisonous gasses) on human, vegetables, animals and environment, these countries show a tendency to search for renewable energy sources from elternative energy sources. Countries which is considered a poor country in terms of the production of fossil fuel sources, has started to utilize their indigeneous energy sources in the recent time. Turkey is one of these countries, too. Turkey which is considered to be a very rich country regarding all available energy sources except for fossil fuel sources, has started to adapt itself to unfamiliar, radical and global changes about energy. Recently, importance given to alternative energy sources, especially wind energy, has increased in Turkey remarkably. Wind energy which has not sufficiently been utilized so far, is now being widely used. It is familiar that these alternative energy forms can be used as a unique energy source to generate electricity besides they can be evaluated combining with other energy form to be able to make more production. With the usage of the combined system, energy can be said to be produced effectively. One of the combined systems powered by wind energy is a pumped storage wind-hydro system. In this system, after meeting the required energy demand (load) from wind energy, the remaining surplus energy is used to pump water from lower reservoir to upper reservoir and thus is stored as a potential energy in upper reservoir and used when necessary. In the case of insuffcient wind speed (that no more electricity from wind energy sources is generated to meet demand), electricity is generated by hydro turbines driven by water inside upper reservoir. Although this kind of system is applied in many countries around the world, any example of this system in Turkey have never been encountered and performed .

In this study, a pumped storage wind-hydro system is designed to meet the electrcity demand of three cities (Kirkclareli, Tekirdag, Edirne) in the Marmara region of Turkey. The degined system offers a chance to meet the electricity demand continuously and effectively by satisfying necessary constraints of the current case.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen parametrelerden biri de enerjidir. Enerjiye olan ihtiyacın, her geçen gün artan dünya nüfusu ile doğru orantılı olarak arttığı bilinen bir gerçektir. Bir yandan artan enerji talebi, diğer yandan küresel ısınma, fosil kökenli yakıt rezervlerinin tükenmek üzere olması ve çevresel faktörler yakın zamanda enerji noktasında bir kriz yaşanması olasılığını ortaya koymaktadır. Bu gerçekler ışığında ülkeler, enerji politikalarını belirlerken, mevcut enerjinin en verimli bir şekilde kullanılmasını esas alarak alternatif enerji kaynakları arasında yer alan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeleri gerekliliğinin farkına varmaya başlamışlardır.

Avrupa ülkeleri başta olmak üzere enerji üretim sistemlerinde, geleneksel üretim kaynaklarından yenilenebilir enerji üretim kaynaklarına doğru bir eğilim olduğu görülmektedir. Bu durumun sebepleri olarak, dünyadaki petrol rezervlerinin hızla tükeniyor olması, geleneksel enerji kaynaklarının çevreye bıraktığı ve kirliliğe sebebiyet veren SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> partikülleri ve emisyonlar, yakıt masraflarındaki artışlar ve son olarak ülkelerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılarken önceliği kendi iç enerji kaynaklarına vermeleri bununla beraber enerji politikaları bağlamında enerji çeşitliliği sağlayarak bir ülkeye veya bir enerji türüne bağımlılığı ortadan kaldırma gerekliliğinin önemli bir hale gelişini sıralanabilir.

Yenilenebilir enerji kaynakları temelde rüzgar, güneş, biyo-kütle, hidro ve jeotermal gibi kaynak türlerini kapsamaktadır. Bu kaynaklar ülkelerin potansiyelleri ölçüsünde yararlanabildikleri kaynak türleridir. Dolayısıyla, ülkeler potansiyeli olduğu enerji türlerine yönelip talep edilen enerjisini karşılayabilirler. Bu enerji türlerinin en önemli özelliklerinden biri de, çevreye hiçbir olumsuz katkılarının bulunmamasıdır. Dolayısıyla, bu enerji türleri çevre dostudurlar.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından günümüzde en çok eğilim rüzgar enerjisine olmaktadır. Temiz enerji oluşu, dünya var olduğu sürece kaynağın tükenmeyecek olması, çevre dostu olması, enerjinin kaynağının bedava olması, bu enerji türünden ülkelerin potansiyelleri ölçüsünde yararlanıyor olması ve en önemlisi de enerji noktasında dış ülkelere olan bağımlılığı ortadan kaldırıyor olması bu enerji türünü diğer yenilenebilir enerji türlerine göre daha avantajlı kılmaktadır.

Türkiye, rüzgar enerjisi potansiyeli olarak oldukça elverişli bir coğrafyaya sahiptir. Türkiye Avrupa ülkeleri arasında teknik açıdan rüzgar enerji potansiyeli en fazla olan ülke konumundadır. Türkiye, enerji tüketiminin yaklaşık iki katına karşılık gelen 160TWh'lik teorik rüzgar enerji potansiyelini rüzgardan elde edebilme potansiyeline sahiptir. Türkiye'nin bölgeleri, rüzgar hız ortalamaları ve m<sup>2</sup> başına ortalama rüzgar güç yoğunluğu bakımından incelendiğinde, sırasıyla en iyi bölgeler Marmara, Güneydoğu Anadolu, Ege bölgeleridir[1-4].

Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi 1998 yılında 9MW iken 2001 yılına gelindiğinde bu değer 19MW'ları bulmuştur[5]. Türkiye'de 2005, 2006, 2007 ve 2008 yıllarında rüzgar enerjisi kurulu güç üretim kapasitesi sırasıyla 20MW, 51MW, 131.35MW ve 333.35MW olarak gerçekleşmiştir[6-9].

Türkiye'de kurulu rüzgar enerjisi kapasitesinde son yıllardaki artışın sebebi, 5346 sayılı yenilenebilir enerji kaynakları yasasının kabul edilmesi olmuştur[10]. Bu yasa ile, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların değerlendirilmesi ve çevrenin korunması amaçlanmaktadır. Ayrıca bu yasanın sağladığı birtakım avantajlardan dolayı rüzgar enerji sektöründe ciddi yatırımlar yapılmaya başlanmıştır. Özellikle rüzgar enerjisi santralinden üretilen enerjinin devlet tarafından alım garantisi verilmesi de bu sektöre olan yatırımın artmasına sağlamıştır. Enerji Piyasaları Denetleme Kurulunun raporlarına göre yasanın kabul edilmesinin ardından rüzgar enerjisinden elektrik üretme amaçlı olarak Aralık 2007'de toplam 78GW'lık bir rüzgar enerjisi lisans başvuru gerçekleşmiştir. Kurul bu başvurulardan sadece 2GW'lık başvuruya izin vermiştir[11-12].

Rüzgar enerjisinin birçok avantajının yanında, bir takım dezavantajları da bulunmaktadır. Rüzgar doğası gereği doğrusal olmayan, süresiz bir akışa sahiptir. Diğer bir deyişle, kesintiler mevcut olup, rüzgarın sürekliliği söz konusu değildir. Tek başına bir enerji üretim kaynağı olarak kullanıldığında ve şebekeden bağımsız düşünüldüğünde enerjinin arz ve kalitesi açısından istenmeyen bir durum oluşmaktadır. Rüzgarın süresizliği, enerji üretimi noktasında bir problem oluşturur. Bu da talebin sürekli olarak karşılanamaması sıkıntısını doğurur. Bu tür durumlarda şebeke bağlantısı gerçekleştirilerek rüzgarın olmadığı durumda enerji ihtiyacı şebekeden karşılanarak enerjinin sürekliliği sağlanabilir.

Ülkemizde hidroelektrik santralleri enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılamada hayati bir rol üstlenmişlerdir. Türkiye su kaynakları açısından değerlendirildiğinde, Avrupa'nın birçok ülkesine göre su zengini bir ülke konumundadır. Bununla beraber, bilindiği gibi Türkiye rüzgar enerji potansiyeli açısından da elverişli bir ülkedir. Türkiye'nin hem su kaynakları hem de rüzgar potansiyeli açısından iyi durumda olması, Türkiye'de pompalı depolamalı rüzgar-hidro hibrit enerji sistemlerinin enerji verimliliği açısından uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye'de pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemlerin modellenmesi ile ilgili bir çalışma yapılmadığından, enerjinin etkin ve verimli kullanılması amacıyla böyle bir sistem tasarımı bu tez çalışması kapsamında yapılacaktır.

Rüzgar - hidro sistemler ile dünyada yapılan ve literatürde yerini almış bir takım çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar;

Kaldellis, Ege Denizi adalarının elektrik ihtiyacını karşılamak üzere rüzgar - hidro elektrik üretim sistemi önermiştir. Lokal rüzgar potansiyeli oldukça iyi olan bu adaların enerji ihtiyacını karşılayacak sistemin parametrik analizini gerçekleştirmiştir. Kullanılan türbin sayısı, seçilen su hazne kapasitesi ve buna karşılık su pompalarının anma güçleri ve yerin lokal rüzgar enerjisi potansiyel yeterliliği gibi parametrelerin önerilen sistemde enerji hareketindeki önemi irdelenmiştir[13]. Kaldellis ve Kavadias Ege Denizi adalarının enerji talebini karşılamak ve temiz su eksikliğini gidermek için çözüm önerisi niteliğinde bir model getirmişlerdir. Adaların rüzgar potansiyelinin oldukça iyi olmasından dolayı bu

bölgeye rüzgar- hidro kombine enerji üretim istasyonu kurarak enerji kesintilerini ortadan kaldırmak ve temiz su eksikliğini gidermek amaçlanmıştır. Bu çalışmada rüzgar potansiyelinin iyi olması tek başına enerji ihtiyacını her zaman karşılayamayacağı düşünülerek bu model ileri sürülmüştür. Bu düşünceden hareketle Kaldellis ve Kavadias optimal rüzgar – hidro çözümü için bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntemi Ege Denizi adaları için uygulamıştır. Nümerik hesaplamalarda uzun dönem rüzgar hız ölçümleri, talep edilen elektrik yükleri ve sistem bileşenlerinin işletme karakteristiklerinde ise gerçek veriler kullanılmıştır[14]. Cristofari ve arkadaşları yaptıkları çalışmada rüzgar türbini ve pompalı hidro sistemden oluşan kombine sistemin maliyet optimizasyonu ve büyüklüğü arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için gerçek rüzgar ve yük verilerinin kullanıldığı bir yöntem sunmuşlardır. Algoritma dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada saatlik yük talebi, haznelerin karakteristiği (yükseklik, hacim) değişik ticari ekipmanların teknik ve ekonomik verileri gibi temel dataların okunması gerçekleştirilmektedir. İkinci aşama, iterative işlemlerin yapıldığı aşamadır. Her  $\delta$  (artış miktarı) değeri için sistem analiz edilmektedir. Üçüncü aşama, ömür maliyet modelinin gerçekleştiği durumdur. Son aşamada ise minimum maliyette seçilen optimum ekonomik yenilenebilir enerji konfigürasyonundan maksimum talebin ne kadarlık bir yüzdesinin karşılanacağı belirlenir[15]. Bakos, düşük maliyetli elektrik üretmek için bir hibrit rüzgar-hidro güç sisteminin işletimiyle ilgili çalışma yapmıştır. Yunanistan'da Ikeria adası üzerinde spesifik bir uygulama yapılarak analiz edilmiştir ve sonuçlar sunulmuştur. Burada, gerçek zamanlı uygulama sonucunda elde edilen veriler geliştirilen benzetim programı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon programı giriş verisi olarak aylık rüzgar hız dağılımı ve hidroelektrik haznelerde depolanan yağmur suyu oranı kullanılmıştır. Yunanistan adasındaki bu uygulamanın fizibilitesi sonucunda beklenen elektrik enerjisi tasarrufu elde edilmiştir[16]. Castronuovo ve arkadaşları kombine rüzgar güç üretimi ve depolamalı hidro sistem için bir yöntem önermiştir. Rüzgar güç üretimi ve depolamalı hidro sistemin birlikte kullanımındaki artış işletimsel optimizasyon yaklaşımının uygulanmasına sebep olmuştur. Optimizasyon modelinde rüzgar - hidro pompalama tesisi, hidrolik generatör ve pompa istasyonu saatlik olarak tanımlanmıştır[17]. Castronuovo ve Lopez rüzgar çiftliği işletirken ekonomik kazançlar sağlamak ve rüzgar enerji kaynağının süreksizliğinden dolayı aktif güç çıkışı değişimlerini azaltmak için su depolama kabiliyetinin kullanımını

önermektedirler. Saatlik ayrıık optimizasyon algoritması önerilmiştir. Rüzgar türbinleri ve depolamalı hidro pompa ekipmanlarından oluşan sistemde, optimum günlük işletme stratejisini tanımlamak için saatlik ayrıık optimizasyon algoritması önerilmiştir. Üç işletme koşulu analiz edilerek elde edilen sonuçlar sunulmuştur[18]. Anagnostopoulos ve Papantonis hibrit rüzgar-hidro santralde pompalama ünitesinin tasarımı ve optimum boyutunun sayısal olarak analizini gerçekleştirmişlerdir. Paralel olarak çalışan pompalardan değişken hızlı pompa veya ek olarak daha küçük pompadan oluşan standart tasarım, diğer iki konfigürasyon ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Amaç, pompaların güç işletme sınırlamalarından dolayı hidrolik enerjiye dönüştürülemeyen artık rüzgar enerjinin miktarını azaltmaktır. Santral işletimi bir yıl için bir değerlendirme algoritması ile simüle edilmiştir[19]. Kaldellis ve arkadaşları Ege Denizinde orta büyüklükte bir ada olan Archipelago'da kombine rüzgar-hidro enerji santrali kurma olasılığını tekno-ekonomik temelli olarak araştırmışlardır. Bu bölgelerde elektrik üretim maliyetinin yüksek olmasının yanı sıra bölgede rüzgar potansiyelinin oldukça iyi olması önerilen çözümün kullanılabilirliğini artırmaktadır. Ek olarak optimum boyutta su haznesi ve rüzgar türbin sayısı seçerek tekno-ekonomik tabanlı parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı ölçümler ile deneysel tabanlı verilerden elde edilen sonuçların tutarlılığı çözümün geçerliliğini ispatlamıştır. Dahası, şebekeden uzak yerlerde ihtiyaç duyulan elektrik talebini her durumda karşılamıştır. İthal edilen yakıt miktarının azalması ile beraber, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını %90'lara ulaşmış ve bu da olumsuz çevre etkilerinin azalmasını sağlamıştır[20].

Rüzgar enerjisinden faydalanmak ülkelerin potansiyelleri ölçüsünde gerçekleşir. Türkiye rüzgar potansiyeli açısından gelecek vadeden ülkelere biridir. Türkiye'nin bazı yerlerinin potansiyel değerlendirme çalışmaları yapılmış olup, bu bölgelerin rüzgar karakteristiği açısından uygun olup olmadığı belirlenmiştir. Fakat Marmara bölgesinin batısı olarak bilinen Trakya için, rüzgar karakteristiğini belirlemek ve rüzgar enerji açısından rüzgar güç üretim sistemi kurmanın uygun olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Marmara bölgesinin batısında bulunan Kırklareli, Edirne, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çerkezköy ve Çorlu bölgelerinin rüzgar karakteristiği ve rüzgar potansiyeli istatistiksel modeller kullanılarak analiz edilip sonuçlar değerlendirilmiştir.

Alt ve üst haznelerden oluşan pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemler, yük talebini karşılandıktan sonra ortaya çıkan artık enerjiyi değerlendirmeye yarayan güç üretim sistemleridir. Pompalı depolamalı rüzgar-hidro güç üretim sisteminin modellenmesinde temelde iki farklı model kullanılmıştır; Bunlar, rüzgar güç karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan istatistiksel bir model ve en uygun rüzgar türbininin seçiminde kullanılan ve GAMS programı ile geliştirilen bir optimizasyon modelidir. Ayrıca hazneli pompalı depolamalı rüzgar-hidro güç üretim sistemi modeli, rüzgar enerjisi, yük ve şebeke arasında enerji akışının ne şekilde olacağının kontrolünü gerçekleştiren kapsamlı (bir çok senaryoyu kapsayan) bir algorithmadan oluşmaktadır. Bu algorithmaya göre;

Rüzgar türbini tarafından üretilen enerji, talep edilen enerjiyi karşılayıp karşılayamamasına göre temelde iki farklı durum söz konusudur. Eğer talep edilen enerji rüzgar güç sistemi tarafından karşılanabiliyorsa, bu durumda talep edilen enerji miktarı ile üretilen miktar arasındaki fark alınarak fazla enerji pompalı depolamalı santral vasıtasıyla alt haznede bulunan suyu üst hazneye basmakta kullanılır. Rüzgardan elde edilen enerji yetersiz olduğu durumda üst haznede yeterli su miktarı var ise üst hazneden alt hazneye su gönderilmesi ile hidroelektrik santral vasıtasıyla enerji üretilerek ihtiyaç giderilir. Rüzgardan üretilen enerjinin yetersiz olması ve üst haznede enerji üretecek kadar su miktarı bulunmaması durumunda enerjinin sürekliliği, arz ve kalitesi açısından enterkonnekte şebeke devreye girmektedir.

Pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemin alt hazne modellenmesinde Ergene havzası ele alınmıştır. Ergene havzası, Marmara bölgesinin batısında bulunan Kırklareli, Edirne, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çerkezköy ve Çorlu bölgelerinin hepsini çevrelediği için seçilmiştir. Ergene havzası daha önce bir enerji üretim sistemi için modellenmemiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, ikinci bölümde rüzgar türbin teknolojisi ve rüzgar gücü, rüzgar güç üretim sistemleri ve son olarak Türkiye’de ve Dünya’da rüzgar enerjisi potansiyeli ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez kapsamında irdelenmesi planlanan bölgelerin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemeye yönelik olarak kullanılacak Weibull ve Rayleigh istatistiksel yöntemleri ve ortalama hız ve güç yoğunluğu hesaplamalarında başvurulmuş metodoloji irdelenmiştir. Ayrıca rüzgara yönelik istatistiksel parametrelerin hesaplama yöntemleri ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde hidrolik enerji ve potansiyeli başlığı altında Türkiye'nin su kaynakları ve su potansiyeli, hidroelektrik enerji, dünyada ve Türkiye'de hidrolik enerjinin mevcut durumu ve kullanımı, küçük güçlü hidroelektrik santraller hakkında bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde, pompalı depolamalı hidrolik santraller hakkında genel bilgi verilmiş olup, pompalı depolamalı santrallerin kurulu güçleri, kullanımı, mevcut durumu ve dünyadaki gelişim süreci hakkında bilgiler verilmiştir.

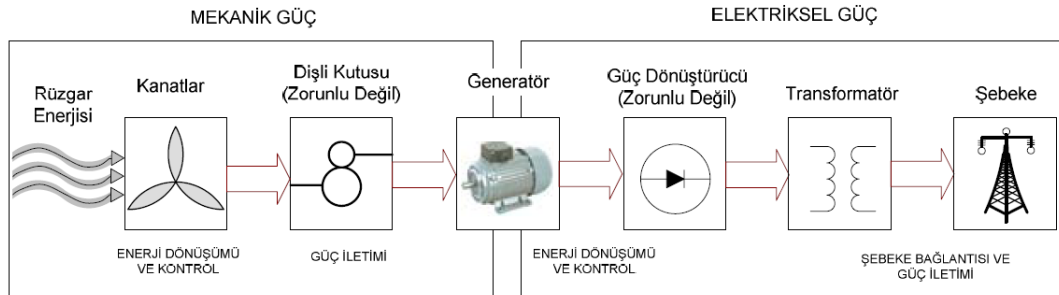
Altıncı bölümde Türkiye'nin Marmara bölgesinin batısında yer alan Çerkezköy, Çorlu, Edirne, Kırklareli, Tekirdağ ve Tekirdağ Malkara bölgeleri için Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünden alınmış son beş yılın gerçek zamanlı rüzgar hız ve yön verileri çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda ele alınan bölgelerin rüzgar karakteristikleri (rüzgar güç potansiyeli, ortalama rüzgar hızları) hesaplanmıştır.

Yedinci bölümde, Trakya bölgesinin TEİAŞ'tan alınan beş yıllık yük datası ile rüzgar verileri örtüştürülmüştür. Pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemin modeli, şebeke ve gerçek veriler kullanılarak istatistiksel ve optimizasyon modelleri kontrol algoritması ile birlikte MATLAB programı kullanılarak analiz edilmiştir.

## 2. RÜZGAR TÜRBİN TEKNOLOJİSİ VE RÜZGAR GÜCÜ

### 2.1. Giriş

Rüzgar türbin rotoru, aerodinamik olarak dizayn edilmiş kanatları vasıtası ile rüzgar enerjisinin bir kısmını yakalayarak mekanik enerjiye çevirir. Düşük hızlı bu mekanik enerji, dişli kutusu yardımı ile yüksek generatör hız seviyesine çıkarılır. Eğer generatör yüksek kutup sayısına sahip ise, dişli kutusuna ihtiyaç duyulmayabilir. Yüksek dönüş hızına sahip bu mekanik enerji ise generatör aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Daha sonra transformatör ve iletim hatları aracılığı ile yerel elektrik şebekesine elektrik sayacı ve kesici üzerinden bağlanır. Tercih edilen rüzgar enerji sistemi topolojisine bağlı olarak, transformatörden önce güç elektroniği üniteleri ile elektrik enerjisi farklı formlarda oluşturulabilir[21]. Bir rüzgar enerji dönüşüm sisteminin temel aşamaları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

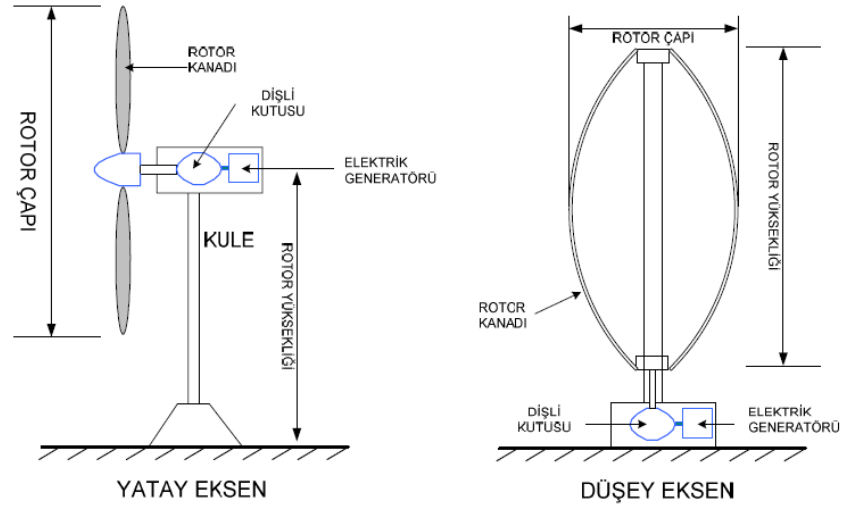


Şekil 2.1: Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinin temel aşamaları

Rüzgar türbinleri, mekaniksel olarak elektrik generatörüne bağlı iki veya daha fazla kanada sahip rotorlar vasıtasıyla rüzgar enerjisini yakalar. Bu türbin yüksek bir kule üzerine monte edilerek, elde edilecek rüzgar enerji miktarı arttırılmaya çalışılır. Rüzgar türbin dizaynında genel olarak iki farklı tasarım biçimi kullanılır. Bunlar;

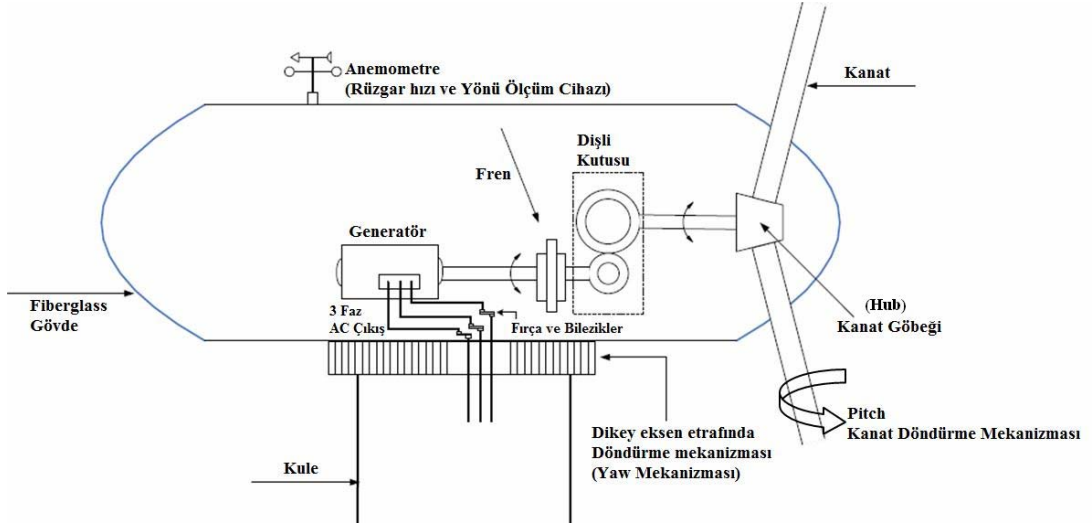
- Rüzgarı her yönden yakalayabilme özelliğine sahip düşey eksenli rüzgar türbinleri
- Hem rüzgar yönünde hem de rüzgara karşı çalışabilen yatay eksenli rüzgar türbinleri

Rotor haricindeki tüm bileşenler her iki rüzgar türbini dizaynında da aynıdır. Düşey eksenli makinanın şekli bir yumurta çırpıcısını andırır. Özel yapısal üstünlüklerinden dolayı, geçmişte yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Günümüzde modern rüzgar türbinlerinin çoğu yatay eksenli olarak tasarlanırlar. Şekil 2.2.'de yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinlerinin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2: Yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri

Rüzgar enerji dönüşüm sistemi; rüzgar türbini, kule, gövde, kanat, anemometre rüzgar hızı ve yönü ölçüm cihazı, generatör, dişli kutusu, kanatların rüzgarın hız durumuna göre konumunu belirleyen pitch (kanat döndürme mekanizması), dikey eksen etrafında kulenin dönmesini sağlayan döndürme mekanizması veya yav mekanizması, kanatların birleştiği nokta olan kanat göbeği ve türbinin durdurulmasını sağlayan fren sisteminden oluşmaktadır. Rüzgar enerji dönüşüm sistemi bileşenleri Şekil 2.3'de görülmektedir[21].



Şekil 2.3: Rüzgar enerji dönüşüm sistemi bileşenleri

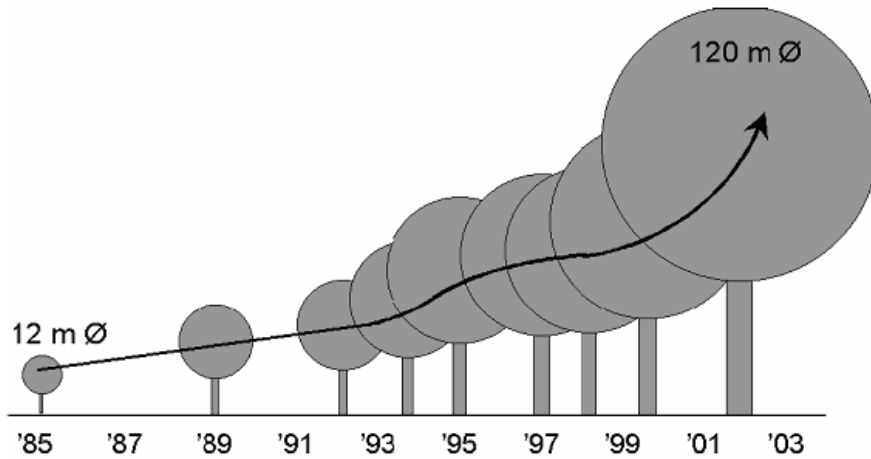
Kule, rüzgar türbininin gövdesini taşımakta olup, yaw mekanizması ile bir arada bulunmaktadır. Yaw mekanizması, ölçüm cihazından gelen bilgi doğrultusunda rüzgar hızı ve doğrultusuna bağlı olarak düşey eksen etrafında kulenin üzerinde dönmesini sağlamaktadır.

Modern rüzgar türbinleri genellikle yatay eksenli olup, 2 veya 3 kanatlı olarak üretilirler. Kanatlar üzerinde rüzgarı tutmaya yarayan kanatçıklarda rüzgar yönüne göre kanatların yönünü ayarlayan bir kanat döndürme mekanizması bulunmaktadır. Mekanik dişli ünitesi; kanatlardan gelen mekaniksel hareketi doğrudan üzerine alan, belirli bir oranda bu hareketi hızlandıran ve generatöre akuple ederek dönmesini sağlayan bir yapıdır. Generatörün dönme hareketinden dolayı üretilen elektrik enerjisi ile üç fazlı bir çıkış gerilimi elde edilir. Bu üç fazlı çıkış gerilimi, transformatör ve iletim hatları ile tüketicilerin kullanacağı seviyeye getirilir.

Rüzgar enerji dönüşüm sistemleri, birçok bilim dalının ortak ilgilendiği bir çalışma konusudur. Örneğin, rüzgar türbin kanat tasarımı ve optimizasyonu aerodinamik, kule, fren ve mekanik dişli ünitesi makina mühendisliği ve inşaat mühendisliği, rüzgar türbinlerinde koruma sistemi ve kontrol mekanizması elektrik ve kontrol mühendisliği bilim dallarının ilgilendiği konulardır.

Rüzgar güç sistemlerine olan ilginin artmasıyla bir ya da birkaç rüzgar türbini dikmek yerine rüzgar çiftlikleri kurulmaya başlanmıştır. Bu rüzgar çiftlikleri çok sayıda rüzgar türbininden oluşmaktadır.

Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinde son zamanlarda, özellikle rüzgar türbin teknolojisinde iki büyük gelişme olmuştur. Bunlardan biri; sabit hızlı enerji üretim sistemlerinden değişken hızlı enerji üretim sistemlerine geçiştir. Sabit hızlı enerji üretimi ile değişken hızlı enerji üretim sistemleri arasındaki fark; sabit hızlı rüzgar türbinlerinde rotor sabit hızla dönerken, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde ise rotor hızı bir kontrol sistemi tarafından kontrol edilmek sureti ile rotor hızı değiştirilebilmektedir. Rüzgar türbin teknolojisindeki ikinci önemli gelişme, büyük ölçekli projelerde birçok rüzgar türbini kullanılarak MW mertebelerinde güç elde etmek için rüzgar çiftliklerinin kurulmasıdır. Tek bir türbin ile MW mertebesinde güç elde etmek ve rüzgar türbin maliyetini azaltmak amacıyla büyük güçlü MW mertebelerinde rüzgar türbinlerinin üretimi gerçekleştirilmektedir. Büyük güçlü rüzgar türbinlerinin üretimi ile gövde yüksekliği ve rotor çapı 100m'ye ulaşmıştır. Böylece düşey pozisyonda türbin kanat ucunun yerden yüksekliği 150m'ye ulaşmaktadır. Rüzgar türbinlerinin geçmişten günümüze boyut ve teknolojik gelişimi Şekil 2.4'de görülmektedir[22].



Şekil 2.4: Rüzgar türbinlerinin geçmişten günümüze gelişimi ve boyutları

MW mertebelerinde rüzgar türbinlerinin üretilmesi sonucu, kanat çapı ve gövde yüksekliğinin artması türbinden elde edilecek güç değerinin de artmasını

sağlamaktadır. Rüzgar türbinlerinde rüzgardan elde edilecek güç değeri ile rüzgar hızı arasında kübik bir ilişki vardır. Rüzgar türbininden elde edilen güç değeri Eşitlik 2.1’de görülmektedir.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p u^3 \quad (2.1)$$

Burada:

$\rho$  havanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  güç katsayısını

$u$  rüzgar hızını ( $\text{m/s}$ )

$R$  rotor yarıçapını ( $\text{m}$ ) göstermektedir.

Güç katsayısı ( $C_p$ ) rüzgar türbini dönüşüm sistemlerinde uç hız oranı ve pitch açısının bir fonksiyonudur. Rüzgar güç dönüşüm sistemlerinde güç katsayısı denklem 2.2 -2.4’deki gibi ifade edilir.

$$C_p(\beta, \lambda_i) = 0.4654 \left[ \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{\frac{20.24}{\lambda_i}} \quad (2.2)$$

$$\lambda_i = \left[ \frac{1}{(\lambda + 0.08\beta)} - \frac{0.035}{(\beta^3 + 1)} \right]^{-1} \quad (2.3)$$

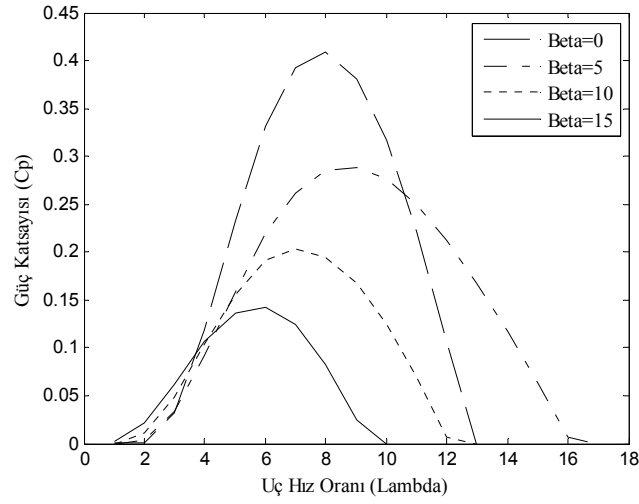
$$\lambda = \frac{w_r R}{u} \quad (2.4)$$

Burada:

$\beta$ , rotor kanatlarının pitch açısını (derece)

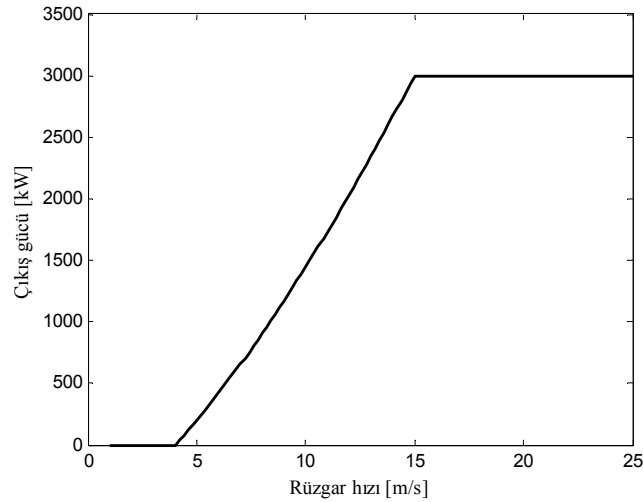
$w_r$ , açısal hızı (rpm) göstermektedir.

Tipik bir rüzgar türbin sisteminde farklı pitch açıları için güç katsayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki, Şekil 2.5’de görülmektedir[23,24].



Şekil 2.5: Farklı pitch açılarında güç katsayısı ve uç hız oranı

Rüzgardan elde edilecek gücü ifade eden formülasyon incelendiğinde, rotor çapının gücü etkileyen önemli parametrelerden biri olduğu görülmektedir. Bu durumda, rüzgar türbininin kanat çapı ne kadar büyükse o kadar fazla rüzgarı süpürür ve elde edilecek güç değeri de o nispette büyür. Rüzgar türbinlerinin performansını etkileyen ana faktörlerden biri de farklı rüzgar hızlarında, türbinin üretebileceği güç değeridir. Rüzgar türbinlerinin güç eğrisi genellikle rüzgar türbin üreticileri tarafından verilir. Makinenin güç eğrisi sistemin aerodinamik ve üretim verimliliğini yansıtır[25]. Şekil 2.6'da Vestas rüzgar türbin imalatçısına ait V90-3MW'lık bir türbin için rüzgar hızı ile üretilen güç arasındaki ilişki görülmektedir[26].



Şekil 2.6: Vestas V90-3MW'lık rüzgar türbini güç eğrisi

Rüzgar türbinleri temelde üç farklı modda çalıştırılmaktadır. Bunlar;  
Mod-1 Değişken rüzgar hızlı işletme/optimum uç hız oranı

$$u_c \leq u \leq u_B \quad (2.5)$$

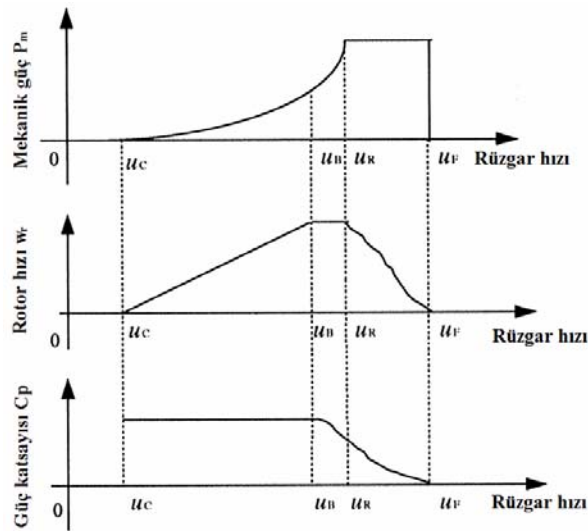
Mod-2 Sabit hızda işletme/değişken uç hız oranı

$$u_B \leq u \leq u_R \quad (2.6)$$

Mod-3 Değişken hızda işletme/ sabit güç

$$u_R \leq u \leq u_F \quad (2.7)$$

Burada:  $u_c$  (cut in speed) rüzgar türbininin üretime geçmesi için gerekli minimum rüzgar hızını temsil etmektedir.  $u_B$  rotor hızının ulaşabileceği izin verilen maksimum rüzgar hızını,  $u_R$  anma rüzgar hızını,  $u_F$  (cut out speed) rüzgar türbinini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızını temsil etmektedir. Şekil 2.7’de, rüzgar türbini üç farklı modda çalıştırıldığında türbinin mekanik gücü, rotor hızı ve güç katsayısının değişimi görülmektedir[27].



Şekil 2.7: Rüzgar türbini çalışma hızları

## 2.2. Rüzgar Türbin Tipleri ve Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler

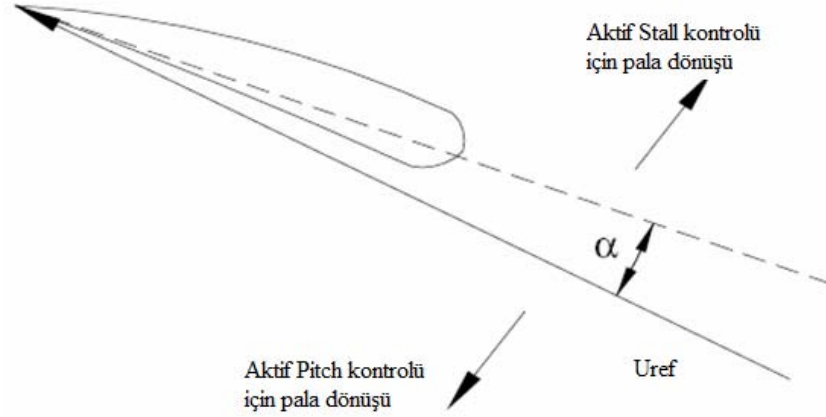
Rüzgar türbinleri, teknolojisi her geçen gün hızla gelişen enerji makineleridir. Türbin teknolojisinin gelişmesinin yanısıra türbin maliyetlerinin azaltılabilmesi için ARGE çalışmaları yürütülmektedir. Geçmişten günümüze rüzgar türbinlerinin gelişim süreci incelendiğinde, kanatlarda kullanılan malzemenin cinsinden generatör ve kontrol sisteminin yapısı ve tipine kadar birçok teknolojik gelişme görülmektedir. Rüzgar türbin konfigürasyonları temelde stall, pitch, aktif stall olmak üzere üç farklı güç kontrol türünden oluşmaktadır.

Stall kontrollü türbinler, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş palalara sahip sistemlerdir. Bu sistemler, rüzgar hızındaki artış ile birlikte hücum açısının da artması ve palanın stall etkisine girmeye başlaması sayesinde güç kontrolü sağlarlar. Pala geometrisi, nominal hızın üzerindeki rüzgar hızlarında performansı düşürecek şekilde tasarlanmıştır. Kanat, kök bölgesinden başlayarak stall etkisine girer. Bu sayede, tasarım hızı üzerindeki hızlarda, aşırı yükleme sebebiyle türbin sistemlerinde oluşacak hasarlar önlenir. Stall kontrollü sistemler, nominal hızın üzerindeki hızlarda, pitch kontrollü türbinler gibi sabit bir güç seviyesini koruyamamaktadırlar. Bu sebeple nominal hız üzerinde enerji üretimi pitch kontrollü türbinlerden düşüktür. Stall kontrollü türbinlerin temel avantajları, rotorda hareketli parçalara sahip değildirler ve karmaşık bir kontrol sistemine ihtiyaç duymazlar[28].

Pitch kontrollü türbinlerde kanatlar, stall kontrollü olanların aksine göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş değildirler. Kanat, pitch kontrol mekanizması sayesinde rüzgar hızına göre eksen etrafında döndürülebilmektedir. Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlamaktadırlar. Fakat stall etkisine göre tasarlanmadıkları için ani rüzgarlara karşı hassastırlar[28].

Aktif stall kontrolü, bundan önce söz edilen iki kontrol sistemine göre daha yeni bir tasarımıdır. Bu sistemde de pitch kontrollü türbine benzer şekilde güç kontrolü için, pala kendi eksen etrafında döndürülerek nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sağlanır. Fakat, dönüş yönü pitch kontrolündeki ile ters istikamettir. Pitch kontrollü türbin, nominal hızın üzerine çıkıldığında palayı, hücum açısını düşürecek

şekilde döndürürken, aktif stall kontrollü bir türbin, palayı ters yönde çevirip, türbini stall etkisine sokar. Bu dönüş hareketleri Şekil 2.8’de görülmektedir [28].



Şekil 2.8: Rüzgar türbin kanadının dönüş hareketi

Tablo 2.1’de farklı tipte rüzgar türbin konfigürasyonları görülmektedir. Rüzgar türbin konfigürasyonunda özel bir isimlendirme kullanılmaktadır. Bir harf ve bir rakamdan oluşan bu özel isimlendirme rüzgar türbininin güç kontrolü hakkında bilgi vermektedir. Örneğin, Tip -A0 rüzgar türbini sabit hızlı rüzgar türbini olup, güç kontrolü stall kontrollü olduğu anlaşılmaktadır. Günümüzde halen bu konfigürasyonlar rüzgar türbin endüstrisinde kullanılmaktadır. Tablo 2.1’de gri renkte belirtilen konfigürasyonlar rüzgar türbin endüstrisinde kullanılmamaktadır [29].

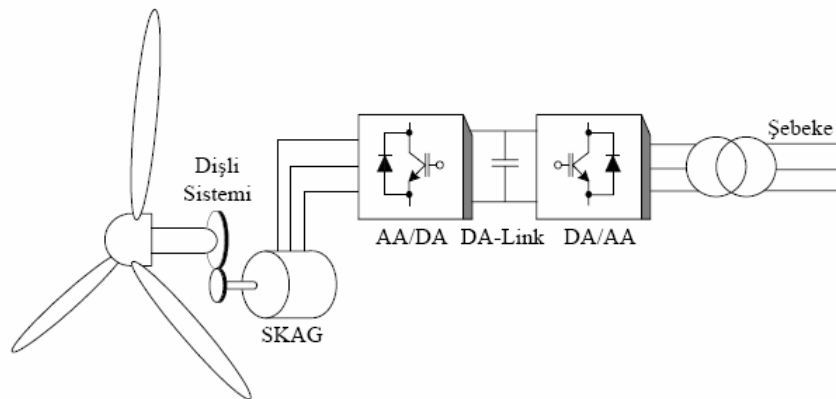
Tablo 2.1: Rüzgar türbin konfigürasyonları

| Hız kontrolü   |        | Güç kontrolü |         |             |
|----------------|--------|--------------|---------|-------------|
|                |        | Stall        | Pitch   | Aktif stall |
| Sabit hızlı    | Tip -A | Tip -A0      | Tip -A1 | Tip -A2     |
| Değişken hızlı | Tip -B | Tip -B0      | Tip -B1 | Tip -B2     |
|                | Tip -C | Tip -C0      | Tip -C1 | Tip -C2     |
|                | Tip -D | Tip -D0      | Tip -D1 | Tip -D2     |

### 2.2.1. Sabit hızlı rüzgar türbinleri (Tip -A)

Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde generatör olarak sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) ler kullanılır. Türbin ile generatör arasında bir dişli kutusu bulunmakta ve

devir sayısı dönüştürülmektedir. Sincap kafesli asenkron makinaların rotorunda sargı olmaması yani bir uyarma devresinin olmaması gerekli reaktif enerjinin dışarıdan sağlanması anlamına gerekir. Bu tipteki rüzgar güç üretim sistemlerinde üretilen güç rotor hızına ve kaymaya bağlı olarak değişim gösterir. Rotor hız değişimleri çok küçük olup, yaklaşık %1-2'dir. Bu yüzden bu tip rüzgar türbinlerine “Sabit hızlı rüzgar türbinleri” denilmektedir[29]. Bu sistemde stator sargısı, DA linkinin iki tarafına, arka arkaya bağlı gerilim kaynaklı iki DGM inverterden meydana gelen, dört bölgeci güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki konverterin kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter ise sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA linkini regüle eder. Rüzgar güç sistemlerinde kullanılan SKAG'nin sağladığı birtakım avantajlar bulunmaktadır. Bunlar, SKAG'nin generatörünün fırçasız bir yapıda olması, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olması nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar. Doğrultucu, generatör için programlanabilir bir uyarım oluşturabilmektedir. İnverter, harmonik kompanzatör olarak çalıştırılabilmektedir. Generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşılaştırması ve stator tarafındaki konverterin, makinanın ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır [30-32].



