

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**VANADYUM REDOKS AKIŞKAN AKÜ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ BİR  
RÜZGAR TARLASI İÇİN ENERJİ ÜRETİM VE DEPOLAMA ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cansev ÇAKIR**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**HAZİRAN 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**VANADYUM REDOKS AKIŞKAN AKÜ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ BİR  
RÜZGAR TARLASI İÇİN ENERJİ ÜRETİM VE DEPOLAMA ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cansev ÇAKIR  
301091091**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU**

**HAZİRAN 2012**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301091091 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cansev ÇAKIR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“VANADYUM REDOKS AKIŞKAN AKÜ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ BİR RÜZGAR TARLASI İÇİN ENERJİ ÜRETİM VE DEPOLAMA ANALİZİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Önder GÜLER**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Lale T. ERGENE**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **27 Nisan 2012**  
**Savunma Tarihi :**      **08 Haziran 2012**



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, karşılaştığım engelleri aşmam konusunda emek, sabır ve desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Burak Barutçu'ya ve çalışma süresince bana rahat bir çalışma ortamı sunmak için her türlü imkan ve desteği sağlayan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, sağladıkları bilgilerle çalışmaya katkıda bulunan Vestas Rüzgar Enerjisi Sistemleri Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'ne, Ericom Telekomünikasyon ve Enerji Teknolojileri A.Ş.'ye, ABB ve Aksa Jeneratör'e teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2012

Cansev Çakır  
(Mekatronik Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                                                            |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                                                 | iii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                                                          | v    |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                                                                       | vii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                                                         | ix   |
| KISALTMALAR .....                                                                                                          | xiii |
| SEMBOLLER .....                                                                                                            | xv   |
| ÖZET.....                                                                                                                  | xvii |
| SUMMARY .....                                                                                                              | xix  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                                             | 1    |
| 2. RÜZGAR ENERJİSİ.....                                                                                                    | 3    |
| 2.1 Rüzgar Karakteristikleri .....                                                                                         | 3    |
| 2.1.1 Rüzgarın oluşumu .....                                                                                               | 3    |
| 2.1.2 Rüzgarın sınıflandırılması.....                                                                                      | 3    |
| 2.1.2.1 Küresel rüzgarlar .....                                                                                            | 3    |
| 2.1.2.2 Yerel rüzgarlar .....                                                                                              | 4    |
| 2.1.3 Yerin rüzgar enerjisi üzerinde etkisi .....                                                                          | 6    |
| 2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi .....                                                                             | 9    |
| 2.3 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu.....                                                                   | 12   |
| 2.3.1 Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu .....                                                                              | 12   |
| 2.3.2 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu .....                                                                           | 13   |
| 2.4 Rüzgar Türbinleri .....                                                                                                | 15   |
| 2.4.1 Rüzgar türbini çeşitleri.....                                                                                        | 15   |
| 2.4.1.1 Düşey eksenli rüzgar türbinleri .....                                                                              | 15   |
| 2.4.1.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri .....                                                                              | 17   |
| 2.4.2 Türbin mekanizması.....                                                                                              | 19   |
| 2.4.3 Güç kontrolü .....                                                                                                   | 21   |
| 2.4.4 Güç ve yıllık enerji üretimi .....                                                                                   | 21   |
| 2.4.5 Rotor aerodinamiği .....                                                                                             | 23   |
| 2.4.5.1 Momentum teorisi .....                                                                                             | 24   |
| 2.4.5.2 Güç katsayısı .....                                                                                                | 25   |
| 2.4.5.3 Betz limiti.....                                                                                                   | 26   |
| 2.4.5.4 "Thrust" katsayısı .....                                                                                           | 26   |
| 2.4.5.5 İz (wake) etkisi .....                                                                                             | 27   |
| 3. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİN ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE ELEKTRİK PİYASASI                | 29   |
| 3.1 Rüzgar Enerji Santrallerinde Üretilen Enerjinin Şebeke Üzerindeki Etkisi.....                                          | 29   |
| 3.2 Rüzgar Enerji Santrallerinde Üretilen Enerjinin Enerji Planlaması Üzerindeki Etkisi.....                               | 30   |
| 3.2.1 Türkiye elektrik piyasasında dengeleme ve uzlaştırma açısından yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim ..... | 30   |
| 3.2.2 Kısa süreli rüzgar enerjisinin tahmini .....                                                                         | 32   |

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİLEN ENERJİNİN</b>                      |            |
| <b>DEPOLANMASI.....</b>                                                        | <b>35</b>  |
| 4.1 Enerji Depolama Teknikleri .....                                           | 35         |
| 4.1.1 Güç uygulamalarında depolama teknolojileri .....                         | 38         |
| 4.1.1.1 Volanlar .....                                                         | 38         |
| 4.1.1.2 Süper-kapasitörler .....                                               | 39         |
| 4.1.1.3 Süper-iletken magnetik enerji depolama.....                            | 39         |
| 4.1.1.5 Bataryalar (aküler).....                                               | 40         |
| 4.1.2 Enerji uygulamalarında depolama teknolojileri .....                      | 40         |
| 4.1.2.1 Pompajlı hidroelektrik santraller .....                                | 40         |
| 4.1.2.2 Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama .....                           | 41         |
| 4.1.2.3 Akışkan aküler.....                                                    | 42         |
| Vanadyum redoks bataryalar.....                                                | 43         |
| <b>5. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİLEN ELEKTRİK</b>                       |            |
| <b>ENERJİSİNİN VANADYUM REDOKS BATARYALARDA DEPOLANMASI</b>                    |            |
| <b>.....</b>                                                                   | <b>47</b>  |
| 5.1 Rüzgar Tarlası Tasarımı .....                                              | 47         |
| 5.2 VR Akışkan Akülü ve Aküsüz Sistemlerin Enerji Analizleri .....             | 51         |
| 5.2.1 VR akışkan akülü, şebekeden bağımsız sistemler.....                      | 51         |
| 5.2.1.1 Sistem 1: 1200 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim.....                 | 52         |
| 5.2.1.2 Sistem 2: 2400 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim.....                 | 56         |
| 5.2.1.3 Sistem 3: 1200 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim.....                | 59         |
| 5.2.1.4 Sistem 4: 2400 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim.....                | 62         |
| 5.2.2 VR akışkan akülü, jeneratör destekli ve şebekeden bağımsız sistemler ... | 65         |
| 5.2.2.1 Sistem 5: 1200 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim, 900 kW              |            |
| jeneratör.....                                                                 | 65         |
| 5.2.2.2 Sistem 6: 2400 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim, 900 kW              |            |
| jeneratör.....                                                                 | 68         |
| 5.2.2.3 Sistem 7: 1200 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim, 900 kW             |            |
| jeneratör.....                                                                 | 71         |
| 5.2.2.4 Sistem 8: 2400 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim, 900 kW             |            |
| jeneratör.....                                                                 | 73         |
| 5.2.3 Aküsüz, şebekeden bağımsız sistemler .....                               | 80         |
| 5.2.3.1 Sistem 9: 600 kW tüketim, şebekeden bağımsız.....                      | 80         |
| 5.2.3.2 Sistem 10: 1200 kW tüketim, şebekeden bağımsız.....                    | 83         |
| 5.2.4 Aküsüz, jeneratör destekli ve şebekeden bağımsız sistemler.....          | 86         |
| 5.2.4.1 Sistem 11: 600 kW tüketim, 900 kW jeneratör.....                       | 87         |
| 5.2.4.2 Sistem 12: 1200 kW tüketim, 900 kW jeneratör.....                      | 90         |
| 5.2.5 Aküsüz, şebeke bağlantılı sistemler .....                                | 93         |
| 5.2.5.1 Sistem 13: 600 kW tüketim, şebeke bağlantılı.....                      | 93         |
| 5.2.5.2 Sistem 14: 1200 kW tüketim, şebeke bağlantılı.....                     | 96         |
| 5.2.6 Sistemlerin Karşılaştırılması .....                                      | 101        |
| 5.2.6.1 Sistem maliyetlerinin karşılaştırılması .....                          | 107        |
| <b>6. SONUÇ.....</b>                                                           | <b>109</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                          | <b>111</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                           | <b>115</b> |

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.1 : Enerji depolama yöntemleri ve kullanılan teknolojiler .....                          | 36  |
| Çizelge 4.2 : Enerji depolama teknolojilerinin kıyaslanması .....                                  | 37  |
| Çizelge 4.3 : VRB redoks tepkimeleri .....                                                         | 45  |
| Çizelge 5.1 : Rüzgar çiftliği konfigürasyonları .....                                              | 50  |
| Çizelge 5.2 : Şebekeden bağımsız, akülü ve jeneratörsüz sistemler için karşılaştırma tablosu ..... | 101 |
| Çizelge 5.3 : Şebekeden bağımsız, akülü ve jeneratörlü sistemler için karşılaştırma tablosu .....  | 102 |
| Çizelge 5.4 : Şebekeden bağımsız, aküsüz sistemler için karşılaştırma tablosu .....                | 104 |
| Çizelge 5.5 : Şebeke bağlantılı, aküsüz sistemler için karşılaştırma tablosu.....                  | 105 |
| Çizelge 5.6 : Sistem maliyet karşılaştırma tablosu.....                                            | 108 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : Küresel rüzgar sistemleri.....                                                                       | 4  |
| Şekil 2.2 : Deniz ve kara meltemleri .....                                                                       | 5  |
| Şekil 2.3 : Vadi ve dağ meltemleri .....                                                                         | 5  |
| Şekil 2.4 : Düşey rüzgar hızı profili.....                                                                       | 6  |
| Şekil 2.5 : Hafif eğimli ve dik eğimli düz arazi üzerinde akış .....                                             | 7  |
| Şekil 2.6 : Doğal engelli arazi üzerinde akış .....                                                              | 7  |
| Şekil 2.7 : Yapay engelli arazi üzerinde akış.....                                                               | 7  |
| Şekil 2.8 : Yüzey şekilleri ve engellerin rüzgar profili ve türbin yerleşimine etkisi ...                        | 8  |
| Şekil 2.9 : Küresel rüzgar sistemleri.....                                                                       | 9  |
| Şekil 2.10 : Afganistan'da tahıl öğütme amaçlı kullanılan düşey eksenli bir rüzgar türbini .....                 | 10 |
| Şekil 2.11 : Poul La Cour'un ilk elektrik üreten rüzgar türbini .....                                            | 11 |
| Şekil 2.12 : Dünyadaki toplam kurulu rüzgar gücü.....                                                            | 13 |
| Şekil 2.13 : Türkiye'de rüzgar enerjisi kurulu gücü.....                                                         | 14 |
| Şekil 2.14 : Su pompalamak için kullanılan el yapımı Savonius rüzgar türbini .....                               | 16 |
| Şekil 2.15 : 4 MW anma gücünde bir Darrieus rüzgar türbini .....                                                 | 17 |
| Şekil 2.16 : Üç kanatlı, yatay eksenli rüzgar türbini.....                                                       | 18 |
| Şekil 2.17 : Yatay eksenli rüzgar türbininin bileşenleri .....                                                   | 20 |
| Şekil 2.18 : Rüzgar türbini güç eğrisi .....                                                                     | 22 |
| Şekil 2.19 : Rotor diskinden geçen havanın akış tüpü şeması.....                                                 | 23 |
| Şekil 2.20 : Akış tüpü boyunca basınç ve hız değişimi .....                                                      | 24 |
| Şekil 2.21: Güç ve thrust katsayılarının akış indüklemeye faktörüne bağlı olarak değişimi .....                  | 27 |
| Şekil 2.22 : Rotor diskinden geçen hava partikülünün izlediği yol .....                                          | 27 |
| Şekil 4.1 : Güç ve enerji uygulamalarında depolama teknolojileri .....                                           | 37 |
| Şekil 4.2 : Volan iç ve dış yapısı .....                                                                         | 39 |
| Şekil 4.3 : Pompajlı HES ile enerji depolama .....                                                               | 41 |
| Şekil 4.4 : Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama .....                                                         | 42 |
| Şekil 4.5 : Vanadyum redoks akışkan akü.....                                                                     | 44 |
| Şekil 4.6 : VRB akış şeması. ....                                                                                | 44 |
| Şekil 5.1 : Rüzgar ölçümü yapılan bölgenin dijital haritası.....                                                 | 48 |
| Şekil 5.2 : Sektörlere göre rüzgar esiş sıklığı .....                                                            | 49 |
| Şekil 5.3 : Rüzgar hızı-frekan dağılım grafiği .....                                                             | 49 |
| Şekil 5.4 : Mikro-konuşlandırma .....                                                                            | 51 |
| Şekil 5.5 : Sistem 1'de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen yıllık grafik (üstte) ve 1 aylık grafik (altta)..... | 53 |
| Şekil 5.6 : Sistem 1'de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik. ....                                         | 54 |
| Şekil 5.7 : Sistem 1'de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik ..                             | 54 |
| Şekil 5.8 : Sistem 1'de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                        | 55 |
| Şekil 5.9 : Sistem 1'de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                        | 55 |
| Şekil 5.10 : Sistem 2'de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                                        | 56 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.11 : Sistem 2’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 57 |
| Şekil 5.12 : Sistem 2’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....  | 57 |
| Şekil 5.13 : Sistem 2’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 58 |
| Şekil 5.14 : Sistem 2’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 58 |
| Şekil 5.15 : Sistem 3’te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik. ....                 | 59 |
| Şekil 5.16 : Sistem 3’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik. ....                 | 60 |
| Şekil 5.17 : Sistem 3’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik. ....  | 60 |
| Şekil 5.18 : Sistem 3’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik. ....                | 61 |
| Şekil 5.19 : Sistem 3’te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 61 |
| Şekil 5.20 : Sistem 4’te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik. ....                 | 62 |
| Şekil 5.21 : Sistem 4’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik. ....                 | 63 |
| Şekil 5.22 : Sistem 4’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik. ....  | 63 |
| Şekil 5.23 : Sistem 4’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 64 |
| Şekil 5.24 : Sistem 4’te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik. ....                | 64 |
| Şekil 5.25 : Sistem 5’te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 66 |
| Şekil 5.26 : Sistem 5’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 66 |
| Şekil 5.27 : Sistem 5’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik. ....  | 67 |
| Şekil 5.28 : Sistem 5’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 67 |
| Şekil 5.29 : Sistem 5’te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik. ....                | 68 |
| Şekil 5.30 : Sistem 6’da 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 69 |
| Şekil 5.31 : Sistem 6’da 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 69 |
| Şekil 5.32 : Sistem 6’da 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....  | 70 |
| Şekil 5.33 : Sistem 6’da 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 70 |
| Şekil 5.34 : Sistem 6’da 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 71 |
| Şekil 5.35 : Sistem 7’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 72 |
| Şekil 5.36 : Sistem 7’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 72 |
| Şekil 5.37 : Sistem 7’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....  | 73 |
| Şekil 5.38 : Sistem 7’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 73 |
| Şekil 5.39 : Sistem 7’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 74 |
| Şekil 5.40 : Sistem 8’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 75 |
| Şekil 5.41 : Sistem 8’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik. ....                 | 75 |
| Şekil 5.42 : Sistem 8’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....  | 76 |
| Şekil 5.43 : Sistem 8’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 76 |
| Şekil 5.44 : Sistem 8’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 77 |
| Şekil 5.45 : 1,8 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen toplam enerji .....           | 78 |
| Şekil 5.46 : 6 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen toplam enerji .....             | 78 |
| Şekil 5.47 : 1,8 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen enerji .....                  | 79 |
| Şekil 5.48 : 6 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen enerji. ....                    | 79 |
| Şekil 5.49 : Sistem 9’da 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 81 |
| Şekil 5.50 : Sistem 9’da 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                 | 81 |
| Şekil 5.51 : Sistem 9’da 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....  | 82 |
| Şekil 5.52 : Sistem 9’da 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 82 |
| Şekil 5.53 : Sistem 9’da 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik. ....                | 83 |
| Şekil 5.54 : Sistem 10’da 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 84 |
| Şekil 5.55 : Sistem 10’da 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 84 |
| Şekil 5.56 : Sistem 10’da 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik ..... | 85 |
| Şekil 5.57 : Sistem 10’da 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....               | 85 |
| Şekil 5.58 : Sistem 10’da 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....               | 86 |
| Şekil 5.59 : Sistem 11’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                | 87 |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 5.60</b> : Sistem 11’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                                 | 88  |
| <b>Şekil 5.61</b> : Sistem 11’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                  | 88  |
| <b>Şekil 5.62</b> : Sistem 11’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 89  |
| <b>Şekil 5.63</b> : Sistem 11’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 89  |
| <b>Şekil 5.64</b> : Sistem 12’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                                 | 90  |
| <b>Şekil 5.65</b> : Sistem 12’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                                 | 91  |
| <b>Şekil 5.66</b> : Sistem 12’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                  | 91  |
| <b>Şekil 5.67</b> : Sistem 12’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 92  |
| <b>Şekil 5.68</b> : Sistem 12’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 92  |
| <b>Şekil 5.69</b> : Sistem 13’te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik. ....                                 | 94  |
| <b>Şekil 5.70</b> : Sistem 13’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                                 | 94  |
| <b>Şekil 5.71</b> : Sistem 13’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik                        | 95  |
| <b>Şekil 5.72</b> : Sistem 13’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 95  |
| <b>Şekil 5.73</b> : Sistem 13’te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 96  |
| <b>Şekil 5.74</b> : Sistem 14’te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                                 | 97  |
| <b>Şekil 5.75</b> : Sistem 14’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik .....                                 | 97  |
| <b>Şekil 5.76</b> : Sistem 14’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                  | 98  |
| <b>Şekil 5.77</b> : Sistem 14’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 98  |
| <b>Şekil 5.78</b> : Sistem 14’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik .....                                | 99  |
| <b>Şekil 5.79</b> : 1,8 MW kurulu güçte RT’de üretilen, şebekeden çekilen ve şebekeye verilen toplam enerji ..... | 100 |
| <b>Şekil 5.80</b> : 6 MW kurulu güçte RT’de üretilen, şebekeden çekilen ve şebekeye verilen toplam enerji .....   | 100 |



## KISALTMALAR

|                         |                                                      |
|-------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>AB</b>               | : Avrupa Birliği                                     |
| <b>AC</b>               | : Alternating Current                                |
| <b>AL-TES</b>           | : Aquiferous Low Temperature Thermal Energy Storage  |
| <b>CAES</b>             | : Compressed Air Energy Storage                      |
| <b>CES</b>              | : Cryogenic Energy Storage                           |
| <b>D</b>                | : Diameter                                           |
| <b>DC</b>               | : Direct Current                                     |
| <b>DUY</b>              | : Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği                |
| <b>EWEA</b>             | : European Wind Energy Association                   |
| <b>H<sup>+</sup></b>    | : Hidrojen İyonu                                     |
| <b>HES</b>              | : Hidroelektrik Enerji Santrali                      |
| <b>HT-TES</b>           | : High Temperature Thermal Energy Storage            |
| <b>ISEP</b>             | : Iowa Stored Energy Park                            |
| <b>Li-Ion</b>           | : Lithium Ion                                        |
| <b>MYTM</b>             | : Milli Yük Tevzi Merkezi                            |
| <b>NaS</b>              | : Sodium Sulphur                                     |
| <b>NiCd</b>             | : Nickel Cadmium                                     |
| <b>OWC</b>              | : Observed Wind Climate                              |
| <b>PC</b>               | : Personal Computer                                  |
| <b>PSB</b>              | : Polysulphide Bromide                               |
| <b>PHS</b>              | : Pumped Hydroelectric Storage                       |
| <b>PMUM</b>             | : Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi                     |
| <b>REPA</b>             | : Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası                  |
| <b>RES</b>              | : Rüzgar Enerji Santrali                             |
| <b>RETS</b>             | : Rüzgar Enerjisi Tahmin Sistemi                     |
| <b>RISO</b>             | : National Laboratory for Sustainable Energy         |
| <b>RT</b>               | : Rüzgar Türbini                                     |
| <b>SMES</b>             | : Superconducting Magnetic Energy Storage            |
| <b>SMF</b>              | : Sistem Marjinal Fiyatı                             |
| <b>TEİAŞ</b>            | : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi             |
| <b>TETAŞ</b>            | : Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi |
| <b>UNSW</b>             | : University of South Wales                          |
| <b>V</b>                | : Volt                                               |
| <b>V<sup>+</sup></b>    | : Vanadyum İyonu                                     |
| <b>V90</b>              | : 90 m rotor çaplı Vestas türbini                    |
| <b>V112</b>             | : 112 m rotor çaplı Vestas türbini                   |
| <b>VR</b>               | : Vanadyum Redoks                                    |
| <b>VRB</b>              | : Vanadyum Redoks Batarya                            |
| <b>WAsP<sup>®</sup></b> | : Wind Atlas Analysis and Application Program        |
| <b>WWEA</b>             | : World Wind Energy Association                      |
| <b>YAL-YAT</b>          | : Yük Alma-Yük Atma                                  |
| <b>ZEBRA</b>            | : Sodium Nickel Chloride Batteries                   |
| <b>ZnBr</b>             | : Zinc Bromine                                       |



## SEMBOLLER

|                 |                                                         |
|-----------------|---------------------------------------------------------|
| $A$             | : Rotor süpürme alanı                                   |
| $a$             | : Pürüzlülük katsayısı                                  |
| $c$             | : Ölçek parametresi                                     |
| $C_p$           | : Güç katsayısı                                         |
| $C_{p_{max}}$   | : Maksimum güç katsayısı                                |
| $C_T$           | : İtme katsayısı                                        |
| $d$             | : Disk bölgesi                                          |
| $E$             | : Enerji                                                |
| $E_{year}$      | : Yıllık enerji üretimi                                 |
| $f$             | : Frekans dağılım fonksiyonu                            |
| $g$             | : Yerçekimi sabiti                                      |
| $h$             | : Deniz seviyesinden yükseklik                          |
| $h_{\infty}$    | : Uzak rüzgar üstü bölgede deniz seviyesinden yükseklik |
| $h_w$           | : İz bölgesinde deniz seviyesinden yükseklik            |
| $h_d$           | : Disk bölgesinde deniz seviyesinden yükseklik          |
| $k$             | : Şekil parametresi                                     |
| $N$             | : Yıllık saat sayısı                                    |
| $P$             | : Güç                                                   |
| $P_o$           | : Serbest akış basıncı                                  |
| $P_{\infty}$    | : Uzak rüzgar üstü bölgede akış basıncı                 |
| $P_w$           | : İz bölgesinde akış basıncı                            |
| $P_d^+$         | : Rotor etkisinden sonra akış basıncı                   |
| $P_d^-$         | : Rotor etkisinden önce akış basıncı                    |
| $r$             | : Referans değer                                        |
| $v$             | : Rüzgar hızı                                           |
| $v_r$           | : Referans noktasındaki rüzgar hızı                     |
| $v_{cut-in}$    | : Devreye alma hızı                                     |
| $v_{cut-off}$   | : Devreden çıkma hızı                                   |
| $w$             | : İz bölgesi                                            |
| $z$             | : Yer seviyesinden yükseklik                            |
| $z_r$           | : Referans yükseklik                                    |
| $\alpha$        | : Eksenel akış indüklemeye faktörü                      |
| $\rho$          | : Akışkanın yoğunluğu                                   |
| $\rho_d$        | : Disk bölgesinde akışkanın yoğunluğu                   |
| $\rho_w$        | : İz bölgesinde akışkanın yoğunluğu                     |
| $\rho_{\infty}$ | : Uzak rüzgar üstü bölgede akışkanın yoğunluğu          |
| $\infty$        | : Uzak rüzgar üstü bölgesi                              |



# **VANADYUM REDOKS AKIŞKAN AKÜ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ BİR RÜZGAR TARLASI İÇİN ENERJİ ÜRETİM VE DEPOLAMA ANALİZİ**

## **ÖZET**

Rüzgar hızındaki anlık, kısa ve uzun periyotlu değişimler, rüzgar enerji sistemlerinin güç ve gerilim çıktılarında önemli dalgalanmalara sebep olur. Bu dalgalanmalar, yerel şebeke ile uyumlu gerilim ve frekansta güç kalitesinin, enerji planlanmasında arz - talep güç dengesinin ve güç akış kontrolünün sağlanması bakımından zorluklar yaratır.

Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği'ne göre, rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri gün öncesinde saatlik üretim tahmini yapmak ve dengesizliğe düşmemek üzere tahminlerinde isabetli olmak durumundadırlar. Rüzgar enerji santrallerinde elektrik üretimi, konvansiyonel santral üretimleri gibi programlanabilen bir yapıya sahip olmadığından, bu üreticilerin gün öncesi üretim tahminlerinde sıkça dengesizliğe düşülmektedir. Eksik ya da fazla tahminlerin yol açtığı dengesizlik, üreticiye ek maliyet getirebilmektedir.

Güç üretim sistemlerinde rüzgar enerjisi kullanımının, sistem ve piyasa işletiminde verimlilik ve güvenilirlik üzerinde yarattığı bu sorunların çözümüne ihtiyaç vardır.

Enerji depolama sistemleri rüzgar enerji santralleriyle birlikte kullanıldığında şebekeye sürekli, sabit ve kararlı güç üretimi sağlanacak ve rüzgardan elde edilen elektrik enerjisinin talep enerjiden yüksek olduğu dönemlerde fazla enerji depolanarak, talep gücün arttığı dönemlerde kullanılabilir. Piyasa koşullarında maliyetlerin uygun olması durumunda, yüksek kapasiteli bölgesel depolama sistemlerinin kullanımının piyasa işletimine önemli katkı yapabileceği düşünülmektedir.

Elektrik enerjisi, kullanılacağı uygulamaya (güç veya enerji uygulamaları) bağlı olarak elektriksel, kimyasal, mekanik ve ısı yollarla depolanabilmektedir. Bu çalışmada, rüzgar enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin depolanmasında; büyük miktarda enerjiyi uzun süre depolayabilmeleri, kendiliğinden deşarj sürelerinin uzun olması ve ihtiyaca hızlı yanıt verebilme özelliklerinden dolayı, kimyasal yolla enerji depolama yöntemlerinden biri olan vanadyum redoks akışkan aküler (VRB) ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında, tasarlanan bir rüzgar tarlasının vanadyum redoks akışkan akü enerji depolama sistemleriyle desteklenmesi durumu için enerji analizleri yapılmıştır. Bu analizler için seçilen bir bölgede yapılan ölçümlerden edinilen iki yıllık rüzgar verisi ve bölgenin topografik haritası, bir rüzgar atlası analiz ve uygulama programı olan WASP®'ta işlenerek farklı rüzgar çiftliği konfigürasyonları denenmiş ve en yüksek enerji üretim tahmini sonucunu veren konfigürasyon, VRB enerji depolama sistemi uygulamasında kullanılmak üzere seçilmiştir.

Enerji analizi için tasarlanan rüzgar tarlasında, biri 1,8 MW diğeri 3 MW olmak üzere iki adet türbin kullanılmıştır. Her iki model türbinin rüzgar tarlasında birer ve

ikişer adet kullanılmasıyla ve iki türbinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan VRB enerji depolamalı ve enerji depolamasız, jeneratörlü ve jeneratörsüz, şebekeden bağımsız sistemler için enerji üretim - depolama hesapları ve analizleri yapılmıştır. Bu analizler için 14 farklı sistem oluşturulmuş ve Matlab® ortamında yazılan programlarla elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Analiz sonuçları, VRB'lerin rüzgar enerji sistemlerinde enerji depolama sistemi olarak kullanılmasının, düşük çevrim verimleri nedeniyle henüz uygulanabilir olmadığını göstermiştir. Çevrim verimlerinin artması ve/veya akü maliyetlerinin piyasa koşullarında tercih edilecek şekilde düşmesi durumunda VRB'ler, sağladıkları avantajlar sayesinde şebekeden bağımsız rüzgar sistemleri için uygulanabilir duruma gelecek ve yaygınlaşacaktır.

# **ENERGY PRODUCTION AND STORAGE ANALYSIS FOR A WIND FARM SUPPORTED WITH A VANADIUM REDOX FLOW BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM**

## **SUMMARY**

Electrical power systems must provide consumer's power demand securing grid frequency and grid voltage. However, since wind is an intermittent resource of power, short term and long term changes in the wind speed cause variations in the power and voltage outputs of wind energy conversion systems. These variations lead to difficulties in providing power quality that has consistent frequency and voltage with the local grid and providing power balance between demand and generation for energy planning.

Imbalance between power demand and generation at a node in the system lead to changes in grid frequency that can affect the frequency at other points of the grid. Frequency control systems are needed to detect these changes and to bring grid frequency to its nominal value (50 Hz for Europe and Turkey). When grid frequency is below its nominal value, power generation must be increased and when it is above the nominal value, power generation must be limited. Also, variations in the power generated by wind energy conversion systems can cause reactive power generation creating phase difference between alternating current and voltage and accordingly power loss in the system. Power quality can decrease due to flicker (changes in the voltage amplitude) and harmonic (distortions in the sinusoidal structures of current and voltage) effects.

Moreover, due to the liberalization of the electricity system, the market itself is responsible for matching supply and demand. The electricity supply has to be controlled to be very close to demand. According to the Balancing and Reconciliation Regulation of Turkey, wind producers have to predict their hourly energy productions for the next day and they must be accurate in their predictions to provide the balance. Since power generation in wind farms is not programmable as in conventional power plants, low or high predictions cause imbalance very often and the wind producers have to meet the imbalance costs.

The use of wind power in electrical power systems reduces the efficiency and reliability of the system and market operations. Hence, these problems need to be solved.

Energy storage is one of the technologies that can support wind energy integration. If energy storage systems are used together with the wind energy conversion systems, power can be provided steadily to the grid or to the load. Also, energy can be stored when the electrical energy, which is converted from the wind power, is higher than the energy demand and can be used when the energy demand increases. Likewise, it can be stored when electricity is cheaper and can be used when electricity is more expensive. In case the costs are acceptable in the market conditions, high capacity storage systems can contribute the market operation.

Electrical energy can be stored using electrical, chemical, mechanical and thermal methods considering the application that the system will be used for. For power applications, technologies which can supply high power in a short time and for energy applications, technologies which can supply high amount of energy for hours or days of discharge period are used. To store electricity generated by wind energy conversion systems, technologies which are suitable for both applications are preferred. In this thesis, vanadium redox flow batteries (one of the chemical methods of energy storage) were discussed to store electrical energy produced by wind farms, because of their capacity to store high amounts of energy during long time periods, low self-discharge and fast response characteristics.

In this thesis, a wind farm was designed using the Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP<sup>®</sup>) and energy analysis of this wind farm was achieved in case of the support with a vanadium redox flow battery energy storage system. For this analysis, wind speed and direction data collected from a measurement mast at a site and digitalized topographical map of the region were processed in WAsP<sup>®</sup> and three different wind farm configurations were tested using different wind turbine power curves. The wind farm configuration that gives the highest energy production estimation was chosen for the application of VRB energy storage system.

For the analysis, 14 different systems were presented in 5 groups, energy production and storage calculations of these systems were done and graphed by written programs in Matlab<sup>®</sup> environment and results of the analyses were compared with each other. Systems in the first group (system 1-4) are standalone systems with VRB; systems in the second group (system 5-8) are standalone systems with VRB and generator; in the third group (system 9-10), there are standalone systems without VRB and generator; in the fourth group (system 11-12), there are standalone systems without VRB and with generator and in the last group (system 13-14), there are systems connected to the grid without VRB and generator. Systems in the same group differ from each other in terms of the capacities of the batteries and the energy consumptions.

In the 4.8 MW wind farm that was designed for energy analysis, two wind turbines with 1.8 MW and 3 MW rated powers were used. Calculations for each system were done using both of the turbines ( for 4.8 MW wind farm), using only one model of the wind turbines (for 1.8 MW and 3MW wind farms) and two of each model of the turbines (for 3.6 MW and 6 MW wind farms). For standalone systems; net energies (difference between the amount of energy produced and the energy consumed), time periods where the net energy is not enough to meet the demand, where the battery is full and where the generator is working were calculated and compared to each other. Also, for the system connected to the grid, total energy taken from and given to the grid and total time periods where the energy was taken from and given to the grid were calculated for comparison with standalone systems. In these calculations, charge and discharge efficiencies were taken into consideration and the round-trip efficiency of the VRB system was taken as 72%.

Results of the analyses can be summarized as the following:

The most significant effects on the time periods where the battery is full and the energy produced cannot be stored any more are mostly caused from the installed capacity of the wind farm and the energy consumption. The influence of the battery capacity is less, but the ideal battery capacity must be determined considering the

power generation and consumption when designing the system. Battery capacity more than needed will cause extra costs for the producer.

Power can be supplied continuously using a generator in standalone systems with battery. However, the length of time where the battery is full will significantly increase and the need of fuel for the generator must be provided during the working hours of the generator in this situation. Adding extra capacity to the batteries does not have a significant effect on the time periods where the generator is working and where the battery is full. If the generator is needed in the system to meet power demand continuously, the cost of the generator and the fuel must be considered.

Using battery in standalone systems did not lead to a significant decrease in the time period where the energy demand could not be provided, because low round-trip efficiencies of vanadium redox flow batteries cause an important amount of energy loss. If a proper generator is used instead of VRB in standalone systems, the length of time without energy will decrease or energy will be supplied continuously.

The use of VRB in standalone systems has an important role on decreasing the length of time where there is energy loss due to production above demand or battery capacity. This effect is clearer in systems where the power demand and production is higher.

The best solution to use the energy produced by autoproducers in wind energy systems having rated power below 500 kW in an optimum way is the integration of wind energy systems to the grid allowing two-way energy flow. Thus, the energy produced above demand will not be lost, demand will be provided without interruption and autoproducers will profit from the energy that is produced above the need. As the barriers on the optimization of grid integration and energy planning in the market are not overcome, the idea of using energy storage systems in wind farms and studies in this direction will continue.

In conclusion, results of the analysis proved that the vanadium redox flow battery use in wind energy systems is not feasible yet due to their low round-trip efficiencies. In case of a proper increase in the round-trip efficiencies and/or decrease in the battery costs, VRBs can become very advantageous and feasible to store energy produced by wind farms.



## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacının artması, bu ihtiyacın büyük çoğunluğunu karşılayan fosil kaynakların giderek azalmasına ve fiyatlarında artışa sebep olmaktadır. Bunun yanında, çevre kirliliği ve iklim değişikliğine karşı oluşan bilinçle, fosil yakıt kullanımının azaltılması yönünde ulusal ve uluslararası politikalar uygulanmaya başlanmıştır. Bu durum, karbon emisyonlarına sebep olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilgiyi giderek arttırmıştır. Yenilenebilir enerji sistemleri arasında önemli bir yeri olan rüzgar enerji sistemleri, 1980'lerden bu yana elektrik üretiminde birim güç ve toplam kapasite bakımından önemli ölçüde gelişme göstermiştir (Stiebler, 2008).

Elektrik güç sistemlerinin; ani aktif ve reaktif yük taleplerine cevap verecek, elektrik enerjisini en düşük maliyetle sağlayacak, ekolojik dengeye en az zararı verecek ve sabit gerilim ve frekans ile güvenilir güç kaynağı sağlayacak şekilde tasarlanması gerekir. Fakat, rüzgar hızındaki anlık, kısa ve uzun periyotlu değişimler, rüzgar enerji sistemlerinin güç ve gerilim çıktılarında önemli dalgalanmalara sebep olur (Werven ve diğ., 2005). Bu dalgalanmalar, yerel şebeke ile uyumlu gerilim ve frekansta güç kalitesinin, enerji planlanmasında arz - talep güç dengesinin ve güç akış kontrolünün sağlanması bakımından zorluklar yaratır. Ayrıca, rüzgar enerji santrallerinde elektrik üretimi, konvansiyonel santral üretimleri gibi programlanabilen bir yapıya sahip olmadığından, gün öncesinde yapılan eksik ya da fazla tahminler elektrik piyasasında dengesizliğe yol açarak üreticiye ek maliyet getirebilmektedir (Deloitte Türkiye, 2011). Güç üretim sistemlerinde rüzgar enerjisi kullanımının, sistem ve piyasa işletiminde verimlilik ve güvenilirlik üzerinde yarattığı bu sorunların hem üretici hem de tüketici açısından çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır (Bahadır ve Ersoy, 2010).

Enerji depolama sistemleri rüzgar enerji santralleriyle birlikte kullanıldığında şebekeye sürekli, sabit ve kararlı güç üretimi sağlanacak ve rüzgar santrallerinde elde edilen elektrik enerjisinin talep enerjiden yüksek olduğu dönemlerde meydana gelen üretim fazlası enerji depolanarak, talep gücün arttığı dönemlerde kullanılabilir.

(Url-1). Piyasa koşullarında maliyetlerinin uygun olması durumunda, yüksek kapasiteli depolama sistemlerinin RES'ler ile birlikte kullanımının piyasa işletimine önemli katkı yapabileceği düşünülmektedir. (Bahadır ve Ersoy, 2010).

Enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanımına yönelik çalışmalar, son yıllarda hız kazanmıştır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin şebeke üzerinde yarattığı etkiler ve bu etkilerin azaltılmasında enerji depolama sistemlerinin rolü Denholm ve diğ. (2010) tarafından incelenmiştir. Swierczynski ve diğ. (2010) enerji depolama sistemlerinin rüzgar enerji sistemlerinde kullanımlarını değerlendirmiştir. Bu tez çalışmasında ise, rüzgar enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin depolanmasında; büyük miktarda enerjiyi uzun süre depolayabilen, kendiliğinden deşarj süreleri uzun olan ve ihtiyaca hızlı yanıt verebilme özelliklerine sahip olan vanadyum redoks akışkan aküler (VRB) ele alınmıştır. VRB'lerin yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte ele alındığı, literatürde yer alan diğer çalışmalar; şebekeden bağımsız güneş enerji sistemlerinde VRB kullanımının incelendiği Joerissen ve diğ. (2004) ve şebekeden bağımsız rüzgar enerji sistemlerinde VRB kullanımının çıkış gerilimine etkisinin incelendiği Barote ve diğ. (2008)'e aittir.

Bu çalışmada; vanadyum redoks akışkan akü enerji depolama sistemine sahip bir rüzgar tarlasının enerji analizleri yapılmıştır. Bu analizler için seçilen bir bölgede yapılan ölçümlerden edinilen iki yıllık rüzgar verisi ve bölgenin topografik haritası, WAsP<sup>®</sup>'ta işlenerek farklı rüzgar çiftliği konfigürasyonları denenmiş ve en yüksek enerji üretim tahmini sonucunu veren konfigürasyon, VRB enerji depolama sistemi uygulamasında kullanılmak üzere seçilmiştir. Enerji analizi için tasarlanan rüzgar tarlasında, biri 1,8 MW diğeri 3 MW olmak üzere iki adet türbin kullanılmıştır. Her iki model türbinin rüzgar tarlasında birer ve ikişer adet kullanılmasıyla ve iki türbinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan VRB enerji depolamalı ve enerji depolamasız, jeneratörlü ve jeneratörsüz, şebekeden bağımsız sistemler için enerji üretim - depolama hesapları ve analizleri yapılmıştır. Bu analizler için 14 farklı sistem oluşturulmuş ve Matlab<sup>®</sup> programı kullanılarak elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

## **2. RÜZGAR ENERJİSİ**

### **2.1 Rüzgar Karakteristikleri**

#### **2.1.1 Rüzgarın oluşumu**

Rüzgar enerjisinin asıl kaynağı Güneş'tir. Güneş'ten gelen enerji; Dünya'nın hareketi, şekli, eksen eğikliği ve yer yüzeyinin homojen olmayan yapısından dolayı dünyanın farklı bölgelerinde farklı miktarlarda soğurur. Sıcaklık farklarından kaynaklanan atmosferdeki basınç farkları; yüzey şekillerinin, kara ve denizlerin coğrafi dağılımına, günün ve yılın zamanına bağlı değişen, karmaşık yapıdaki hava akımlarına sebep olur. Güneş'ten yeryüzüne ulaşan enerjinin yaklaşık yüzde ikisi rüzgar enerjisine dönüşür (Hau, 2006; Flavin, 1981).

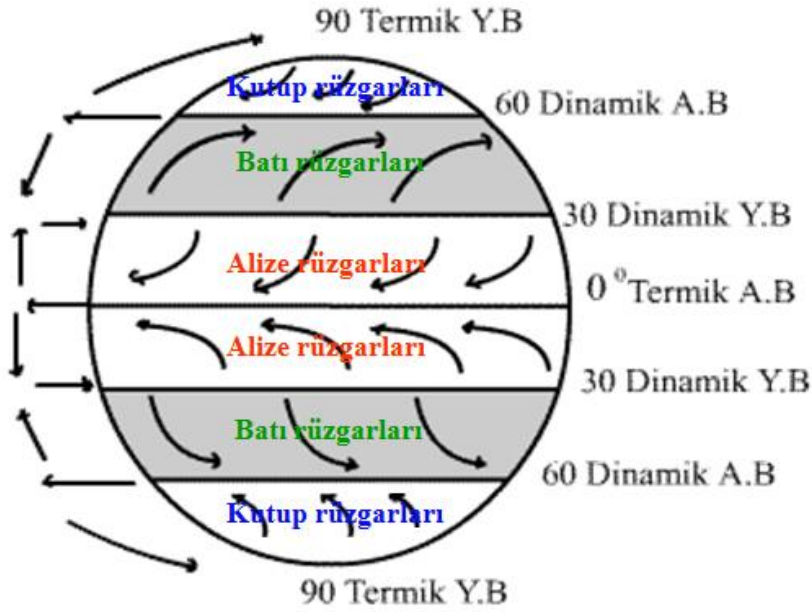
#### **2.1.2 Rüzgarın sınıflandırılması**

Rüzgarlar, etki alanlarına göre küresel ve yerel rüzgarlar olarak iki sınıfta incelenebilir.

##### **2.1.2.1 Küresel rüzgarlar**

Küresel ölçekteki basınç farklarından kaynaklanan basınç gradyan kuvvetleri ve Dünya'nın eksenini etrafında dönmesiyle meydana gelen Coriolis kuvvetlerinin etkisiyle oluşan rüzgarlardır. Güneş radyasyonunun yıl boyunca ekvator bölgesinde kutup bölgelerine oranla çok daha fazla soğrulmasıyla oluşan basınç farkları, küresel ölçekte güçlü hava sirkülasyonlarına sebep olur. Ekvator bölgesinde ısınarak yükselen hava, atmosferin üst katmanlarında kuzey ve güney kutuplarına yönelir. Her iki yarım kürenin 30° enlemlerinde, Coriolis kuvvetlerin etkisiyle daha fazla ilerleyemez ve bu enlemlerde alçalarak subtropikal dinamik yüksek basınç alanları oluşturur. 30° enlemlerde alçalıp sıkışan hava tekrar ayrılarak güney ve kuzeydeki alçak basınç alanlarına hareket ederek alizeleri (ticaret rüzgarları) ve batı rüzgarlarını oluşturur. Atmosferin alt tabakalarında kutuplardan ekvatora doğru ilerlemekte olan hava kütlesi (kutup rüzgarları) 60° enlemlerde, dinamik yüksek basınç bölgelerinden gelen batı rüzgarları ile karşılaşarak yükselir ve bu enlemlerde subpolar dinamik

alçak basınç bölgeleri oluşur (Şekil 2.1). Coriolis kuvvetler rüzgarın, kuzey yarım kürede sağa, güney yarım kürede sola sapmasına sebep olur (Hau, 2006; Url-1).



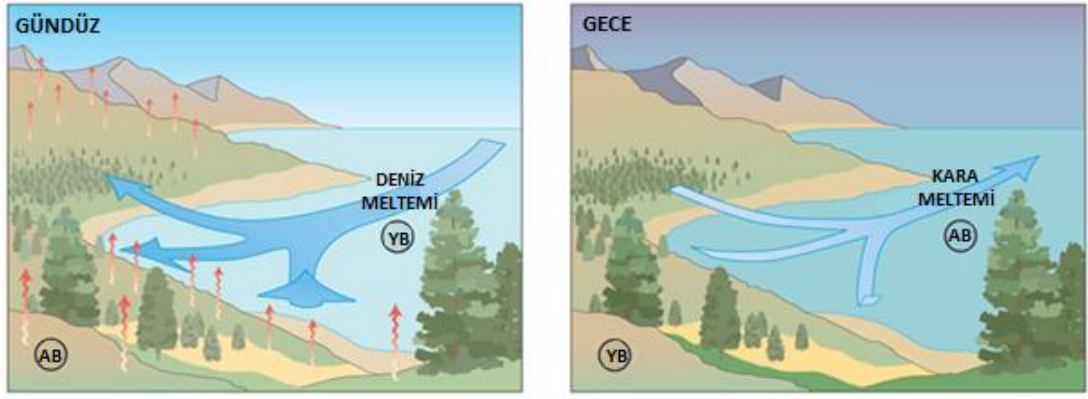
Şekil 2.1 : Küresel Rüzgar Sistemleri (Url-2 ).

#### 2.1.2.2 Yerel rüzgarlar

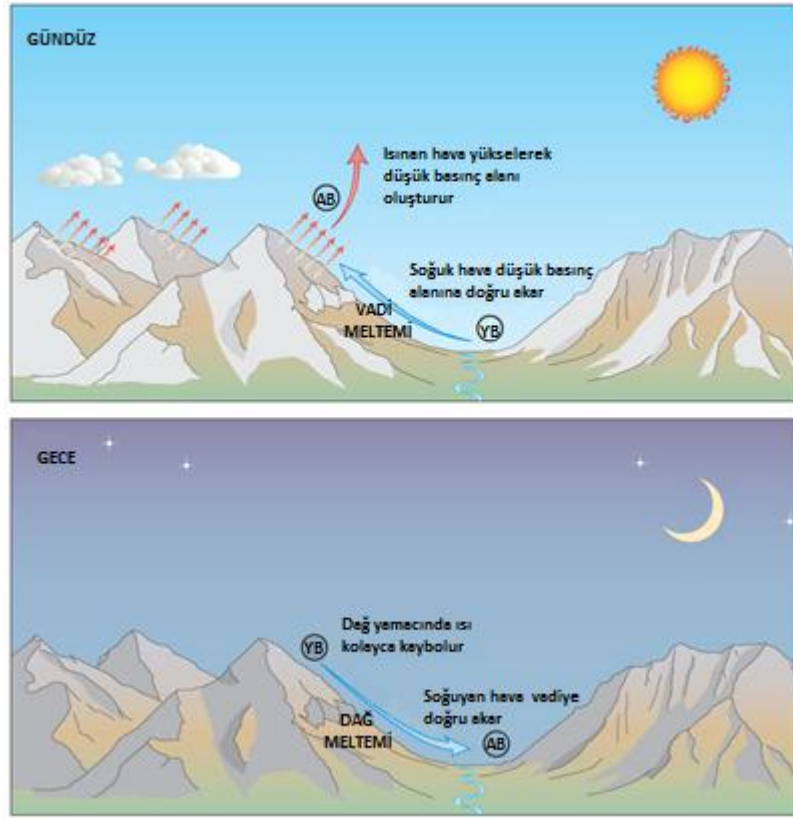
Bölgenin coğrafi özelliklerine bağlı oluşan, küresel rüzgarlara oranla daha dar bir alanda etkili olan ve kısa vadeli esen rüzgarlardır. Belli bir bölgedeki rüzgar potansiyelinin belirlenmesinde büyük öneme sahiptirler. Gece-gündüz değişimleri, kara ve deniz dağılımı, dağlar ve vadiler yerel rüzgarların oluşumunu belirleyen başlıca faktörlerdir.

Kıyı bölgelerinde kara ve denizin gün içinde farklı ısınmalarından kaynaklı hava sirkülasyonları meydana gelir. Gün boyunca kıyı bölgelerinin denize oranla daha fazla ısınmasıyla oluşan sıcaklık ve basınç farkı, denizden karaya doğru esen deniz meltemlerini oluşturur. Geceleri ise karalar daha hızlı ve daha fazla ısı kaybına uğrayarak yüksek basınç bölgeleri haline gelir ve karadan denize doğru esen kara meltemleri oluşur (Şekil 2.2).

Dağ ve vadiden oluşan sistemlerde gün boyunca güneşe bakan dağ yamaçlarında ısınan hava yamaç boyunca yükselerek daha ağır olan soğuk hava ile yer değiştirir, vadi meltemleri oluşur. Geceleri bu sirkülasyonun yönü tersine döner ve soğuk hava dağ yamaçlarından vadi tabanına doğru süzülerek dağ meltemlerini meydana getirir (Şekil 2.3), (Rohatgi, 1994).



Şekil 2.2 : Deniz ve kara meltemleri (Url-3).



Şekil 2.3 : Vadi ve dağ meltemleri (Url-3).

Dünyada gözlemlenen bazı yerel rüzgarlar şu şekilde sıralanabilir:

Fön: Nemli hava kütesinin dağ yamacı boyunca yükselirken soğuyarak yağış bırakması ve nemini kaybeden hava kütesinin dağın diğer yamacından aşağı inerken oluşturduğu kuru ve sıcak rüzgarlardır.

Bora: Adriyatik denizi ve Dalmaçya kıyılarında esen kuvvetli, kuru ve soğuk karakterli rüzgarlardır.

Mistral: Fransa'nın güney kıyılarında esen kuru ve soğuk karakterli rüzgarlardır.

Krivetz: Romanya’da esen soğuk karakterli rüzgarlardır.

