



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İktisat Anabilim Dalı

**TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT OLUŞUMUNUN
ANALİZİ VE FİYAT TAHMİN MODELLERİ**

Fatih KÖLMEK

Doktora Tezi

Ankara, 2016

TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT OLUŞUMUNUN ANALİZİ VE
FİYAT TAHMİN MODELLERİ

Fatih KÖLMEK

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

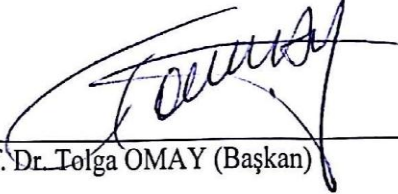
İktisat Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Ankara, 2016

KABUL VE ONAY

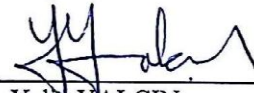
Fatih KÖLMEK tarafından hazırlanan “Türkiye Elektrik Piyasasında Fiyat Oluşumunun Analizi ve Fiyat Tahmin Modelleri” başlıklı bu çalışma, 12 Temmuz 2016 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Tolga OMAY (Başkan)


Doç. Dr. Bahar Bayraktar SAĞLAM (Danışman)


Doç. Dr. Özgür TEOMAN


Doç. Dr. A. Yasemin YALTA


Doç. Dr. Yeliz YALÇIN

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sibel BOZBEYOĞLU

Enstitü Müdürü

BİLDİRİM

Hazırladığım tezin/raporun tamamen kendi çalışmam olduğunu ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt eder, tezimin/raporumun kağıt ve elektronik kopyalarının Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü arşivlerinde aşağıda belirttiğim koşullarda saklanmasına izin verdiğimi onaylarım:

- ☒ Tezimin/Raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir.
- ☐ Tezim/Raporum sadece Hacettepe Üniversitesi yerleşkelerinden erişime açılabilir.
- ☐ Tezimin/Raporumun yıl süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir.

18 Temmuz 2016



Fatih KÖLMEK

TEŞEKKÜR

Bugünlere gelmemdeki en büyük pay sahipleri olan anneme ve babama gösterdikleri eşsiz sevgi, ilgi, emek ve destek için teşekkür ederim. Tüm bunların haricinde bana ve kardeşlerime aşılamış oldukları öğrenme aşkı ve çalışma motivasyonu için kendilerine ayrıca müteşekkirim. Sevgili kardeşlerime de kıymetli dostlukları ve destekleri için teşekkür etmeyi ayrıca bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım boyunca gösterdikleri yakın ilgi, anlayış, yönlendirme ve destek için danışmanım Doç. Dr. Bahar Bayraktar SAĞLAM'a, Doç. Dr. Özgür TEOMAN'a ve Prof. Dr. Tolga OMAY'a ve bu çalışmaya sağladıkları katkı için jüri üyeleri Doç. Dr. A. Yasemin YALTA ile Doç. Dr. Yeliz YALÇIN'a çok teşekkür ederim.

Bölümdeki ilk danışmanım olan Prof. Dr. Mübariz HASANOV'a doktora çalışmalarım boyunca gösterdiği ilgi ve destek için müteşekkirim. Ayrıca, doktora çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Hayatıma girdiği ilk günden beri tarifi imkansız bir sevgi ve ilgi ile hep yanımda olan ve yürüttüğüm çalışmalarda beni sürekli olarak cesaretlendirerek destekleyen sevgili eşime ve sıcacık sevgileri ile hayatımı renklendiren çocuklarıma teşekkür ederim.

ÖZET

KÖLMEK, Fatih. Türkiye Elektrik Piyasasında Fiyat Oluşumunun Analizi ve Fiyat Tahmin Modelleri, Doktora Tezi, Ankara, 2016.

Dünya genelinde elektrik piyasalarında yaşanan serbestleşme ile birlikte, büyük ölçeklerde depolanması mümkün olmayan ve üretildiği anda tüketilmesi gereken elektrik enerjisinin alınıp satıldığı piyasalar rekabete açılmıştır. Bu serbestleşme hareketinin bir sonucu olarak, günümüzdeki gelişmiş elektrik piyasalarında olduğu gibi, tamamen arz-talep dengesine göre gün içerisindeki farklı zamanlarda farklı seviyelerde belirlenen fiyatlar söz konusu olmuştur. Fiyatlarda ortaya çıkan bu oynaklık, bir yandan piyasada faaliyet gösteren oyuncular başta olmak üzere ilgili tarafları ileriye dönük güvenilir fiyat tahmine sahip olmaya, diğer yandan ise araştırmacıları bu alanda çalışma yapmaya itmiştir.