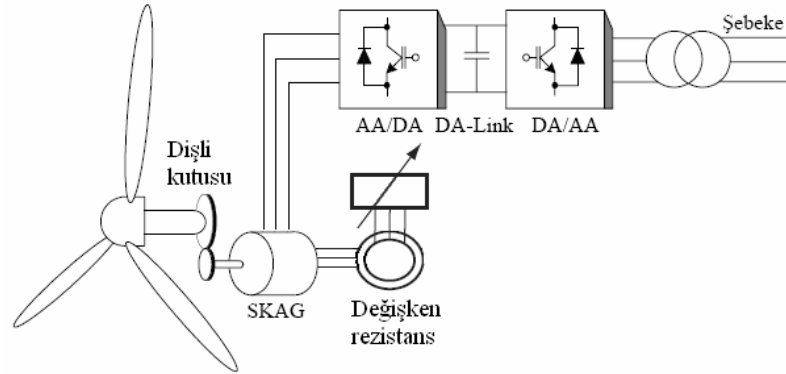
Şekil 2.9: Sabit hızlı rüzgar türbinleri

Günümüzde Tip-A'nın bütün çeşitleri (A0, A1, A2) rüzgar türbini endüstrisinde kullanılmaktadır. Tip-A0 versiyonu Danimarkalı rüzgar türbin üreticileri tarafından

geliştirilen bir türbin tipidir. Tip-A0 versiyonunun yapısının basit, dayanıklı ve fiyatının düşük olması gibi etkenler popülaritesini arttırmaktadır. Tip-A1 pitch kontrol yapısının ana avantajı, türbin çıkış gücünün kontrol edilebilirliğidir. Pitch mekanizması güç dalgalanmalarını önleyecek kadar hızlı bir mekanizma değildir. Pitch mekanizması kanat açısını ayarlamak suretiyle rüzgardaki yavaş değişimleri kompanse edebilir; fakat ani rüzgar değişimlerinde bu mümkün değildir. Tip-A2 de güç kontrolü aktif stall ile gerçekleştirilir. Aktif stall kontrol son zamanlarda oldukça popülerdir. Bu konfigürasyon temel olarak stall regüleli sistemin bütün güç kalitesi özelliklerini kapsamaktadır. Fakat kontrolör ve pitch mekanizmasından dolayı fiyatı en yüksek güç kontrol mekanizmasıdır [29].

### 2.2.2. Sınırlı değişken hızlı rüzgar türbinleri (Tip -B)

Sınırlı değişken hızlı rüzgar türbinleri Optislip olarak bilinen değişken rotor dirençli değişken hızlı rüzgar türbinleridir. Generatör olarak rotoru sargılı asenkron generatorler (RSAG) kullanılır. 1990'ların ortalarından beri Danimarka menşeli rüzgar türbin üreticisi Vestas firması tarafından kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da sınırlı değişken hızlı rüzgar türbinlerinin yapısı görülmektedir.



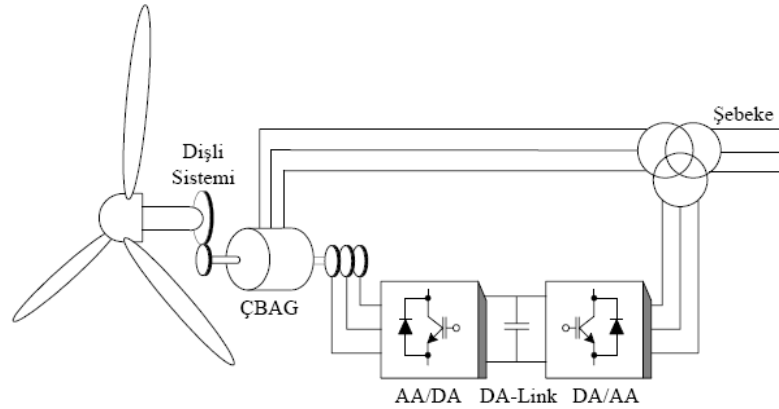
Şekil 2.10: Sınırlı değişken hızlı rüzgar türbinleri

Optislip yapıları değişken rotor dirençli değişken hızlı rüzgar türbinleri, rüzgarın ani ve sert esmesi sırasında rüzgar türbinindeki yükler, çok hızlı güç elektroniği elemanları kullanılarak minimuma indirmektedir. Generatör doğrudan şebekeye bağlanabilmekte ve kapasitör bankası ile reaktif güç kompanzasyonu sağlanmaktadır. Güç kalitesi bakımından kaliteli şebeke bağlantısı, yumuşak yol vericiler kullanılarak sağlanmaktadır. Bu türbin tipinin en önemli özelliği rotor şaftına monteli optik olarak

kontrol edilebilen konverter tarafından rotor rezistansının değiştirilebilmesidir. Toplam rotor rezistansı değiştirilerek kayma ve güç çıkışı kontrol edilir. Dinamik hız kontrol aralığı, değişken rotor rezistansının büyüklüğüne bağlı olup, genellikle hız aralığı senkron hızın %1 - %10 arasındadır[29].

### 2.2.3. Değişken hızlı rüzgar türbinleri (Tip-C)

Değişken hızlı rüzgar türbinleri çift beslemeli asenkron generator (ÇBAG) yapısı olarak bilinirler. Bu konseptte, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanmıştır. Rotor sargısı ise iki adet back-to-back gerilim kaynaklı DGM tekniğini kullanan inverterden oluşan, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Genellikle, rotor tarafındaki konverter elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar.



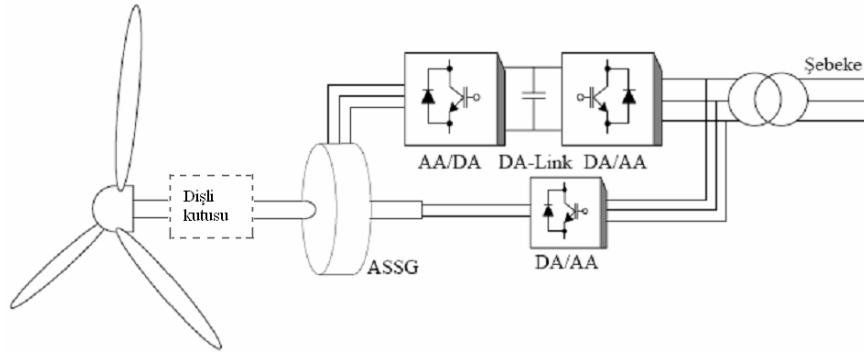
Şekil 2.11: Değişken hızlı rüzgar türbinleri

Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, DA linkini regüle eder. Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan konverter sistemine sahip olduğu için toplam sistem gücünün yaklaşık %25'i oranında bir inverter kullanılmaktadır. Bu durumda, inverter maliyeti azaltır. Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0.25 p.u.'lik kısmına hitap ettiği için, inverter filtrelerinin maliyeti azalmaktadır. Aynı zamanda inverter harmonikleri, toplam sistem harmoniklerinin daha küçük bir bölümünü temsil etmektedir. Ayrıca bu makina dış bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir. OptiSlip ile karşılaştırıldığında frekans konverterin büyüklüğüne bağlı olarak dinamik hız aralığı daha geniştir. Tipik olarak, hız aralığının %30-%40'ını kapsamaktadır. Bu konsepti cazip kılan

konverterin ekonomik olmasıdır. Şekil 2.11’de kısmi skalalı frekans konverterli, değişken hızlı rüzgar türbinlerinin yapısı görülmektedir[31-33].

#### **2.2.4. Tam skalalı frekans konverterli değişken hızlı rüzgar türbinleri (Tip-D)**

Tam skalalı frekans konverterli değişken hızlı rüzgar türbinleri, frekans konverterler ile şebekeye bağlanan değişken hızlı rüzgar türbinleridir. Rotoru sargılı (alan sargılı) senkron generatör veya sabit mıknatıslı senkron generatör ve rotoru sargılı asenkron generatörler generatör olarak kullanılabilir. Tam değişken hızlı rüzgar türbinlerinin bazılarında dişli kutusu mekanizması bulunmamaktadır. Bu durumda, büyük kanat çaplı ve çok kutuplu direkt drive generatörler kullanılır. Enercon, Made ve Lagerwey rüzgar türbin firmalarının direkt drive konfigürasyonu kullanılarak yapılmış rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Şekil 2.12’de tam skalalı frekans konverterli değişken hızlı rüzgar türbinleri görülmektedir. Rotoru sargılı senkron generatörlü tam skalalı frekans konvertörlü rüzgar türbinlerinde stator sargısı, dalga genişlik modülasyonu (DGM) tekniğine göre anahtarlama yapabilen, çift yönlü akım akışının olabildiği (back-to-back) gerilim kaynaklı iki inverterden meydana gelmiş dört bölgeci bir güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Stator tarafındaki konverter elektromanyetik torku, şebeke tarafındaki konverter ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder. Çıkık kutuplu alan sargılı senkron generatörün kullanılmasının en büyük faydası, makinanın güç faktörünün doğrudan kontrolüne müsaade edilmesidir. Bunun sonucu olarak, stator akımı bir çok işletim durumunda minimize edilebilir. Bu generatörlerin kutup eğimi indüksiyon makinalarına göre daha küçük olabilir. Bu durum dişli kutusu kullanılmadığı düşük hızlı çok kutuplu makinalar elde edilmesinde önemli bir özellik olabilmektedir. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü regüle etmek için, nominal rüzgar gücünün 1.2 katı büyüklüğünde konverterler kullanılması gerekmektedir.

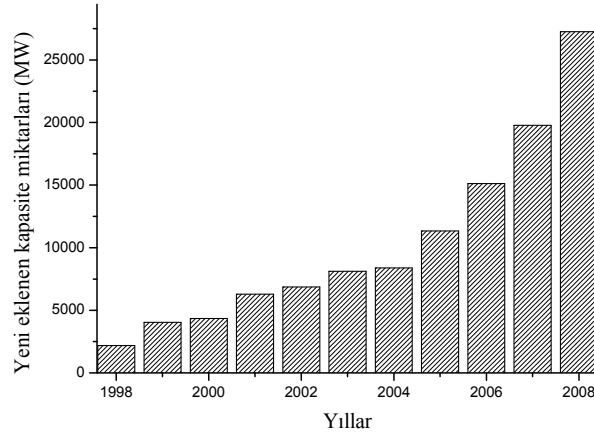


Şekil 2.12: Tam skalalı frekans konverterli değişken hızlı rüzgar türbinleri

Kalıcı mıknatıslı senkron generatörlü tam skalalı frekans konvertörlü rüzgar türbinlerinde, stator tarafı generatör ve DA linki arasına DGM tekniğini kullanan doğrultucu yerleştirilmiştir ve DGM inverter üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Bu sistemin avantajı; generatör ve güç elektroniği devresindeki kayıpları azaltmak için optimal çalışma noktasına yakın bir çalışmaya müsaade eden alan yönlendirmeli kontrolün kullanılmasıdır[30, 32-34].

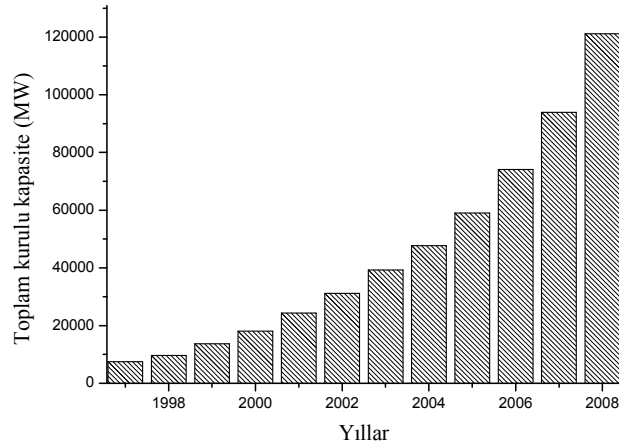
### 2.3. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar gücü, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın kullanılanı olup dünyada hızla büyüme gösteren bir enerji kaynağıdır. Bu duruma paralel olarak, dünyada rüzgar santrallerinin kurulu gücü de hızlı bir artış göstermektedir. Dünyanın rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek yada tahmin etmek oldukça zordur. Fakat yapılan birtakım bilimsel çalışmalar ile dünyanın teknik potansiyelinin sadece %10'unun kullanılmasıyla, dünya elektrik enerjisi gereksiniminin tamamının karşılanabileceğini gösterilmiştir[35]. Dünya rüzgar enerjisi potansiyelinin 50° kuzey ve 50° güney enlemleri arasındaki alanda 26,000 TWh/yıl olduğu, ekonomik ve diğer nedenlerden dolayı 9,000 TWh/yıl'lık kapasitenin kullanılabilir olduğu tahmin edilmektedir. Yine, yapılan çalışmalara göre dünya karasal alanları toplamının  $107.10^6 \text{ km}^2$  olduğu ve %27'sinin yıllık ortalama 5.1 m/s'den daha yüksek rüzgar hızının etkisi altında kaldığı belirtilmektedir[36]. Dünyada rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi 1997 yılında 7480MW iken, 2008 yılı sonunda 121.188MW'a ulaşmıştır. Yıllara göre kurulu kapasitenin artış miktarları incelendiğinde, her yıl bir önceki yıla göre ortalama %20'lik bir artış gözlenmiştir. Kurulu güce eklenen kapasite miktarları Şekil 2.13'de görülmektedir[37].



Şekil 2.13: Dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücüne eklenen kapasite miktarları

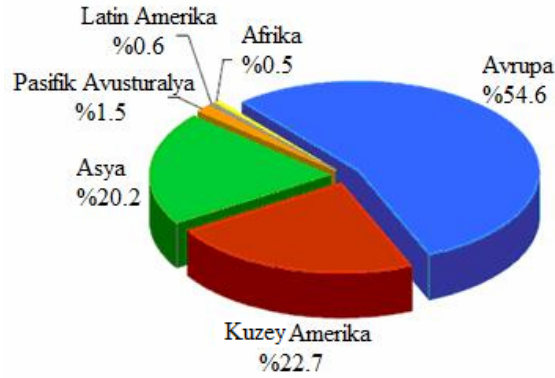
Her yıl bir önceki yıla göre sürekli olarak artan kapasite miktarlarının yıllara göre dağılımına bakıldığında, dünya genelinde rüzgar enerjisine olan ilginin boyutları fark edilebilmektedir. 2008 yılı sonuna gelindiğinde rüzgar enerjisi kurulu kapasiteye 27.261MW’lık kapasitenin eklendiği görülmektedir. Eklenen bu kapasite 2008 yılında rüzgar enerjisi kurulu gücünde %29’luk bir büyüme sağlamıştır. 2005, 2006, 2007 ve 2008 sonunda rüzgar enerjisi kurulu güçlerin değişimi sırasıyla 59.024MW, 74.151MW, 93.927MW ve 121.188MW’tır. Şekil 2.14’te dünyada rüzgar enerjisi kurulu kapasitenin yıllara göre değişimi görülmektedir[37].



Şekil 2.14: Dünyada rüzgar enerjisi kurulu kapasitenin yıllara göre değişimi

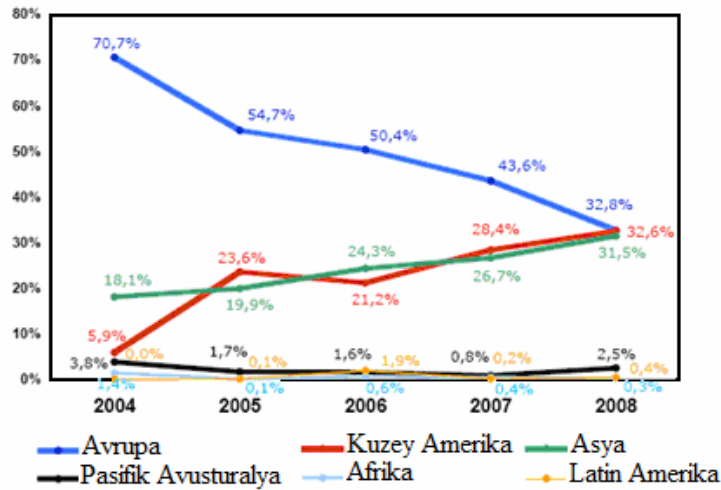
Dünyada enerji ihtiyacını karşılamada rüzgar enerjisinin kullanımı kıtasal olarak irdelendiğinde, 2008 yılında toplam kurulu kapasitenin yaklaşık %54.6’sı Avrupa kıtasında, %22.7 ile ikinci sırada Güney Amerika ve üçüncü olarak %20.2’de Asya

kıtasında yer almaktadır. Şekil 2.15’de 2008’de, toplam kurulu kapasitenin kıtasal bazda dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.15: 2008 yılında eklenen rüzgar enerjisi kurulu kapasitenin kıtasal dağılımı

Rüzgar enerjisi kurulu kapasitesine eklenen yeni kapasitelerin yıllara göre kıtasal bazda dağılımı Şekil 2.16’da görülmektedir. Şekil 2.15 irdelendiğinde toplam kurulu kapasitenin kıtasal dağılımına göre eklenen kapasiteler karşılaştırıldığında Avrupa’da rüzgar enerjisi kurulu kapasitesine yeni eklenen kapasitelerin oranında son beş yılda %50’lere varan bir azalış söz konusudur. Aynı zamanda Asya ve Güney Amerika’da ise yaklaşık %50’lere varan bir artış gerçekleşmiştir. 2008 yılı sonuna gelindiğinde ise eklenen kapasiteler üç kıta içinde artış oranları %32’lerde eşitlenmiştir.



Şekil 2.16: Rüzgar enerjisi kurulu güce eklenen kapasitelerin kıtasal bazda dağılımı

Dünyada 2008 yılı sonu rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi ülkeler bazında incelenecek olursa, dünyanın en büyük kurulu kapasitesine sahip ülkenin Amerika olduğu görülmektedir. 2008 yılına kadar dünyanın en büyük kurulu kapasitesine Almanya sahipken, 2008 yılı rüzgar enerjisi kurulu güce eklenen kapasiteler incelendiğinde,

Amerika'nın kurulu gücünü yaklaşık iki katına çıkardığı ve Almanyanın önüne geçtiği görülmektedir. Tablo 2.2'de son dört yılın rüzgar enerjisi kurulu kapasiteleri ve 2008 yılı eklenen kapasite ile 2008 yılında ait büyüme oranları verilmiştir.

Tablo 2.2: Ülkeler bazında 2008 yılı sonunda rüzgar enerjisi kurulu kapasiteler

| Sıralama | Ülkeler         | 2008 sonu toplam kurulu kapasite | 2008 yılı eklenen kapasite | 2008 yılı büyüme oranı | 2007 sonu Sıralama | 2007 sonu toplam kurulu kapasite | 2006 sonu toplam kurulu kapasite | 2005 sonu toplam kurulu kapasite |
|----------|-----------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|          |                 | [MW]                             | [MW]                       | [%]                    |                    | [MW]                             | [MW]                             | [MW]                             |
| 1        | Amerika         | 25,170                           | 8351.2                     | 49.7                   | 2                  | 16,818.8                         | 11,603                           | 9149                             |
| 2        | Almanya         | 23,902.8                         | 1655.4                     | 7.4                    | 1                  | 22,247.4                         | 20,622                           | 18,427.5                         |
| 3        | İspanya         | 16,740.3                         | 1595.2                     | 10.5                   | 3                  | 15,145.1                         | 11,630                           | 10,027.9                         |
| 4        | Çin             | 12,210                           | 6298                       | 106.5                  | 5                  | 5912                             | 2599                             | 1266                             |
| 5        | Hindistan       | 9587                             | 1737                       | 22.1                   | 4                  | 7850                             | 6270                             | 4430                             |
| 6        | İtalya          | 3736                             | 1009.9                     | 37                     | 7                  | 2726.1                           | 2123.4                           | 1718.3                           |
| 7        | Fransa          | 3404                             | 949                        | 38.7                   | 8                  | 2455                             | 1567                             | 757.2                            |
| 8        | İngiltere       | 3287.9                           | 898.9                      | 37.6                   | 9                  | 2389                             | 1962.9                           | 1353                             |
| 9        | Danimarka       | 3160                             | 35                         | 1.1                    | 6                  | 3125                             | 3136                             | 3128                             |
| 10       | Portekiz        | 2862                             | 732                        | 34.4                   | 10                 | 2130                             | 1716                             | 1022                             |
| 11       | Kanada          | 2369                             | 523                        | 28.3                   | 11                 | 1846                             | 1460                             | 683                              |
| 12       | Hollanda        | 2225                             | 478                        | 27.4                   | 12                 | 1747                             | 1559                             | 1224                             |
| 13       | Japonya         | 1880                             | 352                        | 23                     | 13                 | 1528                             | 1309                             | 1040                             |
| 14       | Avusturalya     | 1494                             | 676.7                      | 82.8                   | 16                 | 817.3                            | 817.3                            | 579                              |
| 15       | İrlanda         | 1244.7                           | 439.7                      | 54.6                   | 17                 | 805                              | 746                              | 495.2                            |
| 16       | İsveç           | 1066.9                           | 235.9                      | 28.4                   | 18                 | 831                              | 571.2                            | 509.1                            |
| 17       | Avusturya       | 994.9                            | 13.4                       | 1.4                    | 14                 | 981.5                            | 964.5                            | 819                              |
| 18       | Yunanistan      | 989.7                            | 116.5                      | 13.3                   | 15                 | 873.3                            | 757.6                            | 573.3                            |
| 19       | Polonya         | 472                              | 196                        | 71                     | 24                 | 276                              | 153                              | 73                               |
| 20       | Norveç          | 428                              | 95.1                       | 28.5                   | 19                 | 333                              | 325                              | 268                              |
| 21       | Mısır           | 390                              | 80                         | 25.8                   | 21                 | 310                              | 230                              | 145                              |
| 22       | Belçika         | 383.6                            | 96.7                       | 33.7                   | 22                 | 286.9                            | 194.3                            | 167.4                            |
| 23       | Çin Taipeh      | 358.2                            | 78.3                       | 28                     | 23                 | 279.9                            | 187.7                            | 103.7                            |
| 24       | Brezilya        | 338.5                            | 91.5                       | 37                     | 25                 | 247.1                            | 236.9                            | 28.6                             |
| 25       | Türkiye         | 333.4                            | 126.6                      | 61.2                   | 26                 | 206.8                            | 64.6                             | 20.1                             |
| 26       | Yeni Zelanda    | 325.3                            | 3.5                        | 1.1                    | 20                 | 321.8                            | 171                              | 168.2                            |
| 27       | Güney Kore      | 278                              | 85.9                       | 44.7                   | 27                 | 192.1                            | 176.3                            | 119.1                            |
| 28       | Bulgaristan     | 157.5                            | 100.6                      | 176.7                  | 33                 | 56.9                             | 36                               | 14                               |
| 29       | Çek Cumhuriyeti | 150                              | 34                         | 29.3                   | 28                 | 116                              | 56.5                             | 29.5                             |
| 30       | Finlandiya      | 140                              | 30                         | 27.3                   | 29                 | 110                              | 86                               | 82                               |

Dünyanın en büyük kurulu kapasitesine sahip ülkeyi sırasıyla Almanya, İspanya ve Çin takip etmektedir. Türkiye ise 2007 yılı sonu itibari ile 26. sırada iken 2008 yılı sonunda 25. sıraya yerleşmiştir. 2008 yılı sonunda rüzgar enerjisi kurulu gücü büyüme oranlarına bakıldığında en büyük artışın %176.7 oranında Bulgaristan da olduğu görülmektedir. Bulgaristan'ı %106.5 , 82.8 , 61.5 oranlarında sırasıyla Çin Avusturalya ve Türkiye takip etmektedir[37]. Türkiye, rüzgar enerjisi potansiyeli olarak oldukça elverişli bir coğrafyaya sahiptir. Türkiye rüzgar enerjisi açısından Avrupa'nın en iyi teknik potansiyeline sahip ülke konumundadır. Teorik olarak bir yılda 160TWh'lık rüzgar enerji potansiyeli olan Türkiye, enerji tüketiminin yaklaşık iki katını rüzgardan elde edebilme potansiyeline sahiptir. Avrupa ülkelerinin teknik Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Tablo 2.3'de görülmektedir[2].

Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi 1998 yılında 9MW iken 2001 yılına gelindiğinde bu değer 19MW'ları bulmuştur. Dünya rüzgar enerjisi birliğinin verilerine göre Türkiye'de rüzgar enerjisi kurulu üretim kapasitesi 2006, 2007, 2008 yılı sonunda yaklaşık olarak sırasıyla 64.6MW, 206.8MW ve 333.4MW'tır [37].

Türkiye Avrupanın en fazla rüzgar enerjisi teknik potansiyeline sahip olmasına rağmen, rüzgar enerjisine olan ilgi fazla değildir. Bu durumun birçok sebebi bulunmaktadır. Bu sebeplerden en önemlisi rüzgardan üretilen elektrik enerjisinin devlet tarafından satın alma garantisinin verilmemesidir. 2006 yılına kadar inşa edilen rüzgar güç üretim santralleri lokal olarak bir yerin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılmaktaydı. 2006 yılında kurulu gücün 17.4MW'lık kısmı Yap İşlet Devret (YİD) modeli ile devlet tarafından yaptırılan santrallerdir. 64.6MW'lık kurulu kapasitenin YİD modeli ile yaptırılan kısmı çıkarıldığında geriye kalan kısım özel sektör tarafından kendi elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla yapılan santrallerdir.

Tablo 2.3: Avrupa ülkelerinin teknik rüzgar enerjisi potansiyeli

| Ülke       | Toplam Alan<br>(1000km) | Teknik Potansiyel |         |
|------------|-------------------------|-------------------|---------|
|            |                         | GW                | TWh/yıl |
| Avusturya  | 84                      | 2                 | 3       |
| Belçika    | 31                      | 2                 | 5       |
| Danimarka  | 43                      | 14                | 29      |
| Finlandiya | 337                     | 4                 | 7       |
| Fransa     | 547                     | 42                | 85      |
| Almanya    | 357                     | 12                | 24      |
| İngiltere  | 244                     | 57                | 114     |
| Yunanistan | 132                     | 22                | 44      |
| İrlanda    | 70                      | 22                | 44      |
| İtalya     | 301                     | 335               | 69      |
| Norveç     | 324                     | 38                | 76      |
| Portekiz   | 92                      | 7                 | 15      |
| İspanya    | 505                     | 43                | 86      |
| Türkiye    | 781                     | 83                | 166     |

2007 yılında 5346 nolu yenilenebilir enerji kanununun yürürlüğe girmesiyle rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisinin devlet tarafından enerji fazlasının satın alım garantisi verilmiştir. Bu kanunun yürürlüğe girmesiyle rüzgar enerjisinden elektrik üretimi amaçlı güç üretim santrali kurmak için Elektrik Piyasaları Düzenleme Kurumu'na (EPDK) lisans başvurularında ciddi bir artış gözlenmiştir. 2007 yılının Kasım ayında EPDK'ya resmi olarak 78GW'lık lisans başvurusunun gerçekleştiği açıklanmıştır. 78GW'lık başvurunun sadece 2GW'lık kısmına lisans izni verilmiştir. 5346 nolu yenilenebilir enerji kanununun yürürlüğe girmesiyle ile kurulu güç 2007 yılı sonunda 206.8MW'a ulaşmıştır. 2006 yılı ile 2007 yılları arasında üç kat artmıştır. Aynı şekilde 2007 yılı ile 2008 yılı arasında iki katına yakın bir artış söz konusu olmuştur[1,37, 38].

Türkiye yedi bölgeden oluşmakta olup, her bölge iklim ve yerçekilleri bakımından birbirine göre farklılıklar göstermektedir. Türkiye bölgelerinin ortalama rüzgar hızları ve m<sup>2</sup> başına ortalama rüzgar güç yoğunlukları belirlenmiş ve Tablo 2.4'de görülmektedir. Tablo 2.4 irdelendiğinde, ortalama rüzgar hızı ve ortalama rüzgar güç yoğunluğu en yüksek olan bölgeler sırasıyla Marmara, Günedoğu Anadolu ve Ege bölgeleridir[1].

Rüzgar enerjisinden ülkeler potansiyelleri ölçüsünde yararlanabilmektedir. Bir bölgede rüzgar enerjisinden enerji üretmek için bölgenin rüzgar yönünden elverişli

olup olmadığını, rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmaları yapılarak belirlenmektedir .

Tablo 2.4: Bölgelerin ortalama rüzgar yoğunluğu ve ortalama rüzgar hızları

| Bölge             | Yıllık ortalama rüzgar güç yoğunluğu ( $W/m^2$ ) | Yıllık ortalama rüzgar hızları (m/s) |
|-------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Marmara           | 51.9                                             | 3.3                                  |
| Güneydoğu Anadolu | 29.3                                             | 2.7                                  |
| Ege               | 23.5                                             | 2.6                                  |
| Akdeniz           | 21.4                                             | 2.5                                  |
| Karadeniz         | 21.3                                             | 2.4                                  |
| İç Anadolu        | 20.1                                             | 2.5                                  |
| Batı Anadolu      | 24.0                                             | 2.5                                  |

Rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmaları noktasal yada lokal olarak yapılmaktadır. Potansiyel belirleme çalışmaları sonucu elde edilecek ortalama rüzgar hızı ve yönü bilgileri ile kurulması planlanan rüzgar santralının gücü ve yıllık ortalama üreteceği enerji miktarı hesaplanır. Ülkemizin bir çok yerinde lokal anlamda rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmaları yürütülmüş ve bu çalışmalar literatürde yerini almıştır[1,39-52]. Bunlardan birkaçını sıralamak gerekirse;

Türkiye'nin Ege bölgesinde yer alan Bozcaada'nın[39], Gökçeada'nın[40], aynı bölgede yer alan Çeşme ilçesinin[41], İzmirde bulunan İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü yerleşkesinin[42], Kütahya ilinin[43], Marmara bölgesinde Balıkesir ili Bandırma bölgesinin[44], Kırklareli ilinin[45], Uludağ –Bursa ilinin [46], İç Anadolu bölgesinde Akhisar Konya ilinin [47,48], Doğu Anadolu bölgesinde Maden Elazığ ilinin[49,50], Akdeniz bölgesinde İskenderun Hatay ilinin[51], Güneydoğu Anadolu bölgesinde Gaziantep Nurdağı'nın[52] rüzgar enerjisi potansiyellerini belirlemeye yönelik yapılmış çalışmalardan sadece birkaçıdır. Bu çalışmalar literatüre katkıda bulunulmasının yanı sıra Türkiye'nin rüzgar atlasının oluşturulmasına da katkıda bulunmuştur.

Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyel atlası (REPA) Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) tarafından Türkiye rüzgar enerjisi sektörünün gelişimine katkı sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir meteorolojik araçtır. REPA, Türkiye coğrafyasının tüm kara ve deniz alanlarını kapsayacak şekilde üç ayrı nümerik hava analiz modelinin uzun yıllara ait gerçekleşmiş meteorolojik parametrelerle geriye

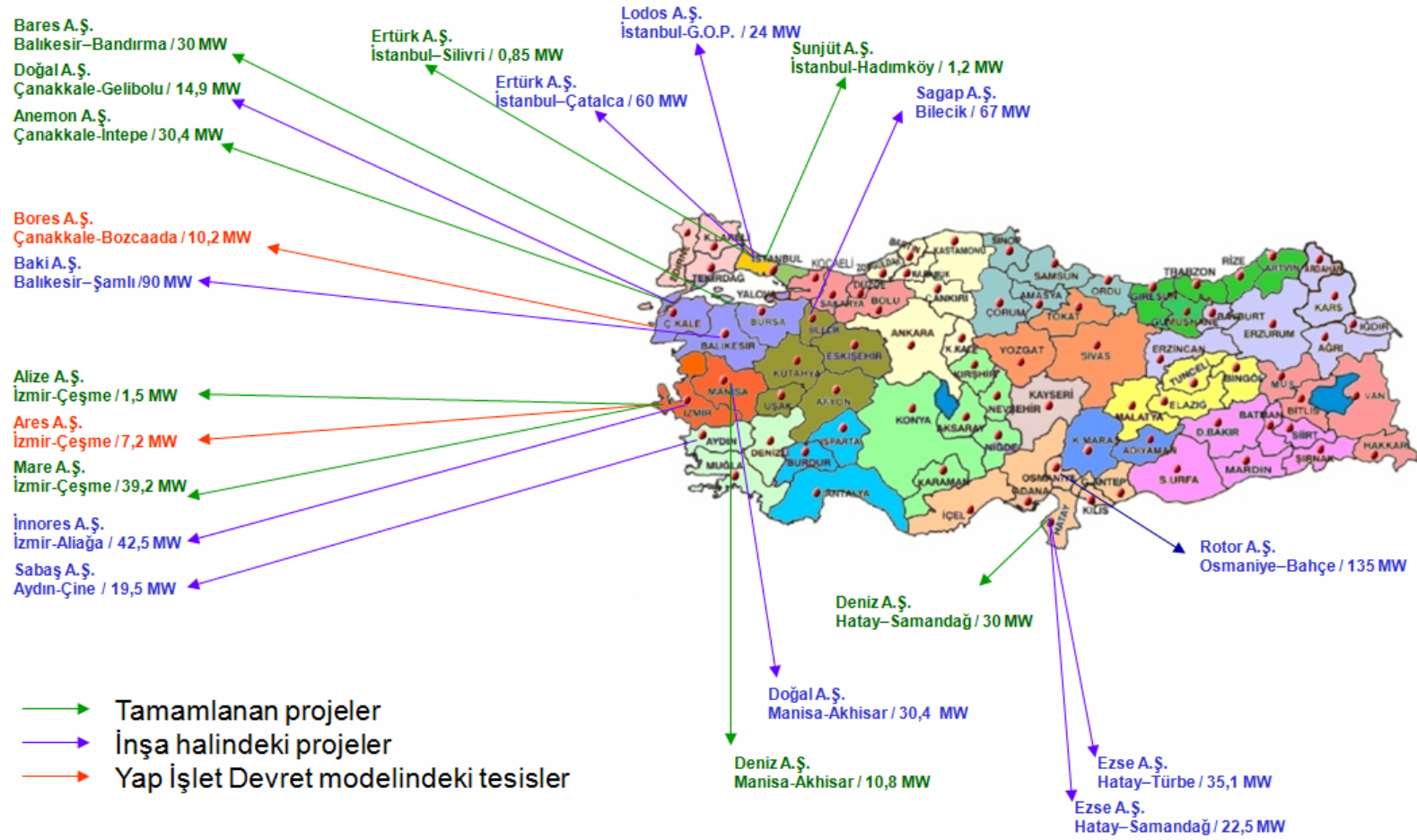
doğru çalıştırılması sonucu üretilmiş, 200m×200m çözünürlüğe sahip ileri tekniklerle gerçekleştirilmiş bir rüzgar atlasıdır. REPA, Türkiye coğrafyası üzerinde 200m×200m'lik alana sahip tüm noktalarda rüzgar kaynak bilgilerine erişim sağlanmasına imkan tanımaktadır. Özellikle rüzgar enerjisi yatırımı yapmak isteyen yatırımcıların gereksinimleri dikkate alınarak; rüzgar kaynak bilgileri değişik tematik haritalarla entegre edilerek zaman ve maddi tasarruf sağlanması öngörülmüştür. REPA'dan saatlik ortalama rüzgar hızı verileri elde edilmektedir. REPA daha öncede belirtildiği gibi nümerik bir yaklaşımla sonuç elde edip, kullanıcılara sunduğundan dolayı REPA rüzgar santrali kurulması planlanan yerler hakkında tahmini bilgi veren bir atlasıdır. Bu yüzden rüzgar enerjisi planlamalarında REPA'dan alınan bilgiler doğrudan kullanılmamalıdır. EIE'inde belirttiği üzere rüzgar ölçüm direği dikip gerçek veriler elde etmeden sadece REPA bilgileri ile rüzgar enerjisi planlama çalışmaları yapmak, rüzgar güç üretim sistemi kurmak ya da lisans için başvuruda bulunulması tavsiye edilmemektedir[53].

Türkiye'de rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmiş, enerji üretim lisansı alınmış ve enerji üreten rüzgar güç üretim santralleri bulunmaktadır. Türkiye'de 2008 yılı ilk altı aylık döneme ait rüzgar enerjisi üretim santral projelerinin hangi aşamada olduğunu gösteren harita Şekil 2.17'de görülmektedir. Haritada, kırmızı olarak işaretlenen kısımlar ilk yapılan rüzgar enerjisi üretim santralleri olup, Türkiye'nin yap işlet devret modeli (YİD) ile özel sektöre yaptırdığı santrallerdir. Yeşil renk ile işaretlenmiş olan kısımlar tamamlanan ve günümüzde işletilen rüzgar enerjisi üretim santrallerini göstermektedir ve son olarak mor renk ile belirtilmiş kısımlar ise inşa halinde olan rüzgar enerjisi üretim santrallerini ifade etmektedir. Rüzgar enerjisi güç üretim lisansı alınmış ve halen inşa halinde olan rüzgar güç üretim santrallerinin toplam kapasite gücü 198MW'dır. Lisans sözleşmesi yapılan ve türbin tedarik seviyesinde olan rüzgar santral projelerinin toplam kapasitesi 1.068GW'tır. Ayrıca Türkiye'deki rüzgar enerjisi üretim santralleri ve özellikleri hakkında detaylı bilgiler EK-I'de görülmektedir.

Mevcut işletmede olan rüzgar güç santralleri ve 2009 yılı ilk yarısında devreye girecek olan RES'lerin ülkemiz coğrafyasında dağılımına bakıldığında genellikle Ege, Marmara ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaştıkları görülmektedir. Bu dağılımın bir sonucu da RES'lerin genellikle nüfusun yoğun olduğu bölgelerde kuruluyor

olmasıdır. Bu bölgelerde enerji tüketiminin de fazla olduğu göz önünde bulundurulursa bu durum bir avantaj olarak kabul edilebilir. Enerjiyi uzak noktalardan bu alanlara iletirken yaşanan kayıp bu sayede asgariye indirilebilir. EK-I’de verilen bilgiler incelendiğinde kullanılan ya da kullanılması planlanan rüzgar türbinleri, sektörün önde gelen firmalarının ürettiği rüzgar türbinleri olduğu görülmektedir[38].

Şekil 2.17: Rüzgar enerjisi üretim santrallerinin son durum



### **3. İSTATİSTİKSEL MODELLER İLE RÜZGAR POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

#### **3.1. Giriş**

Rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla sürdürülen çalışmaların temelini potansiyel belirleme çalışmaları oluşturmaktadır. Rüzgardan elektrik enerjisi üretimine yönelik yapılan çalışmalarda ayrıntılı rüzgar potansiyel değerlendirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, ilk aşamada rüzgardan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelere rüzgar ölçüm istasyonları kurulmaktadır. Rüzgar ölçüm istasyonlarından rüzgar hız ve yön verileri belirli zaman aralıklarında ölçülerek, düşük güçlü mikro işlemci kontrollü veri toplama sistemli veri kaydediciler ile veriler toplanmaktadır. Ölçümler genellikle 10m, 20m ya da 30m yükseklikte alınmakta ve veriler birer saatlik ya da 10 dakikalık periyotlarla toplanmaktadır. Toplanan veriler yazılım programı kullanılarak işlenmekte ve arşivlenmektedir. Rüzgar ölçüm verilerine anlam kazandırmak için istatistiksel modeller kullanılmaktadır. Rüzgar verilerinin istatistiksel analizinde hız zaman serisi yerine frekans dağılımının kullanılması daha çok tercih edilmektedir. Frekans dağılımının istatistiksel analizler için daha güvenilir sonuçlar verdiği literatürde yapılan çalışmalar sonucunda ispatlanmıştır.

#### **3.2. Rüzgar Datalarının Analizi**

Bir alanın rüzgar enerjisi potansiyelini tahmin etmek için o bölgeden elde edilen rüzgar datalarının doğru bir şekilde toplanması, yorumlanması ve analiz edilmesi gerekir. Ele alınacak bölgeye yakın meteorolojik istasyondan alınan uzun süreli rüzgar datası ön değerlendirme için kullanılabilir. Bu datanın, potansiyelini belirlemek istediğimiz alanın rüzgar profilini temsil etmek için dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Ölçüm alınan alanda kaydedilen rüzgar karakteristiği verileri

beş yılda yaklaşık %10 değişim gösterir. Bu değişimin sebepleri yıllık mevsimsel değişimler, yağış oranları ve diğer etkiler olarak ifade edilebilir[54,55].

Modern rüzgar ölçüm sistemleri belli zaman aralıklarında ortalama hız değerlerini vermektedir. Birçok rüzgar analiz yazılımında daha çok on dakika zaman aralığı esas alınarak ortalama rüzgar hız datası kaydedilir. On dakika zaman aralığının üzeri bir aralık kullanılmak isteniyorsa, yazılım bu doğrultuda ayarlamaya imkan tanımaktadır. Bu kısa dönem rüzgar datası, birtakım modeller ve yazılımlar yardımıyla rüzgarın sahip olduğu enerjiyi doğru bir şekilde tahmin etmek için gruplandırılır ve analiz edilir. Bu data ilgilenilen zaman aralığına göre gruplandırılır. Örneğin, farklı saatlerdeki mevcut enerjiyi tahmin etmek için, rüzgar dataları saatlik bazda gruplandırılır. Ayrıca, rüzgar dataları günlük, aylık ve yıllık bazda da sınıflandırılabilir.

### 3.2.1. Ortalama rüzgar hızı

Belirli bir alanda rüzgar karakteristiğini belirleyen en önemli bilgilerden biri ortalama rüzgar hızıdır. Ortalama rüzgar hızı ifadesi denklem 3.1’de görülmektedir.

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.1)$$

Burada  $V_i$  rüzgar hızı (m/s),  $n$  rüzgar hız veri sayısıdır. Örneğin, rüzgar hızı verileri bulunan Tablo 3.1’deki verilerden denklem 3.1 kullanarak ortalama hız  $V_m = 3.875$  m/s olarak hesaplanır. Fakat denklem 3.1 kullanılarak elde edilen ortalama rüzgar hız değerleri rüzgar güç hesaplamalarında kullanılmamalıdır. Aksi taktirde ortalama rüzgar hız değeri alınarak hesaplanan güç değeri ile her bir rüzgar hız değeri bireysel olarak hesaba katılması sonucu elde edilen sonuçlar arasında yaklaşık %20 hata payı oluşmaktadır. Rüzgar enerjisi hesaplamalarında ortalama hız bulunurken, her bir hız değerinin kübü hesaba katılır[55].

$$V_m = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3 \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

Ortalama rüzgar hızı denklem 3.2 ile de bulunabilir. Aynı hız değerleri ile bu kez denklem 3.2 kullanılarak ortalama hız değeri tekrar hesaplanmıştır. Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanan ortalama hız değeri  $V_m=4.591$  m/s'dir. Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanan ortalama rüzgar hızı, denklem 3.2 ile hesaplanan değerden yaklaşık olarak %15 düzeyinde farklılık göstermektedir. Sonuç olarak ortalama hız hesaplanırken denklem 3.2 kullanımı daha doğru sonuç vermektedir.

Tablo 3.1: Ortalama rüzgar hızının iki farklı türde hesaplanması

| Data sayısı | Rüzgar hızı (m/s) | Rüzgar hızlarının küpleri (m/s) |
|-------------|-------------------|---------------------------------|
| 1           | 2                 | 8                               |
| 2           | 4                 | 64                              |
| 3           | 3                 | 27                              |
| 4           | 5                 | 125                             |
| 5           | 6                 | 216                             |
| 6           | 7                 | 343                             |
| 7           | 3                 | 27                              |
| 8           | 1                 | 1                               |
|             | $V_m=3.875$       | $V_m=4.591$                     |

### 3.2.2. Rüzgar hızının dağılımı

Rüzgar potansiyelini değerlendirmede, belli bir sürede alınan ortalama rüzgar verisi haricinde önemli kritik faktörlerden bir diğeri de rüzgar verisinin dağılımıdır. Aynı ortalama rüzgar hız değerine sahip, iki alanda kurulan rüzgar türbinleri hız dağılımlarının farklı olmasından dolayı tamamıyla farklı enerji çıkışına sahip olabilirler. Belli bir rüzgar veri kümesindeki değişken hızlar için bir başka ölçü de standart sapmadır. Standart sapma ( $\sigma_v$ ), her bir hızın ortalama değerden sapmasını verir.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n}} \quad (3.3)$$

Standart sapmanın düşük değerleri veri setinin düzgün dağılmış olduğunu göstermektedir. Standart sapma denklem 3.3’de ifade edilmiştir. Standart sapma önemli bir kavram olup, rüzgâr hızlarındaki dalgalanmaları tanımlamak için kullanılır. Rüzgâr hız verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s arasında olmalıdır[56,57].

Rüzgar değişkenliğinin daha iyi anlaşılması için, datalar genellikle gruplandırılır ve frekans dağılımı şeklinde sunulur. Frekans dağılımı belirli bir aralıktaki hızlar için süre bilgisini verir. Frekans dağılımını oluşturmak için rüzgar hız aralığı eşit aralıklara (0-1, 1-2, 2-3) bölünür ve bu aralıktaki rüzgar hızlarının sayısı belirlenir. Hız değeri frekans dağılımı formunda ifade edildiğinde durumda ortalama rüzgar hızı ve standart sapma denklem 3.4 ve 3.5’deki gibi elde edilir.

$$V_m = \left( \frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^{1/3} \quad (3.4)$$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (V_i - V_m)^2}{\sum_{i=1}^n f_i}} \quad (3.5)$$

$f_i$  frekansı,  $V_i$  ele alınan aralığın orta değerini ve  $V_m$ ’ de ortalama hızı temsil etmektedir. Tablo 3.2’de verilen rüzgar hızı ve frekans değerleri ile ortalama rüzgar hızı denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmaktadır. Tablo 3.2’de, Çorlu bölgesi rüzgar hızının yıllık frekans dağılımı, standart sapma ve ortalama hız değerleri görülmektedir.