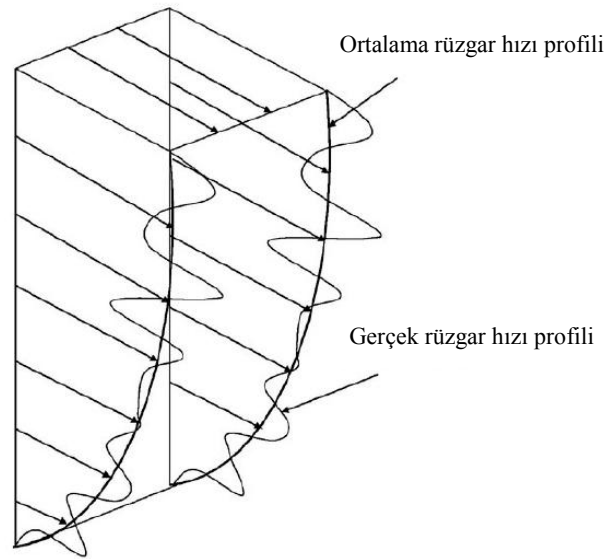
Samyeli: Ülkemizde ilkbahar aylarında güneyden esen sıcak ve kuru rüzgarlardır.

Poyraz: Karadeniz ve Marmara bölgelerinde kuzeydoğudan esen soğuk ve şiddetli rüzgardır (Menteş, 2011).

### 2.1.3 Yerin rüzgar enerjisi üzerinde etkisi

Meteorolojik etkilerin yanında; yer yüzeyinin pürüzlülük koşulları, orografik yapısı ve engeller de yatay ve düşey rüzgar akış profilleri üzerinde etkilidir.

Rüzgarın yer yüzeyiyle temas ettiği noktada rüzgar hızı sıfır kabul edilmiştir ve yükseklikle birlikte logaritmik bir artış gösterir (Şekil 2.4). Yer yüzeyi tamamen düz ve homojen yapıda olmadığından alçaklarda rüzgar akışı, pürüzlülük etkisiyle bozulmalara uğrar ve yükseklerle çıkıldıkça daha sürekli bir akış gözlenir. (Rohatgi, 1994).



Şekil 2.4 : Düşey rüzgar hızı profili (Ragheb, 2011).

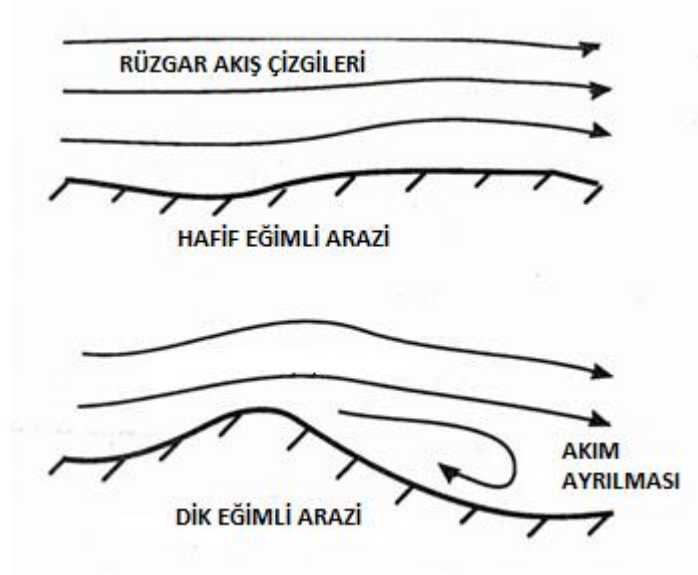
Farklı yüksekliklerdeki rüzgar hızları “Güç Kanunu” eşitliği ile hesaplanabilir:

$$v(z) = v_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^a \quad (2.1)$$

Burada  $z_r$  ölçüm yapılan referans yüksekliği,  $z$  hızın belirlenmek istendiği yüksekliği,  $v_r$  referans noktadaki rüzgar hızını,  $v(z)$  belirlenmek istenen rüzgar hızını temsil eder.  $a$  yüzey pürüzlülük özelliklerine bağlı bir değer alır. Pürüzlülük etkisi; bölgenin

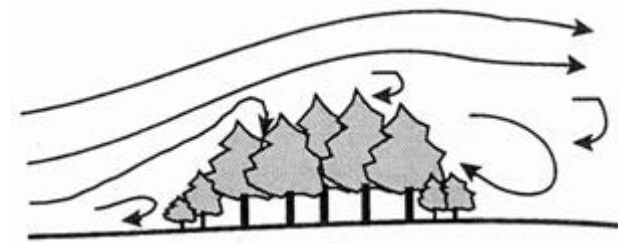
su yüzeyi, asfalt düz zemin, çalılık, ormanlık, seyrek ağaçlı, binalarla çevrili alan olması gibi özelliklerine göre değişkenlik gösterir (Ragheb, 2011).

Hafif eğimli düz bir arazi üzerinde rüzgar akışı araziye uyum gösterirken, daha dik eğimli arazi üzerinde akım ayrılması oluşur (Şekil 2.5).

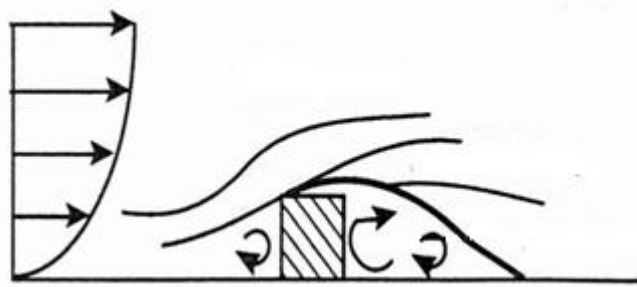


**Şekil 2.5 :** Hafif eğimli ve dik eğimli düz arazi üzerinde akış (Rohatgi, 1994).

Düz arazi üzerindeki akış; bitki ve ağaç kümeleri, kayalar gibi doğal ve binalar gibi insan yapımı engeller yoluyla bozulmaya uğrar (Şekil 2.6-2.7).



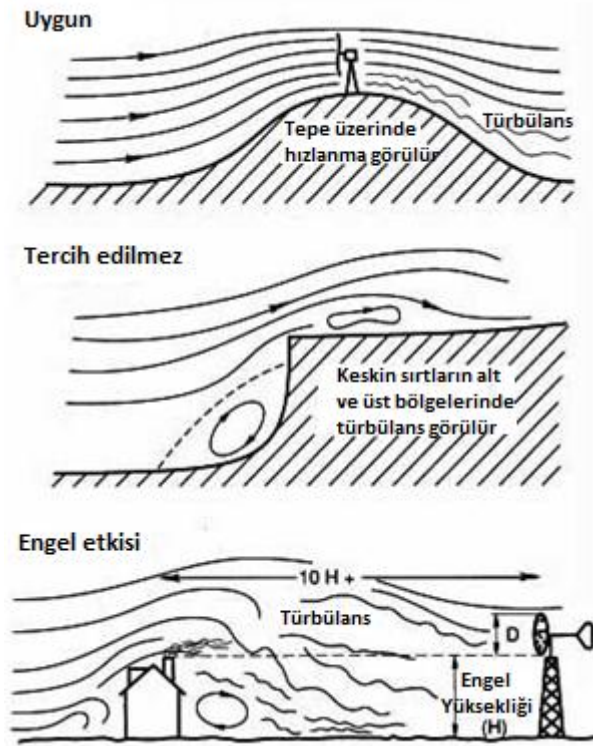
**Şekil 2.6 :** Doğal engelli arazi üzerinde akış (Rohatgi, 1994).



**Şekil 2.7 :** Yapay engelli arazi üzerinde akış (Rohatgi, 1994).

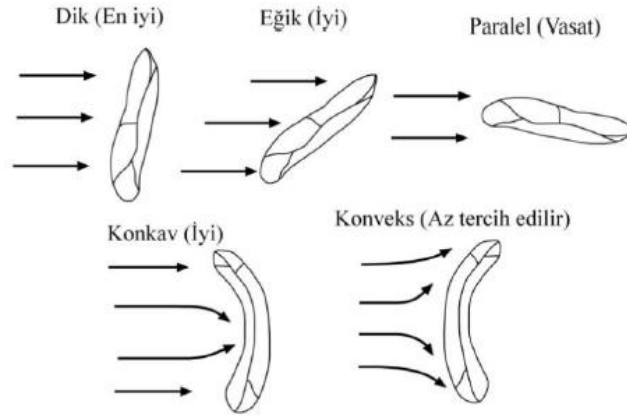
Rüzgar hızının yüksek olduğu ve akışın ayrılmaya uğramadan süreklilik gösterdiği alanlar, türbin yerleşimi açısından tercih edilir. Ayrık akış bölgeleri ise genelde rüzgar hızının düşük olduğu, türbülanslı bölgelerdir ve türbin yerleşimine uygun değildir (Rohatgi, 1994). Engellerin, rüzgar hızı ölçümü yapılan veya türbinin yerleştirildiği bölgedeki rüzgar hızı üzerinde yarattığı etkiye perdeleme etkisi adı verilir. Perdeleme etkisi; rüzgar ölçümü yapılan noktanın yüksekliğine, engelden olan uzaklığına, pürüzlülük uzunluğuna, engelin yüksekliğine, genişliğine ve geçirgenliğine bağlıdır. Geçirgenlik; rüzgarın engelin içinden geçebileceği açık yüzey alanının, engelin rüzgarı karşılayan toplam yüzey alanına oranıdır. Bir bina duvarının geçirgenliği sıfır iken ağaç gibi engellerde yaprakların sıklığına göre 0.3 – 0.5 arasında değişebilmektedir (Ragheb, 2011).

Dik eğimli olmayan düzgün tepeler üzerinden akan rüzgar, zirveden geçerken hızlanır. Bu yüzden tepelerin zirveleri enerji üretimi açısından oldukça uygundur. Keskin sırtlar, sarp kayalıklar veya büyük engeller söz konusu ise türbin perdeleme ve türbülans etkilenmeyecek ya da en az etkilenecek şekilde yerleştirilmelidir. Türbin ve engel arasındaki uzaklık en az engel yüksekliğinin 10 katı kadar olmalı ve yüksek kuleler kullanılmalıdır (Şekil 2.8), (Url-7).



**Şekil 2.8 :** Yüzey şekilleri ve engellerin rüzgar profili ve türbin yerleşimine etkisi (Url-7).

Sırt üzerindeki akışta, sırtın hakim rüzgar yönüne göre konumu, türbin yerleşimine karar verilmesi açısından önem taşır. Sırt eksenine dik yöndeki akış, rüzgar enerjisinden yararlanmada ideal koşulu oluşturur. Sırtın akışla belli bir açı yapacak şekilde uzanması veya rüzgarın bir merkeze yoğunlaşmasını sağlayan konkavlığı da tercih edilen durumlardır. Akışa paralel uzanan veya rüzgarı dağıtan konveks form rüzgar türbini yerleşiminde genellikle tercih edilmez (Şekil 2.9), (Rohatgi, 1994).



**Şekil 2.9 :** Hakim rüzgar yönüne göre sırtın konumu ve türbin yerleşimine uygunluğu (Rohatgi, 1994).

## 2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgar enerjisi, tarih boyunca, yelkenli gemilerde hareketi sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu sayede insanlar ve ticari mallar taşınmış, yeni kıtalar keşfedilmiştir (Johnson, 2001). Tahıl öğütme ve su pompalamada kullanılan rüzgar türbinlerinin tarihinin ise en az 3000 yıl önceye dayandığı düşünülmektedir. Bazı kaynaklarda MÖ 17. yüzyılda Babil kralı Hammurabi'nin yel değirmenlerini sulama amacıyla kullanmayı planladığı, ayrıca Mısır'da İskenderiye yakınlarında 3000 yıl öncesine ait yel değirmeni kalıntılarının bulunduğu ileri sürülmektedir (Johnson, 2001; Hau, 2006).

Rüzgar türbinlerinin kullanımına ilişkin ilk güvenilir bilgi, 644 yılına ait yazılı kaynaklardan elde edilmiştir. Bu kaynaklarda, Pers ve Afgan sınır bölgesi Seistan'da tahıl öğütme amacıyla kullanılan düşey eksenli yel değirmenlerinden söz edilir. Bu ilkel rüzgar türbinlerinin bazıları günümüze dek varlığını sürdürmüştür (Şekil 2.10). Daha sonra elde edilen bulgular, Çinlilerin de eş zamanlı olarak bambu çubukları ve kumaştan yapılmış düşey eksenli türbinleri, pirinç tarlalarını sulamada kullandıklarını göstermiştir (Hau, 2006; Flavin, 1981).



**Şekil 2.10 :** Afganistan'da tahıl öğütme amaçlı kullanılan düşey eksenli bir rüzgar türbini (Hau, 2006).

Avrupa’da rüzgar türbinlerinin ortaya çıkışına ilişkin kesin bir bilgi yoktur. Doğunun düşey eksenli rüzgar türbinlerinden bağımsız olarak Avrupa’da, geleneksel yatay eksenli rüzgar türbinlerinin icat edildiği düşünülmektedir (Hau, 2006). İngiltere’deki ilk rüzgar türbini 1191 yılında kayda geçmiştir. Mısır öğüten ilk rüzgar türbini ise 1439’da Hollanda’da üretilmiştir. 16. yüzyıl Hollanda’sında “Hollanda Yel değirmeni” (Dutch Windmill) adıyla bilinen, daha büyük ve daha güçlü rüzgar türbinleri ortaya çıkmıştır (Johnson, 2001; Hau, 2006).

Avrupa’da ortaya çıkan ilk rüzgar türbinleri tamamen tahtadan yapılmıştı. 1600’lere gelindiğinde ise taştan yapılmış sabit kulelere ve pervaneyi taşıyıp rüzgarın estiği yöne yönelmeyi sağlayan döner çatıya sahip rüzgar türbinleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Johnson, 2001; Hau, 2006).

Rüzgar türbinleri yapısal ve teknolojik gelişmeler göstererek Avrupa’da ve keşiflerle birlikte Amerika’da hızla yayılmış ve Hollanda başta olmak üzere kırsal ekonomilerin önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu gelişim, 19. yüzyıl başlarında fosil yakıtla çalışan buhar makinelerinin ortaya çıkışıyla sekteye uğramıştır (Johnson, 2001; Burton ve diğ., 2001).

Elektrik üreten ilk otomatik rüzgar türbini, 1887-88 kışında Amerikan elektrik endüstrisinin kurucularından Charles F. Brush tarafından inşa edilmiştir. 144 kanatlı ve 12 kW gücündeki bu dev türbin, yavaş dönmesi sebebiyle yüksek verime sahip değildi. Az kanatlı, yüksek hızlı ve daha yüksek verimli rüzgar türbinleri, Danimarkalı Profesör Poul La Cour tarafından geliştirilmiştir (Url-1). La Cour'un 1891'de inşa ettiği, bir dinamoyu çalıştırarak elektrik üreten deneysel rüzgar türbini, tarihi yel değirmenlerinden modern rüzgar türbinlerine geçişte bir dönüm noktası olmuştur (Şekil 2.11), (Hau, 2006).



**Şekil 2.11 :** Poul La Cour'un ilk elektrik üreten rüzgar türbini, 1891, Danimarka (Hau, 2006).

Rüzgar türbinlerine duyulan ilgi bu tarihten I. Dünya Savaşı'nın sonuna kadar sürmüştür. 1918 sonrasında düşüşe geçen dizel yakıt fiyatları, II. Dünya Savaşı başlangıcına kadar bu ilgiyi azaltmıştır (Hau, 2006). 20-35 kW güçteki ve 4 kanatlı La Cour türbinlerini, Lykkegaard Ltd. ve F. L. Smidth & Co şirketlerinin II. Dünya Savaşı döneminde ürettiği 30-60 kW'lık 2 ve 3 kanatlı türbinler izlemiştir (Manwell ve diğ., 2002). Dönemin en büyük rüzgar türbini ise 1941'de ABD'de geliştirilen 1250 kW Smith-Putnam rüzgar türbinidir (Burton ve diğ., 2001). 1950'lerde Poul La Cour'un öğrencisi mühendis Johannes Juul, bugünkü modern türbinlerde kullanılan sistemlerin öncülüğünü yapmıştır. 1956-57 yıllarında Juul'un geliştirdiği 200 kW gücündeki 3 kanatlı Gedser rüzgar türbini; elektromekanik yawing (yönelme) ve stall

(hız kesme) kontrol sistemine, asenkron jeneratöre ve aşırı hızlanma durumunda türbini koruyacak aerodinamik frenlere sahipti (Url-1). 1950’lerde rüzgar enerjisindeki gelişmelerin öncülerinden biri de Ulrich Hütter’di. Rüzgar türbini tasarımlarına uyguladığı modern aerodinamik ilkeler, halen kullanılmaktadır (Manwell ve diğ., 2002).

Bunu izleyen 20 yıl boyunca, fosil yakıt kullanımının rüzgardan üretilecek elektrığe oranla çok daha ekonomik olmasından dolayı, rüzgar enerjisi teknolojisi yeterli ilgiyi görmemiştir. 1973’te ham petrol fiyatlarındaki ani yükselişle, sanayileşmiş batılı ülkeler, petrol ihraç eden ülkelere olan bağımlılıklarının farkına varmışlardır. Enerji Krizi ile ortaya çıkan “enerji güvenliği” politikaları ve 1990’lı yıllarda artan çevre bilinci ile (ABD, Kanada, Danimarka, İsveç, Almanya başta olmak üzere) hükümetlerin rüzgar enerjisi teknolojisinin geliştirilmesine yönelik destek ve teşvikleri artmıştır. Rüzgar türbinleri gelişen ve çeşitlilik gösteren tasarımlarıyla giderek daha verimli ve daha fazla güç üretebilir duruma gelmiştir (Hau, 2006).

## **2.3 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu**

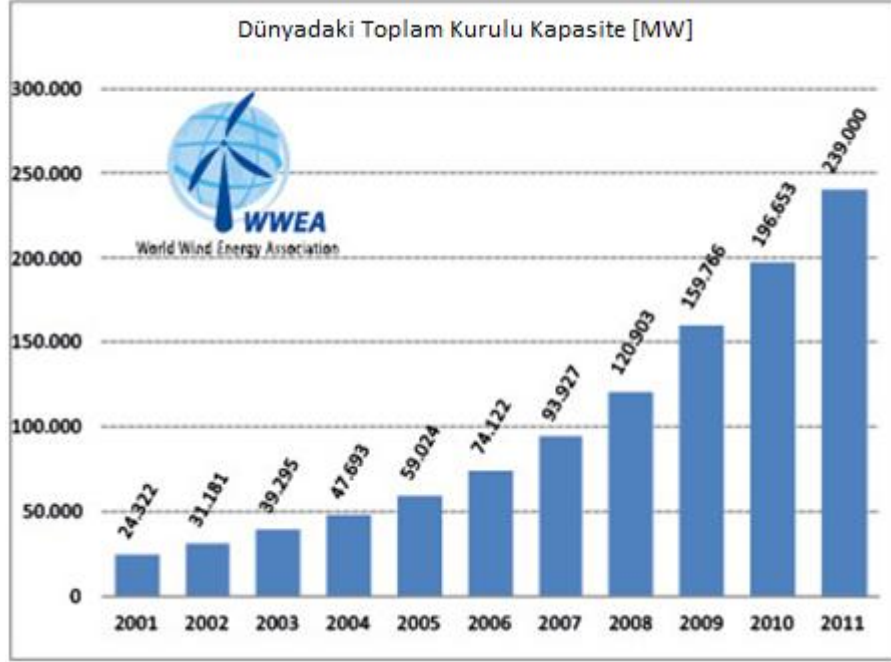
### **2.3.1 Dünyada rüzgar enerjisinin durumu**

Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği (Worl Wind Energy Association: WWEA) raporlarına göre, 2011 yılındaki 42 GW’lık rekor kapasite artışıyla, dünya çapında kurulu rüzgar gücü 239 Gigawatt’a ulaşmıştır. Bu kurulu güçten elde edilebilecek enerji, dünyadaki yıllık toplam elektrik tüketiminin %3’üne denktir. Elektrik üretiminde rüzgar enerjisini kullanan ülkelerin sayısı 86’dır (Url-8). Şekil 2.12’de 2011 yılına kadar dünyadaki toplam kurulu rüzgar gücü kapasitesinin değişimi görülmektedir.

2011 yıl sonu itibariyle Çin 62,7 GW toplam kurulu rüzgar gücü kapasitesiyle lider konumdadır. Çin’i 46,92 GW ile ABD, 29 GW ile Almanya, 21,67 GW ile İspanya ve 15,8 GW ile Hindistan takip etmektedir (Url-8). Asya ülkeleri, 2010 yılı kurulumlarında %54,6 ile en büyük paya sahipken, bunu %27 ile Avrupa ve %16,7’lik yeni kurulum ile Kuzey Amerika izlemektedir. Çin dışındaki ülkelere yeni kurulan kapasitelerdeki düşüşün nedeni olarak rüzgar enerjisi kullanımına yönelik politikaların yetersizliği gösterilebilir (WWEA, 2011).

Rüzgar Enerji Raporu’na göre, rüzgar enerji sektörünün 2009 yılında 50 milyar Euro olan iş hacmi, 2010’da 40 milyar Euro’ya düşmüştür. Bunun sebebi olarak, rüzgar

türbin fiyatlarındaki azalma ve sektörün Çin'e yönelmesi gösterilmektedir. 2010 yıl sonu itibariyle rüzgar enerjisi sektöründe işe alınan çalışan sayısı 670 000'e ulaşmıştır.



Şekil 2.12 : Dünyadaki toplam kurulu rüzgar gücü, 1996 - 2011 (Url-23).

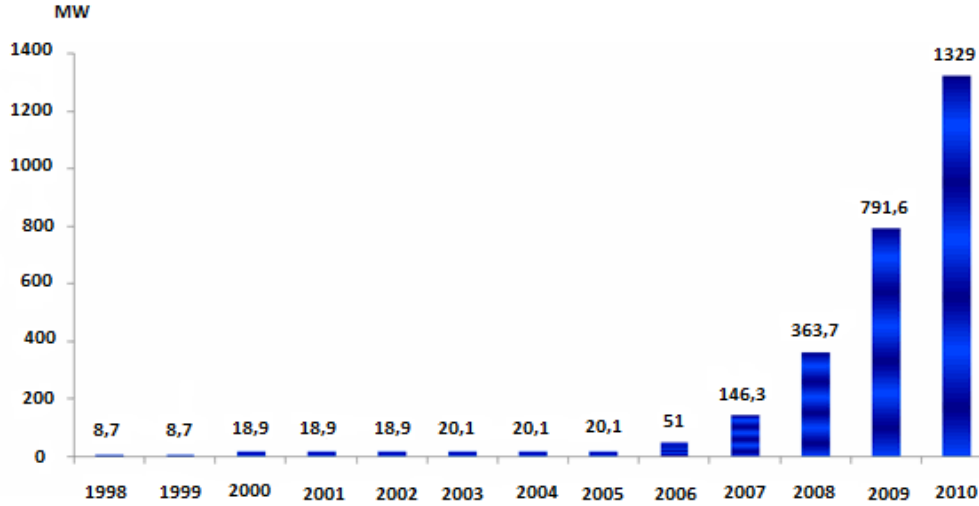
WWEA dünyadaki toplam kurulu rüzgar gücü kapasitesinin 2015 yılında 600 GW'a, 2020 yılında 1500 GW'a ulaşacağını öngörmektedir. Sektörün gelişmesi için aşılması gereken en büyük engeller; sürekli olmayan enerji üretiminin elektrik şebekesinde sebep olduğu düzensizlikler, ulusal ve uluslar arası politikalardaki boşluklar, gelişmekte olan ülkelerdeki finansal kaynaklarda ve piyasa güvenilirliğindeki yetersizliklerdir (WWEA, 2011).

### 2.3.2 Türkiye'de rüzgar enerjisinin durumu

Ulusal Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası'ndan (REPA) elde edilen bulgulara göre, Türkiye, 38 GW karada ve 10 GW denizde olmak üzere 48 GW'lık kurulu gücü destekleyebilecek rüzgar potansiyeline sahiptir. Bu değer, birçok Avrupa ülkesindeki rüzgar potansiyelinin üzerinde olmasına rağmen kurulu güç olarak bu ülkelerin çok gerisindedir (Url-9).

Türkiye'de ilk kurulan rüzgar enerji santrali 1998 yılında devreye girmiştir. Bu tarihten itibaren 2010 yılına kadar rüzgar enerjisi kurulu gücündeki değişim Şekil 2.13'te gösterilmiştir. 2010 yıl sonu itibariyle 1329 MW olan kurulu rüzgar gücünün toplam kurulu güç içindeki payı %27 ve toplam elektrik üretimindeki payı %0,8'dir

(Url-9). Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (European Wind Energy Association: EWEA) verilerine göre Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü kapasitesi, 2011 yıl sonu itibariyle 1799 MW'a yükselmiştir (EWEA, 2012).



**Şekil 2.13 :** Türkiye'de rüzgar enerjisi kurulu gücü (Url-9).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yayınladığı 2010-2014 Stratejik Plan'a göre 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi içindeki payının %30 düzeyine çıkarılması ve bu amaçla 2023'e kadar ülkedeki rüzgar kurulu gücünde 20 GW kapasiteye ulaşılması hedeflenmiştir (ETKB, 2010).

Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının konu edildiği ilk kanun 2001 yılında kabul edilen “Elektrik Piyasası Kanunu”dur. Bu kanun, sektörde yapılacak özelleştirmeye dönük düzenlemelerle, rekabet ortamında güçlü bir elektrik piyasası yaratmak amacıyla düzenlenmiştir (T.C Resmi Gazete S.24335, 2001). Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik bu kanunda 2010 yılında yayınlanan “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik” ile yapılan değişiklikle, kurulu gücü azami beş yüz kilovatlık üretim tesisi ile mikro kojenerasyon tesisi kuran gerçek ve tüzel kişiler, lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaf bırakılmıştır. Bu sayede Türkiye, WWEA'nın 2010 verilerine göre 100 – 500 kW'lık orta ölçekli türbin piyasasında önemli bir market durumuna geçmiştir (WWEA, 2011). Bu yönetmelik, kurulacak sistemde yerli üretim ekipman ve teçhizat kullanımını da teşvik etmektedir (T.C Resmi Gazete S.28001, 2011). 10.03.2012 tarihinde, bu yönetmeliğin uygulanmasına dair tebliğ yayınlanmıştır. Bu tebliğ, kurulu gücü azami beş yüz kilovatlık üretim tesisi kuran/kuracak gerçek ve tüzel kişilere uygulanacak usul ve esaslar ile bu kişilerin

dağıtım sistemine ihtiyaç fazlası enerji vermeleri ve/veya sistemden enerji çekmeleri halinde uygulanacak usul ve esasları kapsamaktadır (T.C Resmi Gazete S.28229, 2012). Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik 2012 yılında yayınlanan bir diğer tebliğ, Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularına İlişkin Ölçüm Standardı Tebliği'dir. Rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi kurmak üzere lisans başvurusunda bulunan tüzel kişiler tarafından, tesisin kurulacağı saha üzerinde, bu tebliğ kapsamında düzenlenen şartlara uygun olarak, en az bir yıl süreli ölçüm yapılması zorunludur (T.C Resmi Gazete S.28212, 2012).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğe ilişkin ilk tarife desteği 2005'te yayınlanan "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun" ile sunulmuştur. 2007'de kanunda yapılan değişikliklerle tarife 10 yıl süreyle 5-5.5 Euro cent/kWh'e yükselmiştir. Bu tarife 2010 yılında 7.3 \$ cent/kWh olarak değiştirilmiştir (T.C Resmi Gazete S.25819, 2005).

05.02.2009 tarihinde Kyoto Protokolü'ne taraf olan Türkiye'nin 2012 yıl sonuna kadar herhangi bir sera gazı salım sınırlama ve azaltım yükümlülüğü yoktur. 2013 yılından itibaren Kyoto Protokolü değerlendirmelerinin önem kazanacağı ve Avrupa Birliği'ne uyum sürecinde bir ülke olan Türkiye'de; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımının teşvik edilerek istenilen hedeflere ulaşması, enterkonnekte şebekelere uyum ve AB piyasasında rekabet edecek duruma gelinmesi amacıyla politikalar geliştirilmeye devam edilmektedir (Url-9; Url-10).

## **2.4 Rüzgar Türbinleri**

### **2.4.1 Rüzgar türbini çeşitleri**

Rüzgar türbinleri, dönme eksenlerinin yer yüzeyine göre konumlanmalarıyla, düşey ve yatay eksenli türbinler olarak iki grupta incelenebilirler.

#### **2.4.1.1 Düşey eksenli rüzgar türbinleri**

Tarihte ortaya çıkan ilk rüzgar türbinleri düşey eksenlidir. Çeşitli tasarımları denendikten sonra kullanımları giderek azalan düşey eksenli rüzgar türbinlerinin başlıca avantajları; jeneratör ve dişli kutusunun yer zeminine yerleştirilebilmesi ve türbinin rüzgara yönelimini sağlayan "yaw" mekanizmasına ihtiyaç duyulmamasıdır.

Bu türbin tipinin dezavantajları ise; kanatlarının yere yakın olması sebebiyle düşük rüzgar hızlarıyla karşılaşılması, verimlerinin düşük olmasıdır (Url-1). Savonius ve Darrieus tipi türbinler, yaygın olarak bilinen dikey eksenli rüzgar türbinleridir.

Savonius tipi rüzgar türbinleri, 1925 yılında Finlandiyalı mühendis J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. Dikey bir eksenin etrafında yarım silindir şeklindeki kanatlardan oluşan türbinin yapımı oldukça basittir (Şekil 2.14). Ayrıca, başlangıç torku yüksek olduğundan düşük rüzgar hızlarında kendiliğinden harekete geçebilir. İlk olarak havalandırma, su pompalama gibi alanlarda kullanılan bu türbinlerin, aerodinamik performanslarının düşüklüğü nedeniyle, elektrik üretiminde ve günümüzde kullanımları oldukça kısıtlıdır. Savonius türbini üzerinde yapılan son çalışmalar, aerodinamik performansının artırılması yönündedir (Nurbay ve Çınar, 2005).



**Şekil 2.14 :** Su pompalamak için kullanılan el yapımı Savonius rüzgar türbini (Url-4).

Ticari amaçlı olarak çeşitli boyutlarda üretimi yapılmış olan Darrieus Rüzgar Türbini, 1931 yılında Fransız mühendis Georges Darrieus tarafından icat edilmiştir (Şekil 2.15). Türbin kanatları aerodinamik profile sahip olduğundan, özellikle yüksek

rüzgar hızlarındaki performansları Savonius türbinlere kıyasla daha yüksektir. Bunun yanında, üretimleri daha zordur ve harekete geçmek için bir tahrik motoru veya Savonius türbine ihtiyaç duyarlar (Nurbay ve Çınar, 2005). Çoğunlukla gergi halatlarına ihtiyaç duymaları da bir diğer dezavantajlarıdır (Url-1).



**Şekil 2.15 :** 4 MW anma gücünde bir Darrieus rüzgar türbini, 1987, Kanada (Hau, 2006).

#### **2.4.1.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri**

Erken dönem yatay eksenli türbinler genellikle çok kanatlı olarak tasarlanmıştır. Bu türbinlerde, rüzgara maruz kalan kanat yüzey alanının rotor süpürme alanına oranını ifade eden “rotor katılığı” (rotor solidity) yüksektir. Bu durum şiddetli rüzgar ve fırtınalarda, türbini aşırı yüklere maruz bırakır. İstenmeyen bu etkiyi sınırlamak ve verimi arttırmak amacıyla modern türbinlerde sayıca daha az, uzun ve ince kanatlar kullanılmaktadır. Modern türbinlerin kanat uç hızları yüksektir. (DNV/RISO, 2002)

Bugün, ticari amaçlı üretilen şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin tümü yatay eksenlidir. Düşey eksenli türbinlerle karşılaştırıldıklarında, rotor katılıkları düşük olduğundan, kW başına maliyetleri daha azdır. Ayrıca, rotor süpürme alanlarının yerden yüksekliğinin fazla olması, enerji üretiminin yüksek olmasını sağlar (Barutçu, 2011). Özellikle 1 MW ve üzerinde güç üretebilen büyük ölçekli yatay eksenli türbinlerde, rotor kanatlarının boylamsal eksenleri etrafında dönebilmesi sayesinde rotor hızı ve güç çıkışı kontrolü sağlanabilir (blade pitch control). “Pitch” kontrol mekanizması, rotoru aşırı hızlanmaktan ve aşırı hızda esen rüzgarın türbinde

yaratacağı etkilerden korur. Ayrıca rotor kanatlarının aerodinamik yapısı, güç üretiminde verimi artıracak şekilde tasarımlanabilmektedir (Hau, 2006).

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri, tek, iki ve üç kanatlı olarak üretilmektedir. Tek ve iki kanatlı türbinler; rotor balansı için kompleks tasarım gerektirmeleri, yüksek gürültü seviyesi ve estetik olmayan görünüşleri sebebiyle tercih edilmemektedir. Danimarka konseptinde üretilen, düzgün dönme momentine sahip üç kanatlı modern rüzgar türbinleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.16), (Url-1).



**Şekil 2.16 :** Üç kanatlı, yatay eksenli rüzgar türbini (Burton ve diğ., 2001).

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri, rüzgarı önden alan (upwind) ve rüzgarı arkadan alan (downwind) sistemler olarak çeşitlilik gösterirler. Rüzgar türbinleri büyük çoğunlukla, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanmıştır. Rüzgarı önden alan türbinlerde rotor yüzü rüzgara dönüktür. Rotor, rüzgarın kuleyi geçtikten sonra akışının bozulmasından kaynaklanan rüzgar gölgeleme (wind shade) etkisine maruz kalmaz, yalnızca rüzgar kuleye varmadan oluşan gölgelenmeden etkilenecektir. Bu sistemlerde, rotoru rüzgarın estiği yöne döndürmek için “yaw” mekanizmasına gerek duyulur. Kanatlar sert yapıda olmalı ve kuleden biraz uzağa yerleştirilmelidir. Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise rotor kule arkasındadır. “Yaw” mekanizmasına

gerek duymadan rüzgar pasif olarak izlenir, kanatlar esnek ve hafif yapıdadır. Bu tasarımın en büyük dezavantajı, kulenin rüzgar gölgeleme etkisiyle, rotorun yorulma yüklerine daha fazla maruz kalmasıdır (Nurbay ve Çınar, 2005).

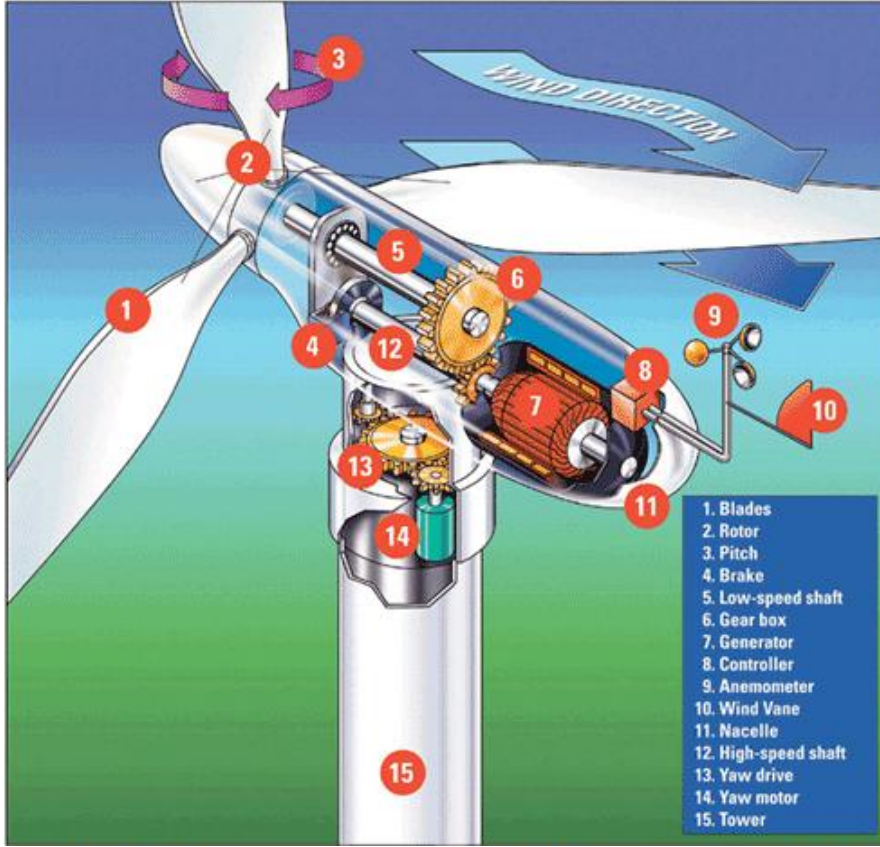
#### **2.4.2 Türbin mekanizması**

Rüzgar türbinleri, rüzgarın taşıdığı kinetik enerjiyi rotor aracılığıyla mekanik enerjiye ve bu mekanik enerjiyi de jeneratörlerde elektrik enerjisine dönüştüren temel bir çalışma sistemine dayanır. Ancak bu sistemi sağlayan mekanizmalar türbinin büyük veya küçük ölçekli olmasına ve türbin modeline göre değişkenlik gösterebilir.

Rüzgar türbinlerinde üretilebilecek yıllık enerji miktarını belirleyen faktörlerden biri rotor kanatlarının dönüş sırasında süpürdükleri alanın (rotor swept area) büyüklüğüdür. Rotor çapı iki katına çıkarıldığında rotor süpürme alanı, dolayısıyla üretilen enerji miktarı dört katına çıkacaktır. Rotor çapları türbinlerin kullanılacağı bölgenin rüzgar şartlarına göre değişiklik gösterebilir (Url-1).

Büyük ölçekli rüzgar türbinleri 1MW ve üzerinde anma gücüne sahiptir. Bu türbinler, üretilmek istenen enerji miktarına bağlı olarak değişen sayılarda bir araya getirilerek rüzgar çiftlikleri oluşturulur ve elektrik şebekesine verilmek üzere güç üretimi sağlanır. Büyük ölçekli türbinler, rüzgarın yoğun ve sürekli olduğu bölgeler için uygundur. Küçük ölçeklilerden farklı olarak, rüzgarın çok güçlü olduğu zamanlarda türbinin zarar görmesini önlemek amacıyla “pitch (kanat açısı kontrolü)” veya “active stall (aktif hız kesme)” güç kontrol mekanizmalarından birine sahiptirler (Url-1; Url-5).

Büyük ölçekli rüzgar türbinlerinin iç yapısı ve temel bileşenleri Şekil 2.17’de görülmektedir. Aerodinamik yapıda tasarlanmış olan rotor kanatlarına ulaşan rüzgar, kanatlar üzerinde aerodinamik kuvvetler meydana getirir. Bu kuvvetlerin etkisiyle oluşan tork, türbinin dönmesini sağlar. Rotor, türbin kanatları ve bu kanatların bağlı olduğu göbekten (hub) oluşan yapıdır. Rotorda oluşan tork, düşük hızlı bir mille dişli kutusuna iletilir ve buraya bağlı olan yüksek hızlı bir mile aktarılır. Dişli kutusu, türbinin ağır ve pahalı bir elemanı olduğundan, dişli kutusuz türbin tasarımları da görülebilmektedir. Yüksek hızlı milin bağlı olduğu jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.



**Şekil 2.17 :** Yatay eksenli rüzgar türbininin bileşenleri (Url-6).

Anemometre ile ölçülen rüzgar hızı ve rüzgar gülü (wind vane) ile belirlenen rüzgar yönü bilgisi kontrol sistemlerine gönderilir. Kontrol sistemleri, rüzgar hızının çok yüksek veya çok düşük olduğu zamanlarda türbinin durdurulmasını, değişen rüzgar hızına göre en yüksek aerodinamik verim elde edilecek şekilde kanat açısının ayarlanmasını (pitch) ve rüzgardan daha fazla enerji sağlanabilmesi için rotor yüzünün rüzgarın estiği yöne bakacak şekilde dönmesini (yaw) sağlar. Acil durumlarda türbin, fren sistemi sayesinde yavaşlatılır veya durdurulur. Düşük ve yüksek hızlı mil, dişli kutusu, jeneratör, kontrol ve fren sistemini içine alan yapıya “nasel” adı verilir. Nasel, çelik boru veya kafes yapıda bir kulenin üzerine yerleştirilmiştir. Yerden yükseldikçe rüzgar hızı artış ve süreklilik gösterdiğinden, kulenin mümkün olduğunca yüksek olması enerji üretiminde verimi arttıracaktır. (Edis, 2011)

100 kW’a kadar anma gücüne sahip olan küçük ölçekli rüzgar türbinleri; şebeke bağlantısından uzak, enerji tüketim noktasına yakın, rüzgarın değişken ve türbülanslı olduğu bölgelerde kurulabilir. Büyük ölçekli türbinlerden farklı olarak, kanat aç ve aktif güç kontrol mekanizmaları bulunmaz. Bunun yerine, basit, düşük maliyetli ve

pasif aerodinamik güç ve hız sınırlaması vardır. Büyük ölçekli türbinlere oranla kW başına düşen maliyetleri daha fazladır. Bu türbinler, dizel jeneratörler, akü ve fotovoltaik sistemlerle birlikte hibrit enerji sistemlerinde kullanılabilirler (Barutçu, 2011; Url-5).

### 2.4.3 Güç kontrolü

Rüzgar türbinleri, düşük rüzgar hızlarında güç üretimini maksimize edecek ve yüksek rüzgar hızlarında türbinin zarar görmesini önlemek için fazla güç üretimini sınırlandıracak şekilde tasarlanmıştır. Güç kontrolü sağlayan “Stall”, “pitch” ve “active stall” kontrol olmak üzere üç tür sistem vardır.

Stall kontrollü türbinlerde rotor kanatları göbeğe sabit açıyla bağlıdır. Kanat geometrisi, belli değeri aşan rüzgar hızlarında, kanat rüzgar altı bölgesinde akış ayrılması oluşturarak güç sınırlaması yapacak şekilde tasarlanmıştır. Düşük rüzgar hızlarında verim düşüktür. Hava yoğunluğu ve şebeke frekansı değişimlerine bağlı olarak maksimum güç üretiminde dalgalanmalar görülür.

Pitch kontrollü türbinlerde güç çıkışının çok yüksek görüldüğü durumlarda kanatlar, rüzgara dik olan yüzeyleri rüzgar etkisine daha az maruz kalacak şekilde döner. Rüzgar hızı tekrar düşmeye başladığında, kanat açısı rüzgara dik olan kanat yüzeyi arttırılacak şekilde değişir. Kanat açısı her rüzgar hızında güç çıkışını optimize edecek şekilde ayarlanır. Pitch mekanizması karmaşık tasarım gerektirir ve yüksek rüzgar hızlarında güç dalgalanmaları meydana gelir.

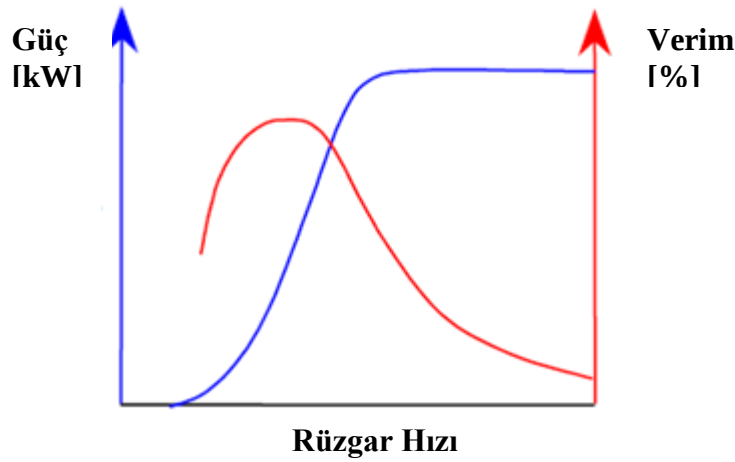
Active Stall kontrollü türbinler düşük rüzgar hızlarında pitch kontrollü sistemler gibi çalışır. Yüksek rüzgar hızlarında ise kanatlar, pitch kontrolündeki kanatların aksi yönünde dönerek stall durumuna zorlanır. Böylece türbin tüm yüksek rüzgar hızlarında anma gücünde çalışabilir ve güç çıkışı, hava yoğunluğundaki dalgalanmalardan etkilenmez (DNV/RISO, 2002).

### 2.4.4 Güç ve yıllık enerji üretimi

Rüzgar türbinlerinde üretilen güç aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2.2)$$

Burada  $P(v)$  belli rüzgar hızındaki güç çıkışını,  $A$  rotor süpürme alanını,  $v$  serbest rüzgar hızını,  $\rho$  hava yoğunluğunu,  $C_p$  güç katsayısını ifade eder. İdeal bir türbinde üretilen gücün rüzgar hızına bağlı değişimini gösteren eğriye, “güç eğrisi” adı verilir. Güç değişimi Şekil 2.18’deki grafikte mavi eğriyle gösterilmiştir. Güç çıkışı, anma rüzgar hızına kadar üçüncü dereceden polinomial artış gösterir. Bu noktadan itibaren güç kontrolü, sabit güç çıkışı sağlamak amacıyla devreye girer. Kırmızı eğriyle gösterilen türbinin güç veya verim faktörüdür. Genellikle 7-9 m/s rüzgar hızında en yüksek değerine ulaşır (DNV/RISO, 2002).



**Şekil 2.18 :** Rüzgar türbini güç eğrisi (DNV/RISO, 2002).

Yıllık tahmini enerji üretiminin hesaplanabilmesi için türbin güç eğrisinin yanında, o bölgedeki her bir rüzgar hızının yaklaşık görülme sıklığı da bilinmelidir. Bu frekansların temsiliinde en çok iki parametrelili Weibull dağılım fonksiyonu kullanılmaktadır. Weibull dağılımının matematiksel formülü aşağıdaki gibidir:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2.3)$$

Bu dağılımda  $v$  rüzgar hızı,  $c$  ölçek ve  $k$  şekil parametreleridir.  $c$  parametresi, ortalama rüzgar hızıyla doğru orantılı olarak değişir.  $k$  parametresi ise ortalama hız ile doğru, standart sapma ile ters orantılı olarak değişir. Standart sapma değeri türbülansı ifade eder, risk ve güvenilirlik hesaplarında kullanılır (Menteş, 2011).

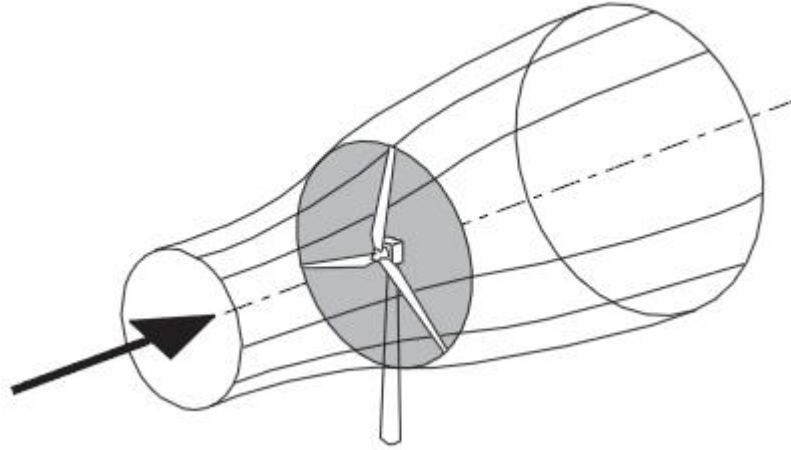
Güç eğrisi ve rüzgar hızı dağılım bilgileriyle, yıllık enerji üretimi formüldeki gibi hesaplanır:

$$E_{year} = N \int_{v_{cut-in}}^{v_{cut-off}} P(v)f(v)dv \quad (2.4)$$

Burada  $E_{year}$  yıllık enerji üretimini,  $P(v)$  güç eğrisi fonksiyonunu,  $f(v)$  hız dağılım fonksiyonunu,  $v_{cut-off}$  türbinde enerji üretiminin durdurulduğu cut-off rüzgar hızını,  $v_{cut-in}$  türbinin enerji üretimine başladığı rüzgar hızını,  $N$  zamanı (8760 saat/yıl) ifade eder (DNV/RISO, 2002).

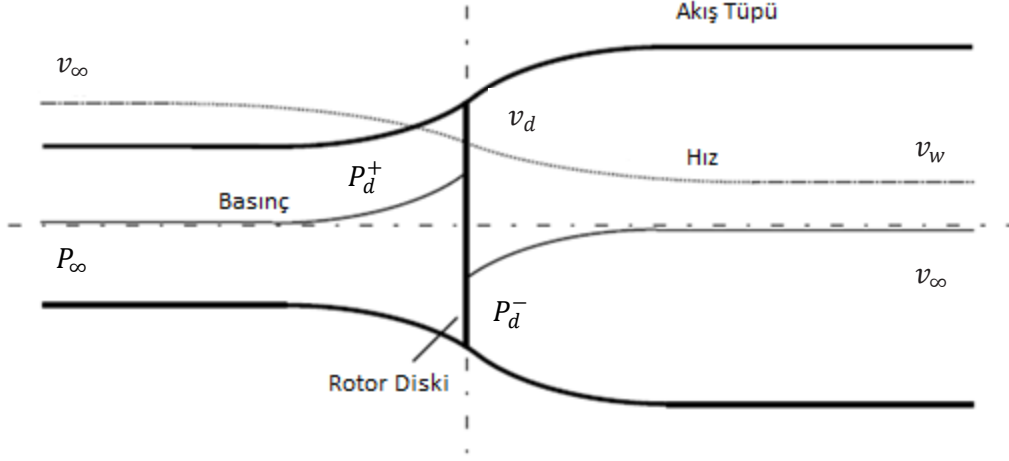
#### 2.4.5 Rotor aerodinamiği

Rotor süpürme alanından (rotor disk) geçen rüzgarın kinetik enerjisinin bir kısmı elektrik enerjisi üretiminde kullanıldığından, bu bölgeden geçen rüzgarın hızında yavaşlama olur. Rotor diskinden etkilenen hava kütesini, serbest akıştaki havadan ayrı olarak düşünürsek, bu iki hava kütlesi arasındaki sınırları bir akış tüpü ile göstermek mümkündür (Şekil 2.19). Hava giriş çıkışı olmadığından, kütleli debi akış tüpü boyunca sabittir. Böylece, rotor diskinden geçen rüzgar yavaşlarken akış tüpünün kesit alanı artar.