Bu tez, 2001 yılından itibaren köklü bir dönüşüm ve serbestleşme içerisine girmiş olan Türkiye elektrik sektöründeki gün öncesi piyasası için saatlik fiyat tahmini modelleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, öncelikle elektrik piyasanın işleyişi ve fiyat oluşum mekanizması incelenmiş, sonrasında ise gün öncesi elektrik piyasasındaki saatlik fiyatlar olan Piyasa Takas Fiyatlarının (PTF) tahminine yönelik olarak yapay sinir ağlarına ve ekonometrik yaklaşıma dayalı modeller geliştirilmiştir. Ayrıca, fiyat oluşumu üzerinde belirleyici olduğu düşünülen farklı parametrelerin fiyat tahmininin başarısı üzerindeki etkisi de ele alınmıştır. Diğer taraftan, saatlik elektrik fiyatlarının tahmininde büyük bir zorluk olarak karşılaşılan gün içerisindeki aşırı oynaklığın ele alınabilmesi için Dalgacık Dönüşümü kullanılmış ve PTF'nin bu yöntem ile ayrıştırılarak modellenmesi durumunda tahmin başarısının arttığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Sözcükler

Elektrik piyasası, Fiyat oluşumu, Fiyat tahmini, Ekonometrik modelleme, Yapay sinir ağı, Dalgacık dönüşümü, Hibrit model

ABSTRACT

KÖLMEK, Fatih. Analysis of Price Formation in Turkish Electricity Market and Price Forecasting Models, Ph. D. Dissertation, Ankara, 2016.

Although large-scale storage of electricity is not possible and electricity has to be consumed in real-time, electricity markets became open to competition in parallel with the liberalization of the electricity markets worldwide. As a result of this liberalization movement, price of electricity started to be determined completely by the supply-demand balance, reaching different levels for different times throughout the day. The volatility of the prices has led the relevant parties (especially the market players) to have reliable price forecasts for future and the researchers to make studies in this field.

This thesis aims to develop hourly price forecasting models for the day-ahead electricity market of the Turkish electricity industry, which has undergone a dramatic transformation and liberalization beginning from 2001. In this context, first operation of the electricity market and the price formation mechanism is investigated, and then different models based on artificial neural networks (ANN) and econometric approach are developed towards forecasting the Market Clearing Prices (MCP) that are the hourly prices in the day-ahead electricity market. Besides, different parameters considered to be determinant in the price formation are discussed with regard to their effects on the success of price forecast are discussed. On the other hand, in order to address the significant challenge of extreme volatility encountered in forecasting hourly electricity prices, Wavelet Transformation is utilized and it is shown that modelling the decomposed components of MCP improves the success of the forecasts.

Keywords

Electricity market, Price formation, Price forecasting, Econometric modelling, Artificial Neural Network, Wavelet transformation, Hybrid model

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
BİLDİRİM	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
GİRİŞ	1
1. BÖLÜM: ELEKTRİK PİYASASININ İŞLEYİŞİ.....	4
1.1. ELEKTRİK PİYASALARININ YAPISI.....	4
1.1.1. Merkezi Piyasalar (Havuz Modeli).....	8
1.1.2. Merkezi Olmayan Piyasalar (İkili Anlaşmalar Modeli)	10
1.2. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI.....	11
1.3. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT OLUŞUMU.....	14
1.3.1. Gün Öncesi Piyasasında Fiyat Oluşumu.....	14
1.3.2. Gün İçi Piyasasında Fiyat Oluşumu	15
1.3.3. Dengeleme Güç Piyasasında Fiyat Oluşumu.....	15
1.3.4. Gün Öncesi Piyasasında Fiyat Oluşumunun Detayları.....	16
1.3.4.1 Gün Öncesi Piyasasında Sunulan Teklifler.....	17
1.3.4.2 Gün Öncesi Piyasasında Sunulan Tekliflerin Değerlendirilmesi.....	18
2. BÖLÜM: LİTERATÜRDEKİ ELEKTRİK FİYATI TAHMİNİ	
ÇALIŞMALARI.....	20
2.1. ELEKTRİK FİYATI TAHMİNİNİN ÖNEMİ.....	20
2.2. ELEKTRİK FİYATI TAHMİNİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR	22
2.3. TÜRKİYE’DEKİ GÜN ÖNCESİ ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT	
TAHMİNİNE YÖNELİK ÇALIŞMALARI	29
2.4. TEZ ÇALIŞMASININ KATKISI	32
3. BÖLÜM: FİYAT TAHMİN MODELLERİNİN ALTYAPISI.....	35

