

# RÜZGÂR GÜCÜ ÜRETİMİ İÇİN TAHMİN VE TEKLİF SİSTEMİ TASARIMI

Semih Ali AKSOY<sup>1</sup>, Emre ERYİĞİT<sup>1</sup>, Narmin HASHİMOVA<sup>1</sup>, Melike İŞBİLİR<sup>1</sup>, Zeynep Müge AVŞAR<sup>1\*</sup>, Gülser KÖKSAL<sup>1</sup>,  
Erman TERCİYANLI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara  
semihaliaksoy@yahoo.com, emreryigit@gmail.com, hasimova@yahoo.com, melikeisbilir@gmail.com, mausar@metu.edu.tr,  
koksal@metu.edu.tr

<sup>2</sup>TÜBİTAK MAM, Enerji Enstitüsü, ODTÜ Yerleşkesi, 06800, Ankara  
erman.terciyanli@tubitak.gov.tr

## ÖZET

Son yıllarda rüzgâr enerjisi, özellikle Türkiye gibi yüksek rüzgâr potansiyeli olan ülkelerde, önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu çalışmalar arasında rüzgâr santralleri için enerji üretim miktarının tahmini ve piyasaya verilecek üretim teklifinin belirlenmesi önemli bir yer tutmaktadır. Bu proje kapsamında, ilk olarak verilerin geliştirilen yeni bir yaklaşımla kümelenip, bunlara Yerel Yüzdellik Dilim Regresyonu uygulanmasıyla, aralık tahminleri elde edilmiştir. Söz konusu model Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi (RİTM'e)'ne kayıtlı santraller üzerinde denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonraki aşamada elektrik enerjisi fiyatlarının tahmini için bir yöntem önerilmiştir. Son olarak üretim tekliflerinin optimizasyonu için bir Rassal (Stokastik) Programlama modeli geliştirilmiştir. Bu Karışık Tamsayılı Programlama modeli, rüzgâr gücü üretimi ve fiyat senaryolarını girdi olarak kullanarak beklenen geliri en çoklayan sonucu verir. Önceden kullanılmakta olan yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, bu çalışmada önerilen yaklaşımın günlük gelirden önemli iyileşmeler sağladığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgâr gücü tahmini, elektrik enerjisi, fiyat tahmini, rüzgâr gücü üretim teklifi, yerel yüzdellik dilim regresyonu

## A PREDICTION AND BIDDING SYSTEM DESIGN FOR WIND POWER GENERATION ABSTRACT

Wind energy has become an important field of study recently, especially in the countries having high potential of wind energy production such as Turkey. Among these studies, forecasting wind power production and choosing a bid for each power plant have an important place. In the scope of the project, firstly by applying a new clustering approach and then Local Quantile Regression to the data, interval forecasts are generated. This forecasting approach gives successful results when tested for power plants enrolled in Wind Power Monitoring and Forecasting Center. At the next stage, a method is proposed for forecasting electricity prices. At the last stage, a stochastic model is built to optimize the bidding strategies. This mixed-integer model takes production forecasts and electricity price scenarios as input and gives the optimal bid as output. The overall approach proposed in this study provides a considerable improvement in revenues when compared to the previous approaches.

**Keywords:** Wind power forecasting, electric energy, price forecasting, bidding for wind power, local quantile regression

\* İletişim yazarı

33. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi Öğrenci Proje Yarışması'nda birincilik ödülü kazanan çalışmanın ilgili öğretim üyelerinin katkılarıyla düzenlenmiş halini EM Dergisi yayın politikası doğrultusunda yayımlıyoruz.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları ve bu kaynakların en iyi şekilde kullanımıyla ilgili araştırmalar giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu proje çalışmasının konusuyla ilgili olan rüzgâr enerjisi de, yenilenebilir kaynaklar arasında hem geniş kapsama alanı olması ve yüksek potansiyeli hem de çevre dostu olması nedeniyle oldukça kritik bir öneme sahiptir. Kısa vadede, rüzgâr enerjisi kullanımının yaygınlaşması öncelikle bu alana yapılacak yatırımlara bağlı görünmekte ve bu da rüzgâr enerjisi sektörünün yatırımcıları çekecek bir potansiyel taşıması gerekliliğine işaret etmektedir. Eldeki meteoroloji verilerinden ne kadar güç üretilebileceğine ilişkin tahminlerin yapılması ve bu güç tahminlerinin var olan elektrik piyasasında kazançlı olacak şekilde kullanımı konusunda Türkiye’de yapılmış çalışmalar, henüz bu amaca yeterince hizmet edecek kadar aşama kaydedememiştir. Bu bağlamda güvenilir bir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisinin yaygın kullanımını desteklemek amacıyla, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK MAM) tarafından talep edilen ve bu raporda özetlenen projenin kapsamı, en doğru rüzgâr gücü tahmininin yapılması ve devamında Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin (RES’lerin) piyasaya en kazançlı üretim teklifini vermesi için bir karar destek sisteminin tasarlanması olarak belirlenmiştir.

Çalışmada rüzgâr gücü için dinamik bir kümeleme ve Yerel Yüzdellik Dilim Regresyona dayalı etkili ve özgün bir aralık tahmin modeli geliştirilmiştir. Ayrıca rüzgâr enerjisi üretim teklifi için RES’lerin en uygun kararı vermesini destekleyecek bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, rüzgâr gücü tahminlerinin yanı sıra elektrik enerjisi fiyat tahminlerine de dayalı senaryoları dikkate alması ve basitleştirilmiş bir karışık tamsayı programlama modeline dayanması bakımından özgündür. Aşağıda bu yaklaşımlar ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. ELEKTRİK PİYASASI

Türkiye Elektrik Piyasası, Gün Öncesi Piyasası ve Dengeleme Güç Piyasası olmak üzere ikiye ayrılma-

tadır. Gün Öncesi Piyasası’nda elektrik üreticilerinin (doğal gaz santralleri, hidroelektrik santralleri, termik santraller vb.) piyasaya ertesi gün için saatlik üretim ve fiyat tekliflerini vermesiyle oluşan arzın talep ile kesleştirilmesinden Piyasa Takas Fiyatı (*PTF*) oluşur. RES’ler piyasaya ertesi gün için fiyat değil yalnızca saatlik üretim teklifi vermektedir. Yenilenebilir Enerji Destekleme Mekanizması (YEKDEM) sayesinde, rüzgâr enerjisiyle yapılan üretimin, teklif edilenden fazla olsa bile, tamamının alınma garantisi vardır. Dengeleme Güç Piyasası ise adından da anlaşılacağı gibi tekliflerin gün içerisinde beklendiği gibi gerçekleşmemesinden kaynaklanan dengesizliği gidermek amacıyla oluşturulmuştur. Bu piyasada oluşan fiyat ise Sistem Marjinal Fiyatı (*SMF*) olarak adlandırılır.