Tablo 3.2: Çorlu bölgesi rüzgar hızlarının yıllık frekans dağılımları, standart sapmaları ve ortalama hız değeri

| Rüzgar hız aralığı | Rüzgar hızı ( $V_i$ ) | $V_i^3$ | Bir yıllık süre (saat) | Frekans $f_i$ | $f_i V_i^3$          | Standart Sapma $\sigma_V$ |
|--------------------|-----------------------|---------|------------------------|---------------|----------------------|---------------------------|
| 0-1                | 0.5                   | 0.125   | 22                     | 0.00251       | 0.00126              | 0.236538                  |
| 1-2                | 1.5                   | 3.375   | 754                    | 0.08607       | 0.12911              | 1.091381                  |
| 2-3                | 2.5                   | 15.625  | 1760                   | 0.20091       | 0.50228              | 1.219195                  |
| 3-4                | 3.5                   | 42.875  | 1647                   | 0.18801       | 0.65805              | 0.745801                  |
| 4-5                | 4.5                   | 91.125  | 1247                   | 0.14235       | 0.64058              | 0.271652                  |
| 5-6                | 5.5                   | 166.375 | 850                    | 0.09703       | 0.53368              | 0.08722                   |
| 6-7                | 6.5                   | 274.625 | 522                    | 0.05959       | 0.38733              | 0.312459                  |
| 7-8                | 7.5                   | 421.875 | 400                    | 0.04566       | 0.34247              | 0.487206                  |
| 8-9                | 8.5                   | 614.125 | 300                    | 0.03425       | 0.2911               | 0.606991                  |
| 9-10               | 9.5                   | 857.375 | 262                    | 0.02991       | 0.28413              | 0.740189                  |
| 10-11              | 10.5                  | 1157.63 | 228                    | 0.02603       | 0.27329              | 0.851823                  |
| 11-12              | 11.5                  | 1520.88 | 213                    | 0.02432       | 0.27962              | 0.979259                  |
| 12-13              | 12.5                  | 1953.13 | 179                    | 0.02043       | 0.25542              | 1.040653                  |
| 13-14              | 13.5                  | 2460.38 | 136                    | 0.01553       | 0.20959              | 1.031686                  |
| 14-15              | 14.5                  | 3048.63 | 92                     | 0.0105        | 0.15228              | 0.95102                   |
| 15-16              | 15.5                  | 3723.88 | 57                     | 0.00651       | 0.10086              | 0.829237                  |
| 16-17              | 16.5                  | 4492.13 | 42                     | 0.00479       | 0.07911              | 0.781055                  |
| 17-18              | 17.5                  | 5359.38 | 21                     | 0.0024        | 0.04195              | 0.601251                  |
| 18-19              | 18.5                  | 6331.63 | 10                     | 0.00114       | 0.02112              | 0.44869                   |
| 19-20              | 19.5                  | 7414.88 | 9                      | 0.00103       | 0.02003              | 0.457717                  |
| 20-21              | 20.5                  | 8615.13 | 5                      | 0.00057       | 0.0117               | 0.365053                  |
| 21-22              | 21.5                  | 9938.38 | 4                      | 0.00046       | 0.00982              | 0.347882                  |
|                    |                       |         | 8760                   | 1             | $V_m=5.22\text{m/s}$ |                           |

### 3.3.Rüzgar Veri Analizi İçin İstatistiksel Modeller

Literatürde rüzgar veri analizinde kullanılan bir çok metot bulunmaktadır. Fakat bu yöntemlerden sadece iki tanesi geçerliliği ve elde edilen sonuçların tutarlılığı açısından rüzgar veri analizinde oldukça sık kullanılmaktadır. Bunlar, Weibull ve Rayleigh dağılımlarıdır.

### 3.3.1. Weibull dağılımı

Weibull dağılımında rüzgar hızındaki değişimler iki fonksiyonla karakterize edilir. Bunlar; olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonudur. Olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V)$  belli bir hızdaki rüzgarın esme olasılığını vermekte olup denklem 3.6 ile bulunur.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{V}{c} \right)^k} \quad (3.6)$$

Burada  $k$  Weibull şekil faktörü ve  $c$  skala faktörüdür. Kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının  $V$ 'ye eşit yada daha düşük rüzgar hızlarda esme olasılığını vermektedir. Bu nedenle kümülatif dağılım, olasılık yoğunluk fonksiyonunun integralidir. Denklem 3.7'de görülmektedir.

$$F(v) = \int_0^v f(V) dV = 1 - e^{-\left( \frac{V}{c} \right)^k} \quad (3.7)$$

Ortalama rüzgar hızı Weibull dağılımı kullanılarak denklem 3.8'de verilmiştir.

$$V_m = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad (3.8)$$

$f(V)$  ifadesi denklem 3.8'de yerine konulursa, denklem 3.9 elde edilir.

$$V_m = \int_0^{\infty} V \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{V}{c} \right)^k} dV \quad (3.9)$$

Denklem 3.9 düzenlenirse denklem 3.10 elde edilir.

$$V_m = k \int_0^{\infty} \left( \frac{V}{c} \right)^k e^{-\left( \frac{V}{c} \right)^k} dV \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da denklem 3.11’deki gibi değişken dönüştürme işlemi gerçekleştirilirse, denklem 3.12 elde edilir.

$$x = \left( \frac{V}{c} \right)^k, \quad dV = \frac{c}{k} x^{\left( \frac{1}{k}-1 \right)} dx \quad (3.11)$$

$$V_m = c \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\frac{1}{k}} dx \quad (3.12)$$

Bu ifade denklem 3.13’de verilen standart Gamma fonksiyonunun genel formudur.

$$\Gamma n = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (3.13)$$

Böylece denklem 3.12’den ortalama hız için denklem 3.14’deki gibi ifade elde edilir.

$$V_m = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (3.14)$$

Weibull dağılımı ile rüzgar hızının standart sapması denklem 3.15’deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_V = \left( \mu_2' - V_m^2 \right)^{1/2} \quad (3.15)$$

Burada  $\mu_2'$  popülasyonun ikinci hassas nokta momenti olup denklem 3.16’daki gibi ifade edilir.

$$\mu_2' = \int_0^{\infty} V^2 f(V) dV \quad (3.16)$$

$f(V)$  ifadesi denklem 3.16’da yerine yazılırsa, denklem 3.17 elde edilir.

$$\mu_2' = c^2 \int_0^{\infty} e^{-x} x^{2/k} dx \quad (3.17)$$

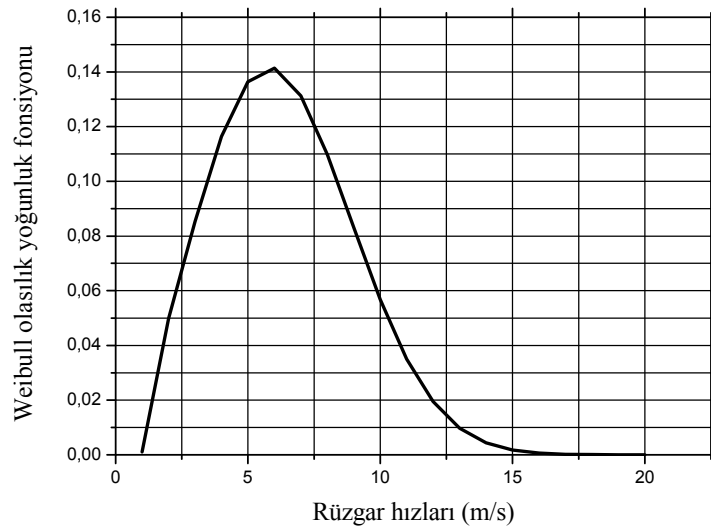
Denklem 3.17 gamma integrali olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mu_2' = c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \quad (3.18)$$

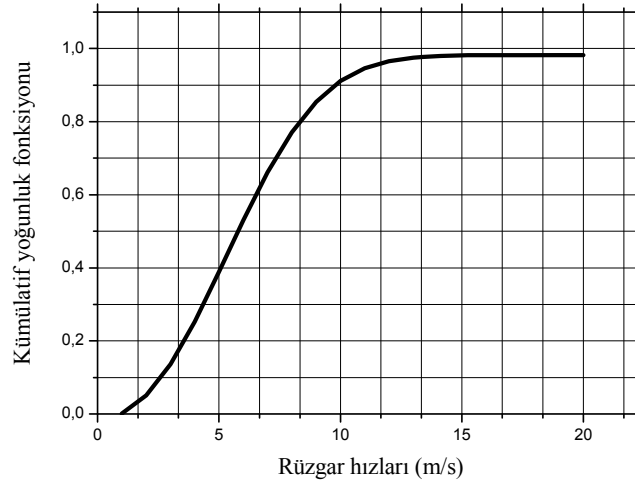
$\mu_2'$  ve  $V_m$  değerleri denklem 3.15'de yerine koyulursa standart sapma ifadesi denklem 3.19'daki hali alır.

$$\sigma_V = c \left( \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right)^{1/2} \quad (3.19)$$

Rüzgar karakteristiğinin Weibull olasılık yoğunluk ve kümülatif dağılım fonksiyonları Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1: Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu



Şekil 3.2: Weibull kümülatif yoğunluk dağılım fonksiyonu

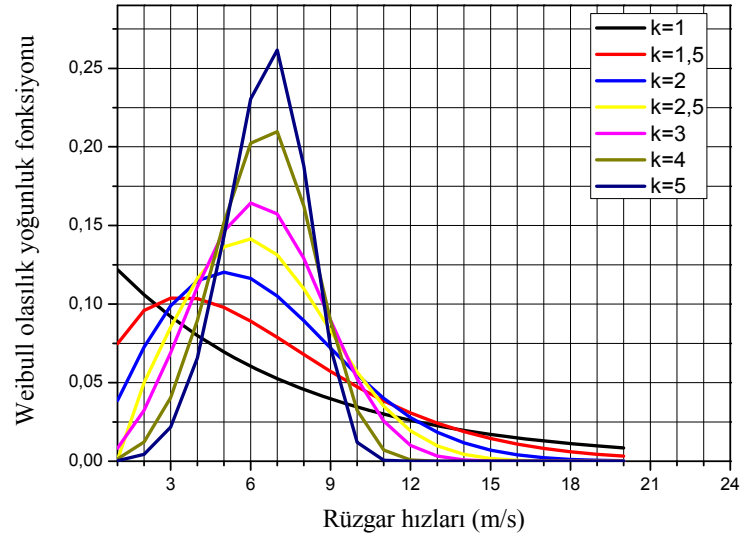
Olasılık yoğunluk eğrisinin maksimum değeri, en muhtemel rüzgar hızı olarak ifade edilen ve rüzgar olasılık dağılımında en çok sıklıkla esen rüzgar hızını temsil etmektedir. En muhtemel rüzgar hızı, maksimum enerji taşıyan rüzgar hızıdır. En muhtemel rüzgar hızı verilen rüzgar olasılık dağılımında en çok sıklıkla esen rüzgar hızını temsil etmekte ve denklem 3.20 ile ifade edilmektedir[58].

$$V_{MP} = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.20)$$

Maksimum enerji taşıyan rüzgar hızı, rüzgar enerjisinin maksimum miktarını taşıyan rüzgar hızını ifade etmekte ve denklem 3.21’de görülmektedir.

$$V_{MaxE} = c \left( \frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.21)$$

Rüzgar karakteristiği denklemlerinde geçen  $k$  ve  $c$  Weibull parametreleridir. Weibull dağılımında rüzgarın en önemli belirleyici faktörü “ $k$ ” şekil faktörüdür. Şekil 3.3’de rüzgarın weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunda  $k$ ’nın etkisi görülmektedir. Farklı  $k$  değerlerine göre weibull fonksiyonunun değişimi görülmektedir.



Şekil 3.3: Farklı şekil faktörleri için Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu

Weibull dağılımıyla rüzgar karakteristiğini analiz ederken,  $k$  ve  $c$  Weibull parametreleri doğru tahmin edilmek zorundadır. Literatürde  $k$  ve  $c$  parametrelerini belirlemede yaygın olarak kullanılan metotlar mevcuttur. Bu metotlar, grafik metodu, standart sapma metodu, moment metodu, maksimum likelihood metodu ve enerji faktörü metotlarıdır[59].

### 3.3.1.1. Grafik Metodu

Metotların içinde en yaygın kullanıma sahip olanı grafik metodudur. Hız değer aralıklarına karşılık kümülatif frekans değerleri elde edilir. Dönüşüm aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

$$x_i = \ln(v_i) \quad (3.22)$$

$$y_i = \ln[-\ln(1 - p_i)] \quad (3.23)$$

$k$  ve  $c$  parametreleri  $y = ax + b$  lineer eşitliğinin sabitleriyle ifade edilebilir.  $k$  ve  $c$  parametreleri denklem 3.24 ve denklem 3.25 ile elde edilmektedir.

$$c = \exp\left(\frac{-a}{b}\right) \quad (3.24)$$

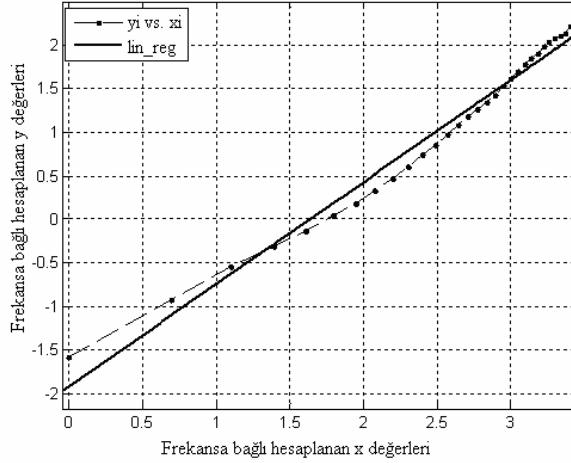
$$k = b \quad (3.25)$$

$x_i$  ve  $y_i$  arasındaki ilişki, noktalardan geçirilen  $ax+b$  formunda doğru denkleminde  $a$  ve  $b$  katsayılarını bularak elde edilir. Bu katsayılar dikkate alınarak  $k$  ve  $c$  parametreleri hesaplanır. Denklem 3.22 ve 3.23 ifadeleri kullanılarak  $x_i$  ve  $y_i$  değerleri hesaplanır. Hesaplanan bu değerler Tablo 3.3’de görülmektedir.

Tablo 3.3: Grafik metodunun uygulanması

| Aralık | Rüzgar hızı<br>m/s | Frekans | Kümülatif | $x_i$   | $y_i$   |
|--------|--------------------|---------|-----------|---------|---------|
| 0-1    | 1                  | 0.1875  | 0.1875    | 0       | -1.572  |
| 1-2    | 2                  | 0.13973 | 0.32723   | 0.69315 | -0.9255 |
| 2-3    | 3                  | 0.11484 | 0.44207   | 1.09861 | -0.5387 |
| 3-4    | 4                  | 0.07763 | 0.51969   | 1.38629 | -0.3102 |
| 4-5    | 5                  | 0.06524 | 0.58493   | 1.60944 | -0.1286 |
| 5-6    | 6                  | 0.06113 | 0.64606   | 1.79176 | 0.0379  |
| 6-7    | 7                  | 0.05291 | 0.69897   | 1.94591 | 0.18278 |
| 7-8    | 8                  | 0.05154 | 0.75051   | 2.07944 | 0.32812 |
| 8-9    | 9                  | 0.04783 | 0.79834   | 2.19722 | 0.47075 |
| 9-10   | 10                 | 0.0403  | 0.83864   | 2.30259 | 0.6011  |
| 10-11  | 11                 | 0.03664 | 0.87529   | 2.3979  | 0.7332  |
| 11-12  | 12                 | 0.02888 | 0.90417   | 2.48491 | 0.85235 |
| 12-13  | 13                 | 0.0254  | 0.92957   | 2.56495 | 0.97572 |
| 13-14  | 14                 | 0.01866 | 0.94823   | 2.63906 | 1.08551 |
| 14-15  | 15                 | 0.01193 | 0.96016   | 2.70805 | 1.17028 |
| 15-16  | 16                 | 0.00999 | 0.97015   | 2.77259 | 1.25605 |
| 16-17  | 17                 | 0.00742 | 0.97757   | 2.83321 | 1.33429 |
| 17-18  | 18                 | 0.00696 | 0.98453   | 2.89037 | 1.42767 |
| 18-19  | 19                 | 0.00531 | 0.98984   | 2.94444 | 1.52373 |
| 19-20  | 20                 | 0.00342 | 0.99326   | 2.99573 | 1.60952 |
| 20-21  | 21                 | 0.00245 | 0.99572   | 3.04452 | 1.69628 |
| 21-22  | 22                 | 0.00148 | 0.9972    | 3.09104 | 1.77143 |
| 22-23  | 23                 | 0.00103 | 0.99823   | 3.13549 | 1.84642 |
| 23-24  | 24                 | 0.00046 | 0.99869   | 3.17805 | 1.89245 |
| 24-25  | 25                 | 0.00057 | 0.99926   | 3.21888 | 1.97493 |
| 25-26  | 26                 | 0.00029 | 0.99954   | 3.2581  | 2.04014 |
| 26-27  | 27                 | 0.00011 | 0.99966   | 3.29584 | 2.07686 |

Elde edilen  $x_i$  ve  $y_i$  değerleri arasındaki ilişkinin grafiği çizilir. Daha sonra elde edilen bu değerlerden  $y=ax+b$  doğru denklemi geçirilir ve doğru denkleminin katsayıları ile  $k$  ve  $c$  parametre değerleri hesaplanır. Gerçek değerler ve uydurulan doğru denklemi grafik Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4: Grafik metodu kullanılarak  $k$  ve  $c$  parametrelerinin belirlenmesi

$y=ax+b$  ifadesinden,  $a=1.608$ ,  $b=2.616$  olarak elde edilmektedir.  $a$  ve  $b$  değerleri kullanılarak  $k$  ve  $c$  parametreleri 2.61 ve 5.09 olarak hesaplanır.

### 3.3.1.2. Standart sapma metodu

$k$  ve  $c$  Weibull parametreleri rüzgar hızının standart sapması ve ortalama hızı ile tahmin edilebilmektedir. Denklem 3.14 ve 3.19’deki standart sapma ve ortalama rüzgar hız değerleri dikkate alındığında, standart sapma ile ortalama hız arasında denklem 3.26 olarak gösterilen bağıntı elde edilir.

$$\left(\frac{\sigma_v}{V_m}\right)^2 = \frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} - 1 \quad (3.26)$$

İlk olarak verilen bir veri seti için  $\sigma_v$  ve  $V_m$  hesaplanır. Sonrasında  $k$  nümerik yöntemlerle çözülerek belirlenebilir.  $k$  değeri belirlendikten sonra denklem 3.27 kullanılarak  $c$  hesaplanır.

$$c = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.27)$$

Diğer bir deyişle,  $k$  için kabul edilebilir yaklaşım denklem 3.28'de görülmektedir[55,60,61].

$$k = \left(\frac{\sigma_V}{V_m}\right)^{-1.090} \quad (3.28)$$

Benzer şekilde  $c$  parametresi denklem 3.29 ile yaklaşık olarak belirlenebilir.

$$c = \frac{2V_m}{\sqrt{\pi}} \quad (3.29)$$

Daha hassas bir şekilde,  $c$  parametresi aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$c = \frac{V_m k^{2.6674}}{0.184 + 0.816k^{2.73855}} \quad (3.30)$$

### 3.3.1.3.Moment metodu

$k$  ve  $c$  parametrelerini tahmin etmek için diğer bir metot birinci ve ikinci dereceden moment metodudur. Weibull dağılımının  $n$ . moment, denklem 3.31'de görülmektedir[59].

$$M_n = c^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (3.31)$$

### 3.3.2 Rayleigh dağılımı

Rüzgar karakteristik analizlerinde Weibull dağılımının güvenilirliği  $k$  ve  $c$  parametrelerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesine bağlıdır.  $k$  ve  $c$  nin doğru hesaplanması için, kısa zaman aralıklı olarak yeterli sayıda alınmış rüzgar dataları

gereklidir. Datalar belirli bir zaman periyodunda günlük, aylık ve yıllık ortalama rüzgar hızı formunda olabilir. Rayleigh modeli, k şekil parametresinin ikiye eşit alındığı (k=2) ve Weibull modelinden türetilmiş özel bir durumdur. Şekil parametresi k=2 alındığında, ortalama hız ifadesi denklem 3.32’de görülmektedir.

$$V_m = c\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) \quad (3.32)$$

Denklem 3.32 düzenlenip değerlendirildiğinde denklem 3.33 elde edilir.

$$c = \frac{2V_m}{\sqrt{\pi}} \quad (3.33)$$

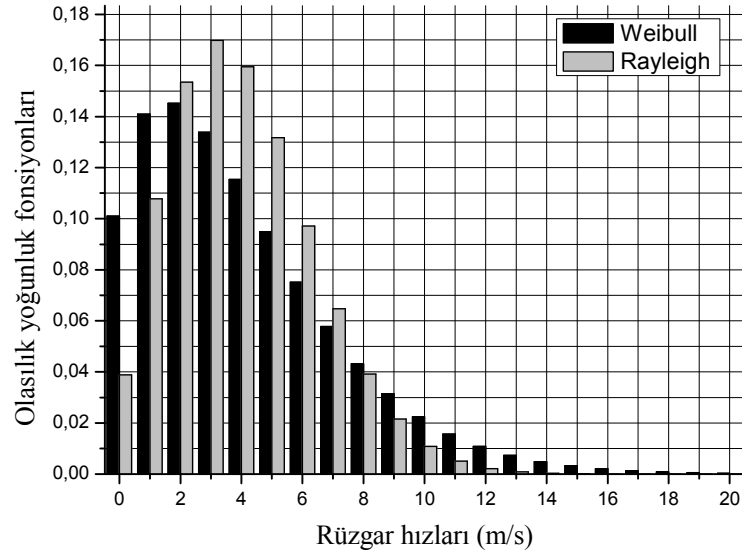
Denklem 3.33’deki c ifadesi denklem 3.6’da yerine koyulduğunda, denklem 3.34 elde edilir.

$$f(V) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{V_m^2} e^{-\left[\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{V_m}\right)^2\right]} \quad (3.34)$$

Benzer şekilde kümülatif dağılım denklem 3.35’de görülmektedir.

$$f(V) = 1 - e^{-\left[\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{V_m}\right)^2\right]} \quad (3.35)$$

Rayleigh ve Weibull dağılım fonksiyonlarının rüzgar hızı ile değişimleri hesaplanmış ve Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5: Kırklareli ilinin Weibull ve Rayleigh dağılımları

### 3.4. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi

Rüzgar hızı yükseklik ile değişim göstermektedir. 10m yükseklikteki hız değeri referans hız değeri ve yükseklik değeri olan 10m ise referans yükseklik olarak ifade edildiğinde, herhangi bir yükseklikteki rüzgar hız değeri belirlenirken denklem 3.36 kullanılır[58].

$$V_{ist} = V_{ref} \left( \frac{h_{ist}}{h_{ref}} \right)^m \quad (3.36)$$

Burada  $V_{ref}$ , 10m yükseklikteki referans rüzgar hızını (m/s),  $h_{ref}$  rüzgar hızının ölçüldüğü referans yükseklik değerini,  $V_{ist}$  değeri bulunmak istenilen yükseklikteki rüzgar hız değerini ve  $h_{ist}$  ise istenilen yükseklik değerini ifade etmektedir. Son olarak rüzgar hızının hub yüksekliği ile değişimini veren ifade eşitlik 3.36'da görülmektedir.  $m$  değeri, yüzey pürüzlülüğüne ve atmosferik kararlılığa bağlıdır. Nümerik olarak  $m$  değeri 0.05-0.5 arasında değişim göstermektedir. Literatürde birçok çalışmada  $m$  değeri 0.14 olarak alınmaktadır [62-65].

### 3.5. Rüzgar Gücünün Yükseklikle Değişimi

Güç yoğunluğu denklem 3.36'nın her iki tarafının küpünün alınması ile denklem 3.37 elde edilir.

$$\left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3m} = \left[ \frac{V^3}{V_{ref}^3} \right] \quad (3.37)$$

Daha sonra eşitliğin her iki tarafı  $\frac{1}{2}\rho$  ile çarpılarak denklem 3.38 elde edilir.

$$\left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3m} = \left[ \frac{\frac{1}{2}\rho V^3}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^3} \right] \quad (3.38)$$

Burada

$P_{ref}$ ,  $\frac{1}{2}\rho V_{ref}^3$  referans noktadaki referans güç yoğunluğu değerini ve  $P$  ise  $\frac{1}{2}\rho V^3$  herhangi bir hub yükseklikteki güç yoğunluğunun değerini temsil etmektedir.

Denklem 3.38 yeniden düzenlendiğinde denklem 3.39 elde edilir.

$$\left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3m} = \left[ \frac{P}{P_{ref}} \right] \quad (3.39)$$

Sonuç olarak herhangi bir hub yüksekliğindeki güç yoğunluğu denklem 3.40'daki gibi elde edilir.

$$P = P_{ref} \cdot \left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3m} \quad (3.40)$$

### 3.6. Rüzgar Karakteristiğinde Kapasite Faktörü, Güç ve Enerji Yoğunluğu

Birim alandaki rüzgar gücü, denklem 3.41'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{P(v)}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3.41)$$

Ortalama rüzgar güç yoğunluğunu hesaplamak için ise en genel form denklem 3.42’de görülmektedir.

$$P_m = \int_0^{\infty} P(v) = f(v) dv \quad (3.42)$$

Fakat rüzgar hızlarının anlık değerlerinin küp değeri biliniyorsa,  $(V^3)_m$  gibi ortalama bir değer hesaplanır. Ortalama rüzgar güç yoğunluğu denklem 3.43’deki ifade ile elde edilir [55,66].

$$\frac{P_m(V)}{A} = \frac{1}{2} \rho (V^3)_m \quad (3.43)$$

Denklem 3.8’ den anlık rüzgar hız verilerinin küpleri denklem 3.44’teki gibi ifade edilebilir.

$$(V^3)_m = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad (3.44)$$

Denklem 3.44’ün integrali alınarak Weibull fonksiyonu için aşağıdaki denklem 3.45 elde edilir.

$$(V^3)_m = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} (V_m)^3 \quad (3.45)$$

Denklem 3.14 ve 3.45 denklem 3.43’de yerine yazılıp gerekli işlemler yapılırsa Weibull ortalama güç yoğunluğu ifadesi elde edilir.

$$\frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad (3.46)$$

Denklem 3.14’de k=2 değeri alındığında denklem 3.47 elde edilir.

$$V_m = c \sqrt{\frac{\pi}{4}} \quad (3.47)$$

Denklem 3.47’den c terimi çekilir ve k=2 için alınarak Weibull’un özel bir durumu olan Rayleigh güç yoğunluğu modelini temsil eden denklem 3.48 elde edilir.

$$\frac{P_R}{A} = \frac{3}{\pi} \rho v_m^3 \quad (3.48)$$

Rüzgar güç yoğunluğu bilinen bir alanın rüzgar enerji yoğunluğu, arzu edilen süreç (aylık, yıllık) için denklem 3.49’daki gibi elde edilir.

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left( \frac{k+3}{k} \right) T \quad (3.49)$$

Burada T zamanı ifade eder. Aylık ya da yıllık bazda birim enerji hesaplarında T=720 saat , T=8760 saat olarak alınır[66].

### 3.7. Rüzgar Güç Performansının Değerlendirilmesi

Bir bölgenin rüzgar dağılımını tanımlamak ve rüzgar enerji dönüşüm sistemi ile rüzgar arasında enerji değişimini analiz etmek için Weibull ve Rayleigh dağılımları yaygın şekilde kullanılır. Rüzgar türbini uygun modeli ile bölgenin gerçek rüzgar frekans dağılımı eşleştirilerek, enerji çıkışı maksimize edilebilir. Bu yüzden bir rüzgar enerji dönüşüm sistemi, sadece bölgeye özgü türbinin üretime geçebilmesi için gerekli olan rüzgar hızı, anma hızı ve rüzgar türbinini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızları tanımlanarak tasarlandığında, maksimum verimde çalışabilir. Fakat bir bölge için rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi tasarlamak oldukça pahalıdır. Bu yüzden genellikle var olan rüzgar türbinleri arasından en iyisi verilen bölge için

seçilir. Farklı rüzgar türbinleri farklı güç performans eğrilerine sahiptir. Bu yüzden performansı belirlemek için kullanılan model de farklıdır. Literatürde, rüzgar türbininin elektriksel çıkış gücünü belirlemek için kullanılan model, denklem 3.50’de görülmektedir.

$$P_e = \begin{cases} 0 & (V < V_c) \\ P_{eR} \frac{V^k - V_c^k}{V_R^k - V_c^k} & (V_c \leq V \leq V_R) \\ P_{eR} & (V_R \leq V \leq V_F) \\ 0 & (V > V_F) \end{cases} \quad (3.50)$$

Burada,

$P_{eR}$  elektriksel anma gücü (kW)

$V_c$  türbinin üretime geçebilmesi için gereken rüzgar hızı (m/s)

$V_R$ , anma rüzgar hızı (m/s)

$V_F$  rüzgar türbinini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızını (m/s)

temsil etmektedir.

Üretilen toplam enerjinin hesaplanmasında rüzgar hızına bağlı olarak türbinin ortalama çıkış gücü çok önemlidir. Bir türbinin ortalama çıkış gücü denklem 3.51’de görülmektedir.

$$P_{e,ave} = P_{eR} \left\{ \frac{e^{-\left[\frac{V_c}{c}\right]^k} - e^{-\left[\frac{V_R}{c}\right]^k}}{\left[\frac{V_R}{c}\right]^k - \left[\frac{V_c}{c}\right]^k} - e^{-\left[\frac{V_F}{c}\right]^k} \right\} \quad (3.51)$$

Türbin ortalama gücünün belirli bir zaman periyodunda türbin anma gücüne oranı kapasite faktörü olarak tanımlanır. Denklem 3.52’de kapasite faktörü eşitliği görülmektedir.

$$CP = \frac{P_{e,ave}}{P_{eR}} \quad (3.52)$$

## 4. HİDROLİK ENERJİ VE POTANSİYELİ

### 4.1. Giriş

Hidroelektrik santraller (HES), barajlı santraller ve doğal göl ve akarsu santralleri olarak iki kategoride incelenmektedir. Barajlı santraller genellikle büyük ölçekli ve kapasiteli hidroelektrik santrallerdir. Literatürde bu türdeki santraller puant santraller olarak ifade edilir. Akarsu ve göl santralleri ise devamlı olarak çalıştıkları için baz yük santrali olarak tanımlanırlar. Türkiye’de barajlı santraller puant yük dışında baz yükü karşılamak içinde kullanılabilirler.

Ülkelerin yağış koşullarının her yıl farklılık göstermesinden dolayı, hidroelektrik santrallerinden enerji üretiminin toplam üretim içindeki payı sabit değildir; değişkenlik arzeder. Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık %20-30’u hidrolik enerjiden üretilmektedir. Barajlar, hidroelektrik enerji üretiminin yanı sıra içme ve kullanma suyu sağlama, sulama ve taşkın koruma gibi amaçlar içinde inşa edilirler [67]. Türkiye’de sulama amaçlı olarak bulunan birkaç baraj dışında, gerçek anlamda barajların yapımı ve inşası İkinci Dünya Savaşı sonrasında başlamıştır. O zamandan beri hidroelektrik güç santrallerinin ve barajların yapımında, sosyo-ekonomik gelişmenin bir sonucu olarak sulama ve elektrik üretim amaçlı projelerde artış gözlenmiştir [68].

Hidroelektrik potansiyelin belirlenmesinde “brüt potansiyel”, “teknik potansiyel” ve “ekonomik potansiyel” kavramları önem taşımaktadır. Bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teorik üst sınırını gösteren brüt su kuvveti potansiyeli; mevcut düşü ve ortalama debinin oluşturduğu potansiyeli ifade etmektedir. Topoğrafya ve hidrolojinin bir fonksiyonu olan brüt hidroelektrik enerji potansiyeli, ülkemiz için 433 milyar kWh mertebesinde dir.

Teknik yönden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyeli; bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teknolojik üst sınırını göstermektedir. Uygulanan teknolojiye bağlı olarak düşü, akım ve dönüşümde oluşabilecek kaçınılmaz kayıplar gözardı edilmektedir. Bölgede planlanan hidroelektrik projelerin teknik açıdan uygulanabilmesi, mümkün olan tüm projelerin gerçekleştirilmesi ile elde edilecek hidroelektrik enerji üretiminin sınırlarını temsil etmektedir. Bu niteliğiyle teknik yönden değerlendirilebilir hidroelektrik potansiyel, brüt potansiyelin bir fonksiyonu olmakta ve çoğunlukla onun yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Ülkemizin teknik yönden değerlendirilebilir hidroelektrik enerji potansiyeli 216 milyar kWh civarındadır. Ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin ekonomik optimizasyonunun sınır değerini gösteren, gerek teknik açıdan geliştirilebilmesi mümkün, gerekse ekonomik yönden tutarlı olan tüm hidroelektrik projelerin toplam üretimi olarak tanımlanabilir. Bir başka söylemle, ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, beklenen faydaları (gelirleri), masraflarından (giderlerinden) fazla olan su kuvveti projelerinin hidroelektrik enerji üretimini göstermektedir. Hidroelektrik santrallerin ekonomik yapılabilirliğinin hesaplanabilmesi için; enterkonnekte sistemde aynı enerjiyi üretecek kaynaklar gözden geçirilmekte, en ucuz enerji kaynağı belirlenerek hidroelektrik santral (HES) projesi bu kaynakla mukayese edilmekte ve ancak daha ekonomik bulunursa önerilmektedir[69].

#### **4.2. Türkiye'nin Su Kaynakları ve Su Potansiyeli**

Su yenilenebilir bir kaynaktır ve bu anlamda sürdürülebilir kullanımı mümkündür. Türkiye dünyanın en hızlı nehirlerinden birkaçına sahip olsa da su rezervleri bakımından alt sıralarda yer almaktadır. Türkiye'de su kaynaklarının yönetimi için uluslararası standartlarda iyi ve sürdürülebilir bir yönetim politikası benimsemelidir. Karasal iklim karakteri gösteren Türkiye'nin 643 mm olan yıllık ortalama yağış miktarı, 501 milyar m<sup>3</sup> suya tekabül etmektedir ve bu yağış miktarı oldukça düzensizdir.

Yıllık ortalama yağış miktarı bölgelere ve mevsimlere göre çok büyük farklılıklar göstermekte olup 250mm ile 3000mm arasında değişmektedir. Orta Anadolu'nun iç kesimlerinde 250mm iken, Karadenizin kuzeydoğu sahil kesimlerinde 3000mm'ye kadar çıkmaktadır. Yağmurlar sonbahar mevsimi ile başlayıp, yaz mevsimine kadar devam eder. Fakat Karadeniz sahil kesimi her mevsim yağış almaktadır.

501 milyar  $m^3$  suyun 274 milyar  $m^3$ 'ü toprak ve su yüzeyleri ile bitkilerden olan buharlaşmalar yoluyla atmosfere geri dönmekte, 69 milyar  $m^3$ 'lük kısmı yeraltı suyunu beslemekte, 158 milyar  $m^3$ 'lük kısmı ise akışa geçerek çeşitli büyüklükteki akarsular vasıtasıyla denizlere ve kapalı havzalardaki göllere boşalmaktadır. Yeraltı suyunu besleyen 69 milyar  $m^3$ 'lük suyun 28 milyar  $m^3$ 'ü pınarlar vasıtasıyla yerüstü suyuna tekrar katılmaktadır. Ayrıca, komşu ülkelerden ülkemize gelen yılda ortalama 7 milyar  $m^3$  su bulunmaktadır. Böylece ülkemizin brüt yerüstü suyu potansiyeli 193 (158+28+7) milyar  $m^3$  olmaktadır. Yeraltı suyunu besleyen 41 (69-28) milyar  $m^3$  de dikkate alındığında, ülkemizin toplam yenilenebilir su potansiyeli brüt 234 (193+41) milyar  $m^3$  olarak hesaplanmıştır.

Ancak, günümüz teknik ve ekonomik şartları çerçevesinde, çeşitli amaçlara yönelik olarak tüketilebilecek yerüstü suyu potansiyeli yurt içindeki akarsulardan 95 milyar  $m^3$ , komşu ülkelerden yurdumuza gelen akarsulardan 3 milyar  $m^3$  olmak üzere yılda ortalama toplam 98 milyar  $m^3$ 'tür. 14 milyar  $m^3$  olarak belirlenen yeraltı suyu potansiyeli ile birlikte ülkemizin tüketilebilir yerüstü ve yeraltı su potansiyeli yılda ortalama toplam 112 milyar  $m^3$  olmaktadır [70-73].

Türkiye 25 hidrolojik havzaya bölünmüştür. Belirlenen 25 havza, 14 adedi nehir havzası, 7 adedi irili ufaklı akarsulardan oluşan müteferrik havza, 4 adedi ise denize boşalımı olmayan kapalı havzalardan meydana gelir. Tablo 4.1'de Türkiye'nin hidrolojik havzaları görülmektedir.

Table 4.1: Türkiye'nin hidrolojik havzaları ve teknik özellikleri

| No           | Havza ismi     | Yağış alanı (km <sup>2</sup> ) | Yıllık ortalama yağış miktarı (km <sup>3</sup> ) | Potansiyel iştirak oranı (%) | Yıllık verim (l/s/km <sup>2</sup> ) |
|--------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 1            | Meriç-Ergene   | 14,560                         | 1.33                                             | 0.7                          | 2.9                                 |
| 2            | Marmara        | 24,100                         | 8.33                                             | 4.5                          | 11                                  |
| 3            | Susurluk       | 22,399                         | 5.43                                             | 2.9                          | 7.2                                 |
| 4            | Kuzey Ege      | 10,003                         | 2.09                                             | 1.1                          | 7.4                                 |
| 5            | Gediz          | 18,000                         | 1.95                                             | 1.1                          | 3.6                                 |
| 6            | K. Menderes    | 6,907                          | 1.19                                             | 0.6                          | 5.3                                 |
| 7            | B. Menderes    | 24,976                         | 3.03                                             | 1.6                          | 3.9                                 |
| 8            | Doğu Akdeniz   | 20,953                         | 8.93                                             | 4.8                          | 12.4                                |
| 9            | Antalya        | 19,577                         | 11.06                                            | 5.9                          | 24.2                                |
| 10           | Burdur         | 6,374                          | 0.5                                              | 0.3                          | 1.8                                 |
| 11           | Akarçay        | 7,605                          | 0.49                                             | 0.3                          | 1.9                                 |
| 12           | Sakarya        | 58,160                         | 6.40                                             | 3.4                          | 3.6                                 |
| 13           | Batı Karadeniz | 29,598                         | 9.93                                             | 5.3                          | 10.6                                |
| 14           | Yeşilırmak     | 36,114                         | 5.8                                              | 3.1                          | 5.1                                 |
| 15           | Kızılırmak     | 78,180                         | 6.48                                             | 3.5                          | 2.6                                 |
| 16           | Konya kapalı   | 53,850                         | 4.52                                             | 2.4                          | 2.5                                 |
| 17           | Doğu Akdeniz   | 22,048                         | 11.07                                            | 6                            | 15.6                                |
| 18           | Seyhan         | 20,450                         | 8.01                                             | 4.3                          | 12.3                                |
| 19           | Asi            | 7,796                          | 1.17                                             | 0.6                          | 3.4                                 |
| 20           | Ceyhan         | 21,982                         | 7.18                                             | 3.9                          | 10.7                                |
| 21           | Fırat-Dicle    | 97,324                         | 21.33                                            | 11.5                         | 13.1                                |
| 22           | Doğu Karadeniz | 24,077                         | 14.90                                            | 8                            | 19.5                                |
| 23           | Çoruh          | 19,872                         | 6.30                                             | 3.4                          | 10.1                                |
| 24           | Aras           | 27,548                         | 4.63                                             | 2.5                          | 5.3                                 |
| 25           | Van gölü       | 19,405                         | 2.39                                             | 1.3                          | 5                                   |
| <b>Total</b> |                | <b>779,452</b>                 | <b>186.05</b>                                    | <b>100</b>                   |                                     |

Türkiye'deki 25 hidrolojik havzanın bölgesel dağılımı Türkiye haritası üzerinde Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1: Türkiye'de hidrolojik havzaların dağılımı

Türkiye'nin havzalarının ortalama yıllık toplam akışları 186 milyar m<sup>3</sup>'tür. Havza verimleri birbirlerinden farklı olup, Fırat ve Dicle havzalarının toplam ülke potansiyelinin yaklaşık % 28.5'ine sahip olduğu görülmektedir. Bu havzayı Karadeniz bölgesi havzaları %13.3 lük oranla takip etmektedir. Türkiye'de nehirler genellikle düzensiz bir rejime sahiptir. Doğal akışları kullanılabilir kaynağa direkt olarak dönüştürülemez. Ortalama yıllık yağış, buharlaşma ve akarsu yüzeyleri coğrafik olarak çok değişiktir. Diğer bir değişle, Türkiye 655,000ha iç suları, 775 baraj ve 165,000ha'lık toplam alan kaplayan göletlere sahiptir. Türkiye'nin su potansiyeli Tablo 4.2'de görülmektedir[70-74].

Table 4.2: Türkiye'nin su potansiyeli

|              | Yağış<br>(mm/m <sup>2</sup> ) | Ortalama yıllık<br>yağış (milyar<br>m <sup>3</sup> /yıl) | Akış<br>(milyar m <sup>3</sup> /yıl) | Ekonomik olarak<br>tüketilebilir<br>(milyar m <sup>3</sup> /yıl) |
|--------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Yerli        | 643                           | 501                                                      | 186                                  | 95                                                               |
| Yurt dışı    | -                             | -                                                        | 7                                    | 3                                                                |
| Toplam       | -                             | -                                                        | 193                                  | 98                                                               |
| Yeraltı suyu | -                             | -                                                        | -                                    | 14                                                               |
| Genel toplam | -                             | -                                                        | -                                    | 112                                                              |

#### 4.3. Hidroelektrik Enerji

Maliyeti düşük ve en güvenilir yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan, hidroelektrik enerji ile yıllık 2600 TWh'lik elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu durum dünya genelinde elektrik tüketiminin yaklaşık %20'sinin hidroelektrik santrallerinden karşılandığı anlamına gelmektedir[75]. Gelişmiş ülkelerde hidrolik enerjinin en hızlı gelişme gösteren yenilenebilir enerji kaynağı olması beklenmektedir. 65 ülke, elektrik üretimlerinin yaklaşık %50'sinden fazlasını hidroelektrikten üretmektedir. Bu durumdan dolayı hidrolik enerji birçok ülkede kritik öneme sahiptir[76].

Ekonomik HES potansiyeli içindeki tüm projeler; termik santrallara göre rantabiliteleri daha yüksek projelerdir. Ülkemizin 2006 yılı başı itibariyle tespit edilen teknik ve ekonomik hidroelektrik enerji potansiyeli 129,9 milyar kWh'dir. Bu potansiyel; en az ilk etüt seviyesindeki hidroelektrik projelerle, istikşaf (ön inceleme), master plan, fizibilite (planlama-yapılabilirlik), kesin proje, inşa ve

işletme aşamalarından oluşan 747 adet hidroelektrik projenin toplam enerji üretim kapasitesini ifade etmektedir. Havza gelişme planlarının farklı zamanlarda hazırlanmış olmalarından dolayı projeler sonraki tarihlerde ekonomik yönden tutarsız duruma gelebilmektedir. Bununla birlikte zaman içinde enerji fayda ve maliyetlerinde meydana gelen değişikliklere göre ekonomik bulunabilecek tesislerin, ilk etütlerde terk edilmiş olmalarına da rastlanılmaktadır. Bu nedenle havza gelişme planlarının belirli aralıklarla, özellikle enerji faydalarına esas teşkil eden alternatif referans santral grubundaki değişikliklerden sonra, tekrar gözden geçirilip değerlendirilmesi uygun olacaktır. Bunlara karşılık, su kaynaklarının geliştirilmesinde görev üstlenen EİE ve DSİ gibi kuruluşların yapmış oldukları, yeni enerji kaynaklarının yaratılmasına yönelik ilk etüt çalışmalarıyla bu potansiyele her yıl ilaveler olabilmektedir. Bütün bu olumlu ve olumsuz etkilerin de dikkate alınmasıyla, Türkiye'nin ekonomik hidroelektrik potansiyeli yıldan yıla ufak farklılıklar göstermekle birlikte bugün için 129.9 milyar kWh civarında olduğu kabul edilebilir. Türkiye'de hidroelektrik proje üretimiyle ilgili EİE ve DSİ gibi kuruluşların önemli görevlerinden biri de ülkenin hidroelektrik potansiyelinin gelişimini temin edecek şekilde tüm etüt ve proje hizmetlerinin ihtiyacı olan veri toplama faaliyetlerini yürüterek, havza master planlarını, baraj ve santrallerin ön inceleme, planlama ve proje çalışmalarını sürdürmektir. Hidroelektrik enerji potansiyelinin halen yararlanılmayan bölümünün gecikilmeden hizmete alınmasını sağlamak üzere ihtiyaç öncesinden yeterli miktarda projeyi hazır halde bulundurmak ilke olarak benimsenmiştir [69].

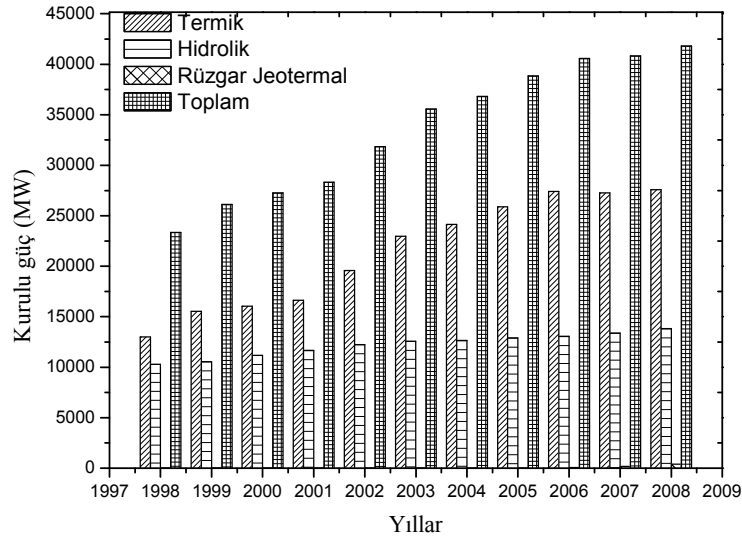
#### **4.3.1. Dünyada ve Türkiye'de hidrolik enerjinin mevcut durumu, kullanımı**

Dünyanın en büyük hidroelektrik enerji üreticisi ülkeler sırasıyla Kanada, Amerika ve Norveç'tir. 2001 yılında Kanada (333.0 TWh), Amerika Birleşik Devletleri (201.2 TWh) ve Norveç (120.4 TWh) en büyük hidroelektrik güç üretici ülkelerdir. Diğer büyük ülkeler sırasıyla Japonya, İsveç ve Fransa'dır [77]. Türkiye 433 milyar kWh brüt teorik hidroelektrik potansiyeli ile dünya hidroelektrik potansiyeli içinde %1 paya sahiptir. 129,9 milyar kWh ekonomik olarak yapılabilir potansiyeli ile Avrupa ekonomik potansiyeli içinde yaklaşık %15 hidroelektrik potansiyele sahiptir [5,78].