3.1. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	35
3.1.1. Yapay Sinir Ağı Türleri	41
3.1.1.1 Tiplerine Göre Yapay Sinir Ağları.....	41
3.1.1.2 Öğrenme Yöntemine Göre Yapay Sinir Ağları.....	42
3.1.1.2.1. Öğretmenli (Supervised) Öğrenme.....	42
3.1.1.2.2. Öğretmensiz (Unsupervised) Öğrenme	43
3.1.1.2.3. Destekleyici (Reinforcement) Öğrenme.....	43
3.1.1.3 Yapısına Göre Yapay Sinir Ağları	43
3.1.1.4 Katman Sayısına Göre Yapay Sinir Ağları	44
3.1.2. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme	44
3.2. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ	47
3.2.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümü	53
3.2.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD).....	55
4. BÖLÜM: TÜRKİYE GÜN ÖNCESİ ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT	
TAHMİNİ	60
4.1. MODELDE KULLANILAN FİYATLAR.....	60
4.2. YAPAY SİNİR AĞI MODELİ	63
4.2.1. Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçları	66
4.2.2. Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçlarının Analizi	70
4.3. AYRIK DALGACIK DÖNÜŞÜMLÜ YAPAY SİNİR AĞI MODELİ.....	71
4.3.1. Ayrık Dalgacık Dönüşümlü Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçları.....	75
4.3.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümlü Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçlarının Analizi	80
4.4. DIŞSAL DEĞİŞKENLERİN TAHMİNLERE ETKİSİ.....	81
4.4.1. Tüketim Girdisinin Tahminlere Etkisi	82
4.4.2. İkili Anlaşma Girdisinin Tahminlere Etkisi.....	82
4.4.3. YEKDEM Portföyü Üretimi Girdisinin Tahminlere Etkisi.....	83
4.4.4. Toplam Alış Miktarı Girdisinin Tahminlere Etkisi	83
4.4.5. Toplam Satış Miktarı Girdisinin Tahminlere Etkisi	84
4.4.6. Gün Bilgisi Girdisinin Tahminlere Etkisi	85
4.4.7. Saat Bilgisi Girdisinin Tahminlere Etkisi	85
4.5. YSA MODELLERİNİN SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	86
4.6. EKONOMETRİK MODEL	88

4.7. HİBRİT MODEL	92
4.8.TAHMİN MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	96
SONUÇ.....	99
KAYNAKÇA	103
EKLER.....	109
EK-1: YAPAY SİNİR AĞLARINDA ÖĞRENME	109
EK-2: ETİK KURUL İZNİ	113
EK-3: ORJİNALLİK RAPORU	114



KISALTMALAR DİZİNİ

ADD	Ayrık Dalgacık Dönüşümü
AKD	Ayrık Kosinüs Dönüşümü
DGP	Dengeleme Güç Piyasası
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPİAŞ	Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GÖP	Gün Öncesi Piyasası
HOMHY	Haftalık Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi
İHD	İşletme Hakkı Devri
KPTF	Kısıtsız Piyasa Takas Fiyatı
NPTF	Nihai Piyasa Takas Fiyatı
OMHY	Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi
PTF	Piyasa Takas Fiyatı
SGÖF	Sistem Gün Öncesi Fiyatı
SDD	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Şirketi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEK	Türkiye Elektrik Kurumu
TETAŞ	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
TADD	Ters Ayrık Dalgacık Dönüşümü
TSSD	Ters Sürekli Dalgacık Dönüşümü
YAL	Yük Alma Talimatı
YAT	Yük Atma Talimatı
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destek Mekanizması
Yİ	Yap-İşlet
YİD	Yap-İşlet-Devret
YSA	Yapay Sinir Ağı