Bir RES’in piyasaya verdiği üretim teklifi  $T$  iken gerçekleşen üretim  $U$  ile gösterilirse, sonuçta kazanılan gelir  $G$  aşağıdaki durumlardan birine göre belirlenir.

$$(1) \text{ Eğer } T=U \text{ ise, } G=T \times PTF.$$

$$(2) \text{ Eğer } T < U \text{ ise, } G=(T \times PTF) + (U-T) \times \min\{PTF, SMF\}.$$

$$(3) \text{ Eğer } T > U \text{ ise, } G=(T \times PTF) - (T-U) \times \max\{PTF, SMF\}$$

Görüldüğü gibi teklifin tahmine eşit olmadığı durumlardan (2)’de, üretilen enerjiyi alım garantisi sebebiyle bir ödül mekanizması işletilmektedir, ancak bu mekanizmada mümkün olan en düşük gelir ödül olarak sağlanmaktadır. (3) numaralı durumda ise elde edilebilecek en yüksek gelir üzerinden bir ceza mekanizması uygulanmaktadır.

Yukarıda özetlenen piyasa işleyişi, doğru üretim teklifi vermenin önemini göstermektedir. Üretilen rüzgâr gücü kesin olarak bilinebilseydi ulaşılabilecek en yüksek gelir  $U \times PTF$  olurdu. Aynı şekilde  $PTF$  ve  $SMF$ ’den hangisinin büyük olacağı kesin olarak bilinebilseydi, rüzgâr gücü tahmini olmadan da, teklifler aşağıda görüldüğü gibi yapılarak, en yüksek gelire ulaşılabilirdi.

- $PTF > SMF$  ilişkisi kesin olarak bilindiği durumda, üretim teklifi söz konusu rüzgâr santralinin

kapasitesi olan  $C$  kadar verilirse gün başında alınan gelir  $C \times PTF$  olur. Gün sonunda da, eğer teklif edilen miktar üretilemezse, ödenen ceza  $(C-U) \times \max\{PTF, SMF\}$  olur. Fiyatların en büyüğü  $PTF$  olduğu için, gün sonunda elde edilen gelir  $U \times PTF$  olur, bu da en yüksek gelir miktarıdır.

- $PTF < SMF$  ilişkisi kesin olarak bilindiği durumda, üretim teklifi 'sıfır' olarak verilirse gün öncesinde hiçbir gelir elde edilemez. Gün sonunda elde edilen gelir ise  $U \times \min\{PTF, SMF\}$  olur. Fiyatların en küçüğü  $PTF$  olduğu için, bu elde edilebilecek en yüksek gelire eşittir.

Ancak fiyatları ya da üretimi kesin olarak bilmek mümkün olmadığı için, sistemdeki belirsizliği en iyi şekilde ele alabilmek amacıyla bu projede üretim ve fiyat senaryoları oluşturulup bir optimizasyon modeliyle en uygun üretim teklifine ulaşılmıştır.

### 3. RÜZGÂR GÜCÜ TAHMİNİ VE ÜRETİM SENARYOLARININ OLUŞTURULMASI

En uygun üretim teklifini verecek optimizasyon modeline girdi olan senaryoları oluşturmak için mevcut sistemde (RİTM) nokta tahmin modeli yetersiz kaldığından, bu projede yeni bir aralık tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada uygulanabilir mevcut yöntemler üzerine yapılan araştırmaların ve yazın taramasının sonucunda, sisteme en uygun aralık tahmin yöntemi olarak Bremnes (2006) çalışmasında önerilen Yerel Yüzdellik Dilim Regresyon (*Local Quantile Regression - LQR*) seçilmiştir.

Sisteme her gün üç farklı kaynaktan gelen hava durumu verilerinden rüzgâr gücü üretiminde ana etken olan hız, santrale özgü bir rüzgâr-güç eğrisi aracılığıyla güç değerine çevrilmektedir. Bu üretilmesi beklenen güce dair elde edilen ilk tahmindir, fakat içinde sistematik bir hata barındırır. Öte yandan, LQR aşağıda belirtilen özelliklere sahiptir.

- LQR geçmiş üretim tahminleri ve gerçekleşen üretim değerleri arasındaki ilişkiye dayanarak, yukarıda sözü geçen sistematik hatayı en aza indirgeyen katsayıyı bulmaya çalışır ve bunu istenilen

her yüzdellik dilim için tekrarlama fırsatı verir.

- LQR yerellik özelliğiyle tahminlerde birçok eğilimi yakalayarak, gerçekleşen ve tahmin edilen üretim değerleri arasındaki farkı azaltır.

Fakat LQR, Bremnes (2006)'nın önerdiği bu haliyle sadece üretim verilerinin birbirlerine olan uzaklığını kullandığı için bazı durumlarda yanıltıcı sonuç verebilir. Örneğin, fırtınalı günün bir saatinden gelen güç verisiyle, durgun bir günün bir saatinden gelen güç verisinin yakınlığı belli bir dereceye kadar yanıltıcı olabilir. Bunun asıl nedeni, santrale özgü olan hız-güç eğrisinin doğrusal olmayan yapısıdır; bu, hızda gerçekleşen büyük bir değişimin güçte beklenen bir değişimi gösterememesine neden olmaktadır. Dolayısıyla hız dışında, sıcaklık ve nem gibi başka hava verilerini de kullanan bir kümeleme yöntemi gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

Mevcut sistemde (RİTM) kullanılan k-ortalama algoritmaları sadece saatler arası ilişkiyi ele aldığı için, günler arası ilişkiyi de ortaya koyabileceği düşünülen *Dynamic Time Warping (DTW)* algoritması (Oates vd., 1999) incelenmiş ve ilk defa bu alana uyarlanmıştır. Uyarlama sonucunda, DTW ile birlikte yeni bir ağırlık fonksiyonu geliştirilmiş ve LQR metoduna eklenmiştir.

14 santral üzerinde son bir ay için yapılan denemelerde, geliştirilen bu tahmin yaklaşımının verdiği 50. yüzdellik değeri ile regresyona dayalı önceki tahmin modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. 9 santralde ortalama mutlak hatalarda %1 ila %4 arasında iyileştirmeler sağladığı gözlenmiştir. Kalan 5 santralde ise ya iyileşme olmamış ya da az miktarda bozulma gözlenmiştir.