Tablo 4.3: Dünyanın hidroelektrik potansiyeli [78]

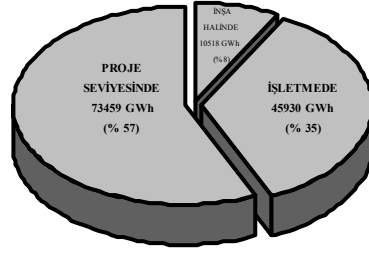
|         | <b>Toplam teorik hidroelektrik potansiyeli</b> | <b>Kullanılabilir hidroelektrik potansiyeli</b> | <b>Ekonomik hidroelektrik potansiyeli</b> |
|---------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Dünya   | 40,150,000                                     | 14,060,000                                      | 8,905,000                                 |
| Avrupa  | 3,150,000                                      | 1,225,000                                       | 800,000                                   |
| Türkiye | 433,000                                        | 216,000                                         | 127,381                                   |

2008 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin toplam kurulu gücü 41,817.2 MW olup, bunun 27,595 MW 'ı termik, 393.451 MW 'ı jeotermal ve rüzgar, 13,828 MW 'ı hidrolik santrallere aittir. Şekil 4.2'de Türkiye'nin kurulu gücü ve bu gücün enerji türlerine göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.2: Türkiye'nin kurulu gücü ve bu gücün enerji türlerine göre dağılımı

2008 yılı sonu itibari ile toplam elektrik enerjisi üretimi ise 198,418.1 GWh olup, bunun 164,139.3 GWh'i (% 82.7) termik, 1008.9 GWh'i jeotermal ve rüzgar (%0.05), 32,269.8 GWh'i (%16,7) hidroelektrik santrallerden sağlanmıştır[79]. Bugün için 129,9 milyar kWh olan ekonomik hidroelektrik potansiyelimizin %35'i (45,930 GWh) işletmede, %8'si (10,518 GWh) inşa halinde ve %57'si (73,459 GWh) ise proje seviyesindedir. Şekil 4.3'de hidroelektrik enerji projelerinin dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.3: Hidroelektrik enerji projelerinin dağılımları

Şekil 4.3’de verilen grafik daha da detaylandırıldığında proje seviyesinde olanlar kendi içerisinde alt kategorilere ayrılmaktadır. Bunlar kesin projesi hazır olanlar, planlaması (fizibilitesi) hazır olanlar ve ilk etüdü hazır olanlar olmak üzere üç alt kategoriden oluşmaktadır. Bu kategorilerin yüzdelik dağılımı ve sayıları Tablo 4.4’de detaylı bir şekilde görülmektedir.

Tablo 4.4: Hidroelektrik santral projelerinin mevcut durumu

| Hidroelektrik Santral Projelerinin Mevcut Durumu | Proje Sayısı | Kurulu Güç (MW) | Toplam Yıllık Hidroelektrik Enerji Üretimi |                     |          |                        |          |
|--------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------------------------|---------------------|----------|------------------------|----------|
|                                                  |              |                 | Güvenilir Enerji (GWh)                     | Toplam Enerji (GWh) | Oran (%) | Kümülatif Enerji (GWh) | Oran (%) |
| 1- İşletmede                                     | 142          | 12,788          | 33, 560                                    | 45,930              | 35.5     | 45, 930                | 35.5     |
| 2- İnşa Halinde                                  | 41           | 4,397           | 8, 817                                     | 14,351              | 11.1     | 60, 281                | 46.6     |
| 3- Gelecekte İnşa Edilecek                       | 589          | 19, 359         | 37, 335                                    | 69,173              | 53.4     |                        |          |
| 3.1 Kesin Projesi Hazır                          | 13           | 2, 356          | 4 ,630                                     | 6, 919              | 5.3      | 67, 200                | 51.8     |
| 3.2 Planlaması (Fizibilitesi) Hazır              | 176          | 7 ,269          | 13 ,239                                    | 26, 415             | 20.4     | 93, 615                | 72.3     |
| 3.3 Master Planı Hazır                           | 99           | 5 ,260          | 10, 773                                    | 18 ,280             | 14.1     | 111, 895               | 86.4     |
| 3.4 İlk Etüdü Hazır                              | 301          | 4 ,474          | 8 ,693                                     | 17 ,559             | 13.6     | 129 ,454               | 100      |
| Toplam Potansiyel                                | 772          | 36, 544         | 79 ,712                                    | 129 ,454            | 100      | 129 ,454               | 100      |

129,454 GWh’lik yıllık ortalama enerji üretim değerini oluşturan 772 hidroelektrik santralin 142’si işletmede, 41’i inşa halinde ve 589 adedi ise proje seviyesindedir. 5 TWh’den fazla yıllık hidroelektrik potansiyeli olan en önemli havzalar sırasıyla Fırat (38,070GWh), Dicle (16,702GWh), Doğu Karadeniz (11,271GWh), Çoruh (10,630GWh), Seyhan (7,968GWh), Kızılırmak (6,229GWh), Yeşilırmak (5,308GWh), Doğu Akdeniz (6,212 GWh) ve Antalya (5,089 GWh)’dır[80-83].

Dünyadaki en büyük su kaynakları geliştirme projelerinden biri olan GAP DSI tarafından gerçekleştirilmektedir. GAP dokuz ili kapsayan bir alanda 19 hidroelektrik santrali ile Türkiye toplam su potansiyelinin % 28'ini kontrol altına alırken, 1.7 milyon hektar arazinin sulanması ve 7476 MW'ın üzerinde bir kurulu kapasite ile yılda 27 milyar KWh'lik elektrik enerjisi üretecektir. Ayrıca proje çerçevesinde 19 hidroelektrik santrali Fırat ve Dicle nehirleri üzerine inşa edilecektir. GAP projesi tamamlandığında Tablo 4.5'deki hidroelektrik santralleri kurulmuş olacaktır[83].

Tablo 4.5: GAP projesi kapsamında kurulacak santraller

| Santral adı | Nehir  | Yıllık ortalama enerji miktarı (GWh) |
|-------------|--------|--------------------------------------|
| Atatürk     | Fırat  | 8515                                 |
| Karakaya    | Fırat  | 6386                                 |
| Birecik     | Fırat  | 2384                                 |
| Karkamış    | Fırat  | 670                                  |
| Batman      | Batman | 702                                  |
| Dicle       | Dicle  | 390                                  |
| Kral kızı   | Dicle  | 336                                  |

#### 4.3.2. Küçük güçlü hidroelektrik santraller

Türkiye'de küçük güçlü hidroelektrik santrallerin(KGHS) sayısında net bir artış görülmektedir. 1990 yılından beri KGHS'lerin sayısı ve kapasiteleri iki katına çıkmıştır. KGHS'lerdeki aynı trendin kurulu kapasite ve güç üretiminde de gerçekleşmesi beklenmektedir. Kısa dönemde 2010 yılında 260 MW kurulu kapasite ve 968 GWh/yıl üretim kapasitesi öngörülmektedir. Uzun vadede ise sırasıyla 2015 yılında 335 MW ve 1250 GWh/yıl olarak tahmin edilmektedir. Türkiye'de KGHS'lerin yaklaşık %85'i son 20 yıllık periyotta inşa edilmiştir. KGHS'lerin üretim kapasitelerinin yaklaşık %20'si özel sektör tarafından gerçekleştirilmiştir. KGHS'ler düşülerine göre üç kategoriye ayrılmaktadır. Tablo 4.6'da bu durum detaylı bir şekilde görülmektedir. Türkiye'de yüksek düşülü KGHS'ler oldukça fazladır.

Tablo 4.6: Düşülerine göre KGHSler

| Düşü türü (h) | Yükseklik aralığı (m) | Oran (%) |
|---------------|-----------------------|----------|
| Düşük düşü    | 0-5                   | 0        |
| Orta düşü     | 5-15                  | 5        |
| Yüksek düşü   | 15-üzeri              | 95       |

Toplam hidroelektrik santrallerinin Türkiye'nin elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %34'ünü karşılarken bu oranın %0.52'lik kısmı KGHS'ler tarafından karşılanmaktadır. Tablo 4.7'de Türkiye'de KGHS'lerin potansiyeli ve mevcut durumu görülmektedir.

Tablo 4.7: Türkiye'de KGHS'lerin potansiyeli ve mevcut durumu

| Potansiyel                                                                         | Üretim  |      | Kapasite (MW) |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|---------------|
|                                                                                    | GWh/yıl | %    |               |
| Toplam teorik potansiyel                                                           | 50,000  | 100  | 16,500        |
| Teknik kullanılabilir potansiyel                                                   | 30,000  | 60   | 10,000        |
| Ekonomik kullanılabilir potansiyel                                                 | 20,000  | 40   | 6,500         |
| Ekonomik kullanılabilir potansiyelden gerçekleştirilen                             | 664     | 3.3  | 175           |
| Kalan kullanılabilir ekonomik potansiyel                                           | 19,336  | 96.7 | 6,325         |
| Çevresel kısıtlamalar dikkate alındığında kalan kullanılabilir ekonomik potansiyel | ~19,300 | 96.7 | 6,325         |

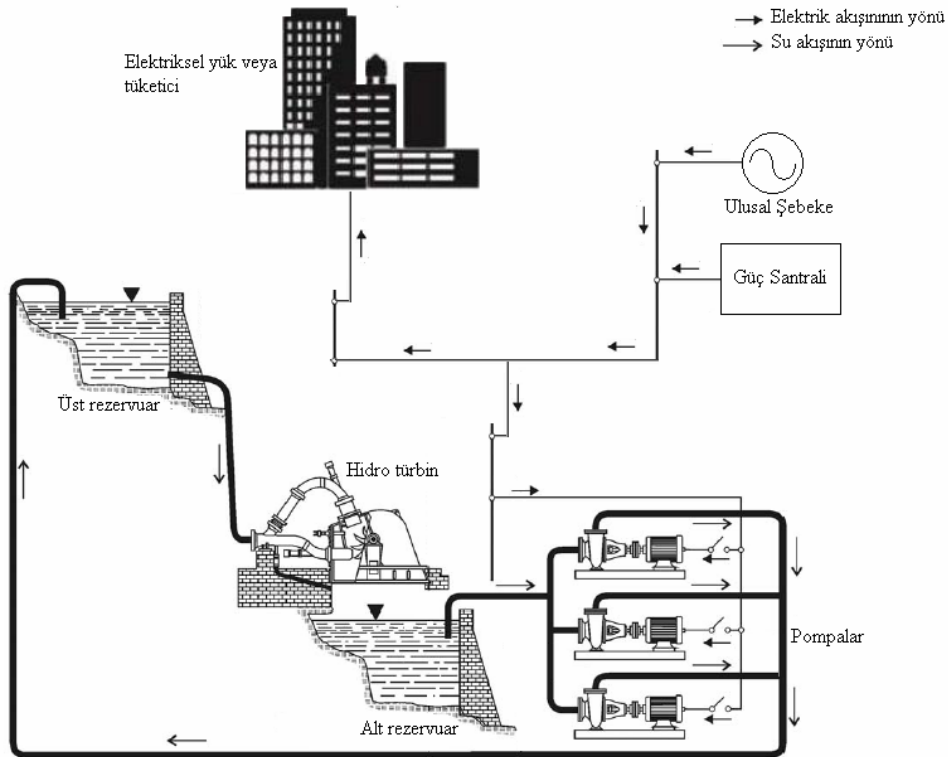
KGHS'lerin toplam teorik potansiyeli 50,000 GWh/yıl olmasının yanı sıra teknik ve ekonomik açıdan potansiyeli ise sırasıyla 30,000 ve 20,000 GWh/yıl olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Türkiye oldukça iyi bir potansiyele sahip olmasına rağmen KGHS'lerden şimdiye kadar ekonomik kullanılabilir potansiyelin sadece %3.3'ü kullanılmıştır[84].

#### 4.3.3. Pompalı depolamalı hidrolik santraller

Mekanik enerji depolama yöntemlerinden biri de suyun pompalar vasıtasıyla yüksek bir yerde bulunan haznede biriktirerek depolanmasıdır. Pompalı depolamalı hidroelektrik santral tümleşik bir sistem olup, pompalama için gerekli enerji santralin normal ünitelerinden sağlanmaktadır. Pompalı depolamalı hidrolik santrallerde depolama ünitesinde suyun biriktirilmesinde kullanılan kaynak türü çok değişik şekillerde olabilir. Pompalı depolamalı sistemler tek başına bir sistem olarak çalıştığında talebin az olduğu durumda ulusal şebeke tarafından enerji sağlanarak üst haznede su biriktirmesi sağlanabilmektedir. Ya da farklı sistemler ile birlikte kombine bir şekilde çalışarak da enerji akışı sağlanabilmektedir. Normal koşullarda barajdan santralin türbinlerine cebri boruları ile su gelmesine karşın, puant yük için çalışma koşulunda vanalarla komuta edilen depo cebri borularından yine aynı türbinlere su gelmektedir.

Pompalı depolamalı santral, baraj ve hazneli geleneksel hidroelektrik santrallere benzemektedir. Fakat geleneksel hidroelektrik santrallere göre aralarında belirli bir yükseklik farkı olan iki adet hazne bulunmaktadır. Alt haznede bulunan su pompalar vasıtasıyla üst haznede depolanır. Barajlı hidrolik santraller pompalı depolamalı santrallere uygulanmasında baraj gölünün dışında ayrı bir hazne inşa edilip depolama için kullanılmaktadır. Bu amaçla normal koşulda türbinden geçen ve santralden nehre atılan suyun (kuyruk suyunun) bir kısmı özel haznelere pompalanmaktadır.

Türkiye’de puant gücün karşılanmasında birtakım sıkıntılar yaşanmaktadır. Hidroelektrik santrallerin sürekli aşırı yüklenerek çalıştırılması puant talebin karşılanmasında olumsuzluklar yaratmaktadır. Elektrik enerjisinde puant yük ihtiyacının karşılanmasında pompa depolamalı hidrolik santraller uygulamaya konmalıdır. Klasik hidroelektrik santrallerinde olduğu gibi pompalı depolamalı hidroelektrik santrallerde puant talebi sorunsuz olarak karşılayabilmektedir[85]. Pompalı depolamalı sistemin genel prensip şeması Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4: Pompalı depolamalı hidroelektrik santralin genel yapısı

Pompalı depolamalı hidroelektrik santraller devreye giriş ve tam kapasiteye ulaşma süreleri açısından birçok santrale göre daha kısa sürede girip çıkabilmektedir. Japonya’da yapılan bir çalışma sonucunda yakıt türüne göre santrallerin devreye giriş süreleri ve tam kapasiteye ulaşma süreleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçları irdelendiğinde devreye giriş süreleri 3-5 dakikayı geçmemeleri nedeniyle klasik ve pompa depolamalı hidroelektrik santraller diğer santrallere göre frekans kontrolü ve sistem stabilitesi açısından daha avantajlı oldukları görülmüştür. Santrallerin yakıt tiplerine göre devreye girme ve tam kapasiteye ulaşma süreleri ile ilgili çalışma sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8: Yakıt türüne göre santrallerin devreye giriş süreleri

| Proje tipi                      | Başlama ve tam kapasiteye ulaşma süreleri |
|---------------------------------|-------------------------------------------|
| Klasik Hidroelektrik Santraller | 3-5 dakika                                |
| Pompa Depolamalı Santraller     | 3-5 dakika                                |
| Fuel Oil Santralleri            | 3 saat                                    |
| LNG-Doğalgaz Santralleri        | 3 saat                                    |
| LNG Çevrim Santralleri          | 1 saat                                    |
| Kömür Santralleri               | 4 saat                                    |
| Nükleer Santraller              | 5 gün                                     |

Pompa depolamalı hidroelektrik santraller frekans kontrolü ve sistem stabilitesi açısından da oldukça avantajlı santrallerdir. Ülkemizde yeni yeni inşa edilmeye başlanılan bu santraller klasik türdeki hidroelektrik santraller gibi frekans kontrolü ve sistem stabilitesine katkı sağlamaktadırlar.

Türkiye’nin Avrupa Elektrik İletim Sistemi ile senkron bağlantı (UCTE üyeliği) çalışmaları devam etmektedir. İletim sistemimizin, Avrupa iletim sistemine senkron bağlanabilmesi için de arz güvenilirliği ve kalite kriterlerinin sağlanması, frekans kontrolü ve yük alma yük atmadaki sorunların yaşanmaması için bu santraller hızla devreye alınmalıdır[86].

Pompalı depolamalı hidroelektrik santraller yüke uyabilmede esneklik sağlama, yedek enerji tutmada, güç faktörünü iyileştirme ve frekans regülasyonu yapabilme gibi avantajlar getirmektedir[87]. Tipik değerlerle pompa-motor ve türbin-jeneratör randımanları sırasıyla % 88 ve % 85’dir. Buna göre toplam randıman  $(0.88) \times (0.85) = 0.75$  olduğundan, pik zaman dışındaki 4 kWh harcanarak depolanacak

enerji, pik yük anında 3kWh olarak yeniden üretilebilmektedir. Yapılan uygulamalarda pompalı santrallerin depolama kapasitesi daha çok 20-60 MWh olmasına karşın, 2 MWh'a kadar düşebilen küçük ve 100 MWh'a çıkabilen büyük depolarda vardır. Pompalı santralin depolama kapasitesi; yatırım tutarı, depolanan su için geniş yararlanabilirlik, çevresel etkiler ve sistemin toplam verimi gibi dört temel faktöre bağlıdır. ABD'deki uygulamalara göre pompalı su depolama sistemlerinin tesis maliyeti 16-26.5 ABD \$/m<sup>3</sup> sınırları arasındadır. Depo hazne debisi 30 m dolaylarında olmaktadır. Suyu 30m düşü yüksekliğine pompalamakla kazanılan potansiyel enerji 0.082 kWh/m<sup>3</sup> kadardır. Buna göre 20,000 kWh'lık bir deponun hacmi 250,000 m<sup>3</sup> ve 60,000 kWh'lık deponun hacmi de 750,000 m<sup>3</sup> dolaylarındadır. Sisteme 40 yıllık ömür tanınarak amortisman hesaplanmaktadır. Normal çalışma koşulunun dışında, pik yük anında bu sistemle üretilecek enerjinin birim maliyeti 1.31-2.18 cent/kWh olarak bildirilmektedir. Pompa depolamalı sistemin devreye sokulmasındaki çabukluk, bu sistemleri, enterkonnekte şebekeyi besleyen termik santrallerin devreden çıkmasında ya da yetersiz kalmasında ideal bir çözüm aracı durumuna getirmektedir. Bu tür santraller elektrik sisteminin işletme güvenirliliği sağlanmasına büyük katkı yaptığından, çeşitli ülkelerde yaygınlaştıkları görülmektedir. Türkiye'de 2000-2025 döneminde pompalı hidroelektrik santralleri kurulmasına girişilmeli ve ilk etapta kurulu hidrolik gücün % 5'i kadar bir hedef seçilmelidir[67].

#### **4.3.3.1. Pompalı depolamalı santrallerin potansiyeli, kullanımı ve mevcut durumu**

Topografik yapı itibariyle birçok dağlık alana sahip ülkelerin hidrolik enerji kurulu kapasiteleri incelendiğinde toplam kurulu kapasitelerinin yaklaşık %50'sinin hazneli ya da pompalı depolamalı santrallerden oluştuğu görülmektedir. Aynı şekilde tepelik alanları çok olan ülkelerde ise kurulu kapasitenin yaklaşık %30'unu hazneli ve pompalı depolamalı santraller teşkil etmektedir. Hazneli hidroelektrik santralleri yılda tam yüklü işletme saatlerinde 1000-3000 saat üretirken akarsu hidroelektrik santrallerinde bu değer 4000-5000 arasındadır. Sonuç olarak hazneli ya da pompalı depolamalı santrallerin toplam hidroelektrik üretimindeki payı %5 ile %28 arasında değişim göstermektedir. Bu bulguları genelleştirirsek, topografiye bağlı olarak enerji, depolama için mevcut kurulu hidroelektrik kapasitenin yaklaşık %30 – %50'si olarak

tahmin edilebilir. Potansiyel depolama kapasitesi kısa dönem depolama ve uzun dönem depolama olarak ikiye ayrılmaktadır. Kısa dönem depolama 1 – 24 saatlik bir periyottan oluşmaktadır. Uzun dönem ise bir gün ve fazlasını ifade etmektedir [85].

#### **4.3.3.2.Pompalı depolamalı hidrolik santrallerin gelişim süreci**

Dünya’da ilk olarak 1890 yılında İtalya ve İsviçre’de kullanılmış olan pompalı depolamalı hidroelektrik santraller 1930’ların başlarında Avrupa’da ticari olarak kurulmaya başlanmıştır. Ancak, asıl gelişme İkinci Dünya Savaşından sonra olmuştur. Son 10 yılda ise özellikle Avrupa’da elektrik piyasasının liberalleşmesi ile birlikte elektrik piyasasındaki temel yatırım kararları değişmiş, pik saatlerde oluşan yüksek fiyatlar nedeniyle bu santrallere olan ilgi artmıştır. Türkiye’de 1998 yılında 1. Enerji Şurası için yapılan çalışmalarda “Türkiye’de pik güç ihtiyacını karşılamak için 2006 yılından itibaren işletmeye alınmak üzere yapılacak fizibilite çalışmaları sonucuna göre belirlenecek yeterli kapasitede ve tüketim merkezlerine yakın bölgelere pompalı depolamalı santral inşa edilmesi elektrik enerjisinin yeterliliği ve güvenilirliği bakımından büyük önem arz etmektedir” ifadesi yer almıştır.

2001 yılında ülkemizde elektrikte rekabetçi serbest piyasa modeline geçilmesi ayrıca Türkiye’de özellikle önemli bir potansiyel olan rüzgar santrallerinin ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve optimum kullanımlarının sağlanabilmesi için bu tip santrallerin önemini daha da arttırdı. Ancak ne Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın yapmış olduğu projeksiyonlarda ne de 9. 7 yıllık kalkınma planında pompalı depolamalı santrallere yer verilmemektedir[86]. Fakat 10. Enerji Kongresi sonuç bildirgesinde “Elektrik enerjisinde puant yük ihtiyacının karşılanmasında pompalı depolamalı hidrolik santraller uygulamaya konmalıdır” ifadesine yer verildi[88]. ERE grubu tarafından Türkiye’nin tüketim merkezlerine yakın yedi adet pompalı depolamalı santral projesi geliştirildi, lisans almak ve uygulamaya geçmek üzere DSİ Genel Müdürlüğüne Su Kullanım Hakkı Anlaşması yapmak üzere müracaatta bulunuldu. Toplam kurulu gücü 2300 MW olan bu projelerin listesi Tablo 4.9’da verilmektedir. Bu özgün projeler, Türkiye’nin yakın gelecekte “puant talebi karşılayamama” sorununa en uygun çözümü sağlayacaktır[89].

Tablo 4.9: ERE grubu tarafından geliştirilen pompalı depolamalı hidroelektrik santraller

| Proje Adı         | Kurulu Gücü | Alt Hazne       | Bağlantı Noktası     | Hak Sahibi Şirket |
|-------------------|-------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| Boyalıca PDHES    | 200 MW      | İznik Gölü      | Adapazarı 380kV TM   | Karaçam A.Ş.      |
| Narlıca PDHES     | 350 MW      | İznik Gölü      | Bursa DGÇK 380kV TM  | Karaçam A.Ş.      |
| Paşapınarı PDHES  | 350 MW      | İznik Gölü      | Bursa DGÇK 380kV TM  | Karaçam A.Ş.      |
| Mahmuthisar PDHES | 300 MW      | Sarıyar B. Gölü | Çayırhan TS 380kV TM | Karaçam A.Ş.      |
| Pınarönü PDHES    | 400 MW      | Ermenek B. Gölü | Ermenek 380kV TM     | Sarıçam A.Ş.      |
| Ardıçkaya PDHES   | 300 MW      | Ermenek B. Gölü | Ermenek 380kV TM     | Sarıçam A.Ş.      |
| Çavuş PDHES       | 400 MW      | Ermenek B. Gölü | Ermenek 380kV TM     | Su-Yen A.Ş.       |

#### 4.3.3.3. Pompalı depolamalı hidroelektrik santraller ile ilgili yapılmış çalışmalar

Shanghai elektrik şebekesinde Tianhuangping pompalı depolamalı hidro santralinin işletilmesinin faydalarını değerlendirmek için bir simülasyon modeli Wei He tarafından sunulmuştur. Tianhuangping pompalı depolamalı hidro santralde ortalama kömür tüketimi 5.1g/kWh azalmakta ve Shanghai elektrik şebekesi için ek olarak 600MW'lık bir pik kapasite sağlanmaktadır. Bu simülasyon modeli Shanghai şebekesinde bütün güç üretim birimlerinin optimal işletimi için geliştirilmiştir. Ayrıca, TPSHP'li Shanghai şebekesinin avantajları nicel olarak gösterilmiştir[90]. Sohrabi pompalı depolamalı bir projenin değerlendirilmesi için dinamik model önermiştir. Bu dinamik modelde optimal büyüme politikası belirlenmiş ve bu model temel alınarak farklı alternatif sistemler ile birlikte değerlendirildiğinde Rodbar pompalı depolamalı sistemin daha ekonomik olduğu ispatlanmıştır[91]. Guan ve arkadaşları Lagrangian yaklaşım tekniğini kullanılarak hidro-termal sistemin zamanlı ve programlı çalışması için optimizasyon tabanlı bir metot önermiştir. Bu makalede pompalı depolamalı üniteler için çözüm metodolojisi üzerine yoğunlaşmıştır. Pompalı depolamalı üniteler üretimde, pompalamada ve boşta işletilebilirler. Haznelerde depolama yaparak pik yük saatlerinde, yükü karşılamaya yardımcı olan pompalı depolamalı sistemler önemli bir rol oynamaktadır. Sürekli dinamikleri ve kısıtları, işletme bölgelerindeki süreksizliği ve ayrık işletme durumlarını içeren bir grup alt problemleri çözmek için kullanılan verimli bir metottur. Northeast Utilities güç sistemi temel alınarak bu algoritma ile sonuçlar test edildiğinde çözümün etkili ve optimuma yakın olduğu görülmüştür[92]. Katsaprakakis ve arkadaşları Astypalaia

adası için bir güç üretim sistemi önermiştir. Astypalaia enterkonnekte şebekeye bağlı olmayan Ege Denizi'nde bulunan küçük bir adadır. Enerji üretimi sadece bir termoelektrik santral tabanlıdır. Adanın 2003 yılında maksimum yıllık güç talebi 1,78MW ve enerji üretim maliyeti 0,20Euro/kWh'ten daha yüksektir. Önerilen sistemde rüzgar enerjisinden maksimum faydalanma ve tüketilen elektrik enerjisinin üretiminde ithal edilen fosil yakıtların kullanımının minimuma indirgenilmesi amaçlanmaktadır. Rüzgar çiftliği temel güç üretim ünitesidir. PSS stokastik rüzgar üretiminde güç talebine adaptasyonu sağlamayı amaçlamaktadır. Termik santral ise sadece pik yük durumunda devreye girmektedir. Makalede yatırım tabanlı bir model önerilmiştir. Yatırım rüzgar çiftliği ve PSS'den oluşmaktadır. Tanıtılan sistemin başlangıç ve işletme- bakım maliyet parametreleri yaklaşık olarak tahmin edilmiştir. Optimizasyon kriterleri yatırım finansal indekslerden oluşmakta olup, finansal hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir[93]. Planlamada en önemli konulardan biri hidroelektrik santrallerin kurulum kapasitesini belirlemek ve yıllık enerji değerini tahmin etmektir. Hosseini ve arkadaşları bu makalede bir metot üzerine yoğunlaşmışlardır. Hassasiyet analiz metodu kullanılarak bir hidroelektrik santralin en önemli ekonomik indislerinin tahmini ve enerji hesapları için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Monte Carlo metodu kullanılarak belirli bir yük süreç eğrili bir hidroelektrik santralin ünitelerinin sayısı için bir güvenilirlik indisleri hesaplayacak Matlab yazılım programından başka bir program daha geliştirmişlerdir. Son olarak teknik ekonomik ve güvenilirlik indisleri karşılaştırılarak hidroelektrik santralin kurulum kapasitesi belirlenecektir. Yukarıda bahsettiğimiz algoritmalar İran'ın kuzey batısında yer alan Bookan isimli mevcut bir santrale uygulandığında 30MW'lık kapasite elde edilir[94]. Nanahara ve Takimoto pompa depolamalı sistemlerde hazne boyutunu belirlemek için bir metot tanımlamışlardır. Bu çalışmada, pompalı depolamalı sistemlerin hem günlük hem de haftalık birlikte işletilmesi durumları için kaynak ve talep kapasitesindeki belirsizliği de dikkate alarak Monte Carlo benzetim metodu sunulmuştur. Önerilen metotta güç sistem güvenilirliği açısından bakıldığında gerekli hazne kapasitesi belirlenmiştir. Yük profili ve üretim üzerinde gereken hazne boyutunun hassasiyeti örnek bir çalışma üzerinde irdelenmiştir[95]. Kaldellis ve arkadaşları Ege Denizinde orta büyüklükte bir ada olan Archipelago'da kombine rüzgar hidro enerji santrali kurma olasılığını tekno-ekonomik temelli olarak araştırmışlardır. Bu bölgelerde elektrik üretim

maliyetinin yüksek olmasının yanı sıra bölgede rüzgar potansiyelinin oldukça iyi olması önerilen çözümün kullanılabilirliğini artırmaktadır. Ek olarak optimum boyutta su haznesi ve rüzgar türbin sayısı seçerek tekno-ekonomik tabanlı parametrik analizler gerçekleştirmiştir. Gerçek zamanlı ölçümler ile deneysel veriler tabanlı elde edilen hesaplama sonuçları önerilen çözümün geçerliliğini ispatlamıştır. Dahası, uzak sistemlerin elektrik talebini her durumda karşılamıştır. İthal edilen yakıt miktarını minimize ederek, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını %90'lara ulaştırmış ve negatif çevre etkileri azaltılmıştır. Ayrıca Kaldellis rüzgar türbin tipi ve modeli seçildikten sonra talep edilen enerjinin tamamını karşılayacak şekilde bir model geliştirmiştir. Bu modelde talep edilen enerji miktarının karşılanması için minimum ve maksimum türbin sayısı belirlenir. Denklem 4.1 ve 4.2'de minimum ve maksimum rüzgar türbin sayılarını veren ifadeler görülmektedir.

$$z_{\min} = \frac{E_{total} + \delta E}{8760CF.N_0} \quad (4.1)$$

$$z_{\max} = \frac{E_{total} + \delta E}{8760CF.N_0\eta} \quad (4.2)$$

Burada bölgenin potansiyeline en uygun seçilmiş rüzgar türbininin anma gücü (MW)  $N_0$ , yıllık toplam talep edilen enerji miktarı  $E_{total}$ , her bir yıl için toplam talebin artış miktarı  $\delta E$ , kapasite faktörü CF, enerji dönüşüm katsayısı  $\eta$ , yı ifade etmektedir. Modellemede Türkiye'nin nüfus artışı dikkate alındığında  $\delta E$  değeri yıllık %5 olarak belirlenmiş olup, modellemede denklem 4.3'deki ifade kullanılarak minimum ve maksimum türbin sayılarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

$$z = \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} \quad (4.3)$$

$z_{\min}$  minimum rüzgar türbin sayısını,  $z_{\max}$  maksimum rüzgar türbin sayısı,  $z$  ise ortalama rüzgar türbin sayısını temsil etmektedir [96].

## **5. TÜRKİYE DE RÜZGAR KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ**

### **5.1. Giriş**

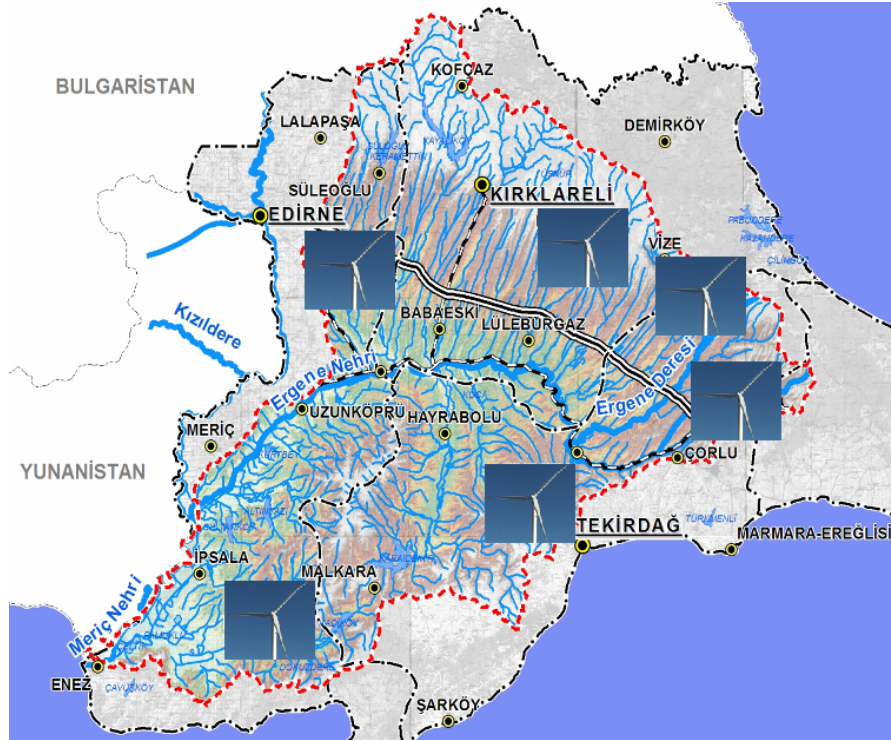
Tez çalışması kapsamında Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çorlu ve Çerkezköy olmak üzere toplamda altı farklı alanda rüzgar karakteristiği belirleme çalışmaları yapılmıştır. Bu altı alanın seçilmesinin sebebi Ergene havzasına olan uzaklıklarıdır. Ergene havzası tez çalışmasının uygulama kısmı olan rüzgar-hidro pompalı depolamalı santral modellemesinde alt hazne olarak seçildiğinden dolayı rüzgar karakteristiği belirlenecek olan yerler Ergene havzasına yakın ve rüzgar yönünden enerji üretebilecek şekilde yeterli rüzgara sahip alanlar olarak belirlenmiştir. Rüzgar karakteristiği belirlenecek alan ve yerler bu bölümden itibaren bölge olarak isimlendirilecektir. Pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemlerin bölgenin elektrik ihtiyacını karşılamada etkin rol oynayacağı düşünülmektedir. Bahsedilen bölgelere ait 2005 ile 2007 yılları arasındaki saatlik periyotta anlık rüzgar hızı ve yön bilgileri Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün rüzgar ölçüm istasyonlarından alınmıştır. Saatlik periyotta alınan bu hız verileri öncelikli olarak frekans sıklık dağılım formuna dönüştürülmüştür. Bu dağılım sırasıyla bütün bölgeler için gerçekleştirilmiştir.

### **5.2. Bölgenin Rüzgar Karakteristiğinin Belirlenmesi**

Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çorlu ve Çerkezköy olmak üzere toplamda altı bölgenin her birinin rüzgar karakteristiğinin belirlenmesi için detaylı analizler gerçekleştirildi. Her bir bölgenin geçmiş yıllarda ölçülmüş olan gerçek dataolar kullanılarak istatistiksel modeller yardımıyla rüzgar karakteristiğinin belirlenmesinde etkin rol oynayan parametreler belirlendi. Rüzgar karakteristiğinin belirlenmesi bu bölümde detaylı olarak analiz edilmektedir.

### 5.2.1. Rüzgar türbini yer seçimi

Rüzgardan elektrik enerjisi üretmek amacıyla rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri kurulması planlanan bölge ya da bölgeler belirlenmelidir. Bölge seçimi gerçekleştirilmeden önce bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli hakkında fikir sahibi olmak açısından Elektrik İşleri Etüt İdaresinin hazırlamış olduğu Türkiye'nin rüzgar atlasından bölgeye ait veriler temin edilebilir. Rüzgar güç üretim sistemi kurulması planlanan bölgeler sırasıyla Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çorlu ve Çerkezköy olmak üzere toplamda altı farklı bölgedir. Bu bölgelerin seçilmesinin bir diğer sebebi tezin ikinci uygulama kısmı olan rüzgar-hidro hazneli pompalı depolamalı santral modellenmesinde kullanılması planlanan hazne olan Ergene havzasına yakınlıklarıdır. Şekil 5.1'de Ergene havzası ve rüzgar karakteristiği belirlenecek olan Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çorlu ve Çerkezköy bölgeleri görülmektedir.



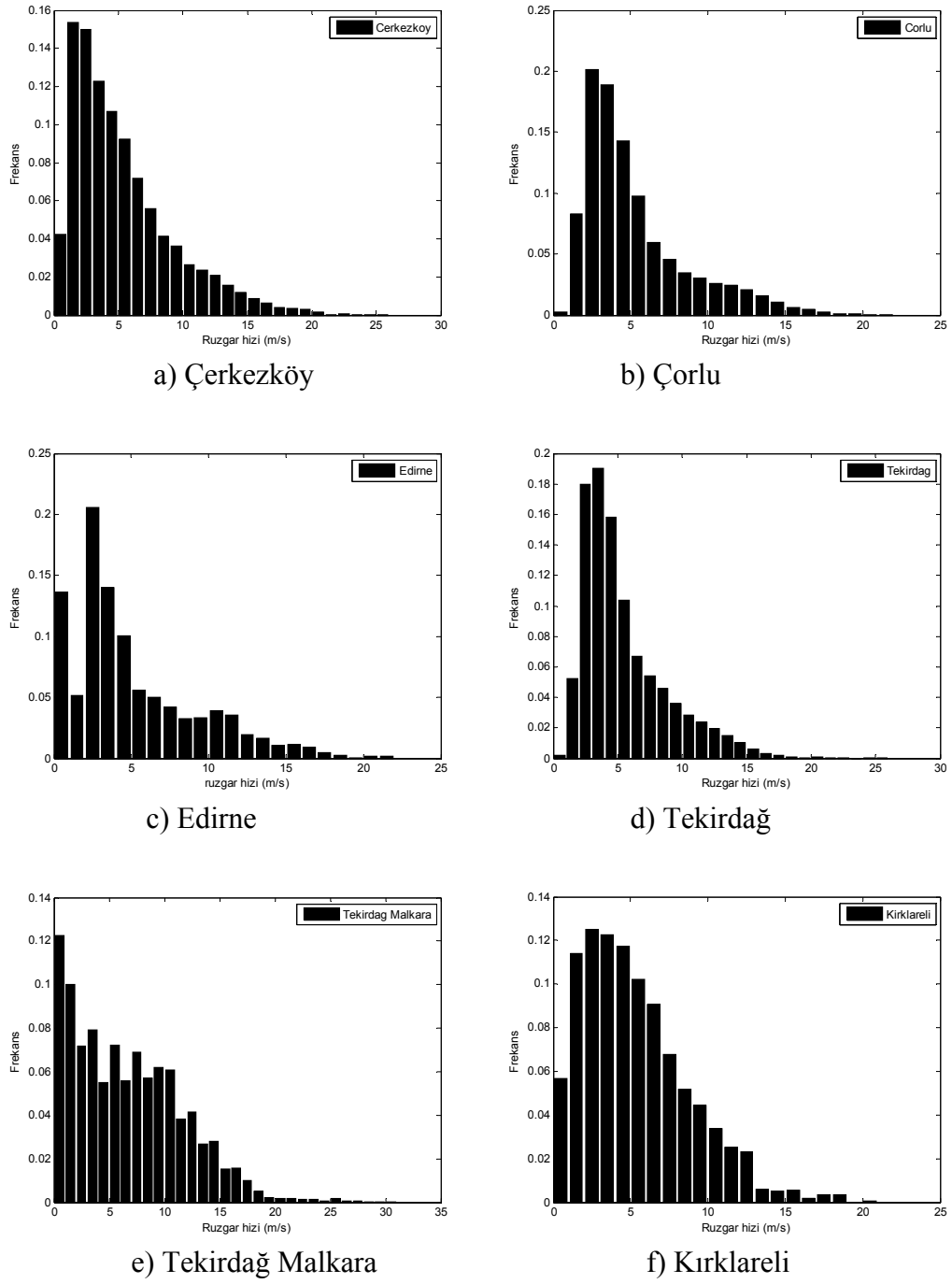
Şekil 5.1: Ergene havzası ve Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çorlu ve Çerkezköy bölgeleri

### 5.2.2. Frekans dağılımlarının belirlenmesi

Rüzgar frekans sıklık dağılımı, belirli bir periyot boyunca alınan ölçüm değerlerinin rüzgar hız değerlerine göre sınıflandırılması olarak da ifade edilebilir. Diğer bir söylemle, 5m/s rüzgar hızı örnek olarak alındığında belirtilen periyot boyunca bu rüzgar hızıyla kaç kere estiğidir. Altı farklı bölgenin rüzgar frekans sıklık dağılımlarının elde edildiği grafikler Şekil 5.2’de görülmektedir.

Çoğu rüzgar türbininin üretime geçebilmesi için gerekli minimum rüzgar hızı 4 m/s olarak ifade edilirken anma rüzgar hızı da genellikle 12 m/s’dir. Bu değerleri baz alarak altı farklı bölgenin tek tek rüzgar frekans sıklık dağılım grafikleri incelendiğinde Çerkezköy bölgesinin toplam rüzgar hız verilerinin %51’i, Çorlu bölgesinin %52.5’i, Edirne bölgesinin %22’si, Kırklareli bölgesinin %58’i, Tekirdağ Malkara bölgesinin %62.6’sı, Tekirdağ bölgesinin %57.5’i 4 m/s ve üzerindedir. Anma hızına göre dağılım grafikleri incelendiğinde, Çerkezköy bölgesinin toplam rüzgar hız verilerinin %7’si, Çorlu bölgesinin %6’sı, Edirne bölgesinin %3’ü, Kırklareli bölgesinin %5’i, Tekirdağ Malkara bölgesinin %15’i, Tekirdağ bölgesinin %6’sı 12m/s nin üzerine olduğu görülmektedir.

Frekans sıklık dağılımlarına bakılarak enerji üretilebilecek sistem bazında incelendiğinde Çerkezköy, Çorlu, Kırklareli, Tekirdağ Malkara ve Tekirdağ’ın büyük ölçekli elektrik üretiminde kullanılan türbinler için elverişli olduğu söylenebilir. Edirne sadece küçük ölçekli rüzgar türbinleri ile bahçe sulama gibi uygulamalar için elverişlidir.

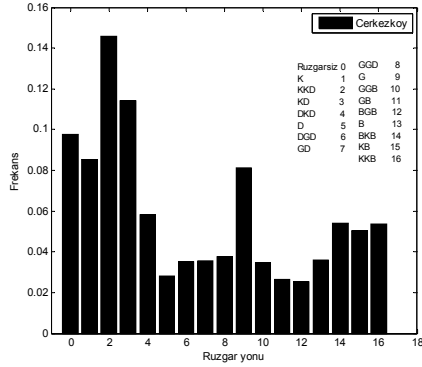


Şekil 5.2: Altı farklı bölge için frekans hız dağılımları

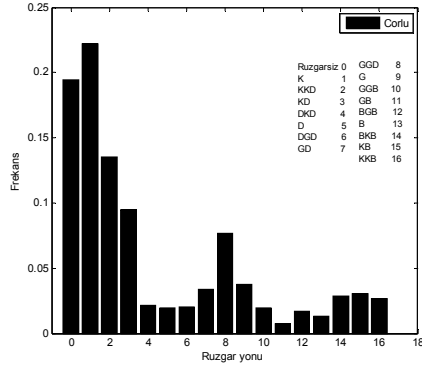
### 5.2.3. Hakim rüzgar yönünün belirlenmesi

Rüzgar frekans sıklık dağılımından sonra diğer önemli parametre rüzgar yön verilerinin incelenmesidir. Hakim rüzgar yönünün belirlenmesi, rüzgar türbininin yerleştirilmesi noktasında türbinden maksimum enerjinin elde edilmesinde hayati önem arz etmektedir. Her bir bölge için hakim rüzgar yönü ve rüzgar yön datalarının

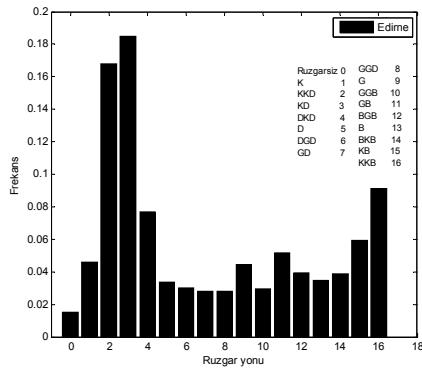
dağılımı Şekil 5.3'te görülmektedir. Hakim rüzgar yönü açısından her bir bölge incelendiğinde, Tekirdağ haricinde diğer bütün bölgelerde Kuzey ve Kuzeydoğu yönü hakim yön olarak karşımıza çıkmaktadır. Tekirdağ'da ise hakim rüzgar yönü Batı ve Kuzeybatıdır. Grafiklerde rüzgarın hiç esmediği durumlarda göz önüne alınmıştır.



