



Türkiye’de Bir Rüzgâr Enerjisi Santrali Üretim Karakteristiğinin Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral ile Değiştirilmesi

Ceyhun YILDIZ^{a,*}, Mustafa ŞEKKELİ^b

^a Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Ankara, TÜRKİYE

^b Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: cyildiz@vegm.gov.tr

ÖZET

Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin (RES) değişken ve tam olarak tahmin edilemeyen üretim karakteristiğine sahip oldukları bilinmektedir. RES’lerin bu karakteristikleri, dâhil oldukları elektrik şebekesi sistemindeki enerji üretim-tüketim dengesini sağlamayı zorlaştırmaktadır. Bu durum rüzgâr enerjisinin yaygınlaşmasında kısıtlamalara gidilmesine sebep olmaktadır. Bu kısıtları kaldırma konusunda son yıllarda yapılan çalışmalar rüzgâr enerjisinin bu istenmeyen (elektrik şebekelerindeki güç dengesini bozan) karakteristiğinin değiştirilmesi için bir enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada Türkiye’de kurulmuş bir RES ve bir enerji depolama sistemi olan Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral (PDHES) beraberce işletilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. PDHES ile RES’nin beraber işletilmesi iki senaryo ile gerçekleştirilmiştir. Senaryolardan birinde iki santral sabit enerji üreterek baz yük santrali gibi işletilmiştir. Diğer senaryoda ise iki santral şebekedeki enerji talebini takip eden üretim yapacak şekilde işletilmiştir. Sonuçlar enerji satış gelirleri ve güvenilirlik endeksleri baz alınarak incelendiğinde iki santralin baz yük santrali gibi çalışma modunda daha güvenilir, talep takibi modunda ise daha kârlı üretim yaptığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Enerjisi, Pompaj Depolamalı HES, Enerji Dengesi

Changing the Characteristic of a Wind Power Plant Production in Turkey by Pumped Storage Hydroelectricity Power Plant

ABSTRACT:

It is known that Wind Power Plants (WPP) have variable and not fully forecastable characteristics. These characteristics of WPPs, make difficult to ensure energy production-consumption balance in their integrated grid. This condition causes restrictions in penetration of wind energy. Studies in recent years about removing these restrictions put forward there is an energy storage system requirement to change this undesirable (distorting grid’s energy balance) property of wind energy. In this study a WPP that installed in Turkey and a pumped storage hydro power plant (PHPP) are operated together and results are explicated. Joint operation of PHPP and WPP implemented by two separate sceneries. In one of these sceneries two power plants are operated as a base load power plant by producing constant energy. In other scenery two power plants are operated as their production can track energy demand. When we analyse the results based on reliability index and energy sale income its seen that two power plants are more reliable in working like base load power plant mode, more profitable in load tracking mode.

Keywords: 3 Wind Energy, Pumped Storage Hydro Power Plant, Energy Balance

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi son yıllarda hızlı bir artış göstermiştir. Bu tür kaynaklardan biri olan rüzgâr enerjisi, yatırım maliyetlerinin düşmesi ve ülkelerin destekleyici politikaları sonucunda birçok ülkede hızla yaygınlaşmaktadır. RES'ler; Hidroelektrik Santraller, Termik Santraller ve diğer geleneksel enerji üretim santrallerinden biraz farklı üretim karakteristiklerine sahiptirler. Rüzgâr enerjisi; su, kömür ya da sıvı yakıtlar gibi depolanamamakta ve ne zaman, ne ölçekte eseceği kontrol edilememektedir. Bu durum elektrik şebekesi işleten kuruluşlara gün öncesinden üretim programı yapma ve şebekedeki enerji üretim-tüketim dengesini sağlama konusunda zorluklar yaşatmaktadır. Elektrik şebekelerinde rüzgâr enerjisinin payı arttıkça karşılaşılan bu zorluklar da artmaktadır. Bu durum konuyla ilgili araştırmacıları motive etmiş ve son yıllarda büyük ölçekte rüzgâr enerjisinin elektrik şebekelerine entegrasyonunda yaşanan problemlerin giderilmesi amaçlı birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalar bu tür değişken, kontrol edilemeyen enerji kaynaklarının elektrik şebekelerine bağlanmaları durumunda bir enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulacağını ortaya koymuştur[1-7]. PDHES'lerin büyük ölçekte enerji depolama konusunda başarılı tesisler olduğu bilindiğinden bu

konuda iyi bir alternatif olacakları düşünülmüştür[8,9]. RES'ler ile beraber PDHES'lerin işletilmesi temelde basit bir senaryo ile gerçekleşmektedir. Senaryoya göre RES'lerin kontrol edilemeyen üretimi PDHES'ler ile depolanacak, istenilen miktarda ve zamanda tekrar kullanılabilir hale getirilecektir.