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1: Birleştirme fonksiyonu türleri.....	37
Tablo 2: Aktivasyon fonksiyonu türleri	38
Tablo 3: YSA modelinin girdileri ve çıktısı.....	64
Tablo 4: YSA modelinin performans incelemesinde seçilen aylar	65
Tablo 5: YSA modelinin girdileri ve çıktısı.....	66
Tablo 6: Mayıs 2014’e ait YSA tahmin modeli sonuçları	66
Tablo 7: Mayıs 2014’e ait YSA tahmin modeli sonuçları	67
Tablo 8: Eylül 2014’e ait YSA tahmin modeli sonuçları.....	68
Tablo 9: Aralık 2014’e ait YSA tahmin modeli sonuçları	69
Tablo 10: Mayıs 2014’e ait ADD’li YSA tahmin modeli sonuçları	76
Tablo 11: Mayıs 2014’e ait ADD’li YSA tahmin modeli sonuçları	77
Tablo 12: Eylül 2014’e ait ADD’li YSA tahmin modeli sonuçları	78
Tablo 13: Aralık 2014’e ait ADD’li YSA tahmin modeli sonuçları	79
Tablo 14: Yalın YSA ve ADD’li YSA tahmin modellerinin sonuçları	81
Tablo 15: Talep Tahmini girdisinin tahminlere etkisi.....	82
Tablo 16: İkili Anlaşma girdisinin tahminlere etkisi.....	83
Tablo 17: YEKDEM portföyü üretim tahmini girdisinin tahminlere etkisi.....	83
Tablo 18: Toplam Alış Teklifi girdisinin tahminlere etkisi	84
Tablo 19: Toplam Satış Teklifi girdisinin tahminlere etkisi	84
Tablo 20: Gün Bilgisi girdisinin tahminlere etkisi.....	85
Tablo 21: Saat Bilgisi girdisinin tahminlere etkisi.....	86
Tablo 22: Tahmin Modellerinin hata performanslarının karşılaştırılması	86
Tablo 23: 2014 PTF serisi için ADF Testi sonuçları	88
Tablo 24: Aralık 2014 PTF’lerine ait AR modelinin katsayıları	90
Tablo 25: Aralık 2014 PTF’lerine ait AR-ARCH modelinin katsayıları	91
Tablo 26: AR-ARCH tipindeki PTF modelinin ARCH-LM testi sonuçları	91
Tablo 27: Aralık 2014’e ait ekonometrik modellerin sonuçları.....	91
Tablo 28: 2014 PTF serisinin detay bileşeni için ADF Testi sonuçları	93
Tablo 29: Aralık 2014 için hesaplanan AR modelinin katsayıları	94
Tablo 30: AR-GARCH tipindeki PTF detay bileşen modelinin ARCH-LM testi sonuçları	95
Tablo 31: Aralık 2014 PTF detay bileşenine ait GARCH modelinin katsayıları	95
Tablo 32: Aralık 2014 PTF’lerine ait karşılaştırmalı hata ortalamaları	96
Tablo 33: Aralık 2014 için PTF tahmin modellerinin karşılaştırması	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1: Tekelci Piyasa Modeli	4
Şekil 2: Serbest (Toptan Satış) Elektrik Piyasası Modeli	6
Şekil 3: Serbest (Toptan ve Perakende Satış) Elektrik Piyasası Modeli	7
Şekil 4: Tek (solda) ve Çift (sağda) Taraflı Havuzlarda Fiyat Oluşumu.....	9
Şekil 5: EPIAŞ'ın ortaklık yapısı	12
Şekil 6: Türkiye Elektrik Piyasasının Yapısı.....	13
Şekil 7: Sinir hücresinin yapısı	35
Şekil 8: Yapay sinir hücresinin gösterimi.....	36
Şekil 9: Sigmoid fonksiyonları	38
Şekil 10: YSA türleri	41
Şekil 11: Çok Katmanlı YSA	44
Şekil 12: YSA'nın öğrenme sürecinde hatanın gelişimi ve ağırlıklar	46
Şekil 13: Farklı dalgacık fonksiyonları (a), konumlandırma (b), ölçeklendirme (c)	48
Şekil 14: Dalgacık dönüşümünün şematik gösterimi	49
Şekil 15: Dalgacık fonksiyonları	51
Şekil 16: Dalgacık dönüşümü örneği.....	52
Şekil 17: Ayrık Dalgacık Dönüşümü akış şeması	57
Şekil 18: Orijinal işaret ile Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile elde edilen bileşenler.....	59
Şekil 19: 2014 yılı Ocak ayına ait saatlik PTF değerleri	60
Şekil 20: 2014 yılı saatlik PTF değerleri	61
Şekil 21: 2014 yılı PTF serisinin otokorelasyonu	63
Şekil 22: Mayıs 2014'e ait gerçek ve YSA tahmini PTF değerleri	67
Şekil 23: Temmuz 2014'e ait gerçek ve YSA tahmini PTF değerleri	68
Şekil 24: Eylül 2014'e ait gerçek ve YSA ile tahmini PTF değerleri	69
Şekil 25: Aralık 2014'e ait gerçek ve YSA tahmini PTF değerleri	70
Şekil 26: Daubechies4 dalgacığına ait (a) ölçek ve (b) dalgacık fonksiyonları	71
Şekil 27: 2014 yılı PTF değerlerine ait yaklaşık ve detay bileşenler	72
Şekil 28: 2014 yılı PTF, yaklaşık bileşen ve detay bileşenler toplamı değerleri.....	73
Şekil 29: 2014 PTF'leri ile yaklaşık ve detay bileşenler toplamı arasındaki fark	74
Şekil 30: Dalgacık dönüşümlü PTF tahminine ait süreç akış şeması	75
Şekil 31: Mayıs 2014'e ait gerçek ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri.....	76
Şekil 32: Temmuz 2014'e ait gerçek ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri.....	77
Şekil 33: Eylül 2014'e ait gerçek PTF ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri	79
Şekil 34: Aralık 2014'e ait gerçek PTF ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri.....	80
Şekil 35: 2014 PTF serisi için korelasyon değerleri.....	89
Şekil 36: AR tipindeki PTF modelinin hata terimleri.....	90
Şekil 37: 2014 PTF serisinin detay bileşeninin otokorelasyonları	92
Şekil 38: 2014 PTF serisinin detay bileşeni için korelasyon değerleri.....	93
Şekil 39: AR tipindeki PTF detay bileşen modelinin hata terimleri.....	94
Şekil 40: Hibrit model ile PTF tahminine ait süreç akış şeması.....	95

GİRİŞ

Üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç temel fiziksel bileşene sahip olan elektrik sektörü, gelişen piyasa mekanizmaları ile birlikte günümüzde çok karmaşık bir yapıya bürünmüştür. Her ne kadar diğer birçok mal gibi büyük ölçeklerde depolanarak talebe göre piyasaya arz edilmesinin söz konusu olmaması nedeniyle üretildiği anda tüketilmesi gerekiyor olsa da, bu özellik elektrik enerjisinin serbest piyasa koşulları altında ticarete konu edilmesini engellememiştir. Bu bağlamda birbirinden farklı ve karmaşık yapıda birçok serbest elektrik piyasası bulunsa da, bahsedilen üç temel bileşeni koordine ederek arz-talep dengesini sürekli olarak sağlamakla görevli sistem işletmeciliğinin varlığı süregelenmiştir.