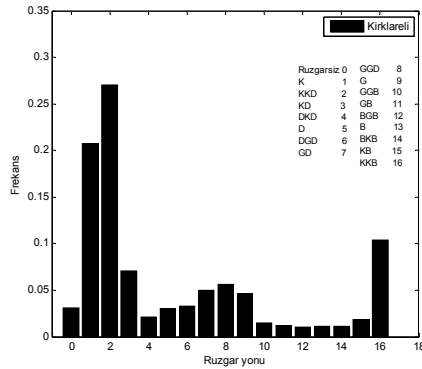
a) Çerkezköy



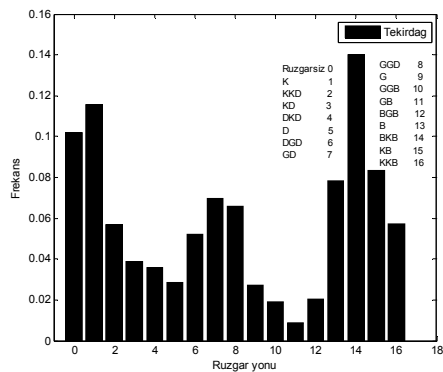
b) Çorlu



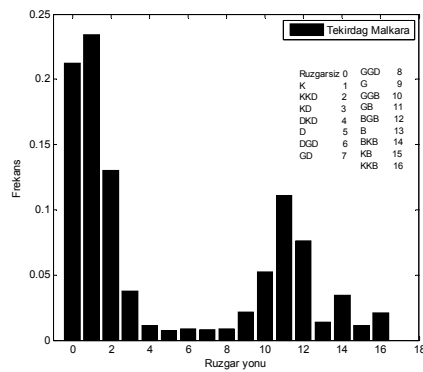
c) Edirne



d) Kırklareli



e) Tekirdağ



f) Tekirdağ Malkara

Şekil 5.3: Her bir bölge için rüzgar yön frekans dağılımları

#### 5.2.4. Weibull dağılımı parametrelerinin hesaplanması

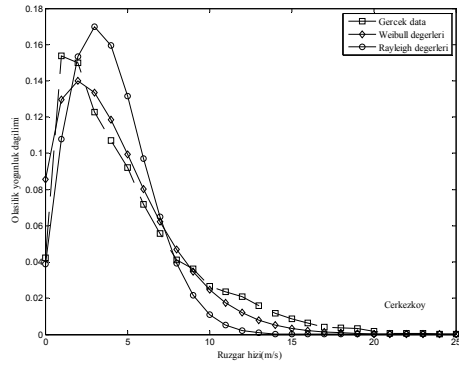
Rüzgarın frekans sıklık dağılımı ve hakim rüzgar yön bilgisi elde edildikten sonra gerçek datalar kullanılarak istatistiksel metotlar ile Weibull ve Rayleigh dağılımları gerçekleştirilir. Öncelikle hem Rayleigh hem de Weibull analizinde kullanılacak olan  $k$  ve  $c$  parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Daha önceki bölümde de belirtildiği gibi Weibull parametrelerinin belirlenmesi için birçok metot bulunmaktadır.

Altı bölgenin Weibull analizlerinde kullanılacak olan  $k$  ve  $c$  parametreleri grafik metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 5.1’de her bir bölgenin rüzgar dataları kullanılarak elde edilen  $k$  ve  $c$  parametreleri görülmektedir.  $k$  ve  $c$  parametreleri her bir bölge için farklılık göstermektedir.  $c$  parametresi ortalama rüzgar hızı hakkında tahmini bilgiler verebilmektedir.  $c$  parametrelerine bakılarak ortalama hızı en yüksek bölgenin Tekirdağ Malkara olduğu söylenebilir.

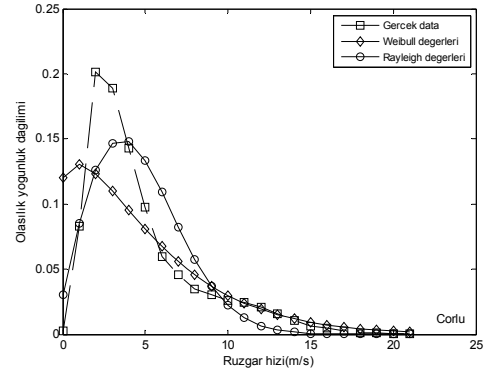
Tablo 5.1: Her bir bölgenin  $k$  ve  $c$  parametreleri

| Bölge            | $k$<br>parametresi | $c$<br>parametresi |
|------------------|--------------------|--------------------|
| Çerkezköy        | 1.48               | 6.11               |
| Çorlu            | 1.21               | 5.73               |
| Edirne           | 1.27               | 5.41               |
| Kırklareli       | 1.60               | 5.85               |
| Tekirdağ         | 1.36               | 6.06               |
| Tekirdağ Malkara | 1.43               | 7.21               |

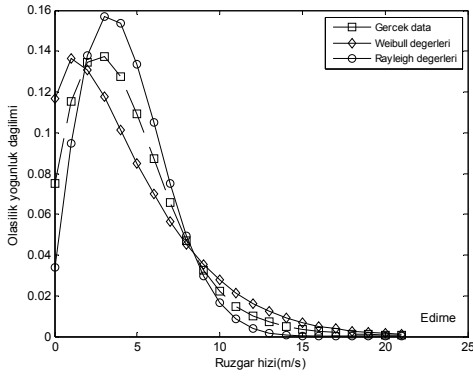
$k$  ve  $c$  parametreleri kullanılarak her bir bölge için Weibull dağılım fonksiyonu eğrileri elde edilir. Şekil 5.4’te her bir bölge için elde edilmiş olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonları, Şekil 5.5’te ise kümülatif yoğunluk dağılım fonksiyonu eğrileri görülmektedir. Bu grafiklerde gerçek data, Weibull ile elde edilmiş kümülatif yoğunluk dağılım eğrisi ve  $k$  parametresinin 2 olarak alınması sonucu elde edilen Rayleigh kümülatif yoğunluk dağılım eğrisi görülmektedir.



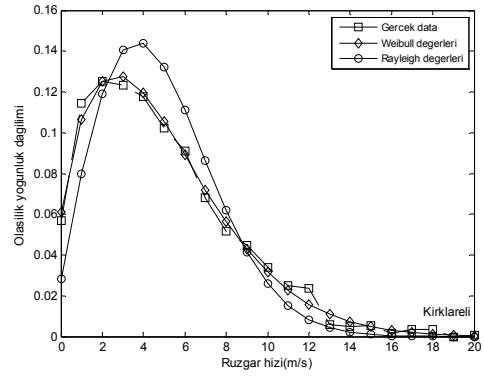
a) Çerkezköy



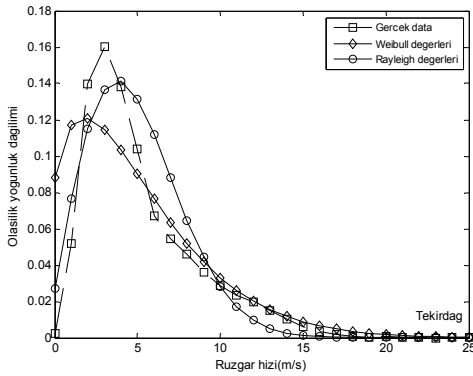
b) Çorlu



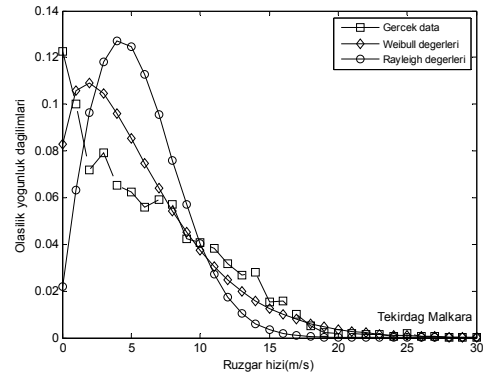
c) Edirne



d) Kırklareli

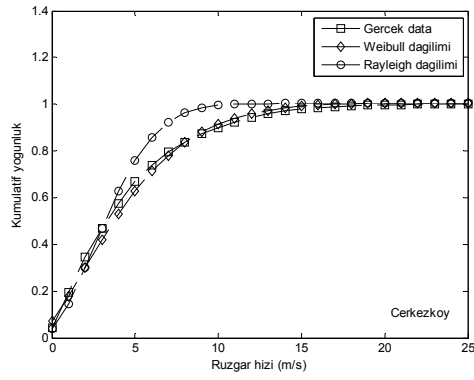


e) Tekirdağ

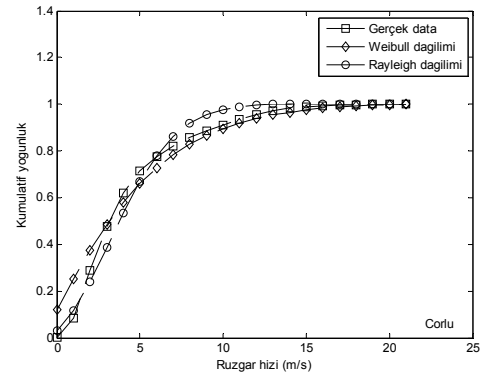


f) Tekirdağ Malkara

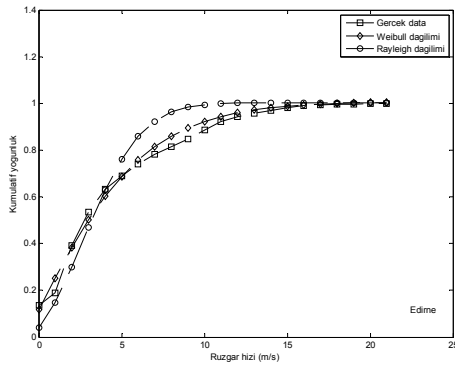
Şekil 5.4: Her bir bölge için Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonları



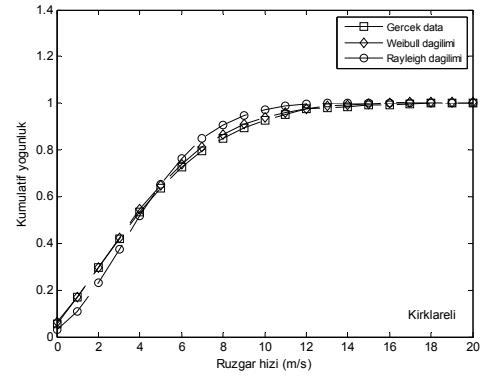
a) Çerkezköy



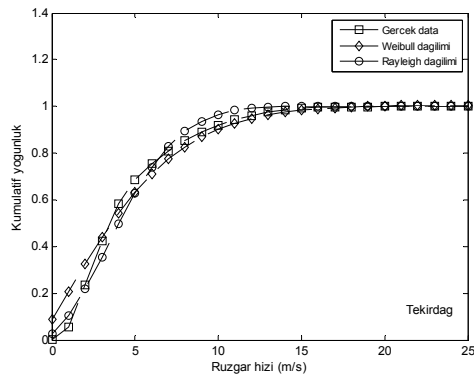
b) Çorlu



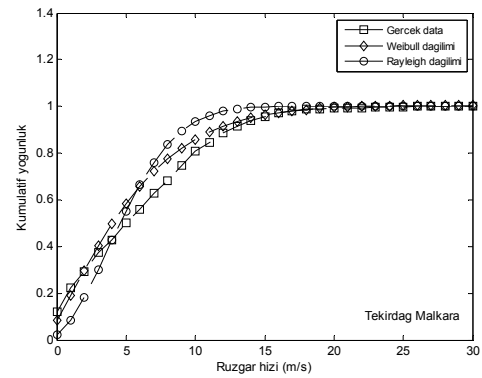
c) Edirne



d) Kırklareli



e) Tekirdağ



f) Tekirdağ Malkara

Şekil 5.5: Her bir bölge için kümülatif yoğunluk dağılım fonksiyonları

### 5.2.5. Ortalama rüzgar hızları

k ve c parametreleri hesaplanıp, Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonları ve kümülatif yoğunluk dağılım fonksiyonları elde edildikten sonra anlık gerçek rüzgar hız dataları kullanılarak ortalama rüzgar hız değeri hesaplanır. Ayrıca Weibull ve

Rayleigh istatistiksel yöntemlerle hesaplanan k ve c parametreleri kullanılarak ortalama hızı, rüzgar hızının standart sapması, maksimum enerji taşıyan rüzgar hızı ve en muhtemel rüzgar hızı gibi değerlerde hesaplanabilmektedir. Ortalama rüzgar hız değeri, ölçüm sonucu elde edilmiş olan saatlik rüzgar hız değerlerinin aritmetik ortalaması ile hesaplanabildiği gibi aynı zamanda Gamma fonksiyonu, k ve c parametreleri kullanarak da istatistiksel olarak hesaplanabilmektedir. Her iki yöntemle de hesaplanarak elde edilen ortalama rüzgar hız değerleri Tablo 5.2’de görülmektedir.

Tablo 5.2: Her bir bölgenin ortalama hızının aritmetik ve istatistiksel olarak hesaplanması

| <b>Bölgeler</b>  | <b>V<sub>ort</sub></b> | <b>V<sub>ort,ist</sub></b> |
|------------------|------------------------|----------------------------|
| Çerkezköy        | 5.31                   | 5.52                       |
| Çorlu            | 5.22                   | 5.38                       |
| Edirne           | 5.10                   | 5.02                       |
| Kırkareli        | 5.32                   | 5.24                       |
| Tekirdağ         | 5.45                   | 5.55                       |
| Tekirdağ Malkara | 6.69                   | 6.55                       |

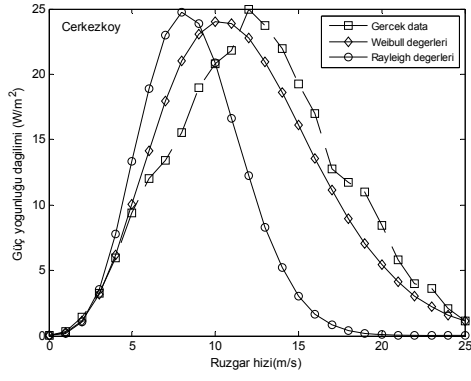
Rüzgar hızının standart sapması, ortalama rüzgar hız değerini hesaplamada k, c ve Gamma fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca her bir bölge için en muhtemel rüzgar hızı ve maksimum enerji taşıyan rüzgar hız değerleri hesaplanmış ve Tablo 5.3’te görülmektedir.

Tablo 5.3: Her bir bölge için ortalama rüzgar hızı, rüzgar hızlarının standart sapması, en muhtemel rüzgar hızı ve maksimum enerji taşıyan rüzgar hız değerleri

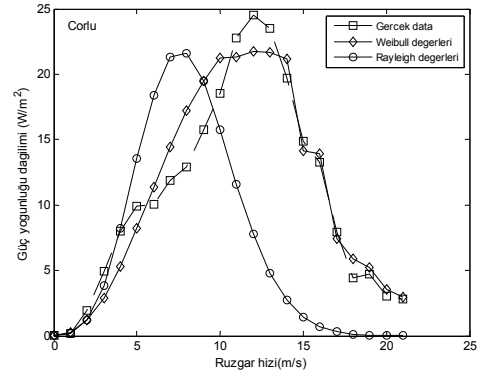
| <b>Bölgeler</b>  | <b>k</b> | <b>c</b> | <b><math>\sigma</math></b> | <b>V<sub>maxE</sub></b> | <b>V<sub>ort</sub></b> | <b>V<sub>mp</sub></b> |
|------------------|----------|----------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| Çerkezköy        | 1.48     | 6.11     | 3.80                       | 10.89                   | 5.52                   | 2.86                  |
| Çorlu            | 1.21     | 5.73     | 4.47                       | 12.83                   | 5.38                   | 1.35                  |
| Edirne           | 1.27     | 5.41     | 3.98                       | 11.39                   | 5.02                   | 1.60                  |
| Kırklareli       | 1.60     | 5.85     | 3.36                       | 9.71                    | 5.24                   | 3.17                  |
| Tekirdağ         | 1.36     | 6.06     | 4.13                       | 11.78                   | 5.55                   | 2.28                  |
| Tekirdağ Malkara | 1.43     | 7.21     | 4.65                       | 13.29                   | 6.55                   | 3.11                  |

#### 5.2.6. Güç yoğunluğu dağılımları

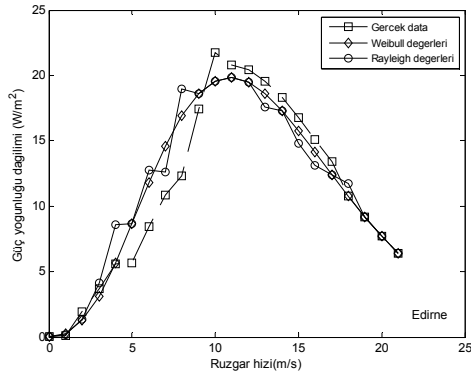
Rüzgar güç ya da enerji yoğunluğu hesapları rüzgar türbini tipi ya da gücüne bağlı olmaksızın rüzgar hız değerleri, k ve c parametrelerine bağlı olarak birim m<sup>2</sup> başına üretilebilecek enerji miktarı hakkında bilgi vermektedir.



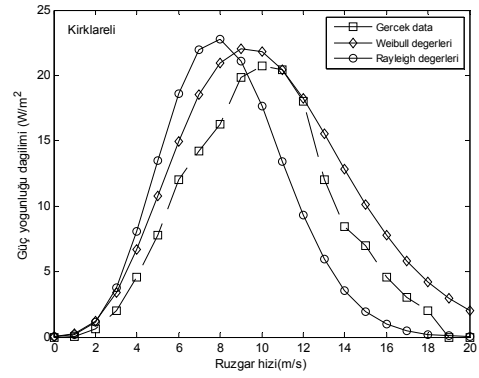
a) Çerkezköy



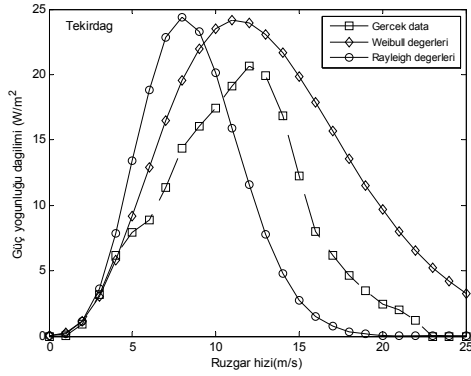
b) Çorlu



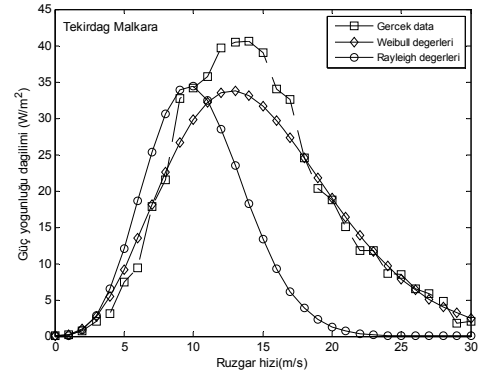
c) Edirne



d) Kırklareli



e) Tekirdağ



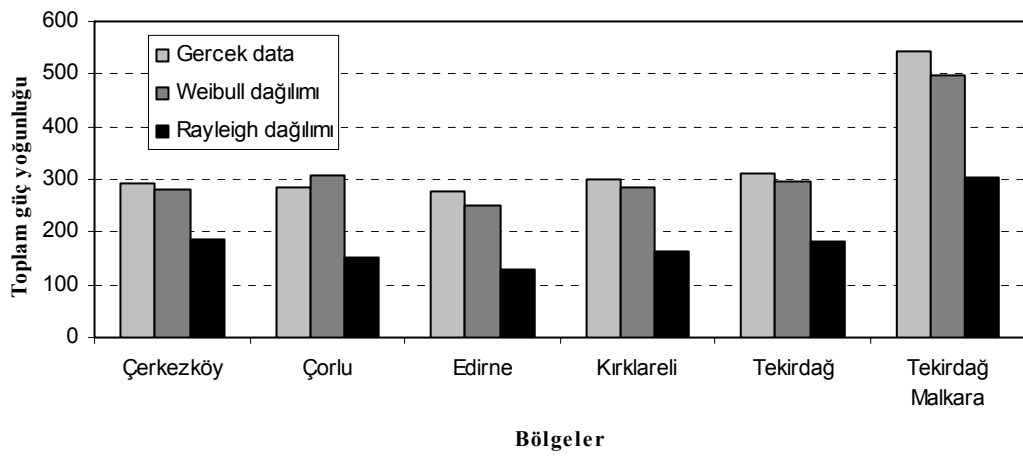
f) Tekirdağ Malkara

Şekil 5.6: Her bir bölge için olasılık güç yoğunluk dağılım fonksiyonları

Her bir bölge için hem gerçek veri kullanılarak hem de Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları ile elde edilmiş olan grafikler Şekil 5.6'da görülmektedir. Her bir hız değerine karşılık üretilebilecek güç miktarları da grafiklerde rahatlıkla görülmektedir. Gerçek verilerle en iyi örtüşen olasılık yoğunluk grafiğinin Weibull olduğu da grafiklerden kolayca anlaşılmaktadır. Her bir bölge için 10m yükseklikte

toplam güç yoğunluk değerleri gerçek veri, Weibull ve Rayleigh olasılık fonksiyonları ile hesaplanmış ve elde edilen değerler Şekil 5.7’de görülmektedir.

Bölgelerin güç yoğunlukları karşılaştırıldığında en iyi güç yoğunluğuna Tekirdağ Malkara sahiptir. Tekirdağ Malkara büyük ölçekli bir rüzgar güç santrali kurmak için elverişlidir. Tekirdağ, Çerkezköy ve Kırklareli, Tekirdağ Malkara’ya nazaran daha düşük bir güç yoğunluğuna sahip olmasına rağmen elektrik üretim amaçlı olarak bu bölgelerde enerji santrali kurulabilir.



Şekil 5.7: Her bir ilçe için 10m yükseklikte elde edilen güç yoğunluk değerleri

### 5.2.7. Rüzgar hızının yükseklikle değişimi

Her bir bölge için farklı yüksekliklerde elde edilen rüzgar hız değerleri ve bu hız değerlerine karşılık hesaplanan güç yoğunluk değerleri Tablo 5.4’te görülmektedir. Ortalama rüzgar hızlarının farklı yüksekliklerde hesaplanmasındaki temel amaç, seçilecek türbinin direk boyu ve hub yüksekliğindeki ortalama hız ve güç yoğunluğu değerlerini belirlemek ve rüzgar güç üretim sistemi kurulması planlanan yer hakkında kabaca bilgi sahibi olmak açısından önem taşımaktadır.

Tablo 5.4: Her bir bölge için farklı yüksekliklerde elde edilmiş rüzgar hız değerleri

| Yükseklik<br>(m) | Çerkezköy               |                      | Çorlu                   |                      | Edirne                  |                      | Kırklareli              |                      | Tekirdağ                |                      | Tekirdağ<br>Malkara     |                      |
|------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
|                  | V <sub>m</sub><br>(m/s) | P(W/m <sup>2</sup> ) | V <sub>m</sub><br>(m/s) | P(W/m <sup>2</sup> ) | V <sub>m</sub><br>(m/s) | P(W/m <sup>2</sup> ) | V <sub>m</sub><br>(m/s) | P(W/m <sup>2</sup> ) | V <sub>m</sub><br>(m/s) | P(W/m <sup>2</sup> ) | V <sub>m</sub><br>(m/s) | P(W/m <sup>2</sup> ) |
| 10.00            | 5.32                    | 291.33               | 5.23                    | 118.49               | 5.11                    | 290.00               | 5.32                    | 200.00               | 5.45                    | 204.03               | 6.69                    | 542.59               |
| 20.00            | 5.86                    | 321.02               | 5.76                    | 130.57               | 5.63                    | 319.55               | 5.86                    | 220.38               | 6.01                    | 224.82               | 7.38                    | 597.88               |
| 30.00            | 6.20                    | 339.77               | 6.10                    | 138.19               | 5.96                    | 338.21               | 6.20                    | 233.25               | 6.36                    | 237.96               | 7.81                    | 632.80               |
| 40.00            | 6.45                    | 353.74               | 6.35                    | 143.87               | 6.20                    | 352.11               | 6.46                    | 242.84               | 6.62                    | 247.74               | 8.13                    | 658.81               |
| 50.00            | 6.66                    | 364.96               | 6.55                    | 148.44               | 6.40                    | 363.29               | 6.66                    | 250.55               | 6.83                    | 255.60               | 8.38                    | 679.71               |
| 60.00            | 6.83                    | 374.40               | 6.72                    | 152.28               | 6.57                    | 372.68               | 6.84                    | 257.02               | 7.01                    | 262.21               | 8.60                    | 697.29               |
| 70.00            | 6.98                    | 382.56               | 6.87                    | 155.60               | 6.71                    | 380.81               | 6.99                    | 262.63               | 7.16                    | 267.93               | 8.79                    | 712.50               |
| 80.00            | 7.11                    | 389.78               | 7.00                    | 158.53               | 6.84                    | 387.99               | 7.12                    | 267.59               | 7.29                    | 272.98               | 8.96                    | 725.94               |
| 90.00            | 7.23                    | 396.26               | 7.11                    | 161.17               | 6.95                    | 394.45               | 7.24                    | 272.03               | 7.42                    | 277.52               | 9.10                    | 738.01               |
| 100.00           | 7.34                    | 402.15               | 7.22                    | 163.57               | 7.05                    | 400.31               | 7.34                    | 276.08               | 7.53                    | 281.64               | 9.24                    | 748.98               |

Tablo 5.4 detaylı bir şekilde irdelendiğinde, her bölge için 50m, 80m ve 100m yüksekliklerdeki ortalama rüzgar hızları yönünden en yüksek olan bölge Tekirdağ Malkara'dır. Tekirdağ Malkara'nın 100m yükseklikteki ortalama hız değeri 9.24m/s'dir.

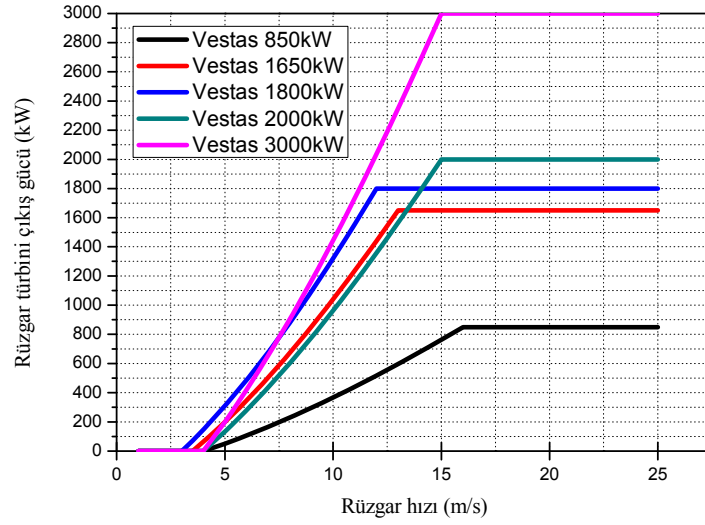
### 5.3. Optimum Rüzgar Türbin Seçimi

Rüzgar karakteristiğini belirleme işleminden sonra bölge için en uygun rüzgar güç üretim sistemi seçimi gerçekleştirilir. Seçim aşamasında dikkat edilmesi gereken husus, optimum türbin sayısını belirlemek ve toplam maliyeti minimuma indirmektir. Modellenen sistemde rüzgardan elektrik enerjisi üretme aşamasında sistem için en uygun olduğu düşünülen beş farklı rüzgar türbini üzerine odaklanılmıştır. Bu türbinler ile ilgili cut-in, cut-out rüzgar hızları ve anma rüzgar hız değeri, türbin çıkış gücü, türbinin hub yüksekliği ve rotor çapı gibi teknik özellikler detaylı olarak Tablo 5.5'de görülmektedir.

Tablo 5.5: Rüzgar türbinlerinin özellikleri

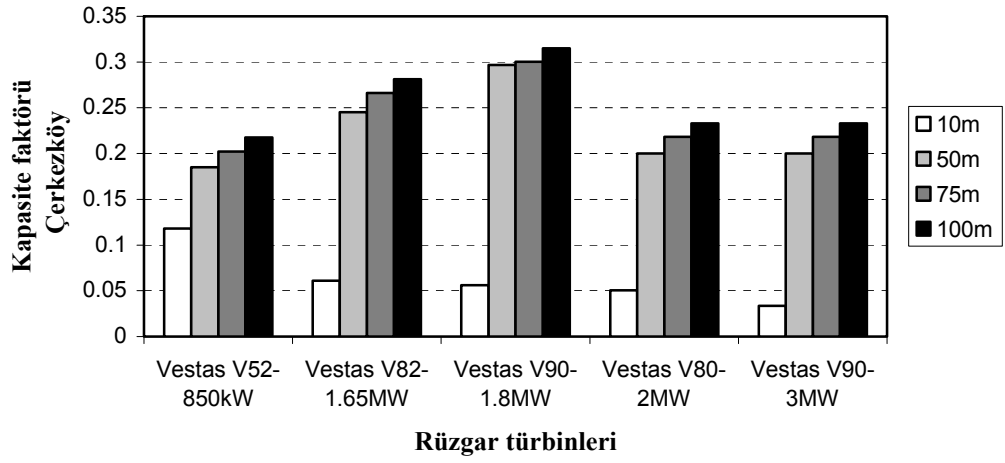
| Rüzgar türbinleri | Devreye giriş hızı, $v_c$ (m/s) | Devreden çıkış hızı, $v_F$ (m/s) | Anma rüzgar hızı, $v_R$ (m/s) | Türbin çıkış gücü, $P_{eR}$ (kW) | Hub Yüksekliği, $h$ (m) | Rotor çapı, (m) |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Vestas V52-850kW  | 4                               | 25                               | 16                            | 850 kW                           | 55-65-75                | 52              |
| Vestas V82-1.65MW | 3.5                             | 20                               | 13                            | 1650 kW                          | 78                      | 82              |
| Vestas V90-1.8MW  | 3                               | 25                               | 12                            | 1800 kW                          | 80-105                  | 90              |
| Vestas V80-2MW    | 4                               | 25                               | 15                            | 2000 kW                          | 67-80                   | 80              |
| Vestas V90-3MW    | 4                               | 25                               | 15                            | 3000 kW                          | 80-105                  | 90              |

Bu değerler dikkate alınarak her bir türbin için türbin güç performansı analitik olarak hesaplanabildiği gibi aynı zamanda imalatçı firma tarafından da verilebilmektedir. Güç performans eğrileri her bir rüzgar hızına karşılık türbinin üretebileceği güç değeri hakkında bilgi vermektedir. Modellemede kullanılan Vestas firmasının rüzgar türbinlerin güç performans eğrileri analitik olarak elde edildi. Elde edilen bu güç performans eğrileri üretici firmanın vermiş olduğu kataloglar ile karşılaştırıldığında eğrilerin bire bir örtüştüğü görüldü. Analitik olarak elde edilen grafikler Şekil 5.8'de görülmektedir.

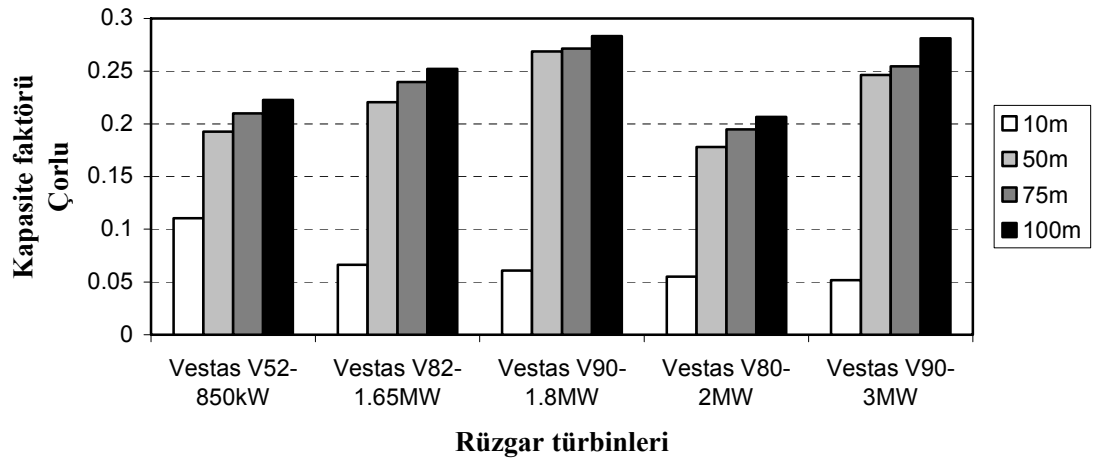


Şekil 5.8: Her bir rüzgar türbinine ait güç performans eğrileri

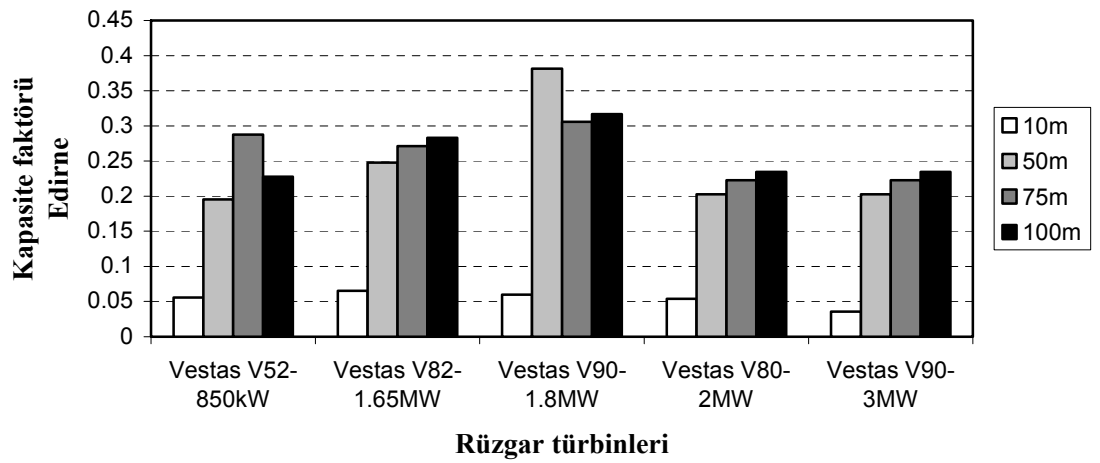
Her bir bölge için 2002-2007 yılları arası saatlik bazda rüzgar ölçüm değerleri ile beş farklı rüzgar türbininin devreye giriş hızı, devreden çıkış hızı, anma rüzgar hızları ve ara rüzgar hız değerlerinde üretebilecekleri güç değerleri performans güç eğrisinin yardımıyla hesaplanır. Beş farklı rüzgar türbininin her birine göre anlık rüzgar verileri kullanılarak ortalama güç değerleri elde edilir. Hesaplanan ortalama güç değerlerinin beş farklı rüzgar türbininin anma güçlerine bölünmesi yada oranlanması ile kapasite faktörleri belirlenir. Şekil 5.9’da her bir bölge için beş farklı rüzgar türbininin kullanılması durumunda elde edilen kapasite faktörleri görülmektedir.



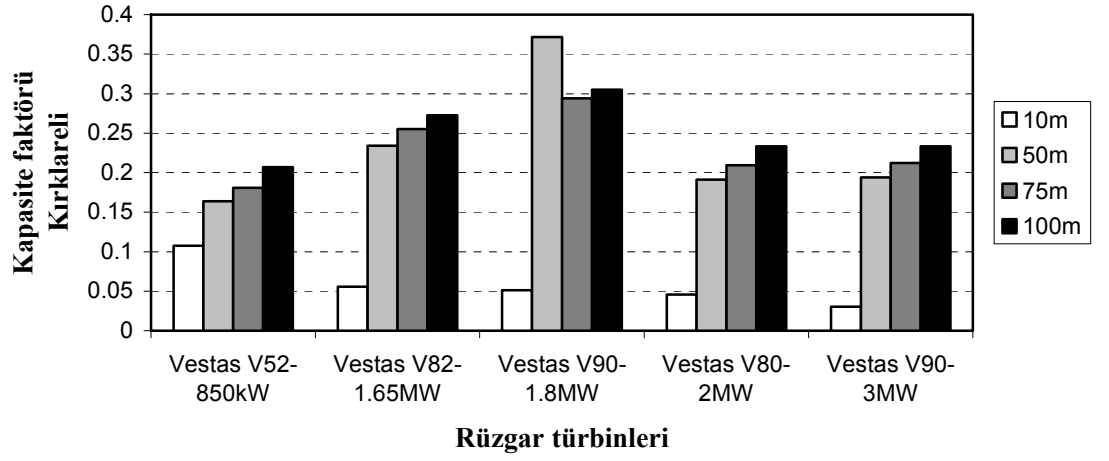
a) Çerkezköy



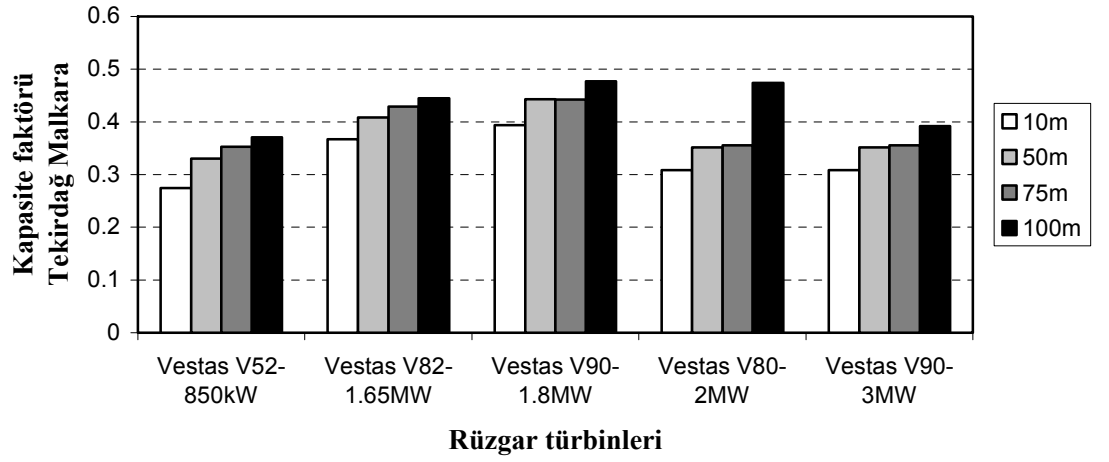
b)Çorlu



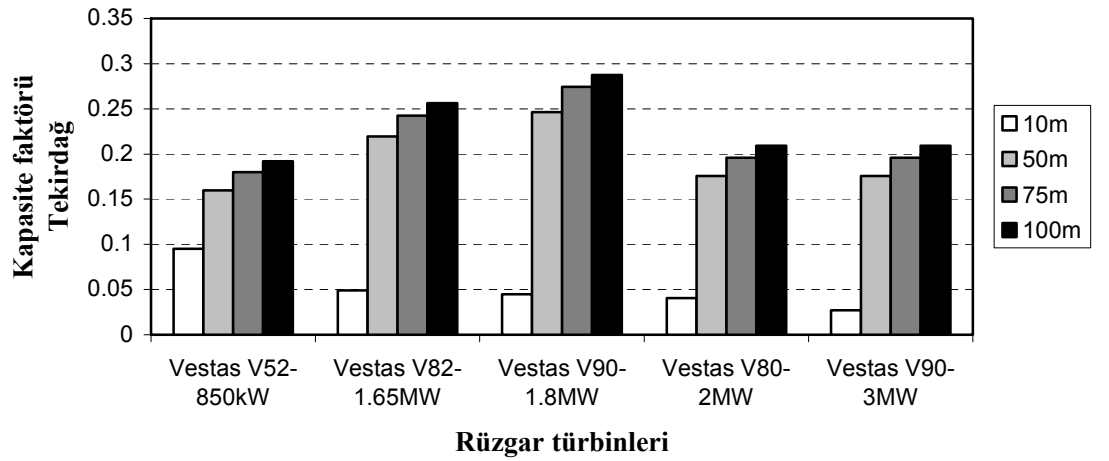
c) Edirne



d) Kırklareli



e) Tekirdağ Malkara



f) Tekirdağ

Şekil 5.9: Her bir bölge için beş farklı rüzgar türbini için hesaplanan kapasite faktörleri

Hesaplamalar, ortalama rüzgar hız değerleri 25m, 50m, 75m ve 100m yükseklikler için ayrı ayrı yapılmıştır. Her bir yükseklik değeri için hesaplanan yeni k ve c değerleri Tablo 5.6’da görülmektedir.

Tablo 5.6: Farklı yükseklikler için hesaplanan Weibull parametreleri

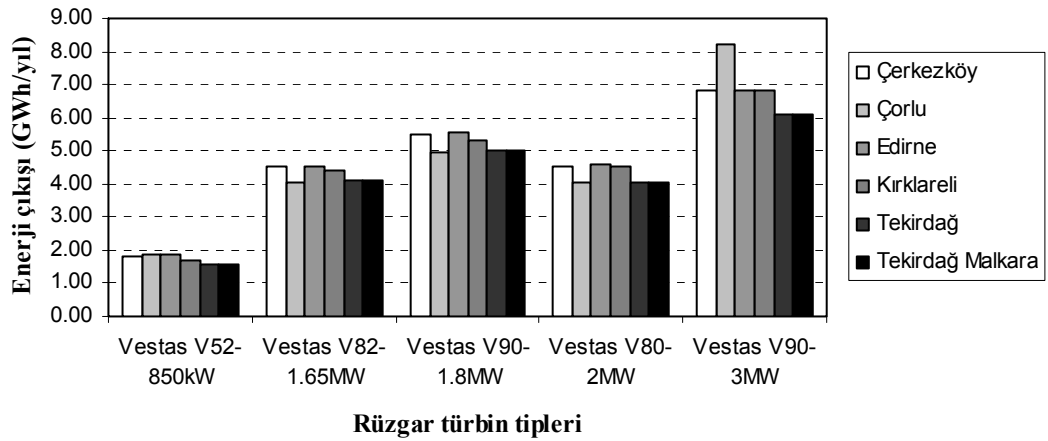
| <b>Bölgeler</b>  |   | <b>10m</b> | <b>50m</b> | <b>75m</b> | <b>100m</b> |
|------------------|---|------------|------------|------------|-------------|
| Çerkezköy        | k | 1.489      | 1.378      | 1.348      | 1.32        |
|                  | c | 6.114      | 6.896      | 7.062      | 6.84        |
| Çorlu            | k | 1.212      | 1.972      | 1.972      | 2.008       |
|                  | c | 5.73       | 7.884      | 7.993      | 8.082       |
| Edirne           | k | 1.273      | 1.319      | 1.242      | 1.291       |
|                  | c | 5.417      | 6.746      | 7.127      | 7.247       |
| Kırklareli       | k | 1.6039     | 1.578      | 1.448      | 1.32        |
|                  | c | 5.585      | 6.396      | 6.862      | 6.249       |
| Tekirdağ         | k | 2.212      | 1.954      | 1.917      | 1.910       |
|                  | c | 7.39       | 8.49       | 8.60       | 8.97        |
| Tekirdağ Malkara | k | 1.43       | 1.969      | 1.948      | 1.898       |
|                  | c | 7.213      | 8.716      | 8.831      | 9.356       |

Yükseklik ile kapasite faktörü değerinin arttığı Tablo 6.6’dan gözlenmektedir. Her bir bölge için 25m, 50m, 75m ve 100m yüksekliklerde hesaplanan k ve c parametreleri ile ortalama güç değerleri ve ortalama rüzgar hızları tekrar hesaplanmaktadır. Fakat, burada, türbinlerin kapasite faktörlerinin değerlendirilmesi yapılırken genellikle 75m, 100m yükseklikteki k ve c parametreleri dikkate alınmaktadır. Bunun sebebi türbinlerin hub yüksekliklerinin 75m ve 100m olmasıdır.

Her bir bölge için rüzgar karakteristiği belirlemede 75m’deki k ve c parametreleri ile 75m yükseklikteki beş farklı rüzgar türbininden hesaplanacak güç değerleri dikkate alınarak kapasite faktörleri hesaplanmıştır. Kullanılan türbinlerin hub yükseklikleri sabit olmasına rağmen, bölgenin rüzgar karakteristiğine bağlı olarak üretilen enerjideki değişimden dolayı kapasite faktörü bölgeden bölgeye farklılık gösterir. Kapasite faktörü türbinlerin parametrelerine bağlı olarak da değişim gösterir.

Bütün bölgelerde en iyi kapasite faktörünün sağlayan Vestas V90-1.8MW'lık türbin türüdür. Her bir bölge için ayrı ayrı değerlendirildiğinde, Çerkezköy, Çorlu, Edirne, Kırklareli Tekirdağ bölgelerinde kapasite faktörleri %15 ile %30 seviyelerinde değişim gösterirken, Tekirdağ Malkara'da bu değer %30 ile %40'lar seviyesinde değişmektedir. Tekirdağ Malkara'da en yüksek kapasite faktörü %40 ile Vestas V90-1.8MW'lık türbin ile sağlanmıştır. Trakya bölgesinde rüzgar karakteristiği yönünden en uygun yerin Tekirdağ Malkara olduğu yapılan karakteristik çalışmanın sonucunda elde edilmiştir.

Çorlu, Çerkezköy, Edirne, Kırklareli ve Tekirdağ bölgeleri kapasite faktörü değerlerinin maksimum %15 ile %30 seviyelerinde olması türbin yerleştirilmesi için çok uygun yerler olmadığına kanıttır. Tekirdağ Malkara'da Vestas V90-1.8MW'lık türbin kullanıldığı takdirde en yüksek kapasite faktörünün yanı sıra yıllık üretilecek en fazla enerji bu türbin ile sağlanabilecektir. Diğer türbinler ile elektrik üretmek de mümkün olup, üretilen enerjinin maksimum olması arzulandığından seçilmesi gereken türbin Vestas V90-1.8MW olmalıdır. Seçilen türbinlerden 100m yükseklikte elde edilecek yıllık enerji miktarları Şekil 5.10'da görülmektedir.

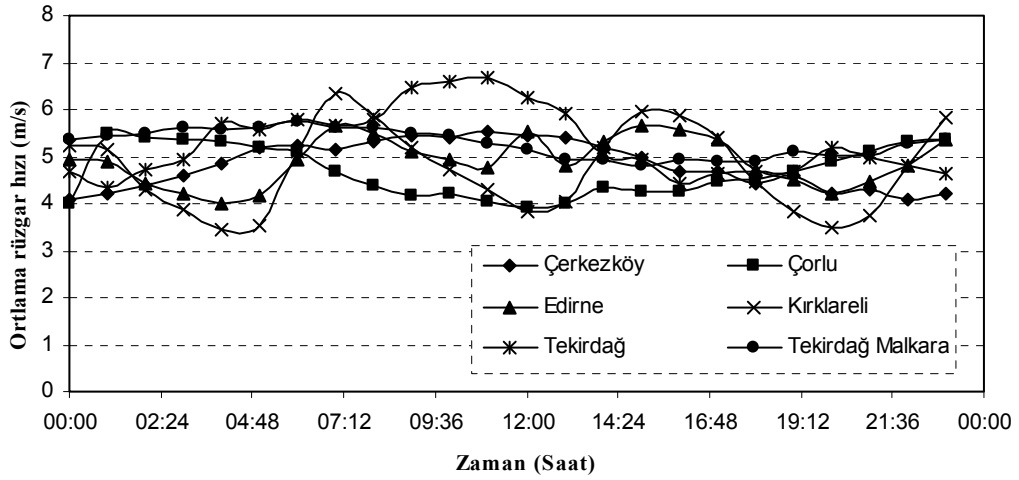


Şekil 5.10: Her bir bölge için 100m yükseklikteki beş farklı türbinden elde edilen enerji çıkışları

Elde edilen enerji miktarlarına bakıldığında Tekirdağ Malkara'nın rüzgar potansiyelinin diğerlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Üretilen enerjinin maksimum olması ve üretim maliyetinin minimum olması göz önüne alındığında, türbin satın alma maliyetine göre kıyaslandığında uygun türbinin Vestas V80-1.8MW olduğu görülmektedir.