**Şekil 2.19 :** Rotor diskinden geçen havanın akış tüpü şeması (Burton ve diğ., 2001).

Rüzgar hızı, rotor diskine ulaşmadan önce rüzgar üstü bölgede azalmaya başlar. Kinetik enerjideki bu düşüşün dengelenmesi için hava kütesinin statik basıncı bu bölgede artar. Bu hava kütlesi rotor diskinden geçtiği sırada ise statik basıncında ani bir düşüş gözlenir. Havanın, rotorun rüzgar altı bölgesinde atmosfer basıncının altında, düşmeye devam eden bir hızla ilerlediği bölgeye “iz” (wake) adı verilir. Hava, rüzgar altı bölgede ilerlemeye devam ederken statik basıncı atmosferik basınç seviyesine geri döner (Şekil 2.20).



**Şekil 2.20 :** Akış tüpü boyunca basınç ve hız değişimi (Burton ve diğ., 2001).

Akış tüpü boyunca aynı kalması gereken kütleli debi;  $\rho$  yoğunluk,  $A$  kesit alan,  $v$  akış hızı olmak üzere  $\rho.A.v$  formülü ile hesaplanır.  $\infty$  ile uzak rüzgar üstü,  $d$  ile diskten geçerken,  $w$  ile iz durumları belirtilirse, aşağıdaki ifadeye ulaşılır:

$$\rho A_{\infty} v_{\infty} = \rho A_d v_d = \rho A_w v_w \quad (2.5)$$

Diskten serbest akış hızı üzerinde bir varyasyon yarattığı düşünülür. İndüklenen bu akışın akış yönlü bileşeni  $-\alpha v_{\infty}$  ile gösterilir. Burada  $\alpha$  aksenal akış indüklemeye faktörüdür (inflow factor). Diskten geçmekte olan havanın akış yönündeki hızı şu şekilde ifade edilir (Burton ve diğ., 2001):

$$v_d = v_{\infty} (1 - \alpha) \quad (2.6)$$

#### 2.4.5.1 Momentum teorisi

Diskten geçen rüzgar  $v_{\infty} - v_w$  kadar hız değişimine uğrar. Buna göre momentum değişim oranı, hızdaki değişim ile kütleli debinin çarpımıdır:

$$\text{Momentum Değişim Oranı} = (v_{\infty} - v_w) \rho A_d v_d \quad (2.7)$$

Bu momentum değişimine yol açan kuvvet, havanın diskten geçmesi sırasında oluşan basınç farkından kaynaklanır. Buna göre;

$$(P_d^+ - P_d^-) A_d = (v_{\infty} - v_w) \rho A_d v_{\infty} (1 - \alpha) \quad (2.8)$$

Basınç farkının bulunabilmesi için rüzgar üstü ve rüzgar altı akış bölgelerinin her birine Bernoulli denklemi (2.9) uygulanır. Bernoulli denklemine göre sabit şartlar altında kinetik enerji, statik basınç enerjisi ve yerçekimsel potansiyel enerjinin toplamından oluşan enerji, akışkan üzerinde veya akışkan tarafından iş yapılmadığı sürece sabit kalır.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + P_o + \rho gh = \text{sabit} \quad (2.9)$$

Akışın yatay ve sıkıştırılmaz olduğu varsayılırsa rüzgar üstü (2.10) ve rüzgar altı (2.11) akış denklemleri;

$$\frac{1}{2}\rho_{\infty} v_{\infty}^2 + P_{\infty} + \rho_{\infty} gh_{\infty} = \frac{1}{2}\rho v_d^2 + P_d^+ + \rho_d gh_d \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{2}\rho_w v_w^2 + P_w + \rho_w gh_w = \frac{1}{2}\rho v_d^2 + P_d^- + \rho_d gh_d \quad (2.11)$$

Bu iki denklemin farkı alındığında;

$$(P_d^+ - P_d^-) = \frac{1}{2}\rho(v_{\infty}^2 - v_w^2) \quad (2.12)$$

Bulunan basınç farkı denklemde yerine koyulursa;

$$\frac{1}{2}\rho(v_{\infty}^2 - v_w^2)A_d = (v_{\infty} - v_w)\rho A_d v_{\infty}(1 - \alpha) \quad (2.13)$$

Böylece, akış tüpündeki aksenal hız kaybının bir yarısının rüzgar üstü, diğer yarısının rüzgar altı bölgede olduğu bilgisine ulaşılır (Burton ve diğ., 2001):

$$v_w = (1 - 2\alpha)v_{\infty} \quad (2.14)$$

#### 2.4.5.2 Güç katsayısı

Rotor diskinde etkiyen kuvvet;

$$F = (P_d^+ - P_d^-)A_d = 2\rho A_d v_{\infty}^2 \alpha(1 - \alpha) \quad (2.15)$$

Disk üzerinde toplanan bu kuvvet etkisiyle yapılan işin zamana bağlı değişimi, havanın taşıdığı gücü verecektir:

$$Güç = Fv_d = 2\rho A_d v_\infty^3 \alpha(1 - \alpha)^2 \quad (2.16)$$

Güç katsayısı veya güç faktörü, türbinde üretilen elektrik enerjisinin aynı türbinin rotor süpürme alanından geçen rüzgarın, diskin olmadığı durumda taşıdığı enerjiye oranıdır. Formüldeki gibi ifade edilir:

$$C_p = \frac{Güç}{\frac{1}{2} \rho A_d v_\infty^3} \quad (2.17)$$

Buradan aşağıdaki ifadeye ulaşılır (Burton ve diğ., 2001):

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (2.18)$$

#### 2.4.5.3 Betz limiti

Betz limiti, 1919 yılında Alman aerodinamikçi Albert Betz tarafından hesaplanmış ulaşılabilecek maksimum güç katsayısıdır.

Güç katsayısının maksimum değerini veren ifade:

$$\frac{dC_p}{d\alpha} = 4(1 - \alpha)(1 - 3\alpha) = 0 \quad (2.19)$$

$\alpha=1/3$  alındığında maksimum güç katsayısı;

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.20)$$

olarak bulunur (Burton ve diğ., 2001).

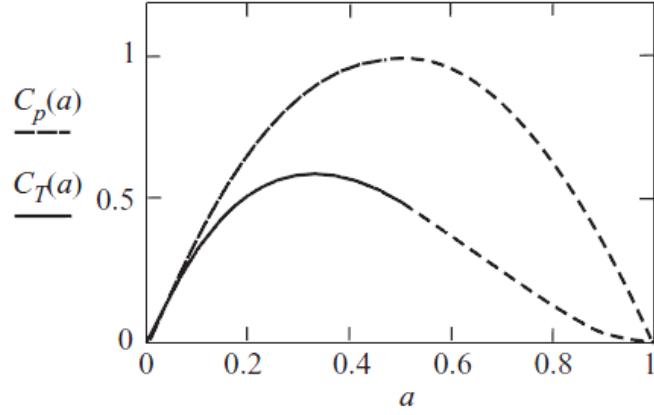
#### 2.4.5.4 “Thrust (itme)” katsayısı

Diskten geçen havanın basıncındaki düşmeye bağlı oluşan kuvvet formülü, “thrust” katsayısını verecek şekilde boyutsuzlaştırılabilir:

$$C_T = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2 A_d} \quad (2.21)$$

$$C_T = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (2.22)$$

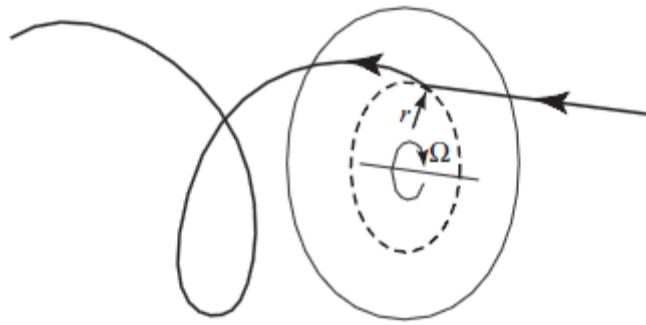
$\alpha \geq 1/2$  değerleri için  $(1 - 2\alpha)v_\infty$  ile verilen iz hızı sıfır veya negatif değerler aldığından momentum teorisi bu durumlar için uygulanamaz (Burton ve diğ., 2001). Güç ve thrust katsayılarının akış indüklenme faktörüne bağlı olarak değişimi Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.21 :** Güç ve thrust katsayılarının akış indüklenme faktörüne bağlı olarak değişimi (Burton ve diğ., 2001).

#### 2.4.5.5 İz (wake) etkisi

Rotor diskinden geçen havanın disk üzerinde meydana getirdiği torka karşılık eşit ve zıt yönde bir tork bu hava üzerine etki eder ve havanın, rotorun döndüğü yönün aksi yönünde dönmesine yol açar. Diskten geçen hava partikülleri, sahip oldukları aksenal hızlara ek olarak açısal momentum kazanır ve rotorun iz bölgesinde dönerek, daha düşük hızda ilerlemeye devam eder (Şekil 2.22), (Burton ve diğ., 2001).



**Şekil 2.22 :** Rotor diskinden geçen hava partikülünün izlediği yol (Burton ve diğ., 2001).



### **3. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİN ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE ELEKTRİK PİYASASI**

Rüzgar hızındaki anlık, kısa ve uzun periyotlu değişimler, rüzgar enerji sistemlerinin güç ve gerilim çıktılarında önemli dalgalanmalara sebep olur. Bu dalgalanmalar, yerel şebekeye uyumlu gerilim ve frekansta güç kalitesinin, enerji planlanmasında arz - talep güç dengesinin ve güç akış kontrolünün sağlanması bakımından zorluklar yaratır (Url-11). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın, 2020 yılında ülkemizdeki enerji tüketiminin %20'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması hedefi doğrultusunda; güç üretim sistemlerinde rüzgar enerjisi kullanımının, sistem işletiminde verimlilik ve güvenilirlik üzerinde yarattığı bu sorunların çözümüne ihtiyaç vardır (Bahadır ve Ersoy, 2010).

#### **3.1 Rüzgar Enerji Santrallerinde Üretilen Enerjinin Şebeke Üzerindeki Etkisi**

Elektrik güç sistemlerinin; ani aktif ve reaktif yük taleplerine cevap verecek, elektrik enerjisini en düşük maliyetle sağlayacak, ekolojik dengeye en az zararı verecek ve sabit gerilim ve frekans ile güvenilir güç kaynağı sağlayacak şekilde tasarlanması gerekir. Gerilim ve frekans, elektrik güç sistemlerindeki iki ana değişkendir. Elektrik sistemi, şebeke frekans ve gerilimini koruyarak tüketici talebini karşılamak durumundadır. Bir güç sisteminin frekansı, sistemdeki aktif güç dengesine bağlıdır. Sistemin bir noktasında aktif güç üretim ve tüketimi arasındaki dengesizlik, sistemin diğer noktalarında da hissedilecek frekans değişimlerine yol açar. Enterkonnekte sistemlerde bu değişimlerin fark edilmesi ve şebeke frekansının nominal değerine (Avrupa ve Türkiye elektrik şebekesi için 50 Hz) getirilmesi için frekans kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulur. Frekans düştüğünde güç üretimi artırılıp frekans artışında güç üretimi kısıtlanmalıdır.

Şebeke güvenliği ve kalitesi için kontrolüne ihtiyaç duyulan diğer parametre gerilimdir. Rüzgar güç üretim sistemlerinin yarattığı gerilim değişimleri türbin ve rüzgar enerji santrali çevresinde lokal bir etki yarattığından, gerilimdeki

dalgalanmalar problemin ortaya çıktığı noktada çözümlenmelidir. İletim ve dağıtım sistemlerinde gerilim kontrolü trafolarla ve reaktif güç dengeleme ile sağlanır ve değişken gerilim tüketiciye ulaşmadan önce nominal değere (üç fazlı 380 V AC) getirilir.

Rüzgar türbinlerinde üretilen enerjideki değişimler, alternatif akım ve gerilim arasında faz farkı yaratarak reaktif güç üretimi yoluyla sistem kayıplarına, gerilim genliğinde değişkenliklere (flicker etkisi) ve akım ve gerilimin sinüzoidal yapısında bozulmalara (harmonik etkisi) yol açarak güç kalitesini düşürür (Werven ve diğ., 2005). Yeni nesil rüzgar türbinleri, değişken ve güvenilirliği az olan rüzgar enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin şebeke üzerindeki birçok etkisini azaltacak güç elektroniği donanımı ile tasarlansa da; şebekeye uyumda yetersiz güç kalitesi, flicker ve harmonik etkisi, şebeke arızalarına verilen tepki, şebeke kararlılığına etkiler, aktif ve reaktif güç değişkenliği, gerilim ve frekans regülasyonu ihtiyacı gibi etkiler görülmektedir (Bahadır ve Ersoy, 2010).

İletim sisteminin güvenilir ve düşük maliyetli olarak işletilmesinde, enerji kalitesi ile sistem kararlılığının sağlanmasında uygulanacak standartlar ve rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin şebeke bağlantı kriterleri, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nde belirtilmektedir. Rüzgar türbinlerinin arıza sırasında gerilim düşümlerine tepkileri, santralin arıza sonrası sisteme sağlaması gereken katkı, gerilim dalgalanmalarına vermesi gereken reaktif güç tepkisi, aktif güç kontrol sınırları, frekans tepki sınırları bu yönetmelikte belirtilmiştir (T.C Resmi Gazete S.25001, 2003).

### **3.2 Rüzgar Enerji Santrallerinde Üretilen Enerjinin Enerji Planlaması Üzerindeki Etkisi**

#### **3.2.1 Türkiye elektrik piyasasında dengeleme ve uzlaştırma açısından yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim**

Aktif elektrik enerjisi arz ve talebinin dengelenmesine ve dengesizlikten doğacak alacak-borç miktarlarının belirlenerek uzlaştırmanın gerçekleştirilmesine ilişkin usul ve esaslar, Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği (DUY) ile belirlenmiştir. Bu yönetmeliğe göre elektrik piyasasında dengeleme mekanizması, gün öncesi ve gerçek zamanlı arz-talep dengeleme faaliyetlerinden oluşur.

Gün öncesi planlamada; her gün saat 11:30'a kadar, bir sonraki güne ait saatlik elektrik talep tahmini, iletim sisteminin yük akışlarını yönetmekten sorumlu Milli Yük Tevzi Merkezi (MYTM) tarafından piyasa katılımcılarına duyurulur. Üretim lisansına sahip katılımcılar, bir sonraki gün için saatlik üretim programlarını ve teklif miktarlarını MYTM'ye bildirirler. Üretim ve tüketim arasındaki dengesizlikleri mali olarak uzlaştırmakla görevli Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi (PMUM), sistem kısıtlarını dikkate almadan saatlik sistem marjinal fiyat (SMF) hesaplamasını yapar ve bu fiyatları Piyasa Yönetim Sistemi yazılımında yayımlar. Bunu takiben MYTM, bölgesel yük tevzi merkezlerinden aldığı kısıtlarla üretim programında değişiklikler yapar ve katılımcılara yük alma (YAL) - yük atma (YAT) talimatlarıyla birlikte yeni üretim programı bildirilir. Her gün saat 14:00'a kadar piyasa işletmecisi tüm sistem için gün öncesi programını sonuçlandırır.

Gerçek Zamanlı dengelemede, sistemde gerçek zamanlı meydana gelen yük ihtiyacını karşılamak için dengeleme birimlerine ekonomik sıralama ile YAL – YAT talimatları verilir. Bir üreticinin ünitelerinin herhangi bir nedenle servis harici olması durumunda ortaya çıkacak dengesizlikte sistemdeki diğer ünitelere yük alma; önemli bir ölçüde tüketim kaybının olduğu zamanda ise üreticilere yük atma talimatları verilir. Dengeleme talimatları, saatlik fiyatlar üzerinden aylık olarak uzlaştırılır. Dengeleme için kabul edilen YAL-YAT teklifleri için saatlik sistem marjinal fiyatı ödenir. Dengesizliklerin uzlaştırılmasında ise piyasa katılımcıları, belirlenen aktif elektrik enerjisi açık ya da fazlalarını, her bir uzlaştırma dönemi için tek bir “sistem dengesizlik fiyatı” üzerinden karşılamak durumundadır (T.C Resmi Gazete S.27200, 2009).

Türkiye elektrik enerjisi sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleri ürettikleri elektriği ikili anlaşma ile serbest müzakere sonucu belirlenen fiyattan, toptan satış şirketleri, dağıtım şirketleri, TETAŞ ya da serbest tüketicilere; gün öncesi planlama/piyasa kapsamında PMUM'a; YEK Destekleme Mekanizması kapsamında sabit fiyattan alım garantisi (18/05/2005-31/12/2015 döneminde devreye girmiş veya girecek rüzgar enerji santralleri için 10 yıl süre ile geçerli 7,3 ABD dolar cent/kWh) ile PMUM üzerinden tedarik şirketlerine satabilme imkanına sahiptirler.

DUY'a göre, rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri dengeleme birimi olma yükümlülüğünden muaf olup uzlaştırma santrali olarak nitelendirilmektedir. Bu santraller, gün öncesi piyasası kapsamında sadece günlük üretim programı, tüketim

tahmini ve ikili anlaşmaları bildirmekle; dengeleme güç piyasası kapsamında ise sadece kesinleşmiş günlük üretim programını bildirmekle yükümlüdür. Alış ve satış teklifi veremezler. Gün öncesinde saatlik üretim tahmini yapmak ve dengesizliğe düşmemek üzere tahminlerinde isabetli olmak durumundadırlar. Eksik ya da fazla tahminlerin yol açtığı dengesizlik, üreticiye ek maliyet getirebilmektedir (Deloitte Türkiye., 2011).

### **3.2.2 Kısa süreli rüzgar enerjisinin tahmini**

Rüzgar enerji santrallerinde elektrik enerjisi üretimi, konvansiyonel santral üretimleri gibi programlanabilen bir yapıya sahip olmadığından, bu üreticilerin gün öncesi üretim tahminlerinde sıkça dengesizliğe düşülmektedir. Enerji üretim tahmin zorunluluğu ve bu tahminin gerçekleştirilememesi durumunda ortaya çıkan mali yükümlülükler, kısa dönemli rüzgar tahminlerine dayalı enerji tahmin modellerinin kullanılmasını gerektirmektedir (Bahadır ve Ersoy, 2010). Doğrudan zaman serisi tahminleri, rüzgar hızından rüzgar enerjisinin modellenmesi, yapay sinir ağları (artificial neural networks) ve bulanık mantık (fuzzy logic) gibi yöntemleri kullanan tahmin modelleri, çeşitli Avrupa ülkelerinde kullanılmaktadır (Durak, 2010)

Rüzgar enerjisi tahminlerinin, sistem işletmecisi veya üretici tarafından yapılması mümkündür. Ancak, rüzgar çiftliği enerji üretim programlarının tek elden (şebeke işletmecisi tarafından) yapılması ve tahmin sürelerinin azaltılması, tahminlerdeki yanılma payını azaltmaktadır. Tahmin hatalarının azalmasıyla, yük alma – yük atma talimatlarının ve gün öncesi piyasasında dengesizliğin azalması, hızlı devreye girip çıkabilen santrallerin daha etkin programlanarak dengeleme güç piyasasında kullanılması, daha fazla yenilenebilir enerji üretim sisteminin şebekeye entegrasyonu sağlanacak ve gün öncesi sistem dengesizlik fiyatları düşecektir (Bahadır ve Ersoy, 2010).

Ülkemizde kısa süreli (0 - 48 saat) rüzgar enerjisi tahminlerinin tek elden yapılabilmesi için, 2010 yılında, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün sayısal hava tahmin model ürünleri kullanılarak Rüzgâr Enerjisi Tahmin Sistemi (RETS) geliştirilmiştir. Deneme aşamasında olan çalışmada Türkiye için, çeşitli yüksekliklerde, 4 km çözünürlükte ve 48 saatlik rüzgar tahminleri üretilmeye başlanmıştır (Url-19). Ayrıca, RES'lerin Türkiye elektrik sistemine geniş ölçekli entegrasyonunun sağlanması için bir rüzgar gücü izleme ve tahmin sistemi

geliştirmek ve bu sistemi ülke genelinde yaygınlaştırmak amacıyla Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Tübitak ve Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü 2010 yılında başlatılan “Türkiye’de Rzgrdan retilen Elektriksel G İçin İzleme ve Tahmin Sistemi Geliştirme Projesi” yürütülmektedir (Url-20).



#### **4. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİLEN ENERJİNİN DEPOLANMASI**

Enerji depolama sistemleri rüzgar enerji santralleriyle birlikte kullanıldığında şebekeye sürekli, sabit ve kararlı güç üretimi sağlanacaktır. Bunun yanında, rüzgar enerji santrallerinde üretilen enerjinin, talep enerjiden fazla olduğu dönemlerde meydana gelen üretim fazlası enerji depolanarak, üretimin tüketimi karşılamada yetersiz kaldığı dönemlerde kullanılabilir (Url-11). Rüzgar enerjisi tahmin sistemlerinin geliştirilmesine ek olarak; piyasa koşullarında maliyetlerin uygun olması durumunda, yüksek kapasiteli bölgesel depolama sistemlerinin kullanımının piyasa işletimine önemli katkı yapabileceği düşünülmektedir (Bahadır & Ersoy, 2010).

##### **4.1 Enerji Depolama Teknikleri**

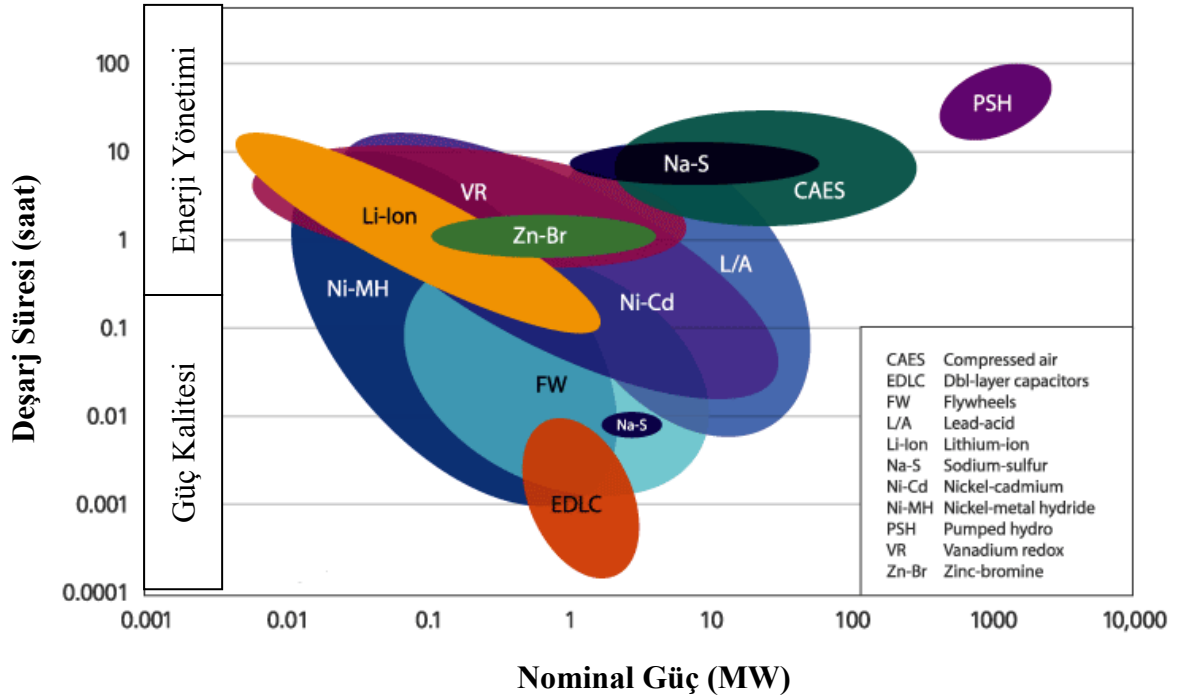
Elektrik enerjisinin doğrudan depolanması kolay değildir. Bu yüzden farklı formlarda depolanan enerji, gerektiğinde yeniden elektriğe dönüştürülerek kullanılır. Elektrik enerjisinin depolanma yöntemleri ve ilgili teknolojiler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir (Beams Energy Group, 2010).

Enerji depolama teknolojisinin seçimi, sistemin kullanılacağı uygulamaya bağlıdır. Güç uygulamaları için saniye ve dakikalar mertebesindeki periyotlarda yüksek güç sağlayan, enerji uygulamaları içinse saatler ve günler mertebesindeki deşarj süresince büyük miktarda enerji sağlayan teknolojiler tercih edilir (Şekil 4.1), (Url-11).

Çizelge 4.2’de, enerji depolama teknolojilerinin kıyaslanması yapılmıştır. Bu çizelgede, ilgili uygulama için tamamen mümkün ve uygun depolama sistemleri ●, ilgili uygulamaya uygun olma durumu ○, uygulanabilir fakat ekonomik veya pratik olmama durumu ■, uygulanabilir ve ekonomik olmama durumu – işareti ile belirtilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Enerji depolama yöntemleri ve kullanılan teknolojiler (Beams Energy Group, 2010).

| <i>Enerji Depolama Şekli</i>       |                                                   | <i>Kullanılan Teknoloji</i>                                                                                                                                                          |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Elektriksel enerji depolama</b> | Magnetik enerji depolama                          | Süper-iletken magnetik enerji depolama (SMES)                                                                                                                                        |
|                                    | Elektrostatik enerji depolama                     | Kapasitörler, süper-kapasitörler                                                                                                                                                     |
| <b>Mekanik enerji depolama</b>     | Kinetik enerji                                    | Volanlar (Flywheels)                                                                                                                                                                 |
|                                    | Potansiyel enerji                                 | Pompajlı hidroelektrik santral (PHS)                                                                                                                                                 |
|                                    | Sıkıştırılmış havanın elastik potansiyel enerjisi | Sıkıştırılmış hava ile depolama (CAES)                                                                                                                                               |
| <b>Kimyasal enerji depolama</b>    | Elektrokimyasal enerji depolama                   | Konvansiyonel aküler (Kurşun asit aküler, Sodyum Sülfür bataryalar (NaS), Nikel Kadmiyum bataryalar (NiCd), Sodyum Nikel Klorit bataryalar (ZEBRA), Lityum İyon bataryalar (Li-Ion)) |
|                                    |                                                   | Akışkan aküler (Vanadyum Redoks bataryalar (VRB), Zinc Bromine bataryalar (ZnBr), Polysulphide Bromide bataryalar (PSB))                                                             |
|                                    | Kimyasal enerji depolama                          | Yakıt hücreleri (Fuel-cells)<br>Metal-hava bataryalar (Metal-air)                                                                                                                    |
|                                    | Termokimyasal enerji depolama                     | Solar-yakıt                                                                                                                                                                          |
| <b>Isıl enerji depolama</b>        | Düşük sıcaklıkta enerji depolama                  | Sulu düşük sıcaklıkta ısı enerji depolama (AL-TES)                                                                                                                                   |
|                                    | Kriyojenik enerji depolama (CES)                  |                                                                                                                                                                                      |
|                                    | Yüksek sıcaklıkta ısı enerji depolama (HT-TES)    |                                                                                                                                                                                      |



Şekil 4.1 : Güç ve enerji uygulamalarında depolama teknolojileri (Url-12).

Çizelge 4.2 : Enerji depolama teknolojilerinin kıyaslanması (Url-12).

| <i>Depolama teknolojileri</i>                 | <i>Avantajlar (kıyaslamalı)</i>               | <i>Dezavantajlar (kıyaslamalı)</i>                 | <i>Güç uygulamaları</i> | <i>Enerji uygulamaları</i> |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| <b>Pompajlı HES</b>                           | Yüksek kapasite, düşük maliyet                | Özel alan ihtiyacı                                 | -                       | ●                          |
| <b>Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama</b> | Yüksek kapasite, düşük maliyet                | Özel alan ve fosil yakıt ihtiyacı                  | -                       | ●                          |
| <b>Akışkan aküleri: PSB, VRB, ZnBr</b>        | Yüksek kapasite, bağımsız güç ve enerji oranı | Düşük enerji yoğunluğu                             | ○                       | ●                          |
| <b>Metal-air</b>                              | Çok yüksek enerji yoğunluğu                   | Elektrik şarjında güçlük                           | -                       | ●                          |
| <b>NaS</b>                                    | Yüksek güç ve enerji yoğunluğu, yüksek verim  | Yüksek üretim maliyeti, özel şarj devresi ihtiyacı | ●                       | ●                          |
| <b>Ni-Cd</b>                                  | Yüksek verim, güç ve enerji yoğunluğu         |                                                    | ●                       | ■                          |
| <b>Diğer gelişmiş bataryalar</b>              | Yüksek verim, güç ve enerji yoğunluğu         | Yüksek üretim maliyeti                             | ●                       | ○                          |

**Çizelge 4.2 (devam) : Enerji depolama teknolojilerinin kıyaslanması (Url-12).**

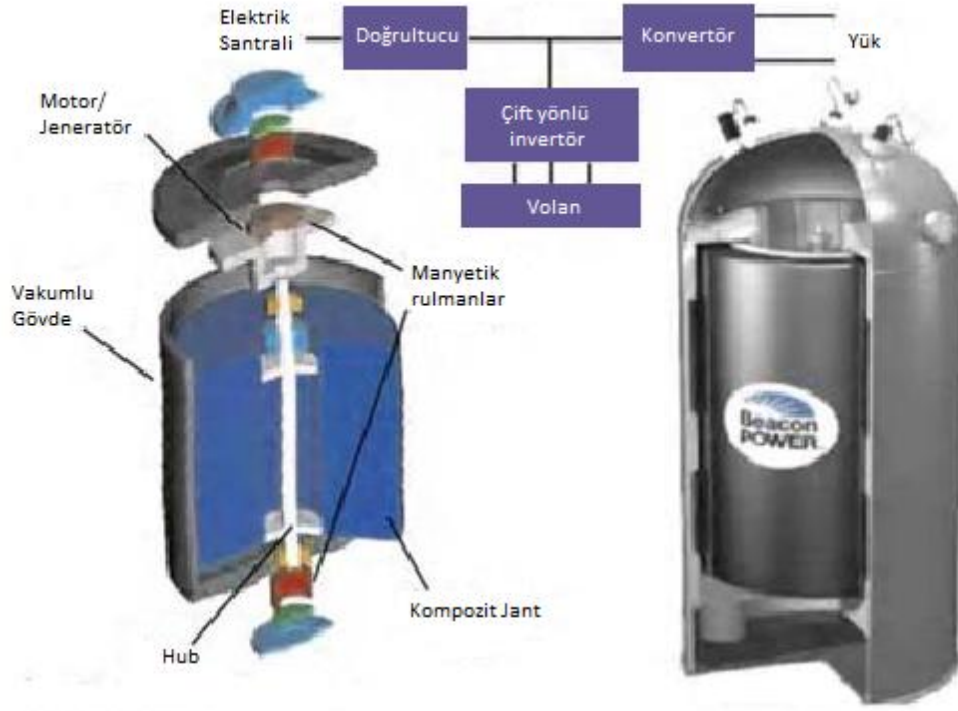
|                                               |                               |                                                |   |   |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|---|---|
| <b>Kurşun-asit akü</b>                        | Düşük maliyet                 | Derin deşarj durumunda sınırlı çevrim ömrü     | ● | ■ |
| <b>Volanlar</b>                               | Yüksek güç                    | Düşük enerji yoğunluğu                         | ● | ■ |
| <b>Süper-iletken magnetik enerji depolama</b> | Yüksek güç                    | Düşük enerji yoğunluğu, yüksek üretim maliyeti | ● | ■ |
| <b>Süper-kapasitörler</b>                     | Uzun yaşam ömrü, yüksek verim | Düşük enerji yoğunluğu                         | ● | ○ |

#### 4.1.1 Güç uygulamalarında depolama teknolojileri

Güç uygulamaları, yüksek güç ihtiyacına hızlı (genellikle bir saniyeden kısa sürede) yanıt gerektiren, uzun deşarj süresine ihtiyaç duyulmayan uygulamalardır. Çok büyük miktarlarda gücü kısa zamanda sağlayabilen volanlar, süper-kapasitörler, süper-iletken magnetik enerji depolama ve bataryalar bu tür uygulamalarda kullanılabilir (Url-11; Denholm ve diğ., 2010). Güç uygulamalarında kullanılan teknolojiler; güçteki dalgalanmaları yalnızca kısa bir süreliğine engelleyebilmeleri, kendi kendine deşarj oranlarının yüksekliği ve enerji yoğunluklarının düşüklüğü gibi sebeplerle rüzgar çiftliklerinde enerji depolama için yardımcı batarya sistemi olmadan kullanımları uygun değildir (Swierczynski ve diğ., 2010).

##### 4.1.1.1 Volanlar

Volan, enerjiyi mekanik yolla kinetik enerji şeklinde depolayan ve bir eksen etrafında dönen volan rotoru ve jeneratörden oluşan sistemdir (Şekil 4.2). Volan ne kadar hızlı dönerse o kadar enerji depolanır. Depolanmış kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürüldükçe volan yavaşlar. Yüksek güç ihtiyacına kısa sürede yanıt verebilen, yüksek verimli, uzun ömürlü, çevreye etkisi az olan sistemlerdir (Beams Energy Group, 2010; Url-11). Güçteki dalgalanmaları yalnızca kısa bir süre için engelleyebilmeleri, enerji yoğunluklarının düşüklüğü ve kendi kendine deşarj oranlarının yüksek olması sebebiyle rüzgar çiftliklerinde kullanım için uygun değildir (Swierczynski ve diğ., 2010).



**Şekil 4.2 :** Volan iç ve dış yapısı (Beams Energy Group, 2010).

#### 4.1.1.2 Süper-kapasitörler

Süper-kapasitörlerde enerji elektrik alanda, elektrostatik olarak depolanır. Kapasitörlerden farklı olarak, kapasitansın artırılması için polarize edilmiş sıvı katmanları ve yüzey alanları artırılmış gözenekli elektrotlar bulundurur. Elektrolit içine asılı, kimyasal tepkimeye girmeyen iki gözenekli levha arasında potansiyel fark oluşturularak pozitif yüklü iyonların negatif, negatif yüklü iyonların pozitif elektrota hareketi sağlanır. İki elektrot arasına yerleştirilmiş yalıtkan ayırıcı, elektrotlar arasında yük akışını önler. Süper-kapasitör enerji depolama sistemleri, uzun yaşam sürelerine, hızlı şarj ve deşarj özelliklerine sahiptir. Fakat volanlara benzer tepki karakteristikleri, kendiliğinden deşarj oranlarının yüksek olması ve düşük enerji yoğunluğuna sahip olmaları açısından rüzgar enerji sistemlerinde kullanılmaya uygun değildir (Url-13; Swierczynski ve diğ., 2010).

#### 4.1.1.3 Süper-iletken magnetik enerji depolama

Süper-iletken magnetik enerji depolamada enerji, direnç kayıplarının önlenmesi amacıyla süper-iletken malzemeden yapılmış bobinin magnetik alanı içinde depolanır. Süper-iletkenlik durumunun korunması için bobin, çok düşük sıcaklıktaki sıvının (genellikle sıvı helyum veya azot) içinde tutulur (Beams Energy Group,

2010). İhtiyaca abuk yanıt verebilir, verimleri yüksektir, fakat enerji kapasitesinin sınırlı olması ve bobin soğutma sisteminin yüksek maliyeti sebebiyle rüzgar enerji santrallerinde üretilen enerjinin depolanmasında tercih edilmemektedir (Swierczynski ve diğ., 2010; Denholm ve diğ., 2010).

#### **4.1.1.4 Bataryalar (aküler)**

Bataryalar, bir elektrolit içinde pozitif ve negatif elektrotlardan oluşan, elektrik enerjisini elektrokimyasal yolla depolayan sistemlerdir. Sisteme potansiyel fark uygulandığında elektrolit içindeki iyonlar, kendilerine zıt yükteki elektrotlara doğru hareket ederek tepkimeye girer. Tepkimeler tersinirdir ve deşarj süresince elektrotlardaki iyonların elektrolit içinde serbest kalarak zıt yönde hareket etmeleri dış yük üzerinden geçen devreyi tamamlar. Sürekli gerçekleşen kimyasal tepkimeler bataryaların ömrünü kısaltır (Beams Energy Group, 2010; Denholm ve diğ., 2010). Kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel metal hidrid, sodyum sülfür ve lityum iyon batarya gibi depolama sistemleri genellikle hızlı yanıt gerektiren uygulamalarda güç kalitesi sağlar, yüksek güç ve enerji yoğunluklarına, yüksek verime sahiptirler (Url-12).

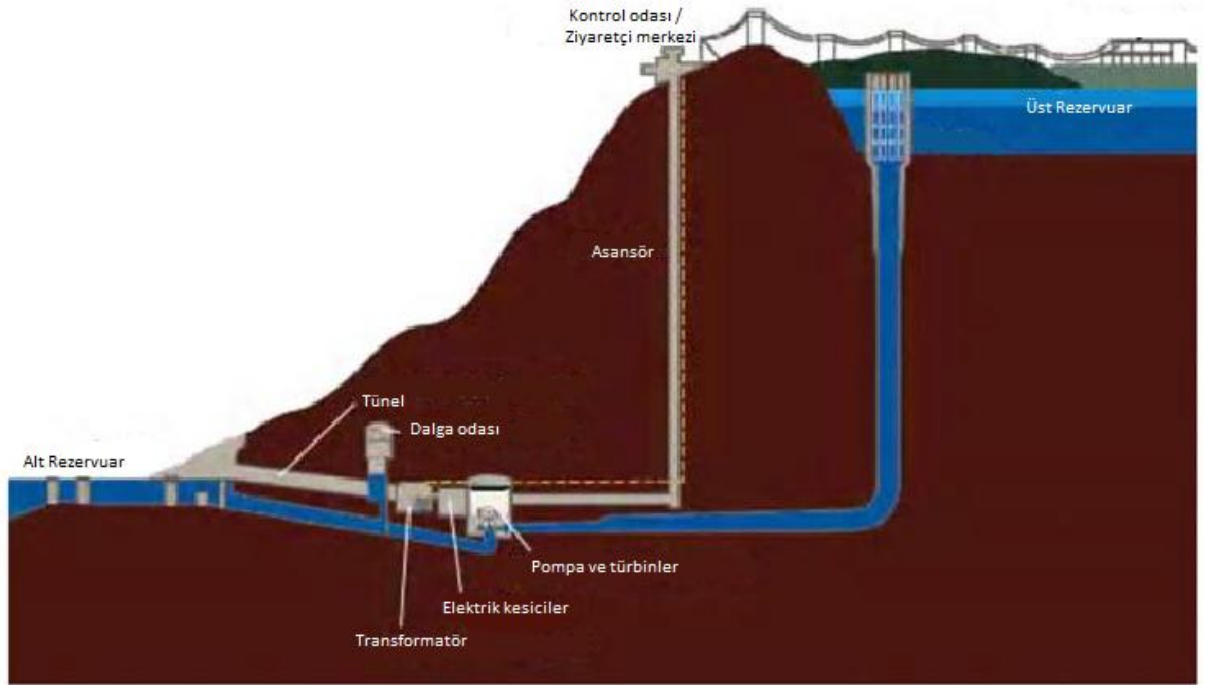
#### **4.1.2 Enerji uygulamalarında depolama teknolojileri**

Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama, pompajlı hidroelektrik santraller, akışkan aküler ve yüksek enerji bataryaları, büyük miktarda enerjiyi uzun süre depolayabilmeleri ve deşarj sürelerinin uzun olmasından dolayı MW leğinde rüzgar enerji santrallerinde üretilen enerjinin depolanması için uygundur (Swierczynski ve diğ., 2010). Bunun yanında, depolama sisteminin ihtiyaca hızlı yanıt verebilme özelliği, rüzgar enerji santrali g çıkışındaki dalgalanmaların yumuşatılmasında, üretilen ve bölgede talep edilen enerji arasındaki dengesizliğin yol açacağı gerilim ve frekans bozulmaları gibi güç kalite problemlerinin iyileştirilmesinde etkilidir. Bu yüzden, rüzgar enerjisi üretim sistemlerinde kullanılacak depolama teknolojilerinin, enerji ve g uygulamalarının her ikisine de uygun teknolojiler olmaları tercih edilir (Url-11).

##### **4.1.2.1 Pompajlı hidroelektrik santraller**

Pompajlı hidroelektrik santrallerde suyun farklı yüksekliklerde bulunan rezervuarlar arasında taşınmasıyla elektriğin üretimi ve potansiyel enerji olarak depolanması

sağlanır. Elektrik talebinin düşük olduğu zamanlarda türbinlerde üretilen fazla elektrik, suyun yüksek seviyedeki rezervuara pompalanmasını sağlar. Elektrik talebi fazla olduğundaysa, yüksek rezervuarda depolanan su, düşük seviyedeki rezervuara bırakılarak elektrik üretilir (Şekil 4.3), (Beams Energy Group, 2010). Bu sistemlerde %75'in üzerinde verime ve 20 saatin üzerinde deşarj süresine ulaşılabilir. Rezervuarlar için geniş alan gerektirmeleri ve çevreye olumsuz etkilerinin yarattığı sınırlamalara rağmen yüksek verimleri, kanıtlanmış teknolojileri ve alternatiflerine oranla maliyetlerinin düşük olması sebebiyle birçok uygulaması mevcuttur (Denholm ve diğ., 2010). Dünya çapında işletmede olan pompajlı HES'lerin toplam kurulu gücü 90 GW'ın üzerindedir (Beams Energy Group, 2010).

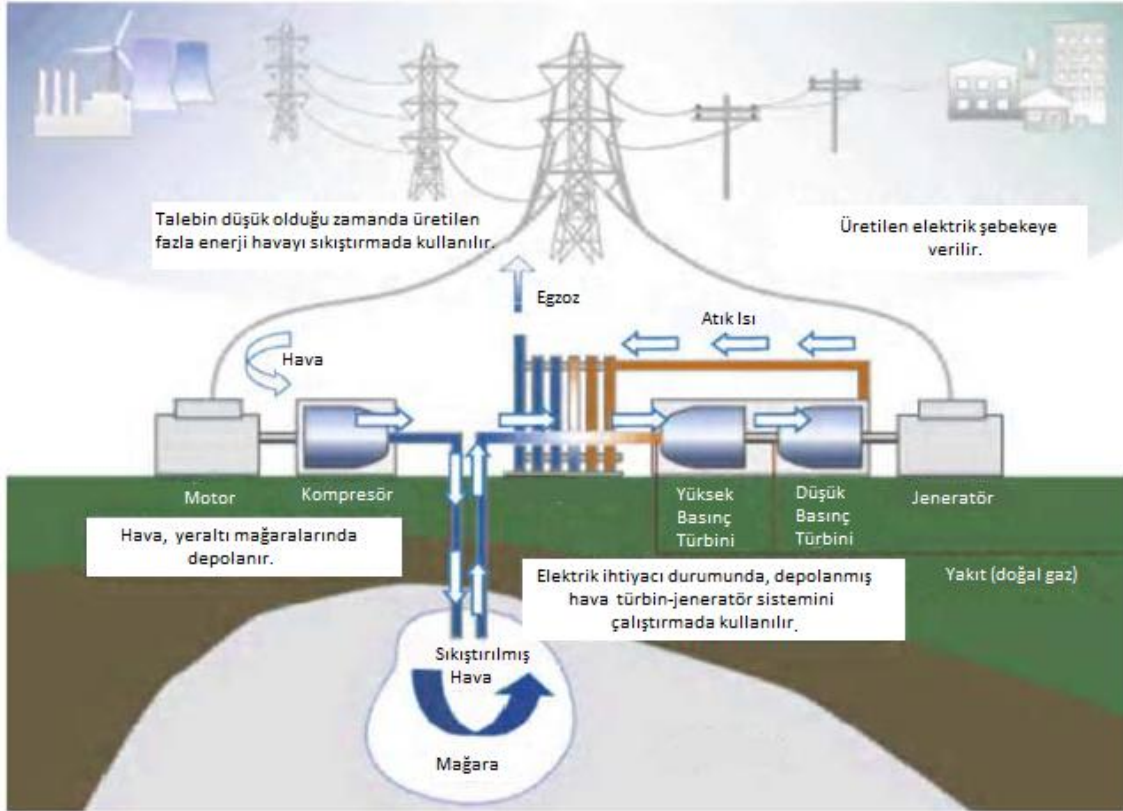


**Şekil 4.3 :** Pompajlı HES ile enerji depolama (Beams Energy Group, 2010).

#### **4.1.2.2 Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama**

Konvansiyonel gaz türbini teknolojisine dayanan enerji depolama yönteminde sıkıştırılmış havanın elastik potansiyel enerjisi kullanılır. Enerji depolanması, havanın elektrikli kompresör yardımıyla sıkıştırılarak hava sızdırmaz yer altı mağaralarında yüksek basınç altında depolanması ile gerçekleşir. Enerji ihtiyacı durumunda, sıkıştırılmış hava depolama kanallarından çekilir, ısıtılır ve yüksek basınç türbini yardımıyla genişletilir. Ardından hava, yakıtla karıştırılarak tutuşturulur, egzozu düşük basınçlı gaz türbiniyle genişletilir. Gaz türbininde yanmanın gerçekleştiği bu sistem, hibrit enerji üretim/depolama sistemi olarak

düşünülebilir. Türbinler bir elektrik jeneratörüne bağlıdır, üretilen elektrik şebekeye verilir (Şekil 4.4). Bu sistem, yüksek güç ve enerji kapasitesiyle rüzgar enerji santrallerinde üretilen enerjinin depolanmasında iyi bir çözüm olarak görülebilir. Sistemin başlıca dezavantajları ise basınçlı havanın depolanacağı yere ve fosil yakıt kullanımına olan ihtiyaçtır. Bu teknolojiye yönelik, havanın yüksek basınçla dayanıklı yer üstü tanklarda depolanması ve fosil yakıt kullanımını azaltan türbinlerin geliştirilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Denholm ve diğ., 2010; Swierczynski ve diğ., 2010). Bu teknolojinin, 110 MW Alabama’da, 290 MW Almanya’da olmak üzere iki adet ticari uygulaması mevcuttur. Ayrıca, ISEP (Iowa Stored Energy Park) projesi ile 2000 MW rüzgar gücünü destekleyecek 268 MW’lık sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sisteminin 2015 yılında bitirilmesi planlanmaktadır (Beams Energy Group, 2010).



Şekil 4.4 : Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama (Beams Energy Group, 2010).

#### 4.1.2.3 Akışkan aküler

Akışkan akülerde enerji, konvansiyonel akülerden farklı olarak, iki farklı sıvı elektrolit arasındaki tersinir reaksiyonlar aracılığıyla kimyasal potansiyel enerji şeklinde depolanır. Yüklü elektrolitler, her biri iyon değişim membranıyla ayrılmış iki yarım hücre içeren eş hücre serilerinden oluşan hücre yığınına pompalanır ve

reaksiyonlar burada gerçekleşir. Elektrolitin hacmi enerji kapasitesini, reaksiyonların gerçekleştiği hücre yığınının aktif yüzey alanı da güç kapasitesini belirler. En büyük avantajları, güç ve enerji kapasitesinin esnek şekilde ölçeklendirilebilmesidir. Derin deşarjdan olumsuz yönde etkilenmezler ve 10 saate kadar kesintisiz deşarj sağlayabilirler. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı yüksek yatırım maliyeti ve pompa sistemleri ve akış kontrolünü içeren işletme maliyetleridir.

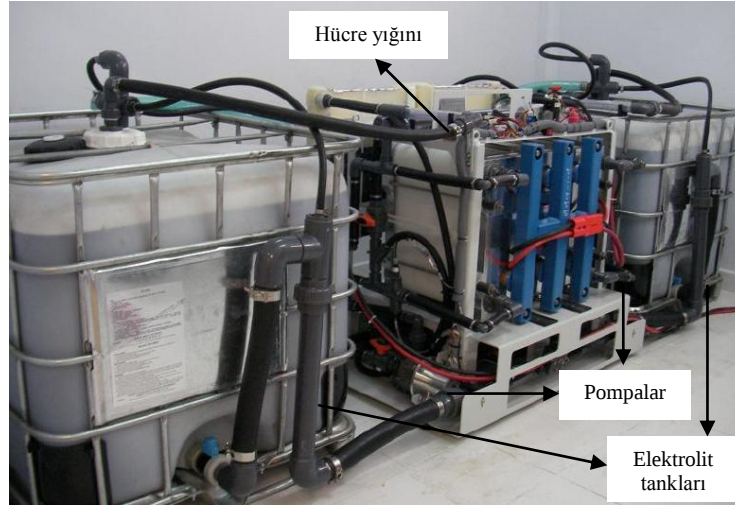
Akışkan akülerin özellikle rüzgardan elektrik üretiminin sabit ve düzgün şekilde sağlanmasına uygun oldukları düşünülmektedir. Uygulamada veya deneme aşamasında, Vanadyum Redoks (VRB), Polysulphide Bromide (PSB) ve Zinc Bromine (ZnBr) olmak üzere üç temel akışkan akü tasarımı vardır. Rüzgar enerjisi uygulamaları için çoğunlukla vanadyum redoks bataryalar önerilmektedir. VRB'lerin rüzgar güç projelerinde uygulamaları mevcuttur (Beams Energy Group, 2010; Swierczynski ve diğ., 2010).