Elektrik sektörünün günümüzdeki yapının aksine serbest piyasa faaliyetine konu edilemediği dönemlere bakıldığında, birer doğal tekel niteliğinde olan iletim ve dağıtım faaliyeti ile birlikte üretim faaliyetini de bünyesinde bulunduran dikey bütünleşik yapıların varlığı göze çarpmaktadır (Hunt, 2002, s.2). Bu dönemler için, sistem işletmecisinin görevinin sadece elektrik sisteminin kararlılığını sağlamak ve bu amaçla bir yük dağıtımı yaparak her bir üretim tesisinin üreteceği elektrik enerjisi miktarını belirleyip arz-talep dengesini korumak olduğu söylenebilir. Aslında başlı başına zor olan bu görev, elektrik sektöründe yaşanan serbestleşme ile birlikte çok farklı bir nitelik kazanmıştır. 1990'lı yıllara doğru elektrik sektöründe görülmeye başlanan (Hunt, 2002, s.19) ve doğalgaz kombine çevrim santrallerinde sağlanan teknolojik gelişme sayesinde hızla devam eden (IEA, 2005, s.31) serbestleşme, sistem işletmeciliğini farklı bir boyuta taşımıştır. Artık dikey bütünleşik yapıların yanı sıra faaliyet gösteren serbest üretim tesislerinin de hesaba katılması ve sistem dengelemesinin rekabetçi bir ortama doğru ilerleyen piyasa koşulları altında yapılması gerekmeğe başlamıştır. Artan serbestleşme daha organize piyasa yapılarını beraberinde getirmiş ve böylelikle fiyat oluşum mekanizmaları ile birlikte piyasa işletmecisinden de artık bahsedilmeye başlanmıştır (Kölmek, 2012).

Günümüzde gelinen noktada elektrik piyasasındaki fiyatlar, arz-talep dengesinin neredeyse tamamen yansıtıldığı dinamik mekanizmalar içerisinde belirlenebilmektedir.

Zira hem arz tarafında hem de talep tarafında yer alan oyuncuların sundukları teklifler; hangi oyuncunun hangi fiyatta ne kadarlık bir hacimde elektrik enerjisi arz/talep edebileceğini belirtmesine, dolayısıyla da fiyata göre değişkenlik gösteren toplam elektrik enerjisi arz ve talep eğrilerinin oluşturulabilmesine imkan tanımaktadır. Ayrıca, fiyatlandırma periyotlarına bakıldığında artık aylık veya günlük fiyatlar yerine saatlik hatta dakikalık fiyatlardan bahsedilebilmektedir. Bunun da ötesinde, gelişmiş piyasalardan olan ABD'deki PJM veya MISO piyasalarındaki gibi konumsal fiyatlandırma yapılabilmekte ve gerçek arz-talep koşullarını yansıtacak şekilde sistem üzerindeki her bir düğüm noktası için farklı fiyatlar oluşabilmektedir.

Bu açıdan bakıldığında; karmaşık bir yapıya sahip olan elektrik piyasasındaki fiyat oluşumu, tüketiciye ulaşan elektrik enerjisinin toplam bedeli üzerinde belirleyici olmanın ötesinde bir öneme sahiptir. Piyasadaki arz-talep dengesine ve sunulan fiyat tekliflerine dayalı olarak oluşan fiyatlar, nihai elektrik enerjisi bedelinin önemli bir bileşeni olmanın yanı sıra, piyasa oyuncuları için hem kısa dönemdeki piyasa davranışları hem de uzun dönemdeki yatırım kararları açısından önemli bir sinyal niteliği taşımaktadırlar. Bu nedenle, piyasadaki fiyat oluşum mekanizması ve bu mekanizma neticesinde ortaya çıkan fiyat düzeyleri serbest bir elektrik piyasasının ne kadar sağlıklı işlediği ve sürdürülebilir olduğu hakkında önemli bilgiler içermektedir. Dolayısıyla, piyasadaki mevcut fiyat düzeyini gözlemlemenin ötesinde ileriki dönemlerde fiyatların ne olacağı hakkında bilgi sahibi olmak, politika belirleyiciler ve düzenleyiciler, piyasadaki oyuncular ve elbette ki tüketiciler açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu noktadan hareketle tez çalışmasında, ülkemizdeki elektrik piyasasında fiyat oluşumu mekanizması incelenmiş, gün öncesi piyasasında saatlik bazda oluşan ve referans fiyat olarak kabul edilen Piyasa Takas Fiyatlarının (PTF) tahminine yönelik olarak tahmin modelleri geliştirilmiştir. Yapılan çalışmanın katkıları; gün öncesi piyasasının gerçek anlamda işletildiği ve günümüze yakın bir dönem olan 2014 yılının çalışılması, fiyat oluşumunda role sahip olan tüketim tahmini, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) portföyü üretimi, toplam alış ve satış teklifleri gibi değişkenlerin de kullanıldığı fiyat modellerin geliştirilmesi ve en önemlisi,