Tahminlerin başarımını değerlendirmek için ortalama mutlak hatanın yanı sıra güvenilirlik ve keskinlik ölçüleri de kullanılmıştır. Bunlardan güvenilirlik, belli bir yüzdellik olarak hesaplanan değerlerin gerçek verilerde hangi yüzdelliğe karşılık geldiğini gösterir (Bremnes, 2004). Keskinlik ise yüzdelliklerin arasındaki uzaklığın çoğunlukla dar, riskli durumlarda ise geniş olmasının bir ölçüsüdür. Bu bilgiler doğrultusunda, 2013 Şubat

**Tablo 1.** 2013 Şubat Ayı İçin Rüzgâr Gücü Tahmini Güvenilirlik Değerleri

Güvenilirlik	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
Santral A	0,14	0,22	0,33	0,42	0,50	0,58	0,66	0,72	0,83
Santral B	0,23	0,29	0,35	0,43	0,49	0,57	0,65	0,74	0,85
Santral C	0,22	0,29	0,36	0,45	0,53	0,59	0,68	0,76	0,86

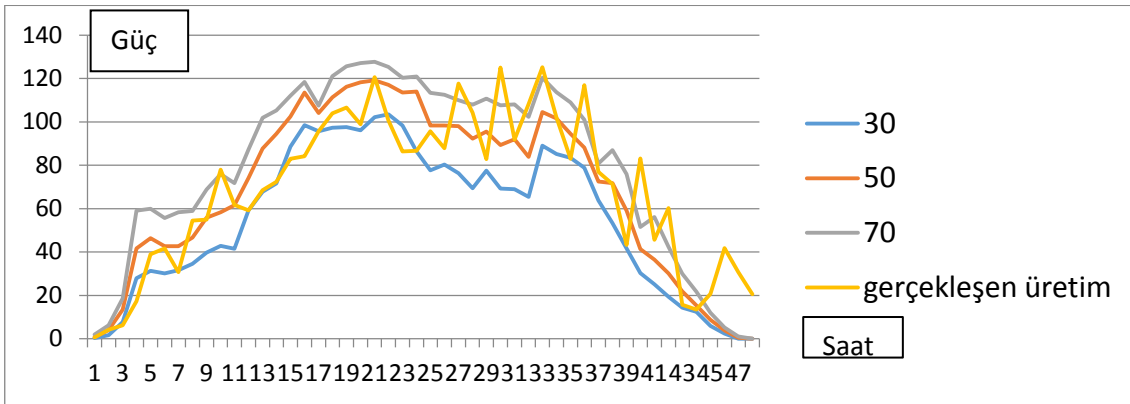
ayı için testleri tamamlanmış üç santralin güvenilirlik değerleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Özellikle üretimin daha yoğun gözleendiği 30. ve 70. yüzdellikler arasında güvenilirliklerin başarılı olduğu görülmektedir.

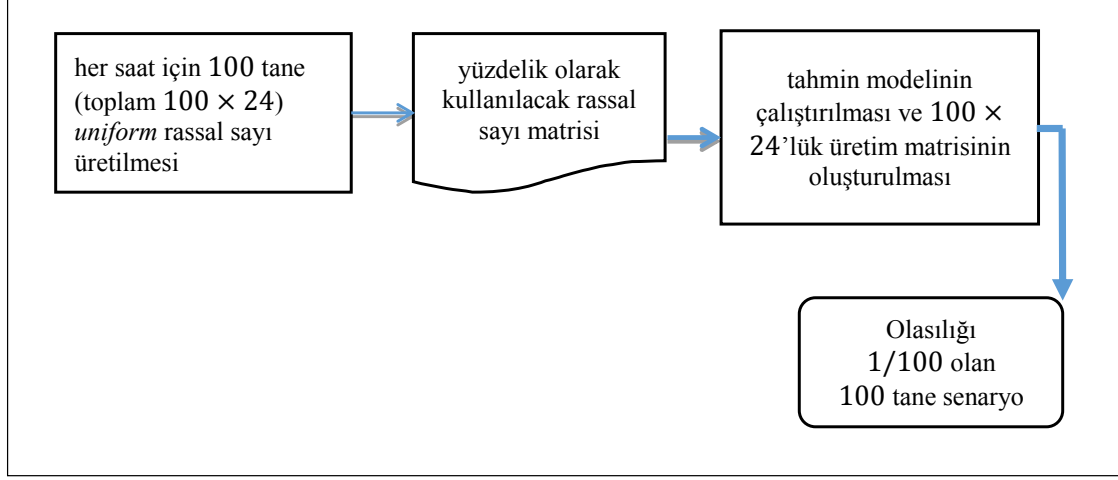
Keskinlik için ise Santral A’nın 48 saatlik (21-22 Şubat 2013) aralık tahmini sonuçları Şekil 1’de gösterilmiştir. İncelenen bu 48 saat için 30. ve 70. yüzdellikler arasındaki ortalama uzaklık 3.1 MW/saattir. Ancak bu değer üretimin az ya da çok olmasına oldukça bağlıdır. Bu yüzden keskinliği sayısal bir değer yerine grafik üzerinden incelemek daha uygundur (Santral A için 2013 Şubat ayına ait detaylı sonuçlara, Bandırma Rüzgâr Enerjisi Santrali Güç Üretimi ve Tahmini 2013’teki adresten erişilebilir.). Buna göre, riskli üretim durumlarında (örneğin havanın beklenmedik şekilde fırtınalı olduğu, yani hava tahminlerinin iyi olmadığı durumlarda) tahminlerin arasındaki uzaklıkların arttığı, diğer durumlarda ise azaldığı gözlenmiştir. Bu durum aslında tahmin modelinin olabilecek durumları çok iyi bir şekilde temsil ettiğinin bir göstergesidir. Çünkü havanın fırtınalı olduğu durumlarda rüzgâr hız-güç eğrisinin doğrusal olmayan yapısından dolayı

yüzdellik dilimler arasındaki farkın, rüzgârın daha yavaş estiği durumlara göre daha fazla olması beklenen bir durumdur.

En uygun üretim teklifini vermek için optimizasyon modelinde kullanılacak üretim senaryoları Şekil 2’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Üretim teklifi verilecek ertesi günün her saati için 100 *uniform* rassal sayı üretilmiş, bunlar tahmin modelinde yüzdellik olarak kullanılmış ve böylece 100 senaryo elde edilmiştir. Eşit olasılıkla gerçekleşmesi beklenen bu 100 senaryonun doğrudan optimizasyon modelinde kullanımı iki nedenden ötürü gerçekçi gözükmemiştir. Birinci neden, 100 senaryonun modelin çalışma süresini çok uzatmasıdır. İkinci neden ise, her biri eşit olasılıkla olan senaryoların aslında gerçekleşme olasılıklarının eşit olmamasıdır. Bu nedenlerden ötürü elde edilen 100 senaryonun, yazındaki çalışmalara (Brand vd., 2002) dayanarak 10 tane temsili senaryoya indirilmesi uygun bulunmuştur.