### **Vanadyum redoks bataryalar**

Vanadyum, atomları 23 proton, 23 elektron ve 28 nötron içeren, valans elektronları birden çok kabukta bulunabilen, gümüş renkli bir geçiş metalidir. Çeliğin ve titanyumun güçlendirilmesinde, malzeme dayanıklılığının artırılmasında kullanılır. VRB sistemlerindeki önemi ise, sülfürik asit ve elektrolitler için elektron alıcısı ve vericisi kimyasal katalizör özelliği göstermesinden ve dört farklı yükseltgenme seviyesindeki vanadyum iyonunun, aynı elektrolit çözelti içinde bulunabilmesinden kaynaklanır (Url-14).

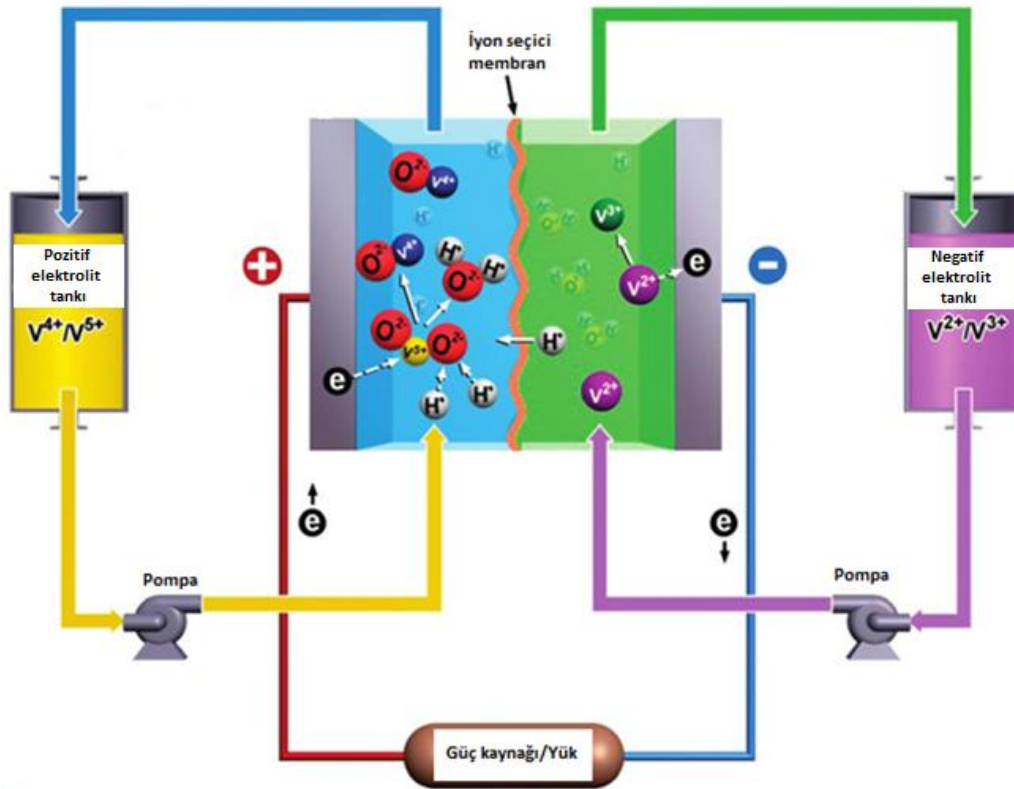
Vanadyum redoks batarya sistemi, iki elektrolit tankı; pompalar, valfler, sensörler, borular ve ısı eşanjöründen oluşan akışkan sistemi; akü kontrolörü ve kablo tertibatından oluşan elektrik sistemi ve hücre yığınının oluşur (Şekil 4.5). Sülfürik asit içerisinde çözünmüş vanadyumun farklı iyonik formlarını içeren elektrolitler, elektrokimyasal indirgenme/yükseltgenme tepkimelerinin gerçekleştiği hücre yığınının pompalanır. Proton geçirgen bir membran içeren hücre içerisinde akan çözelti arasında gerçekleşen  $H^+$  iyonu (proton) alış-verişi ile dış devreden elektron akışı sağlanır. Böylece deşarj için elektrokimyasal yol tamamlanmış olur ve doğru akım (DC) oluşur. Harici bir kaynaktan hücre yığınının akım verilmesiyle elektronların izlediği yol tersine çevrilir ve akü şarj konumuna gelir. Hücre yığınının gerçekleşen tepkimeler tamamen tersinirdir, böylece akünün şarj ve deşarjında

yüksek verimlere ulaşılır. Birden fazla hücrenin bir araya getirilmesiyle oluşan hücre yığınlarında hücre sayısı ayarlanarak istenilen çıkış gerilimi elde edilebilir. Hücre gerilimleri 1,4 – 1,6 voltur (Kılavuz, 2011; Url-15).



Şekil 4.5 : Vanadyum redoks akışkan akü (Kılavuz, 2011).

VRB’lerde enerji, vanadyum redoks iyon çiftlerinde depolanır. Sülfürik asit çözeltisi içinde negatif tankta  $V^{+2}$  ve  $V^{+3}$ , pozitif tankta oksit halde  $V^{+4}$  ve  $V^{+5}$  iyonları bulunur. Deşarj sürecindeki VRB akış şeması Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Şarj sürecinde ise elektronlar bunun tersi yönde hareket eder.



Şekil 4.6 : VRB akış şeması (Url-16).

Şarj vedeşarj süreçlerinde yarı-hücrelerde gerçekleşen redoks (indirgenme/yükseltgenme) tepkimeleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3 : VRB redoks tepkimeleri (Url-17).**

| Elektrot | Şarj                                                                          | Deşarj                                                                        |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Pozitif  | $\text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+$ | $\text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$ |
| Negatif  | $\text{V}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{V}^{2+}$                        | $\text{V}^{2+} \rightarrow \text{V}^{3+} + \text{e}^-$                        |

VRB'lerde, iki elektrolitik sıvı arasında madde alış verişi gerçekleşmediğinden, reaksiyonlar sonrasında tanklardaki içerik aynı kalır. Elektrolitlerin kaza sonucu karışması durumunda dahi batarya kalıcı olarak zarar görmez. Bu sistemlerde yalnızca elektrolit tankları büyütülerek yüksek miktarda (MWh mertebesinde) enerji depolanabilir, hücre yığınlarının eklenmesiyle sistemin güç çıkışı artırılabilir. Aküler %100 derindeşarjdan zarar görmez, uzun süre %100deşarj durumunda bırakılabilirler. Şarj için bir güç kaynağının bulunmadığı durumlarda, tanklara şarjlı sıvıların doldurulmasıyla şarj edilebilirler. Yükteki değişimlere çok hızlı cevap verebilirler ve aşırı yüklenme kapasiteleri oldukça fazladır. University of South Wales (UNSW)'de yapılan araştırmalar, VRB'lerin yükte %100 oranında değişikliğe yarım milisaniyenin altında bir sürede cevap verdiğini ve 10 s boyunca %400 aşırı yüklenmelere dayandığını göstermiştir. Pratikteki uygulamalarında çevrim verimleri %65-75 civarındadır (Url-17). 13000 çevrim sayısının üzerinde, 10 yıl boyunca şarj vedeşarj edilebilirler. Kendiliğindendeşarjları oldukça düşüktür, uzun süre tam şarj konumunda kalabilirler. Bakımları kolay ve bakım masrafları düşüktür (Url-18).

VRB'lerin 15-25 Wh/kg elektrolit'lik enerji yoğunlukları diğer akü teknolojilerine göre düşük olduğundan (kurşun-asit akülerde 30-40 Wh/kg; lityum-iyonda 80-200 Wh/kg), aynı miktar enerjiyi sağlamak için kapladıkları alan ve ağırlıkları daha fazladır. 5 kW'tan düşük güçte ve 10 kWh'ten az enerji depolanması gereken sistemlerde kullanımı uygun değildir. 6-8 saatin üzerinde enerji yedeklemesi gerektiren durumlarda kullanılabilirler. Pazardaki taleplerinin henüz yeterince yüksek olmamasından dolayı çevrim başına birim enerji başına maliyetleri 0.08\$ / kWh gibi yüksek değerlerdedir (Kılavuz, 2011). Çalışma sıcaklıkları düşüktür (0 ° - 35°C) ve ortamdaki sıcaklık değişimlerine duyarlıdır (Url-18).

VRB sistemleri, yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyonu da içeren küçük ve büyük ölçekte enerji depolama için uygundur. Cevap verme hızları sayesinde kesintisiz güç kaynağı uygulamalarında; elektriğin ucuz olduğu gece vaktinde

depolanıp, gündüz pahalı olduğu zaman dilimlerinde kullanılması ile yük dengelemede; rüzgar ve güneş gibi kaynaklardan elde edilen değişken enerjinin şebeke entegrasyonu için düzenlenmesinde; şarj-deşarj hücre sayısı değiştirilerek ve anahtarlama ile frekans sınırlaması yapılarak DC/DC, AC/DC, DC/AC ve AC/AC dönüştürücüleri olarak; elektrolit değişimiyle şarj edilebilme özellikleri sayesinde elektrikli araçlarda; şebekeden bağımsız sistemlerde (baz istasyonlarına enerji sağlamada, şebekeden bağımsız rüzgar ve güneş sistemlerinin kararlılığının sağlanmasında, jeneratör gerektiren sistemlerde yakıt tasarrufu yapmak için) kullanımları mümkündür (Kılavuz, 2011).

2005 yılında NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), rüzgar enerji santrallerinde üretilen enerjinin depolanmasında dünyadaki ilk büyük ölçekli projeyi gerçekleştirmiştir. 32 MW güçte kurulu bir rüzgar çiftliğine entegre edilen 4 MW nominal güçte 90 dakika kesintisiz enerji sağlayabilen vanadyum redoks batarya sistemi, 3 yıl boyunca rüzgar çiftliğinin kesintili güç çıkışını düzeltmek için kullanılmıştır. Japonya'da Hokkaido Adası'nda gerçekleştirilen sistemin bu süre içindeki çevrim sayısı 270.000'in üzerindedir (Beams Energy Group, 2010). Rüzgar enerji sistemlerinde kullanılan diğer VRB depolama sistemleri küçük ölçekli uygulamalardır. Bunlar, Tazmanya Huxley Tepesi Rüzgar Tarlası'nda 200 kW'lık, Danimarka RISO laboratuvarlarında test amaçlı kurulan 15 kW x 8h'lık ve Japonya Tomari Rüzgar Tepeleri'nde 275 kW'lık çıkış dengeleyici uygulamalardır (Kılavuz, 2011).

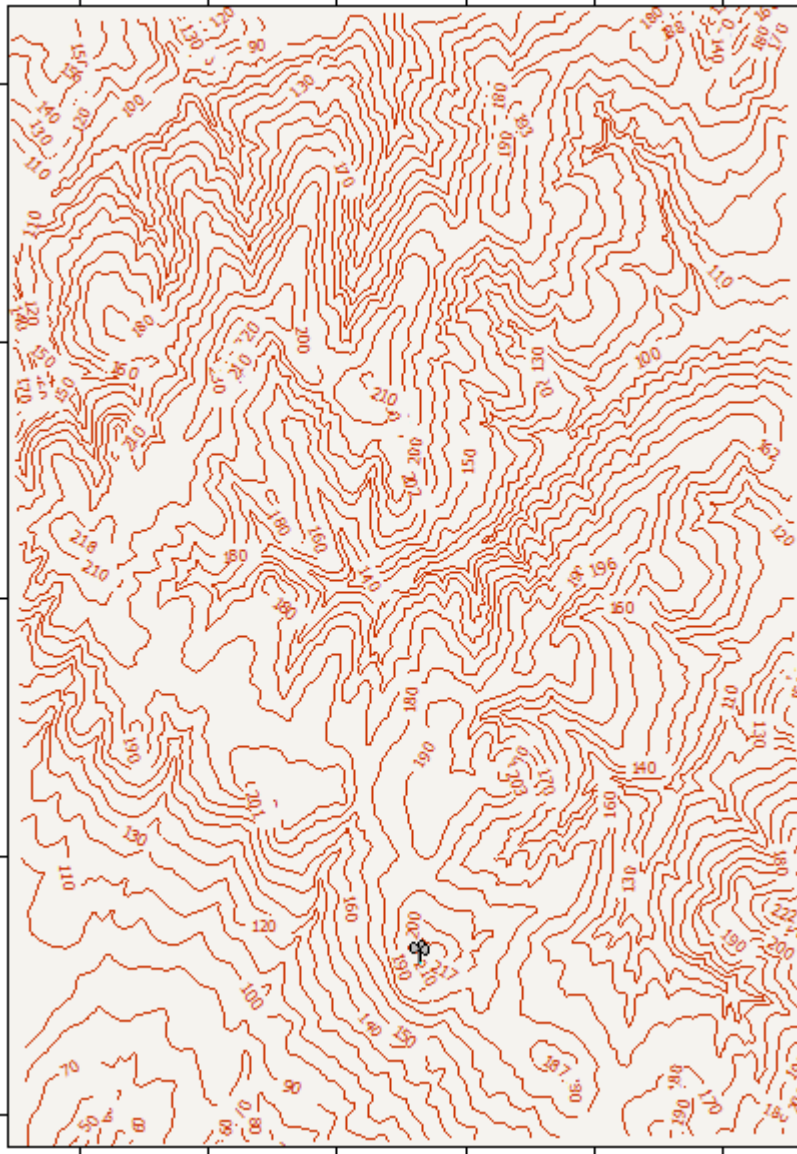
## **5. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİN VANADYUM REDOKS BATARYALARDA DEPOLANMASI**

### **5.1 Rüzgar Tarlası Tasarımı**

Bu tez çalışmasında, tasarlanan bir rüzgar tarlasının vanadyum redoks akışkan akü enerji depolama sistemleriyle desteklenmesi durumu için enerji analizleri yapılmıştır. Bu analizler için seçilen bir bölgede yapılan ölçümlerden edinilen iki yıllık rüzgar verisi ve bölgenin topografik haritası, bir rüzgar atlası analiz ve uygulama programı olan WAsP®'ta işlenerek farklı rüzgar çiftliği konfigürasyonları denenmiş ve en yüksek enerji üretim tahmini sonucunu veren konfigürasyon, VRB enerji depolama sistemi uygulamasında kullanılmak üzere seçilmiştir.

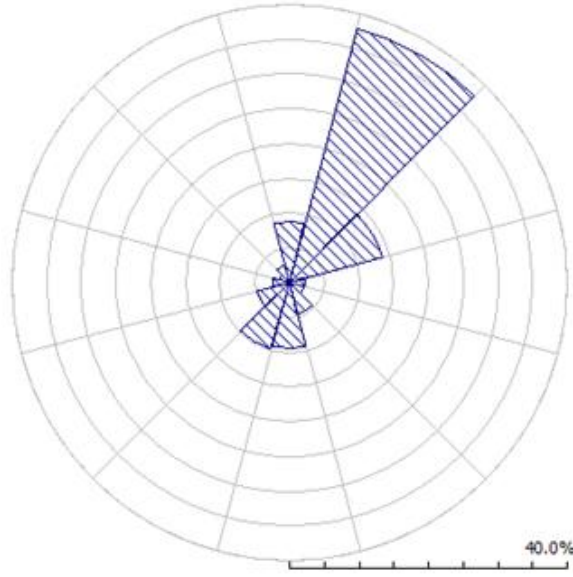
Danimarka Riso Ulusal Meteoroloji Laboratuvarı tarafından geliştirilen WAsP® (Wind Atlas Analysis and Application Program); bir bölgeye ait rüzgar atlasının oluşturulması ile rüzgar iklimi, türbin ve rüzgar çiftliklerinin enerji üretim tahmininde kullanılan bir PC programıdır (Url-21). WAsP®'ta rüzgar atlasının oluşturulup enerji üretim tahminlerinin yapılabilmesi için bölgede gerçekleştirilen ölçümlerden edinilen rüzgar verisi, bölgenin sayısallaştırılmış topografik haritası, engel ve pürüzlülük bilgileri ve türbin güç eğrilerinin girilmesi gereklidir. Bunun için WAsP® Map Editor programı kullanılarak bölgenin 1/25000 ölçekli topografik haritasının eş yükselti eğrileri üzerinden, dijital arazi haritası oluşturulmuştur. Deniz seviyesinden yükseklikleri gösteren dijital harita ve rüzgar ölçüm direğinin yeri Şekil 5.1'de görülmektedir. 60 m boyundaki ölçüm direği, deniz seviyesinden 210 m yüksekte bulunmaktadır.

Rüzgar çiftliğinin kurulması planlanan tepede, yerden 60m yükseklikte yapılan ölçümlerden elde edilen iki yıllık rüzgar hızı ve yön verisinden, programın OWC Wizard aracı ile bölgeye ait rüzgar iklim bilgisi elde edilmiştir. Ölçüm yapılan noktadaki rüzgar iklim bilgisinin bölgenin dijital haritasındaki farklı yüksekliklere ekstrapolasyonu ve bölgenin pürüzlülük bilgileri ile de bölgenin rüzgar atlası oluşturulmuştur. Gözlemlenmiş iklim bilgisinden elde edilen sonuçlara göre

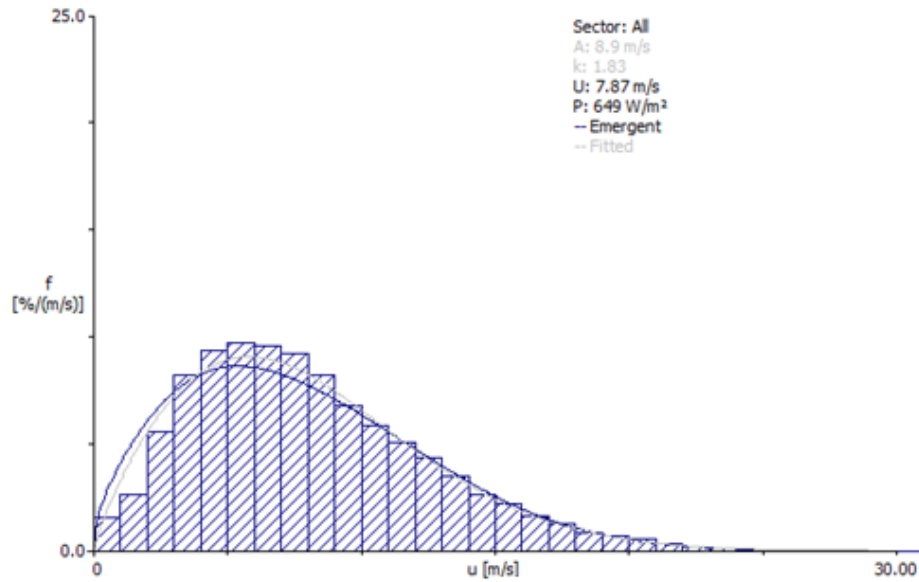


**Şekil 5.1 :** Rüzgar ölçümü yapılan bölgenin dijital haritası.

bölgedeki hakim rüzgar yönü  $15^{\circ}$ - $45^{\circ}$  sektörüdür (Şekil 5.2). Şekil 5.3'te ölçüm noktasındaki rüzgarın, tüm sektörlerdeki rüzgar hızı – frekans dağılım grafiği görülmektedir. Bu dağılımda ölçek parametresi (A) 8,9 m/s; şekil parametresi (k) 1,83; ortalama rüzgar hızı 7,87 m/s ve güç yoğunluğu  $649 \text{ W/m}^2$  olarak bulunmuştur. Ekonomik RES yatırımı için 50m'de yapılan ölçümlerden 7 m/s ve üzerinde rüzgar hızı gerektiği bilgisi göz önüne alındığında bölgenin, RES kurulumu için iyi bir rüzgara sahip olduğu söylenebilir (Url-22).



**Şekil 5.2 : Sektörlere göre rüzgar esiş sıklığı.**



**Şekil 5.3 : Rüzgar hızı - frekans dağılım grafiğı.**

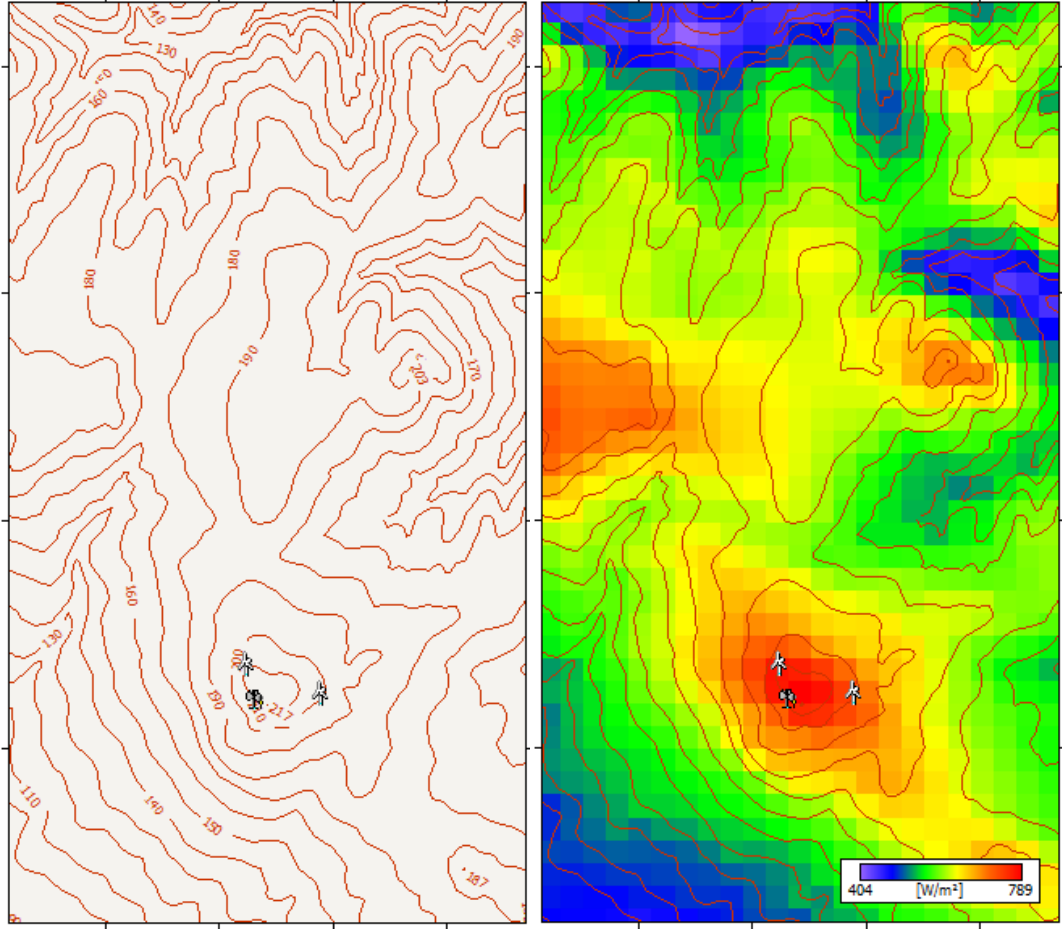
Rüzgar çiftliğı kurulması planlanan bölgeye ait rüzgar verisi değerlendirildikten sonra türbinlerin saha üzerinde en yüksek enerji üretimi elde edilecek şekilde yerleştirilmesi (mikro-konuşlandırma) gerekmektedir. Mikro-konuşlandırma için farklı model türbinlerin WAsP® Turbine Editor'de oluşturulan güç eğrileri kullanılarak üç farklı rüzgar çiftliğı tasarımı denenmiştir. Türbinler için en uygun yerleşim noktaları belirlenirken; türbinlerin birbirlerinin rüzgarını etkilemeyecek ya da en az derecede etkileyecekleri ve rüzgar güç yoğunluğunun yüksek olduğu noktaların seçilmesine, hakim rüzgar yönüne dik doğrultuda dizilimlerine ve Rüzgar Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularının Değerlendirilmesi Hakkında Yönetmelik'te

belirtilen, lisans başvurusunda uyulması gereken türbinler arası mesafe şartlarına dikkat edilmiştir. Bu yönetmeliğe göre, her bir türbin koordinatı merkez alınarak; uzun çapı hakim rüzgar yönüne paralel  $7 \times D$  (D: metre cinsinden türbin rotor çapı) ve kısa çapı bu doğrultuya dik olarak  $3 \times D$  uzunluğunda olan elipsler çizildiğinde, her bir elips içinde sadece bir adet rüzgar türbini olması istenir (T.C Resmi Gazete S.27049, 2008). Bu konfigürasyonlarda kullanılan türbinler ve özellikleri, rüzgar çiftlikleri nominal güçleri ve WAsP® ile hesaplanan yıllık enerji üretimleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1 : Rüzgar çiftliği konfigürasyonları.**

| Rüzgar Çiftliği Konfigürasyonu      | Konfigürasyon 1                                                                                          | Konfigürasyon 2                                | Konfigürasyon 3                                                                               |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Türbinler ve Özellikleri            | 1xEnercon E-82 E3<br>3 MW (84,6 m kule yüksekliği)<br>1xEnercon E-82 E2<br>2 MW (84,6 m kule yüksekliği) | 2xNordex N100<br>2.5 MW (80 m kule yüksekliği) | 1xVestas V112<br>3 MW (84 m kule yüksekliği)<br>1xVestas V90<br>1,8 MW (80 m kule yüksekliği) |
| Rüzgar Çiftliği Nominal Gücü        | 5 MW                                                                                                     | 5 MW                                           | 4,8 MW                                                                                        |
| Yıllık Net Enerji Üretim Tahminleri | 18,432 GWh                                                                                               | 16,342 GWh                                     | 21,197 GWh                                                                                    |

Konfigürasyonların yıllık net enerji üretim tahminleri karşılaştırıldığında, oluşturulan rüzgar çiftliği simülasyonunda en yüksek enerji üretimini sağlamak amacıyla Vestas türbinlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 5.4’te 3 numaralı konfigürasyona ait türbinlerin harita üzerindeki yerleşimleri, rüzgar ölçüm direğine göre konumları, deniz seviyesinden yükseklikleri ve bölgedeki güç yoğunluk değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. V112 ve V90 türbinleri deniz seviyesinden sırasıyla 210m ve 198m yüksekliklere yerleştirilmiştir. Türbin göbek yüksekliklerindeki ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunlukları V112 türbini için 8,54 m/s ve 793 W/m<sup>2</sup>, V90 türbini için 8,28 m/s ve 732 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Türbinler, ölçüm direğine yakın ve aralarındaki mesafe gözetilerek rüzgar güç yoğunluğundan en yüksek seviyede faydalanabilecekleri şekilde konuşlandırılmıştır.



Şekil 5.4 : Mikro-konuşlandırma.

## 5.2 VR Akışkan Akülü ve Aküsüz Sistemlerin Enerji Analizleri

Bu tez çalışması için tasarlanan rüzgar tarlasında, biri 1,8 MW diğeri 3 MW olmak üzere iki adet türbin kullanılmıştır. Her iki model türbinin rüzgar tarlasında birer ve ikişer adet kullanılmasıyla ve iki türbinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan VRB enerji depolamalı ve enerji depolamasız sistemler için enerji üretim - depolama hesapları ve analizleri yapılmıştır. Bu analizler için 14 farklı sistem oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 5.2.1 VR akışkan akülü, şebekeden bağımsız sistemler

Bu sistemlerde, rüzgar türbinleri ile üretilen enerji aküde depolanmakta ve yükün beslenmesi aküden karşılanmaktadır. Bu sistemleri tanımlayan grafiklerde net enerji, depolanması için aküye verilen ve aküden çekilen enerji arasındaki farkı vermektedir. Üretilen ve talep enerjiler hesaplanırken akünün şarj ve deşarj verimleri dikkate alınmıştır. Buna göre;

$$\text{Net Enerji} = \text{RT ile üretilen enerji} * \text{şarj verimi} - \text{Talep enerji} * (1/\text{deşarj verimi}) \quad (5.1)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Akü sisteminin şarj vedeşarj verimleri %85 olarak alınmıştır. Vanadyum redoks bataryalarda %65-75 arasında değişen çevrim verimi, bu sistem için ~%72'dir.

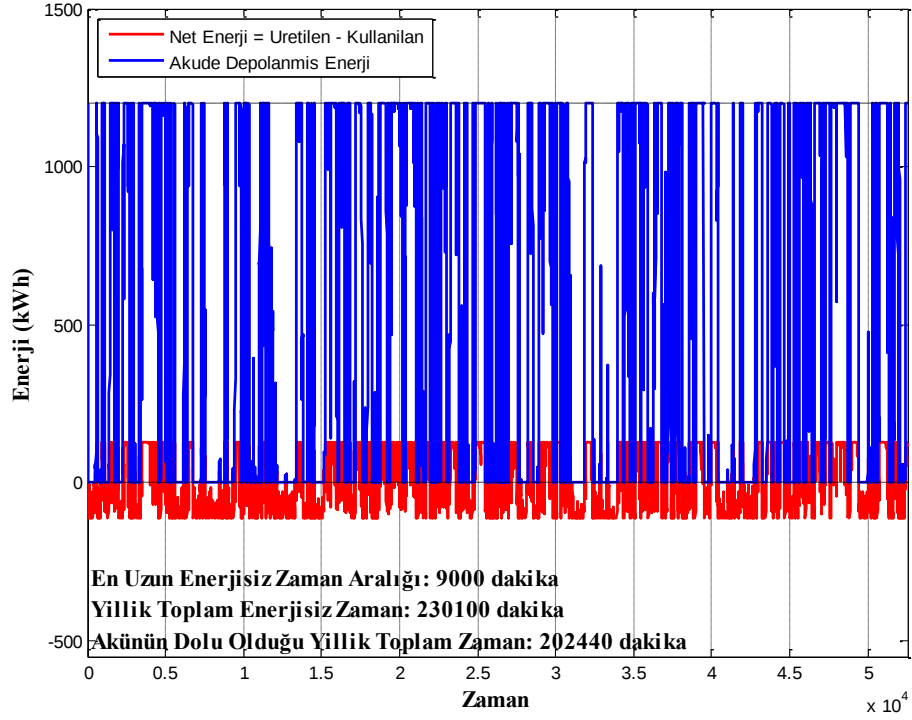
Akü, net enerji değeri sıfırdan büyük olduğunda şarj, sıfırın altında isedeşarj durumundadır. Net enerji sıfıra eşitse, aküye verilen ve aküden çekilen enerji birbirine eşittir ve akünün doluluk değeri sabit kalmaktadır. Akünün dolu olduğu sürelerde net enerjinin sıfırdan büyük olması durumunda aküye kapasitesi üzerinde enerji yüklemesi yapılamamaktadır. Net enerjinin negatif değer aldığı ve aynı zaman aralığında akünün de boş olduğu durumlar enerjisiz zaman aralıklarını vermekte ve bu durumlarda talep edilen güç karşılanamamaktadır. Bu sistemler için hesaplanan en uzun enerjisiz zaman aralıkları, yıllık toplam enerjisiz zaman ve akünün dolu olduğu yıllık toplam zaman değerleri dakika cinsinden ilgili grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde x-eksenleri, her bir işaretin 10'ar dakikalık ortalamaları göstermesinden dolayı, kaçınıcı 10 dakikada bulunulduğunu belirten zaman dilimlerini; y-eksenleri ise kWh cinsinden enerji değerlerini göstermektedir.

#### 5.2.1.1 Sistem 1: 1200 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim

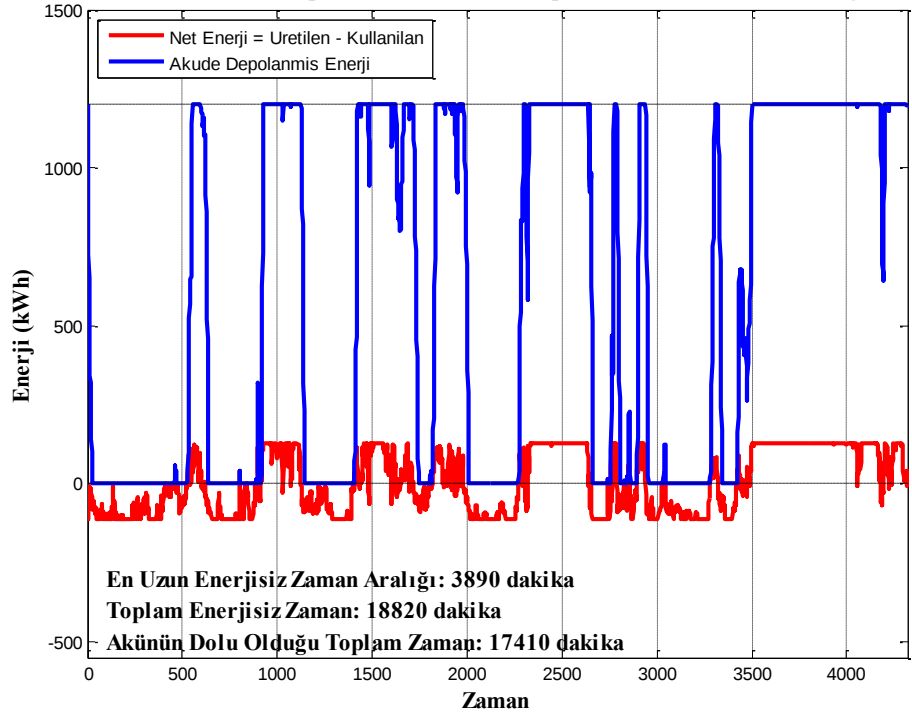
600 kW'lık sabit bir yükü besleyen, 1200 kWh akü kapasitesine sahip, şebekeden bağımsız bir sistemde üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji grafikleri Şekil 5.5-5.9'da verilmiştir. Türbin gücünün artmasıyla meydana gelen net enerjideki artış, enerjisiz zamandaki azalma ve akünün dolu olduğu zamandaki artış, ilgili grafiklerin karşılaştırılmasıyla görülebilmektedir.

Şekil 5.5'te, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini kullanılarak elde edilen yıllık enerji üretim ve depolama grafiğı (üstte) ve rüzgar verisinin ilk 1 aylık dönemi için hazırlanan grafik (altta) gösterilmiştir. Şekil 5.6'da, 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen yıllık enerji üretim ve depolama grafiğı verilmiştir.

**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**

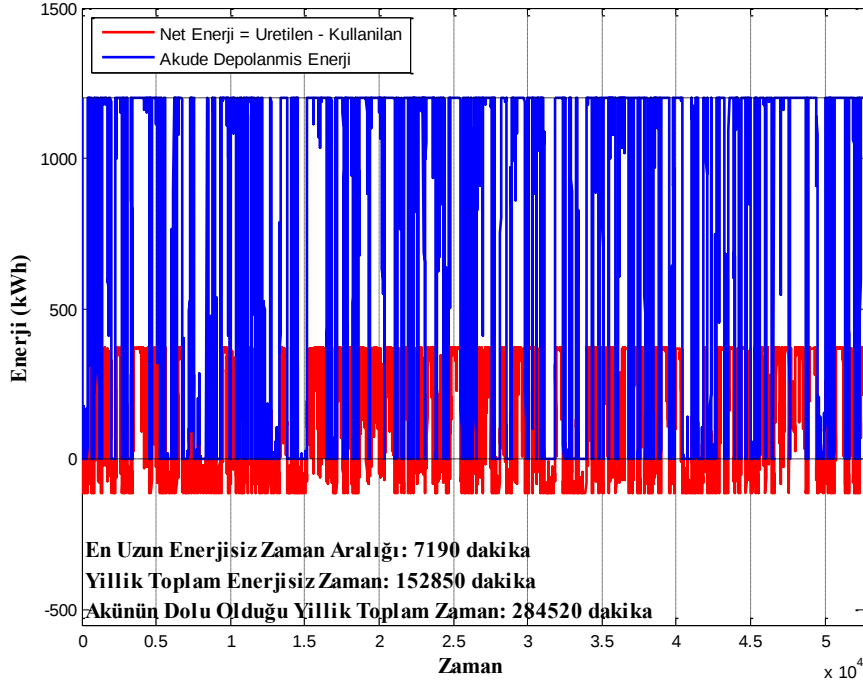


**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



**Şekil 5.5 :** Sistem 1’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen yıllık grafik (üstte) ve 1 aylık grafik (altta).

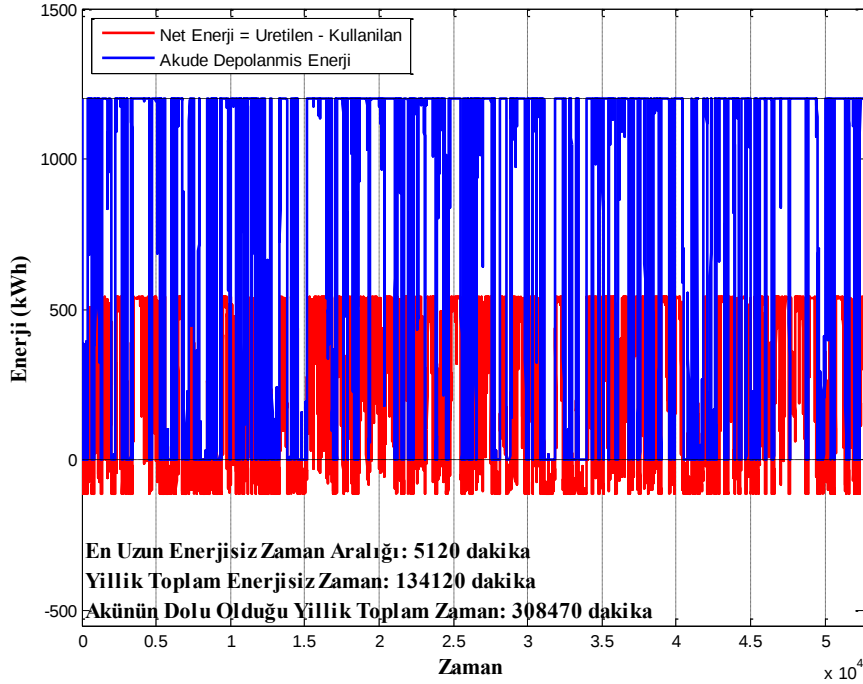
**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



**Şekil 5.6 :** Sistem 1’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

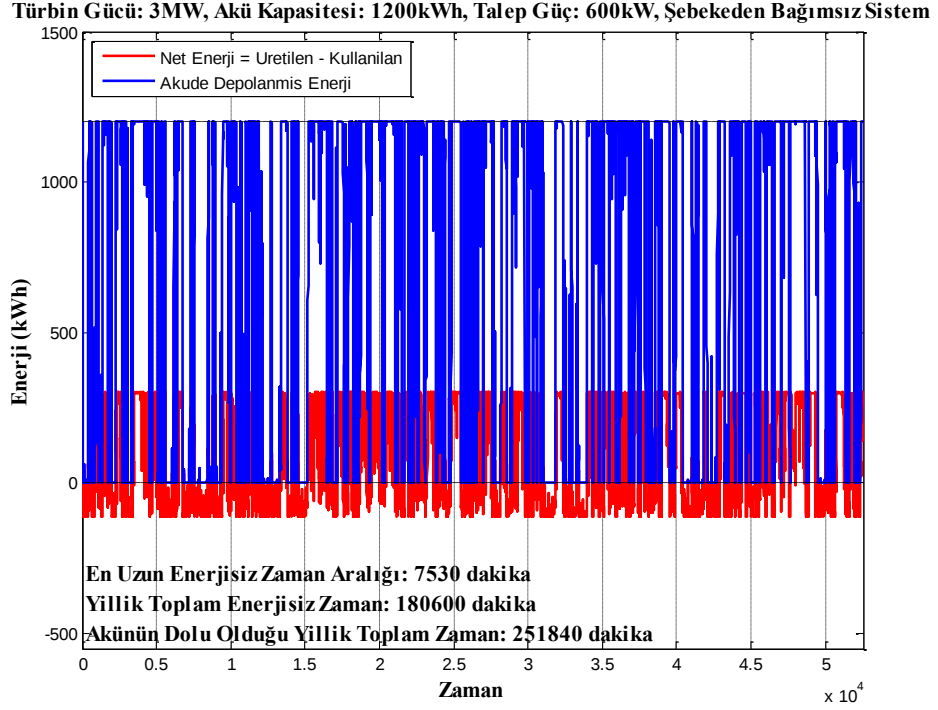
Şekil 5.7’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**

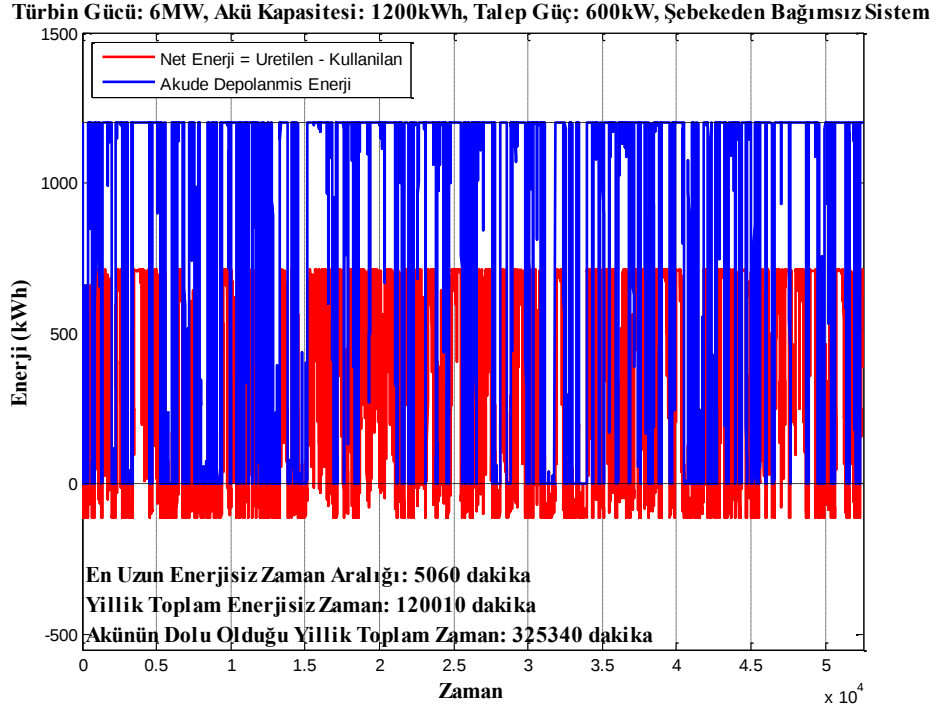


**Şekil 5.7 :** Sistem 1’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.8’de,1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.9’da 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.



**Şekil 5.8 :** Sistem 1’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

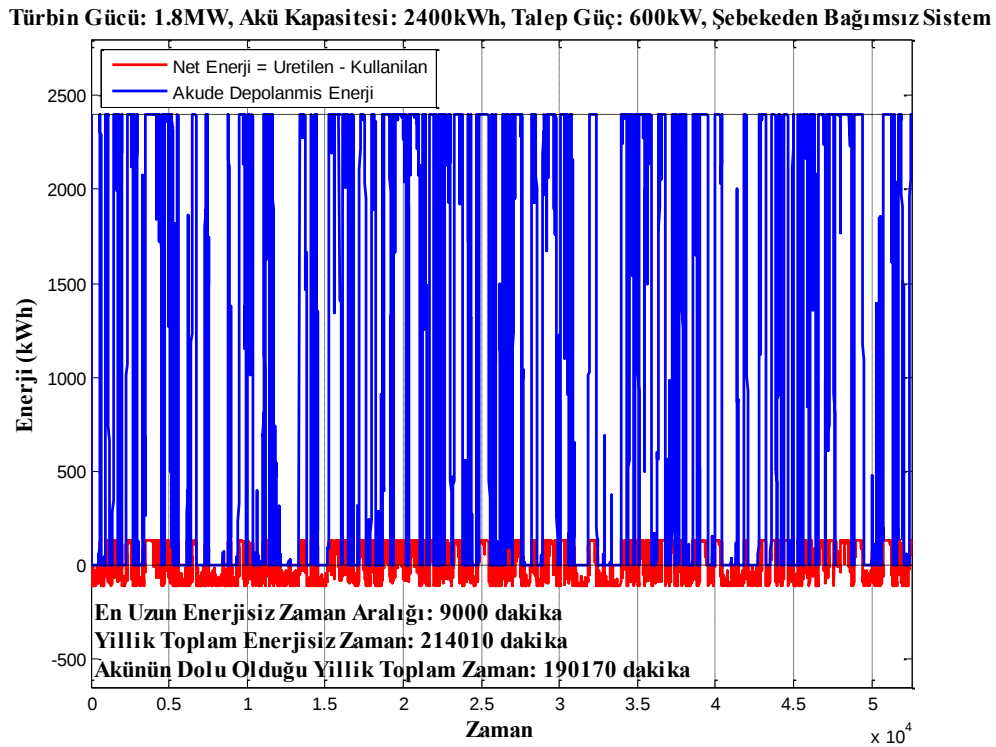


**Şekil 5.9 :** Sistem 1’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

### 5.2.1.2 Sistem 2: 2400 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim

Bu sistem için yalnızca 1 numaralı sistemdeki akü kapasitesi iki katına (2400 kWh) çıkarılarak üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

Şekil 5.10'da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.11'de 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

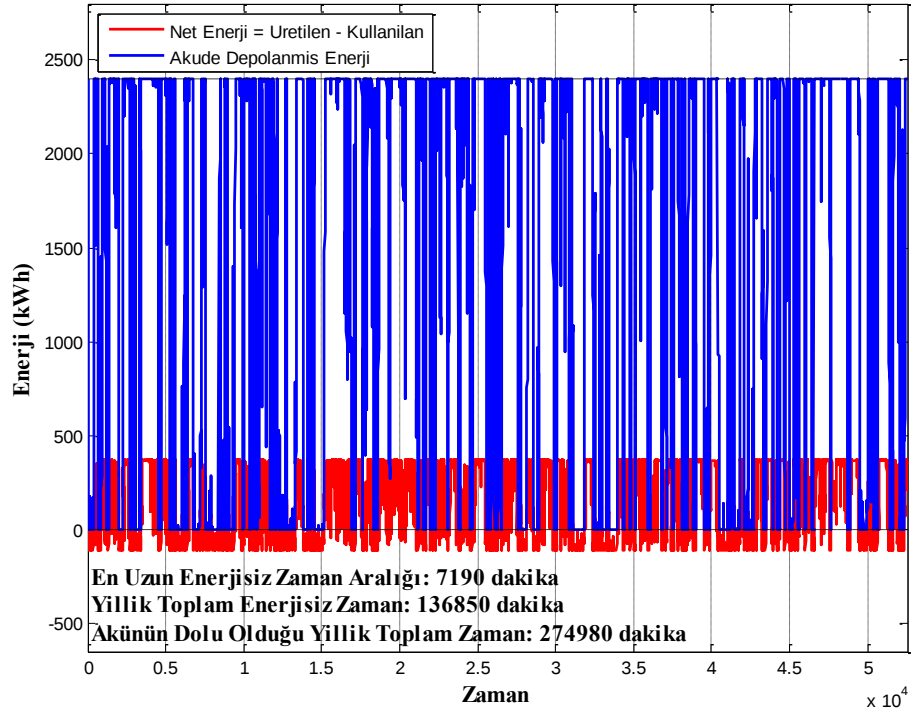


**Şekil 5.10 :** Sistem 2’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.12’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

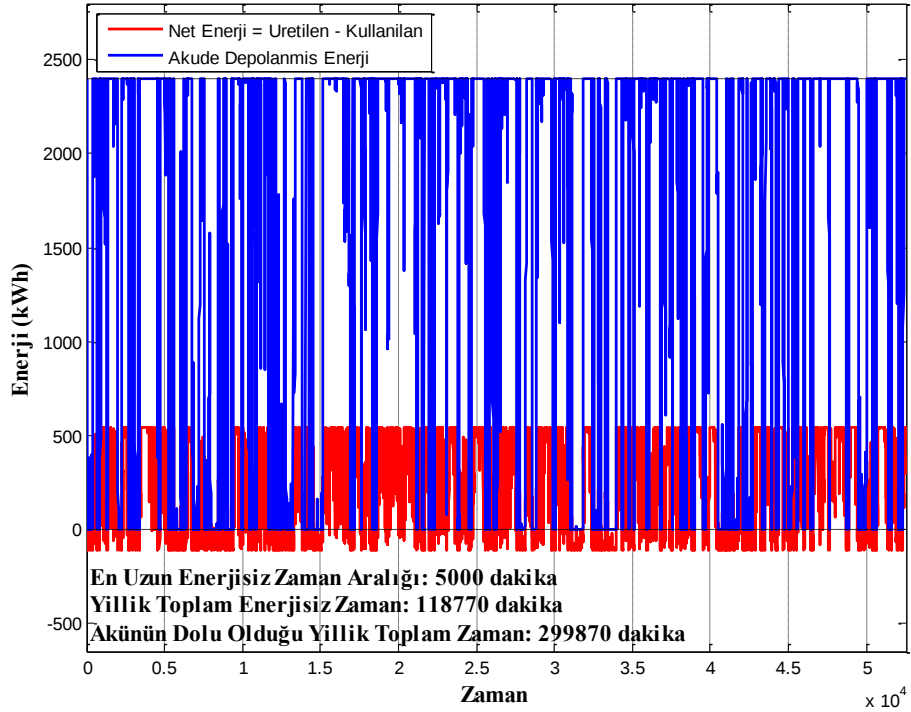
Şekil 5.13’de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.14’te 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