Türkiye yaklaşık 45GW'lık bir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir[10]. Bu potansiyelin henüz yaklaşık 3,66GW'lık kısmını kullanmaktayız[11]. Kurulu gücümüzün yaklaşık 70 GW olduğu göz önüne alındığında rüzgâr enerjisi potansiyelimizin tamamının elektrik şebekemize dâhil edilerek kullanılmasının mümkün olmadığı görülmektedir. Bu kısıtın giderilmesi için bir enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulduğundan yukarıda bahsetmiştik. Literatür incelendiğinde ülkemizde konuyla ilgili az sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Türkiye'de rüzgâr enerjisi ve PDHES için ülke potansiyeli ve kurulabilecek tesisler incelenmiş, PDHES'lerin şebekeye katkısı hakkında öngörüler yapılmıştır[12]. PDHES ve RES tesislerinin belirli yerlerdeki maliyetleri hesaplanarak sabit bir işletim senaryosu ile elde edilecek gelirlerle, yapılacak yatırımın karlılığı hesaplanmıştır[13]. Türkiye elektrik piyasasında oluşan fiyat ve talepler genel olarak incelenip, hibrit RES+PDHES için sabit çalışma saatleri belirlenerek tesis üretimleri incelenmiştir [14]. Bu çalışmada

PDHES+RES tesisleri için Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında bir gün sonrası için iki ayrı üretim planı oluşturma yöntemi incelenmiştir. Enerji piyasasında bir gün sonrası için oluşturulan enerji talep tahminleri ve RES üretim tahminleri de yöntemlerde hesaplamalara dâhil edilmiştir. Böylece, gerçek piyasa verileri ve RES üretim-tahmin etkileri dikkate alınan, literatürde daha önce incelenmemiş bir yaklaşım irdelenmiştir. Ülkemizin yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu konuda yapılacak detaylı çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmektedir.

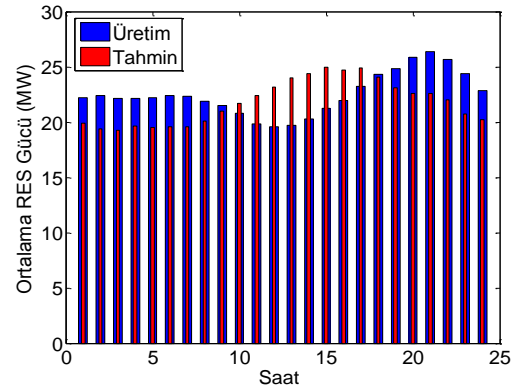
2. RES ENERJİ ÜRETİMLERİNİN İNCELENMESİ

Çalışmada kullanılan RES ile ilgili tüm veriler Türkiye'de faaliyet gösteren bir RES işletmesinden alınmış gerçek verilerdir. Firmanın isteği doğrultusunda işletmenin ismi, lokasyonu belirtilmemiştir. Santrale ilişkin bazı karakteristik bilgiler Tablo-A'de verilmiştir. Veriler senelik üretim ve 24 saatlik enerji üretim tahminlerinden oluşmaktadır. Bu veriler kullanılarak; senelik saatlik üretim ortalama değerleri ve 24 saatlik enerji üretim tahmin değerlerinin senelik saatlik ortalama değerleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu değerler Şekil-1'deki grafikte verilmiştir. Ayrıca Şekil-2'de kurulu güce göre normalize

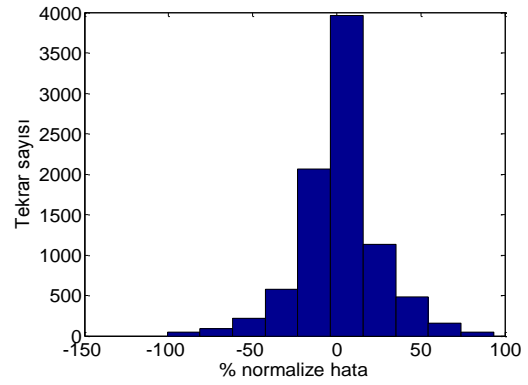
edilmiş tahmin hatalarının yüzdelik değerlerinin histogram grafiği verilmiştir.