Senaryoların sayısının üretim verilerinin yapısını yansıtmak biçimde düşürülmesi, 100 senaryonun 10 temsili kümeyle bölünmesi olarak düşünülebilir.

**Şekil 1.** Santral A İçin Rüzgâr Gücü Tahmini (21-22 Şubat 2013)



Şekil 2. Üretim Senaryolarının Oluşturulması

Bunun için üretilen senaryoların birbirleri arasındaki Öklid uzaklıkları hesaplanmış ve bu uzaklıklara göre en yakın iki senaryo birleştirilmiştir; birleştirilen senaryolardan düşük olasılıklı olanı elenmiş ve olasılığı diğer senaryonun olasılığına eklenmiştir. Bu elemeyi sonra Öklid uzaklıkları güncellenmiş ve aynı işlem tekrar edilmiştir. Bu işlem, elde 10 tane senaryo kalana kadar devam etmiştir. Bu kümeleme sonucunda her biri farklı olasılıkta olan 10 tane senaryo optimizasyon modeline girdi olacak şekilde elde edilmiştir.

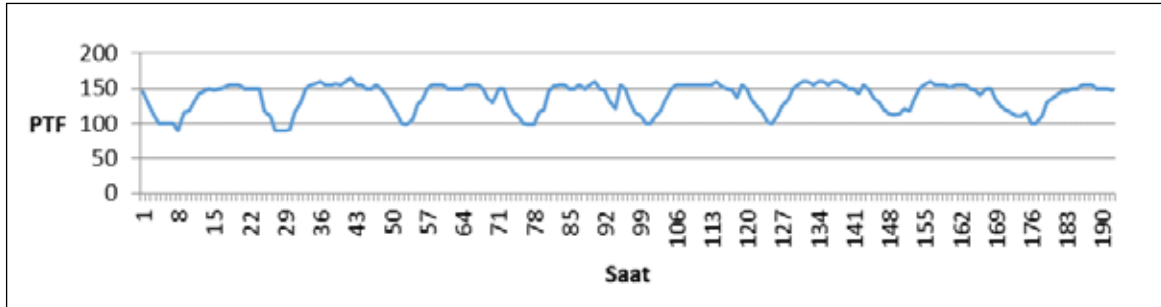
#### 4. FİYAT TAHMİNİ VE FİYAT SENARYOLARININ OLUŞTURULMASI

Elektrik piyasasında artan rekabet ve serbestleşmeyle birlikte, piyasa yapısının katılımcılar için artan belirsizliklerden dolayı daha fazla risk taşıdığı söylenebilir. Yukarıda anlatılan enerji piyasası fiyatlandırma yapısı içinde teklif verme stratejileri ve yatırım kararları

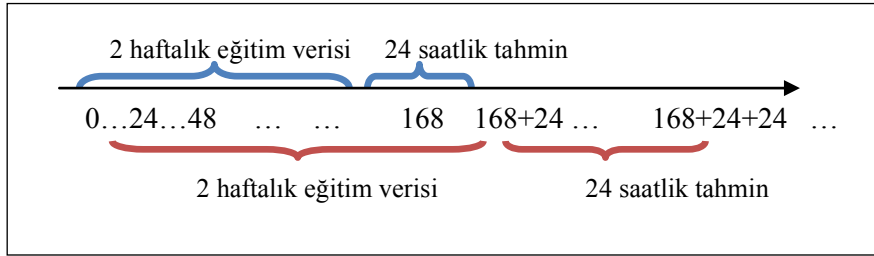
piyasadaki fiyatlara doğrudan bağlıdır. Güvenilir fiyat tahmini yapmak, piyasa katılımcıları için piyasadaki belirsizliği azaltır ve teklif verme sürecinde karar mekanizmasını etkiler. Bu proje kapsamında, yenilenebilir bir yapısı olan rüzgâr enerjisini desteklemek için rüzgâr santrali sahibinin elde edeceği geliri ençoklayan bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu modelin gelirlerinden birisi de fiyat senaryolarıdır.

#### 4.1 Piyasa Takas Fiyatı Tahmini ve Senaryoların Oluşturulması

Geçmiş PTF verileri incelendiğinde bu verilerin 24 saatte bir benzer bir yapı gösterdiği görülmüştür. Veri yapısı tipik bir hafta için Şekil 3'te verilmiştir. Yukarıda PTF'nin arz ve talep kesişimine göre belirlendiği bahsedilmişti. Fiyatların 24 saatlik dilimlerde benzerlik göstermesi, talep verilerinde de benzer bir yapı olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 3. PTF İçin Haftalık Zaman Serisi Grafiği



Şekil 4. Fiyat Tahmini İçin Verilerin Kullanımı

Bu veri yapısı için öz ilişki ve kısmi öz ilişki fonksiyonu (bkz. Ek 1) incelendiğinde, ARIMA(0,1,1) tahmin modelini kullanmanın uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Conejo 2005, piyasa takas fiyatı tahminlerinde benzer bir yaklaşım izlemiştir.). Kullanılan bu model, 2 haftalık eğitim verisinden 1 günlük *PTF* tahmini yapmaktadır (Şekil 4). Bunlar nokta tahminleri olduğu için, çeşitli senaryolar üretmek amacıyla LQR metodunun kullanımı öngörülmüştür. ARIMA modelinden elde edilen *PTF* tahminleriyle gerçekleştirilen değerler LQR'da kullanılarak 24 saatlik aralık tahminleri yapılmıştır.

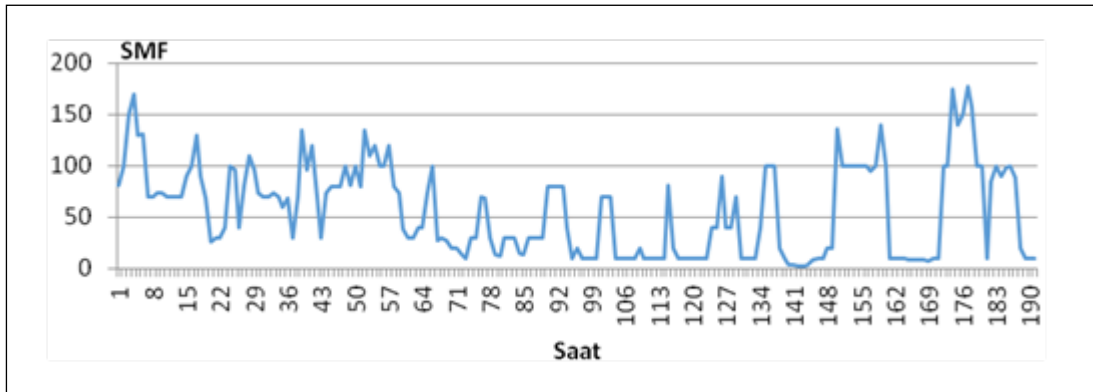
Üretim senaryolarının oluşturulmasında ve azaltılmasında kullanılan aynı yaklaşım *PTF* senaryolarının oluşturulmasında da kullanılmış, sonuç olarak olasılıkları birbirinden farklı 10 tane *PTF* senaryosu elde edilmiştir (bkz. Ek 2).