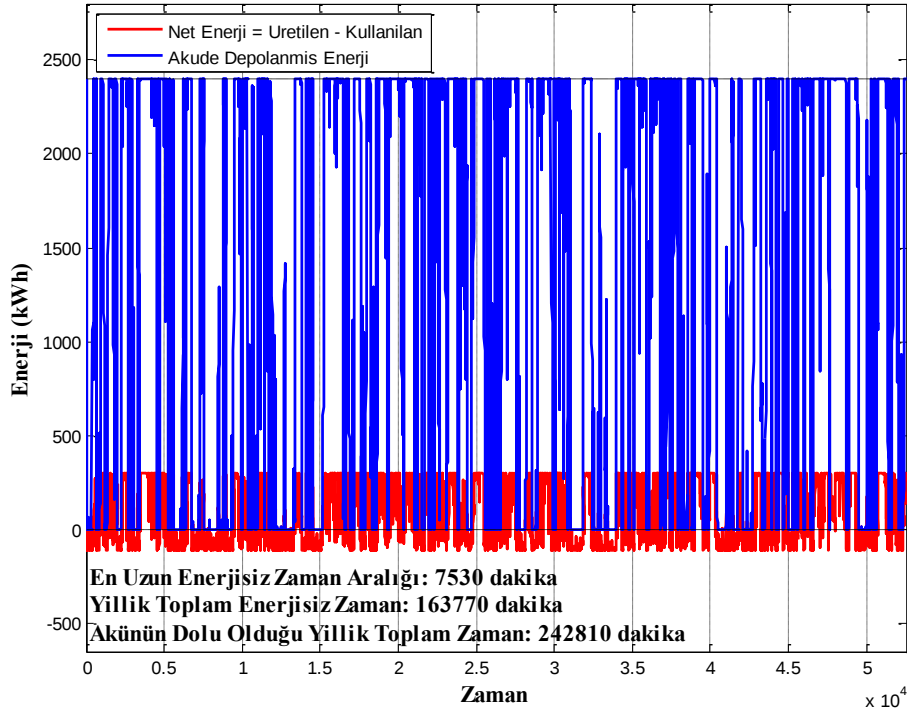
**Şekil 5.11 :** Sistem 2’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



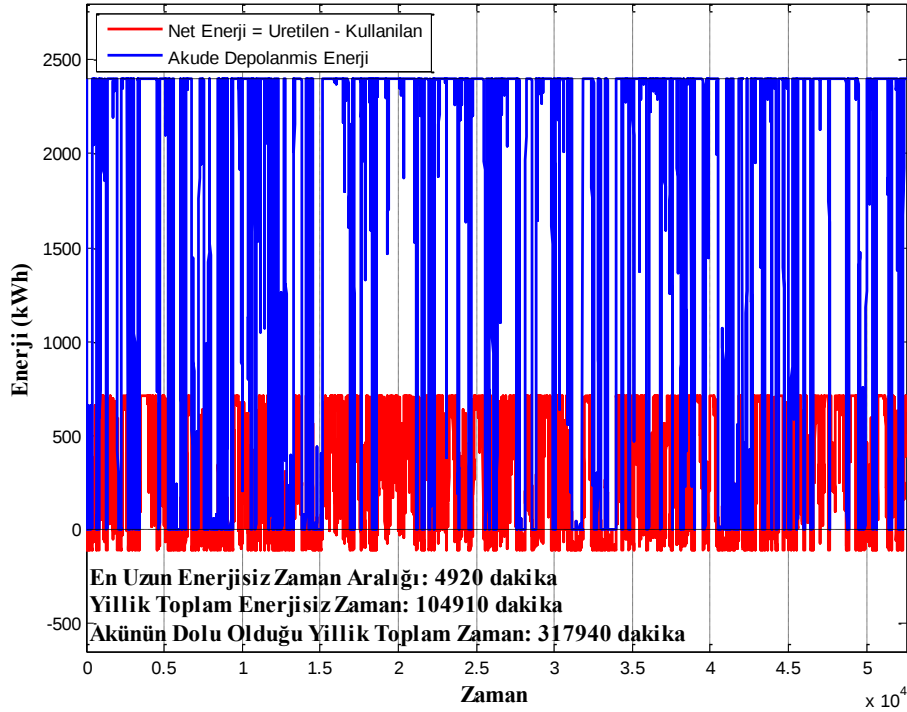
**Şekil 5.12 :** Sistem 2’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



**Şekil 5.13 :** Sistem 2’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 600kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**

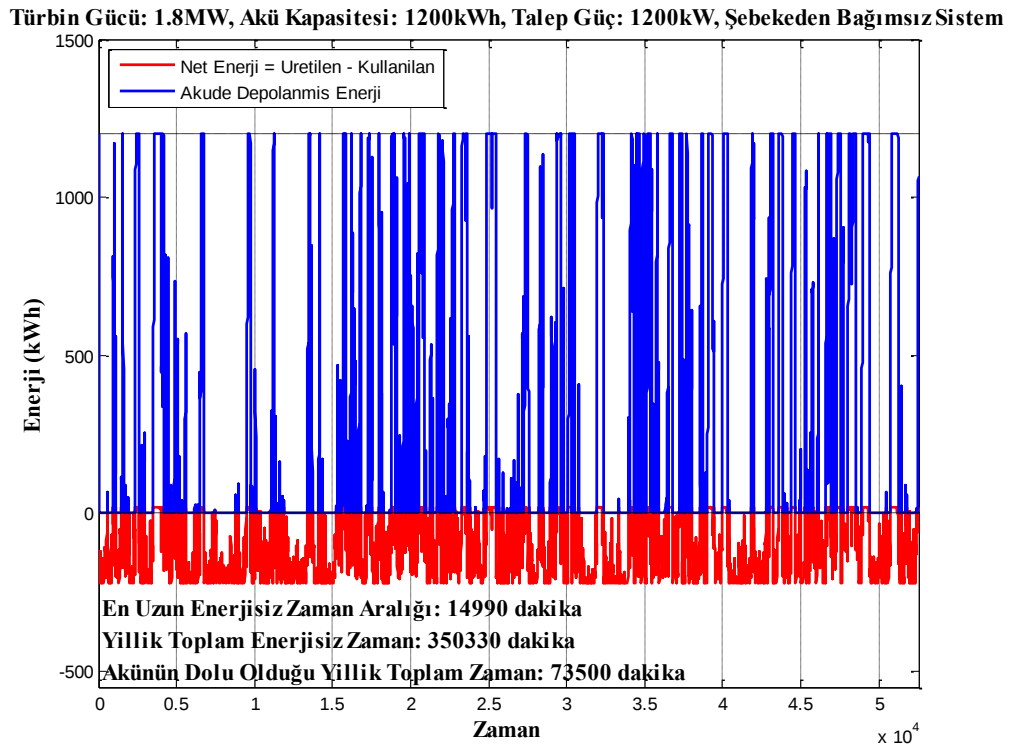


**Şekil 5.14 :** Sistem 2’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

### 5.2.1.3 Sistem 3: 1200 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim

Bu sistem için yalnızca 1 numaralı sistemdeki talep edilen güç iki katına (1200 kW) çıkarılarak üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

Şekil 5.15'te, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.16'da 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

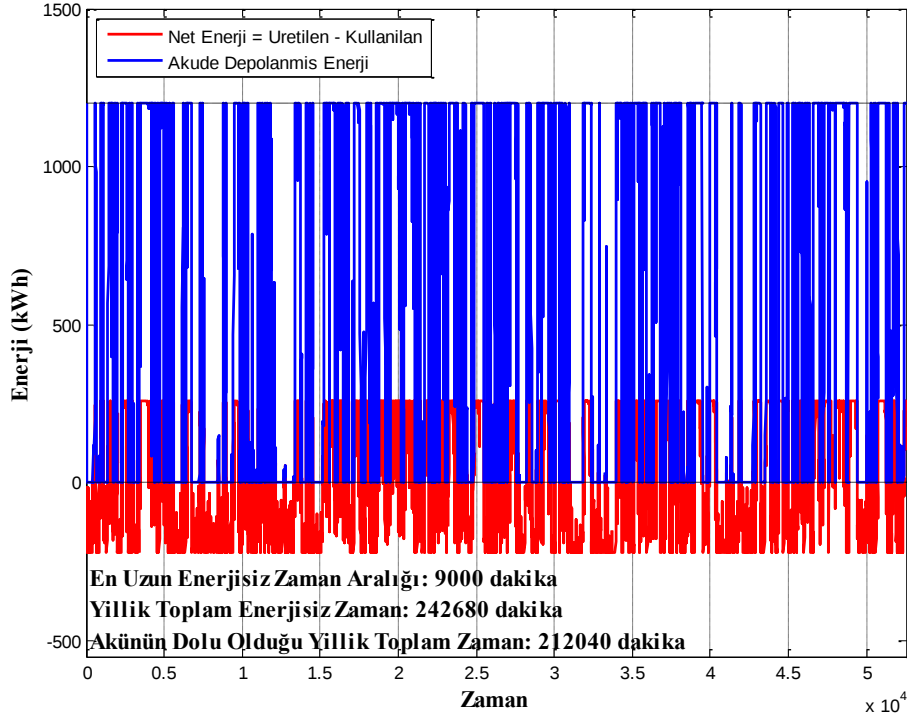


**Şekil 5.15 :** Sistem 3'te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.17'de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

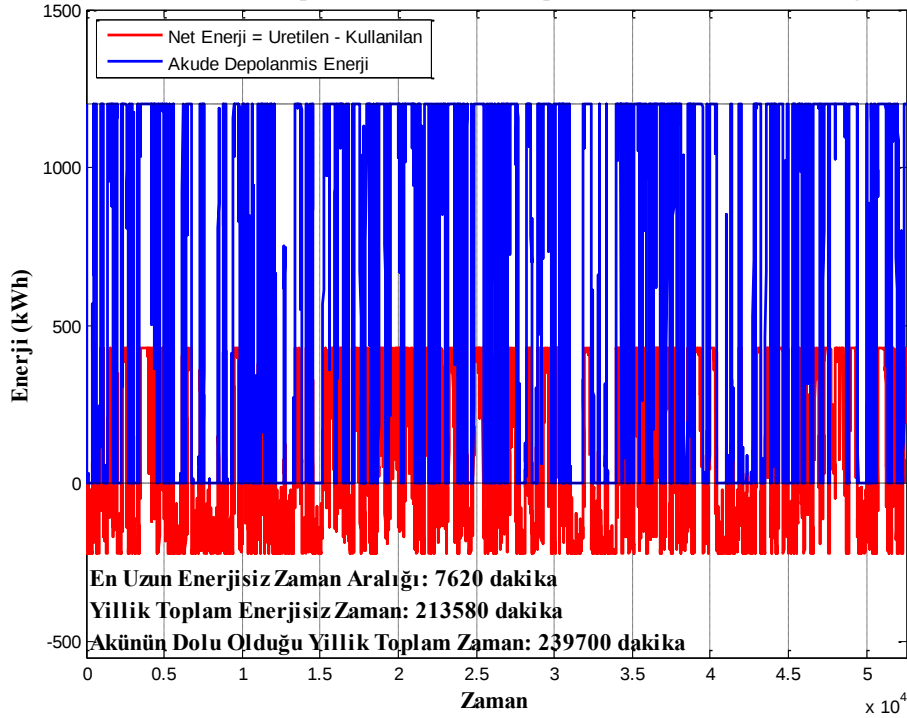
Şekil 5.18'de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.19'da 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



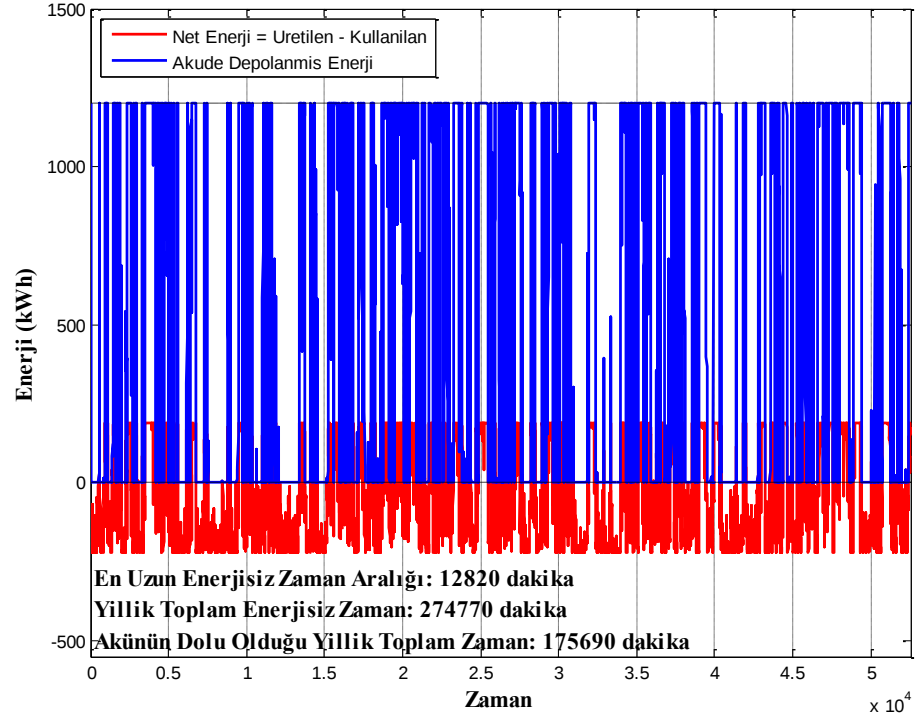
**Şekil 5.16 :** Sistem 3’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



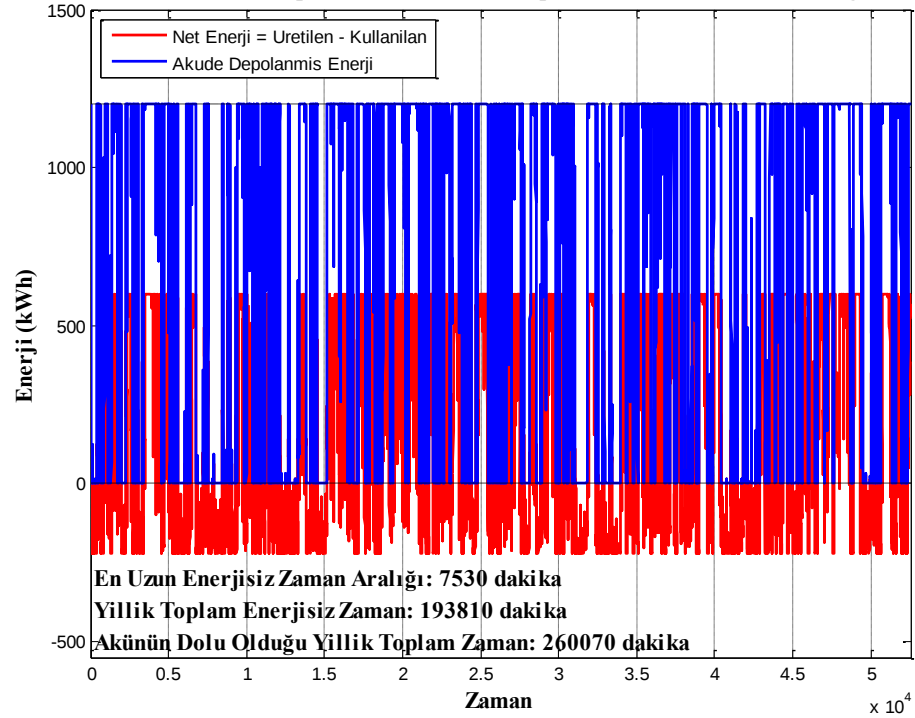
**Şekil 5.17 :** Sistem 3’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



**Şekil 5.18 :** Sistem 3’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 6MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**

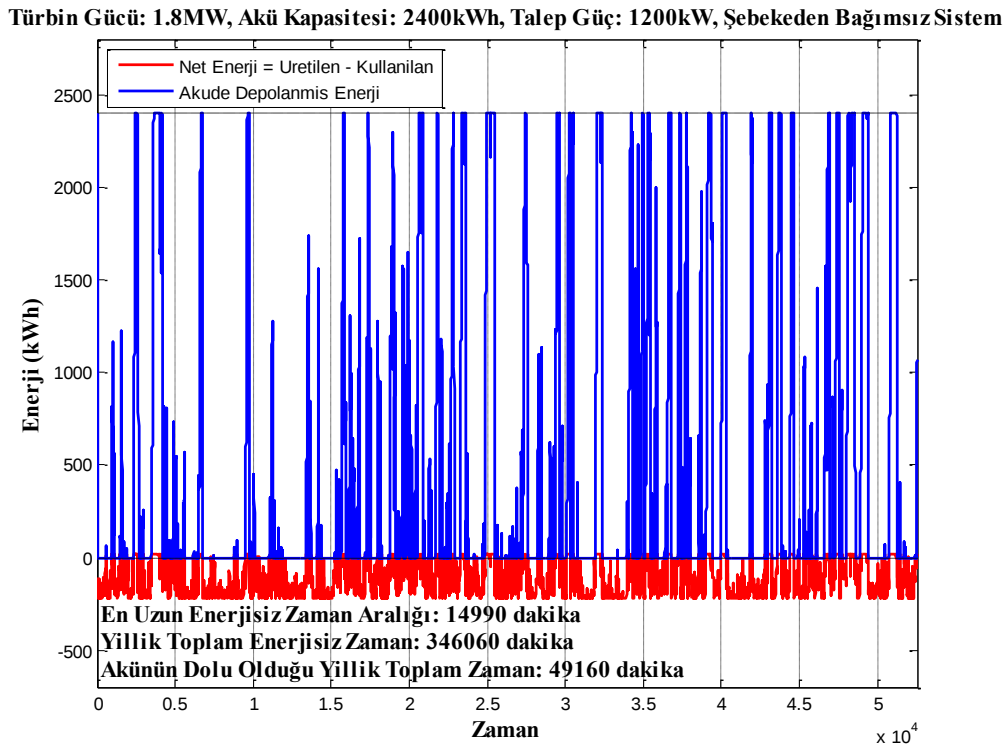


**Şekil 5.19 :** Sistem 3’te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

#### 5.2.1.4 Sistem 4: 2400 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim

Bu sistem için 1 numaralı sistemdeki talep edilen güç ve akü kapasitesi iki katına çıkarılarak üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

Şekil 5.20’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.21’de 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

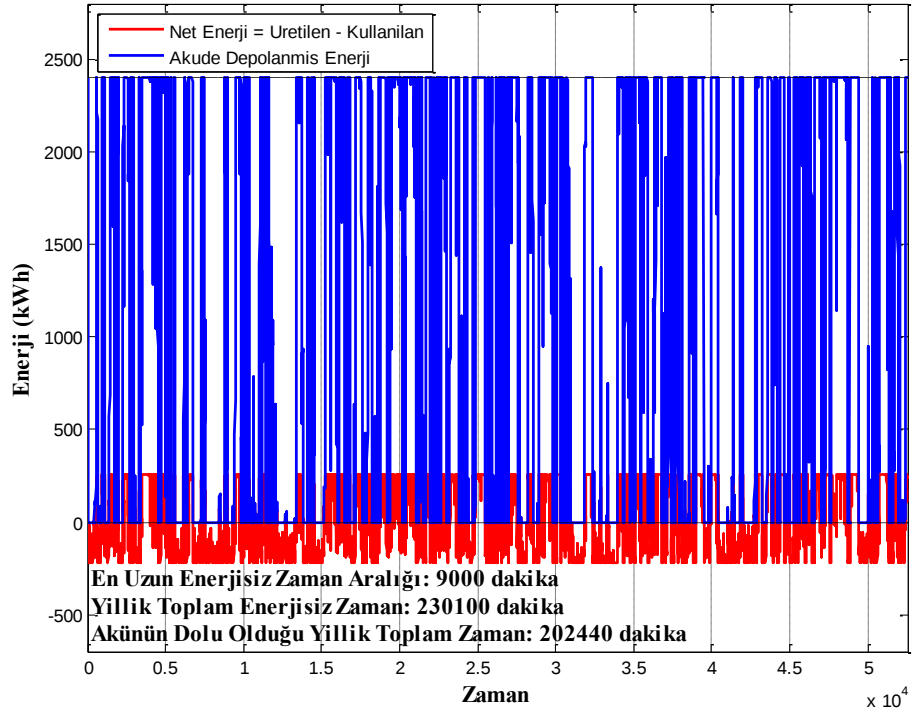


**Şekil 5.20 :** Sistem 4’te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.22’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

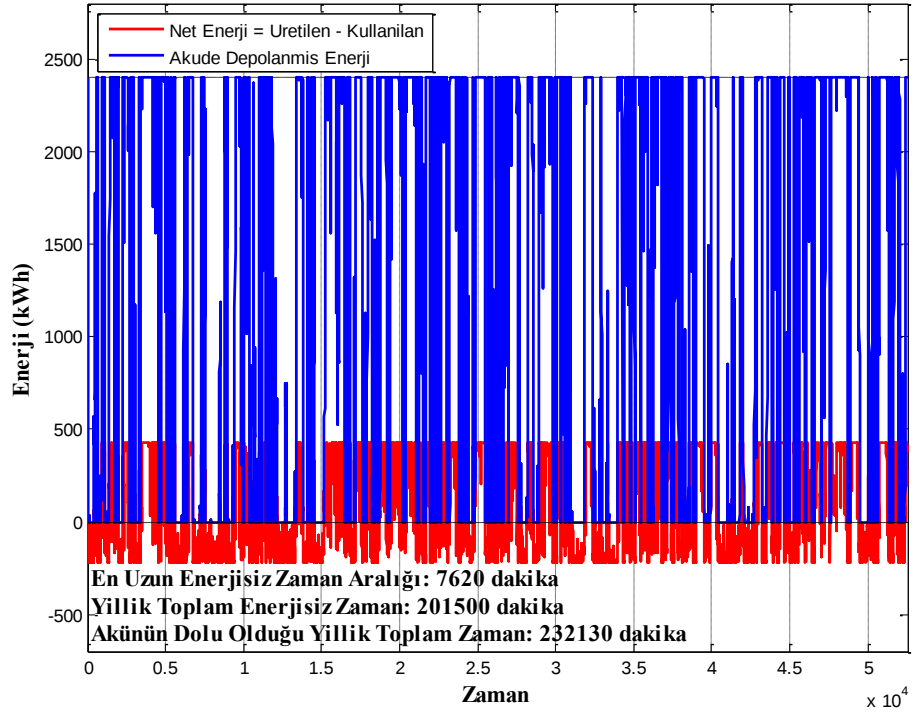
Şekil 5.23’te, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.24’te 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



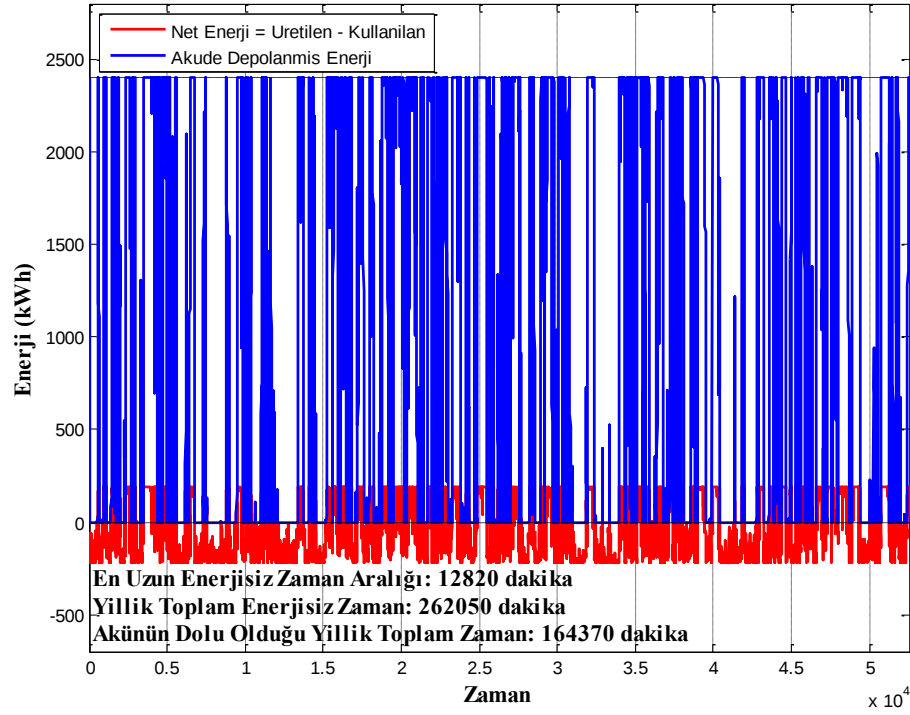
**Şekil 5.21 :** Sistem 4’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



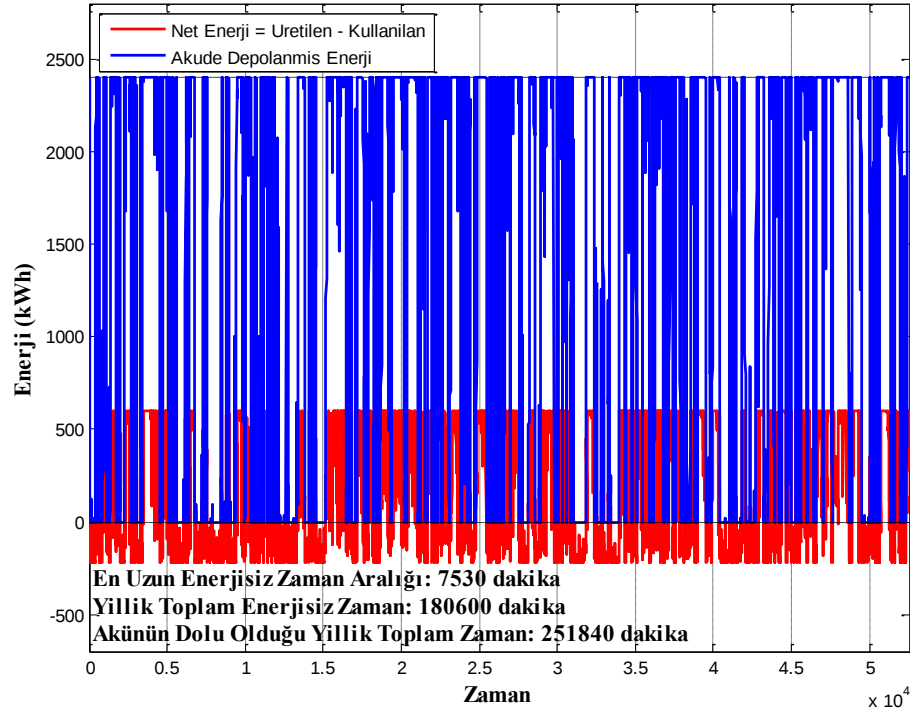
**Şekil 5.22 :** Sistem 4’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



**Şekil 5.23 :** Sistem 4’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Güç: 1200kW, Şebekeden Bağımsız Sistem**



**Şekil 5.24 :** Sistem 4’te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

### 5.2.2 VR akışkan akülü, jeneratör destekli ve şebekeden bağımsız sistemler

Bu sistemlerde, rüzgar türbini ve jeneratör ile üretilen enerji aküde depolanmakta ve yükün beslenmesi aküden karşılanmaktadır. Bu sistemleri tanımlayan grafiklerde net enerji, rüzgar türbinleri ve jeneratörden depolanması için aküye verilen enerji ve aküden çekilen talep enerji arasındaki farka eşittir. Bu hesapta, akünün şarj ve deşarj verimleri dikkate alınmıştır. Buna göre;

$$\begin{aligned} \text{Net Enerji} = & (RT \text{ ile üretilen} + \text{Jeneratörde üretilen enerji}) \\ & * \text{şarj verimi} - \text{Talep enerji} * (1/\text{deşarj verimi}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

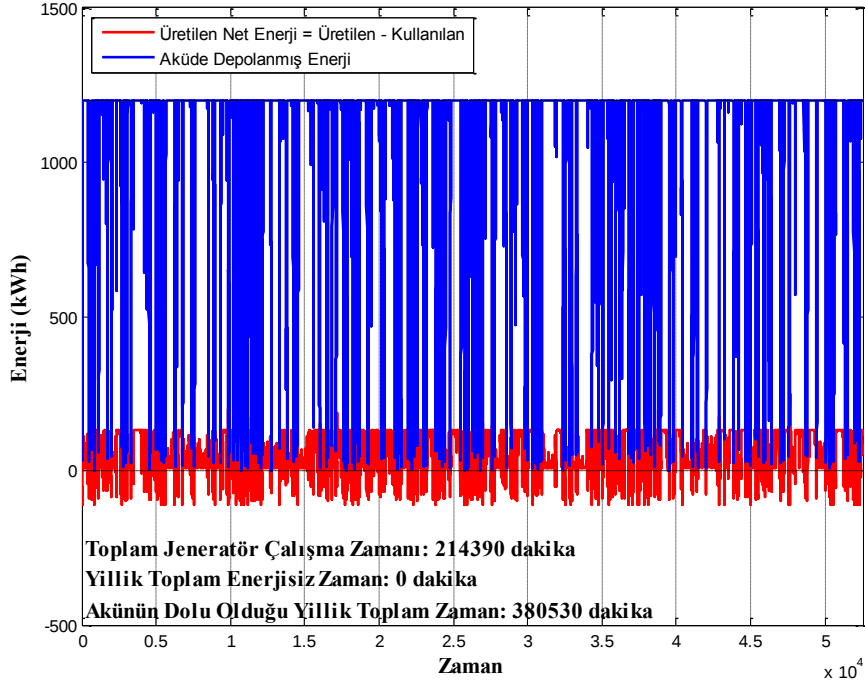
şeklinde hesaplanmıştır.

Akü, net enerji değeri sıfırdan büyük olduğunda şarj, sıfırın altında ise deşarj durumundadır. Akünün dolu olduğu sürelerde net enerjinin sıfırdan büyük olması durumunda aküye kapasitesi üzerinde enerji yüklemesi yapılamamaktadır. Net enerjinin sıfır ve altında değer aldığı ve aynı zaman aralığında akünün de boş olduğu durumlarda jeneratör devreye girmekte, akü tam dolu duruma gelene kadar çalışmaktadır. Bu sayede talep güç sürekli olarak karşılanmış olacağından, bu sistemlerde toplam enerjisiz zaman sıfırdır. Bu sistemler için hesaplanan toplam jeneratör çalışma zamanları ve akünün dolu olduğu yıllık toplam zaman değerleri dakika cinsinden ilgili grafiklerin altında verilmiştir. Grafiklerde x-eksenleri, her bir işaretin 10'ar dakikalık ortalamaları göstermesinden dolayı, kaçınıcı 10 dakikada bulunulduğunu belirten zaman dilimlerini; y-eksenleri ise kWh cinsinden enerji değerlerini göstermektedir.

#### 5.2.2.1 Sistem 5: 1200 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim, 900 kW jeneratör

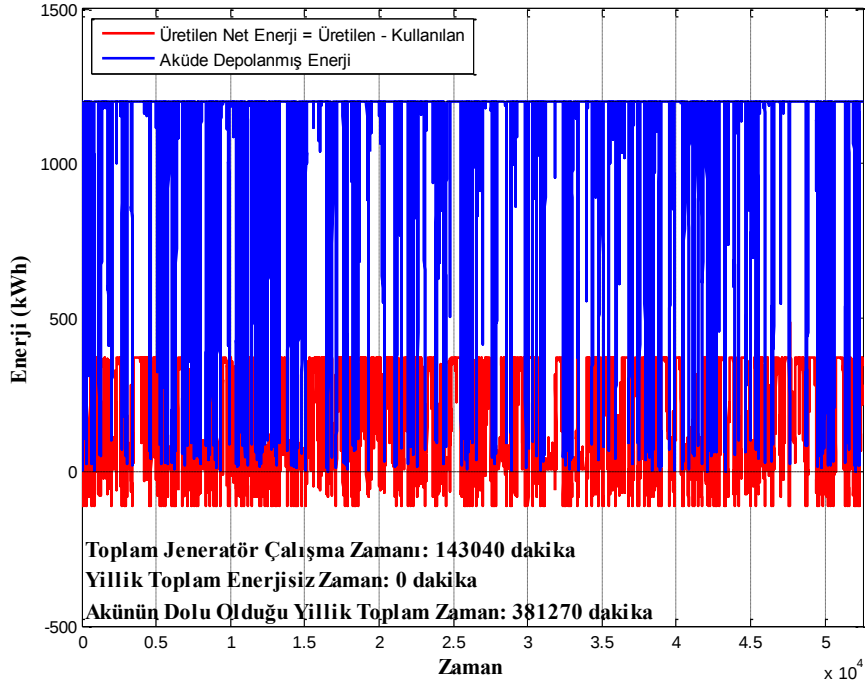
600 kW'lık sabit bir yükü besleyen, 1200 kWh akü kapasitesine sahip, 900 kW jeneratör destekli, şebekeden bağımsız bir sistemde üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji grafikleri Şekil 5.25-5.29'da verilmiştir. Türbin gücünün artmasıyla meydana gelen net enerjideki artış, toplam jeneratör çalışma zamanındaki azalma ve akünün dolu olduğu zamandaki artış, ilgili grafiklerin karşılaştırılmasıyla görülebilmektedir. Şekil 5.25'te, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.26'da 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.25 : Sistem 5’te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.**

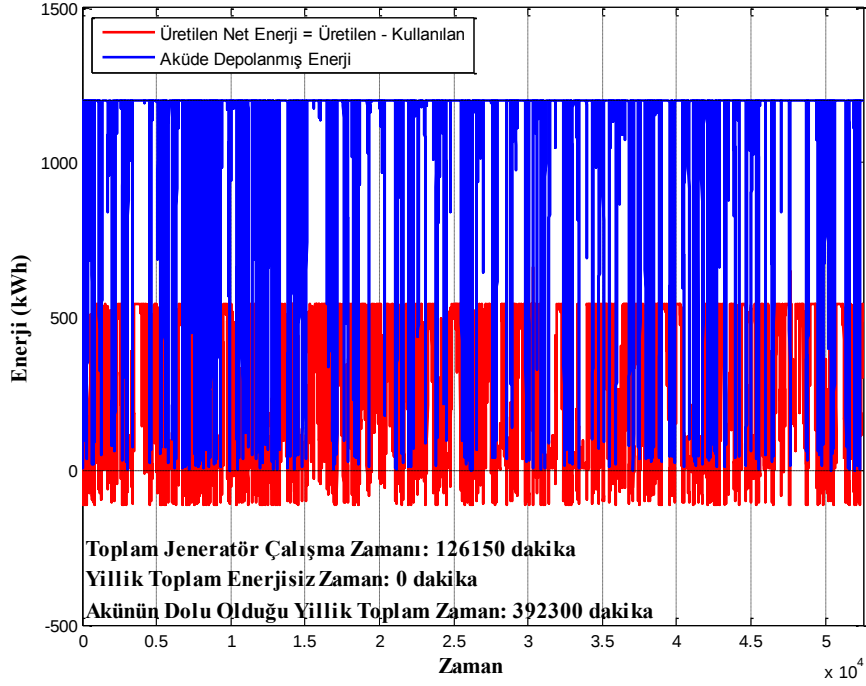
**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.26 : Sistem 5’te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.**

Şekil 5.27’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

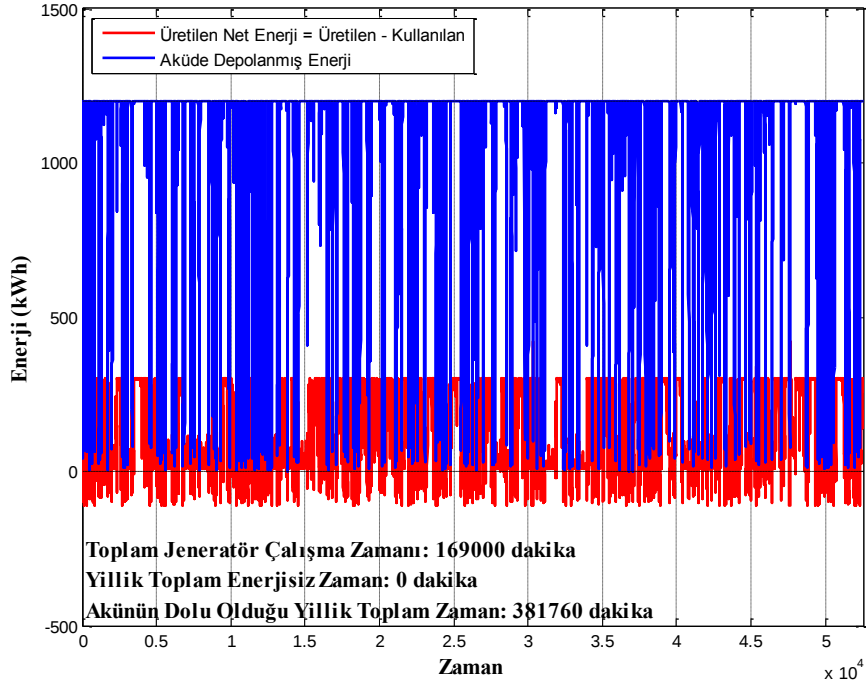
**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



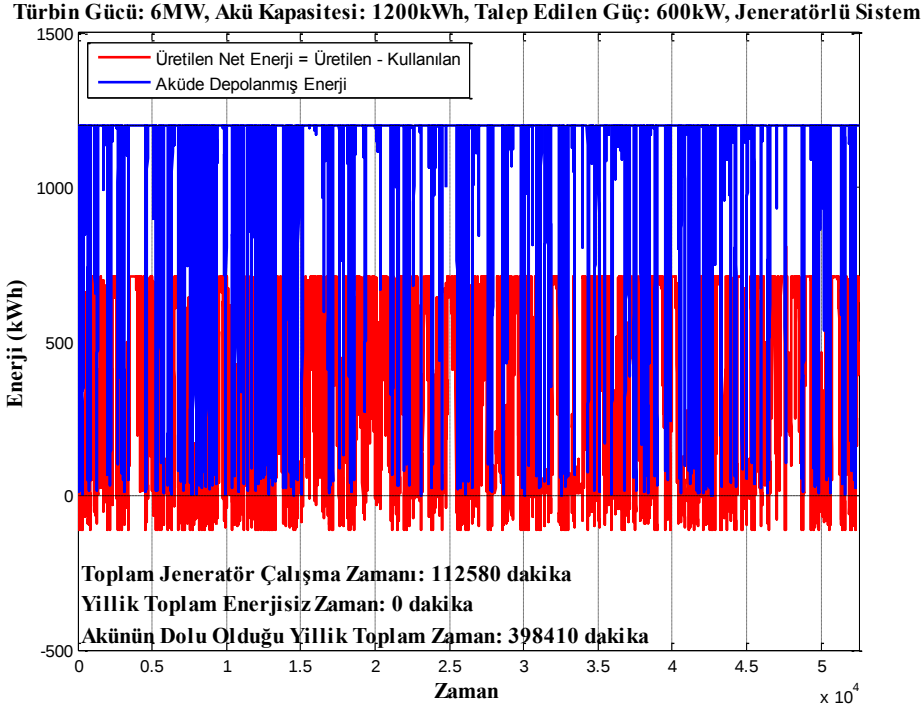
**Şekil 5.27 :** Sistem 5’te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.28’de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.29’da 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 3MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.28 :** Sistem 5’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.29 :** Sistem 5’te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

#### 5.2.2.2 Sistem 6: 2400 kWh akü kapasitesi, 600 kW tüketim, 900 kW jeneratör

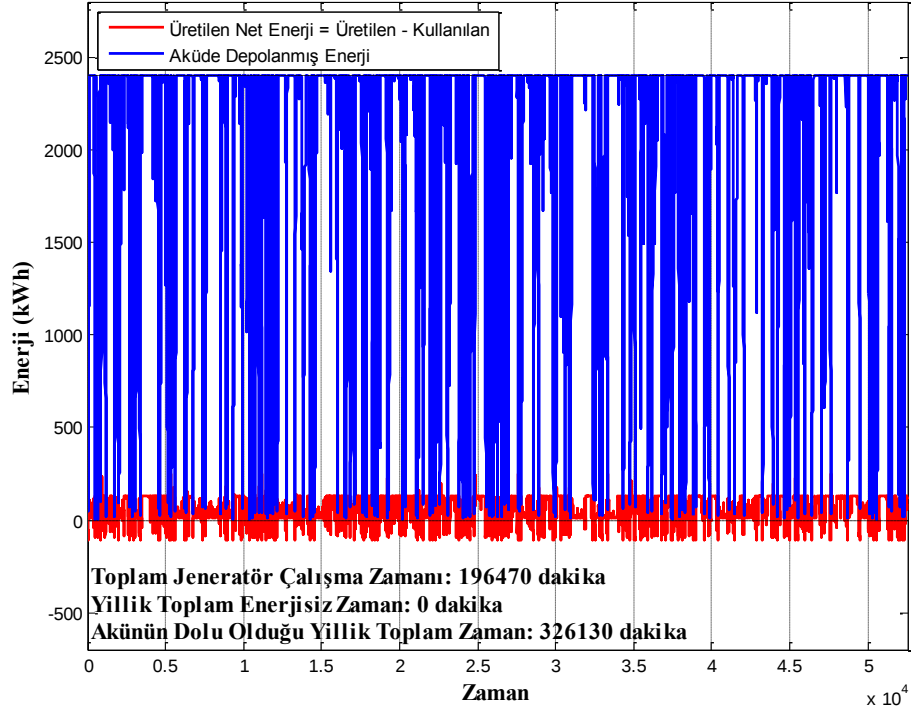
Bu sistem için yalnızca 5 numaralı sistemdeki akü kapasitesi iki katına (2400 kWh) çıkarılarak üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

Şekil 5.30’da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.31’de 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 5.32’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

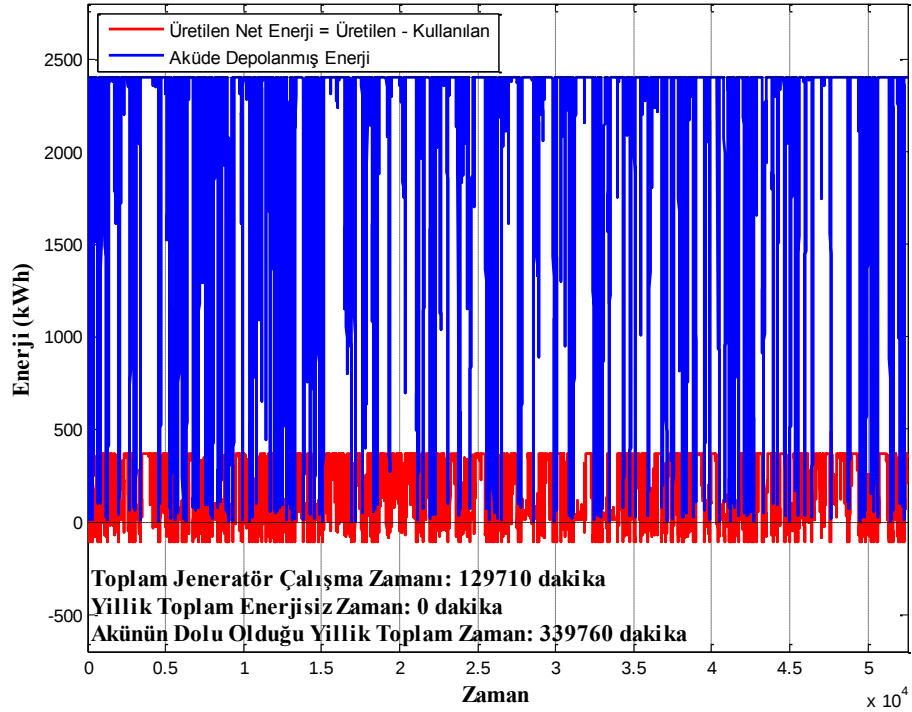
Şekil 5.33’te, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.34’te 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



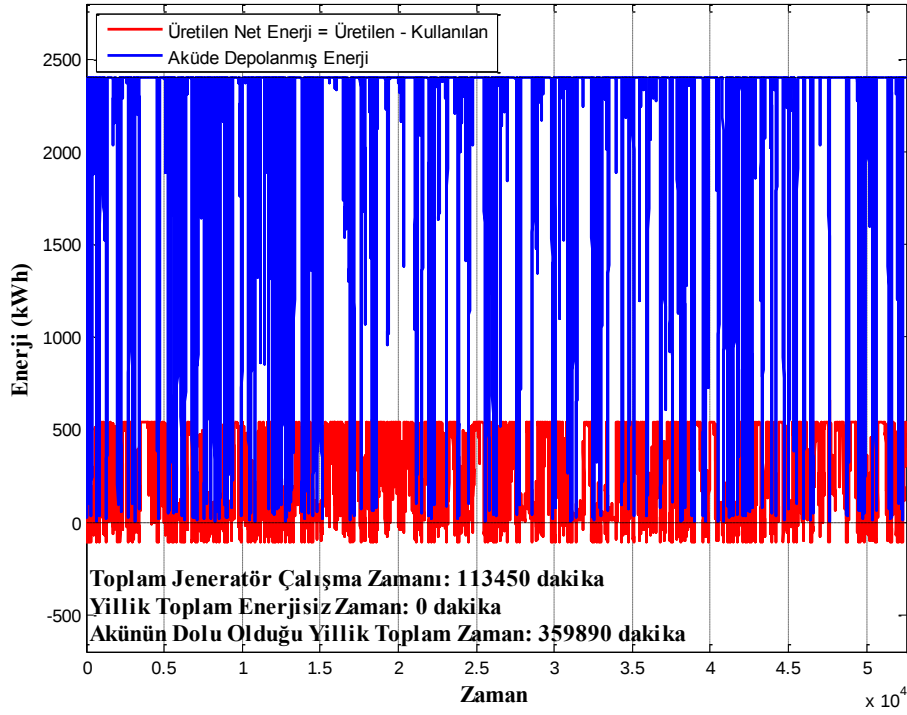
**Şekil 5.30 :** Sistem 6’da 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



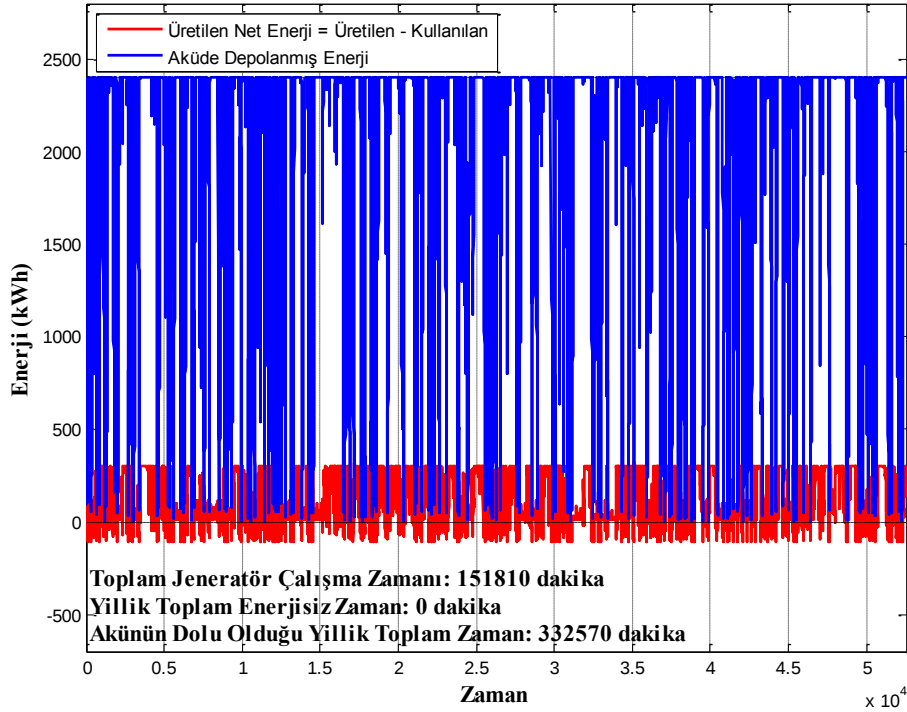
**Şekil 5.31 :** Sistem 6’da 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



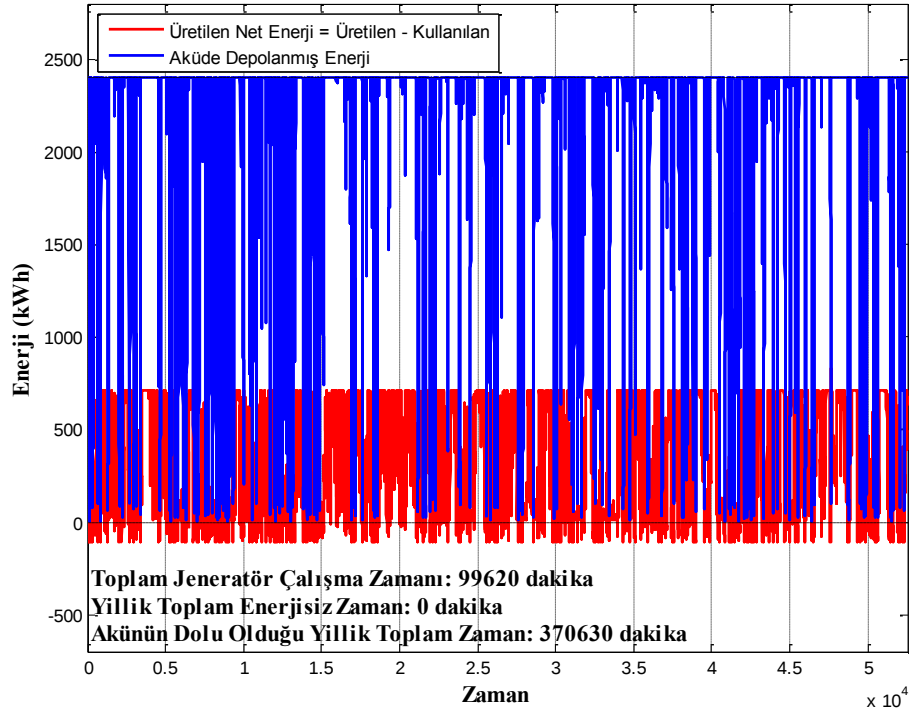
**Şekil 5.32 :** Sistem 6’da 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.33 :** Sistem 6’da 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.34 :** Sistem 6’da 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