Tablo-1 RES'in bazı karakteristik bilgileri (Some characteristic data of WPP)

Türbin Gücü (MW)	Türbin Sayısı	Kurulu Güç (MW)
3	20	60



Şekil 1. RES üretimlerinin ve üretim tahminlerinin senelik saatlik ortalama değerleri



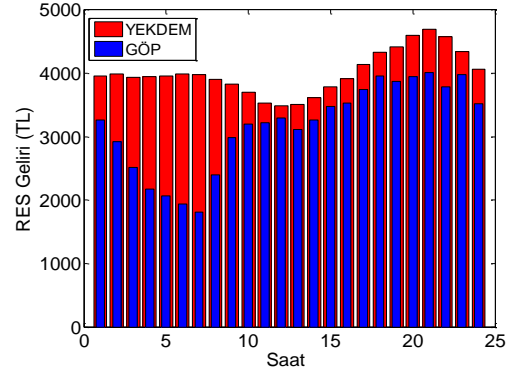
Şekil 2. RES üretim tahminlerinin normalize hata değerlerinin histogram grafiği

RES üretimleri ve tahmin değerleri kullanılarak mevcut elektrik piyasasında santral gelirleri de incelenmiştir. Bilindiği üzere bu tür tesisler genelde iki tip piyasaya teklif vermektedirler. Bunlardan biri YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması)

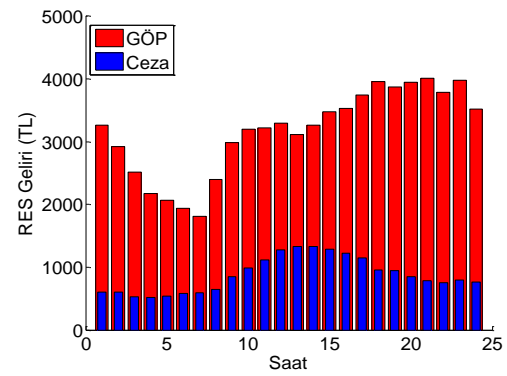
piyasası, diğeri ise enerji tahmin değerlerinin önem kazandığı gün öncesi elektrik piyasasıdır (GÖP). YEKDEM piyasasında santrallerin ürettikleri enerji birim fiyat ile çarpılmakta ve gelirleri hesaplanmaktadır. Bu piyasa sistemi tesislerin ürettikleri enerjinin, miktarından ve zamanından dolayı tesislere bir sorumluluk yüklemektedir. GÖP piyasasında tesisler bir gün sonra üretecekleri enerjiyi 24 saatlik bir enerji üretim programı şeklinde bildirmekte bu programdan sapmalar ise belirli bir şekilde cezalandırılmaktadırlar. Bu iki piyasa mekanizması ilerleyen bölümlerde açıklanacaktır. Tablo-1’de YEKDEM, GÖP gelirleri ve üretim tahminlerindeki hatalardan kaynaklanan cezalar verilmiştir. Ayrıca gelirlerin her iki piyasa için senelik saatlik ortalama değerleri ve tahmin hatalarından kaynaklanan cezaların senelik saatlik ortalamaları Şekil-3,4’te grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 2. Senelik Gelir

YEKDEM	GÖP	GÖP
Senelik	Senelik	Senelik
Geliri (TL)	Geliri (TL)	Ceza (TL)
35.218.270	27.820.598	7.686.896



Şekil 3. YEKDEM ve GÖP'te RES senelik saatlik ortalama gelirleri



Şekil 4. GÖP'te RES gelirlerinin cezalarının senelik saatlik ortalama değerleri grafiği

YEKDEM piyasası ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırma amaçlı oluşturulmuş bir piyasadır. Bu piyasa yapısında talep güç takibi gibi şebeke işletimini kolaylaştıran yönlendirmeler bulunmamaktadır. GÖP'te ise üretim teklifi veren tesisler piyasada oluşan fiyatlarla ve tekliften sapmaların cezalandırılması ile talep güç takibine zorlanmaktadır. RES'ler bir sonraki gün yapacakları üretim programını tamamen rüzgâr tahmin değerlerine bağımlı olarak oluşturabildiklerinden GÖP yönlendirmelerine uyum sağlayamamaktadırlar. Şekil-4'te bu

nedenle oluşan cezalar görülmektedir. Bu durum tesis gelirlerini ve elektrik şebekesindeki enerji üretim-tüketim dengesini olumsuz yönde etkilemektedir. RES'lerin elektrik şebekesine daha büyük oranlarda katıldığı düşünülürse bu sorunların daha da büyüyeceği görülmektedir. Ayrıca YEKDEM piyasası gelirleri dolar kurundan çok etkilendikleri için RES yatırımları için belirsiz risklerin oluşmasına sebep olmaktadır.

3. POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLER

PDHES'ler dünyada yaklaşık yüzyıldır kullanılan, büyük ölçekte enerji depolama özelliğine sahip enerji santralleridir. Bu santraller elektrik şebekelerinde ihtiyaç duyulan enerji depolama ihtiyacını karşılamaktadırlar[15]. Şebekelerdeki enerji depolama ihtiyacı; ülkelerin coğrafi özellikleri, enerji talebi özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Kışın elektrik ile ısınan bir ülke sonbaharda depoladığı enerjiyi kış aylarında kullanabilmekte, yaz aylarında elektrikli klimalar kullanan bir ülke ilkbaharda depoladığı enerjiyi yaz aylarında kullanabilmektedir. Ayrıca hafta içerisinde değişen talep güç değerleri bu tesisler kullanılarak düzenli hale getirilebilmektedir. Benzer şekilde şebekedeki anlık talep güç değişimlerine hızlı tepki verebilecek PDHES'ler

şebekedeki frekans kontrolüne yardımcı olarak kullanılabilir[16]. Bu tesisler temel olarak oldukça basit bir prensiple çalışmaktadır. Bu tip tesisler aralarında yükseklik(düşü) farkı bulunan iki adet su depolama rezervuarı kullanmaktadır. Santral binasında su türbinleri ve pompalar bulunmaktadır. Enerji depolanmak istenildiği zaman santraldeki pompalar kullanılarak alçak kottaki su yüksek kottaki rezervuara pompalanmakta böylece elektriksel enerji, potansiyel enerji olarak depolanmaktadır. Depolanmış enerjiye ihtiyaç duyulduğunda yüksek rezervuarda depo edilmiş su alçak kotlara bırakılarak su türbinleri ve jeneratörler vasıtasıyla elektriksel enerjiye dönüştürülmektedir.

4. YEKDEM ve GÖP ELEKTRİK PİYASALARI

YEKDEM piyasasına dâhil olan tesislere on yıl süre ile alım garantisi verilmekte ve bu yapıda satış yapan RES'lerin üretimleri 7,3 cent ABD\$/kWh birim fiyat üzerinden fiyatlandırılmaktadır[17]. Toplam günlük gelir (1) numaralı eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$Gelir^g = \sum_{s=1}^{24} (E_s^{g\text{ üretim}} \cdot 7,3 \cdot (\$kuru)) \dots\dots(1)$$

GÖP piyasa mekanizması ise tesisleri, gün öncesinden belirleyip bildirdikleri üretim planlarından sorumlu tutmaktadır. Üretim

programlarına uymayan tesisler bu dengesiz (farklı) üretim miktarlarından dolayı cezalandırılmaktadır[18]. Böylece şebeke işletimi için önemli bir bileşen olan gün öncesi işletim programının güvenli olarak yapılması sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu piyasa yapısında bir gün sonrası için talep tahmini yapıldıktan sonra üretim tesislerinden alınan satış tekliflerinin en ucuzundan başlayarak alım yapılmaktadır. Bu alımlara enerji talebi karşılancaya kadar devam edilmektedir. Böylece enerji talebinin yüksek olduğu saatlerde enerji fiyatları yükselmekte, enerji talebinin düşük olduğu saatlerde fiyatlar düşmektedir. Bu durum üretim tesislerini enerji talebinin yüksek olduğu saatlerde fazla üretim yapmaya teşvik etmektedir. Böylece elektrik şebekesindeki üretim-tüketim dengesinin sağlanması kolaylaştırılmaktadır. Bu piyasa yapısında gelir ve cezalar eşitlik (2) ve (3) ile hesaplanmaktadır.