PTF'deki aşırı oynaklığın modellemede ve tahminde neden olduğu zorluğun Dalgacık Dönüşümü kullanılarak oluşturulan farklı türdeki modeller (yapay sinir ağları ve ekonometrik) ile ele alınmasıdır.

Tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci Bölüm'de, elektrik piyasalarının genel yapısı anlatılmakta ve ülkemizdeki elektrik piyasasının işleyişi ile fiyat oluşum süreçleri açıklanmaktadır.

İkinci Bölümde, elektrik piyasasında fiyat tahminine yönelik olarak literatürde yer alan çalışmalar incelenmekte ve tez çalışmasının sağladığı katkı açıklanmaktadır.

Üçüncü Bölüm'de, PTF tahmininde kullanılan, ekonometrik modellerin haricindeki yöntemleri açıklamak amacıyla Yapay Sinir Ağları ve Dalgacık Dönüşümü konuları anlatılmaktadır.

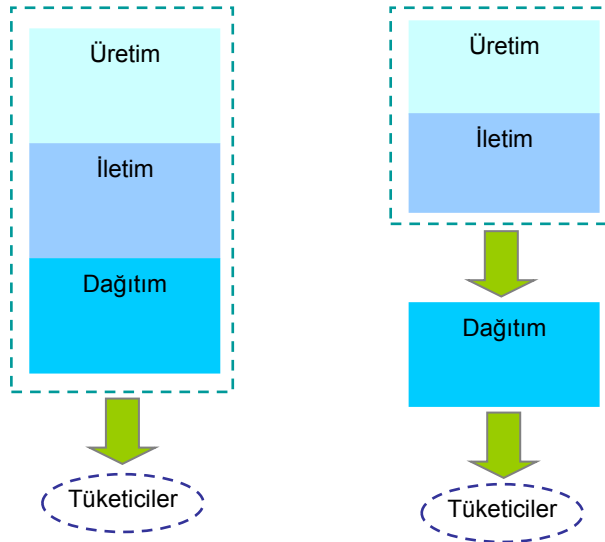
Dördüncü Bölüm'de, PTF tahmini için kurulan modeller neticesinde elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Bu kapsamda, kullanılan tahmin yöntemlerinin saatlik PTF değerlerine nasıl uygulandığı ve ulaşılan sonuçlar, Dalgacık Dönüşümünün tahmin performansında sağladığı iyileşme, ilave değişkenlerin tahminlerin başarısı üzerindeki etkileri ve yapay sinir ağı ile ekonometrik yöntemi harmanlayan hibrit yaklaşımın katkısı ele alınmaktadır.

1. BÖLÜM

ELEKTRİK PİYASASININ İŞLEYİŞİ

1.1. ELEKTRİK PİYASALARININ YAPISI

Ekonominin farklı sektörlerindeki serbestleşme hareketleri ile başarılı sonuçlar elde edilmesini takiben, elektrik piyasaları da benzer bir değişim sürecine girmiştir. Halen devam etmekte olan bu değişim kapsamında, piyasalardaki çoğunlukla dikey bütünleşik niteliğe sahip olan tek el niteliğindeki yapılar ayrılmaya başlamış ve onların yerini serbest piyasa ortamında rekabet eden oyuncular almıştır (Barroso ve diğerleri, 2005). Burada dikey bütünleşik yapıdan kasıt, piyasanın herhangi bir şekilde rekabete açılmadığı ve tüm faaliyetlerin tek bir firma tarafından gerçekleştirildiği piyasa modelidir. Tekelci nitelikteki piyasaların genel yapısı Şekil 1’de gösterilmektedir. Ülkemizde, elektrik piyasasındaki tüm faaliyetlerin Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) tarafından gerçekleştirildiği dönem ile TEK’in Türkiye Elektrik Üretim İletim A.Ş. (TEAŞ) ve Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) olmak üzere ikiye ayrılmış olduğu dönem, birer tek elci piyasa modeli örneğidir.