#### 5.2.2.3 Sistem 7: 1200 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim, 900 kW jeneratör

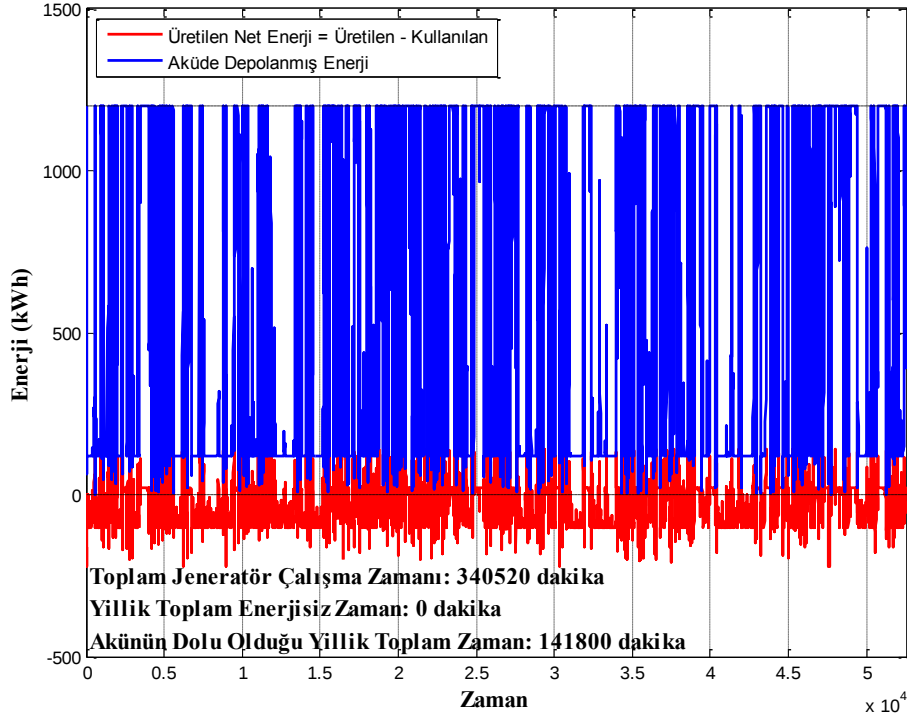
Bu sistem için yalnızca 5 numaralı sistemdeki talep edilen güç iki katına (1200 kW) çıkarılarak üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

Şekil 5.35’te, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.36’da 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 5.37’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

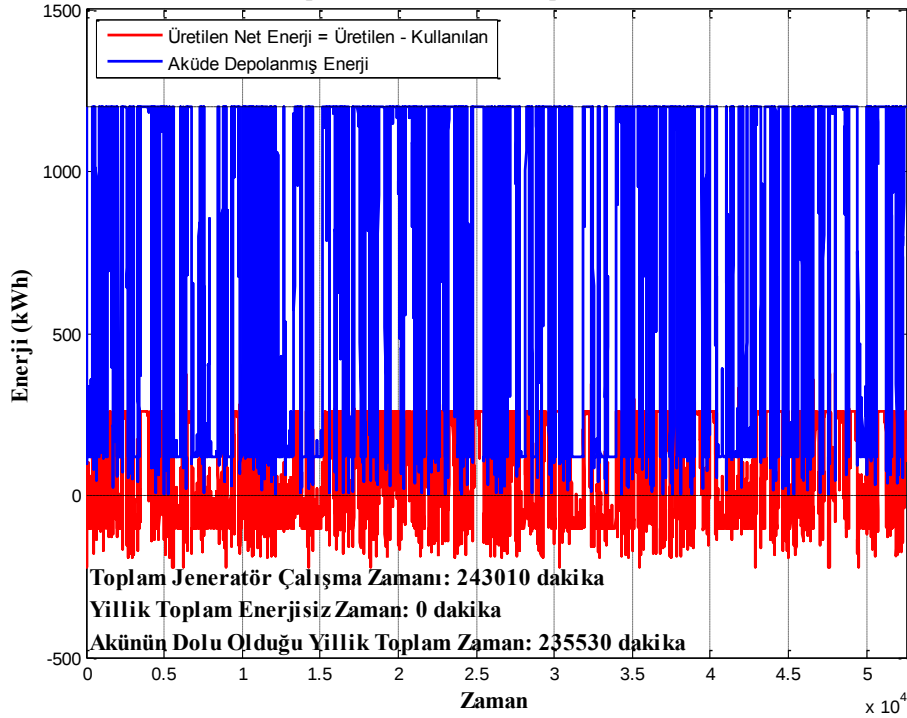
Şekil 5.38’de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.39’da 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**



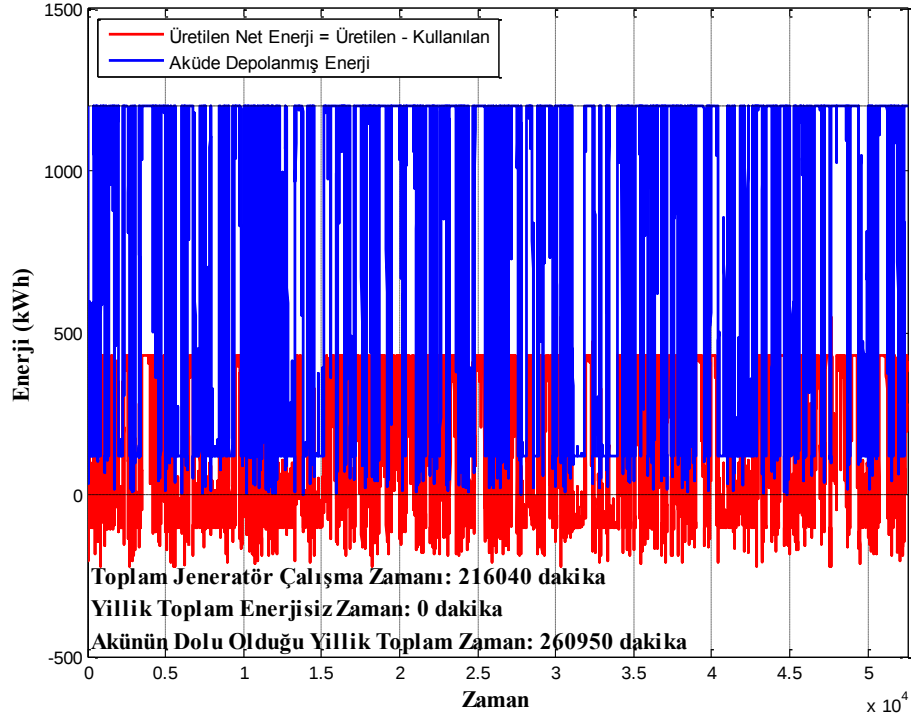
**Şekil 5.35 :** Sistem 7’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**



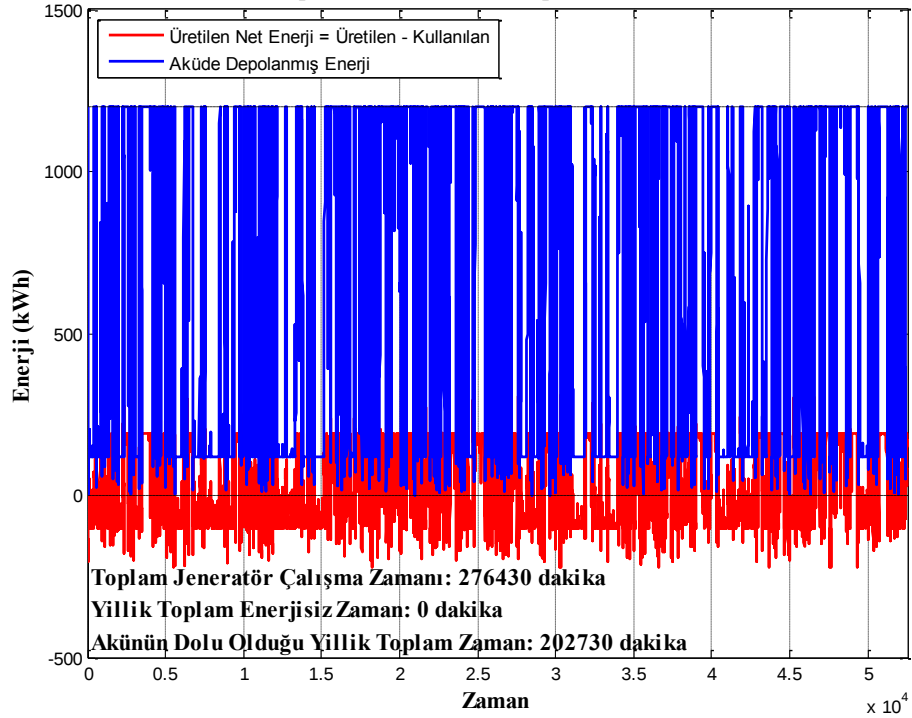
**Şekil 5.36 :** Sistem 7’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**

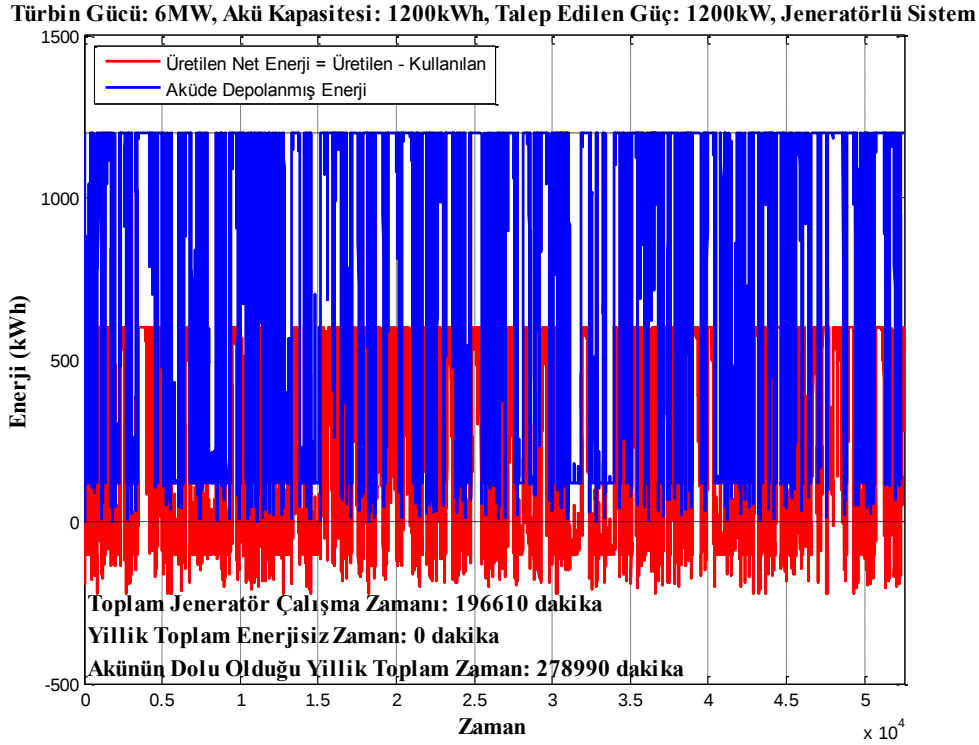


**Şekil 5.37 :** Sistem 7’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.38 :** Sistem 7’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.39 :** Sistem 7’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

#### 5.2.2.4 Sistem 8: 2400 kWh akü kapasitesi, 1200 kW tüketim, 900 kW jeneratör

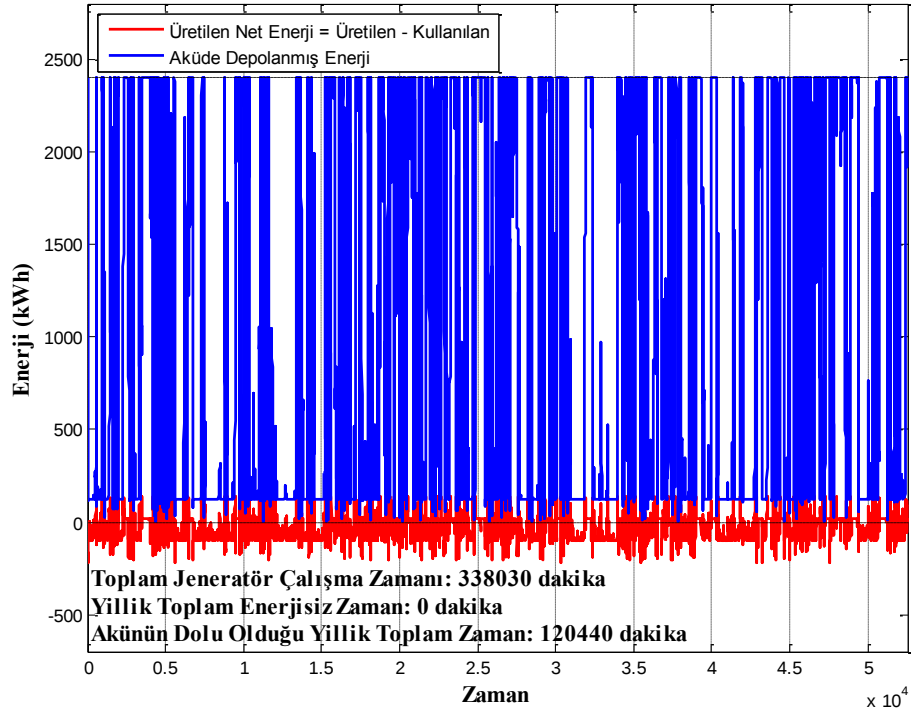
Bu sistem için 5 numaralı sistemdeki talep edilen güç ve akü kapasitesi iki katına çıkarılarak üretilen net enerji ve aküde depolanan enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

Şekil 5.40’ta, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.41’de 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 5.42’de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için enerji üretim ve depolama grafikleri verilmiştir.

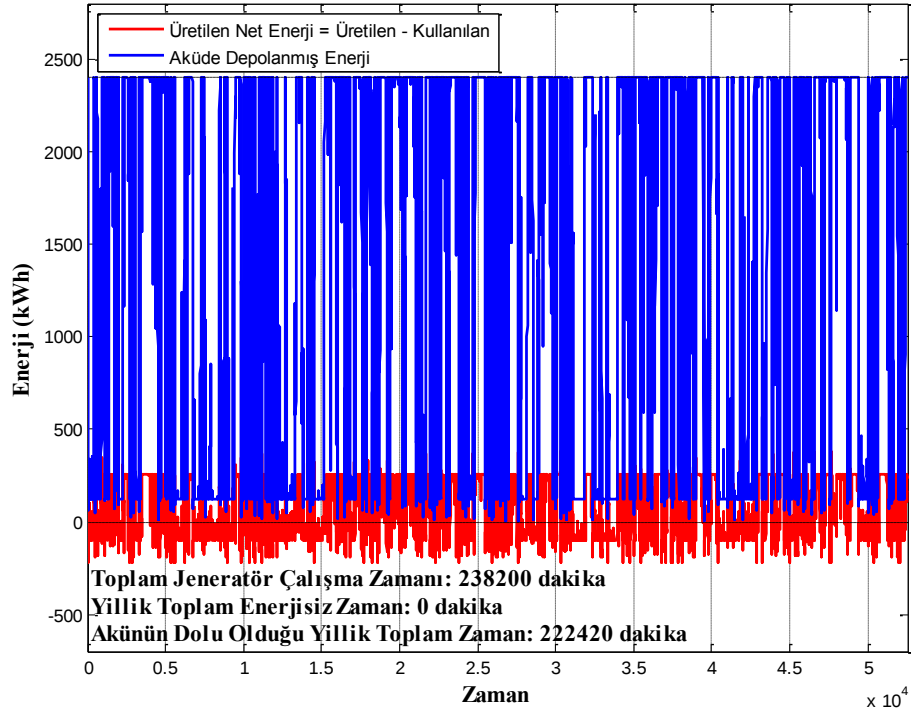
Şekil 5.43’te, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.44’te 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen enerji üretim ve depolama grafikleri gösterilmiştir.

**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**



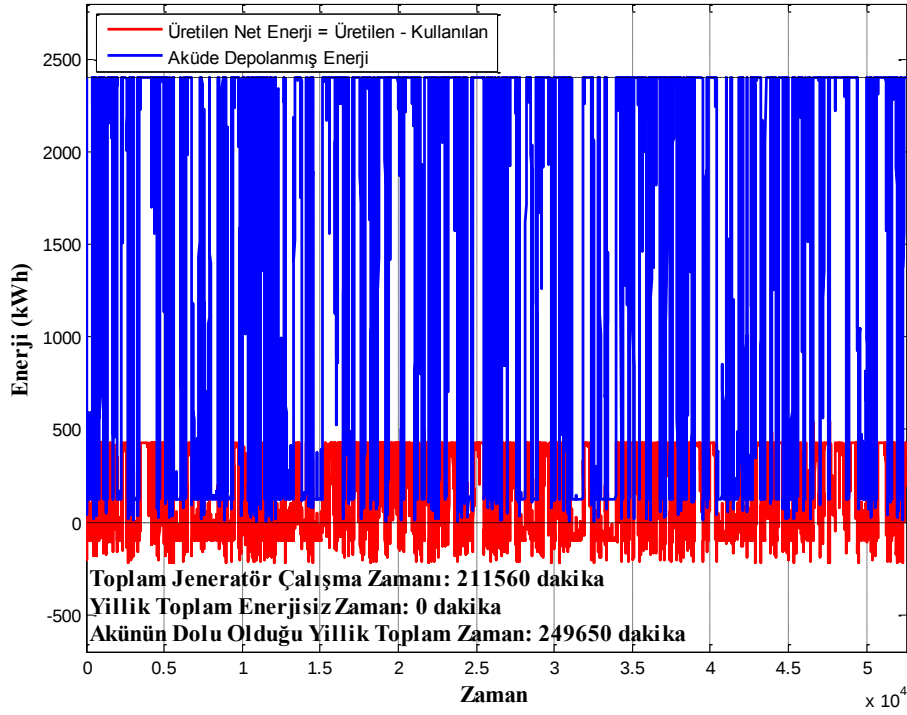
**Şekil 5.40 :** Sistem 8’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3.6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**



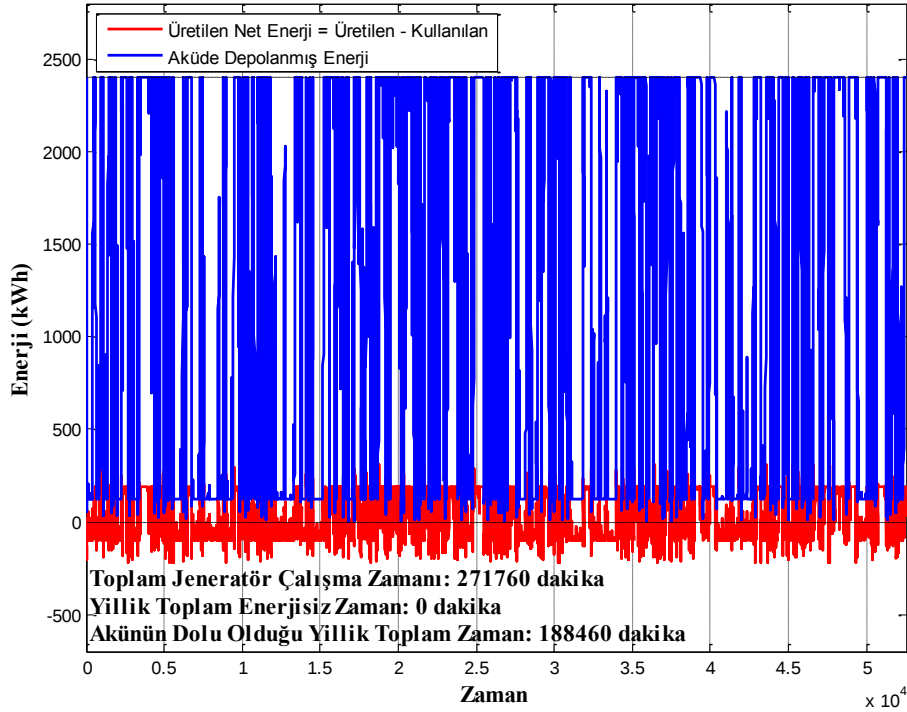
**Şekil 5.41 :** Sistem 8’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 4.8MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**



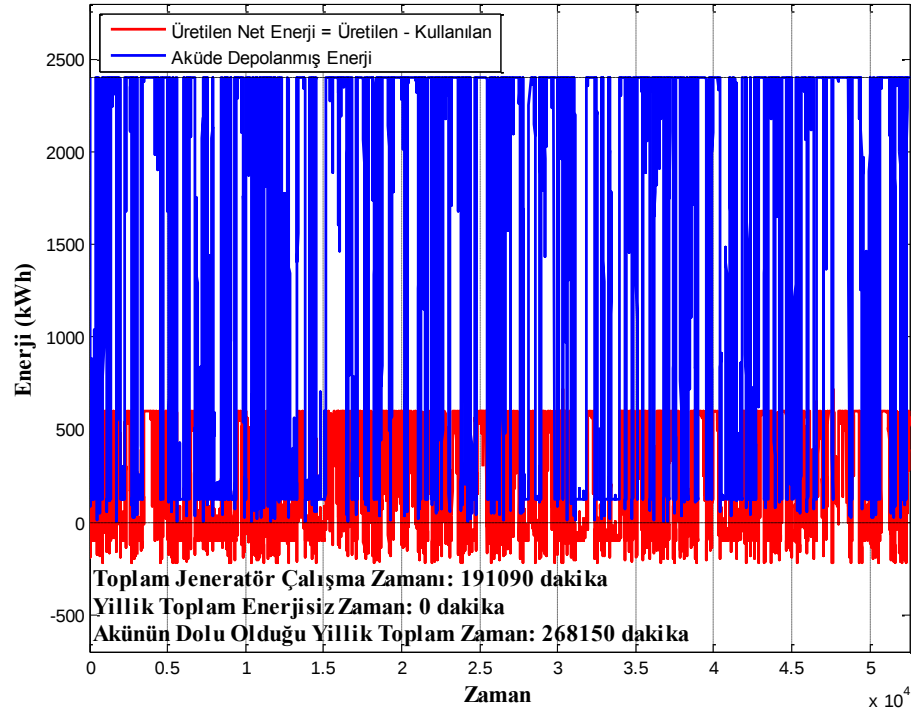
**Şekil 5.42 :** Sistem 8’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 3MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.43 :** Sistem 8’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

**Türbin Gücü: 6MW, Akü Kapasitesi: 2400kWh, Talep Edilen Güç: 1200kW, Jeneratörlü Sistem**

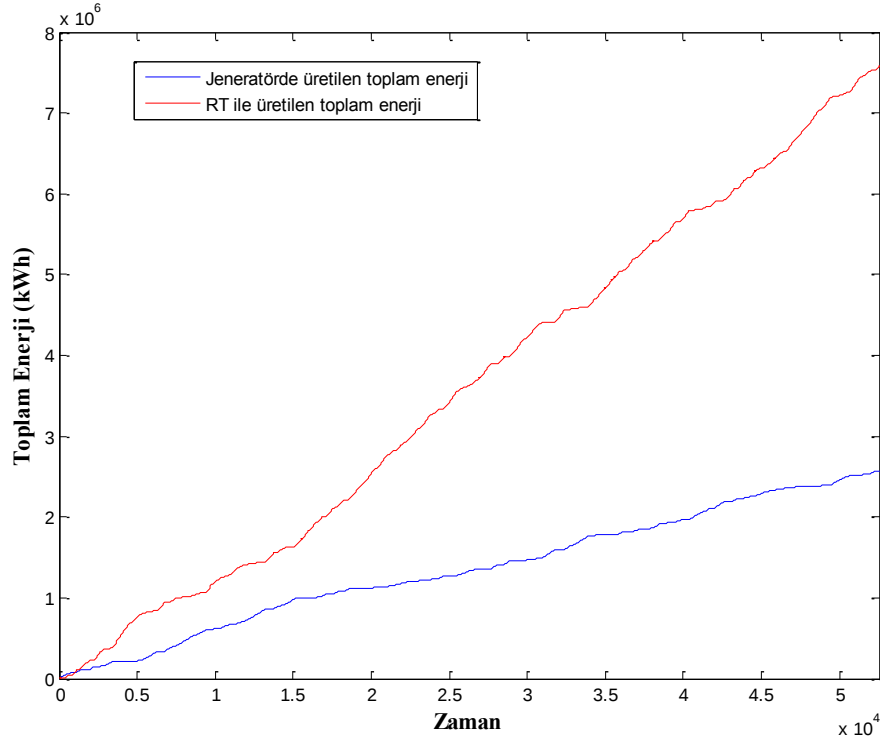


**Şekil 5.44 :** Sistem 8’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.45 ve Şekil 5.46’ daki grafikler, 5 numaralı sistemde 1,8 MW ve 6 MW kurulu güce sahip sistemlerde rüzgar türbinlerinde ve jeneratörde üretilen toplam enerjilerin kıyaslanması amacıyla hazırlanmıştır. Kurulu gücün yüksek olduğu sistemde, rüzgar türbinlerinde üretilen toplam enerjinin daha yüksek, jeneratörün çalışma süresinin azalmasına bağlı olarak da jeneratörde üretilen enerjinin daha düşük olduğu görülmektedir.

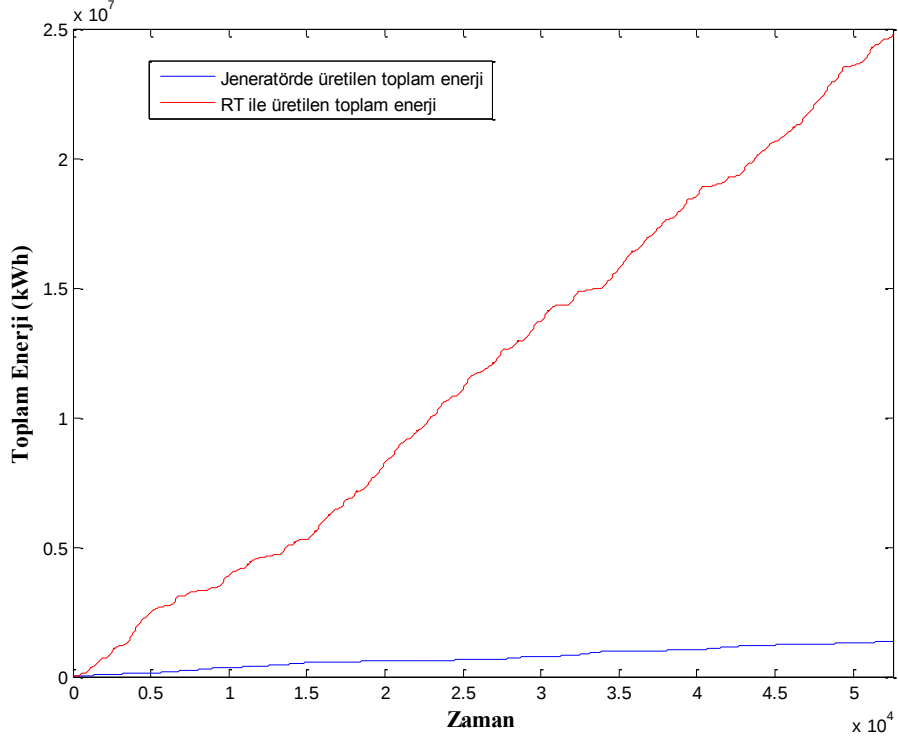
Şekil 5.47 ve Şekil 5.48’ deki grafikler, 5 numaralı sistemde 1,8 MW ve 6 MW kurulu güce sahip sistemlerde rüzgar türbinlerinde üretilen 10’ar dakikalık enerjilerin ve jeneratör çalışma zamanlarının kıyaslanması amacıyla hazırlanmıştır. Kurulu gücün düşük olduğu sistemde, rüzgar türbinlerinde üretilen enerjinin talep enerjiyi karşılamada daha yetersiz kalmasına bağlı olarak jeneratör daha yoğun çalışmıştır. Jeneratörde üretilen enerjinin RT ile üretilen enerjiye oranının, kurulu gücün düşük olduğu sistemde daha yüksek olduğu grafiklerin karşılaştırılmasıyla görülmektedir.

**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



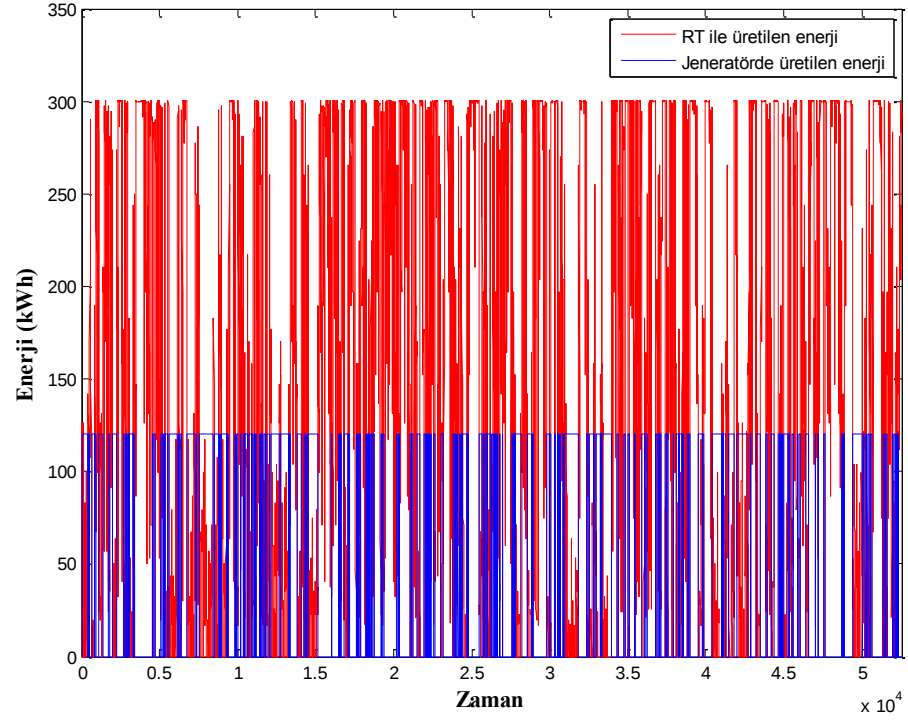
**Şekil 5.45 :** 1,8 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen toplam enerji.

**Türbin Gücü: 6MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



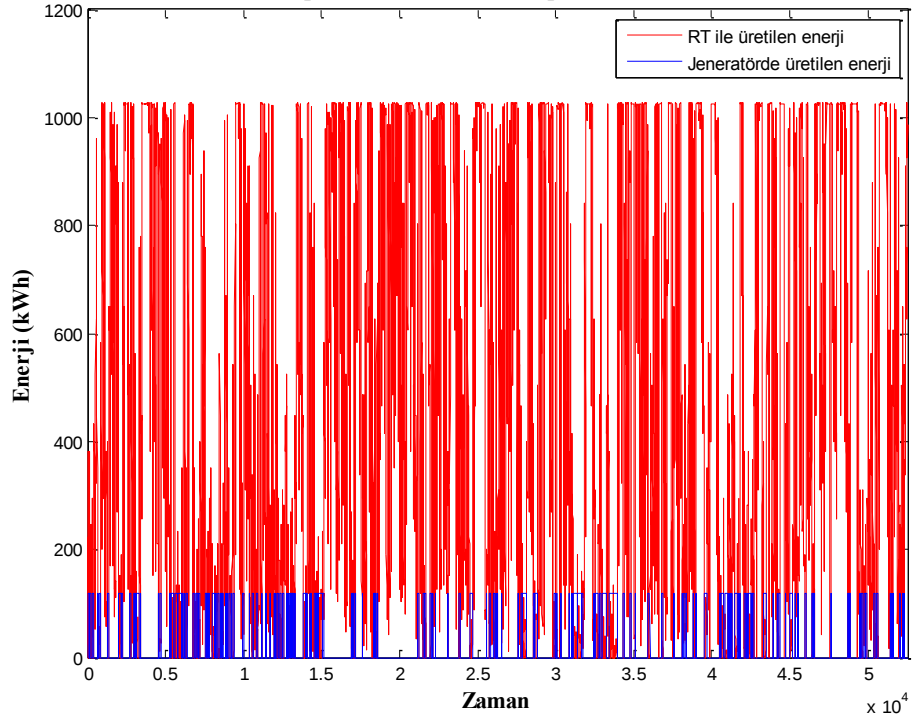
**Şekil 5.46 :** 6 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen toplam enerji.

**Türbin Gücü: 1.8MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.47 : 1,8 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen enerji.**

**Türbin Gücü: 6MW, Akü Kapasitesi: 1200kWh, Talep Edilen Güç: 600kW, Jeneratörlü Sistem**



**Şekil 5.48 : 6 MW kurulu güçte RT ve jeneratörde üretilen enerji.**

### 5.2.3 Aküsüz, şebekeden bağımsız sistemler

Bu sistemlerde, rüzgar türbinleri ile üretilen enerji herhangi bir akü sisteminde depolanmamakta ve doğrudan yükün beslenmesinde kullanılmaktadır. Bu sistemleri tanımlayan grafiklerde net enerji;

$$Net\ Enerji = RT\ ile\ üretilen\ enerji - Talep\ enerji \quad (5.3)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Net enerji değerinin sıfırdan büyük olduğu durumlarda talep edilen enerji karşılanabilmekte, sıfır ve altında ise karşılanamamaktadır. Bu sistemler için hesaplanan en uzun enerjisiz zaman aralıkları ve yıllık toplam enerjisiz zaman değerleri dakika cinsinden ilgili grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde x-eksenleri, her bir işaretin 10'ar dakikalık ortalamaları göstermesinden dolayı, kaçınıcı 10 dakikada bulunulduğunu belirten zaman dilimlerini; y-eksenleri ise kWh cinsinden net enerji değerlerini göstermektedir.

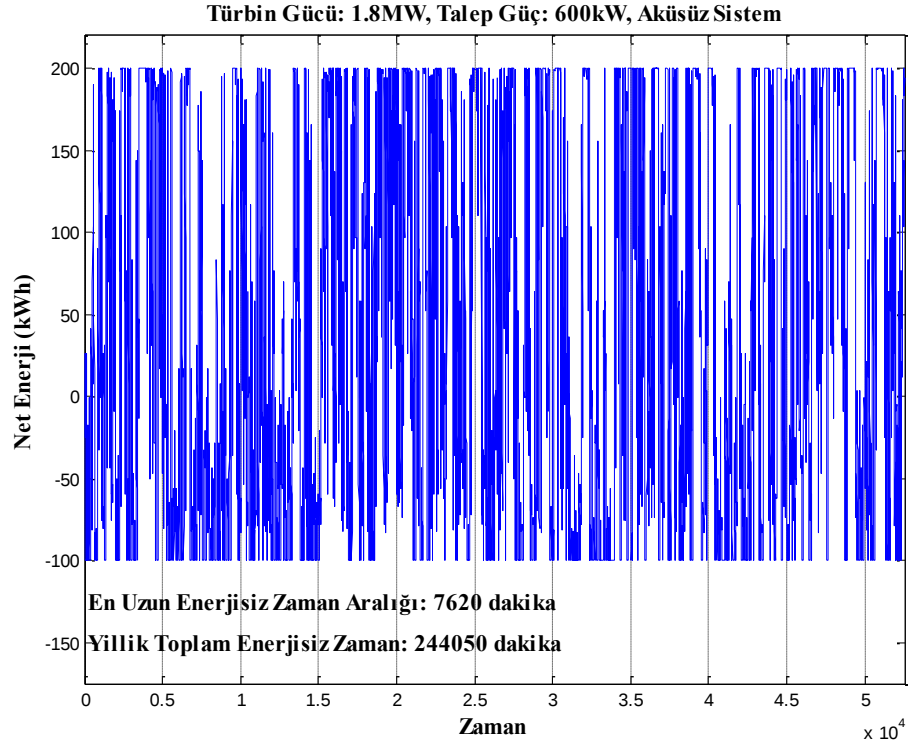
#### 5.2.3.1 Sistem 9: 600 kW tüketim, şebekeden bağımsız

600 kW'lık sabit bir yükü besleyen, şebekeden bağımsız bir sistemde üretilen net enerji grafikleri Şekil 5.49-5.53'te verilmiştir. Türbin gücünün artmasıyla meydana gelen net enerjideki artış ve enerjisiz zamandaki azalma, ilgili grafiklerin karşılaştırılmasıyla görülebilmektedir.

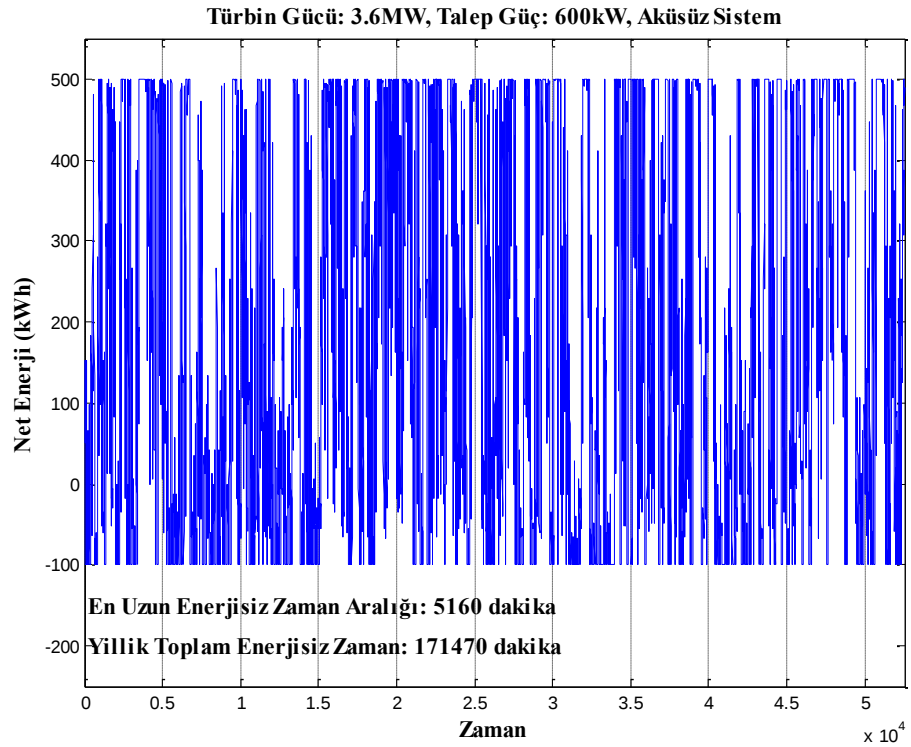
Şekil 5.49'da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.50'de 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 5.52'de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için net enerji grafikleri verilmiştir.

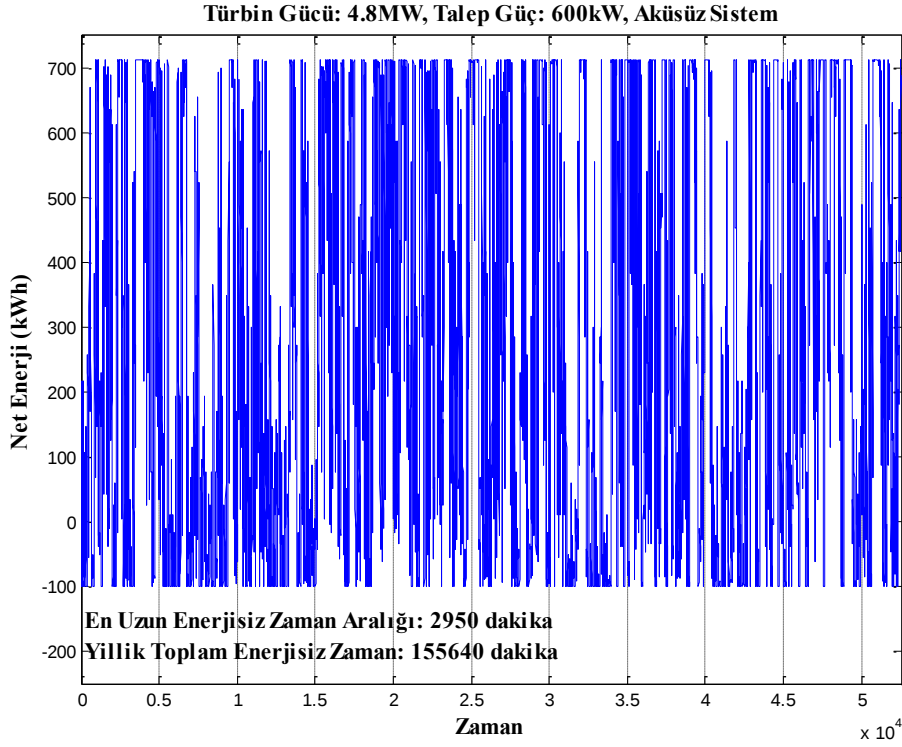
Şekil 5.52'de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.53'te 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji grafikleri verilmiştir.



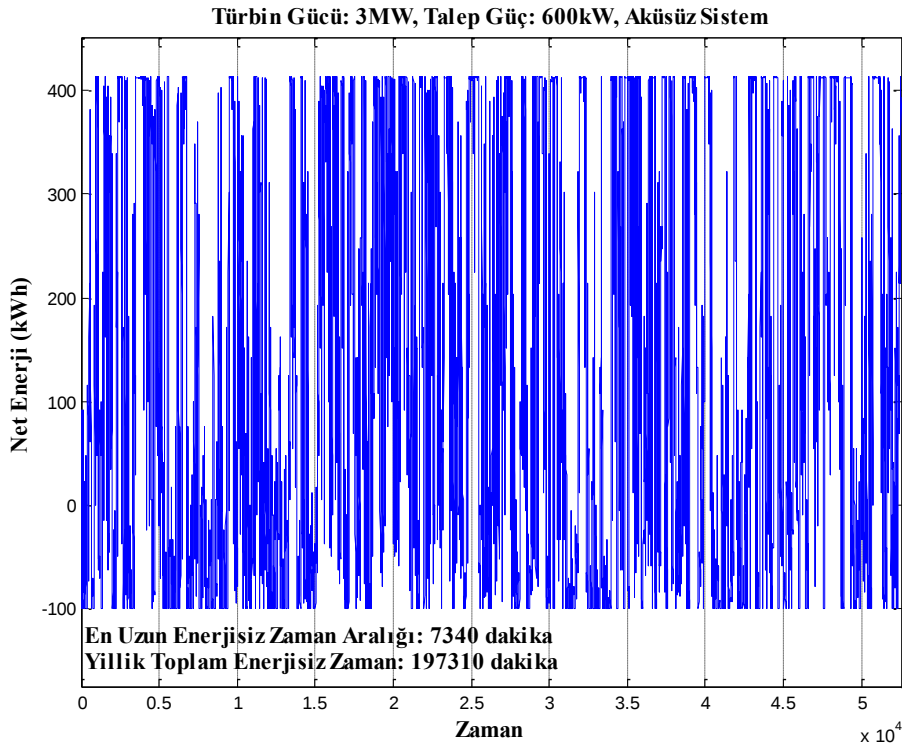
**Şekil 5.49 :** Sistem 9’da 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



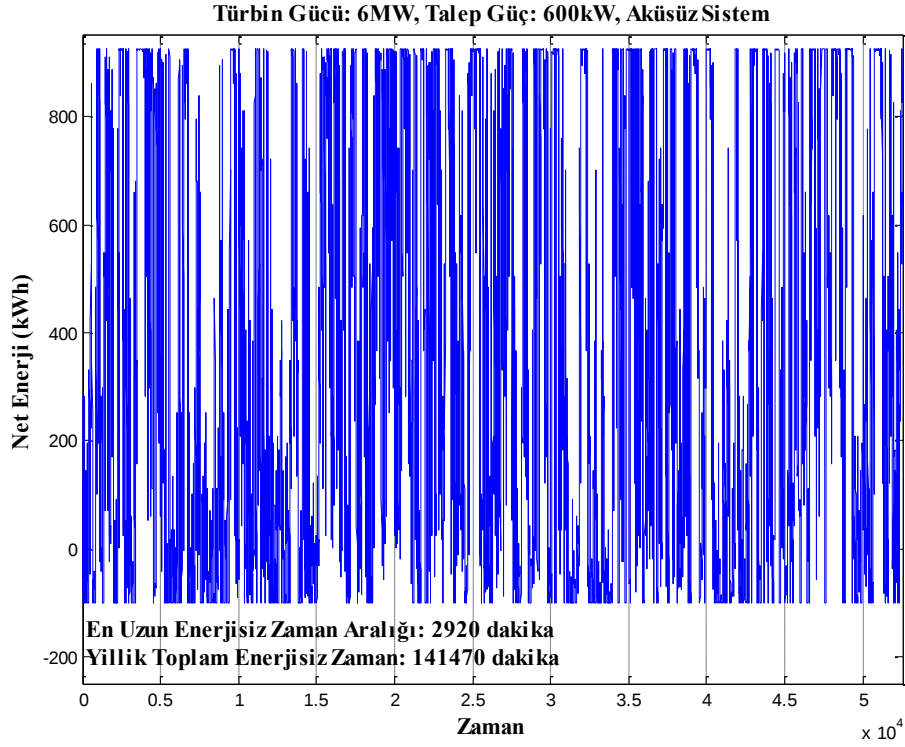
**Şekil 5.50 :** Sistem 9’da 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



Şekil 5.51 : Sistem 9’da 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



Şekil 5.52 : Sistem 9’da 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.53 :** Sistem 9’da 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

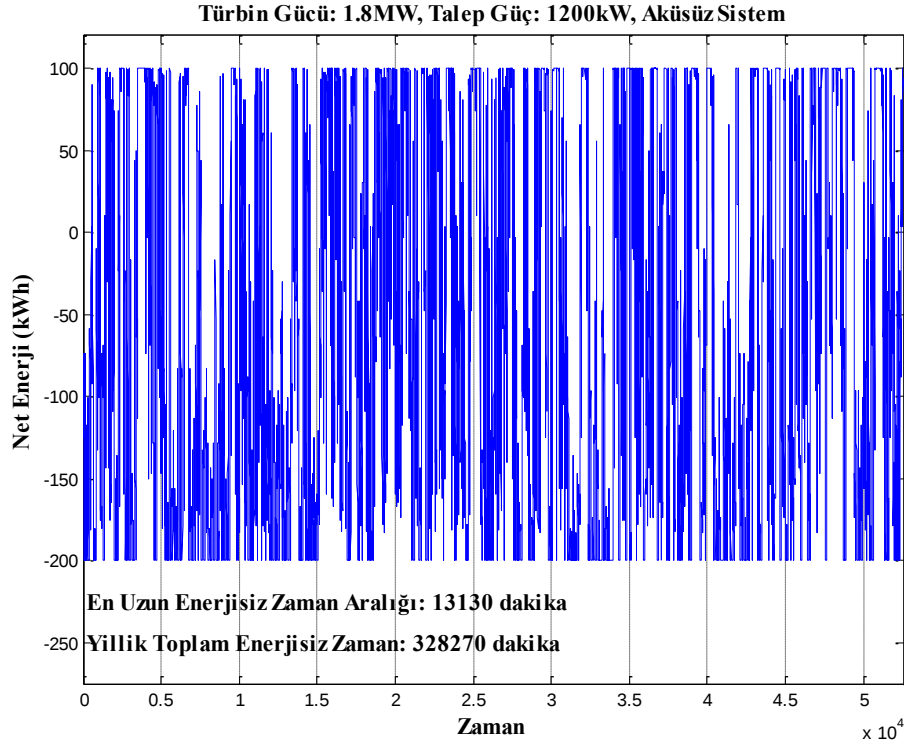
#### 5.2.3.2 Sistem 10: 1200 kW tüketim, şebekeden bağımsız

Bu sistem için yalnızca, 9 numaralı sistemdeki talep edilen güç iki katına (1200 kW) çıkarılarak net enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

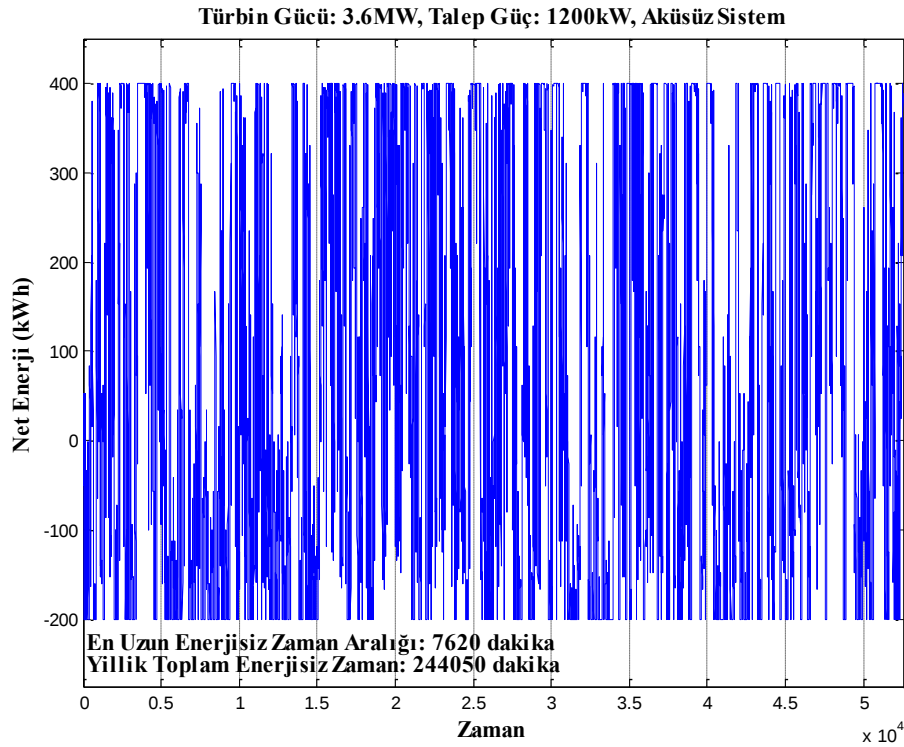
Şekil 5.54’te, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.55’te 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 5.56’da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için net enerji grafikleri verilmiştir.