$$EDM_s^g = E_s^{g, üretim} - E_s^{g, teklif} \dots\dots\dots(2)$$

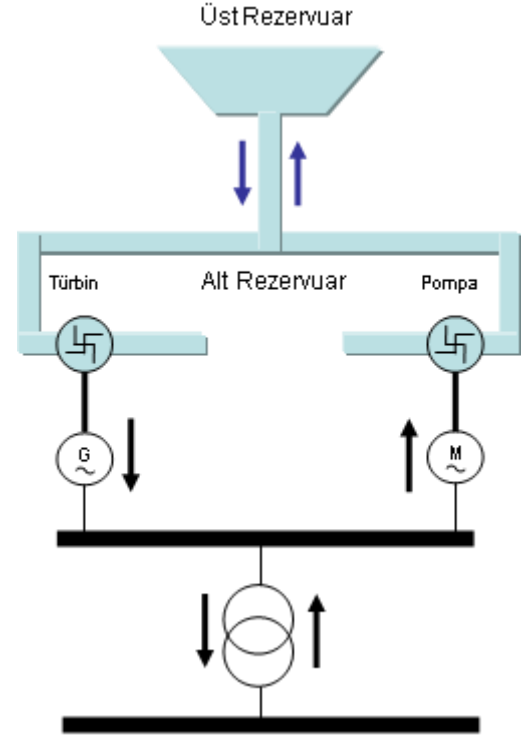
$$Gelir^g = \sum_{s=1}^{24} \left[E_s^{g, teklif} \cdot ptf_s^g + \begin{cases} EDM_s^g > 0 \Rightarrow EDM_s^g \cdot \min(smf_s^g, ptf_s^g) \\ EDM_s^g < 0 \Rightarrow EDM_s^g \cdot \max(smf_s^g, ptf_s^g) \end{cases} \right] \dots(3)$$

5. SİSTEM MODELİ VE SİMÜLASYONU

Sistem, simülasyon çalışmaları yapılmak üzere modellenmiş, oluşturulan matematiksel model Matlab yazılım geliştirme ortamında çözümlenerek incelemeler

yapılmıştır. Temelde sistem iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan biri (RES) gerçek bir tesis olduğundan modelleme ihtiyacı duyulmamıştır. Diğer bileşen PDHES için bir saat örnekleme zamanı olmak üzere kararlı durum modeli oluşturulmuştur. PDHES sistemi içerisinde pompa, türbin, motor, jeneratör, trafo ve rezervuar bileşenleri bulunmaktadır. Oluşturulan model elektriksel enerji temelli bir modeldir. Dinamikler elektriksel enerji türünden hesaplanmaktadır. Şekil-5'te sistemin modellenen kısmının şematik gösterimi verilmiştir. Modelde trafo çıkışındaki enerji akışı (10) numaralı denklem ile temsil edilmiştir. (10) numaralı denklem RES ve PDHES sistemlerinin şebekeden çektiği ve verdiği enerjilerin toplamından oluşmaktadır. Eşitliğin sağ tarafı incelendiğinde türbin üretiminde verimler azaltıcı etki yapacak şekilde çarpılmıştır. Çünkü sistemde depolanmış potansiyel enerjinin bir kısmı türbin, jeneratör ve trafo verimlerinden dolayı kaybedilmektedir. Pompa çalışma modunda ise verim değerleri RES üretiminden çekilen enerjiyi arttırıcı etki yapacak şekilde bölünmüştür. Çünkü çekilen enerjinin tamamı depolanamamakta pompa, motor ve trafo verimlerinden kaynaklanan kayıplar oluşmaktadır. (4-8) denklemleri sistem kısıtlarını temsil etmektedir. Kısıtlar santral bileşenlerinin kapasitelerinden

kaynaklanmaktadır. (4) ve (6) numaralı eşitlikler pompa ve türbinin çalışmaları esnasında alacakları değerleri kurulu güçlerine sınırlamaktadır. Pompa ve türbin için bir diğer kısıtta rezervuardaki su miktarından kaynaklanmaktadır. Türbin üst rezervuardaki su bitince çalışmayacak, pompa ise üst rezervuar dolunca depolama yapamayacaktır. Bu kısıtlar pompa ve türbin için sırasıyla (5) ve (7) numaralı eşitlikler ile hesaba katılmıştır. Denklem (8) rezervuarda depolanacak potansiyel enerji miktarını rezervuar kapasitesi ile sınırlamaktadır. (9) denklemini ile rezervuarda depolanan enerji miktarını hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte; pompa rezervuarı dolduracak, türbin rezervuarı boşaltacak şekilde hesaba katılmıştır. Eşitlikteki verimlerin çarpım bölümlerinden anlaşılacağı üzere türbin ürettiğinden daha fazla enerjiyi rezervuardan çekmekte, pompa kullandığı enerjiden daha azını rezervuarda depolayabilmektedir.