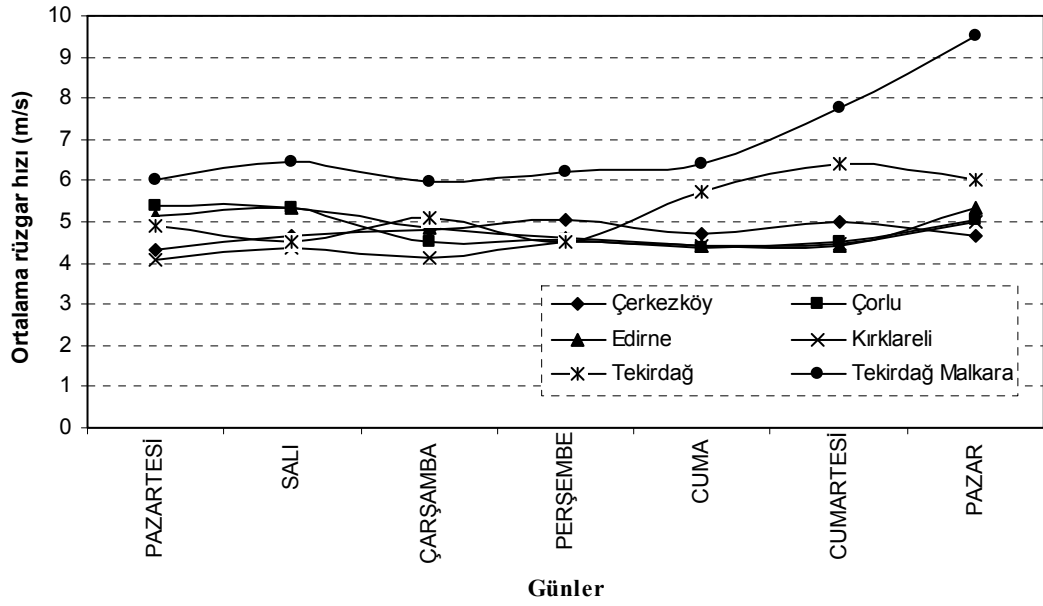
#### 5.4. Rüzgar Güç Üretim Sistemi Yük Eğrilerinin Oluşturulması

Rüzgar enerjisi üretim sistemlerinden elde edilen güç miktarları günlük, aylık, mevsimsel ve yıllık bazda oluşturulmaktadır. Yıllık saatlik bazda elde edilen datadan aylık, mevsimsel ve günlük ortalama rüzgar datalarına kolaylıkla dönüşüm yapılabilmektedir. Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te saatlik, günlük, aylık ve mevsimsel ortalama rüzgar hızlarının grafikleri görülmektedir.



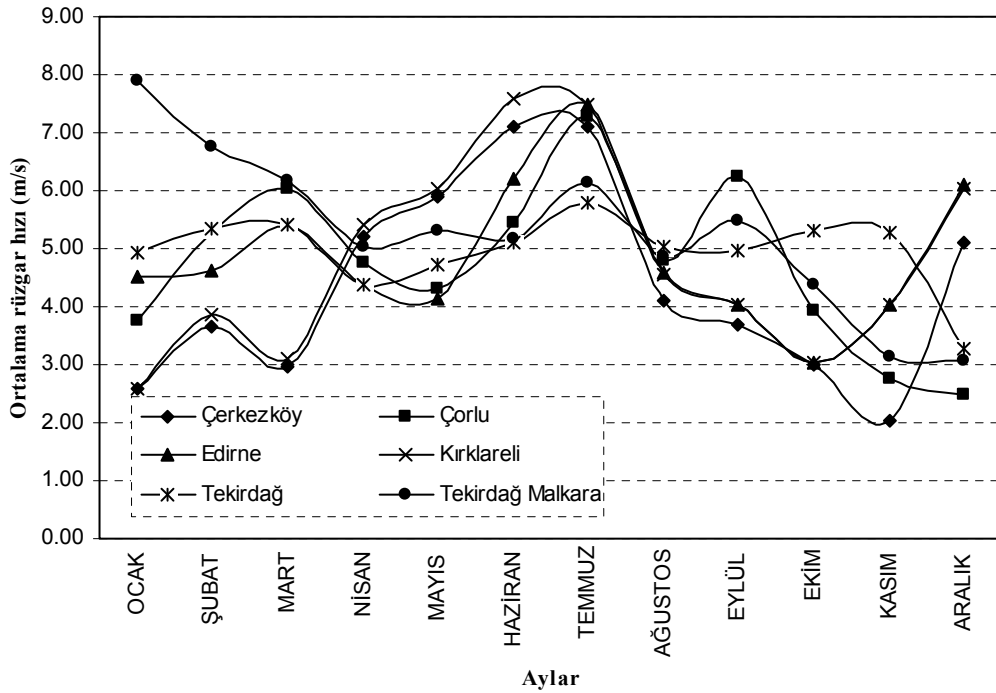
Şekil 5.11: Her bir bölgenin saatlik ortalama rüzgar hızları

Her bir bölgeye ait saatlik bazda elde edilen eğriler incelendiğinde, her bir bölgede en yüksek ortalama rüzgar hızı değerleri 06.00 ile 10.00 ve 14.00 ile 18.00 saatlerinde gerçekleşmiştir. Ortalama rüzgar hızları genel olarak irdelendiğinde en yüksek ortalama hız değerleri Tekirdağ Malkara bölgesinde iken en düşük ortalama hız değerleri Çerkezköy bölgesindedir. En yüksek ortalama hız değeri Tekirdağ bölgesinde saat 07.00’de 6.342m/s olarak hesaplanmıştır. En düşük ortalama rüzgar hız değeri Kırklareli bölgesinde saat 04.00’de 3.457 m/s olarak belirlenmiştir.



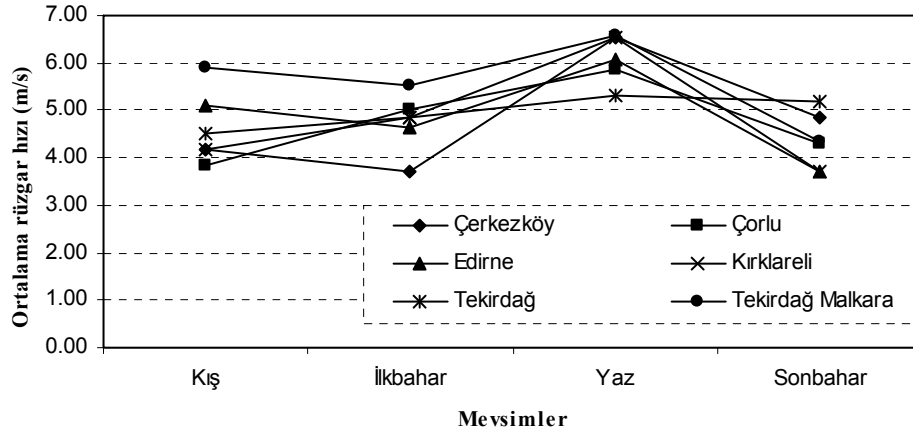
Şekil 5.12: Her bir bölge için günlük ortalama rüzgar hızları

Günlük bazda ortalama rüzgar hız değerleri incelendiğinde, en yüksek ortalama rüzgar hız değeri 9.49 m/s olarak Tekirdağ Malkara bölgesinde Pazar günü elde edilmiştir. En düşük ortalama rüzgar hız değeri 4 m/s olarak Kırklareli bölgesinde Çarşamba günü gözlenmiştir.



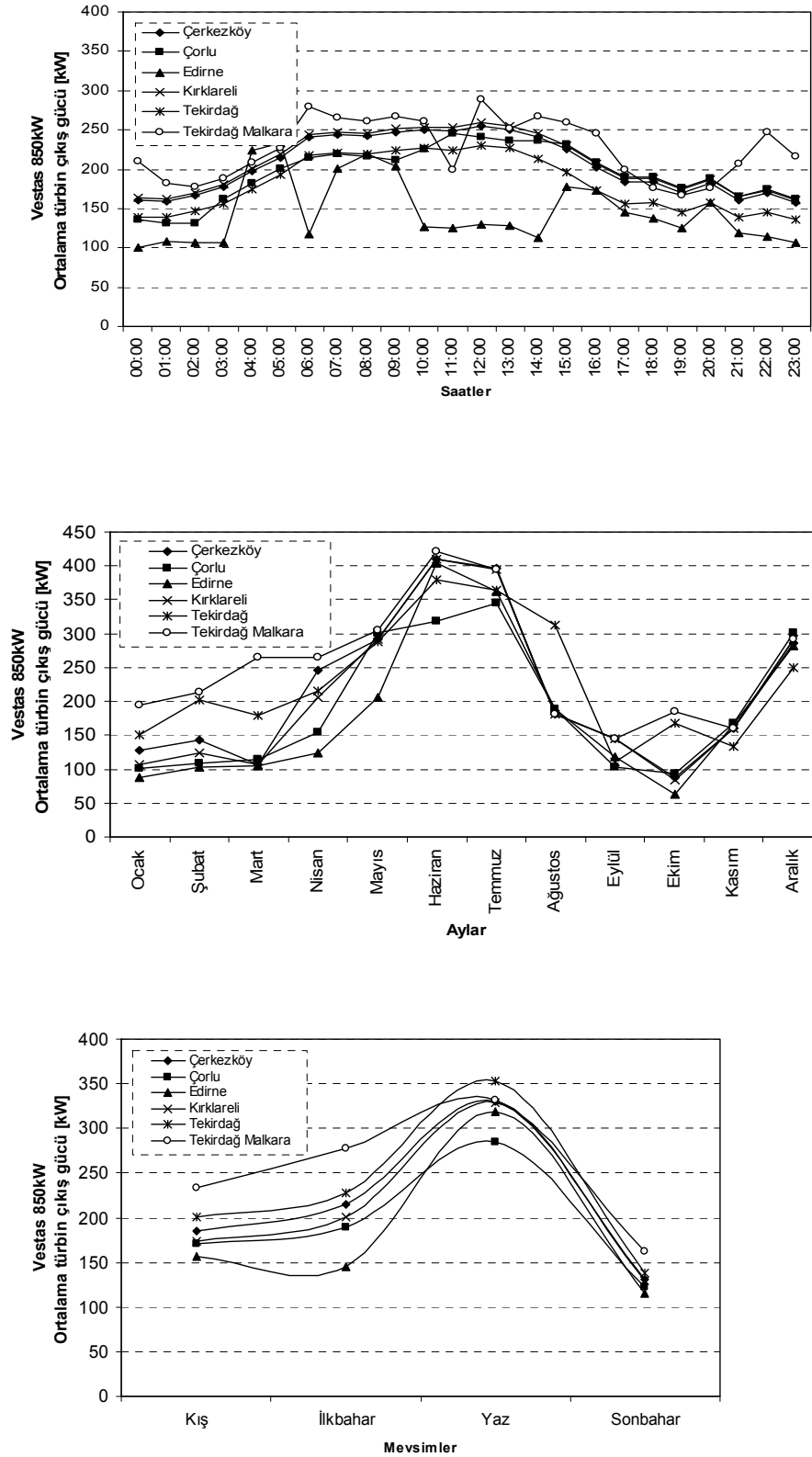
Şekil 5.13: Her bir bölge için aylık ortalama rüzgar hızları

Aynı veriler her bir bölge için aylık bazda irdelendiğinde, en düşük ortalama rüzgar hız değeri 2.58 m/s olarak Çerkezköy bölgesinde Ocak ayında gözlenmiştir. En yüksek ortalama rüzgar hız değeri ise 7.906 m/s olarak Tekirdağ Malkara bölgesinde Temmuz ayında hesaplanmıştır.



Şekil 5.14: Her bir bölge için ortalama mevsimsel rüzgar hızları

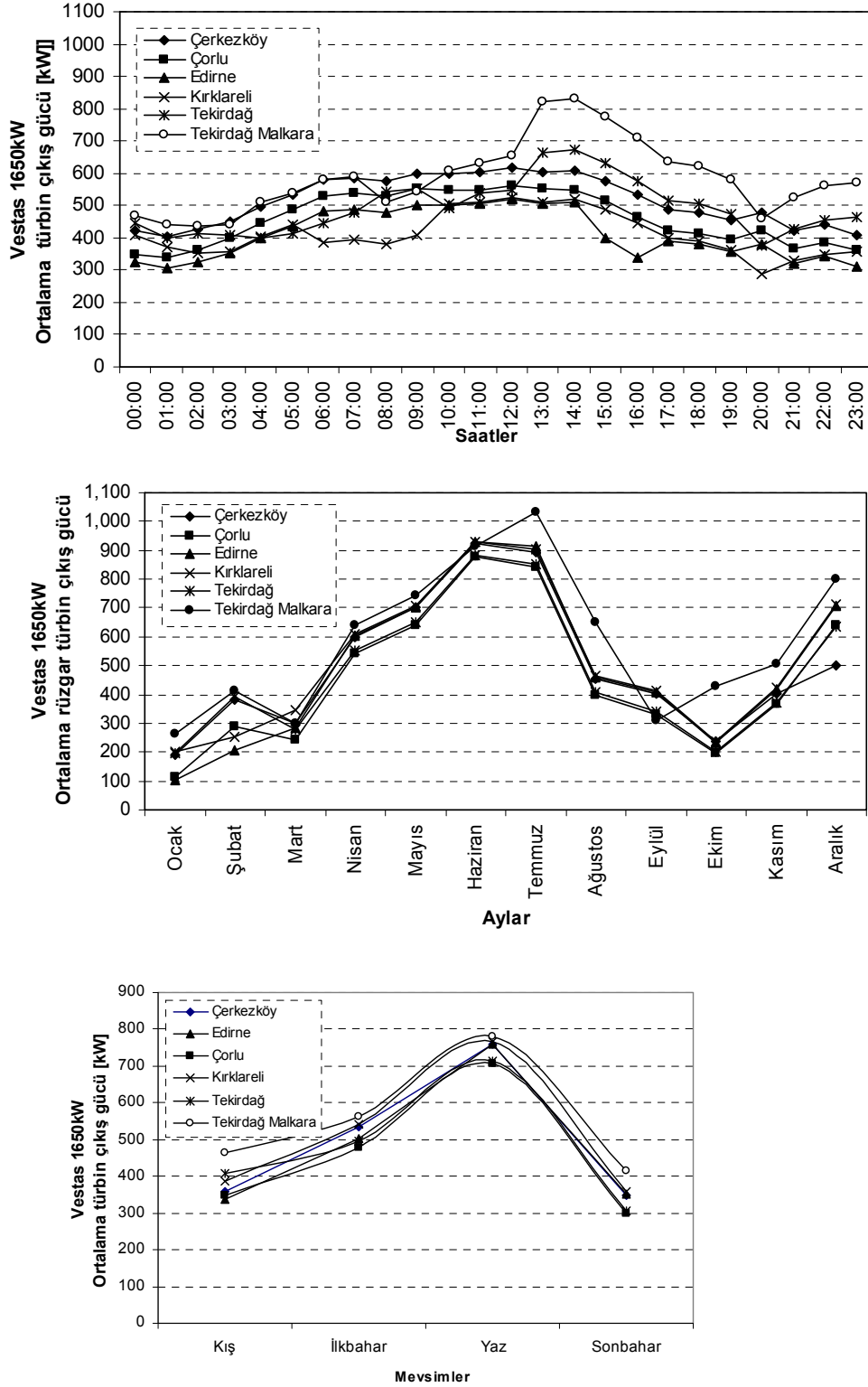
Mevsimsel olarak her bir bölge değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama rüzgar hızlarının Yaz döneminde görülürken en düşük ortalama rüzgar hızları Sonbahar'da gözlenmiştir. Mevsimsel olarak en yüksek ortalama rüzgar hızlarına Tekirdağ Malkara bölgesi sahipken, en düşük ortalama rüzgar hızına Çerkezköy bölgesi sahiptir. Tekirdağ bölgesinde en yüksek ortalama rüzgar hız değeri 6.6 m/s olarak Yaz döneminde sağlanmıştır. Mevsimsel olarak en düşük ortalama rüzgar hız değeri 3.71 m/s olarak İlkbahar'da görülmüştür. Buraya kadar her bir bölge için rüzgar ölçüm istasyonlarından alınan ortalama rüzgar hız verilerinin saatlik, günlük, aylık ve mevsimsel olarak dağılımları hesaplanıp, grafikleri elde edilerek gerekli yorumlamalar yapılmıştır. Bu veriler esas alınarak her bir bölge için beş farklı türbin türü ile elde edilebilecek güç değerleri saatlik, günlük, aylık ve mevsimsel olarak hesaplanarak grafiksel olarak ifade edilmektedir. Vestas 850kW'lık türbin tercih edildiğinde elde edilecek enerji miktarlarının bölgelere göre değişimi saatlik, aylık ve mevsimlik olarak Şekil 5.15'de görülmektedir. Elde edilen enerji miktarları irdelendiğinde en düşük enerji miktarının Edirne bölgesinde olduğu en yüksek enerji eldesinin ise Tekirdağ Malkara ve Tekirdağ bölgelerinde olduğu her üç grafik incelendiğinde de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.15: Vestas 850kW’lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri

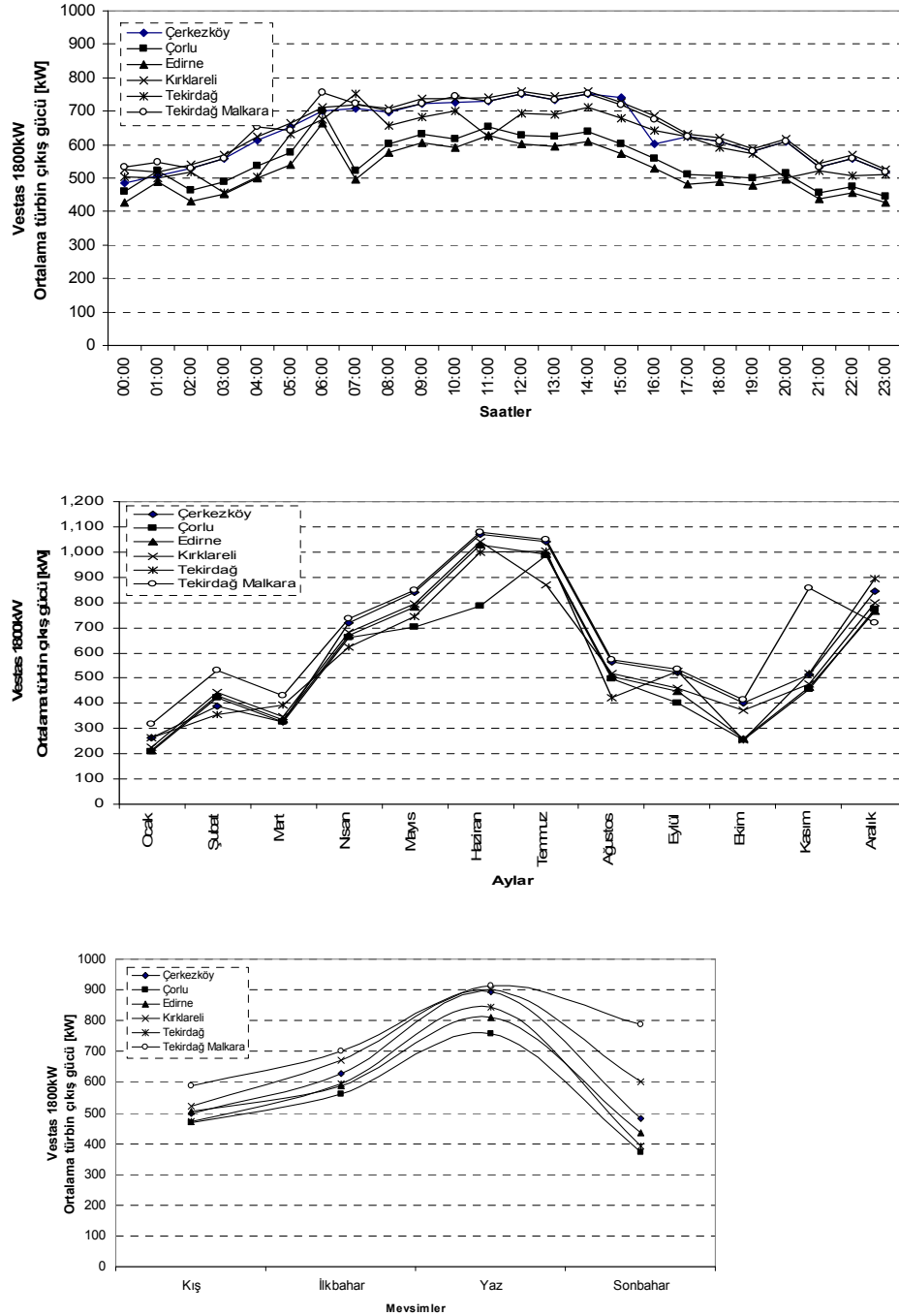
Vestas 1650kW’lık rüzgar güç üretim sistemi kullanılması durumunda elde edilecek enerji miktarlarının bölgelere göre değişimi saatlik, aylık ve mevsimlik

olarak Şekil 5.16’da görülmektedir. Elde edilen enerji miktarları irdelendiğinde en düşük enerji miktarının Kırklareli ve Edirne bölgesinde olduğu en yüksek enerji eldesinin ise Tekirdağ Malkara ve Tekirdağ bölgelerinde olduğu her üç grafik incelendiğinde de ortaya çıkmaktadır.



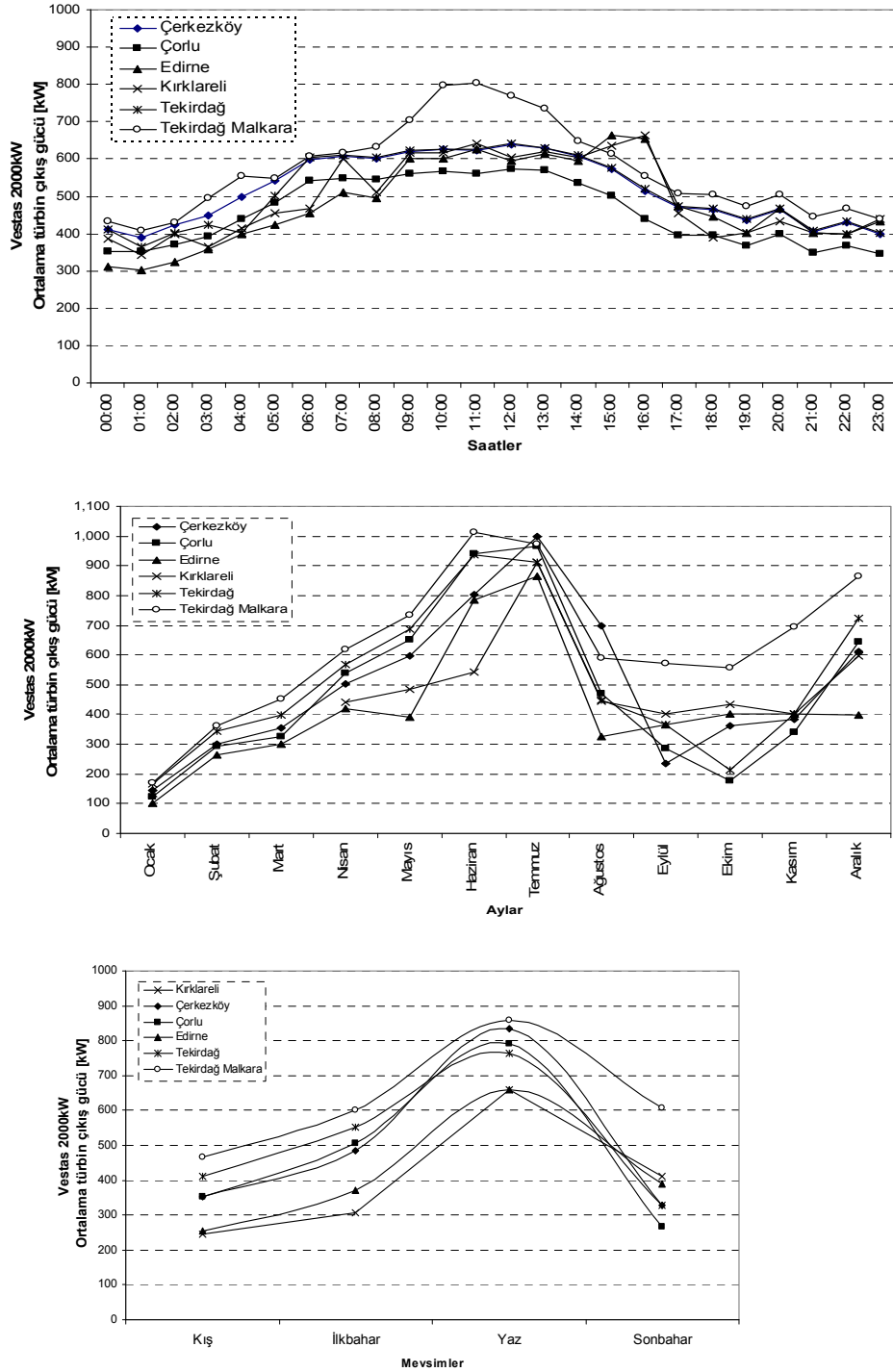
Şekil 5.16: Vestas 1650kW’lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri

Vestas 1800kW'lık rüzgar güç üretim sistemi kullanılması durumunda elde edilecek enerji miktarlarının bölgelere göre değişimi saatlik, aylık ve mevsimlik olarak Şekil 5.17'de görülmektedir. Elde edilen enerji miktarları irdelendiğinde en düşük enerji miktarının Kırklareli ve Edirne bölgesinde olduğu en yüksek enerji eldesinin ise Tekirdağ Malkara ve Tekirdağ bölgelerinde olduğu her üç grafik incelendiğinde de ortaya çıkmaktadır.



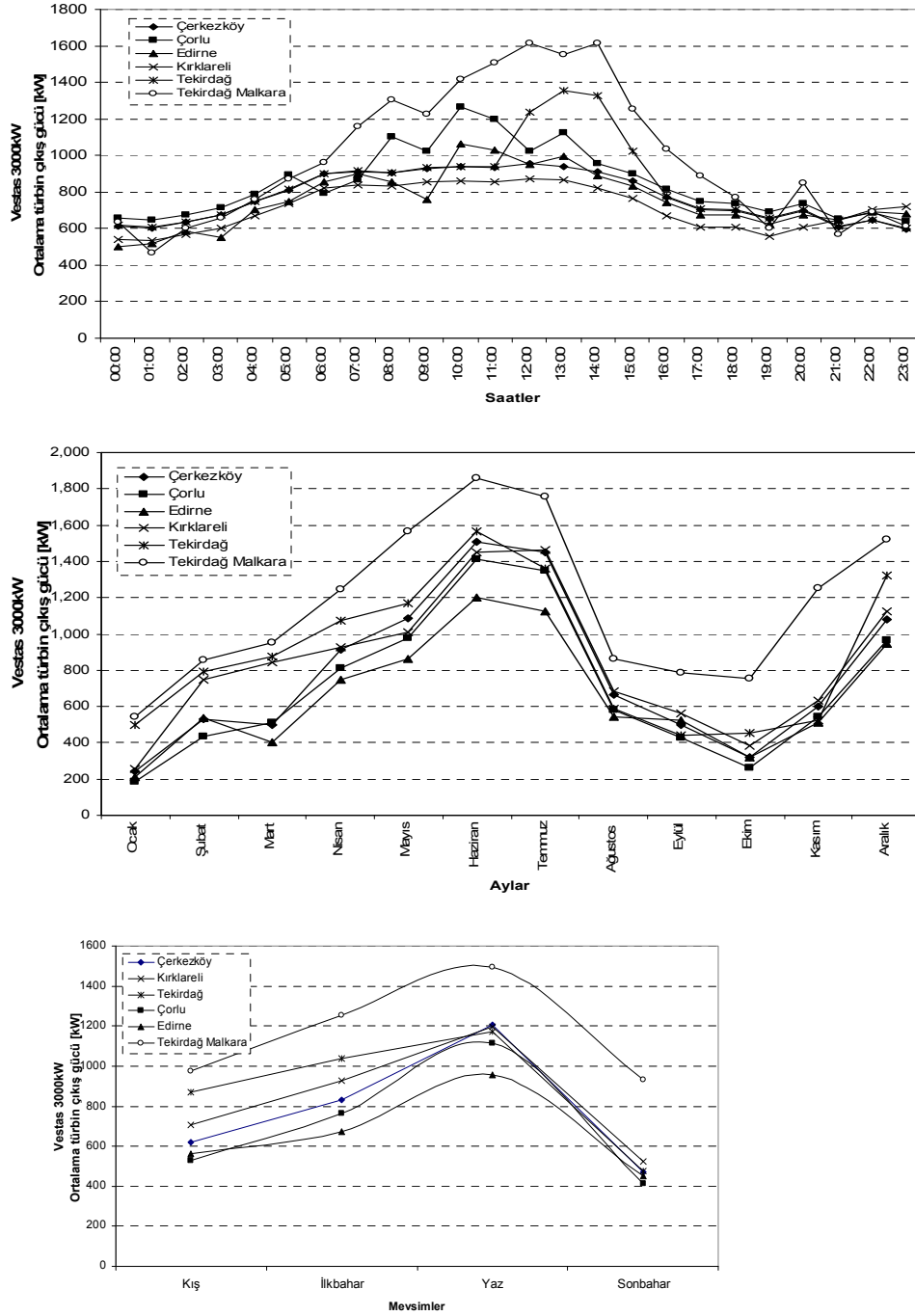
Şekil 5.17: Vestas 1800kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri

Vestas 2000kW'lık rüzgar güç üretim sistemi kullanılması durumunda elde edilecek enerji miktarlarının bölgelere göre değişimi saatlik, aylık ve mevsimlik olarak Şekil 5.18'de görülmektedir. Elde edilen enerji miktarları irdelendiğinde en düşük enerji miktarının Kırklareli ve Edirne bölgesinde olduğu en yüksek enerji eldesinin ise Tekirdağ Malkara ve Tekirdağ bölgelerinde olduğu her üç grafik incelendiğinde de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.18: Vestas 2000kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri

Vestas 3000kW'lık rüzgar güç üretim sistemi kullanılması durumunda elde edilecek enerji miktarlarının bölgelere göre değişimi saatlik, aylık ve mevsimlik olarak Şekil 5.19'da görülmektedir. Elde edilen enerji miktarları irdelendiğinde en düşük enerji miktarının Kırklareli ve Edirne bölgesinde olduğu en yüksek enerji eldesinin ise Tekirdağ Malkara ve Tekirdağ bölgelerinde olduğu her üç grafik incelendiğinde de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.19: Vestas 3000kW'lık türbinin her bir bölge için saatlik, günlük ve mevsimsel güç değerleri

### 5.5. Her Bir Rüzgar Türbini İçin Birim Enerji Hesabı

Rüzgar türbinlerinde maliyeti oluşturan birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar türbin maliyeti, kurulum maliyeti, bakım onarım maliyetidir. Bu maliyetlerin toplamı türbinin genel toplam maliyetini oluşturmaktadır. Türbin maliyetinin yaklaşık %35-40'ı kurulum maliyetini, kurulum maliyeti ve türbin maliyetinin toplamının yaklaşık %12-15'i 20 yıllık bakım onarım maliyetini oluşturmaktadır[97].

Tablo 5.7: Rüzgar türbin maliyetleri ve birim enerji maliyeti

| Türbin türü                                                   | Vestas V52-850kW | Vestas V82-1.65MW | Vestas V90-1.8MW | Vestas V80-2MW | Vestas V90-3MW |
|---------------------------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|----------------|----------------|
| Türbin maliyeti(\$)                                           | 850,000          | 1,550,000         | 1,650,000        | 1,800,000      | 2,600,000      |
| Kurulum maliyeti(\$)                                          | 297500           | 542500            | 577500           | 630000         | 910000         |
| Bakım ve Onarım maliyeti (\$)                                 | 2,912,355        | 5,310,765         | 5,653,395        | 6,167,340.0    | 8,908,380.0    |
| Toplam Maliyet(\$)                                            | 4,059,855        | 7,403,265         | 7,880,895        | 8,597,340      | 12,418,380     |
| Kapasite faktörü (CP)                                         | 0.40             | 0.49              | 0.52             | 0.42           | 0.42           |
| 20 yıl boyunca türbinden üretilen toplam enerji miktarı (kWh) | 59,754,000       | 143,782,000       | 164,332,000      | 149,142,000    | 223,500,000    |
| Enerjinin birim maliyeti (\$/kWh)                             | 0.0679           | 0.0515            | 0.0480           | 0.0576         | 0.0556         |

Tablo 5.7’de her bir türbin için türbin maliyeti, kurulum maliyeti, bakım ve onarım maliyeti ve bunların toplamı olan toplam maliyet değerleri yer almaktadır. Ayrıca tabloda her bir türbinin 20 yıl boyunca işletileceği göz önünde bulundurularak toplam üretilen enerji miktarları ve birim enerji maliyetleri bulunmaktadır.

### 5.6. Optimizasyon Probleminin Oluşturulması, Optimum Rüzgar Türbini Ve Türbin Sayısının Belirlenmesi

Optimizasyon hesabında mühendislikte sıklıkla tercih edilen GAMS (General Algebraic Modeling System) optimizasyon programı kullanılmıştır. GAMS doğrusal, doğrusal olmayan ve karma tamsayılı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan bir optimizasyon yazılım programıdır. Büyük ölçekli, karmaşık, mühendislik temelli optimizasyon problemlerinin çözümünde başvurulacak bir optimizasyon yazılım programıdır. Açık kod mimarisine sahip olan GAMS programı kişisel bilgisayarlar, iş istasyonu ve süper bilgisayarlar için

kullanımı mevcut olan bir yazılım programıdır. GAMS programı doğrusal ve karma-tamsayıli programlama, kuadratik programlama, karma tamamlayıcı problemleri, lineer olmayan programlama, Şebeke programlama gibi model tiplerini kullanır[98].

Doğrusal programlama (Simplex yöntemi) ile optimizasyon problemi çözülmüştür. Yazılan programın kodu ve elde edilen sonuçlar EK-3’de belirtilmiŐtir. Optimum türbin sayısını ve optimum maliyeti hesaplayabilmek için beş farklı senaryo üzerinde durulmuŐtur. Her bir senaryoda biri haricinde diğeri türbinler göz ardı edilmektedir ve ihmal edilmeyen türbine göre optimum türbin sayısı ve optimum maliyet hesaplanmıştır. Örneğini, Senaryo 1’de (850kW’lık haricindeki türbinlerin sayıları 0 olarak alınmıştır.) 850kW’lık türbine göre optimum değeri elde edilmiştir.

Optimizasyon problemi amaç fonksiyonu ve koŐulları ile beraber aşağıdaki gibi en genel formda yazılabilir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min(n_{850}C_{850}KF_{850}P_{850}t + n_{1650}C_{1650}KF_{1650}P_{1650}t + n_{1800}C_{1800}KF_{1800}P_{1800}t + n_{2000}C_{2000}KF_{2000}P_{2000}t + n_{3000}C_{3000}KF_{3000}P_{3000}t)$$

Kısıtlar:

$$KF_{850}n_{850}P_{850} = P_L$$

$$KF_{1650}n_{1650}P_{1650} = P_L$$

$$KF_{1800}n_{1800}P_{1800} = P_L$$

$$KF_{2000}n_{2000}P_{2000} = P_L$$

$$KF_{3000}n_{3000}P_{3000} = P_L$$

Burada,

$KF_{850}, KF_{1650}, KF_{1800}, KF_{2000}, KF_{3000}$  her bir türbinin kapasite faktörlerini ifade eden birer sabit olup, her birinin değeri sırasıyla 0.4, 0.49, 0.52, 0.42 ve 0.42’ dir ve Tablo 5.7’de verilmiştir.

$P_L$ , toplam talep edilen yük değeri 305,821,483 kWh/yıl’dır.

$C_{850}, C_{1650}, C_{1800}, C_{2000}, C_{3000}$  her bir türbinin birim enerji maliyetini göstermekte olup, değerleri sırasıyla 0.0679, 0.0515, 0.0480, 0.0576, 0.0556 \$/kWh'tir ve Tablo 5.7'de verilmiştir.

$P_{850}, P_{1650}, P_{1800}, P_{2000}, P_{3000}$  her bir türbinin üretebileceği maksimum yıllık toplam güç değerini ifade etmekte olup, değerleri sırasıyla 7,446,000 , 14,454,000 , 15,768,000 , 17,520,000 , 26,280,000 kWh/yıl.

Yukarıda belirtilen değerler optimizasyon probleminde yerine konulursa,

Amaç fonksiyonu:

$$\min(4044667n_{850} + 7294934n_{1650} + 7871386n_{1800} + 8476877n_{2000} + 12273811n_{3000})$$

Kısıtlar:

$$2978400n_{850} = 305821483$$

$$7082460n_{1650} = 305821483$$

$$8199360n_{1800} = 305821483$$

$$7358400n_{2000} = 305821483$$

$$11037600n_{3000} = 305821483$$

elde edilir.

Senaryo 1'de 850kW'lık türbin tercih edilmesi durumunda optimum türbin sayısı ve toplam maliyeti elde etmek için gerekli optimizasyon problemi ve kısıtlar görülmektedir.

Senaryo 1.

$n_{1650} = n_{1800} = n_{2000} = n_{3000} = 0$  durumunda, optimizasyon problemi

Amaç fonksiyonu:

$$\min(4044667n_{850})$$

Kısıt:

$$2978400n_{850} = 305821483$$

halini alır.

Bu problemin çözümü ile 850kW'lık türbinin sayısını gösteren,  $n_{850}$  'in optimum değeri ve oluşan toplam maliyet elde edilir.

Senaryo 2'de 1650kW'lık türbin tercih edilmesi durumunda optimum türbin sayısı ve toplam maliyeti elde etmek için gerekli optimizasyon problemi ve kısıtlar görülmektedir.

Senaryo 2.

$n_{850} = n_{1800} = n_{2000} = n_{3000} = 0$  durumunda, optimizasyon problemi

Amaç fonksiyonu:

$$\min(7294934n_{1650})$$

Kısıt:

$$7082460n_{1650} = 305821483$$

halini alır.

Bu problemin çözümü ile 1650kW'lık türbinin sayısını gösteren,  $n_{1650}$  'in optimum değeri ve oluşan toplam maliyet elde edilir.

Senaryo 3'te 1800kW'lık türbin tercih edilmesi durumunda optimum türbin sayısı ve toplam maliyeti elde etmek için gerekli optimizasyon problemi ve kısıtlar görülmektedir.

Senaryo 3.

$n_{850} = n_{1650} = n_{2000} = n_{3000} = 0$  durumunda, optimizasyon problemi

Amaç fonksiyonu:

$$\min(7871386n_{1800})$$

Kısıt:

$$8199360n_{1800} = 305821483$$

halini alır.

Bu problemin çözümü ile 1800kW'lık türbinin sayısını gösteren,  $n_{1800}$  'in optimum değeri ve oluşan toplam maliyet elde edilir.

Senaryo 4'te 2000kW'lık türbin tercih edilmesi durumunda optimum türbin sayısı ve toplam maliyeti elde etmek için gerekli optimizasyon problemi ve kısıtlar görülmektedir.

Senaryo 4.

$n_{850} = n_{1650} = n_{1800} = n_{3000} = 0$  durumunda, optimizasyon problemi

Amaç fonksiyonu:

$$\min(8476877n_{2000})$$

Kısıt:

$$7358400n_{2000} = 305821483$$

halini alır.

Bu problemin çözümü ile 2000kW'lık türbinin sayısını gösteren,  $n_{2000}$ 'in optimum değeri ve oluşan toplam maliyet elde edilir.

Senaryo 5'te 3000kW'lık türbin tercih edilmesi durumunda optimum türbin sayısı ve toplam maliyeti elde etmek için gerekli optimizasyon problemi ve kısıtlar görülmektedir.

Senaryo 5.

$n_{850} = n_{1650} = n_{1800} = n_{2000} = 0$  durumunda, optimizasyon problemi

Amaç fonksiyonu:

$$\min(12273811n_{3000})$$

Kısıt:

$$11037600n_{3000} = 305821483$$

halini alır.

Bu problemin çözümü ile 3000kW'lık türbinin sayısını gösteren,  $n_{3000}$ 'in optimum değeri ve oluşan toplam maliyet elde edilir.

Her bir senaryonun tek tek optimizasyonu sonucunda elde edilen optimum türbin sayıları ve toplam maliyetler Tablo 5.8'de görülmektedir. Tablo 5.8'de verilen optimum türbin sayısı değerleri optimizasyon programı ile elde edilen değerlerin

yukarı yuvarlanması ile elde edilir. Tablo 5.8’de her bir senaryo için türbin türü, optimum türbin sayısı ve optimum maliyet değerleri yer almaktadır.

Tablo 5.8: Senaryolar ve optimum türbin sayıları ve optimum maliyetler

| Senaryo  | Optimum türbin sayısı | Optimum maliyet (\$) | Türbin türü             |
|----------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| 1        | 103                   | 415,310,000          | Vestas V52-850kW        |
| 2        | 44                    | 315,000,000          | Vestas V82-1.65MW       |
| <b>3</b> | <b>38</b>             | <b>293,590,000</b>   | <b>Vestas V90-1.8MW</b> |
| 4        | 42                    | 352,310,000          | Vestas V80-2MW          |
| 5        | 28                    | 340,070,000          | Vestas V90-3MW          |

Ele alınan senaryolar neticesinde Senaryo 3 ile optimum değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Senaryo 3 te optimum türbin türü Vestas V90-1.8MW, optimum türbin sayısı 38 ve optimum maliyet 293,590,000\$ olarak belirlenmiştir.

## **6. POMPALI DEPOLAMALI RÜZGAR - HİDRO SİSTEMLERİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

### **6.1. Giriş**

Bir önceki bölümde seçilmiş olan altı farklı bölgenin rüzgar karakteristiği belirlendikten sonra bu bölgeler arasından rüzgar karakteristiği yönünden en iyi olanı saptandı. Bu bölgeye özgü olarak, en uygun rüzgar türbini seçimi ve optimum rüzgar türbin sayısı, toplam maliyetin minimizasyonu olarak tanımlanan optimizasyon problemi çözülerek elde edildi. Bu bölümde ise, uygulamanın ikinci kısmı olan pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemin modellenmesi gerçekleştirilecektir. Pompalı depolamalı sistem her bir ünitesi ayrı ayrı ele alınarak modelleneyecektir. Daha sonra ise, rüzgar türbininde dahil olduğu pompalı depolamalı rüzgar- hidro sistemin modellenmesi yapıp gerçek saha verileri ve resmi kurumlardan alınan ham veriler çerçevesinde simülasyonlar gerçekleştirilecektir.

### **6.2. Pompalı Depolamalı Rüzgar - Hidro Sistemlerin Modellenmesi**

Pompalı depolamalı rüzgar hidro sistemin modellenmesi temelde dört aşamada gerçekleştirildi. Bunlar sırasıyla;

- Elektriksel yük veya tüketici
- Enterkonnekte şebeke
- Rüzgar türbini
- Pompalı depolamalı sistem

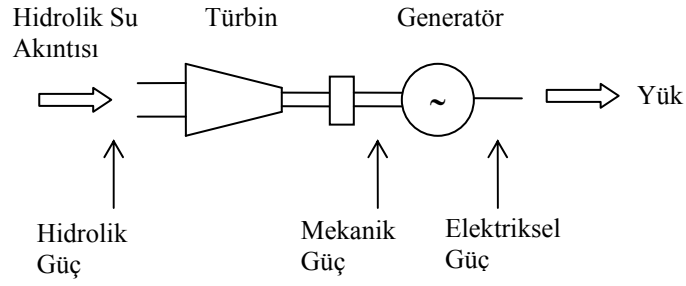
Elektriksel yük, tüketicilerin toplam saatlik bazda tükettikleri ve şebeke tarafından talep edilen elektrik enerjisinin miktarını temsil etmektedir. Tüketicilerin elektrik

enerjisi tüketimi, günlük, aylık, mevsimsel peryodlar dikkate alınarak modellemede kullanılmaktadır.