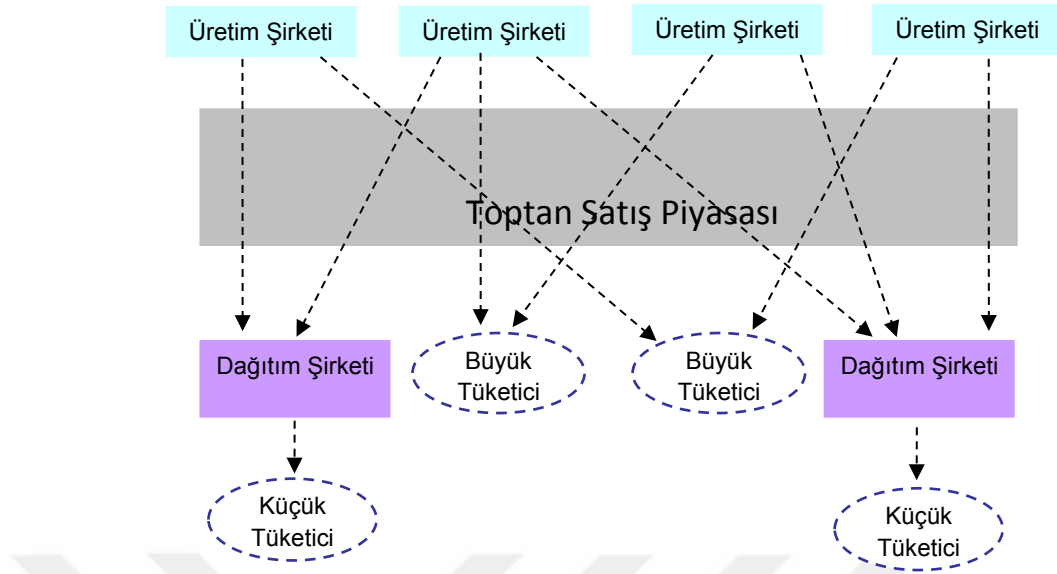


Şekil 1: Tekelci Piyasa Modeli (Hunt, 2002, s. 42)

Rekabetçi piyasa yapısına geçiş sürecinde uygulanmış olan piyasa modelleri artan rekabet düzeylerine göre sıralanacak olursa, tekolci piyasa yapısından sonraki aşama, piyasanın üretim tarafının rekabete açılması ve piyasaya giren üreticilerin ürettikleri elektrik enerjisini uzun süreli anlaşmalar aracılığıyla tekel konumundaki bir alıcıya satmaları üzerine kurulu olan tek alıcılı piyasa modelidir. Serbestleşmeye geçişin ilk aşaması olarak değerlendirilebilecek olan bu model, özellikle özel sektör yatırımlarını çekmek amacıyla başta Asya ülkelerinde olmak üzere yaygın şekilde kullanılmıştır (Hunt, 2002, s.42). Ülkemizde, TEK'in TEAŞ ve TEDAŞ olarak ikiye ayrılmasından sonra yaşanmaya başlayan dönem içerisinde imzalanmış olan Yap-İşlet-Devret (YİD), Yap-İşlet (Yİ) ve İşletme Hakkı Devri (İHD) sözleşmeleri ile oluşan ve elektrik piyasasının üretim tarafında özel sektörün imtiyazlı olarak faaliyet göstermesine izin verilmesiyle ortaya çıkan yapı, tek alıcılı bir piyasa modeli örneğidir.

Tek alıcılı piyasa modeli ile piyasanın üretim tarafı özel sektöre açılmış olsa da, üretilen elektrik enerjisinin tek bir alıcısının olması ve tüm tüketicilerin tekel konumundaki bir firmanın müşterileri olmaları itibarıyla, piyasanın tam anlamıyla rekabete açılmış olduğu söylenemez. Nitekim, tek alıcılı bir yapıdan daha rekabetçi olan piyasa modelinde, üreticilerin tüketiciler ile doğrudan ticari ilişkide bulunabilmelerine imkan tanıyan toptan satış piyasaları bulunmaktadır (Şekil 2).

Bu yapı içerisinde, tüketim miktarı belirli bir sınırın üzerindeki tüketicilere tedarikçilerini seçebilme hakkı tanınmıştır. Bu kapsama giren tüketiciler, elektrik enerjisi ihtiyaçlarını bir üretim şirketinden, bir dağıtım şirketinden, bir toptan satış şirketinden veya havuz üzerinden karşılayabilmektedirler. Ancak, düşük tüketimli tüketicilerin böyle bir özgürlüğü yoktur ve elektrik enerjisi ihtiyaçlarını bölgesinde bulundukları dağıtım şirketleri üzerinden karşılamak zorundadırlar.