Şekil 5. Modellenen sistemin şematik gösterimi

$$0 \leq P_s^g \leq P_n \dots\dots\dots(4)$$

$$P_s^g = \min(P_s^g, (\text{Re } z_{\text{mak}} - \text{Re } z_s^g) \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{trafo}}) \dots\dots(5)$$

$$0 \leq T_s^g \leq T_n \dots\dots\dots(6)$$

$$T_s^g = \min(T_s^g, \text{Re } z_s^g / (\eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{\text{trafo}})) \dots\dots\dots(7)$$

$$0 \leq \text{Re } z_s^g \leq \text{Re } z_{\text{mak}} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{Re } z_s^g = \text{Re } z_{s-1}^g + P_s^g \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{trafo}} - T_s^g / (\eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{\text{trafo}}) \dots\dots\dots(9)$$

$$E_s^g = R_s^g + T_s^g \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{\text{trafo}} - P_s^g / (\eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{trafo}}) \dots\dots\dots(10)$$

Simülasyon çalışmalarında tesisler beraberce iki ayrı çalışma planına göre üretim yapmışlardır[19]. Bu çalışma planlarından birinde iki tesisin beraberce baz santral gibi sabit güç üretmesi amaçlanmıştır. Bu senaryo şöyledir: RES’in bir gün sonra üreteceği enerji,

tahmin değerlerinin ortalaması olmak üzere sabit güç değeridir. Eşitlik (11)’de bu değer hesaplanmaktadır. Eğer RES üretimi bu değer altında ise türbin devreye girecek eksik üretimi tamamlayacaktır. RES, sabit güç değerinin üzerinde üretim yaparsa pompa devreye girecek ve fazla enerjiyi rezervuarda depolayacaktır. Diğer plan ise şebekedeki talep güç eğrisi tahmini ve RES üretim tahminleri baz alınarak oluşturulacaktır. Bu çalışma planına göre iki tesisin toplam üretimi şebekedeki talep güç eğrisini takip etmeye çalışacaktır. Burada pompa, türbin ve RES toplamından oluşan bir üretim planı (12-14) numaralı eşitlikler ile oluşturulmaktadır. Eşitlik (12) ile talep eğrisindeki sabit kısım çıkarılarak değişken bölümün toplamı elde edilmiştir. Bu toplam değer ile bir sonraki gün talebin aldığı saatlik değer oranı tahmin edilen toplam rüzgar üretimi ile çarpılarak o saat için planlanan üretim değeri hesaplanmıştır. Böylece tahmin edilen toplam rüzgar üretimi talebin aldığı değer ile orantılı olarak gün içinde dağıtılmış olacaktır. Bu üretim planı sayesinde hem şebekedeki enerji üretim-tüketim dengesi korunmaya çalışılacak hem de enerji talebinin (enerji fiyatlarının) düşük olduğu saatlerde az, enerji talebinin (enerji fiyatlarının) yüksek olduğu saatlerde fazla üretim yapılacağından tesis geliri artırılabilecektir.

$$SabitGüçRt^g = \sum_{s=1}^{24} Rt_s^g / 24 \dots\dots\dots(11)$$

$$Top.Talep^g = \sum_{s=1}^{24} Talep_s^g - \min[Talep^g] \cdot 24 \dots\dots(12)$$

$$Top.Rt^g = \sum_s^g Rt_s^g \dots\dots\dots(13)$$

$$Plan_s^g = \frac{Talep_s^g - \min[Talep^g]}{Top.Talep^g} \cdot Top.Rt^g \dots\dots(14)$$

Simülasyonlarda kullanılan üretim planlarının performanslarını değerlendirmek üzere bir de güvenilirlik endeksi (15) numaralı eşitlik ile tanımlanmıştır. Güvenilirlik endeksi, teklif verilen her saat için verilen teklifin gerçekleşmesi durumunda 1 değerini, gerçekleşmemesi durumunda 0 değerini almaktadır. Bu değerlerin toplamı saat sayısına bölünerek teklif edilen üretimlerin gerçekleştirilme oranı bulunmaktadır. Bu değer 100 ile çarpıldığında verilen tekliflerin yüzde kaçının gerçekleştiği hesaplanmış olmaktadır.

$$End_s^g = \begin{cases} Plan_s^g = Üretim_s^g \Rightarrow 1 \\ Plan_s^g \neq Üretim_s^g \Rightarrow 0 \end{cases} \dots\dots(15)$$