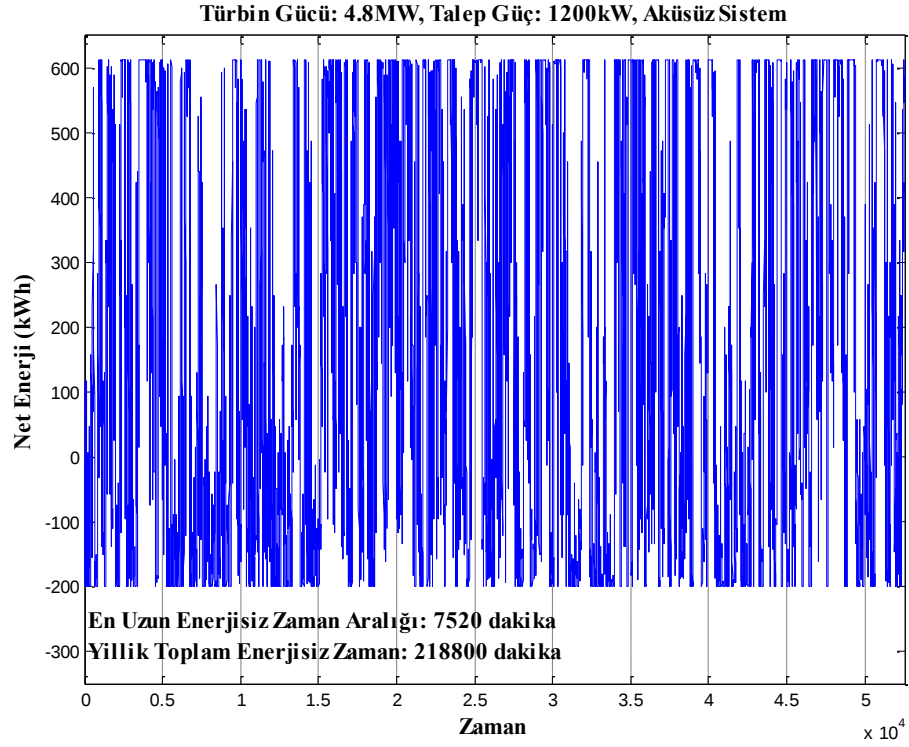
Şekil 5.57’de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.58’de 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji grafikleri verilmiştir.



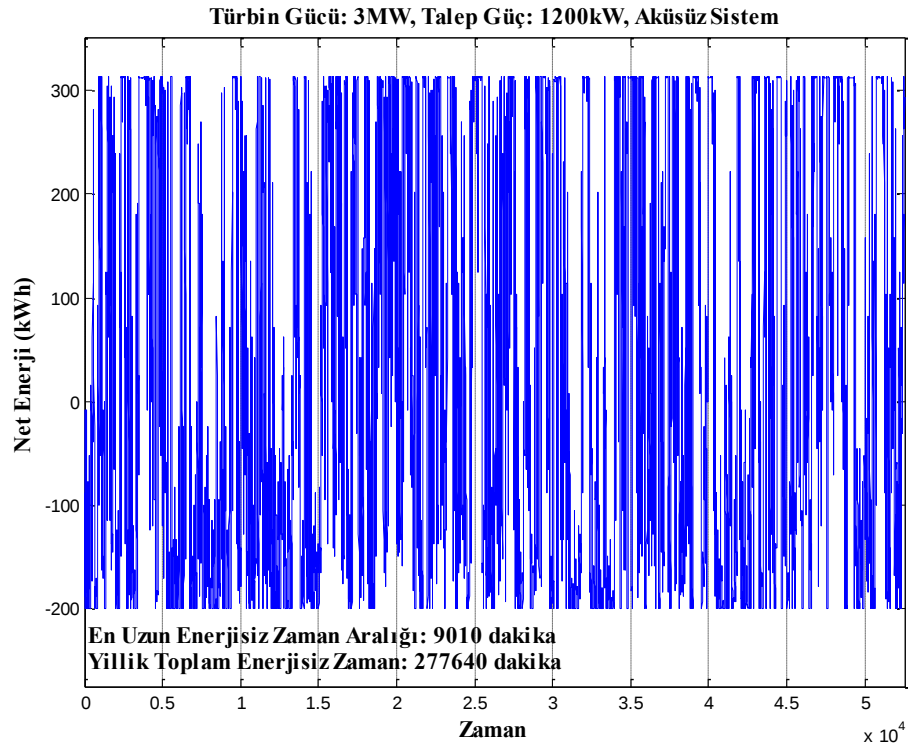
**Şekil 5.54 :** Sistem 10’da 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



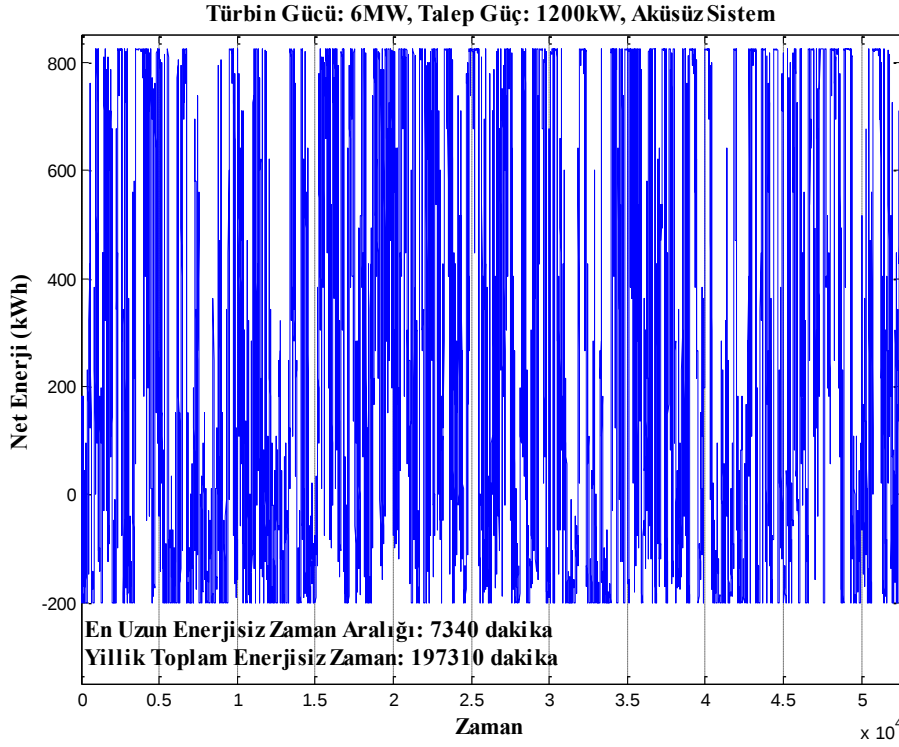
**Şekil 5.55 :** Sistem 10’da 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.56 :** Sistem 10'da 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.57 :** Sistem 10'da 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.58 :** Sistem 10’da 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

#### 5.2.4 Aküsüz, jeneratör destekli ve şebekeden bağımsız sistemler

Bu sistemlerde, rüzgar türbinleri ve jeneratör ile üretilen enerji herhangi bir akü sisteminde depolanmamakta ve doğrudan yükün beslenmesinde kullanılmaktadır. Bu sistemleri tanımlayan grafiklerde net enerji;

$$\begin{aligned} \text{Net Enerji} = & \text{RT ile üretilen enerji} \\ & + \text{Jeneratör ile üretilen enerji} - \text{Talep enerji} \end{aligned} \quad (5.4)$$

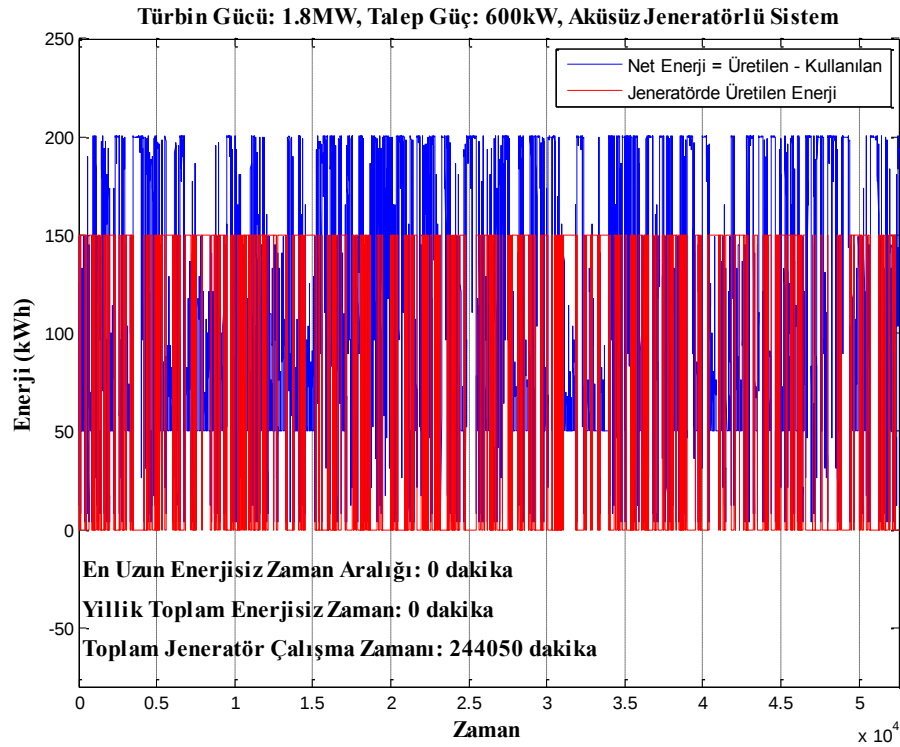
şeklinde hesaplanmıştır.

Net enerji değerinin sıfırdan büyük olduğu durumlarda talep edilen enerji karşılanabilmekte, sıfır ve altında ise jeneratör devreye girmektedir. Bu sistemler için hesaplanan toplam jeneratör çalışma süreleri ve enerjisiz zamanlar dakika cinsinden ilgili grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde x-eksenleri, her bir işaretin 10’ar dakikalık ortalamaları göstermesinden dolayı, kaçınıcı 10 dakikada bulunulduğunu belirten zaman dilimlerini; y-eksenleri ise kWh cinsinden net enerji değerlerini göstermektedir.

#### 5.2.4.1 Sistem 11: 600 kW tüketim, 900 kW jeneratör

600 kW'lık sabit bir yükü besleyen, 900 kW jeneratör destekli şebekeden bağımsız bir sistemde net enerji ve jeneratörde üretilen enerji grafikleri Şekil 5.59-5.63'te verilmiştir. Türbin gücünün artmasıyla meydana gelen net enerjideki artış ve jeneratör çalışma zamanlarındaki azalma, ilgili grafiklerin karşılaştırılmasıyla görülebilmektedir.

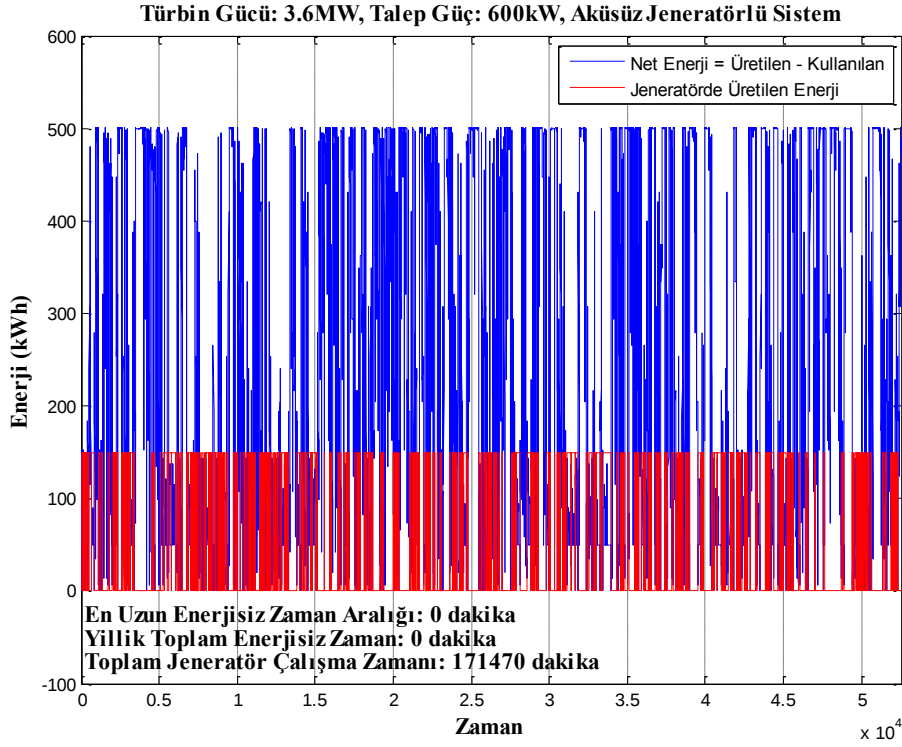
Şekil 5.59'da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.60'ta 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve jeneratörde üretilen enerji grafikleri gösterilmiştir.



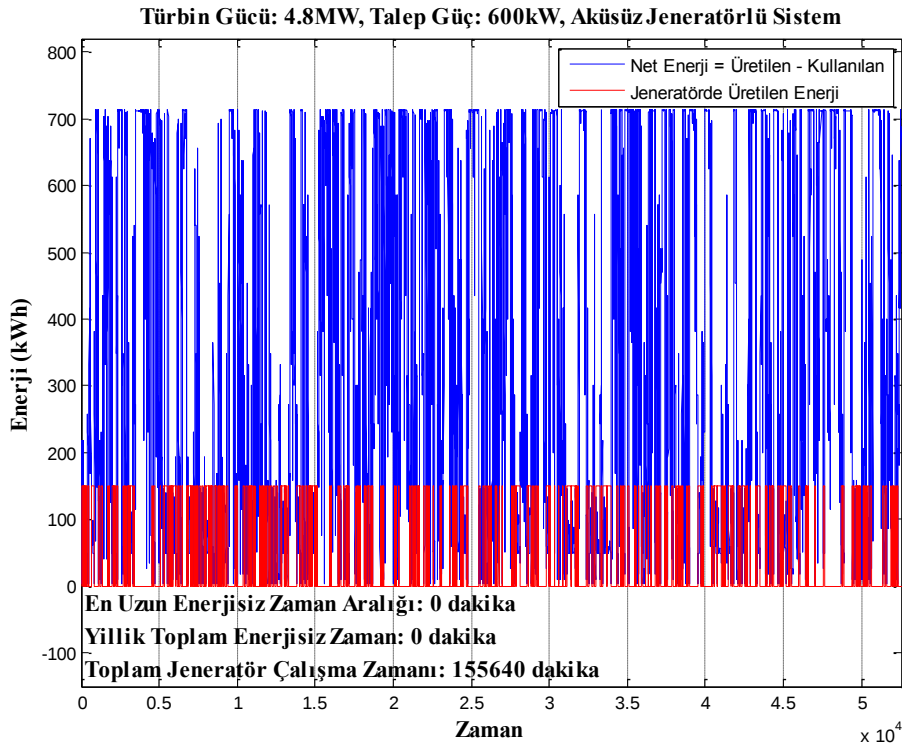
**Şekil 5.59 :** Sistem 11'de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.61'de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için net enerji ve jeneratörde üretilen enerji grafikleri verilmiştir.

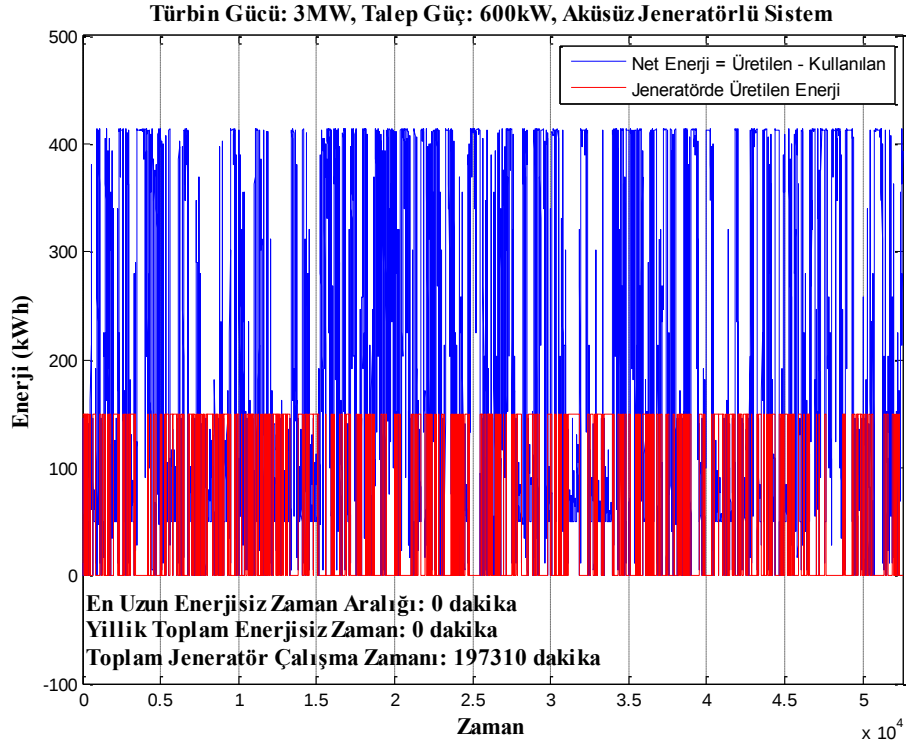
Şekil 5.62'de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.63'te 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve jeneratörde üretilen enerji grafikleri verilmiştir.



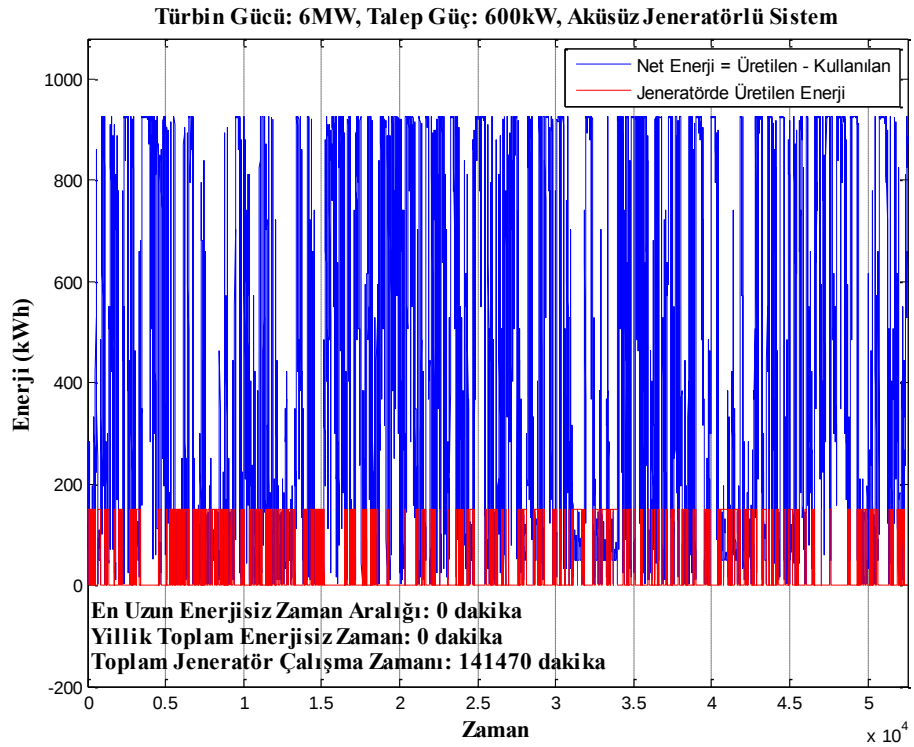
**Şekil 5.60 :** Sistem 11’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.61 :** Sistem 11’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.62 :** Sistem 11’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

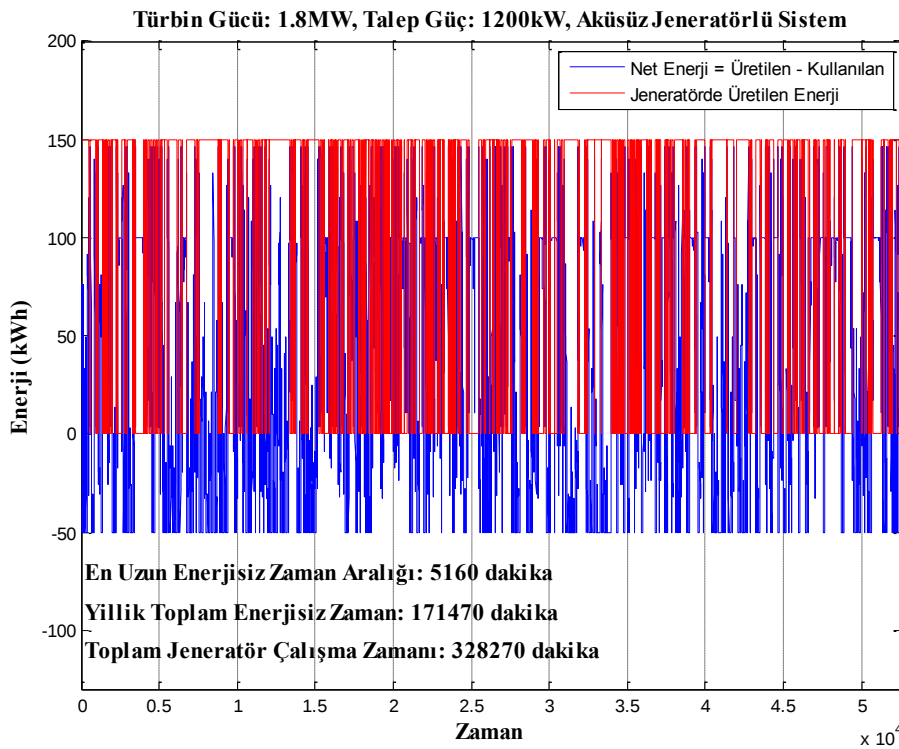


**Şekil 5.63 :** Sistem 11’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

#### 5.2.4.2 Sistem 12: 1200 kW tüketim, 900 kW jeneratör

Bu sistem için yalnızca, 11 numaralı sistemdeki talep edilen güç iki katına (1200 kW) çıkarılarak net enerji ve jeneratörde üretilen enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

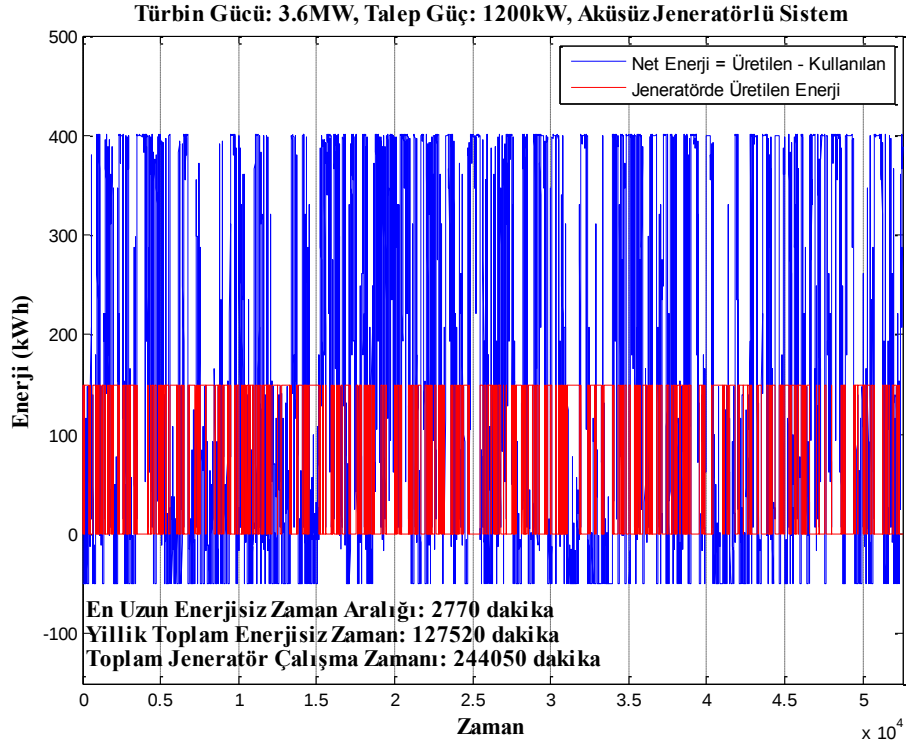
Şekil 5.64'te, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.65'te 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve jeneratörde üretilen enerji grafikleri gösterilmiştir.



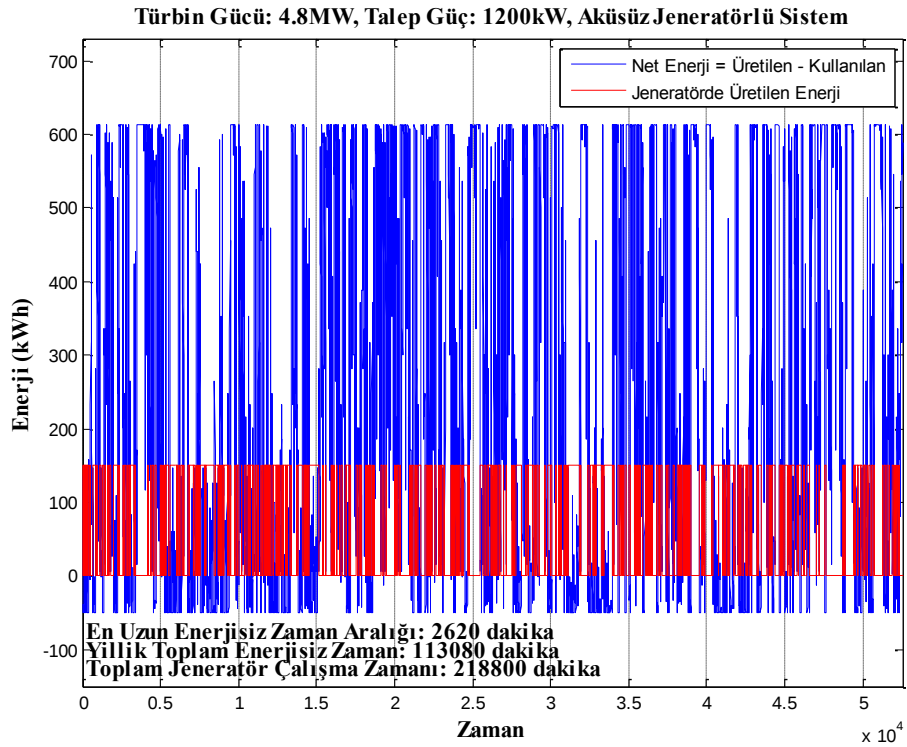
**Şekil 5.64 :** Sistem 12’de 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.66’da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için net enerji ve jeneratörde üretilen enerji grafikleri verilmiştir.

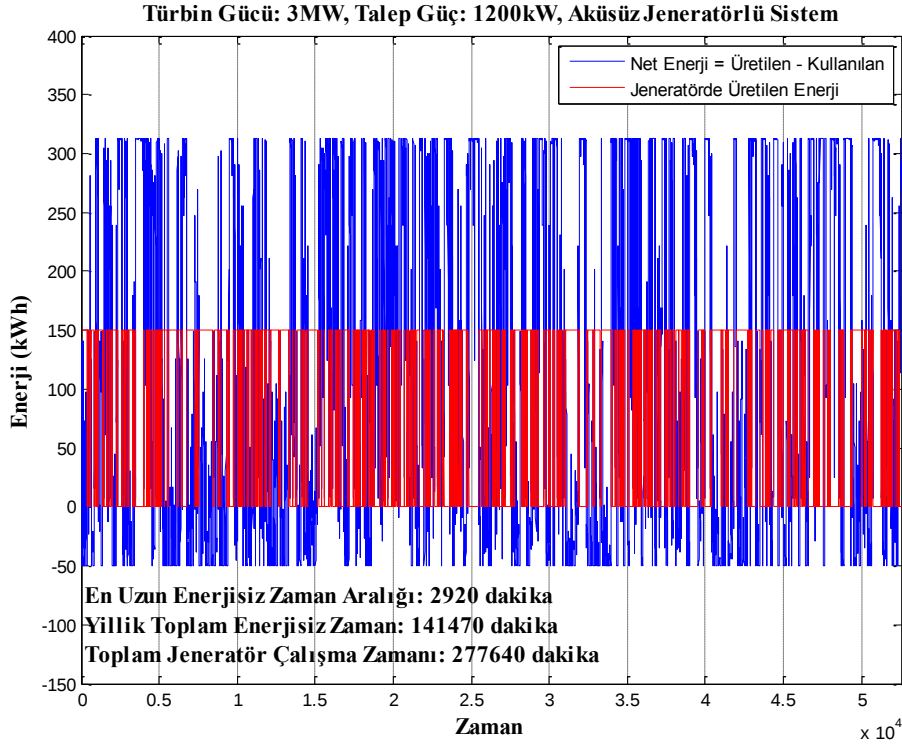
Şekil 5.67’de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.68’de 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve jeneratörde üretilen enerji grafikleri verilmiştir.



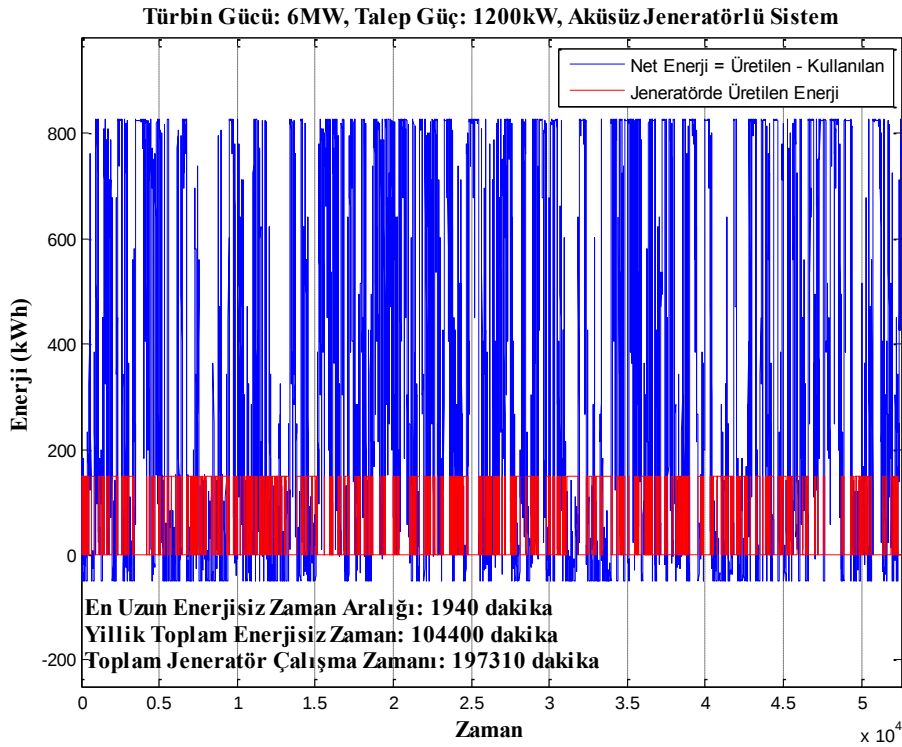
Şekil 5.65 : Sistem 12’de 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



Şekil 5.66 : Sistem 12’de 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.67 :** Sistem 12’de 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.68 :** Sistem 12’de 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

### 5.2.5 Aküsüz, şebeke bağlantılı sistemler

Bu sistemlerde, rüzgar türbinlerinde üretilen enerji herhangi bir akü sisteminde depolanmamakta ve doğrudan yükün beslenmesinde kullanılmaktadır. Bu sistemleri tanımlayan grafiklerde net enerji;

$$\text{Net Enerji} = \text{RT ile üretilen enerji} - \text{Talep enerji} \quad (5.5)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Net enerji değerinin sıfırdan büyük olduğu durumlarda talep edilen enerji karşılanabilmekte ve üretim fazlası şebekeye verilmektedir. Net enerji sıfıra eşit olduğu üretilen ve talep enerji denge durumunda, şebeke ile bir enerji alış-verişi olmamaktadır. Net enerji sıfırın altında ise talep enerji kesintisiz olarak karşılanacak şekilde şebekeden enerji çekilmektedir. Bu sistemler için hesaplanan şebekeden enerji çekilen ve şebekeye enerji verilen zamanlar dakika cinsinden ilgili grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde x-eksenleri, her bir işaretin 10'ar dakikalık ortalamaları göstermesinden dolayı, kaçınıcı 10 dakikada bulunulduğunu belirten zaman dilimlerini; y-eksenleri ise kWh cinsinden net enerji değerlerini göstermektedir.

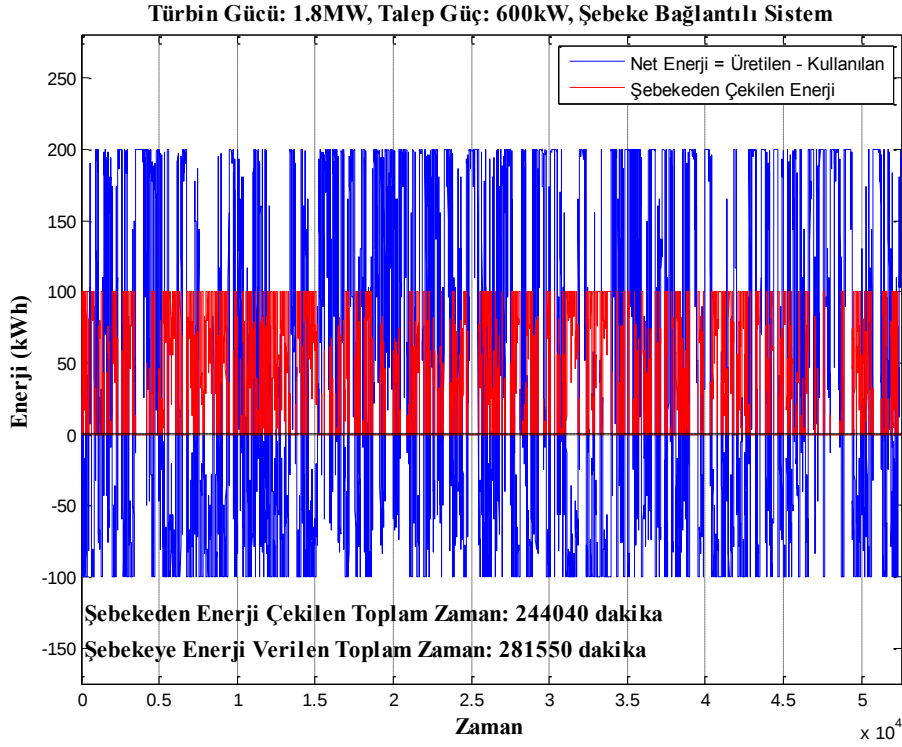
#### 5.2.5.1 Sistem 13: 600 kW tüketim, şebeke bağlantılı

600 kW'lık sabit bir yükü besleyen şebekeye bağlı bir sistemde net enerji ve şebekeden çekilen enerji grafikleri Şekil 5.70-5.74'te verilmiştir. Türbin gücünün artmasıyla meydana gelen net enerjideki ve şebekeye enerji verilen zamandaki artış ve şebekeden enerji çekilen zamandaki azalma, ilgili grafiklerin karşılaştırılmasıyla görülebilmektedir.

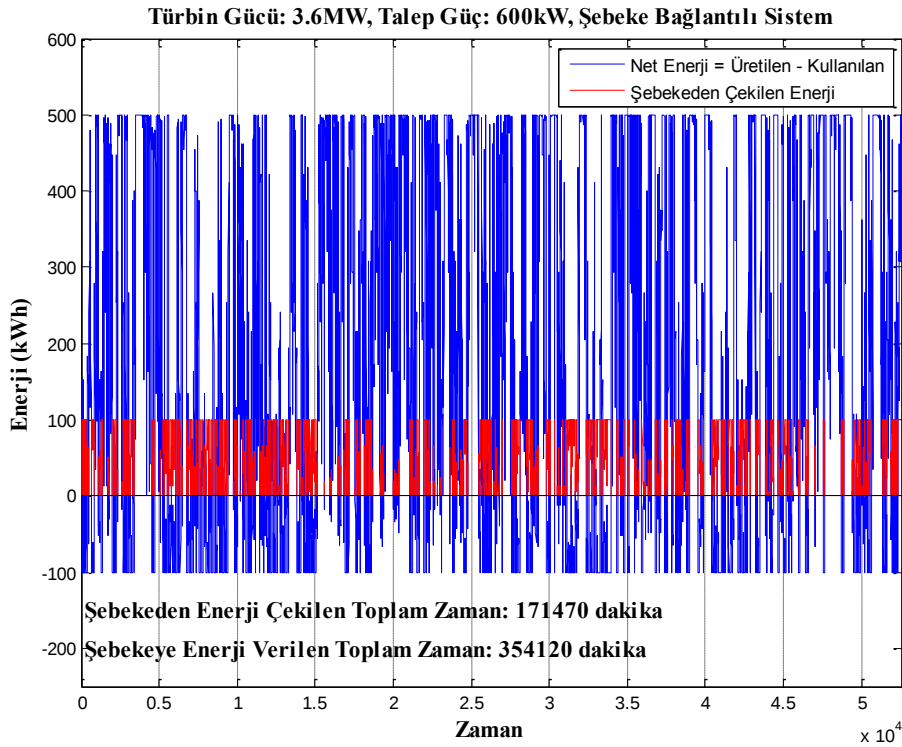
Şekil 5.69'da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.70'te 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve şebekeden çekilen enerji grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 5.71'de, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için net enerji ve şebekeden çekilen enerji grafikleri verilmiştir.

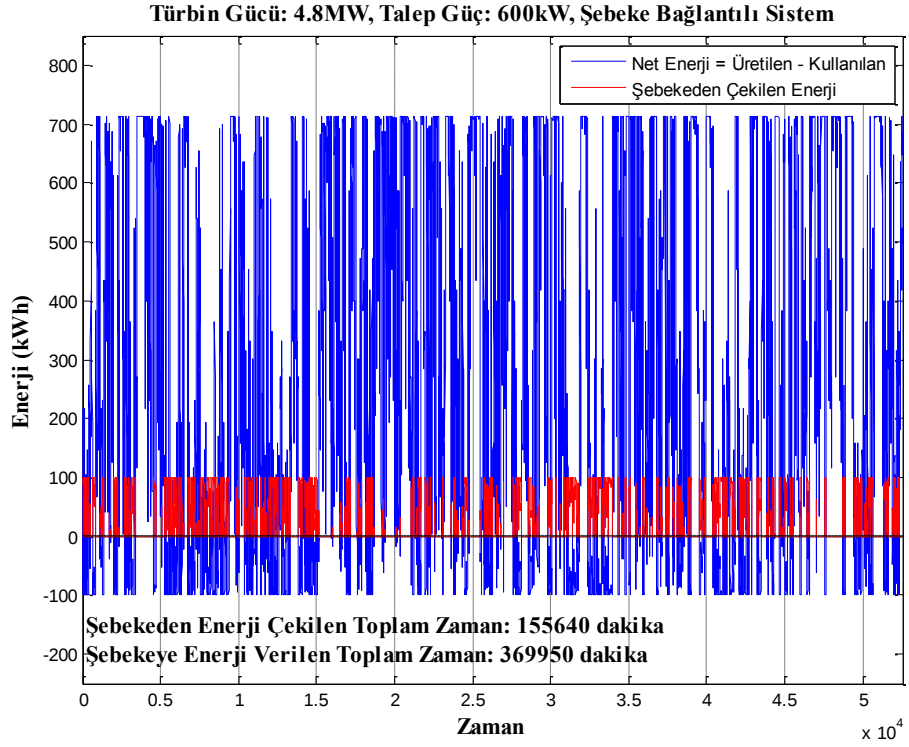
Şekil 5.72'de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.73'te 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve şebekeden çekilen enerji grafikleri verilmiştir.



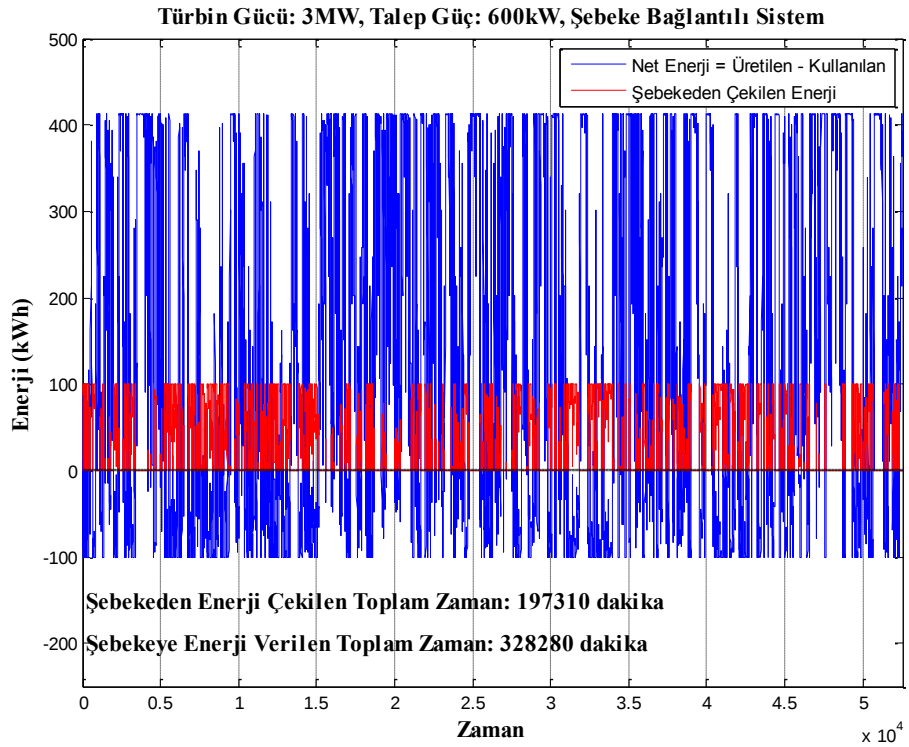
**Şekil 5.69 :** Sistem 13'te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



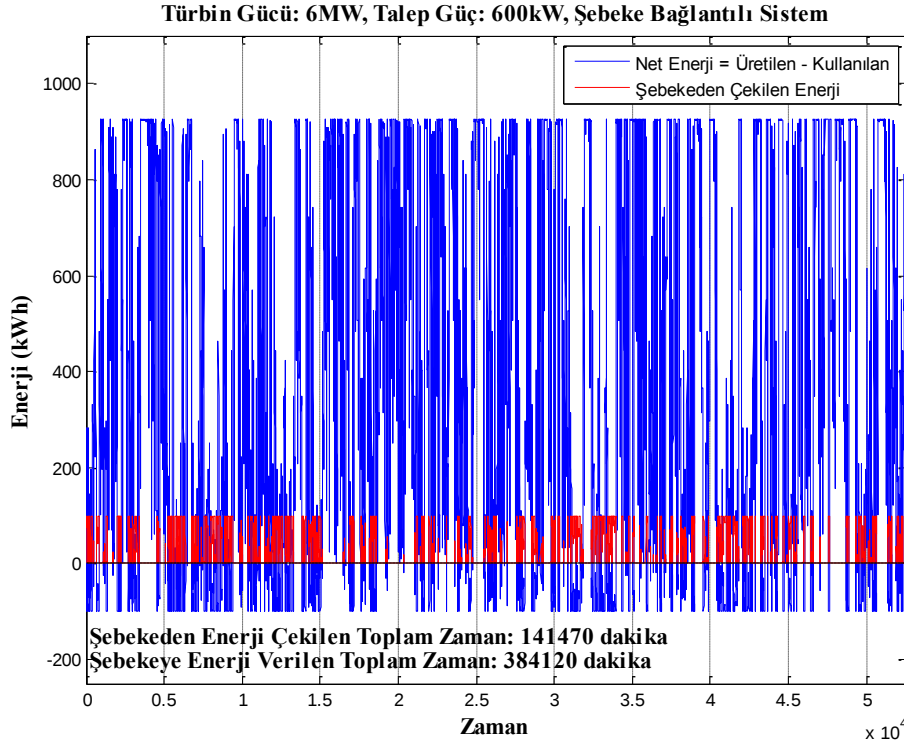
**Şekil 5.70 :** Sistem 13'te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.71 :** Sistem 13'te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.72 :** Sistem 13'te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.73 :** Sistem 13'te 2 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

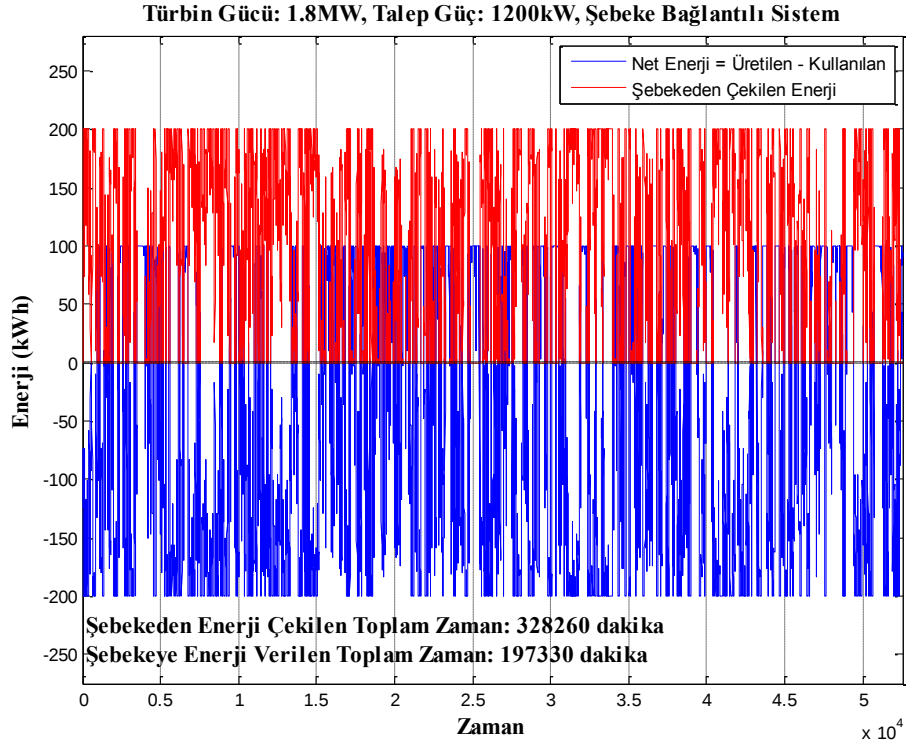
#### 5.2.5.2 Sistem 14: 1200 kW tüketim, şebeke bağlantılı

Bu sistem için yalnızca, 13 numaralı sistemdeki talep edilen güç iki katına (1200 kW) çıkarılarak net enerji ve şebekeden çekilen enerji değerleri yeniden hesaplanmıştır.

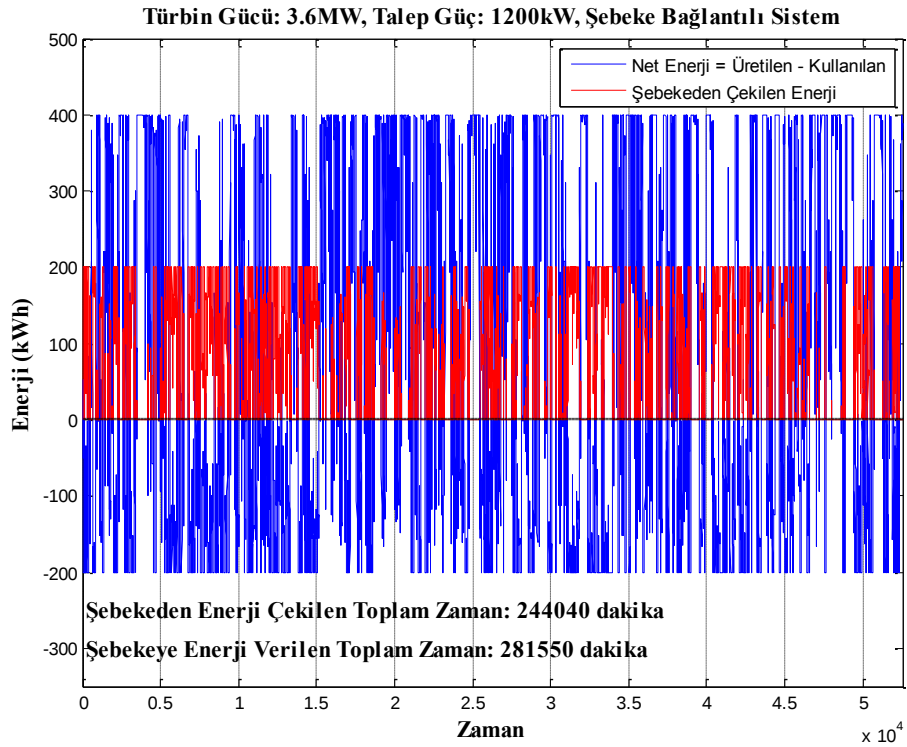
Şekil 5.74'te, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 rüzgar türbini ve Şekil 5.75'te 2 adet V90 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve şebekeden çekilen enerji grafikleri verilmiştir.

Şekil 5.76'da, 1 adet 1,8 MW Vestas V90 türbini ve 1 adet 3 MW Vestas V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen, tasarlanan 4,8 MW rüzgar tarlası için net enerji ve şebekeden çekilen enerji grafikleri verilmiştir.