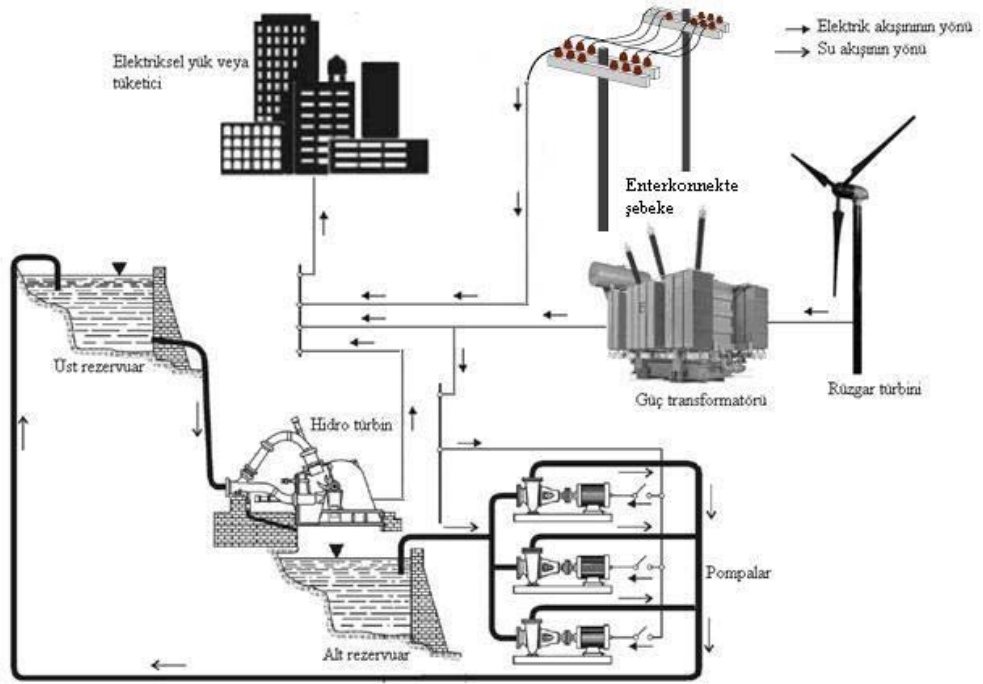
Rüzgar-hidro sistemin kurulmasının planlandığı bölgede yük talebinin, kurulan sistemin enerji arzının önemli bir parçası olan rüzgardan karşılanamaması durumunda, enterkonnekte şebeke devreye girerek arz karşılığı olmayan enerjiyi temin ederek enerjinin sürekliliğini ve arzında problem yaşanmamasını sağlar.

Rüzgar türbini, modellenen sistemin ana güç üretim kaynağı olarak planlanmıştır. Rüzgar türbini ile rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi güç transformatörü vasıtasıyla tüketicinin talep ettiği gerilim seviyesine dönüştürülüp tüketicinin talep ettiği elektriksel yükün karşılanmasında kullanılır. Talep edilen yükün üstünde bir enerji üretimi söz konusu olduğu durumda ise pompalar vasıtasıyla alt haznedeki suyun üst hazneye pompalanarak fazla enerji daha sonra kullanılmak üzere depolanır.

Pompaalı depolamalı hidrolik sistem alt ve üst hazne, küçük güçlü hidroelektrik santral, çift yönlü çalışabilen bir su pompası ve cebri borulardan oluşmaktadır. Pompaalı depolamalı hidrolik sistem modellenirken her bir bileşen ayrı ayrı modellenmiştir. Pompaalı depolamalı rüzgar-hidro sistemlerin kullanımındaki maksat yük talebi karşılandıktan sonra ortaya çıkan artık enerjiyi değerlendirmedir. Artık enerji, talep edilen enerji rüzgardan karşılandıktan sonra sistemde fazladan kalan enerji olarak tanımlanır. Pompaalı depolamalı santral suyun üst hazneye pompalanması ve üst haznede pompalanan suyun depolanmasında etkin rol oynamaktadır. Pompalar alt hazneden üst hazneye su pompalamada görev almaktadır. Pompalar için ihtiyaç duyulan enerji, artık enerjiden sağlanmaktadır. Bu sistem sayesinde kullanılmayan fazla enerji potansiyel enerjiye dönüştürülerek ihtiyaç durumunda kullanılabilir. Pompaalı depolamalı hidro sistemde enerji talebinin en yoğun olduğu durumlarda, üst haznede depolanan su serbest bırakılır ve türbin vasıtasıyla tekrardan enerjiye dönüştürülerek ihtiyaç duyulan yerde kullanılmaktadır. Şekil 6.1’de hidrolik sistemde enerji üretim sistemi akış diyagramı görülmektedir. Tez çalışmasında modellenmesi planlanan pompaalı depolamalı rüzgar –hidro sistemin yapısı Şekil 6.2’ de görülmektedir.



Şekil 6.1: Hidrolik enerji üretim sistemi akış diyagramı



Şekil 6.2: Modellenen pompalı depolamalı rüzgar –hidro sistem

Modellenen hazneli pompalı depolamalı rüzgar - hidro sistemde;

- Rüzgardan elde edilen enerjinin talep edilen enerji miktarından fazla olması durumunda, artık enerji ile alt haznedeki su üst hazneye pompalanmakta ve bu sayede artık enerji depolanarak değerlendirilmektedir.
- Rüzgardan elde edilen enerjinin talep edilen enerji miktarından az olması durumunda eğer üst hazne su seviyesi referans yükseklikten fazla ise talep edilen enerji türbin vasıtasıyla belirli bir gün için küçük güçlü hidroelektrik santral (KGHES)’den karşılanmaktadır

- iii. Rüzgardan elde edilen enerjinin talep edilen enerji miktarından az olması durumunda eğer üst hazne su seviyesi referans yükseklikten az ise talep edilen enerji enterkonnekte şebeke tarafından karşılanmaktadır. Modellenen sistemin akış algoritması EK’de verilmiştir.

### **6.3. Optimum Rüzgar Türbin Tipi Ve Modelinin Belirlenmesi**

Beşinci bölümde optimum türbin sayısını belirlemek amacıyla maliyet dikkate alınarak GAMS programı ile optimum türbin sayısı ve tipi belirlendi. Ayrıca Kaldellis tarafından maliyet göz önünde bulundurmadan geliştirilen modelle optimum rüzgar türbin sayısı 43 hesaplanırken, maliyetin göz önünde bulundurulduğu GAMS programı ile optimum türbin sayısı 38 olarak elde edildi. Maliyet göz önünde bulundurulmadığı taktirde her iki metotla da aynı rüzgar türbin sayısı elde edilmekte olup, bu sonuçlar ışığında modellenen pompalı depolamalı rüzgar hidro sistemde GAMS programı ile elde edilen rüzgar türbin sayısı dikkate alınmıştır.

### **6.4. Optimum Su Türbininin Belirlenmesi**

Üst haznede biriktirilmiş olan sudan minimum kayıpla enerji üretecek olan optimum su türbininin seçimi gerçekleştirilir. Aynı şekilde su pompası seçiminde de minimum değerde enerji tüketerek mevcut alt haznede bulunan suyun üst hazneye pompalayacak niteliklerde pompa belirlenir. Ayrıca üst haznenin kapasitesine bağlı olarak “d” değeri hesaplanmaktadır. “d” değeri, hidroelektrik santralin üst haznesi tam kapasitede su ile dolu iken küçük güçlü hidroelektrik santralin tek başına talebi kaç gün karşılayabileceğini belirleyen parametredir. 1, 2 ve 3 gün olarak alınan 3 farklı d değeri için tasarlanan sistem analiz edilip, enerji hesaplaması yapılabilmektedir. Seçilen d değerine göre hidroelektrik santralin üreteceği enerji miktarının doğrudan değişmesine ek olarak ihtiyaç duyulan suyun hacminde ve bu suyu muhafaza edecek olan hazne hacminde de artma söz konusu olacaktır. Bu durum sistemde söz konusu olabilecek enerji kesintilerini minimize etmesine karşın, sistem kurulurken üst hazne maliyetlerinin artmasına da neden olacaktır. Bu sebeple, bölgenin rüzgar datası, yük datası, pompa ve türbin verileri göz önünde bulundurulup

sistemin maliyet optimizasyonu yapılarak doğru karar alınmalıdır. Bu bağlamda, tasarlanan sistemde  $d=1$  olarak alınmıştır.  $d=1$  için ihtiyaç duyulan hazne hacmi ve su miktarı hesaplamalarına ilgili bölümde yer verilmiştir. Optimum su türbini modellenirken temelde hacimsel debisinin maksimum olması istenir ve optimizasyon problemi şu şekilde oluşturulabilir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|P_{wind}(i) - P_{yuk}(i)|}{C_{turbini,i} \cdot P_{sturbini,i}}}{n} \right\}$$

Kısıtlar

Rüzgar gücü ve yük kısıtı:  $P_{yuk} \geq P_{wind}$

Su türbini maliyet kısıtları :

$$C_{turbini,1} = 1,180,000\text{€}$$

$$C_{turbini,2} = 2,094,000\text{€}$$

$$C_{turbini,3} = 6,800,000\text{€}$$

$$C_{turbini,4} = 13,500,000\text{€}$$

Su türbini güç kısıtları :

$$P_{sturbini,1} = 944\text{kW}$$

$$P_{sturbini,2} = 2,094\text{kW}$$

$$P_{sturbini,3} = 10,000\text{kW}$$

$$P_{sturbini,4} = 14,500\text{kW}$$

olacak şekilde oluşturuldu. Su türbini kısıtlarında yer alan türbin tipleri ve özellikleri üretici firma kataloglarından temin edilmiş olup, Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1: Su türbini tipleri ve özellikleri

| Türbin tipleri | $Q_t$ (m <sup>3</sup> /s) | $H_t$ (m) | $P_{sturbini}$ (kW) | $\eta_t$ (%) | $C_t$ (€)  |
|----------------|---------------------------|-----------|---------------------|--------------|------------|
| Su türbini -1  | 2.3                       | 139.7     | 944                 | 73           | 1,180,000  |
| Su türbini -2  | 3.75                      | 124       | 2,094               | 70           | 2,094,000  |
| Su türbini -3  | 4.5                       | 156       | 10,000              | 80           | 6,800,000  |
| Su türbini -4  | 5                         | 232       | 14,500              | 76           | 13,500,000 |

Optimizasyon probleminde  $C_{\text{turbini}}$  su türbini fiyatını,  $n$  ise  $P_{\text{yük}} \geq P_{\text{wind}}$  durumunun sağlandığı saat sayısını temsil etmektedir. Burada  $n$  değeri MATLAB’te geliştirilen programdan elde edilmiş olup 1619 olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{\sum_{i=1}^n |P_{\text{wind}}(i) - P_{\text{yük}}(i)|}{n} = \frac{3,265.10^4}{1619} = 20,167 \text{ kwh}$$

Elde edilen değer amaç fonksiyonunda yerine koyulursa amaç fonksiyonu eşitlik 6.1’deki hali alır.

$$\min \left\{ 20,167 \frac{C_{\text{turbini}}}{P_{\text{turbini}}} \right\} \quad (6.1)$$

En son elde edilen amaç fonksiyonu ve tanımlanmış olan kısıtlardan meydana gelen optimizasyon problemini daha önce optimum rüzgar türbin sayısını belirlerken başvuru GAMS optimizasyon programı ile çözüp her bir su türbinin maliyeti hesaplandı. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.2’de yer almaktadır. Tablo 6.1’den de anlaşıldığı üzere en düşük su türbini maliyeti Su türbini-3 ile elde edilmiştir. Bundan dolayı, tasarlanan sistemde bu su türbini kullanılmıştır.

Tablo 6.2: Su türbin tipleri ve maliyetler

| Su türbini tipi      | Maliyet (€)       |
|----------------------|-------------------|
| Su türbini -1        | 25,208,750        |
| Su türbini -2        | 20,167,000        |
| <b>Su türbini -3</b> | <b>13,713,560</b> |
| Su türbini -4        | 18,776,172.41     |

Bu seçilen su türbinine göre hazne boyutları şekillenecektir. Modellemede talep edilen enerji miktarını tek bir su türbini ile karşılayamadığı durumlar söz konusu olabilir. Bu durumda gerekli su türbini sayısı sistemde saatlik bazda yük talebinin su türbin gücüne bölünmesi ile elde edilir. Bu ifade eşitlik 6.2’de görülmektedir.

$$n_{sturbini} = \frac{\sum_{i=1}^{8760} P_{yük}(i)}{8760 \cdot P_{sturbini}} \quad (6.2)$$

Talep edilen ortalama yük 34,911.12 kWh ve rüzgardan elde edilecek olan enerjinin sıfır olduğu en kötü senaryoyu oluşturan varsayım altında, yaklaşık olarak 4 adet 10MW güç sağlayabilen su türbini sistemde kullanılır.

### 6.5. Optimum Su Pompasının Belirlenmesi

Talebin düşük, üretilen enerji miktarının çok olduğu durumda alt hazneden üst hazneye su basılmasında su pompaları kullanılmaktadır. Özellikle üst haznede suyun biriktirilmesinde su pompaları kullanılır. Optimum su pompası belirlenirken, su pompasından minimum güç sarfiyatında maksimum debide su basması istenir. Belirlenen dört su pompasından optimizasyon sonucunda en uygun olan belirlenecektir. Su pompası kısıtlarında yer alan pompa tipleri ve özellikleri üretici firma kataloglarından temin edilmiştir. Optimizasyon problemi oluşturulursa,

*Amaç fonksiyonu:*

$$\min \left\{ \frac{\sum_{i=1}^s \frac{P_{wind}(i) - P_{yük}(i)}{C_{pompa,i} \cdot P_{pompa,i}}}{s} \right\}$$

*Kısıtlar*

Rüzgar gücü ve yük kısıtı:  $P_{yük} \leq P_{wind}$

Su pompası maliyet kısıtları :

$$C_{pompa,1} = 245,000\text{€}$$

$$C_{pompa,2} = 500,000\text{€}$$

$$C_{pompa,3} = 600,000\text{€}$$

$$C_{pompa,4} = 625,000\text{€}$$

Su türbini güç kısıtları :

$$P_{pompa,1} = 350kW$$

$$P_{pompa,2} = 1000kW$$

$$P_{pompa,3} = 1500kW$$

$$P_{pompa,4} = 2500kW$$

olacak şekilde oluşturuldu. Optimizasyon probleminde  $C_{pompa}$  su pompası fiyatını,  $s$  ise  $P_{yuk} \leq P_{wind}$  durumunun sağlandığı saat sayısını temsil etmektedir. Su pompa tipleri ve özellikleri Tablo 6.3’de görülmektedir.

Tablo 6.3: Su pompa tipleri ve özellikleri

|         | $Q_p (m^3/s)$ | $H_p (m)$ | $P_{pompa} (kW)$ | $\eta_p (\%)$ | $C_{pompa} (€)$ |
|---------|---------------|-----------|------------------|---------------|-----------------|
| Pompa-1 | 0.17          | 90        | 350              | 73            | 245,000         |
| Pompa-2 | 0.92          | 110       | 1000             | 80            | 500,000         |
| Pompa-3 | 1.24          | 130       | 1500             | 72            | 600,000         |
| Pompa-4 | 1.98          | 146       | 2500             | 75            | 625,000         |

Burada  $s$  değeri MATLAB’te geliştirilen programdan 4468 olarak elde edilmiştir.

$$\frac{\sum_{i=1}^s P_{wind}(i) - P_{yuk}(i)}{s} = \frac{12,300.10^4}{4468} = 27,600 kwh$$

Bulduğumuz değeri amaç fonksiyonunda yerine koyarsak amaç fonksiyonu aşağıdaki hali alır.

$$\min \left\{ 27,600 \frac{C_{pompa}}{P_{spompa}} \right\}$$

Amaç fonksiyonu ve daha önce tanımlanmış olan kısıtlardan meydana gelen optimizasyon problemini GAMS optimizasyon programı ile çözüp her bir su pompasının maliyeti hesaplanır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.4’de yer almaktadır.

Tablo 6.4: Su pompa tipleri ve maliyetler

| Su pompası tipi      | Maliyet (€)      |
|----------------------|------------------|
| Su pompası -1        | 19,320,000       |
| Su pompası -2        | 13,800,000       |
| Su pompası -3        | 11,040,000       |
| <b>Su pompası -4</b> | <b>6,900,000</b> |

Tablo 6.4’den anlaşıldığı üzere en düşük su pompası maliyeti Su pompası-4 ile elde edilmiştir. Bundan dolayı, tasarlanan sistemde bu su pompası kullanılmıştır. Modellenen hazneli pompalı depolamalı rüzgar hidro sistemde tek bir su pompasının

yeterli olmaması durumunda pompa sayısının belirlenmesi gerekir. Pompa sayısının belirlenmesinde, pompa sayısı sistemde saatlik bazda rüzgardan elde edilen güç değeri ile yük talebi arasındaki farkın pompa gücüne bölünmesi ile elde edilir. Bu ifade eşitlik 6.3’de görülmektedir.

$$n_{pompa} = \frac{\sum_{i=1}^s P_{wind}(i) - P_{yuk}(i)}{sP_{pompa}} \quad (6.3)$$

Burada  $s$ ,  $P_{yuk} \leq P_{wind}$  durumunun sağlandığı saat sayısını temsil etmektedir. Talep karşılandıktan sonra kullanılmayan fazla olan enerji su pompasında alt haznedeki suyu üst hazneye pompalamak için kullanılacaktır. Bu durumda, fazla olan enerjinin ortalaması yaklaşık olarak 27,600 kWh olarak elde edilmiştir. Bu enerjinin kullanılacağı 2.5MW’lık su pompası sayısı yaklaşık olarak 11 adettir.

Su türbini, su pompası, cebri boru, diğer mekanik aksamalarda oluşan kayıplar ihmal edilmiştir. Ayrıca haznelerdeki suyun bekleme sırasında çevresel sıcaklık değişimleri ile az da olsa bir buharlaşma durumu söz konusudur. Yapılan hesaplamalarda buharlaşma olayı göz ardı edilmiştir.

## 6.6. Hazne Boyutlarının Belirlenmesi

Pompa depolamalı rüzgar-hidro sistemlerde pompalama ve depolama işlemlerinin yapılabilmesi için alt ve üst olmak üzere iki tane hazne bulunmaktadır. Enerji üretiminin sürekliliği açısından bakıldığında bu haznelerin boyutlarının belirlenmesi oldukça önemli bir konudur. Haznelerin olması gereken boyutlarından çok büyük bir kapasitede yapılması gereksiz bir yatırım anlamına gelmekte olup, aksine olması gereken değerden daha küçük seçildiği durumda ise üretilmesi gereken enerji miktarından daha az enerji üretiminin olması santralden daha fazla faydalanılabilecek iken daha az randımanlı çalıştırılması anlamına gelecektir.

### 6.6.1. Üst hazne kapasitesinin belirlenmesi

Bu haznelerden üst haznenin kapasitesine bağlı olarak hidroelektrik santralinin üreteceği enerji miktarı belirlenirken elde edilecek güç değeri üst hazne su seviyesi yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak modellendi.

$$P = f(h) \quad (6.4)$$

Minimum su seviye yüksekliği  $h_{ref}=15m$  olarak belirlendi. Bu seviyenin altına inildiği takdirde hidroelektrik ünite devre dışı kalmaktadır. Ayrıca üst haznenin hacmi su türbini tarafından tek başına  $d$  gün boyunca pik yükü karşılayacak şekilde seçilir.  $d=1$  ve  $d=3$  için minimum ve maksimum su (üst hazne) hacimleri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$V_{rez} = \frac{d \cdot \left( \frac{E}{365} \right)}{n_g \cdot n_t \cdot H \cdot g} \quad (6.5)$$

Burada,  $n_g$  generatör verimi,  $n_t$  türbin verimi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $E$  yıllık tüketilen enerji miktarı,  $H$  maksimum hazne yüksekliğini temsil etmektedir. Buradan hareketle,

$$E = 7540803.69 \text{ kWh}$$

$$H = 68m$$

$$n_g = 0.8$$

$$n_t = 0.8$$

$$g = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

değerleri dikkate alınarak,

$d = 1$  için hesaplamalar gerçekleştirildiğinde,

$$V_{rez} = 23002.1 m^3 \text{ olarak hesaplanır.}$$

$d = 3$  için hesaplamalar gerçekleştirildiğinde,

$$V_{rez} = 69006.3 m^3 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Hesaplamalardan da görüldüğü gibi  $d$  değeri arttıkça hazne hacminin arttığı dolayısıyla maliyetin de doğrudan artırdığı görülmektedir. Üst hazne geometrisinin hacmi taban alan ile hazne yüksekliğinin çarpımına eşit olduğu gerçeğinden yola çıkarak haznenin sahip olması gereken taban alan hesaplanabilir. Bunun için aşağıdaki genel hacim denklemi kullanılabilir.

$$A_{rez} = \frac{V_{rez}}{H} = \frac{23002.1}{68.2} = 338 \text{ m}^2$$

Burada,

$V_{rez}$ =Hazne hacmi,  $\text{m}^3$

$A_{rez}$ = Hazne kesit alanı,  $\text{m}^2$

$H$ = Hazne yüksekliği, m

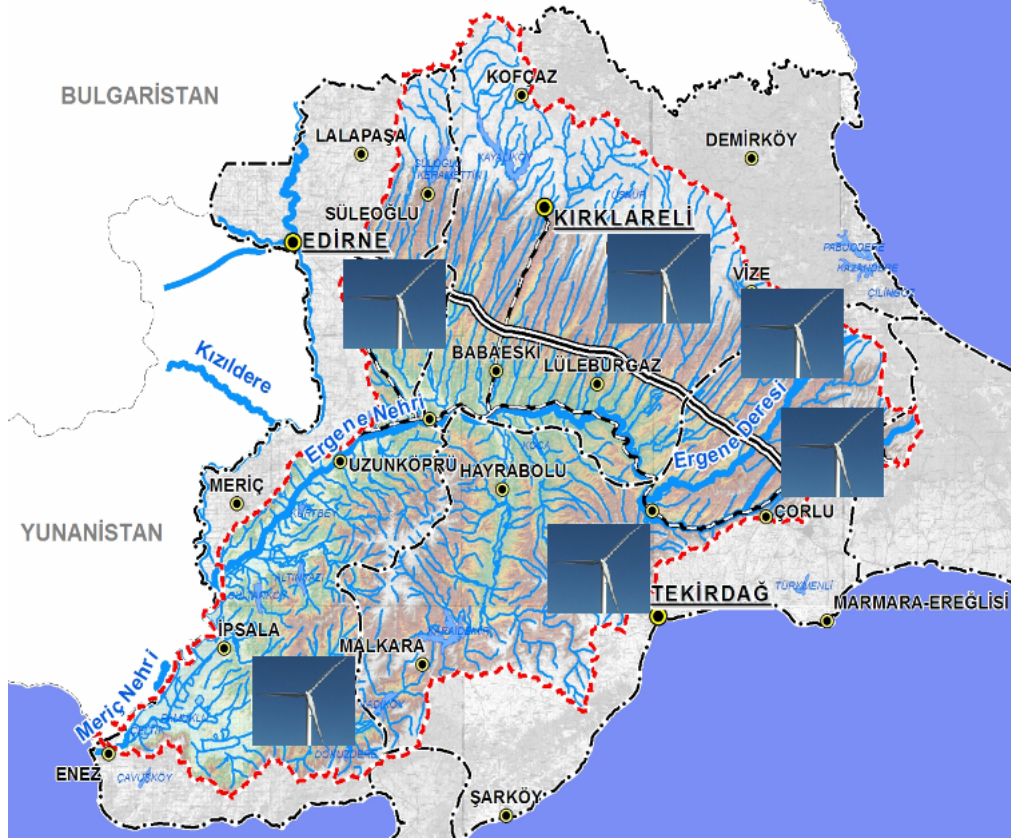
olarak ifade edilmektedir.

$d=1$  için elde edilen  $V_{rez}$  ve  $H$  değerleri 23002.1 ve 68.2m değerleri sırasıyla yerine yazılırsa,  $A_{rez}$ , hazne kesit alanı  $338 \text{ m}^2$  olarak hesaplanır. Üst hazne tasarlanırken taban alanı  $338 \text{ m}^2$  olarak alınır. Tasarlanan sistem kapalı bir sistem olduğu için ve kütlenin korunumu prensibinden dolayı tüm sistemde bu hacimde su dolaşımı gerçekleşecektir. Kapalı sistem içerisinde suyun buharlaşması ve yıl içinde mevsimsel değişikliklerden kaynaklanan kayıplar göz önüne alınmamıştır.

#### **6.6.2. Alt hazne kapasitesinin belirlenmesi**

Alt hazneyi tasarlarken üst hazne hacmi göz önünde bulundurulmuştur. Rüzgar potansiyelinden faydalanılan Tekirdağ, Edirne ve Kırklareli'ye yakınlığı dikkate alındığında alt hazne olarak Ergene havzası düşünülmüştür. Ergene havzası, Tekirdağ'da Saray İlçesinin kuzeyinde yer alan Yıldız Dağları'ndan doğup İpsala ilçesi civarında Meriç Nehri ile birleşerek Ege Denizi'ne dökülmektedir. Meriç Nehri'nin denize döküldüğü yerdeki drenaj alanı  $53,000 \text{ km}^2$  olup bu miktarın yaklaşık  $12,000 \text{ km}^2$ 'sini Ergene Havzası teşkil etmektedir. Trakya Bölgesi'nde Edirne, Kırklareli ve Tekirdağ illerinin toplam alanının  $18,789 \text{ km}^2$  olduğu düşünülürse,  $11,000 \text{ km}^2$ 'lik Ergene Nehri drenaj alanının bu ilin üç büyük kısmını teşkil ettiği anlaşılmaktadır. Ergene Nehri, 283 km uzunluğunda olup, ortalama

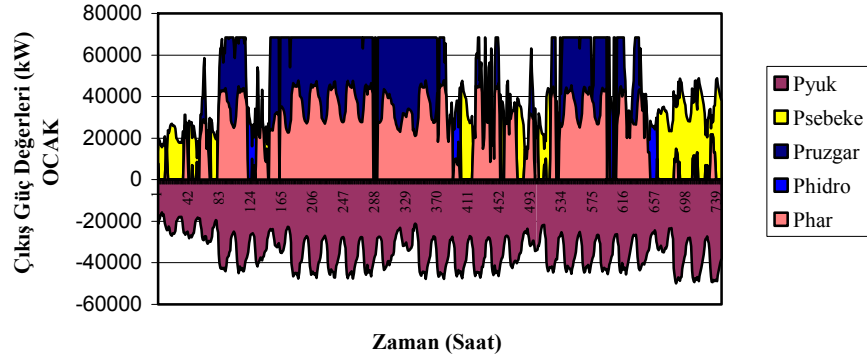
debisi  $24 \text{ m}^3/\text{sn}$ , maksimum debisi  $2190 \text{ m}^3/\text{sn}$  ve yıllık su potansiyeli 1.330 milyar  $\text{m}^3$ 'tür. Ergene Havzası'nın 17,323 ha'lık bölümünde tarım yapılmakta, bu da Türkiye'nin önemli bir tarım bölgesi olan Trakya'da önemli bir potansiyel oluşturmaktadır[99]. Rüzgar güç sistemlerinin Ergene Havzası üzerinde dağılımı Şekil 6.4'de görülmektedir.



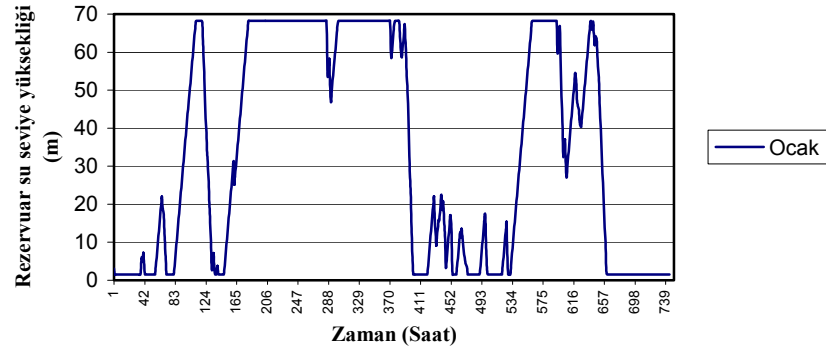
Şekil 6.3: Rüzgar güç sistemlerinin ergene havzası üzerinde dağılımı

### 6.7. Pompalı Depolamalı Rüzgar - Hidro Sistemlerin Simülasyonu

Her bir elemanın modellenmesi ve optimum sayılarının belirlenmesinden sonra pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemin gerçek yük talebi ve rüzgar hız verileri kullanılarak simülasyonu gerçekleştirildi. Saatlik bazda yük talebi ve rüzgar verileri ile simülasyon beş yıllık veriler kullanılarak analiz edildi. Simülasyon sonucunda tasarlanan pompalı depolamalı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları ve hangi zamanlarda daha sıklıkla devreye girdikleri elde edilen datalar ışığında tayin edildi. Şekil 6.4 ile 6.27 arasında ise, aylık olarak sistemde enerji sağlayan kaynakların yükü karşılama eğrileri ve üst haznede bulunan su yüksekliğinin değişimleri görülmektedir.

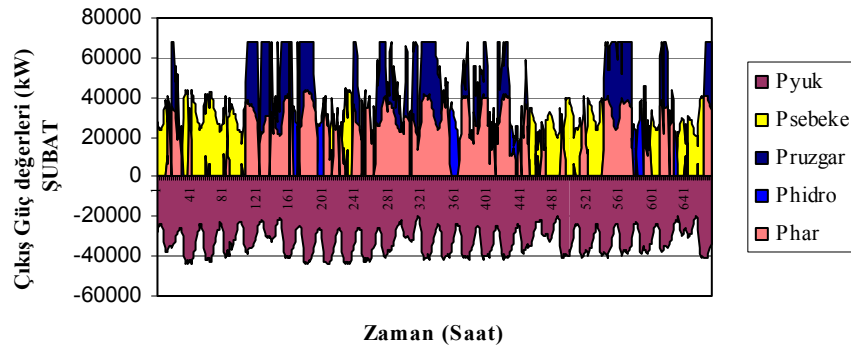


Şekil 6.4: Ocak ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

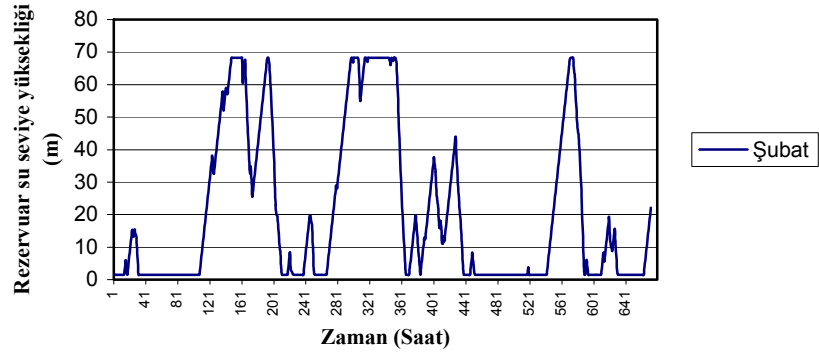


Şekil 6.5: Ocak ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Ocak ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Ocak ayı için talebin %24'ü şebekeden %9.2'si hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %66.8'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

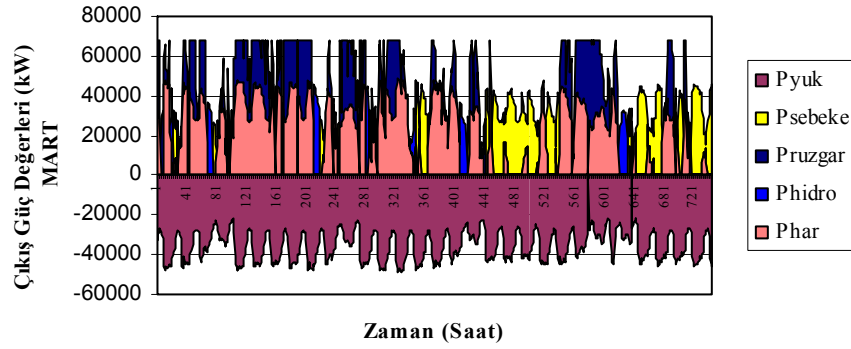


Şekil 6.6: Şubat ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

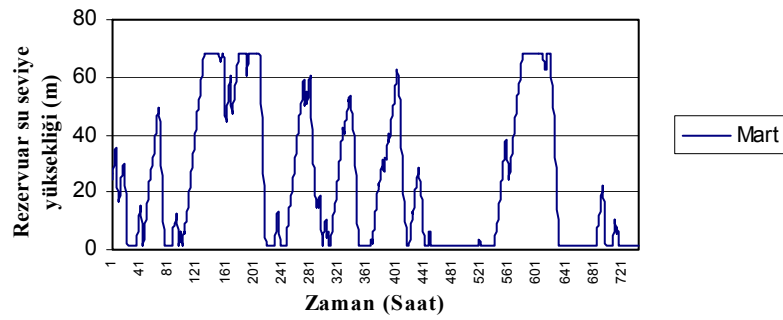


Şekil 6.7: Şubat ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Şubat ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan şebeke, rüzgar ve hidroelektrik enerji sağlayıcı elemanlar talebi değişik oranlarda karşılamaktadırlar. Şubat ayı grafiği irdelendiğinde, talebin %34.22'si şebekeden %11.11'i hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %54.65'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

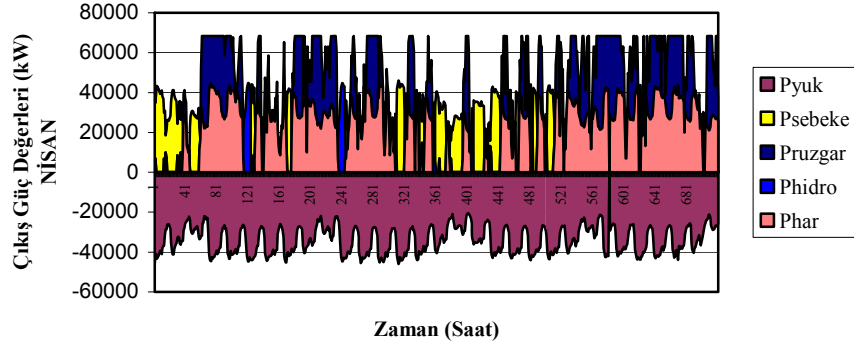


Şekil 6.8: Mart ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

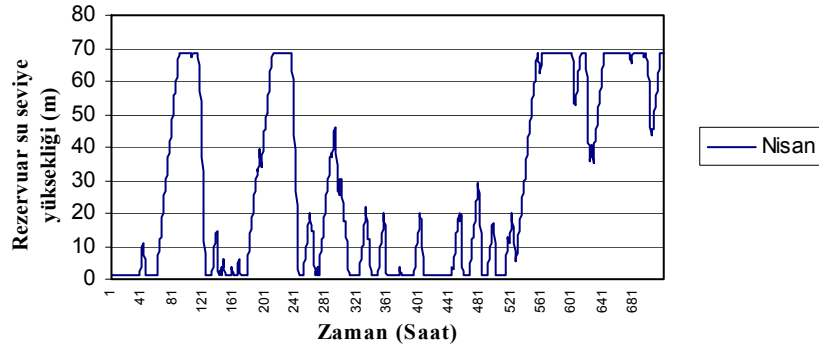


Şekil 6.9: Mart ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Mart ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde yer alan şebeke, rüzgar ve hidroelektrik enerji sağlayıcı kaynaklar talebi değişik oranlarda karşılamaktadırlar. Mart ayı grafiği irdelendiğinde, talebin %27.84'ü şebekeden %12.19'u hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %59.95'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

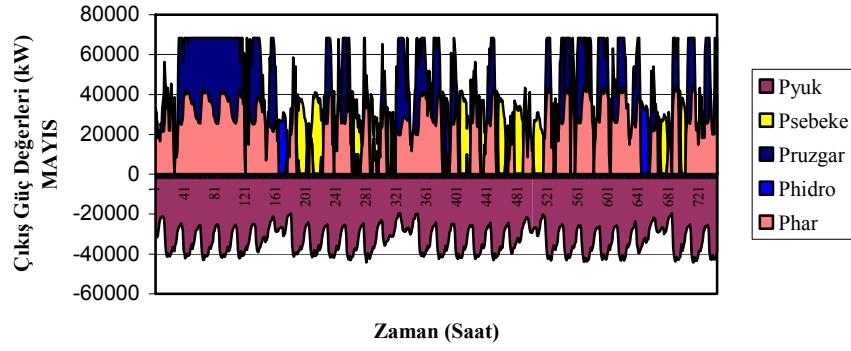


Şekil 6.10: Nisan ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

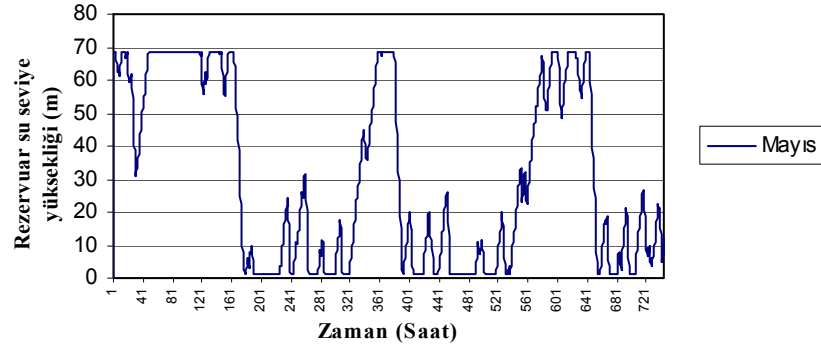


Şekil 6.11: Nisan ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Nisan ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Nisan ayı için talebin %25.59'u şebekeden %10.21'i hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %64.18'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

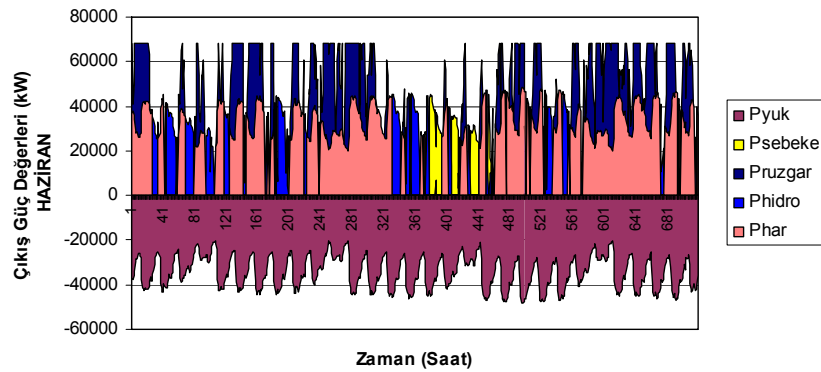


Şekil 6.12: Mayıs ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

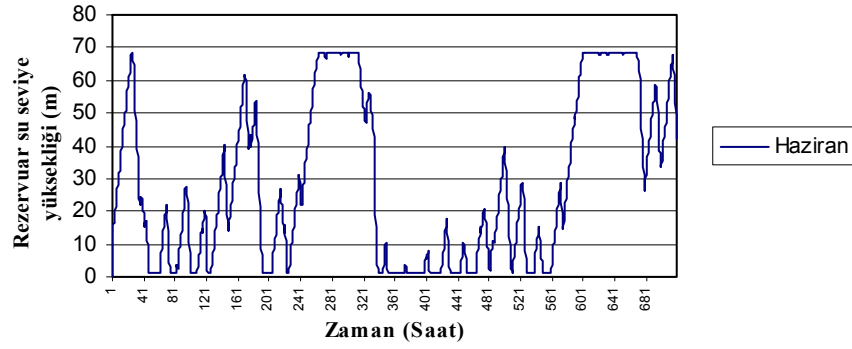


Şekil 6.13: Mayıs ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Mayıs ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Mayıs ayı için talebin %19.29'u şebekeden %13.68'si hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %67.02'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

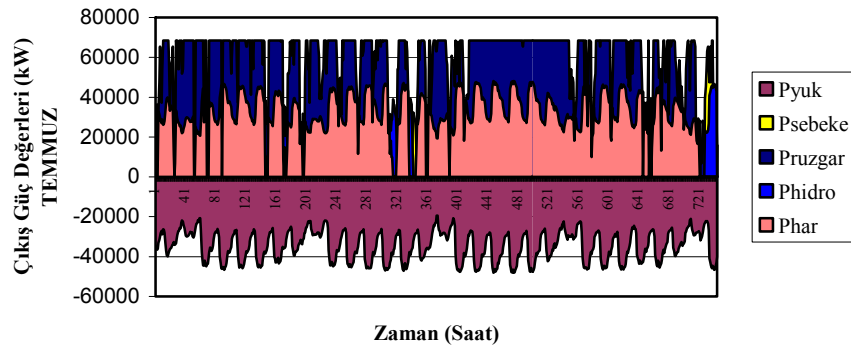


Şekil 6.14: Haziran ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

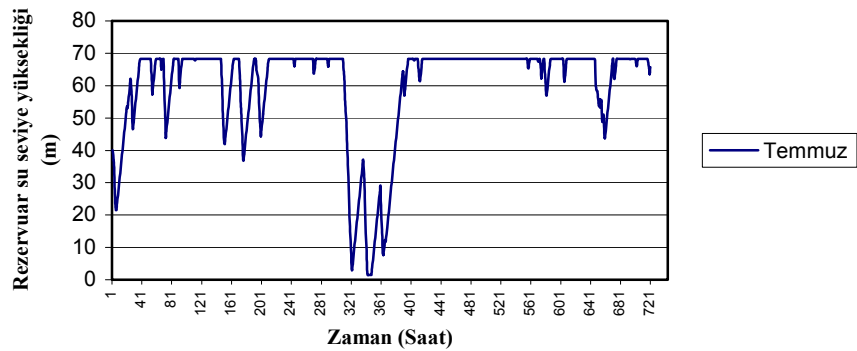


Şekil 6.15: Haziran ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Haziran ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Haziran ayı için talebin %20.02'si şebekeden %12.97'si hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %67'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.



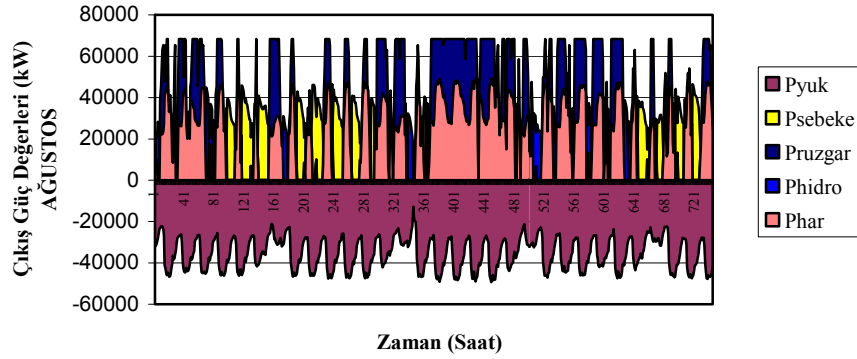
Şekil 6.16: Temmuz ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları



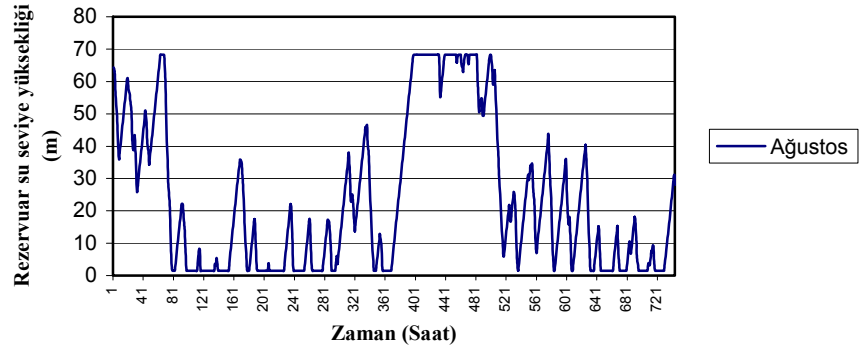
Şekil 6.17: Temmuz ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Temmuz ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Temmuz ayı için talebin

%3.89'u şebekeden %10.20'si hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %85.9'luk kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

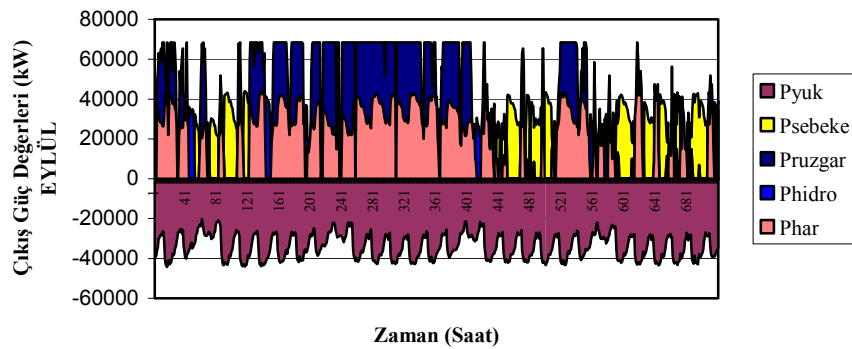


Şekil 6.18: Ağustos ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

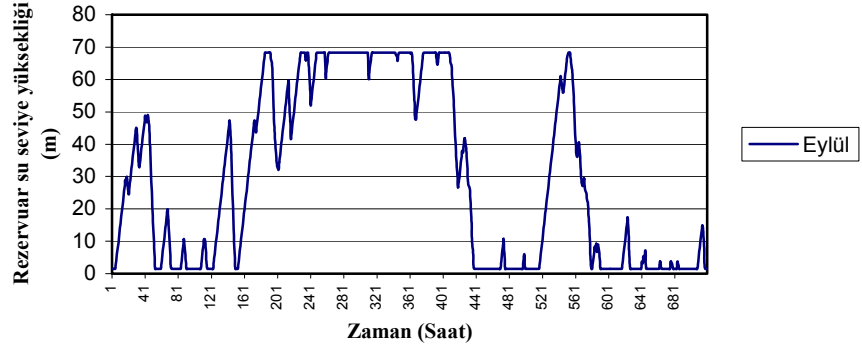


Şekil 6.19: Ağustos ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Ağustos ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Ağustos ayı için talebin %21.69'u şebekeden %15.07'si hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %63.22'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

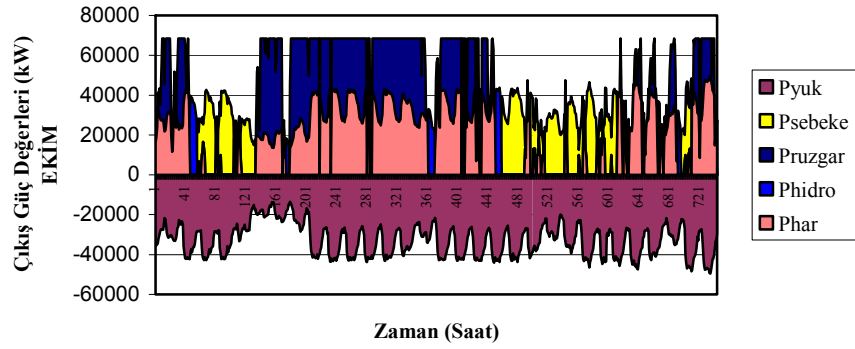


Şekil 6.20: Eylül ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

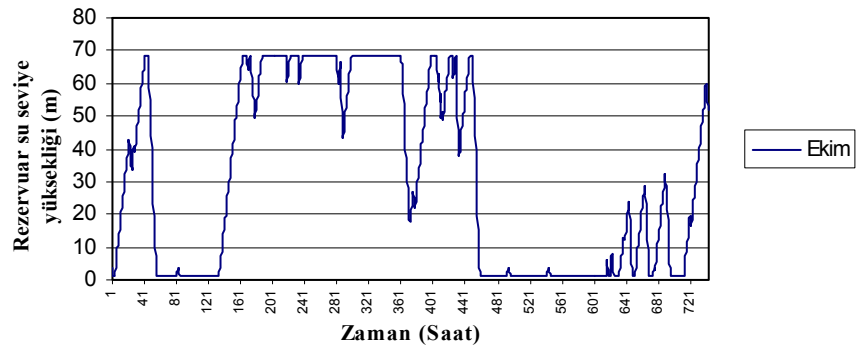


Şekil 6.21: Eylül ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Eylül ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Eylül ayı için talebin %27.76'sı şebekeden %10.78'i hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %61.45'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.