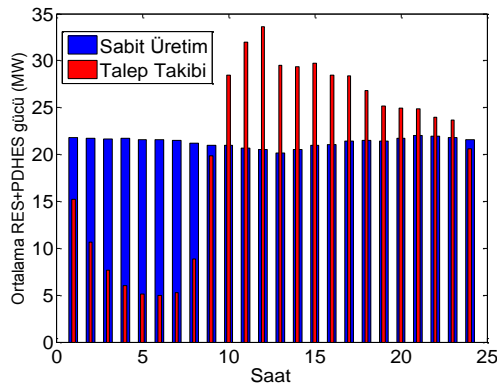
$$Güv.End = \sum_{g=1}^{366} \sum_{s=1}^{24} End_s^g / (24 * 366) \dots\dots(16)$$

6. ARASTIRMA BULGULARI

Simülasyonlar sonucunda, iki çalışma senaryosu ve sadece rüzgâr santrali için; 1) Üretim değerleri, 2) Güvenilirlik endeksleri, 3) YEKDEM ve GÖP

piyasalarındaki gelirler olmak üzere toplam üç tip veri elde edilerek incelenmiştir. Şekil-6’da üretim değerleri verilmiştir. Ayrıca şebekedeki talep güç eğrisi ile talep takibi yapmaya çalışan üretim planı için iki tesisin üretim değerleri Şekil-6’da verilmiştir. Değerler senelik saatlik ortalama değerlerdir.

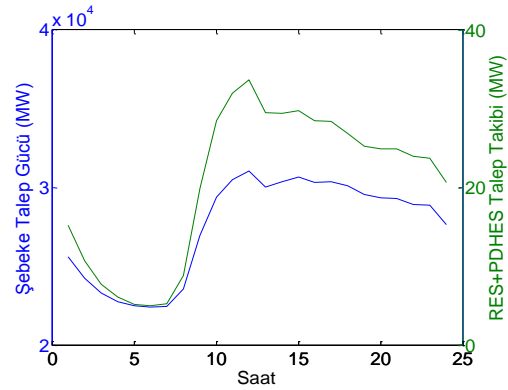
Şekil-6 incelendiğinde RES üretimi neredeyse sabit kalmıştır. Değişken RES üretimlerinin sabit kalması şebeke operatörüne bu santralleri baz yükü üzerine alacak şekilde üretim planlarına katma şansı vermektedir. Böylece değişken, kararsız RES üretimleri önceden yüksek güvenilirlik endeksleri tahmin edilebilen sabit bir forma dönüşmüş olacaktır. Şebekedeki güç dengesine olan olumsuz etki ortadan kalkmıştır. RES üretimleri baz yük santrali olarak çalışan (doğalgaz, kömür termik) santrallerin yerini alabilecektir.



Şekil 6. İki senaryoya ait güç üretimleri

Şekil-7 incelendiğinde RES üretimleri artık talep eğrisini takip edebilir hale gelmiştir. Böylece rüzgâr enerjisinin elektrik

şebekesindeki güç dengesine olan olumsuz etkisi olumlu yönde değişmiştir. RES sanki dengeleyici üretim yapan bir santral gibi sisteme dâhil olmuştur. Anlaşılacağı üzere RES üretimlerindeki bu değişiklik rüzgâr enerjisinin elektrik şebekelerinde daha yüksek miktarda kullanılabilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca şebekedeki RES’lerin bu şekilde işletilmesi şebeke operatörlerinin değişken RES üretimleri için ayırdıkları sıcak yedek (enerji) miktarını da düşürecek sıcak yedek görevi yapan santrallerin yük alıp atmalarından kaynaklanan maliyetleri düşecektir.



Şekil 7. Talep takibi modu üretimleri ve talep güç eğrisi

Tablo-2’de iki çalışma senaryosu ve RES’in yalnız çalışması için güvenilirlik endeksleri, YEKDEM ve GÖP gelirleri verilmiştir. Değerler incelendiğinde GÖP geliri talep takibi yapan üretim şeklinde fazladır. Güvenilirlik endeksi ise en yüksek sabit üretim şeklinde elde edilmiştir. Güvenilirlik endeksinin artması santralin daha kararlı ve önceden tahmin edilebilir şekilde üretim yapabildiğini

göstermektedir. Önerilen iki senaryoda bu endeksin artmasına karşılık üretim değerlerinde aşırı bir düşüş yaşanmadığı ve GÖP piyasası gelirinin talep takibi senaryosunda arttığı görülmektedir.