ARIMA ile LQR modellerinin bu şekilde birleştirilmesi, fiyat tahmin çalışmalarına ilgili yazında yeni bir uygulamadır. Elde edilen tahmin sonuçları, bu uygulamanın başarılı olduğunu göstermektedir (bkz. Ek 3).

#### 4.2 Sistem Marjinal Fiyatı Tahmini ve Senaryoların Oluşturulması

*PTF* verilerinin aksine *SMF* verilerinde tekrarlanan bir yapıya rastlanmamıştır. Tipik bir haftalık *SMF* verisinin zaman serisi grafiği Şekil 5'te gösterilmiştir. Bilindiği üzere *SMF* arz ve talep arasında oluşan dengesizlikten ortaya çıkan fiyattır ve bu dengesizliğin birçok nedeni vardır. En olası örneklerden biri olan termik santral arızası veya planlı olmayan bir bakım durumu arz tarafında taahhüt edilen miktarın altında kalmaya yol açar. Bu gibi etmenler düşünüldüğünde *SMF*'nin tahmin modelinin geliştirilmesi daha zordur.

*SMF* veri oluşumunda doğrudan olmasa da gün öncesinde oluşan *PTF* verilerinin etkili olduğu bilinmektedir. Bu bilgiden yola çıkarak *SMF* tahmininde, girdi ve çıktı arasında karmaşık ilişkiler olduğunda kullanılması tercih edilen yapay sinir ağlarının kullanılması uygun görülmüştür (Catalão 2007 ve Ghodsi 2012, benzer bir yaklaşım izlemiştir.). Ancak elde edilen modellerin başarımı istenilen düzeyde olmamıştır (bkz. Ek 3).



Şekil 5. *SMF* İçin Haftalık Zaman Serisi Grafiği

Önceden elde edilen *PTF* senaryoları, *SMF* Yapay Sınır Ağı modelinde girdi olarak kullanılarak her *PTF* değeri için aynı olasılıkta bir *SMF* senaryosu oluşturulmuştur. Oluşturulan *PTF* ve *SMF* senaryoları ve onlara karşılık gelen olasılıklar, üretim teklifi optimizasyon modelinin girdileri olarak kullanılmıştır.

## 5. ÜRETİM TEKLİFİNİN BELİRLENMESİ İÇİN ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Varkani vd. (2009), rüzgâr enerjisinden elde edilecek beklenen geliri ençoklamak için bir Karışık Tamsayılı Programlama modeli oluşturmuşlardır. Fakat bu modelde sadece üretim senaryoları kullanılmıştır. Modelin bir diğer olumsuz yanı ise amaç fonksiyonunun doğrusal olmamasıdır; amaç fonksiyonunda toplanan terimlerin bir kısmı reel ve ikili değişkenlerin çarpımından oluşmaktadır.

Bu projede, yukarıda değinilen yaklaşımdan yararlanılarak hem üretim hem de fiyat senaryolarının girdi olarak kullanıldığı yeni bir model geliştirilmiştir. Önerilen modelde üretim ve fiyat senaryolarını dikkate alarak, beklenen geliri ençoklayan üretim teklifinin elde edilmesi hedeflenmiştir (Model Ek 4'te verilmiştir.). Özetle, Varkani vd. (2009) tarafından önerilen model aşağıdaki biçimde geliştirilmiştir.

- Fiyat tahmininin beklenen gelir üzerindeki etkisi düşünülerek önerilen modele fiyat senaryoları entegre edilmiştir.
- Amaç fonksiyonu ikili değişkenlerden arındırılarak doğrusal hâle getirilmiştir.
- Önerilen model ile her saat için santralin piyasaya

vermesi gereken üretim tekliflerine ve bu tekliflerin sonucunda elde edilecek gelirin beklenen değerine ulaşılabilmektedir.

Tipik üç santral için bu çalışmada önerilen matematiksel modele göre verilen üretim tekliflerinin ve üretim tahmin modelleri sonucunda elde edilen 50. yüzdellik değerlerinin, test edilen Şubat ayı için santral sahiplerine mevcut durumdan (TÜBİTAK-MAM tahmininden) ne kadar fazla/az gelir getirebileceği Tablo 2'de gösterilmiştir. Mevcut durumda nokta tahmini elde edildiği için, karşılaştırma yapabilmek amacıyla üretim tahmin modeli sonuçlarından 50. yüzdellik değerler seçilmiştir. Bu şekilde önerilen matematiksel modelin, üretim tahmin modelinin ve mevcut durumun karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 2'de verilen yüzdellik gelişmeler, enerji piyasasındaki gelirlerde büyük etki yaratabilecek niteliktedir. Bu çalışmada önerilen yaklaşım sonucunda ilgili santrallerin gelirlerindeki değişimler, sırasıyla 44.571, 8.060 ve 12.718 TL olmuştur. Diğer santraller henüz test edilme aşamasındadır. Önerilen model Santral B'de daha fazla gelir sağlarken aynı etkinin diğer santrallerde görülmemesinin sebebi *SMF* tahmininin, rüzgâr gücü ve *PTF* tahminleri kadar etkili yapılamaması olarak görülmüştür. İlk kısımda açıklandığı gibi *PTF* ve *SMF*'den hangisinin yüksek olacağını, yani fiyatın yönünü bilmek maksimum gelire ulaşmak için yeterlidir. Santral A'da gün bazında yapılan incelemede, fiyatının yönünün %70 ve üzeri oranda doğru tahmin edildiği günlerde, önerilen modelin çok daha fazla gelişme kazandırdığı görülmüştür.

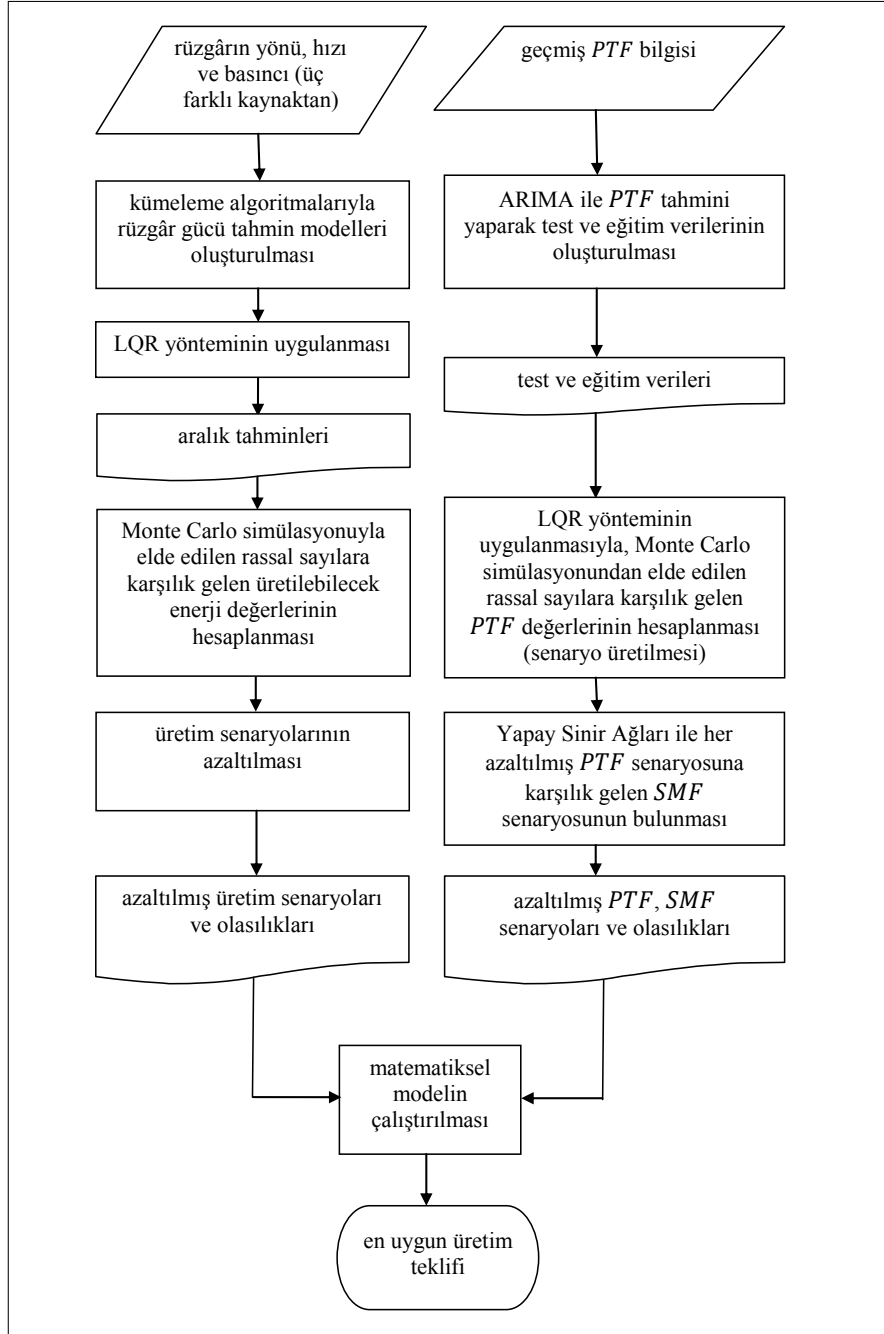
**Tablo 2.** Mevcut Sistemin Önerilen Tahmin ve Teklif Sistemiyle Karşılaştırılması

		Önerilen Sistem	Teklif: 50. yüzdellik değer	Teklif: TÜBİTAK-MAM tahmini
Santral A	Gelir (TL)	2.665.384,7	2.682.421,4	2.637.850,2
	Gelişme (%)	<b>1,04</b>	<b>1,69</b>	
Santral B	Gelir (TL)	452.320,3	447.241,5	439.181,4
	Gelişme (%)	<b>2,99</b>	<b>1,84</b>	
Santral C	Gelir (TL)	1.684.457,4	1.698.100	1.685.381,3
	Gelişme (%)	<b>-0,05</b>	<b>0,76</b>	

## 6. TASARLANAN KARAR DESTEK SİSTEMİ VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, rüzgâr gücü tahmini için dinamik kümeleme ve LQR'a dayalı etkili bir aralık tahmini yöntemi önerilmektedir. Ayrıca elektrik enerjisi fiyat

tahminleri de ARIMA ve yapay sinir ağı yöntemleriyle yapılmıştır. RES'lerin en uygun rüzgâr gücü üretim teklifini verebilmesi için bu tahmin modellerinden geliştirilen senaryolara dayalı bir matematiksel model de önerilmiştir. Uygulanan yöntemlerin kullanımını



Şekil 6. Önerilen Karar Destek Sistemi



gösteren akış şeması Şekil 6'da verilmiştir. Bu akış şeması, bu projede tasarlanan karar destek sisteminin çerçevesini çizmektedir.

Bu tahmin ve teklif yaklaşımı, RES'lerin gelirlerini artırmak ve dolayısıyla rüzgâr enerjisi üretim yatırımlarını teşvik etmek bakımından önem taşımaktadır. Çalışmanın destekleyicisi olan TÜBİTAK MAM yetkilileri geliştirilen yöntemlerin tahminlerin başarımını artırdığını ve daha uygun üretim tekliflerinin verilmesi için önemli bir altyapı oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Bundan sonra yapılacak çalışmalar kapsamında, sistemin en uygun teklifi vermesini sağlamak amacıyla, SMF tahminlerinin daha iyi yapılabilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir. Mevcut durumda modeller Matlab dilinde kodlanmıştır. Ancak bunların TÜBİTAK MAM gibi uygulayıcı kuruluşlarda hacimli veriler üzerinde hızlı sonuç verebilmesi için C++ ve CPLEX gibi uygun dillerde programlanması yararlı olacaktır.