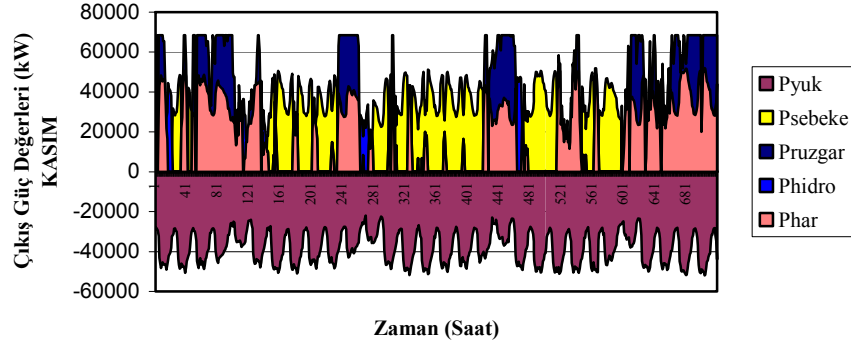
Şekil 6.22: Ekim ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları



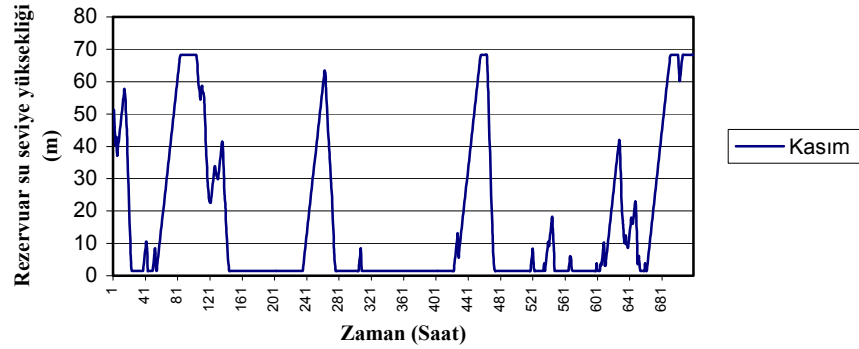
Şekil 6.23: Ekim ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Ekim ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Ekim ayı için talebin

%30.41'i şebekeden %9.59'u hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %59.98'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

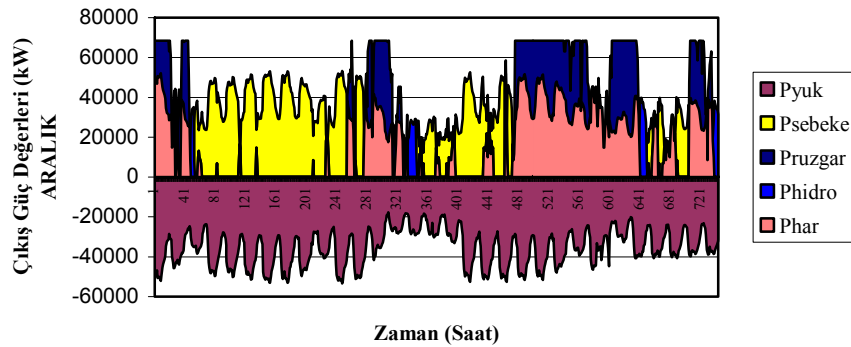


Şekil 6.24: Kasım ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları

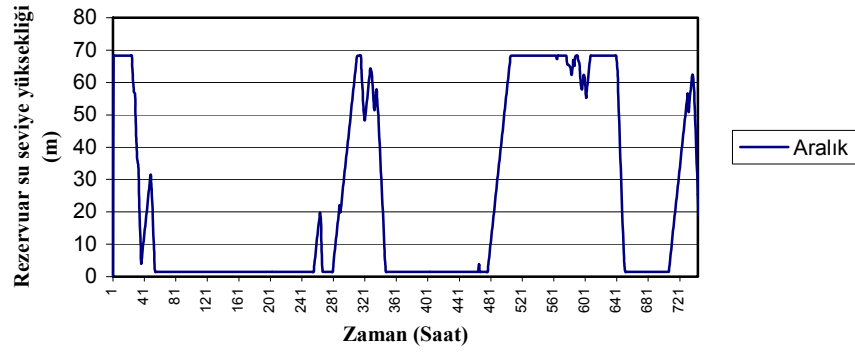


Şekil 6.25: Kasım ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Kasım ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Kasım ayı için talebin %45.3'ü şebekeden %8.34'ü hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %46.34'lük kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.



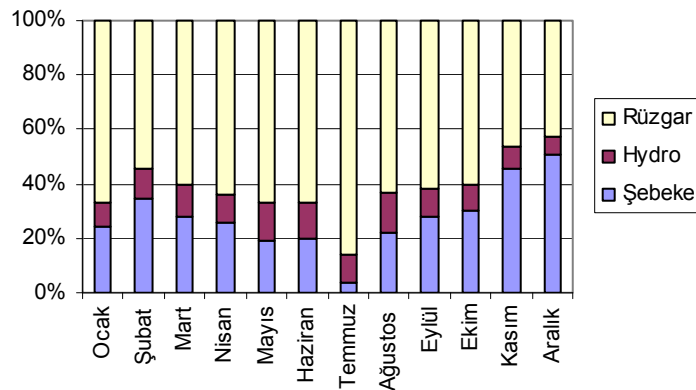
Şekil 6.26: Aralık ayı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları



Şekil 6.27: Aralık ayı rüzgar - hidro sistemde üst hazne su seviyesinin değişimi

Aralık ayına ait grafik incelendiğinde pompalı depolamalı sistemde alan enerji sağlayıcı elemanların katkıları kolaylıkla elde edilecektir. Aralık ayı için talebin %50.57'si şebekeden %6.97'si hidroelektrik santralinden sağlanmaktadır. Geri kalan %42.45'lik kısım ise rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır.

Tüm sene göz önünde bulundurulduğunda, sistemin ana enerji sağlayıcısı konumunda olan rüzgar, hidro ve şebekenin yüzdesel olarak paylarının durumu ve davranışları aşağıdaki grafikte ayrıntılı olarak görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, şebeke payı %3-%50 arasında, rüzgar enerjisinin payı %43-%87 arasında, hidro enerjinin payı ise %7-%14 arasında değişim göstermektedir. Biliyoruz ki, şebeke hattı ne kadar çok devreye girerse enerjinin birim üretim maliyetleri o ölçüde fazla olacaktır. Şebekenin payı Kasım ve Aralık ayları haricinde maksimum %30 civarındadır. Bu da, sistemde şebekenin payının çok yüksek oranlarda olmadığını dolayısıyla enerjinin birim üretim maliyetinin optimum ve makul düzeylerde olacağına işaret etmektedir.



Şekil 6.28: Rüzgar, hidro ve şebekenin enerji ihtiyacını karşılama durumları

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Rüzgar yapısı ve doğası gereği sürekli olmayan bir kaynak türüdür. Her ihtiyaç duyulduğunda bulunacak ve depolanacak bir yapıya sahip değildir. Talep edilen enerjinin yani yük datasının tepe değeri ile rüzgardan elde edilen enerjinin tepe değeri nadiren örtüşmektedir. Diğer bir deyişle, rüzgardan elde edilen enerji miktarı çok iken, talep edilen enerjinin düşük olması ya da bu durumun aksine talep edilen enerji miktarının çok, rüzgardan elde edilen enerji miktarının az olması gibi durumlar söz konusu olmaktadır. Bu gibi durumlarda enerjinin sürekliliği açısından bakıldığında rüzgardan elde edilen enerjinin maksimum kullanımı ve talep edilen enerjinin sürekli olarak karşılanması gerekir. Ayrıca, rüzgardan elde edilen enerji miktarı ile puant gücünde her daim karşılanması gerçeği de göz önüne alındığında, pompalı depolamalı rüzgar- hidro sistemler tüm bu ihtiyaçlara cevap olabilecek bir sistemdir. Buradan hareketle, tez çalışması kapsamında pompalı depolamalı rüzgar- hidro sistemlerin modellenmesi ve mevcut bir bölge için analizleri yapılmıştır. Dahası pompalı depolamalı rüzgar- hidro sistemler ile ilgili Türkiye’de akademik anlamda bir çalışma yapılmamış olması da bu konuya eğilinmesini sağlamıştır.

Tez çalışması kapsamında Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, Tekirdağ Malkara, Çorlu ve Çerkezköy olmak üzere toplamda altı farklı bölgede rüzgar karakteristiği belirleme çalışmaları yapılmıştır. Bu altı bölgenin seçilmesinin temel sebeplerinden biri bu bölgelerin geçmişe ait rüzgar verilerinin sağlıklı ve sürekli olarak elde edilmiş olmasıdır. Ergene havzasına olan yakınlıklarından dolayı da ayrıca tercih sebebi olmuştur. Bahsedilen bölgelere ait 2002 ile 2007 yılları arasındaki saatlik periyotta anlık rüzgar hızı ve yön bilgileri Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nün rüzgar ölçüm istasyonlarından alınmıştır. Saatlik periyotta alınan bu hız verileri öncelikli olarak frekans sıklık dağılım formuna dönüştürülmüştür.

Toplamda altı bölgenin her birinin rüzgar karakteristiğinin belirlenmesi için detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir bölgenin geçmiş yıllarda ölçülmüş olan gerçek veriler kullanılarak istatistiksel modeller yardımıyla rüzgar karakteristiğinin

taininde etkin rol oynayan parametreler belirlenmiştir. Bunun için ilk olarak, her bir bölge için rüzgar verisinin frekans dağılımları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, Tekirdağ Malkara bölgesinin rüzgar hız verilerinin %62.6'sı 4 m/s ve üzerinde olup, anma hızına göre dağılım grafikleri incelendiğinde ise Tekirdağ Malkara bölgesinin rüzgar hız verilerinin %15'inin 12m/s'nin üzerine olduğu görülmektedir. Rüzgar türbini ile üretim bu hız aralığında (4m/s-12m/s) gerçekleştiğinden dolayı ele alınan bölgenin rüzgar potansiyeli bu hızlar baz alınarak karakterize edilmiştir.

Frekans sıklık dağılımlarına bakılarak enerji üretilebilirlik açısından bölgeler incelendiğinde Tekirdağ Malkara'nın büyük ölçekli elektrik üretiminde kullanılan türbinler için en elverişli bölge olduğu söylenebilir. Rüzgar frekans sıklık dağılımdan sonra rüzgar yön verileri belirlenmiştir. Hakim rüzgar yönünün belirlenmesi, rüzgar türbininin yerleştirilmesi noktasında türbinden maksimum enerjinin elde edilmesinde hayati önem arz etmektedir. Hakim rüzgar yönü açısından her bir bölge incelendiğinde, Tekirdağ Malkara bölgesinde hakim rüzgar yönünün Kuzey ve Kuzeydoğu olarak karşımıza çıkmaktadır. Rüzgarın frekans sıklık dağılımı ve hakim rüzgar yön bilgisi elde edildikten sonra gerçek datalar kullanılarak istatistiksel metotlar ile Weibull ve Rayleigh dağılımları gerçekleştirilmiştir. c parametresi ortalama rüzgar hızı hakkında tahmini bilgiler verebilmektedir. c parametrelerine bakılarak ortalama hızı en yüksek bölgenin Tekirdağ Malkara olduğu söylenebilir. Tekirdağ Malkara bölgesinin şekil ve skala parametre değerleri sırasıyla 1.43 ve 7.21' dir.

Şekil ve skala parametreleri hesaplanıp, Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonları ve kümülatif yoğunluk dağılım fonksiyonları elde edildikten sonra anlık gerçek rüzgar hız verileri kullanılarak ortalama rüzgar hız değeri hesaplanmıştır. Tekirdağ Malkara bölgesi için ortalama rüzgar hız değeri 6.69m/s olarak hesaplanmıştır ve bu parametre değerleri yardımı ile  $m^2$  başına üretilebilecek enerji miktarı değerleri hesaplanmıştır. Bölgelerin güç yoğunlukları karşılaştırıldığında en iyi güç yoğunluğuna Tekirdağ Malkara bölgesi sahiptir.

Bütün bölgelerde en iyi kapasite faktörü, beş farklı güç değerine sahip rüzgar türbinleri arasında Vestas V90-1.8MW ile elde edilmiş olup, her bir bölge için ayrı ayrı değerlendirildiğinde, en iyi kapasite faktörü Tekirdağ Malkara bölgesinde elde edilmektedir. Tekirdağ Malkara bölgesinin kapasite faktörü değeri %30 ile %40'lar seviyesinde değişmektedir. Tekirdağ Malkara'da en yüksek kapasite faktörü %40 ile Vestas V90-1.8MW'lık türbin ile sağlanmıştır. Ayrıca, üretilen enerjinin birim maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda yine en düşük maliyet Vestas V90-1.8MW türbinin kullanılması durumunda ortaya çıkmıştır. Üretilen elektriğin kWh başına maliyeti 0.048\$'dır.

Kurulan sistemde kullanılacak olan rüzgar türbin tipi ve boyutu belirlendikten hemen sonra optimum rüzgar türbin sayısını tayin edebilmek için mevcut durumu eksiksiz olarak ortaya koyabilen, amaç fonksiyonu ve kısıtlardan oluşan optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Optimizasyon problemi beş farklı senaryo için doğrusal programlama yöntemi ile çözülmüştür. Her bir senaryo için elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, maliyetlerin Vestas V90-1.8MW türbininden 38 adet kullanılması durumunda minimum hale geldiği görülmüştür. Rüzgar karakteristiklerinin hemen ardından en uygun rüzgar türbin tipi, boyutu ve optimum rüzgar türbin sayısı belirlendikten sonra pompalı depolamalı rüzgar hidro sistemi, elektriksel yük, enterkonnekte şebeke, rüzgar türbini ve pompalı depolamalı sistemler temel alınarak modellenmiştir.

Modellenen sistemin akış algoritması elde edilerek bu model tabanlı bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen bu programda giriş verileri sisteme girildikten sonra uygun maliyet ve optimizasyon tabanlı bir yaklaşım sergilenmiştir. Bu programda su türbini, su pompası, rüzgar türbini gibi her bir bileşenin optimum sayıları rahatlıkla belirlenebilmektedir. Ayrıca modellenen sistemdeki her bir parametrenin değeri saatlik olarak hesaplanabilmektedir. Program sadece bu tez çalışması kapsamında değerlendirilen bölgeler ve bilgiler ışığında değil, herhangi bir bölgeye ait veriler girildiğinde de gerekli hesaplamaları yapacak şekilde geliştirilmiştir. Bu geliştirilen program ışığında modellenen sistemde alt hazne olarak Ergene havzası belirlenmiştir. Ergene havzasına ait bilgiler kullanılarak optimum üst hazne boyutları; hazne hacmi  $23,002.1\text{m}^3$ , hazne taban alanı  $338\text{m}^2$  ve hazne yüksekliği

68m olarak elde edilmiştir. Ayrıca optimum rüzgar türbin sayısı belirlenirken başvuru yola benzer olarak yine her iki durum (su pompası ve su türbini) içinde ayrı ayrı oluşturulan optimizasyon problemleri yardımıyla çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ışığında su pompası ve su türbininin tipi, boyutu ve optimum sayıları belirlenmiştir. Her bir elemanın modellenmesi ve optimum sayılarının belirlenmesinden sonra pompalı depolamalı rüzgar-hidro sistemin gerçek yük talebi ve rüzgar hız verileri kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Saatlik bazda yük talebi ve beş yıllık rüzgar verileri ile sistem simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonucunda tasarlanan pompalı depolamalı rüzgar - hidro sistemde rüzgar, hidro ve şebekenin mevcut yükü karşılamadaki payları ve hangi zamanlarda daha sıklıkla devreye girdikleri, talebin sürekli olarak karşılanıp karşılanamadığı bilgilerine elde edilen datalar ışığında ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, modellenen sistem ve geliştirilen program ile ele alınan bölgede belirtilen bir sistem kurulması durumunda yıllık talep edilen yükün %27.4'ü şebekeden, %11'i hidro sistemden, kalanı ise rüzgardan elde edilmektedir. Buradan bu sistem tüm Türkiye'ye indirgenirse %6-16'lara varan enerji tasarrufları söz konusu olabilir. Elde edilen simülasyon sonuçlarından en iyi ve en kötü durum değerlendirildiğinde; Aralık ayında, talep edilen enerjinin %50.5'i şebekeden, %6.97'si hidro sistemden ve %42.45 i rüzgardan karşılandığı durum en kötü durum olarak karşımıza çıkarken, Mayıs ayında %19.2'si şebekeden, %13.68'i hidro sistemden ve %67'si rüzgardan karşılandığı durum en iyi durum olarak görülmektedir. Hidro sistemden elde edilen enerji miktarının tamamı enerji tasarrufu olarak algılanırsa, bu oran aylık olarak bu bölgeye özgü %6 ile %16 arasında değişim göstermektedir.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda sistemin ekonomik analizi ve sistem maliyeti üzerine çalışmalar yapılarak literatüre katkı sağlanabilir. Optimizasyon problemlerini oluştururken ele alınan su türbini tipleri ve su pompa sayıları değiştirilerek daha hassas sonuçlar elde edilebilecek sistemler tasarlanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Alboyaci, B., Dursun, B., “Electricity restructuring in Turkey and the share of wind energy production”, *Renewable Energy*, **vol:33**, **no:11**, 2499–2505, (2008).
- [2] Oztopal, A., Sahin, A.D., Akgun, N., Sen, Z., “On the regional wind energy potential of Turkey”, *Energy*, **vol 25**, **no:2**, 189–200, (2000).
- [3] Kaygusuz, K., Sarı, A., “Renewable energy potential and utilization in Turkey”, *Energy Conversion and Management*, **vol 44**, **no:3**, 459–478, (2003).
- [4] Uyar, T.S., 2006, *Türkiye enerji sektöründe karar verme ve rüzgar enerjisinin Entegrasyonu* [online], <http://www.geocities.com>, (**Ziyaret Tarihi: 28 Kasım 2006**).
- [5] Ogulata, R.T., “Energy sector and wind energy potential”, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, **vol:7**, **no:6**, 469–484, (2003).
- [6] EWEA, 2009, *Wind power installed in Europe by end of 2005* [online], The European Wind Energy Associations, <http://www.ewea.org>, (**Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2009**).
- [7] EWEA, 2009, *Wind power installed in Europe by end of 2006* [online], The European Wind Energy Associations, <http://www.ewea.org>, (**Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2009**).
- [8] EWEA, 2009, *Wind power installed in Europe by end of 2007* [online], The European Wind Energy Associations, <http://www.ewea.org>, (**Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2009**).
- [9] EWEA, 2009, *Wind power installed in Europe by end of 2008* [online], The European Wind Energy Associations, <http://www.ewea.org>, (**Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2009**).
- [10] EPDK, 2009, *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun*, [online], Enerji Piyasaları Denetleme Kurumu, <http://www.epdk.org.tr/mevzuat/diger/yenilenebilir/yenilenebilir.doc>, (**Ziyaret Tarihi: 15 Şubat 2009**).
- [11] Alboyaci, B., Dursun, B., Buhan, S., Boyrazoglu, B., “Power quality measurements performed on Wind farms in Turkish power system”, *International Journal of Distributed Energy Resources*, **vol:5**, **no:1**, 41 – 53, (2009).

- [12] EPDK, 2009, *Rüzgar enerjisi lisans başvuruları ve kabul edilen lisanslar*, [online], Enerji Piyasaları Denetleme Kurumu, <http://www.epdk.gov.tr>, (**Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2009**).
- [13] Kaldellis, J.K., “Parametrical investigation of the wind-hydro electricity production solution for Aegean Archipelago”, *Energy Conversion and Management*, **vol: 43, no:16**, 2097-2113, (2002).
- [14] Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A., “Optimal wind-hydro solution for Aegean Sea islands' electricity-demand fulfilment”, *Applied Energy*, **vol:70 no:4**, 333-354, (2001).
- [15] Cristorafi, C., Notton, G., Poggi, P., Muselli, M., Heraud, N., Nedelcheva, S., “Coupling hydro and wind electricity production by water -pumping storage”, *Environment Identities and Mediterranean Area*, ISEIMA '06, 196-199, (2006).
- [16] Bakos, G.C., “Feasibility study of a hybrid wind/hydro power-system for low cost electricity production”, *Applied Energy* **vol:72 no:3-4**, 599-608, (2002).
- [17] Castronuovo, E.D., Lopes, J.A.P., “Optimal operation and hydro storage sizing of a wind-hydro power plant”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **vol:26 no:10**, 771-778, (2004).
- [18] Castronuovo, E.D. Lopes, J.A.P., “On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant”, *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol:19, no:3**, 1599-1606, (2004).
- [19] Anagnostopoulos, J.S., and Papantonis, D.E., “Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant”, *Energy Conversion and Management*, **vol:48, no:11**, 3009-3017, (2007).
- [20] Kaldellis, J.K., Kavadias K., Christinakis, E., “Evaluation of the wind-hydro energy solution for remote islands” *Energy Conversion and Management*, **vol:42, no:9**, 1105-1120, ( 2001).
- [21] Tanrıöven, M., 2009, “Rüzgar ve Güneş enerjisi dersi ders notları”, Yıldız Teknik Üniversitesi, 1-20.
- [22] Kuik, G.A.M., “Are wind turbines growing too fast?” *2001 European Wind Energy Conference and Exhibition*, Copenhagen, Denmark, pp.69-72, 2-6 July (2001).
- [23] Heier, S., “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, *John Wiley & Sons*, 2<sup>nd</sup> edition, Newyork, (1998).
- [24] Kyoungsoo, R., Han-ho, C., “Application of neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine system” *Electrical Engineering*, **vol:88**, 45–53, (2005).

- [25] Sathyajith, M., “Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics”, **Springer Publishing**, (2006).
- [26] Vestas Wind Systems, “Vestas V90-3.0 MW Wind Turbine specifications”, Denmark.
- [27] Song, Y.D., Dhinakaran, B., Bao, X.Y., “Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms”, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics vol:85**, 293-308, (2000).
- [28] Emniyetli, G., “Evsel Elektrik İhtiyacının Karsılanması İçin Rüzgar Türbin Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, **Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Edirne, (2007).
- [29] Ackermann, T., “Wind Power in Power Systems”, **John Wiley & Sons**, 56-60, (2005).
- [30] Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., Eskildsen, K. “Generators and Power Electronics Technology For Wind Turbines,” **The 27th Annual Conference of the IEEE, vol: 3**, 2000 -2005, (2001).
- [31] Polinder, H., Haan S.W.H., Dubois, M.R., Sootweg, J.G., “Basic Operation Principles and Electrical Conversion of Wind Turbines,” **NORPIE 2004, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics**, Trondheim, Norway, (2004).
- [32] Uyar, M., Gençoğlu, M.T., Yıldırım S., “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri”, **II. Ulusal Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, YEKSEM 2003**, Mersin, (2003).
- [33] Muller, S. Deicke ve M. De Doncker, R.W., “Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines,” **IEEE Industry Applications Magazine, vol:8,no:3**, 26-33, (2002).
- [34] Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, A., Pinheiro, J.R., Hey, H.L., “A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System,” **7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP'03**, Fortaleza, Brazil, 732- 738, (2003).
- [35] Dursun B., “Dikey Eksenli Bir Darrieus Rüzgar Türbin Dizayn Edilmesi ve Kanat Üretimi” Yüksek Lisans Tezi, **Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen ve Mühendislik Bilimleri Enstitüsü**, Gebze (2006).
- [36] DüNDAR, C., “Rüzgar Enerjisi ve Türkiye Rüzgar Atlası” **III. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu**, 431-439, İstanbul, (2003).
- [37] WWINDE, “World Wind Energy Report 2008”, **8th World Wind Energy Conference & Exhibition Wind Power for Islands – Offshore and Onshore**, Jeju Island, South Korea, 1-15 (2009).

- [38] EPDK, 2009, *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına İlişkin Diğer Bilgiler*, [online], <http://www.epdk.gov.tr/lisans/elektrik/yeke/yeke.html>, (**Ziyaret Tarihi: 03 Aralık 2009**).
- [39] Turksoy, F., “Investigation of wind power potential at Bozcaada,Turkey”, *Renewable Energy*, **vol:6 no:8**, 917–23 (1995).
- [40] Tolun, S., Montes, S., Aslan, Z., Yukselen, M.A., “The wind energy potentials of Gökceada in the northern Aegean Sea”, *Renewable Energy*, **vol:6, no:7**, 679–685, (1995).
- [41] Dunder, C., Inan, D., “Wind energy potential in Cesme, Turkey”, *ISES 1997 Solar World Congress*, Taejon, Korea, (1997).
- [42] Ozerdem, B., Turkeli, M., “An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey”, *Renewable Energy*, **vol: 28, no:7**, 1013–1027, (2003).
- [43] Köse, R., “An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kütahya, Turkey”, *Energy Conversion and Management*, **vol:45, no:11-12**, 1631-1641, (2003).
- [44] Dunder, C., Inan, D., “The analysis of wind data and wind energy potentials in Bandırma, Turkey”, *ISES 1999 Solar World Congress*, Israel, (1999).
- [45] Gokcek, M., Bayulken, A., Bekdemir, S., “Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey”, *Renewable Energy* **vol:32, no:10**, 1739–1752, (2007).
- [46] Ucar, A., Balo, F., “Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludağ-Bursa, Turkey”, *Applied Energy*, **vol:86, no:3**, 333-339, (2009).
- [47] Ulgen, K., Genc, A., Hepbasli, A., Oturanc, G., “Assessment of Wind Characteristics for Energy Generation”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **vol:26, no:13**, 1227-1237, (2004).
- [48] Durak, M., Sen, Z., “Wind energy potential in Turkey and Akhisar case study”, *Renewable Energy*, **vol:25, no:3**, 463–472, (2002).
- [49] Akpınar, E.K., Akpınar, S., “An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics”, *Energy Conversion and Management* **vol:46, no:11-12**, 1848–1867, (2005).
- [50] Akpınar, E.K., Akpınar, S., “Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey”, *Energy Conversion and Management*, **vol:45, no:18-19**, 2901–2914, (2004).

- [51] Bilgili, M., Sahin B., Kahraman, A., “Wind energy potential in Antakya and Iskenderun regions, Turkey”, *Renewable Energy* **vol:29, no:10**, 1733–1745, (2004).
- [52] Karlı, V.M., Gecit, C., “An investigation on wind power potential of Nurdagi-Gaziantep, Turkey”, *Renewable Energy*, **vol:28, no:5**, 823–830, (2003).
- [53] EİE, *Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası*, [online], [http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/YEKrepa/REPA-duyuru\\_01.html](http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html) (Ziyaret Tarihi: 12 Ekim 2009).
- [54] Jamil, M., Parsa, S., Majidi, M., “Wind power statistics and an evaluation of wind energy density”, *Renewable Energy*, **vol:6, no:5-6**, 623-628, (1995).
- [55] Mathew, S., “Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics”, Berlin Heidelberg, *Springer-Verlag* (2006).
- [56] Kose, F., Özgören, M., “Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Ölçümü Ve Rüzgâr Türbini Seçimi”, *Mühendis ve Makina*, **vol:46, no:20**, 20-30, (2005).
- [57] Akkaş, A.A., “Rüzgâr Enerji Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi”, *Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu*, (2001).
- [58] Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., Liao C.H., “Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan” *Renewable Energy*, **vol:28 no:6**, 851-871, (2003).
- [59] Tar, K., “Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **vol:12, no:6**, 1712–1724, (2008).
- [60] Justus, C. G., Hargraves, W.R., Mikhail, A., Graber, D., “Methods of estimating wind speed frequency distribution”, *Journal of Applied Meteorology*, **vol:17, no:3**, 350-353 (1978).
- [61] Bowden, G.J., Barker, P.R., Shestopal, V.O., Twidell, J.W., “The Weibull distribution function and wind statistics”, *Wind Engineering* **vol:7, no:2**, 85-98, (1983).
- [62] Johnson, G.L., “Wind energy systems”, NJ, USA, *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, (1985).
- [63] Ilinca, A., McCarthy, E., Chaumel, J.L., Rétiveau, J.L., “Wind potential assessment of Quebec Province”, *Renewable Energy*, **vol:28, no:12**, 1881-1897. (2003).
- [64] Akpınar, E.K., Akpınar, S., “An analysis of the wind energy potential of Elazığ, Turkey”, *International Journal of Green Energy*, **vol:1, no:2**, 193 – 207, (2004).

- [65] Zhou, W., Yang, H., Fang, Z., “Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China” *Renewable Energy*, vol:31 no:6, 739-753, (2006).
- [66] Celik, A.N., “A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey”, *Renewable Energy*, vol:29, no:4, 593-604, (2004).
- [67] Ultanır, M.O., “21.Yüzyıla Giderken Türkiye’nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi” *TUSİAD yayınları*, 103-116,(1997).
- [68] Bakis, R., Demirbas, A., “Sustainable development of small hydropower plants (SHPs)”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol:26, no:12, 1105-1118, (2004).
- [69] EİE, The Electrical Power Resources Planning and Survey Administration, “Hydro Electric Power Plant Projects Carried out by EİE”, Ankara, 1-45, (2008).
- [70] DİE, 2009, “Statistic yearbook of Turkey in 2003”, State Institute of Statistics, Prime Ministry, Republic of Turkey, Ankara, (2004).
- [71] Altınbilek, D., Cakmak, C., “The role of dams in development”, *Third International Symposium, DSI*, Ossiach, Austria, (2001).
- [72] Altınbilek, D., “The role of dams in development”, *International Journal of Water Resources Development*, vol:18, no:1, 9–24, (2002).
- [73] DSI, 2009 *Toprak ve Su Kaynakları*, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, [online]: <http://www.dsi.gov.tr>, (Ziyaret Tarihi: 13 Haziran 2009).
- [74] Balat, M., “Turkey’s Hydropower Potential and Electricity Generation Policy Overview Beginning in the Twenty-First Century”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol:27, no:10, 949 – 962, (2005).
- [75] Dragu, C., Sels,T., Belmans, R., “Small Hydro Power- State of The Art and Applications”, *International Conference Power Generation and Sustainable Development* (AIM), Liege, Belgium, 265-270, (2001).
- [76] Bergkamp, G., Matthew, M., Dugan, P., McNeely, J., Acreman, M., “Dams, ecosystem functions and environmental restoration”, *WCD Thematic Review Environmental Issues II.1* Vlaeberg, Cape Town, (2000).
- [77] IEA “Renewables information”, *International Energy Agency*, France, (2003).
- [78] Balat, H., “A renewable perspective for sustainable energy development in Turkey: The case of small hydropower plants”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol:11, no:9, 2152-2165, (2007).

- [79] TEIAS, 2009 *Annual Development Of Turkey's Gross Electricity Generation-Imports-Exports And Demand*, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, [online]: <http://www.teias.gov.tr>, (**Ziyaret Tarihi: 15 Mayıs 2009**).
- [80] MENR, 2009, *Energy report of Turkey in 2004*, Ministry of Energy and Natural Resources, [online]: <http://www.enerji.gov.tr>, (**Ziyaret Tarihi: 26 Temmuz 2009**).
- [81] Yuksek, O., Komurcu, M.I., Yuksel, I., Kaygusuz, K., “The role of hydropower in meeting Turkey’s electric energy demand”, *Energy Policy*, vol:34, no:17, 3093-3103, (2006).
- [82] IHA, “Hydropower information and country report for Turkey”, *International Hydropower Agency*, (2007).
- [83] Ozturk, M., Bezir, N.C., Ozek, N. “Hydropower-water and renewable energy in Turkey: Sources and policy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol:13, no:3, 605-615, (2009).
- [84] Punys, P., Pelikan, B., “Review of small hydropower in the new Member States and Candidate Countries in the context of the enlarged European Union”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol:11, no:7, 1321-1360, (2007).
- [85] Lako, P., Eder, H., de Noord, M., Reisinger, H., “Hydropower Development with a Focus on Asia and Western Europe. Overview in the framework of VLEEM 2. project”, *Verbundplan, Editor*, (2003).
- [86] Tutus, A., “Pompa Depolamalı HES’ler”, *TMMOB 10. Enerji Kongresi*, (2006).
- [87] Breeze, P., “Power Generation Technologies”, *Elsevier, Newnes*, Burlington, (2005).
- [88] WECS, “Enerji Kongresi Sonuç Bildirgesi”, *10. Enerji Kongresi*, İstanbul, Harbiye, (2006).
- [89] Bakır, N.N., “Türkiye’nin Hidroelektrik Potansiyelinin Yeniden Değerlendirilmesi”, ERE Grubu, [online]: <http://www.ere.com.tr/yayinlar.html>, (**Ziyaret Tarihi: 12 Mart 2008**).
- [90] He, W., “A simulation model for evaluating Tianhuangping pumped storage hydro-plant”, *Renewable Energy*, vol:11, no:2, 263-266, (1997).
- [91] Sohrabi, A.R., “Economic Analysis of a Pumped Storage Project for Iran Generating System Based on Dynamic Modeling”, *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference* (UPEC-2006), 21-25. (2006).

- [92] Guan, X., Luh, P.B., Yan H., Rogan, P., “Optimization-Based Scheduling Of Hydrothermal Power-Systems With Pumped-Storage Units”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol:9, no:2, 1023-1031, (1994).
- [93] Katsaprakakis D.A., , Dimitris, P., Christakis, G., “A Wind Parks, Pumped Storage and Diesel Engines Power System for the electric power production in Astypalaia”, *EWECE 2006- European Wind Energy Conference & Exhibition*, Megaron Conference Centre, Athens, Greece, 1-16 (2006).
- [94] Hosseini, S.M.H., Forouzbakhsh, F., Fotouhi, M., Vakilian, M., “Determination of installation capacity in reservoir hydro-power plants considering technical, economical and reliability indices”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol:30 no:6-7, 393-402, (2008).
- [95] Nanahara, T., Takimoto, A., “A Study On Required Reservoir Size For Pumped Hydro-Storage”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol: 9, no:1, 318-323, (1994).
- [96] Kaldellis, J.K., Kavadias, K., Christinakis, E., “Evaluation of the wind-hydro energy solution for remote islands”, *Energy Conversion and Management*, vol:42, no:9, 1105-1120, (2001).
- [97] Ozdamar, A., Yildiz, H., Sar, O., “Wind energy utilization in a house in Izmir, Turkey”, *International Journal of Energy Research*, vol:25, no:3, 253-261, (2001).
- [98] GAMS, General Algebraic Modeling System yazılım programı [online]: <http://www.gams.com/download/>, (Ziyaret Tarihi: 30 Mayıs 2009).
- [99] Suat, O., “Ergene havzası haritası” [online]: [www.luleburgaz.blogcu.com](http://www.luleburgaz.blogcu.com), (Ziyaret Tarihi: 03 Mayıs 2009).
- [100] MATLAB, MATLAB & Simulink student version 7.0.

## EKLER

### Ek - A. Rüzgar Enerjisi Üretim Santrallerinin Özellikleri ve Son Durumu

| Mevkii                                 | Şirket                   | Üretime Geçiş Tarihi | Kurulu Güç (MW) | Türbin imalatçısı | Türbin adet ve kapasitesi        |
|----------------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|-------------------|----------------------------------|
| İzmir-Çeşme                            | Alize A.Ş.               | 1998                 | 1.50            | Enercon           | 3 adet 500 kW                    |
| İzmir-Çeşme                            | Güçbirliği A.Ş.          | 1998                 | 7.20            | Vestas            | 12 adet 600 kW                   |
| Çanakkale-Bozcaada                     | Bores A.Ş.               | 2000                 | 10.20           | Enercon           | 17 adet 600 kW                   |
| İstanbul-Hadımköy                      | Sunjüt A.Ş.              | 2003                 | 1.20            | Enercon           | 2 adet 600 kW                    |
| Balıkesir-Bandırma                     | Bares A.Ş.               | I/2006               | 30.00           | GE                | 20 adet 1.500 kW                 |
| İstanbul-Silivri                       | Ertürk A.Ş.              | II/2006              | 0.85            | Vestas            | 1 adet 850 kW                    |
| İzmir-Çeşme                            | Mare A.Ş.                | I/2007               | 39.20           | Enercon           | 49 adet 800 kW                   |
| Manisa-Akhisar                         | Deniz A.Ş.               | I/2007               | 10.80           | Vestas            | 6 adet 1.800 kW                  |
| Çanakkale-İntepe                       | Anemon A.Ş.              | I/2007               | 30.40           | Enercon           | 38 adet 800 kW                   |
| Çanakkale-Gelibolu                     | Doğal A.Ş.               | II/2007              | 14.90           | Enercon           | 13 adet 800 kW + 5 adet 900 kW   |
| Hatay-Samandağ                         | Deniz A.Ş.               | I/2008               | 30.00           | Vestas            | 15 adet 2.000 kW                 |
| Manisa-Sayalar                         | Doğal A.Ş.               | I/2008               | 30.40           | Enercon           | 38 adet 800 kW                   |
| İzmir-Aliğa                            | İnnores A.Ş.             | I/2008               | 42.50           | Nordex            | 17 adet 2.500 kW                 |
| <b>İŞLETMEDEKİ KAPASİTE TOPLAMI</b>    |                          |                      | <b>249.15</b>   |                   |                                  |
| İst.Gaziosmanpaşa                      | Lodos A.Ş.               | II/2008              | 24.00           | Enercon           | 12 adet 2.000 kW                 |
| İstanbul-Çatalca                       | Ertürk A.Ş.              | II/2008              | 60.00           | Vestas            | 20 adet 3.000 kW                 |
| Balıkesir-Şamlı                        | Baki A.Ş.                | II/2008              | 114.00          | Vestas            | 30 adet 3.000 kW                 |
| <b>İNŞA HALİNDEKİ KAPASİTE TOPLAMI</b> |                          |                      | <b>198.00</b>   |                   |                                  |
| Muğla-Datça                            | Dares A.Ş.               | II/2008              | 28.80           | Enercon           | 36 adet 800 kW                   |
| Hatay-Samandağ                         | Ezse Ltd. Şti.           | II/2008              | 35.10           | Nordex            | 900 kW                           |
| Hatay-Samandağ                         | Ezse Ltd. Şti.           | II/2008              | 22.50           | Nordex            | 2.500 kW                         |
| Aydın-Didim                            | Ayen A.Ş.                | II/2008              | 31.50           | Suzlon            | 2.100 kW                         |
| İzmir-Çeşme                            | Kores A.Ş.               | II/2008              | 15.00           | Nordex            | 2.500 kW                         |
| Balıkesir-Susurluk                     | Alize A.Ş.               | II/2008              | 19.00           | Enercon           | 17 adet 800 kW ve 6 adet 900 kW  |
| Osmaniye-Bahçe                         | Rotor A.Ş.               | I/2009               | 135.00          | GE                | 54 adet 2.500 kW                 |
| İzmir – Çeşme                          | Mazi-3 Res Elk. Ür. A.Ş. | I/2009               | 22.50           | Nordex            | 9 adet 2500 kW                   |
| Balıkesir-Bandırma                     | Borasco A.Ş.             | I/2009               | 45.00           | Vestas            | 15 adet 3000 kW                  |
| Tekirdağ-Şarköy                        | Alize A.Ş.               | I/2009               | 28.80           | Enercon           | 14 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW |
| Balıkesir-Havran                       | Alize A.Ş.               | I/2009               | 16.00           | Enercon           | 8 adet 2000 kW                   |
| Çanakkale-Ezine                        | Alize A.Ş.               | I/2009               | 20.80           | Enercon           | 10 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW |
| Manisa-Kırkağaç                        | Alize A.Ş.               | II/2009              | 25.60           | Enercon           | 32 adet 800 kW                   |
| Manisa-Soma                            | Soma A.Ş.                | II/2009              | 140.80          | Enercon           | 176 adet 800 kW                  |
| Edirne-Enez                            | Boreas A.Ş.              | II/2009              | 15.00           |                   |                                  |

|                                               |                                 |         |                 |         |                  |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|---------|-----------------|---------|------------------|
| İzmir-İliaga                                  | Doruk A.Ş.                      | II/2009 | 30.00           | Enercon | 15 adet 2.000 kW |
| İzmir-İliaga                                  | Yapısan İnş. Elk. San.Tic. A.Ş. | II/2009 | 90.00           | Nordex  | 36 adet 2500 kW  |
| İzmir-İliaga                                  | Doğal A.Ş.                      | I/2010  | 30.00           | Enercon | 15 adet 2000 kW  |
| İzmir-Foça                                    | Doğal A.Ş.                      | I/2010  | 30.00           | Enercon | 15 adet 2000 kW  |
| Balıkesir-Kepsut                              | Poyraz A.Ş.                     | I/2010  | 54.90           | Enercon | 61 adet 900 kW   |
| Manisa-Soma-Kırkağaç                          | Bilgin Elektrik Üretim A.Ş.     | I/2010  | 90.00           | Nordex  | 36 adet 2500 kW  |
| Balıkesir-Kepsut                              | Bares Elektrik Üretim A.Ş.      | I/2010  | 142.50          | Nordex  | 57 adet 2500 kW  |
| TÜRBİN TEDARİK SÖLEŞMESİ İMZALI PROJE TOPLAMI |                                 |         | <b>1.068.80</b> |         |                  |

## Ek-B. GAMS Program Çıktıları

Senaryo-1

### **S O L V E S U M M A R Y**

MODEL Mat\_thickness OBJECTIVE Z  
TYPE LP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER BARON FROM LINE 10

\*\*\*\* SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION  
\*\*\*\* MODEL STATUS 1 OPTIMAL  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE **415305573.9140**  
Solution = 415305573.914 best solution found during preprocessing  
Best possible = 415305573.914

---- VAR Z **4.1531E+8**  
---- VAR n **102.680**

Senaryo-2

### **S O L V E S U M M A R Y**

MODEL Mat\_thickness OBJECTIVE Z  
TYPE LP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER BARON FROM LINE 10  
\*\*\*\* SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION  
\*\*\*\* MODEL STATUS 1 OPTIMAL  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE **314996127.4900**

Solution = 314996127.49 best solution found during preprocessing  
Best possible = 314996127.49

---- VAR Z **3.1500E+8**  
---- VAR n **43.180**

Senaryo-3

### **S O L V E S U M M A R Y**

MODEL Turbine Selection OBJECTIVE Z  
TYPE LP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER BARON FROM LINE 10  
\*\*\*\* SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION  
\*\*\*\* MODEL STATUS 1 OPTIMAL  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE **293588623.6800**

Solution = 293588623.68 best solution found during preprocessing  
Best possible = 293588623.68

---- VAR Z **2.9359E+8**

---- VAR n            **37.298**

Senaryo

## **SOLVE SUMMARY**

MODEL Mat\_thickness    OBJECTIVE Z  
TYPE LP                DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER BARON            FROM LINE 10

\*\*\*\* SOLVER STATUS    1 NORMAL COMPLETION

\*\*\*\* MODEL STATUS    1 OPTIMAL

\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE    **352306348.4160**

Solution    = 352306348.416 best solution found during preprocessing

Best possible = 352306348.416

---- VAR Z            **3.5231E+8**

---- VAR n            **41.561**

Senaryo -5

## **SOLVE SUMMARY**

MODEL Mat\_thickness    OBJECTIVE Z  
TYPE LP                DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER BARON            FROM LINE 10

\*\*\*\* SOLVER STATUS    1 NORMAL COMPLETION

\*\*\*\* MODEL STATUS    1 OPTIMAL

\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE    **340073489.0960**

Solution    = 340073489.096 best solution found during preprocessing

Best possible = 340073489.096

---- VAR Z            **3.4007E+8**

---- VAR n            **27.707**

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Dursun, B., Alboyaci, B., “The contribution of Wind-Hydro Pumped Storage Systems in Meeting Turkey’s Electric Energy Demand”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, in press, (2010).[SCI]

Dursun, B., Alboyaci, B., “An Evaluation of Wind Energy Characteristics for four different locations in Balıkesir”, ***Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects***, in press, (2010).[SCI]

Alboyaci, B., Dursun, B., Buhan, S., Boyrazoglu, B., “Power Quality Measurements Performed on Wind Farms in Turkish Power System”, ***International Journal of Distributed Energy Resources***, vol:5, no:1, 41-53, (2009). [ Engineering Index]

Alboyaci, B., and Dursun, B., “Electricity restructuring in Turkey and the share of wind energy production”, ***Renewable Energy, An International Journal***, vol:33, no:11, 2499-2505, (2008).[SCI]

Alboyaci, B., and Dursun, B., “Grid Connection Requirements for Wind Turbine Systems in some Countries Comparison to Turkey”, ***Electrical Power Quality & Utilization Magazine***, vol:3, no:2,1-15 (2008).[ Engineering Index]

## ÖZGEÇMİŞ

1981’de İstanbul’da doğdu. İlk öğrenimini İstanbul Bahçelievlerde bulunan Siyavuşpaşa İlkokulu ve Org. Eşref Bitlis İlköğretim okulunda tamamladı. Orta öğrenimini Bahçelievler Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı. 1998 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünü kazandı. 2003 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde başladığı yüksek lisans programını 2006 yılında tamamladı ve aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde doktora programına başladı. 2003 yılı Kasım ayından itibaren Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaya başladı. Evli ve bir çocuk babasıdır.