Tablo 3. Analiz sonuçları

	Talep		
	Sabit Güç Üretimi	Takibi Üretimi	RES Üretimi
YEKDEM			
Geliri (TL)	33.384.707	32.160.275	35.218.271
GÖP Geliri (TL)	27.303.313	28.742.649	27.820.598
GÖP Ceza (TL)	2.872.671	4.296.188	7.686.896
Güvenilirlik Endeksi (%)	64,663	61,988	2.459

7. SONUC

Bu çalışmada RES’lerin elektrik şebekelerinde güç dengesini bozan üretim karakteristikleri incelenmiş, bu durum bir enerji depolama sistemi ile giderilmeye çalışılmıştır. Ülkemizde yüksek rüzgâr enerjisi potansiyelinin bulunması bu konunun önemini arttırmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin RES üretimlerindeki kararsızlığı giderme konusunda kullanılabileceği bilinmektedir fakat literatür incelendiğinde ülkemizdeki RES üretimleri, enerji piyasası şartları ve elektrik şebekesi talep güç eğrileri hesaplamalara katılarak çok az sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde beraber çalışan bir enerji depolama sistemi

ile bir RES üretiminin güvenilirlik endeksinin oldukça yüksek değerlere çıkabildiği ve GÖP gelirinin bir miktar artabildiği görülmektedir. RES üretimlerinin bir enerji depolama sistemi kullanılarak enerji talebi eğrisini takip edebildiği veya gün boyu sabit bir değere dönüşebildiği de görülmektedir. Böylece RES üretimlerinin kararsız, tam olarak tahmin edilemeyen karakteristiğinin daha kararlı ve önceden tahmin edilip gün öncesi üretim planına katılabilir hale dönüştürülebileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] A.M. Foley, P.G. Leahy, K. Li, E.J. McKeogh, A.P. Morrison. *IEEE, Applied Energy*, **137** (2015) 638-648.
- [2] M. A. Hozouri, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad. *IEEE, Trans. on Power Systems*. **30(2)** (2015) 1017-1025.
- [3] M. W. Murage, C. L. Anderson. *Elsevier, Renewable Energy*. **63** (2014) 698-707.
- [4] T. Ma, H. Yang, L. Lu, J. Peng. *Elsevier, Renewable Energy*. **69** (2014) 7-15.
- [5] A. Tuohy, M.O. Malley. *Elsevier, Energy Policy*. **39 (4)** (2011) 1965-1974
- [6] M. E. Khodayar, M. Shahidehpour, L. Wu. *IEEE, Trans. on Power Syst.* **28(3)** (2013) 2808-2818.
- [7] E. Fertig, A. M. Heggedal. *Springer Verlag, Energy Syst.* **5(2)** (2013).

- [8] B. Dursun, B. Alboyacı. *Elsevier, Ren. and Sust. En. Rev.* **14(7)** (2010) 1979-1988.
- [9] N. Zhang, C. Kang, D. S. Kirschen, Qi. Xia, W. Xi, J. Huang, Q. Zhang. *IEEE, Trans. on Sust. En.* **4(2)** (2013) 393-401.
- [10] Enerji ve Tabii Kaynaklar BakanlığıGüzgar.Available: <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar> (Erişim tarihi 2014).
- [11] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Available: <http://www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx> (Erişim tarihi: (2015))
- [12] B. Dursun, B. Alboyacı. *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14** (2010) 1979-1988.
- [13] Ç. B. Börçek, *Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santraller: Batı Karadeniz’de Örnek Bir Çalışma*, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak-Türkiye, (2012).
- [14] P. Karaçay, *Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller ve Türkiye’deki Durum*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul-Türkiye, (2010).
- [15] Ü. Ünver, H. Bilgin, A. Güven. *Mühendis ve Makina.* **37** (2015) 12-16.
- [16] M. Yavuzdemir. *MEnerji Piyasası Bülteni.* **56(663)** (2015) 57-64.
- [17] Anonim, *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belgelendirilmesi ve Desteklenmesine İlişkin Yönetmelik*, **T.C. Resmi Gazete**, No:28782, Ekim 2013.
- [18] Anonim, *Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği*, **T.C. Resmi Gazete**, No:27200, Nisan 2009.
- [19] W. You, Y. Xiong, J. Chang, *Joint Power Generation Schedules of Wind Farms and Pumped Storage Power Stations Based on Load Tracking*, **Proc.U2013-ICMIC**, (2013), 153–157.