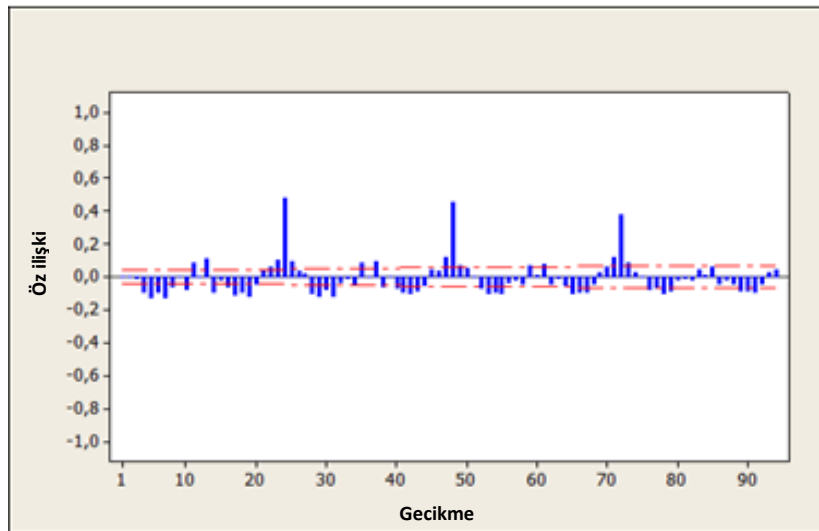
### KAYNAKÇA

1. Brand, H., Thorin, E., Weber, C. 2002. "Scenario Reduction Algorithm and Creation of Multi-Stage Scenario Trees," OSCOGEN, 7, 1-15.
2. Bremnes, J.B. 2004. "A Probabilistic Wind Power Forecasts Using Local Quantile Regression," Wind Energy, 9, 47-54.
3. Bremnes, J.B. 2006. "A Comparison of a Few Statistical Models for Making Quantile Wind Power Forecasts," Wind Energy, 9(1-2), 3-11.
4. Catalão, J. P. S., Mariano, S. J. P. S., Mendes, V. M. F., Ferreira, L. A. F. M. 2007. "An Artificial Neural Network Approach for Short-Term Electricity Prices Forecasting," Intelligent Systems Applications to Power Systems, 3, 1-6.
5. Conejo, A.J. 2005. "Day-ahead Electricity Price Forecasting Using the Wavelet Transform and ARIMA Models," Power Systems, IEEE Transactions, 1035-1042.
6. Ghodsi, R. 2012. "Forecasting Short Term Electricity Price Using Artificial Neural Network and Fuzzy Regression," International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, 2, 1-8.
7. Oates, T., Firoiu, L., Cohen, P.R. 1999. "Clustering Time Series with Hidden Markov Models and Dynamic Time Warping," Proceedings of the IJCAI-99 Workshop on Neural, Symbolic and Reinforcement Learning Methods for Sequence Learning, 17-21.
8. Varkani, A. K., Monsef, H., Baghaee, H.R. 2009. "Strategy for Participation of Wind Power in Power Market Considering the Uncertainty in Production," International Review of Electrical Engineering (IREE), 4(5), 1005-1014.
9. Bandırma Rüzgâr Enerjisi Santrali Güç Üretimi ve Tahmini. [http://www.ritm.gov.tr/guc/ritmik\\_tr.html](http://www.ritm.gov.tr/guc/ritmik_tr.html). Son erişim tarihi: 30 Aralık 2013.

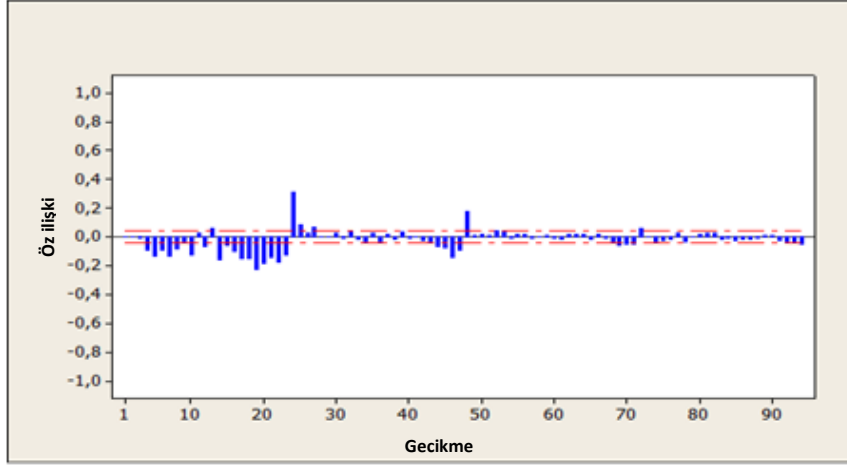
### EKLER

**Ek 1.** Piyasa Takas Fiyatı Verilerinin Öz İlişki Grafikleri

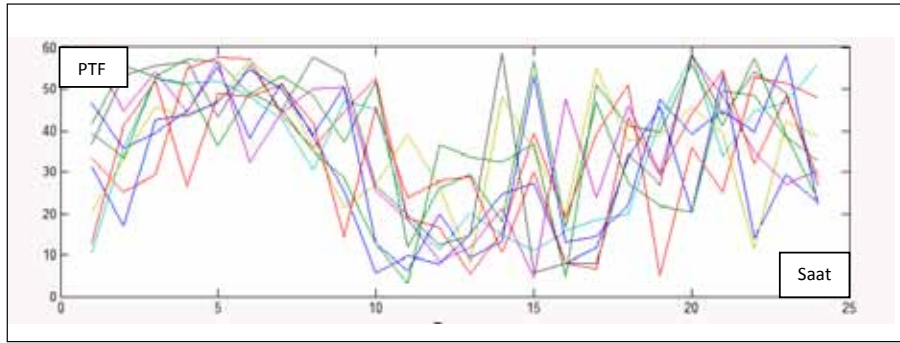
a) PTF İçin Artık Değerlerin Öz İlişki Fonksiyonu (Anlamlılık Sınırı: %5)



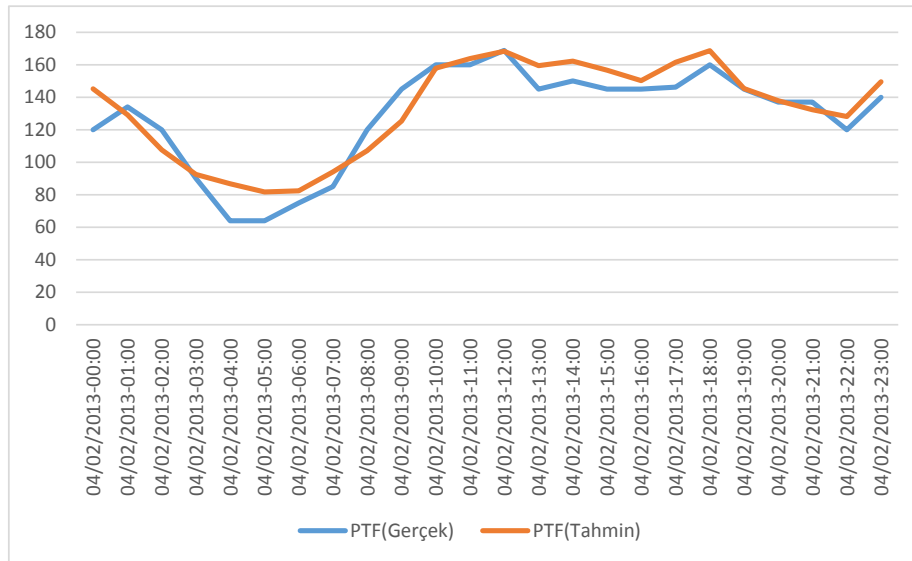
b) PTF İçin Artık Değerlerin Kısmi Öz İlişki Fonksiyonu (Anlamlılık Sınırı: %5)