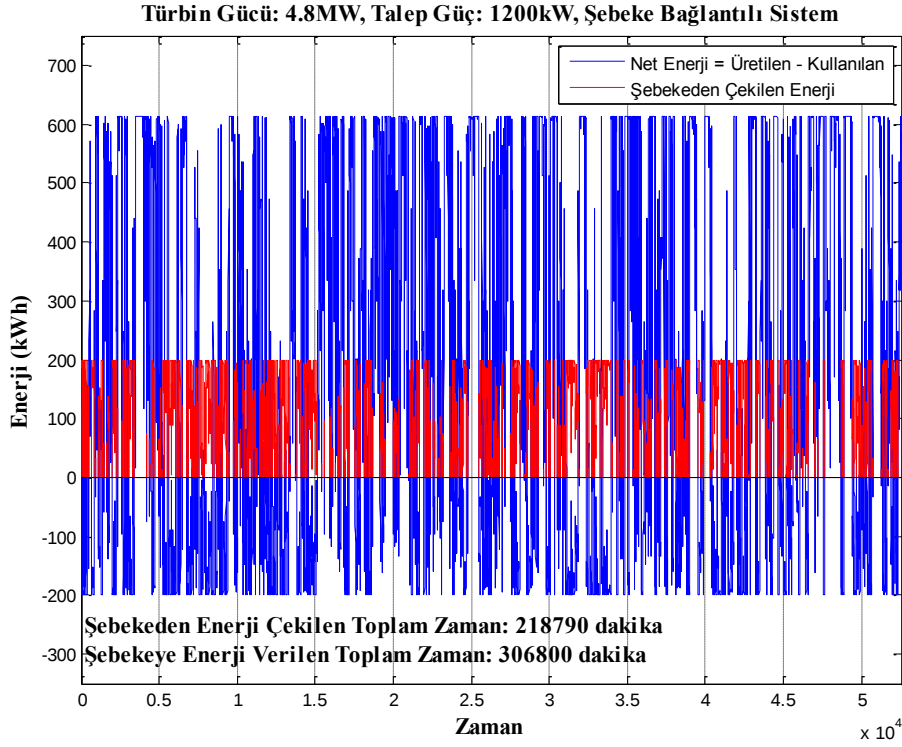
Şekil 5.77'de, 1 adet 3 MW Vestas V112 rüzgar türbini ve Şekil 5.78'de 2 adet V112 türbini güç eğrisi kullanılarak elde edilen net enerji ve şebekeden çekilen enerji grafikleri verilmiştir.



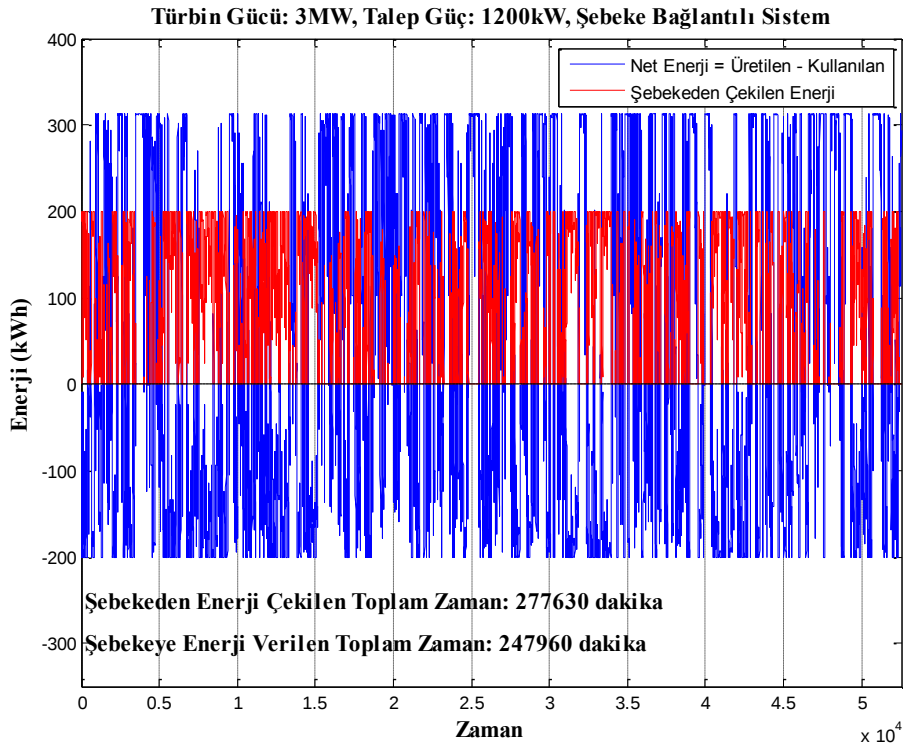
**Şekil 5.74 :** Sistem 14'te 1 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



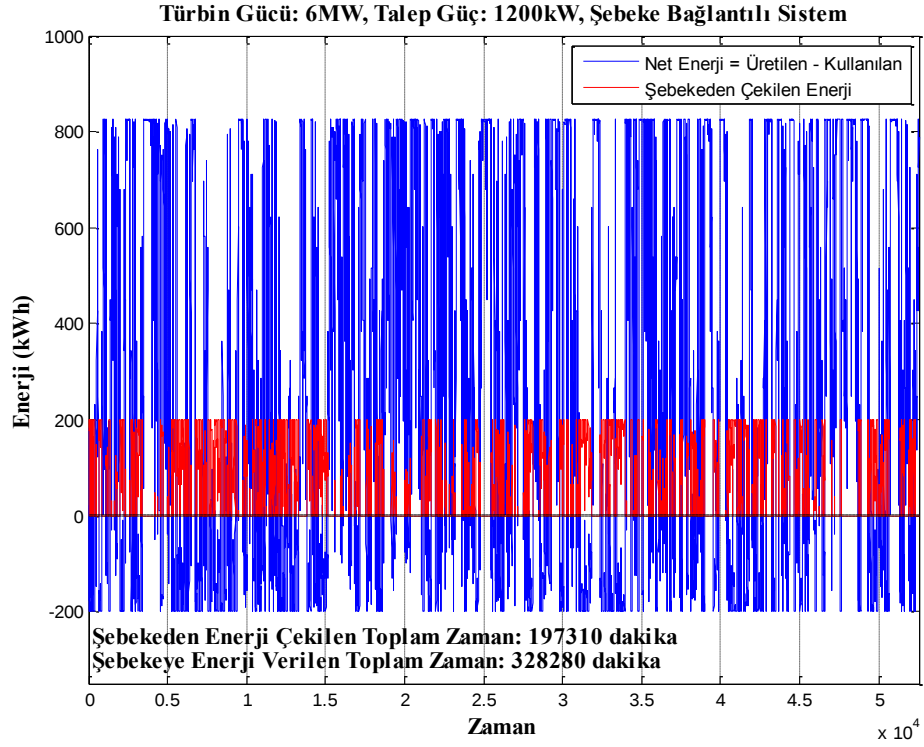
**Şekil 5.75 :** Sistem 14'te 2 adet V90 kullanılarak elde edilen grafik.



**Şekil 5.76 :** Sistem 14'te 1 adet V90 ve 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

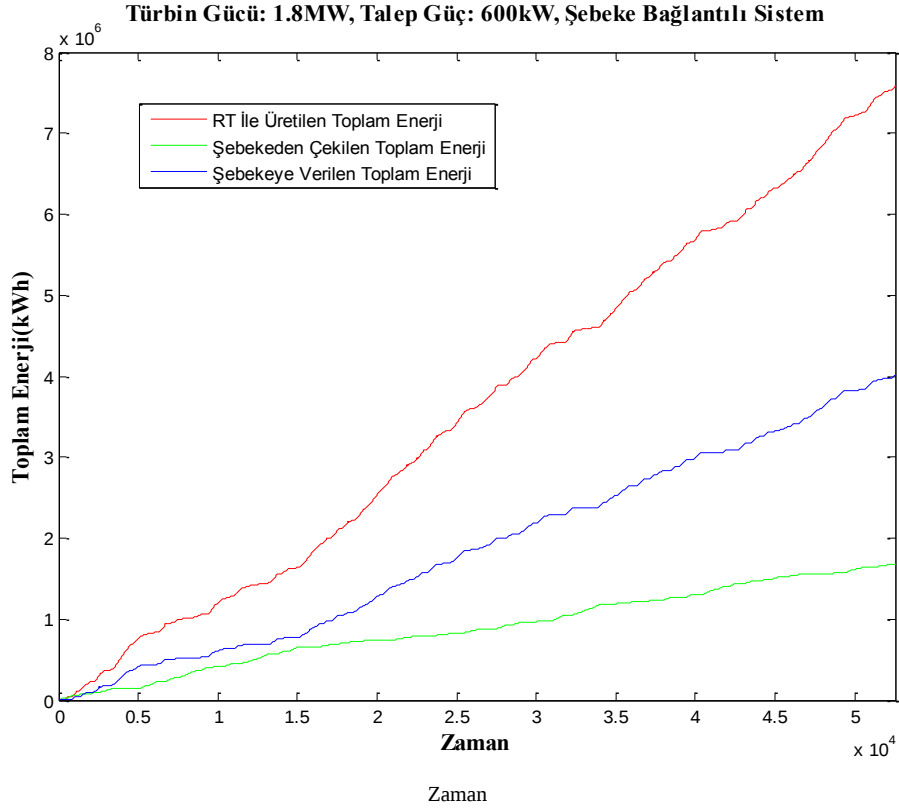


**Şekil 5.77 :** Sistem 14'te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

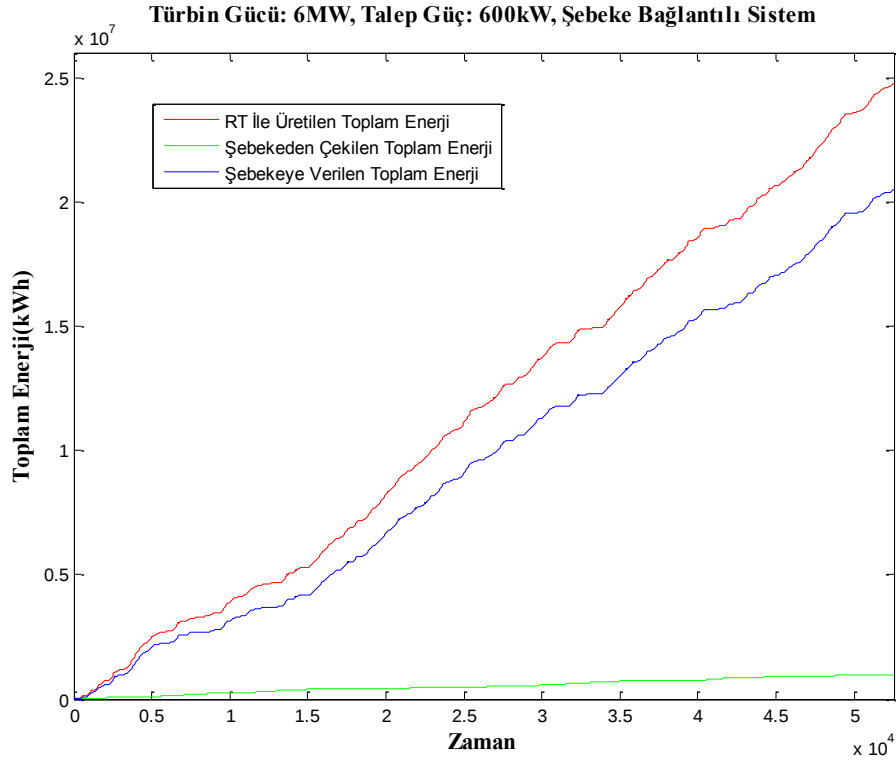


**Şekil 5.78 :** Sistem 14’te 1 adet V112 kullanılarak elde edilen grafik.

Şekil 5.79 ve Şekil 5.80’ deki grafikler, 5 numaralı sistemde 1,8 MW ve 6 MW kurulu güce sahip sistemlerde rüzgar türbinlerinde üretilen, şebekeden çekilen ve şebekeye verilen toplam enerjilerin kıyaslanması amacıyla hazırlanmıştır. Kurulu gücün yüksek olduğu sistemde, rüzgar türbinlerinde üretilen ve şebekeye verilen yıllık toplam enerjinin daha yüksek, şebekeden çekilen toplam enerjinin ise daha düşük olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.79 :** 1,8 MW kurulu güçte RT’de üretilen, şebekeden çekilen ve şebekeye verilen toplam enerji.



**Şekil 5.80 :** 6 MW kurulu güçte RT’de üretilen, şebekeden çekilen ve şebekeye verilen toplam enerji.

### 5.2.6 Sistemlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde, VRB enerji depolama sistemine sahip olan ve olmayan 14 farklı rüzgar enerji sisteminin karşılaştırmalı enerji analizleri için çizelgeler oluşturulmuştur. Çizelge 5.2’de, analizi yapılan şebekeden bağımsız, enerji depolamalı sistemler için hesaplanan en uzun enerjisiz zaman aralıkları, yıllık toplam enerjisiz zaman ve akünün dolu olduğu toplam zamanlar S:saat ve d:dakika cinsinden yazılarak listelenmiştir.

**Çizelge 5.2 : Şebekeden bağımsız, akülü sistemler için karşılaştırma tablosu.**

| <i>Sistem Özellikleri</i> | <i>Kurulu Güç (MW)</i> | <i>En uzun enerjisiz zaman aralığı</i> | <i>Yıllık toplam enerjisiz zaman</i> | <i>Akünün dolu olduğu yıllık toplam zaman</i> |
|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Sistem No: 1</b>       | 1,8                    | 150 S                                  | 3835 S                               | 3374 S                                        |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6                    | 119 S 50 d                             | 2547 S 30 d                          | 4742 S                                        |
| <b>1200 kWh</b>           | 4,8                    | 85 S 20 d                              | 2235 S 20 d                          | 5141 S 10 d                                   |
| <b>Tüketim: 600 kW</b>    | 3                      | 125 S 30 d                             | 3010 S                               | 4197 S 20 d                                   |
| <b>Şebekeden Bağımsız</b> | 6                      | 84 S 20 d                              | 2000 S 10 d                          | 5422 S 20 d                                   |
| <b>Sistem No: 2</b>       | 1,8                    | 150 S                                  | 3566 S 50 d                          | 3169 S 30 d                                   |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6                    | 119 S 50 d                             | 2280 S 50 d                          | 4583 S                                        |
| <b>2400 kWh</b>           | 4,8                    | 83 S 20 d                              | 1979 S 30 d                          | 4997 S 50 d                                   |
| <b>Tüketim: 600 kW</b>    | 3                      | 125 S 30 d                             | 2729 S 30 d                          | 4046 S 50 d                                   |
| <b>Şebekeden Bağımsız</b> | 6                      | 82 S                                   | 1748 S 30 d                          | 5299 S                                        |
| <b>Sistem No: 3</b>       | 1,8                    | 249 S 50 d                             | 5838 S 50 d                          | 1225 S                                        |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6                    | 150 S                                  | 4044 S 40 d                          | 3534 S                                        |
| <b>1200 kWh</b>           | 4,8                    | 127 S                                  | 3559 S 40 d                          | 3995 S                                        |
| <b>Tüketim: 1200 kW</b>   | 3                      | 213 S 40 d                             | 4579 S 30 d                          | 2928 S 10 d                                   |
| <b>Şebekeden Bağımsız</b> | 6                      | 125 S 30 d                             | 3230 S 10 d                          | 4334 S 30 d                                   |
| <b>Sistem No: 4</b>       | 1,8                    | 249 S 50 d                             | 5767 S 40 d                          | 819 S 20 d                                    |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6                    | 150 S                                  | 3835 S                               | 3374 S                                        |
| <b>2400kWh</b>            | 4,8                    | 127 S                                  | 3358 S 20 d                          | 3868 S 50 d                                   |
| <b>Tüketim: 1200 kW</b>   | 3                      | 213 S 40 d                             | 4367 S 30 d                          | 2739 S 30 d                                   |
| <b>Şebekeden Bağımsız</b> | 6                      | 125 S 30 d                             | 3010 S                               | 4197 S 20 d                                   |

Bu çizelgeye göre;

- Talep enerjinin karşılanamadığı en uzun enerjisiz zaman aralıkları, 1 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %20-32 oranında azalma, akü kapasitesinin artmasıyla %0-2 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %25-70 oranında artış göstermiştir. Buna göre en uzun enerjisiz zaman aralıkları üzerinde en büyük etkiler,

kurulu güç ve tüketimden kaynaklanır. Kurulu gücün artışı ile, akü kapasitesi ve tüketimdeki değişimin bu zamana etki derecesi üzerinde bir paralellik görülememiştir. Başka bir deyişle, daha yüksek kurulu güce sahip sistemlerde kapasite veya tüketimdeki artışın en uzun enerjisiz zaman aralığı üzerindeki etkisinin daha fazla/az olduğuna dair bir yorum yapılamamaktadır.

- Talep enerjinin karşılanamadığı yıllık toplam enerjisiz zaman, 1 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %33 oranında azalma, akü kapasitesinin artmasıyla %6-12 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %52-61 oranında artış göstermiştir. Buna göre yıllık toplam enerjisiz zaman üzerinde en büyük etki, tüketimden kaynaklanır. Ayrıca, daha yüksek kurulu güce sahip sistemlerde kapasite veya tüketimdeki artışın toplam enerjisiz zaman üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Akünün dolu olduğu ve üretilen enerjinin daha fazla depolanamadığı yıllık toplam zaman; 1 numaralı sistemde türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %30-40 oranında artış, akü kapasitesinin artmasıyla %2-6 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %20-63 oranında azalma göstermiştir. Buna göre akünün dolu olduğu zaman üzerinde en büyük etkiler, kurulu güç ve tüketimden kaynaklanır. Daha yüksek kurulu güce sahip sistemlerde kapasite veya tüketimdeki artışın akünün dolu olduğu zaman üzerindeki etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 5.3'te, analizi yapılan jeneratör destekli, şebekeden bağımsız, enerji depolamalı sistemler için hesaplanan toplam jeneratör çalışma süresi, yıllık toplam enerjisiz zaman ve akünün dolu olduğu toplam zamanlar S:saat ve d:dakika cinsinden yazılarak listelenmiştir.

**Çizelge 5.3 :** Şebekeden bağımsız, akülü ve jeneratör destekli sistemler için karşılaştırma tablosu.

| <i>Sistem Özellikleri</i> | <i>Kurulu Güç (MW)</i> | <i>Toplam jeneratör çalışma süresi</i> | <i>Yıllık toplam enerjisiz zaman</i> | <i>Akünün dolu olduğu yıllık toplam zaman</i> |
|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Sistem No: 5</b>       | 1,8                    | 3573 S 10 d                            | 0                                    | 6342 S 10 d                                   |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6                    | 2384 S                                 | 0                                    | 6354 S 30 d                                   |
| <b>1200 kWh</b>           | 4,8                    | 2102 S 30 d                            | 0                                    | 6538 S 20 d                                   |
| <b>Tüketim: 600 kW</b>    | 3                      | 2816 S 40 d                            | 0                                    | 6362 S 40 d                                   |
| <b>Jeneratörlü Sistem</b> | 6                      | 1876 S 20 d                            | 0                                    | 6640 S 10 d                                   |

**Çizelge 5.3 (devam) : Şebekeden bağımsız, akülü ve jeneratör destekli sistemler için karşılaştırma tablosu.**

|                           |     |             |   |             |
|---------------------------|-----|-------------|---|-------------|
| <b>Sistem No: 6</b>       | 1,8 | 3274 S 5    | 0 | 5435 S 30 d |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6 | 2161 S 30 d | 0 | 5662 S 40 d |
| <b>2400 kWh</b>           | 4,8 | 1890 S 50 d | 0 | 5998 S 10 d |
| <b>Tüketim: 600 kW</b>    | 3   | 2530 S 10 d | 0 | 5542 S 50 d |
| <b>Jeneratörlü Sistem</b> | 6   | 1660 S 20 d | 0 | 6177 S 10 d |
| <b>Sistem No: 7</b>       | 1,8 | 5675 S 30 d | 0 | 2363 S 20 d |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6 | 4050 S 10 d | 0 | 3925 S 30 d |
| <b>1200 kWh</b>           | 4,8 | 3600 S 40 d | 0 | 4349 S 10 d |
| <b>Tüketim: 1200 kW</b>   | 3   | 4607 S 10 d | 0 | 3378 S 50 d |
| <b>Jeneratörlü Sistem</b> | 6   | 3276 S 50 d | 0 | 4649 S 50 d |
| <b>Sistem No: 8</b>       | 1,8 | 5633 S 50 d | 0 | 2007 S 20 d |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>    | 3,6 | 3970 S      | 0 | 3707 S      |
| <b>2400 kWh</b>           | 4,8 | 3526 S      | 0 | 4160 S 50 d |
| <b>Tüketim: 1200 kW</b>   | 3   | 4529 S 20 d | 0 | 3141 S      |
| <b>Jeneratörlü Sistem</b> | 6   | 3184 S 50 d | 0 | 4469 S 10 d |

Bu çizelgeye göre;

- Yıllık toplam jeneratör çalışma süresi, 5 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %33 oranında azalma, akü kapasitesinin artmasıyla %8-13 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %58-74 oranında artış göstermiştir. Buna göre en uzun enerjisiz zaman aralıkları üzerinde en büyük etki tüketimden kaynaklanır. Ayrıca, daha yüksek kurulu güce sahip sistemlerde kapasite veya tüketimdeki artışın toplam enerjisiz zaman üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Rüzgar türbininde enerji üretiminin olmadığı, aynı zamanda akünün de boş olduğu durumlarda jeneratör devreye girdiği için, yıllık toplam enerjisiz zaman sıfırdır.
- Akünün dolu olduğu ve üretilen enerjinin daha fazla depolanamadığı yıllık toplam zaman; 5 numaralı sistemde türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %0-4 oranında artış, akü kapasitesinin artmasıyla %6-14 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %30-62 oranında azalma göstermiştir. Buna göre akünün dolu olduğu zaman üzerinde en büyük etkiler, tüketimden kaynaklanır. Daha yüksek kurulu güce sahip sistemlerde kapasite veya tüketimdeki artışın akünün dolu olduğu zaman üzerindeki etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 5.4'te, analizi yapılan jeneratörlü ve jeneratörsüz, şebekeden bağımsız, enerji depolamasız sistemler için hesaplanan toplam jeneratör çalışma süresi, yıllık toplam enerjisiz zaman ve en uzun enerjisiz zaman aralıkları S:saat ve d:dakika cinsinden listelenmiştir.

**Çizelge 5.4 :** Şebekeden bağımsız, aküsüz sistemler için karşılaştırma tablosu.

| <i>Sistem Özellikleri</i>         | <i>Kurulu Güç (MW)</i> | <i>En uzun enerjisiz zaman aralığı</i> | <i>Yıllık toplam enerjisiz zaman</i> | <i>Toplam jeneratör çalışma zamanı</i> |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Sistem No: 9</b>               | 1,8                    | 127 S                                  | 4067 S 30 d                          | -                                      |
| <b>Tüketim: 600 kW</b>            | 3,6                    | 86 S                                   | 2857 S 50 d                          | -                                      |
| <b>Aküsüz Sistem</b>              | 4,8                    | 49 S 10 d                              | 2594 S                               | -                                      |
|                                   | 3                      | 122 S 20 d                             | 3288 S 30 d                          | -                                      |
|                                   | 6                      | 48 S 40 d                              | 2357 S 50 d                          | -                                      |
| <b>Sistem No: 10</b>              | 1,8                    | 218 S 50 d                             | 5471 S 10 d                          | -                                      |
| <b>Tüketim: 1200 kW</b>           | 3,6                    | 127 S                                  | 4067 S 30 d                          | -                                      |
| <b>Aküsüz Sistem</b>              | 4,8                    | 125 S 20 d                             | 3646 S 40 d                          | -                                      |
|                                   | 3                      | 150 S 10 d                             | 4627 S 20 d                          | -                                      |
|                                   | 6                      | 122 S 20 d                             | 3288 S 30 d                          | -                                      |
| <b>Sistem No: 11</b>              | 1,8                    | 0                                      | 0                                    | 4067 S 30 d                            |
| <b>Tüketim: 600 kW</b>            | 3,6                    | 0                                      | 0                                    | 2857 S 50 d                            |
| <b>Aküsüz, Jeneratörlü Sistem</b> | 4,8                    | 0                                      | 0                                    | 2594 S                                 |
|                                   | 3                      | 0                                      | 0                                    | 3288 S 30 d                            |
|                                   | 6                      | 0                                      | 0                                    | 2357 S 50 d                            |
| <b>Sistem No: 12</b>              | 1,8                    | 86 S                                   | 2857 S 50 d                          | 5471 S 10 d                            |
| <b>Tüketim: 1200 kW</b>           | 3,6                    | 46 S 10 d                              | 2125 S 20 d                          | 4067 S 30 d                            |
| <b>Aküsüz, Jeneratörlü Sistem</b> | 4,8                    | 43 S 40 d                              | 1884 S 40 d                          | 3646 S 40 d                            |
|                                   | 3                      | 48 S 40 d                              | 2357 S 50 d                          | 4627 S 20 d                            |
|                                   | 6                      | 32 S 20 d                              | 1740 S                               | 3288 S 30 d                            |

Bu çizelgeye göre;

- En uzun enerjisiz zaman aralıkları, 9 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %32-60 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %22-151 oranında artış göstermiştir. Buna göre en uzun enerjisiz zaman aralıkları üzerinde en büyük etki, tüketimden kaynaklanır. Kurulu gücün artışı ile, tüketimdeki artışın bu zamana etki derecesi üzerinde bir paralellik görülememiştir. 11 numaralı sistemde, jeneratörde üretilen güç, talep güçten yüksek olduğundan enerjisiz zaman sıfırdır. 10 numaralı sisteme

jeneratör eklenerek en uzun enerjisiz zaman aralıkları %60-70 oranında azaltılmıştır.

- Talep enerjinin karşılanamadığı yıllık toplam enerjisiz zaman, 9 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %30 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %34-42 oranında artış göstermiştir. Kurulu gücün artışı ile, tüketimdeki artışın bu zaman üzerindeki etki derecesi üzerinde bir paralellik görülememiştir. 11 numaralı sistemde, jeneratörde üretilen güç, talep güçten yüksek olduğundan enerjisiz zaman sıfırdır. 10 numaralı sisteme jeneratör eklenerek toplam enerjisiz zaman, %47-49 oranında azaltılmıştır.
- Toplam jeneratör çalışma süresi, 11 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %30 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %34-42 oranında artış göstermiştir. Kurulu gücün artışı ile, tüketimdeki artışın bu zaman üzerindeki etki derecesi üzerinde bir paralellik görülememiştir.

Çizelge 5.5'te, analizi yapılan şebeke bağlantılı, enerji depolamasız sistemlerde şebekeye enerji verilen ve şebekeden enerji çekilen yıllık toplam zamanlar ve bu enerji değerleri listelenmiştir.

**Çizelge 5.5 : Şebeke bağlantılı, aküsüz sistemler için karşılaştırma tablosu.**

| <i>Sistem Özellikleri</i>       | <i>Kurulu Güç (MW)</i> | <i>Şebekeye verilen toplam enerji (MWh)</i> | <i>Şebekeden çekilen toplam enerji (MWh)</i> | <i>Şebekeye enerji verilen toplam zaman</i> | <i>Şebekeden enerji çekilen toplam zaman</i> |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Sistem No: 13</b>            | 1,8                    | 4003,5                                      | 1681,6                                       | 4692 S 30 d                                 | 4067 S 50 d                                  |
| <b>Tüketim: 600 kW</b>          | 3,6                    | 11165                                       | 1265,4                                       | 5902 S                                      | 2857 S 50 d                                  |
| <b>Şebeke Bağlantılı Sistem</b> | 4,8                    | 15813                                       | 1112,5                                       | 6165 S 50 d                                 | 2594 S                                       |
|                                 | 3                      | 8481,5                                      | 1359,1                                       | 5471 S 20 d                                 | 3288 S 30 d                                  |
|                                 | 6                      | 20497                                       | 996                                          | 6402 S                                      | 2357 S 50 d                                  |
| <b>Sistem No: 14</b>            | 1,8                    | 1643,6                                      | 4577,7                                       | 3288 S 50 d                                 | 5471 S                                       |
| <b>Tüketim: 1200 kW</b>         | 3,6                    | 8007                                        | 3363,3                                       | 4692 S 30 d                                 | 4067 S 20 d                                  |
|                                 | 4,8                    | 12441                                       | 2997,1                                       | 5113 S 20 d                                 | 3646 S 30 d                                  |
| <b>Şebeke Bağlantılı Sistem</b> | 3                      | 5640,4                                      | 3773,8                                       | 4132 S 40 d                                 | 4627 S 10 d                                  |
|                                 | 6                      | 20479                                       | 2718,2                                       | 5471 S 20 d                                 | 3288 S 30 d                                  |

Bu çizelgeye göre;

- Şebekeye verilen yıllık toplam enerjide, 13 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %140-180 oranında artış ve tüketimin artmasıyla %0-60 oranında azalma görülmüştür. Kurulu gücün artışı ile, tüketimdeki artışın bu enerji değişimi üzerindeki etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir.
- Şebekeden çekilen yıllık toplam enerjide, 13 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %25 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %165-177 oranında artış görülmüştür. Kurulu gücün artışı ile, tüketimdeki artışın bu enerji değişimine etki derecesi üzerinde bir paralellik gözlenememiştir.
- Şebekeye enerji verilen yıllık toplam zaman, 13 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %17-25 oranında artış ve tüketimin artmasıyla %14-29 oranında azalma göstermiştir. Kurulu gücün artışı ile, tüketimdeki artışın bu zaman üzerindeki etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir.
- Şebekeden enerji çekilen yıllık toplam zaman, 13 numaralı sistemde tek başına türbin gücünün iki katına çıkartılmasıyla yaklaşık %30 oranında azalma ve tüketimin artmasıyla %34-42 oranında artış göstermiştir. Kurulu gücün artışı ile, tüketimdeki değişimin bu zamana etki derecesi üzerinde bir paralellik gözlenememiştir.

Ayrıca 600 kW tüketime, 1200 kWh akü kapasitesine sahip akülü, aküsüz, jeneratörlü ve jeneratörsüz sistemler (Sistem 1,5,9 ve 11), 1,8 MW ve 6 MW kurulu güç üzerinden karşılaştırıldığında;

- Jeneratör desteği bulunmayan akülü sistemlerde, jeneratör bulundurmeyen aküsüz sistemlere oranla toplam enerjisiz zamanda ve buna bağlı olarak karşılanamayan enerjide 1,8 MW ve 6 MW kurulu güç için sırasıyla %5,7 ve %15 oranında düşüş gözlenmiştir. Buradan, enerjisiz zamanın telafi edilmesinde akü kullanımının büyük ölçekli rüzgar sistemleri için küçük ölçeklilere kıyasla daha uygun olacağı sonucuna varılabilir. Ayrıca, akülü sistemde akünün dolu olmasına bağlı olarak üretilen fazla enerjinin kaybının görüldüğü süre, aküsüz sistemde talep fazlası üretilen enerji kaybının

görüldüğü süreye oranla 1,8 MW ve 6 MW kurulu güç için sırasıyla %28 ve %15 daha azdır.

- Akülü sistemlerde jeneratör kullanılan ve kullanılmayan durumlar için karşılaştırıldığında; jeneratör kullanımının, akünün dolu olduğu zamanda 1,8 MW ve 6 MW kurulu güç için sırasıyla %88 ve %22'lik artışa yol açtığı görülmektedir. Buradan, akülü sistemde enerjisiz zamanın sıfırlanması amacıyla jeneratör kullanılmak istenmesi durumunda, üretilen fazla enerjinin kaybı açısından büyük ölçekli rüzgar sistemlerinde daha olumlu sonuç alınacağı söylenebilir.
- Jeneratör kullanılan sistemler karşılaştırıldığında, akü kullanımının jeneratör çalışma süresini aküsüz duruma göre 1,8 MW ve 6 MW kurulu güç için sırasıyla %12 ve %20 oranlarında azalttığı görülmüştür.
- Şebeke bağlantılı sistemlerde şebekeye enerji verilen ve şebekeden enerji çekilen zamanlar; şebeke bağlantısız, aküsüz sistemlerde sırasıyla üretim fazlası enerjinin boşa gittiği ve talep enerjinin karşılanamadığı zamanları temsil etmektedir. Sistemin şebekeye bağlanmasıyla kayıp enerji ve talebin karşılanamaması durumunun önüne geçilmiştir.

#### **5.2.6.1 Sistem maliyetlerinin karşılaştırılması**

Çizelge 5.6'da, piyasadan edinilen yaklaşık ürün fiyat bilgileri kullanılarak, oluşturulan sistemlerin Amerikan Doları üzerinden hesaplanan toplam maliyetleri ve 1MW kurulu güç başına maliyetler karşılaştırılmıştır. Maliyet hesaplarında; 1200 kWh akü için 2 milyon \$, 2400 kWh akü için 4 milyon \$, 900 kW jeneratör için 150.000 \$, 1,8 MW türbin maliyeti ve kurulum için 2,8 milyon \$ ve 3 MW türbin maliyeti ve kurulum için 4,5 milyon \$ değerleri kullanılmıştır.

Şebekeden bağımsız sistemlerde akü kullanılması durumunda toplam maliyette, kurulu güce bağlı olarak %20-70 arasında önemli bir artış gözlenmiştir. Akü kapasitesinin arttırılmasıyla gözlenen maliyet artışı %20-40 civarındadır. Jeneratör kullanımı, sistem maliyetlerini %1-5 oranında arttırmıştır. Kurulu gücün yüksek olduğu sistemlerde akü kullanımıyla, akü kapasitesinin arttırılmasıyla ve/veya jeneratör kullanılmasıyla meydana gelen maliyetteki artış oranının daha düşük olduğu görülmüştür.

**Çizelge 5.6 : Sistem maliyet karşılaştırma tablosu.**

| <i>Sistem Özellikleri</i>         | <i>Kurulu Güç (MW)</i> | <i>Sistem Toplam Maliyeti (milyon \$)</i> | <i>1 MW Kurulu Güç Başına Toplam Maliyet (milyon \$)</i> |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Sistem No: 1 ve 3</b>          | 1,8                    | 4,8                                       | 2,67                                                     |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>            | 3,6                    | 7,6                                       | 2,11                                                     |
| <b>1200 kWh</b>                   | 4,8                    | 9,3                                       | 1,94                                                     |
| <b>Şebekeden Bağımsız</b>         | 3                      | 6,5                                       | 2,17                                                     |
|                                   | 6                      | 11                                        | 1,83                                                     |
| <b>Sistem No: 2 ve 4</b>          | 1,8                    | 6,8                                       | 3,78                                                     |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>            | 3,6                    | 9,6                                       | 2,67                                                     |
| <b>2400 kWh</b>                   | 4,8                    | 11,3                                      | 2,35                                                     |
| <b>Şebekeden Bağımsız</b>         | 3                      | 8,5                                       | 2,83                                                     |
|                                   | 6                      | 13                                        | 2,17                                                     |
| <b>Sistem No: 5 ve 7</b>          | 1,8                    | 4,95                                      | 2,75                                                     |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>            | 3,6                    | 7,75                                      | 2,15                                                     |
| <b>1200 kWh</b>                   | 4,8                    | 9,45                                      | 1,97                                                     |
| <b>Jeneratörlü Sistem</b>         | 3                      | 6,65                                      | 2,22                                                     |
|                                   | 6                      | 11,15                                     | 1,86                                                     |
| <b>Sistem No: 6 ve 8</b>          | 1,8                    | 6,95                                      | 3,86                                                     |
| <b>Akü Kapasitesi:</b>            | 3,6                    | 9,75                                      | 2,71                                                     |
| <b>2400 kWh</b>                   | 4,8                    | 11,45                                     | 2,39                                                     |
| <b>Jeneratörlü Sistem</b>         | 3                      | 8,65                                      | 2,88                                                     |
|                                   | 6                      | 13,15                                     | 2,19                                                     |
| <b>Sistem No: 9 ve 10</b>         | 1,8                    | 2,8                                       | 1,56                                                     |
| <b>Aküsz, Jeneratörsüz Sistem</b> | 3,6                    | 5,6                                       | 1,56                                                     |
|                                   | 4,8                    | 7,3                                       | 1,52                                                     |
|                                   | 3                      | 4,5                                       | 1,5                                                      |
|                                   | 6                      | 9                                         | 1,5                                                      |
| <b>Sistem No: 11 ve 12</b>        | 1,8                    | 2,95                                      | 1,64                                                     |
| <b>Aküsz, Jeneratörlü Sistem</b>  | 3,6                    | 5,75                                      | 1,60                                                     |
|                                   | 4,8                    | 7,45                                      | 1,55                                                     |
|                                   | 3                      | 4,65                                      | 1,55                                                     |
|                                   | 6                      | 9,15                                      | 1,53                                                     |

## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, bir bölgede yapılan rüzgar hız ve yön ölçümlerinden edinilen iki yıllık rüzgar verisi kullanılarak bir rüzgar tarlası tasarlanmış ve bu rüzgar tarlasının vanadyum redoks akışkan akü enerji depolama sistemleriyle desteklenmesi durumu için Matlab® ortamında yazılan programlar kullanılarak enerji analizleri yapılmıştır. Bu analizler için 14 farklı sistem oluşturulmuş ve elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şebekeden bağımsız, VR akışkan akülü sistemlerin değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlara göre,

- Üretilen enerjinin daha fazla depolanamadığı akünün dolu olduğu zaman ve talep enerjinin karşılanamadığı enerjisiz zaman üzerindeki en büyük etkiler, kurulu güç ve tüketimden kaynaklanır. Akü kapasitesindeki değişimin bu zamanlar üzerindeki etkisi ise üretim ve tüketimin etkisine oranla oldukça azdır. Akülü sistemin kurulumunda üretim ve tüketim miktarları dikkate alınarak ideal akü kapasitesi belirlenmelidir. Gereğinden fazla akü kapasitesi uygulaması, enerji üreticisi için artı maliyete yol açacaktır.
- Akülü ve şebekeden bağımsız sistemlere jeneratör eklenmesiyle talep gücün kesintisiz olarak karşılanması sağlanabilir. Fakat akü kapasitesinin dolu olup üretilen enerjinin daha fazla depolanamayarak boşa gittiği zamanda önemli bir artış gözlenecek ve çalışma süreleri boyunca jeneratörün yakıt gereksinimi karşılanmak durumunda kalınacaktır. Jeneratörlü sistemlerde akü kapasitesinin arttırılması da akünün dolu olduğu zamanın azaltılmasında ve jeneratör çalışma süresini kısaltmada önemli bir rol oynamamaktadır. Bunlar göz önüne alınarak, şebekeden bağımsız, akülü sistemlerde jeneratör kullanımının, talebin büyük ölçüde sürekli ve sabit olarak karşılanması dışında önemli bir avantaj sağlamadığı görülmektedir. Jeneratör kullanmayı gerektiren sistemlerde bu durumun, jeneratör ve yakıt maliyetini birlikte getireceği dikkate alınarak bir maliyet analizi yapılmalıdır.

Şebekeden bağımsız, VR akışkan akülü ve aküsüz sistemlerin karşılaştırılması ve şebeke bağlantılı sistemin değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlara göre,

- Şebekeden bağımsız sistemlerde akü kullanılmasıyla, toplam enerjisiz zamanda önemli bir azalma görülmemiştir. Özellikle tüketimin yüksek olduğu durumlarda, enerjisiz zamandaki azalma oldukça düşüktür. Bu bakımdan VRB'lerin çevrim verimlerinin düşük olmasının büyük oranda enerji kaybına yol açtığı söylenebilir. Şebekeden bağımsız sistemlerde VRB yerine uygun ölçekte jeneratör desteği kullanılması, enerjisiz zamanı önemli ölçüde azaltacak ya da önleyecektir.
- Şebekeden bağımsız sistemde akü kullanılması, aküsüz sistemde talebin üzerindeki ve akülü sistemde akü kapasitesinin üzerindeki üretim fazlası enerjinin meydana geldiği sürenin azalması bakımından önemli bir etkiye sahiptir. Bu etki tüketimin ve kurulu gücün yüksek olduğu sistemlerde daha belirgindir.
- 500 kW altı rüzgar enerji santrallerinde otoprodüktörler tarafından üretilen enerjinin optimal kullanımı için en etkili çözüm, RES'lerin çift yönlü enerji alış-verişi sağlanacak şekilde şebekeye bağlanmasıdır. Bu sayede üretilen fazla enerjinin kaybının ve talebin karşılanamaması durumunun önüne geçilecek ve otoprodüktör, üretim fazlası enerjiden kazanç sağlayabilecektir. RES'lerin şebekeye entegrasyonunun ve enerji piyasasında planlamanın iyi şekilde sağlanmasının önündeki engeller sürdükçe, RES'lerde enerji depolama sistemlerinin kullanılması düşüncesi ve bu yöndeki çalışmalar devam edecektir.

Tüm sonuçlar dikkate alındığında, VRB'lerin rüzgar enerji sistemlerinde enerji depolama sistemi olarak kullanılması, düşük çevrim verimleri nedeniyle tercih edilmemektedir. Çevrim verimlerinin artması ve/veya akü maliyetlerinin yeterince azalması durumunda; derin deşarjdan etkilenmemeleri, yüksek çevrim ömürleri, yük değişimlerine hızlı cevap verebilmeleri, enerji depolama kapasitelerinin ve güç çıkışlarının kolay ayarlanabilir olması, şarj ve bakım kolaylıkları ve kendiliğinden deşarjlarının düşük olması gibi avantajlar, VRB'leri şebekeden bağımsız rüzgar sistemleri için uygulanabilir kılacaktır.

## KAYNAKLAR

- Bahadır, M. ve Ersoy, Ş.** (2010). Rüzgar enerjisi santralleri üretim tahmininin bilinmesinin önemi. *Kısa Süreli Rüzgar Enerjisi Tahmini ve Devlet Meteoroloji İşleri Faaliyetleri Semineri*, İstanbul, Mart 5.
- Barote, L., Weissbach, R., Teodorescu, R., Marinescu, C. ve Cirstea, M.** (2008). Stand-alone wind system with vanadium redox battery energy storage. *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Romania, May 22-24.
- Barutçu, B.** (2011). Wind energy and conversion technology lecture notes. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Beams Energy Group.** (2010). Energy storage technologies for wind power integration. Université Libre de Bruxelles, Belgium.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. ve Bossanyi, E.** (2001). Wind energy handbook. John Wiley & Sons Ltd, England, 0-471-48997-2.
- Deloitte Türkiye.** (2011). Yenilenebilirler için yeni hayat: yenilenebilir enerji politikaları ve beklentiler. Deloitte Enerji ve Kaynaklar Grubu, Türkiye.
- Denholm, P., Ela, E., Kirby, B. ve Milligan, M.** (2010). The role of energy storage with renewable electricity generation. *Technical Report*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, NREL/TP-6A2-47187.
- DNV/RISO.** (2002). Guidelines for design of wind turbines (2nd ed.). Denmark.
- Durak, M.** (2010). Kısa süreli rüzgar enerjisi tahmini. *Kısa Süreli Rüzgar Enerjisi Tahmini ve Devlet Meteoroloji İşleri Faaliyetleri Semineri*, İstanbul, Mart 5.
- Edis, F. O.** (2011). Rüzgar enerjisi ve sistemleri ders notları. İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- ETKB.** (2010). 2010-2014 stratejik plan. ETKB, Türkiye.
- EWEA.** (2012). Wind in power: 2011 European statistics. EWEA Head Office, Brussels, Belgium.
- Flavin, C.** (1981). Wind power: A turning point. Washington, D.C.: Worldwatch Institute.
- Hau, E.** (2006). Wind turbines, fundamentals, technologies, application, economics (2nd ed.). Springer, Berlin, Germany, 10 3- 540- 24240- 6.
- Joerissen, L., Garche, J., Fabjan, C. ve Tomazic, G.** (2004). Possible use of vanadium redox- flow batteries for energy storage in small grids and

stand-alone photovoltaic systems. *Journal of Power Sources* 127, 98-104.

- Johnson, G. L.** (2001). Wind energy systems. Electronic Edition, Manhattan, USA.
- Kılavuz, K.** (2011). Vanadyum redoks akışkan akülerin elektriksel karakterizasyonunun belirlenmesi ve performans ölçümlerinin gerçekleştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G. ve Rogers A. L.** (2002). Wind energy explained, theory, design and application. John Wiley & Sons, Ltd, University of Massachusetts, Amherst, USA, 0-470-84612-7.
- Menteş, Ş. S.** (2011). Rüzgar enerjisi ve sistemleri ders notları. İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
- Nurbay, N. ve Çınar, A.** (2005). Rüzgar türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması. *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, Ekim 19- 21.
- Ragheb, M.** (2011). Wind power systems lecture notes. University of Illinois, Urbana – Champaign.
- Rohatgi, J. S. ve Nelson, V.** (1994). Wind characteristics: An analysis for the generation of wind power. Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, USA.
- Swierczynski, M., Teodorescu, R., Rasmussen, C. N., Rodriguez, P. ve Vikelgaard, H.** (2010). Overview of the Energy Storage Systems for the Wind Power Integration Enhancement. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2010*, Italy, July 4-7.
- Stiebler, M.** (2008). Wind energy systems for electric power generation. Technical University of Berlin, Germany.
- T.C Resmi Gazete S.24335.** (2001). Kanun No: 4628, Enerji piyasası kanunu.
- T.C Resmi Gazete S.25001.** (2003). Elektrik piyasası şebeke yönetmeliği.
- T.C Resmi Gazete S.25819.** (2005). Kanun No: 5346, Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun.
- T.C Resmi Gazete S.27049.** (2008). Rüzgar enerjisine dayalı lisans başvurularının teknik değerlendirilmesi hakkında yönetmelik.
- T.C Resmi Gazete S.27200.** (2009). Elektrik piyasası dengeleme ve uzlaştırma yönetmeliği.
- T.C Resmi Gazete S.28001.** (2011). Enerji piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmelik.
- T.C Resmi Gazete S.28212.** (2012). Rüzgar ve güneş enerjisine dayalı lisans başvurularına ilişkin ölçüm standardı tebliği.
- T.C Resmi Gazete S.28229.** (2012). Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmeliğin uygulanmasına dair tebliğ.

- Url-1** <<http://wiki.windpower.org/>>, alındığı tarih 27.12.2011.
- Url-2** <[http://www.agri.ankara.edu.tr/irrigation/1036\\_\\_meteoroloji\\_7.ppt](http://www.agri.ankara.edu.tr/irrigation/1036__meteoroloji_7.ppt)>, alındığı tarih 31.01.2012.
- Url-3** <[http://web.gccaz.edu/~lnewman/gph111/topic\\_units/Pressure\\_winds/pressure/pressure2.html](http://web.gccaz.edu/~lnewman/gph111/topic_units/Pressure_winds/pressure/pressure2.html)>, alındığı tarih 31.01.2012.
- Url-4** <<http://www.icestuff.com/~energy21/savonius2.htm>>, alındığı tarih 07.02.2012.
- Url-5** <[http://www1.eere.energy.gov/wind/wind\\_how.html](http://www1.eere.energy.gov/wind/wind_how.html)>, alındığı tarih 11.02.2012.
- Url-6** <<http://www.alliantenergykids.com/EnergyandTheEnvironment/RenewableEnergy/022397>>, alındığı tarih 12.02.2012.
- Url-7** <<http://www.dcw.org.au/SiteSelection.html>>, alındığı tarih 17.02.2012.
- Url-8** <<http://www.wwindea.org>>, alındığı tarih 19.02.2012.
- Url-9** <<http://www.polatenerji.com>>, alındığı tarih 19.02.2012.
- Url-10** <<http://www.gwec.net/index.php?id=133&L=0%EF%BF%BD>>, alındığı tarih 20.02.2012.
- Url-11** <<http://www.bilesim.com.tr/yazdir.php?t=3&id=7583&sn=0>>, alındığı tarih 20.02.2012.
- Url-12** <<http://www.electricitystorage.org>>, alındığı tarih 20.02.2012.
- Url-13** <<http://www.supercapacitors.org/howtheywork.html>>, alındığı tarih 20.02.2012.
- Url-14** <<http://www.pdenenergy.com/index.html>>, alındığı tarih 05.03.2012.
- Url-15** <<http://www.ericom.com.tr/index.aspx>>, alındığı tarih 05.03.2012.
- Url-16** <<http://nhzss.blogspot.com/2011/06/elektroauto-wie-benzineraufladen.html>>, alındığı tarih 05.03.2012.
- Url-17** <<http://www.firstlibertypower.com/vanadium/vanadium-redox-battery>>, alındığı tarih 21.03.2012.
- Url-18** <<http://www.vrbeasteurope.hu/?level=technologia&lang=en>>, alındığı tarih 21.03.2012.
- Url-19** <<http://www.dmi.gov.tr/tahmin/ruzgar-enerjisi-tahmini-tr.aspx?rS=r&rT=h&rY=065&rH=01>>, alındığı tarih 29.03.2012.
- Url-20** <<http://www.uzay.tubitak.gov.tr/ritm/tr/project/>>, alındığı tarih 29.03.2012.
- Url-21** <<http://www.wasp.dk>>, alındığı tarih 02.04.2012.
- Url-22** <[http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/YEKrepa/REPA-duyuru\\_01.html](http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html)>, alındığı tarih 02.04.2012.
- Url-23** <[http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)>, alındığı tarih 24.04.2012.
- Werven, M. J. N., Beurskens, L. W. M. ve Pierik, J. T. G. (2005).** Integrating wind power in EU electricity systems: economic and technical issues.

Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten, The Netherlands,  
ECN-C-05-019.

**WWEA.** (2011). World wind energy report 2010. WWEA Head Office, Bonn,  
Germany.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad: Cansev Çakır**

**Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 14.01.1987**

**Adres: Merkez Mah. Harzemşah Sok. No:18/4 Şişli/İSTANBUL**

**E-Posta: cansevcakir@hotmail.com**

**Lisans: Sabancı Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği**