

Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında rüzgar enerjisi ve pompaj depolamalı hidroelektrik santral için optimum teklif oluşturulması

Optimal bidding in Turkey day ahead electricity market for wind energy and pumped storage hydro power plant

Ceyhun YILDIZ^{1*}, Mustafa ŞEKKELİ²

¹Elbistan Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye.

cyildiz@ksu.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye.

msekkeli@ksu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 11.08.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 22.03.2016

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.34654

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Elektrik şebekesindeki talep güç arttığında enerji fiyatları artmakta, şebekedeki talep güç azaldığında enerji fiyatları azalmaktadır. Bu sebeple, günlük toplam gelirin artırılması için üretimlerin yüksek talep güç değerlerinin oluştuğu saatlere kaydırılması gerekmektedir. Rüzgar Enerjisi Santralleri (RES) kararsız ve kontrol edilemeyen üretim karakteristiğine sahiptirler. Bu sebeple RES üretimlerini zaman ekseninde kaydırabilmek için enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada; Türkiye enterkonnekte elektrik şebekesine bağlı dört adet Rüzgar Enerjisi Santrali (RES) ve bu santrallerin enerji depolama ihtiyacını karşılamak üzere düşünülmüş bir Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral (PHES), Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında incelenmiştir. Beraber enerji üretimi yapacak bu santrallerin gün öncesi piyasa tekliflerini optimize etmek üzere doğrusal programlama yöntemi kullanılarak bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Optimizasyon stratejisi ile işletilen santrallerin üretimleri ve gelirleri incelendiğinde, RES'lerin tek başına işletilmesi ile kıyasla senelik gelirin %2.737 oranında arttığı ve üretimlerin talep gücün yüksek olduğu saatlere büyük oranda kaydırılabildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Rüzgar enerjisi, Enerji depolama

1 Giriş

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekelerindeki kullanımı; temiz, çevre dostu olmaları ve en önemlisi ülkelerin destekleyici politikaları sayesinde hızlı bir artış göstermiştir. Rüzgâr enerjisi, santral kurulum maliyetlerinin hızla düşmesi ve elektrik şebekelerinde daha çok kullanılıyor olması sebebiyle son yıllarda önemi artan bir yenilenebilir enerji kaynağı olmuştur. Bilindiği üzere rüzgâr enerjisi kararsız ve tamamen tahmin edilemeyen bir karakteristiğe sahiptir. Bu sebeple, yüksek miktarda rüzgâr enerjisi elektrik şebekelerine enjekte edildiğinde şebekelerdeki enerji üretim-tüketim dengesini sağlamak zorlaşmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, rüzgâr enerjisinin bu istenmeyen (şebekenin enerji dengesini bozan) karakteristiğini değiştirmek için bir enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur [1]-[7]. PHES'ler rüzgâr enerjisi üretimlerini kompanze edebilecek büyük ölçekli enerji depolama sistemleri olarak bilinmektedir [8],[9]. Rüzgâr enerjisini PHES'ler ile kompanze etmek basit bir senaryoya dayanmaktadır. Bu basit senaryoya göre RES üretimleri depolanacak ve enerji ihtiyacı oluşması durumunda bu depolanmış enerji kullanılacaktır.

Abstract

In electrical grid; when the demand power increases energy prices increase, when the demand decreases energy prices decrease. For this reason; to increase the total daily income, it is required to shift generations to the hours that high demand power values occurred. Wind Power Plants (WPP) have unstable and uncontrollable generation characteristic. For this reason, energy storage systems are needed to shift the generations of WPPs in time scale. In this study, four wind power plants (WPP) which are tied to the Turkish interconnected grid and a pumped hydro storage power plant (PSP) that meets the energy storage requirement of these power plants are investigated in Turkey day ahead energy market. An optimization algorithm is developed using linear programming technique to maximize the day ahead market bids of these plants which are going to generate power together. When incomes and generations of the plants that are operated with optimization strategy is analyzed, it is seen that annual income increased by 2.737% compared with WPPs 's alone operation and generations are substantially shifted to the high demand power occurred hours.

Keywords: Wind energy, Energy storage

Türkiye 48GW rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir [10]. Türkiye'de RES kurulu gücü ise sadece 3.66GW'tır [11]. Ülkenin toplam kurulu gücü yaklaşık 70GW'tır ve tüm rüzgâr enerjisi potansiyelinin kullanılmasının mevcut şebeke yapısında mümkün olamayacağı görülmektedir. Bu sebeple rüzgâr enerjisinin Türkiye elektrik şebekesine bağlanması kısıtlarının giderilmesini araştıran çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmektedir. Literatür incelendiğinde bu konuda farklı şebeke yapıları için farklı ülkelerin çalışmalar yaptığı görülmektedir: PHES ile RES sistemlerinin izole bir şebekeye katkıları dinamik bir model üzerinde incelenmiştir [12]. Yunan adalarında rüzgâr enerjisinin maksimum kullanımını sağlayacak optimum PHES ve RES tesisi kapasitesi belirleme çalışması yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada optimum kapasite, genetik algoritmalar kullanılarak oluşturulan bir optimizasyon senaryosu ile hesaplanmıştır [13]. Kenya Turkana gölü yakınında kurulması planlanan bir RES için günlük üretim profili incelemesi yapılmış, santral üretimlerinin günlük talep güç profili ile örtüşmediği görülmüştür. Bir PHES ile RES üretimlerinin talep güç profiline uyumlu hale getirilebileceği optimal kontrol yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu ortaya koyulmuştur [14].

Enerji piyasalarının rekabetçi yapısına RES'ler değişken ve kontrol edilemeyen üretim yaptıklarından uyum sağlayamamaktadırlar. Rüzgâr enerjisi üretim tahminleri, bu santrallere gün öncesi piyasaya teklif verme konusunda yardımcı olsa da üretim profillerindeki kararsızlık piyasa gelirini büyük oranda etkilemektedir. RES üretimlerinin bir PHES ile düzenlenmesi konusunda İspanya enerji piyasası şartlarında bir optimizasyon çalışması yapılmış, böylece tesis gelirlerinin artırılacağı görülmüştür [15]. Rüzgâr enerjisi üretim tahmini hataları enerji piyasasına katılan RES'lerin gerçekleştiremeyecekleri üretim teklifleri yapmalarına neden olmaktadır. Gerçekleştirilemeyen üretimlerden dolayı piyasaya katılan RES'ler cezaya düşmektedirler. Gerçekleşmeyen üretimlerin PHES ile tamamlanması durumunda PHES ve RES piyasa gelirlerinin artırılacağı görülmüştür [16]. Bu çalışma, Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında RES ve PHES tesislerinin beraber teklifleri için bir optimizasyon stratejisi geliştirilen ilk çalışmadır. Bu makale yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm makalenin giriş bölümüdür. Bu bölümde konuyla ilgili genel bilgiler ve kısa literatür taraması verilmiştir. İkinci bölüm Türkiye'deki elektrik piyasası yapısını kısaca anlatmaktadır. Çalışmada incelenen RES üretimleri ile ilgili bazı analizler üçüncü bölümde verilmiştir. Dördüncü bölümde yapılan analiz çalışmalarında kullanılan, enerji temelli PHES modeli ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Beşinci bölümde çalışmada kullanılan optimizasyon senaryosu açıklanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar altıncı bölümde özetlenmiştir. Son bölüm olan yedinci bölümde ise çalışma ile ilgili tartışma ve varılan sonuç bulunmaktadır.

2 Türkiye elektrik piyasası

Türkiye'de elektrik piyasasının serbestleşmesi için önemli bir adım olan gün öncesi piyasası ve dengeleme güç piyasası 1 Aralık 2011 tarihinde faaliyete geçmiştir. Gün öncesi piyasa ile şebekeye bağlı katılımcılar arz ve taleplerini yine piyasa katılımcılarının teklifleri ile oluşan fiyatları baz alarak düzenleyebilmektedirler. Bu piyasada arz ve talep fiyat teklif eğrilerinin kesiştiği nokta o saat için piyasa takas fiyatını (PTF) ve piyasa takas miktarını (PTM) belirlemektedir. Dengeleme güç piyasasında ise gün öncesinden oluşturulan üretim planında oluşan sapmalar dengelenmekte ve sistem marjinal fiyatı (SMF) oluşmaktadır. Şebekede enerji talebinin artması fiyatların artmasına, talebin azalması ise fiyatların azalmasına yol açmaktadır. Bu durum katılımcıların sistemden enerji çekişlerini düşük talep olan saatlere, sisteme enerji verişlerini ise yüksek talep olan saatlere kaydırmaları için motivasyon oluşturmuştur. Böylece katılımcılar, enerji alış-satışlarını şebekedeki arz-talep güç dengesini güçlendirici yönde yapmaya teşvik edilmiştir.

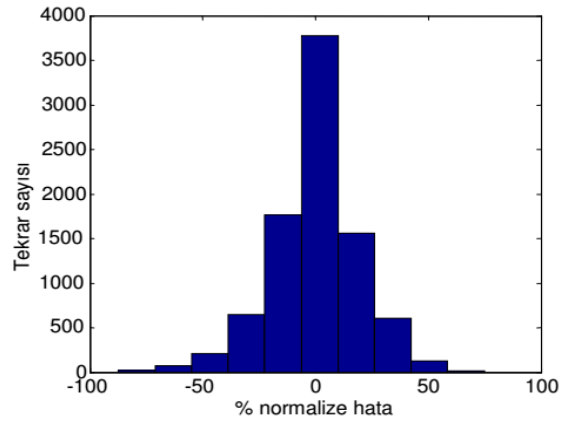
Gün öncesi piyasada RES'ler de fiyat ve miktar teklifi vermektedirler. Bildirilen üretim planı gerçekleştirilir ise gelir üretim değeri ile PTF çarpılarak hesaplanmaktadır. Üretim planlarını gerçekleştirmedikleri takdirde bu santraller cezaya düşmektedirler. Sisteme bildirilen üretim planından fazla yapılan üretimler min(SMF,PTF) ile ücretlendirilmekte. Eksik üretimler ise mak(SMF,PTF) ile değerlendirilmektedir. RES'leri kaynak olarak tamamen rüzgâra bağımlı oldukları için üretimlerini zamanda kaydıramamakta piyasada oluşan şebeke güç dengesini destekleyici yöndeki motivasyona cevap verememektedirler.

3 RES üretimlerinin analizi

Bu çalışmada kullanılan RES verileri Türkiye'de kurulmuş dört adet santralden alınmış gerçek verilerdir. Tablo 1'de santrallere ait bazı karakteristik bilgiler verilmiştir. Kullanılan veri seti 2012 yılına ait saatlik enerji üretim ve bir gün sonrası için oluşturulmuş 24 saatlik enerji üretim tahmin değerlerinden oluşmaktadır. Rüzgâr, yukarıda bahsedildiği gibi değişken ve kontrol edilemeyen bir enerji kaynağıdır. Her ne kadar kontrol edilemese de bir sonraki gün üretilecek enerjinin bilinmesi şebeke operatörleri için önemli bir bilgidir. Tahmin bilgisi ile şebeke operatörü bir gün sonrası için üretim planı oluşturabilecek şebekedeki rüzgâr enerjisinin payını hesaba katabilecektir. Rüzgâr enerjisi üretim tahminleri %100 doğrulukta yapılamamaktadır. Şekil 1'de kurulu güce göre normalize edilmiş tahmin hata değerlerinin histogram grafiği verilmiştir. Grafikteki yatay eksen kurulu güce göre normalize edilmiş hata değerlerini, dikey eksen ise bu hataların tekrarlanma sayısını temsil etmektedir.

Tablo 1: RES listesi.

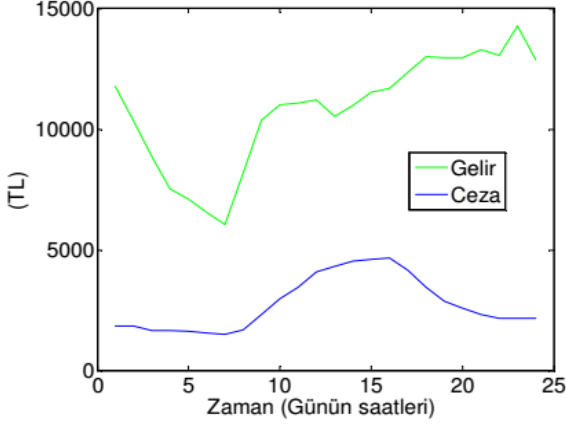
RES no.	Türbin sayısı	Türbin gücü (MW)	Kurulu güç (MW)
1	36	2.5	90
2	20	3	60
3	22	1.5-2.5	35
4	5	3	15



Şekil 1: Normalize hata değerleri.

Rüzgâr enerjisi tahminleri gün öncesi elektrik piyasasında oldukça önemlidir [17]. Tahmin değerleri kullanılarak santraller gün öncesi piyasada (bir gün sonrası için) teklif vermekte eğer bu teklif ettikleri üretimleri ertesi gün gerçekleştirmezlerse cezaya düşmektedirler. Tahmin hataları piyasaya teklif veren santrallerin cezaya düşmelerine sebep olmaktadır. Bu kapsamda, çalışmada incelenen RES'ler için senelik gelir ve ceza miktarları hesaplanmıştır. Tüm verilere ilişkin genel bir bakış sağlayabilmek için senelik saatlik ortalama (günün her saati için bir ortalama) değerler oluşturulmuştur. Gelir ve ceza miktarlarının senelik saatlik ortalama değerleri Şekil 2'de verilmiştir.

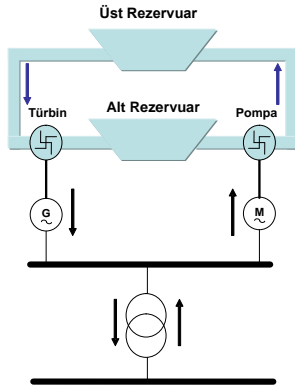
Şekil 2'de yatay eksen günün saatlerini temsil etmektedir. Düşey eksen ise santralin elde ettiği geliri göstermektedir. Bir gün içerisinde her saat için bir değer hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar tüm yıl için yapılmıştır. Gün içerisinde herhangi bir saatin aldığı senelik saatlik ortalama değer, yılın tüm günlerinde o saatin aldığı değerlerin ortalamasıdır.



Şekil 2: Senelik saatlik ortalama değerler.

4 PHES modeli

Simülasyon ve analiz çalışmalarında kullanılmak üzere sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sistem iki bileşenden oluşmaktadır. Bileşenlerden biri olan RES'lere ait gerçek veri seti kullanıldığı için bu bölüm modellenmemiştir. Diğer bölüm olan PHES için bir matematiksel model oluşturulmuştur. PHES'ler enerji depolamak ve depolanan enerjiyi ihtiyaç duyulduğunda tekrar güce çevirmek için tasarlanmış santrallerdir. Şekil 3'te PHES sisteminin şematik bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 3: PHES sistemi.

Şekildeki mavi oklar su akışlarını, siyah oklar elektriksel enerji akışlarını temsil etmektedir. Santralin çalışma prensibi oldukça basittir. Tesis enerji depolama işlemini, motorlar ile yüksekteki rezervuara su pompalayarak elektriksel enerjinin potansiyel enerjiye dönüştürülmesi şeklinde gerçekleştirmektedir. Depolanan potansiyel enerjiye ihtiyaç duyulduğunda yüksek rezervuardaki su bırakılarak santraldeki türbinler çalıştırılmakta ve böylece elektriksel güce dönüşüm sağlanmaktadır. PHES modeli örnekleme zamanı bir saat olmak üzere ayrık zamanlı bir kararl durum modelidir. Model enerji temelli bir modeldir ve dinamiklerini enerji türünden ifade etmektedir. PHES sistemi; türbin,

pompa, motor, jeneratör, transformatör, alt ve üst rezervuar bileşenlerinden oluşmaktadır. Üst rezervuardaki su seviyesi ile üniterler(pompa-türbin) arasında oluşan yükseklik farkı üniterlerin enerji çıkışı hesaplamalarını etkilemektedir. Benzer şekilde cebri boruda oluşan sürtünme kayıpları da hesaba katılabilir. Üst rezervuardaki su seviyesi değişimleri toplam düşüyle kıyaslandığında genelde oldukça küçük olmaktadır ve benzer şekilde cebri boruda oluşan sürtünmeden kaynaklı enerji kayıpları da toplam ünite enerjilerine kıyasla çok düşüktür. Bu sebeple üst rezervuardaki su kotu ve cebri boru sürtünme kayıpları ortalama sabit bir değer olarak alınmıştır. PHES modelinde kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: PHES modeli parametreleri.

T_n (MW)	P_n (MW)	Rez_{mak} (MWh)	η_m	η_p	η_g	η_t	η_{trns}
50	50	600	0.9	0.8	0.9	0.9	0.93

Eşitlik (1,3,5) sistemin kısıtlarını temsil etmektedir. Eşitlik (2) ve eşitlik (4) sırasıyla pompa ve türbin güçlerini vermektedir. Eşitlik (6) ve (7) sırasıyla rezervuarda depolanmış enerji miktarlarını ve trafodan akan enerjiyi vermektedir.

$$0 \leq P_s^g \leq P_n \quad (1)$$

$$P_s^g = \min(P_s^g, (Rez_{mak} - Rez_s^g) \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{trns}) \quad (2)$$

$$0 \leq T_s^g \leq T_n \quad (3)$$

$$T_s^g = \min(T_s^g, Rez_s^g / (\eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{trns})) \quad (4)$$

$$0 \leq Rez_s^g \leq Rez_{mak} \quad (5)$$

$$Rez_s^g = Rez_{s-1}^g + P_s^g \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{trns} - T_s^g / (\eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{trns}) \quad (6)$$

$$E_s^g = R_s^g + T_s^g \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{trns} - P_s^g / (\eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{trns}) \quad (7)$$

s : Saat,

g : Gün,

η_m : Motor verimi (%),

η_p : Pompa verimi (%),

η_g : Generator verimi (%),

η_t : Türbin verimi (%),

η_{tr} : Trafo verimi (%),

T : Türbin gücü (MW),

T_n : Nominal türbin gücü (MW),

P : Pompa gücü (MW),

P_n : Nominal pompa gücü (MW),

E : Trafodan akan enerji (MWh),

Rez : Rezervuarda depolanmış enerji (MWh),

Rez_{mak} : Rezervuarın maksimum kapasitesi (MWh),

R : Rüzgar gücü (MW).

5 Optimizasyon senaryosu

Şebekedeki enerji talebi arttığında enerji fiyatları artmakta, talep miktarı azaldığında ise fiyatlar düşmektedir. RES'lerin üretimleri rüzgâr değerlerine bağımlılık göstermekte bu sebeple enerji üretim miktarı ve zamanı kontrol edilememektedir. RES'lerin bu kontrol edilemeyen karakteristikleri, üretimlerini yüksek enerji talebinin olduğu (yüksek enerji fiyatlarının olduğu) saatlere kaydıramamasına yol açmaktadır. PHEs enerji depolayabilme kabiliyeti ile rüzgâr enerjisi üretimlerini zamanda kaydırabilir ve genliklerini değiştirebilir [18]. RES'ler böylece gün öncesi piyasada istedikleri (enerji fiyatlarının yüksek olduğu) saatlerde istedikleri miktarda üretim yapacak şekilde tekliflerini verebilirler fakat PHEs in enerji depolama ve kurulu güç kısıtları dikkate alındığında teklif senaryosu oluşturmanın çokta kolay olmayacağı anlaşılmaktadır. Çünkü bir sonraki günün 24 saati için pompa ve türbin değerleri olmak üzere toplam 48 değer seçilmeli ve rezervuarın enerji depolama kısıtı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu optimizasyon problemi Matlab optimizasyon kütüphanesi kullanılarak doğrusal programlama yöntemi ile çözülmüştür. Optimizasyon senaryosu santrallerin gün öncesi piyasasındaki gelirlerini maksimize etmektedir. Sonuçları elde etmek üzere oluşturulmuş algoritma iki bölümden oluşmaktadır: 1. Optimizasyon algoritmasında, RES üretimi tahminleri ve talep güç tahminlerini hesaba katarak gün öncesi piyasada en yüksek gelir sağlayacak teklifin oluşturulması. 2. Gün öncesinde oluşturulmuş üretim planına göre tesislerin işletilmesi. Eşitlik (8-11)'de algoritmaya ilişkin kısıtlar ve değerlendirme fonksiyonu verilmiştir. Tüm hesaplamalar bir yıllık veriler kullanılarak yapılmıştır.

$$0 \leq P_s^g \leq P_n \quad (8)$$

$$0 \leq T_s^g \leq T_n \quad (9)$$

$$0 \leq Rez_s^g \leq Rez_{mak} \quad (10)$$

$$mak(f(.)) = mak(\sum_h^{24}(T_s^g - P_s^g + R_s^g).Ef_s^g) \quad (11)$$

Ef : Enerji fiyatı (TL/MWh),

$f(.)$: Değerlendirme fonksiyonu.

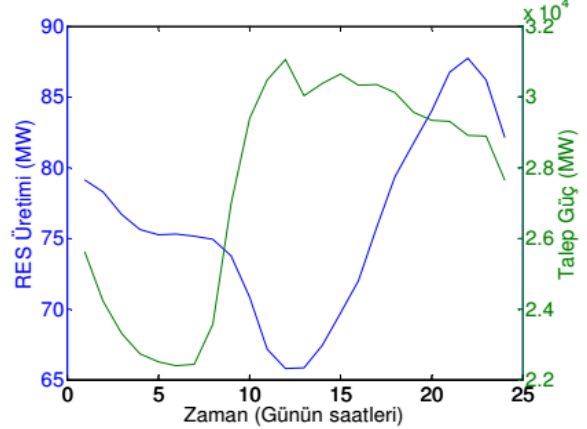
Enerji fiyat tahminleri gün öncesi piyasalarda oldukça önemlidir fakat Türkiye gün öncesi piyasası sisteminde fiyat tahmini yapılmamaktadır. Bu sebeple enerji fiyatları ile benzer trendlere sahip olduğu için piyasa sistemindeki talep tahminleri enerji fiyat tahminlerinin yerine kullanılmıştır. Algoritmanın sistem çıktıları üzerindeki toplam etkisini görebilmek için senelik saatlik ortalama değerler hesaplanmıştır.

6 Sonuçlar ve analizler

RES üretimlerinin şebekedeki enerji dengesine etkisini görmek için talep ile RES üretim değerleri incelenmiş Şekil 4'teki grafik oluşturulmuştur. Şekil 4'e bakıldığında talep enerjinin yüksek olduğu saatlerde RES üretimleri düşmekte, talep enerjinin düşük olduğu saatlerde ise RES üretimleri yükselmektedir. Bu durumun elektrik şebekesindeki enerji dengesine bozucu bir etki yapacağı görülmektedir.

Şekil 4 ve 5'teki değerler Bölüm 2'de anlatılan senelik saatlik ortalama değer hesabı yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu yöntem

ile gün içerisindeki her saatin aldığı ortalama değerler görülmekte böylece bir yıllık süreç gözlemlenebilmektedir.

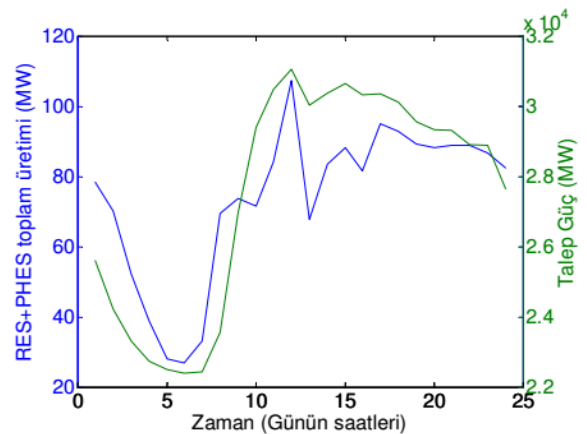


Şekil 4: RES üretimlerinin ve şebeke talebinin senelik saatlik ortalama üretim değerleri.

PHEs ve RES'ler optimizasyon senaryosuna göre gün öncesi piyasada işletilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Gün öncesi piyasaya katılan tesisler önceki bölümlerde anlatıldığı gibi gün öncesinden bir işletim programı oluşturmaktadırlar. Bu işletim programı doğrusal programlama yöntemi ile optimize edilmiştir. Optimum işletim programı dikkate alınarak tesisler bir gün sonra işletilmiştir. Gün öncesi piyasada işletim basamakları kısaca aşağıdaki gibidir:

1. Bir gün sonra üretilecek rüzgâr enerjisi tahminleri, enerji talep tahminleri ve dikkate alınarak en iyi işletim senaryosunun oluşturulması,
2. Oluşturulan senaryo için PHEs ve RES'in işletilmesi. Tesislerin ürettiği güçlerin hesaplanması.

Analizler 2012 yılının 366 günü için yapılmıştır. Analiz sonuçlarının yıl boyunca aldığı değerleri görebilmek için 3. Bölümde anlatılan yöntem kullanılarak senelik saatlik değerler hesaplanmıştır. Senelik saatlik ortalama değerlerden oluşan grafik Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: Toplam üretimin ve şebeke talebinin senelik saatlik ortalama üretim değerleri.

Şekil 5'ten açıkça anlaşılacağı üzere toplam (4 adet RES+PHEs) üretim talep eğrisini takip edebilmiştir. Böylece kontrol edilemeyen rüzgâr enerjisi kontrol edilebilir hale gelmiş, RES'lerin şebekedeki enerji dengesine olan bozucu etki azaltılmıştır.

Santrallerin üretimlerine ilişkin senelik saatlik ortalama değerler Ek'teki Tabloda liste halinde verilmiştir. Tablo santrallerin çalışma senaryolarına ilişkin tüm değerleri bir arada vermektedir. Çalışmada iki adet çalışma senaryosu incelenmiştir. 1. Rüzgâr enerjisi üretim tahminleri kullanılarak bir sonraki gün için çalışma senaryosu oluşturulması. 2. Talep güç, rüzgâr enerjisi üretim tahminleri ve doğrusal programlama yöntemi kullanılarak çalışma senaryosu oluşturulması. 2. Senaryo ile 1. Senaryo kıyaslandığında sabah saatlerindeki üretimin 2.'de daha düşük, saat 09:00'dan sonraki üretimlerin 2.'de daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuca enerji fiyatlarındaki değişim sebep olmaktadır. Optimizasyon senaryosunun amacı toplam geliri artırmak olduğu için toplam üretim değerlerini, enerji fiyatlarının (talep enerjinin) düşük olduğu saatlerden enerji fiyatlarının (talep enerjinin) yüksek olduğu saatlere kaydırmış, böylece gelir artırılmış aynı zamanda da enerji dengesi üzerindeki olumsuz etki azaltılmıştır.

İki ayrı senaryoya ilişkin kıyaslanması önemli olan iki değer daha vardır. Bunlar şebekeye aktarılan toplam enerji ve toplam gelirdir. Değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 3: Toplam gelir ve üretim.

Senaryo	Toplam Gelir (TL)	Toplam Üretim (MWh)
RES	90662512.2	639454.6
PHES+RES	93144348.3	617830.0

PHES'in verimi motor, jeneratör ve trafo verimleri ihmal edilse dahi türbin ve pompa verimlerinin çarpımı olarak en fazla %72'dir fakat PHES kullanılan senaryodaki enerji kaybı sadece %3.382 olmuştur. Çünkü RES üretimleri tamamen depolanıp daha sonra enerjiye dönüştürülmemiştir. Sadece geliri maksimize edecek kadar enerji depolanıp yüksek enerji fiyatlarının olduğu saatlerde tekrar enerjiye dönüştürülmüştür. 2. Senaryoda toplam gelir artışı %2.737 olmuştur. Toplam üretim bir miktar azalmasına rağmen toplam gelirin artmasının sebebi yüksek enerji fiyatlarının olduğu saatlerde gerçekleşen üretimlerdir.

7 Tartışma ve sonuç

Literatürde Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında PHES ve RES'lerin beraber işletilmesini inceleyen çok az sayıda çalışma vardır. Bu çalışma gün öncesi piyasa tekliflerinin optimize edilmesi için bir optimizasyon yöntemi kullanan tek çalışmadır. Türkiye'de PHES ve RES'lerin beraber işletilmesi ile rüzgâr enerjisinin şebekeye bağlanabilme kısıtlarının giderilmesi konusunu ayrıntılı olarak analiz etmek önemlidir çünkü ülkede 48 GW'lık bir rüzgâr enerjisi potansiyeli bulunmaktadır. Bu yüksek potansiyel; ülkenin enerjide dışa bağımlılığı da göz önünde bulundurulduğunda ekonomik açıdan, yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olduğundan dolayı ise çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir fırsat olduğu görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde senaryo 2 kullanılırsa RES'lerin gelirleri bir miktar artırılabilir ve bu santral üretimleri talep eğrisini takip edebilir hale getirilebilmektedir. Fakat fazladan bir PHES tesisine ihtiyaç duyulduğu için yatırım maliyetinin gelir artışına kıyasla oldukça fazla olacağı anlaşılmaktadır. Yerli ve yenilenebilir enerji kaynağı olan

rüzgâr enerjisinin kullanımı bu yöntemle artırılabilir için ülke ekonomisi açısından bu tür birlikte çalışacak PHES+RES sistemlerinin faydalı olacağı açıktır. PHES+RES sistemlerinin uygulanabilmesi için bu tür tesisler maddi teşviklere ihtiyaç duymaktadır. PHES sistemleri iki adet rezervuara ve pompa-türbin ünitelerine sahip olduğundan yüksek maliyetlere kurulabileceği ve bu sebeple ekonomik teşvik mekanizmaları olmadan yatırım yapılmasının oldukça zor olacağı görülmektedir. Fakat mevcut baraj rezervuarlarından, hidroelektrik santral binalarından ve ünitelerinden faydalanılabileceği göz önünde bulundurulduğunda PHES maliyetleri düşürülebilecektir.

Bu çalışmadan elde edilen neticeler ışığında PHES+RES sistemleri ile Türkiye gün öncesi elektrik piyasasına katılan RES'lerin gelirlerinin %2.737 oranında artırılabilir ve üretimlerin talep eğrisini takip edebilir hale getirilebileceği öngörülmektedir.

8 Kaynaklar

- [1] Foley AM, Leahy PG, Li K. "A long-term analysis of pumped hydro storage to firm wind power". *Applied Energy*, 137, 638-648, 2015.
- [2] Hozouri MA, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M. "On the use of pumped storage for wind energy maximization in transmission-constrained power systems". *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(2), 1017-1025, 2015.
- [3] Murage MW, Anderson CL. "Contribution of pumped hydro storage to integration of wind power in Kenya: An optimal control approach". *Renewable Energy*, 63, 698-707, 2014.
- [4] Ma T, Yang H, Lu L. "Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong". *Renewable Energy*, 69, 7-15, 2014.
- [5] Tuohy A, Malley MO. "Pumped storage in systems with very high wind penetration". *Energy Policy*, 39(4), 1965-1974, 2011.
- [6] Khodayar M, Shahidehpour E. "Enhancing the dispatchability of variable wind generation by coordination with pumped-storage hydro units in stochastic power systems". *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2808-2818, 2013.
- [7] Fertig E, Heggedal AM. "Optimal investment timing and capacity choice for pumped hydropower storage". *Energy Systems*, 5(2), 285-306, 2013.
- [8] Dursun B, Alboyaci B. "The contribution of wind-hydro pumped storage systems in meeting Turkey's electric energy demand". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1979-1988, 2010.
- [9] Zhang N, Kang C, Kirschen DS. "Planning Pumped Storage Capacity for Wind Power Integration". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(2), 393-401, 2013.
- [10] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Wind". <http://www.enerji.gov.tr/en-US/Pages/Wind> (28.04.2015).
- [11] Türkiye Elektrik İletim AŞ. "Load Dispatch Department Operational Reports". <http://www.teias.gov.tr/Eng/DispatchReports.aspx> (28.04.2015).
- [12] Papaefthymiou SV, Lakiotis VG, Margaritis ID, Papathanassiou SA. "Dynamic analysis of island systems with wind-pumped-storage hybrid power stations". *Renewable Energy*, 74, 544-554, 2015.

- [13] Papaefthymiou SV, Papathanassiou SA. "Optimum sizing of wind-pumped-storage hybrid power stations in island systems". *Renewable Energy*, 64, 187-196, 2014.
- [14] Wanjiku M, Anderson CL. "Contribution of pumped hydro storage to integration of wind power in Kenya: An optimal control approach". *Renewable Energy*, 63(C), 698-707, 2014.
- [15] Karimi VA, Daraeepour A, Monsef H. "A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets". *Applied Energy*, 88(12), 5002-5012, 2011.
- [16] Duque D, Jaramillo ED. "Optimal operation of a pumped-storage hydro plant that compensates the imbalances of a wind power producer". *Electric Power Systems Research*, 81(9), 1767-1777, 2011.
- [17] Özkan MB, Terciyanlı E, Küçük D, Buhan S, Demirci T, Yıldız C, Günindi M. "Verification of a real-time wind power monitoring and forecast system for Turkey". *2nd Renewable Power Generation Conference*, Beijing, China, 9-11 September 2013.
- [18] Terciyanlı E, Yıldız C, et al, "Optimal operation of a wind powered pumped storage hydroelectricity plant". *Int. Conf. on Sust. En. Tech.*, Istanbul, Türkiye, Eylül 2011.

Ek A

Tablo: Çalışma sonuçları.

Saat	RES (MWh)	Pompa (MWh)	Türbin (MWh)	Talep (MWh)	Enerji Fiyatı (TL/MWh)	RES+PHES (MWh)	RES+PHES (TL)	RES (TL)
1	79.0965	0.7471	0.0001	25616.12	150.53	78.35	11670.23	11765.79
2	78.2545	8.1894	0	24219.40	137.52	70.07	9365.202	10333.74
3	76.6659	24.3612	0	23311.20	121.45	52.30	6200.675	8849.304
4	75.6332	37.1326	0.2732	22726.78	106.59	38.77	3953.917	7506.584
5	75.2268	47.2399	0	22507.65	103.37	27.99	2469.501	7108.476
6	75.2689	48.4215	0	22390.98	97.69	26.85	1786.162	6553.45
7	75.1102	42.0961	0	22443.17	93.21	33.01	2302.959	6036.617
8	74.9346	5.4039	0	23562.84	119.37	69.53	7586.179	8177.661
9	73.7254	0.0984	0	26959.84	148.79	73.63	10372.17	10377.49
10	70.8216	0	0.6997	29387.16	161.83	71.52	11088.16	10997.15
11	67.1758	0	16.9676	30470.77	169.21	84.14	14010.65	11070.38
12	65.7454	0	41.6024	31063.66	175.28	107.35	18943.47	11217.44
13	65.8160	0	2.0201	30034.97	166.42	67.84	10847.62	10532.71
14	67.3998	0	16.0132	30379.78	168.87	83.41	13758.87	10971.44
15	69.7217	0	18.4345	30658.47	170.91	88.16	14949.47	11517.31
16	71.9823	0	9.6742	30337.98	168.05	81.66	13402.94	11674.44
17	75.7903	0	19.2817	30352.46	167.68	95.07	15919.68	12366.98
18	79.3387	0	13.4622	30106.56	167.99	92.80	15498.09	12995.04
19	81.7124	0	7.4535	29554.37	163.14	89.17	14265.43	12957.57
20	83.9926	0	4.1166	29331.97	160.58	88.11	13653.94	12965.63
21	86.7320	0	2.0583	29307.10	158.32	88.79	13618.45	13287.59
22	87.7425	0	1.0291	28894.26	152.87	88.77	13218.08	13062.46
23	86.1867	0	0.5146	28891.80	168.69	86.70	14360.7	14273.11
24	82.1664	0	0.2573	27659.02	159.54	82.42	12920.44	12879.21