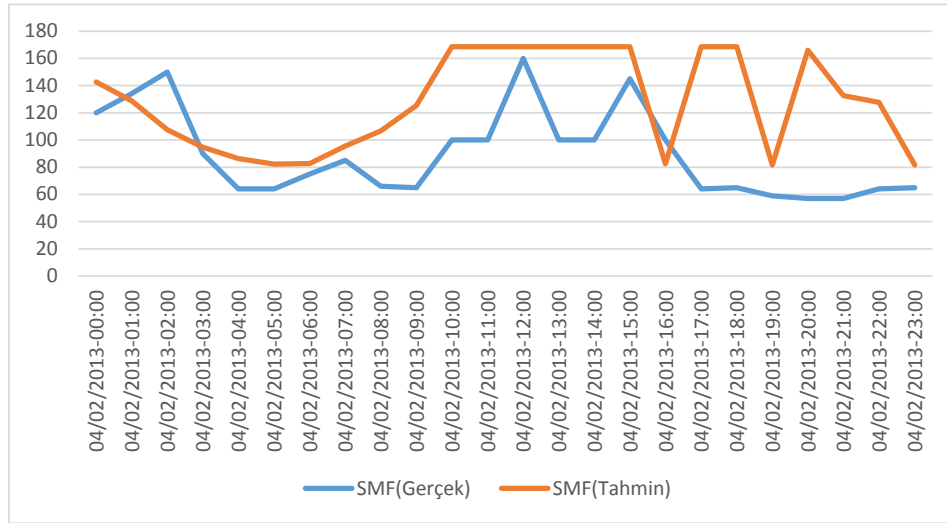
Ek 2. İndirgenmiş PTF Senaryoları



Ek 3. PTF ve SMF Tahminleri



Yukarıdaki örnek grafikte görüldüğü gibi tahmin edilen fiyat gerçekleşen fiyatı çok iyi takip etmektedir. Bu örnekte Şubat ayı için hesaplanan ortalama mutlak hata 18,48 TL'dir.



Yukarıdaki örnek grafikte görüldüğü gibi tahmin edilen fiyat ile gerçekleşen fiyat arasında büyük farklar gözükmemektedir. Bu örnekte Şubat ayı için hesaplanan ortalama mutlak hata 44,21 TL'dir.

#### Ek 4. Önerilen Matematiksel Model

Önerilen Karışık Tamsayı Programlama modelinde kullanılan parametreler aşağıda verilmektedir.  $k$  endeksi, gün içindeki  $k$ 'inci saati göstermektedir.

$C$  : rüzgâr santralının saatlik kapasitesi.

$p_i$  :  $i$  numaralı üretim senaryosunun gerçekleşme olasılığı,  $i = 1, \dots, 10$ .

$f_j$  :  $j$  numaralı fiyat senaryosunun gerçekleşme olasılığı,  $j = 1, \dots, 10$ .

$U_{ik}$  :  $i$  numaralı üretim senaryosu için  $k$ 'inci saatteki olası üretim miktarı,  
 $i = 1, \dots, 10$  ve  $k = 1, \dots, 24$ .

$PTF_{jk}$  :  $j$  numaralı fiyat senaryosu için  $k$ 'inci saatteki olası  $PTF$  değeri,  
 $j = 1, \dots, 10$  ve  $k = 1, \dots, 24$ .

$SMF_{jk}$  :  $j$  numaralı fiyat senaryosu için  $k$ 'inci saatteki olası  $SMF$  değeri,  
 $j = 1, \dots, 10$  ve  $k = 1, \dots, 24$ .

$M$  : büyük bir sayısal değer.

$\alpha_{jk} = \min\{PTF_{jk}, SMF_{jk}\}$  : ödül mekanizması için birim fiyat,  $j = 1, \dots, 10$ ,  $k = 1, \dots, 24$ .

$\beta_{jk} = \max\{PTF_{jk}, SMF_{jk}\}$  : ceza mekanizması için birim fiyat,  $j = 1, \dots, 10$ ,  $k = 1, \dots, 24$ .

Modelde kullanılan karar değişkenleri aşağıda sıralanmaktadır.

$T_k$  :  $k$ 'inci saat için piyasaya verilen üretim teklifi,  $k = 1, \dots, 24$ .

$$b_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } T_k \leq U_{ik} \text{ ise,} \\ 0 & \text{eğer } T_k > U_{ik} \text{ ise,} \end{cases} \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24.$$

$$Z_{ik} = \begin{cases} U_{ik} - T_k & \text{eğer } T_k \leq U_{ik} \text{ ise,} \\ 0 & \text{eğer } T_k > U_{ik} \text{ ise,} \end{cases} \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24.$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} T_k - U_{ik} & \text{eğer } T_k > U_{ik} \text{ ise,} \\ 0 & \text{eğer } T_k \leq U_{ik} \text{ ise,} \end{cases} \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24.$$

Önerilen matematiksel model aşağıda verilmektedir.

$$\text{Maks } \left\{ \sum_{j=1}^{10} f_j \sum_{k=1}^{24} PTF_{jk} T_k + \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} p_i f_j \sum_{k=1}^{24} \alpha_{jk} Z_{ik} - \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} p_i f_j \sum_{k=1}^{24} \beta_{jk} Y_{ik} \right\}$$

$$0 \leq T_k \leq C \quad k = 1, \dots, 24,$$

$$U_{ik} - T_k \leq Z_{ik} - Y_{ik} \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24,$$

$$Z_{ik} \leq M b_{ik} \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24,$$

$$Y_{ik} \leq M(1 - b_{ik}) \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24,$$

$$T_k \geq 0 \quad k = 1, \dots, 24,$$

$$Z_{ik} \geq 0 \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24,$$

$$Y_{ik} \geq 0 \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24,$$

$$b_{ik} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, 10 \text{ ve } k = 1, \dots, 24 \}.$$