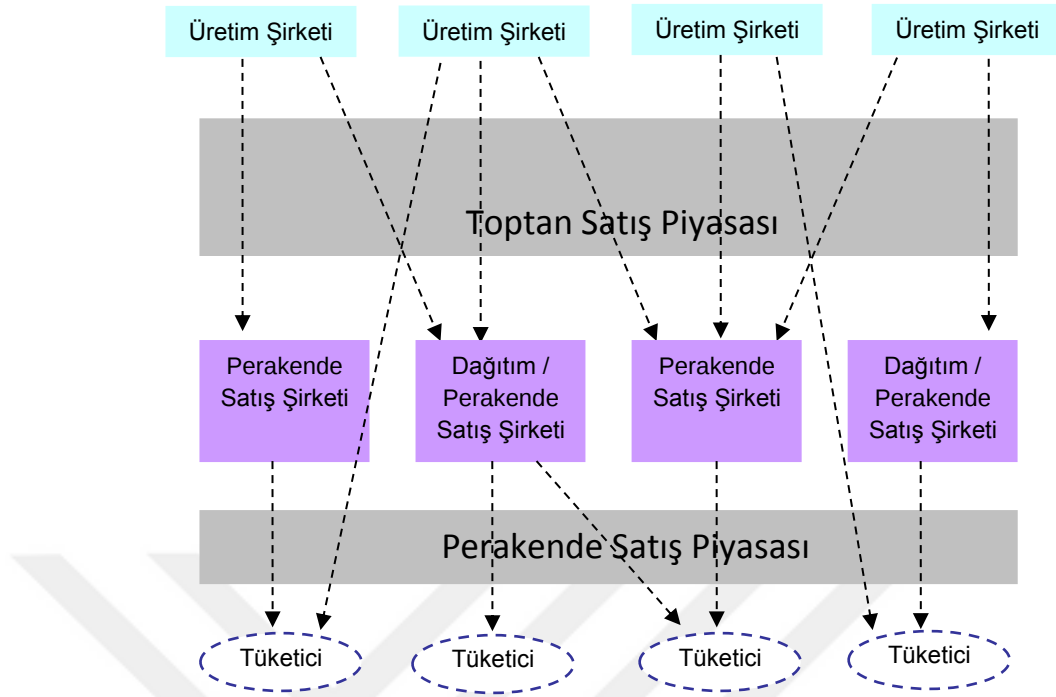


Şekil 2: Serbest (Toptan Satış) Elektrik Piyasası Modeli (Hunt, 2002, s.45)

Piyanın tam anlamıyla serbest olduğu modelde ise, tüketim miktarlarından bağımsız olmak üzere tüm tüketicilerin tedarikçilerini seçebildikleri bir yapı söz konusudur. Şekil 3’te gösterilen bu modelde tüketiciler, elektrik enerjisi ihtiyaçlarını diledikleri tedarikçiden karşılayabilirler. Ülkemizdeki elektrik piyasası, her ne kadar tüm tüketicilerin tedarikçilerini seçebilmelerine henüz imkan tanınmamış¹ ve perakende satış faaliyetleri² sadece görevli tedarik şirketleri tarafından yürütölüyor olsa da, bu piyasa modeli esas alınarak kurulmuştur.

¹ 2016 itibariyle, tedarikçisini seçebilme hakkına sahip bir serbest tüketici olabilmek için, yıllık elektrik enerjisi tüketiminin 3600 kWh olması gerekmektedir. Bu limit, % 86 civarında bir piyasa açıklık oranına denk gelmektedir.

² Burada “perakende satış faaliyeti” kavramı ile “serbest olmayan tüketicilere” enerji satışı ifade edilmektedir.



Şekil 3: Serbest (Toptan ve Perakende Satış) Elektrik Piyasası Modeli (Hunt, 2002, s.54)

Elektrik piyasalarının serbestleşmesi sürecinde, perakende satış piyasasının bulunduğu en rekabetçi yapı dahil olmak üzere, bir şebekenin kurulmasını ve işletilmesini gerektiren iletim ve dağıtım faaliyetleri tekel olarak kalmıştır (Hunt, 2002, s.42). Zira, aynı noktalara hizmet verecek birden fazla şebeke inşa etmek ve işletmek ekonomik açıdan uygun değildir. Bununla birlikte, iletim ve dağıtım faaliyetlerinin birer tekel olarak bırakılmasının piyasadaki rekabeti bozmaması için, şebekeye erişimin ayrımcılık yapılmadan sağlanması önemle gözetilmiş ve düzenleyici kuruluşların başlıca vazifeleri arasında görülmüştür.

Günümüzde işletilmekte olan rekabetçi elektrik piyasaları açısından, her ne kadar piyasaların tasarımıdaki temel amaç serbestleşme olsa da, farklı politikalar neticesinde şekillenmiş olan farklı piyasa yapılarının bulunduğu ve her ülke için geçerli olan standart bir elektrik piyasası modelinin olmadığı görülecektir. Zira her ülkenin kendine has şartlarının ve elektrik piyasası açısından farklı hedeflerinin olması gayet doğaldır. Diğer taraftan, günümüzdeki serbest elektrik piyasalarını merkezi piyasalar (havuz

modeli) ve merkezi olmayan piyasalar (ikili anlaşmalar modeli) olarak iki temel başlık altında sınıflandırmak mümkündür (Barroso ve diğerleri, 2005).

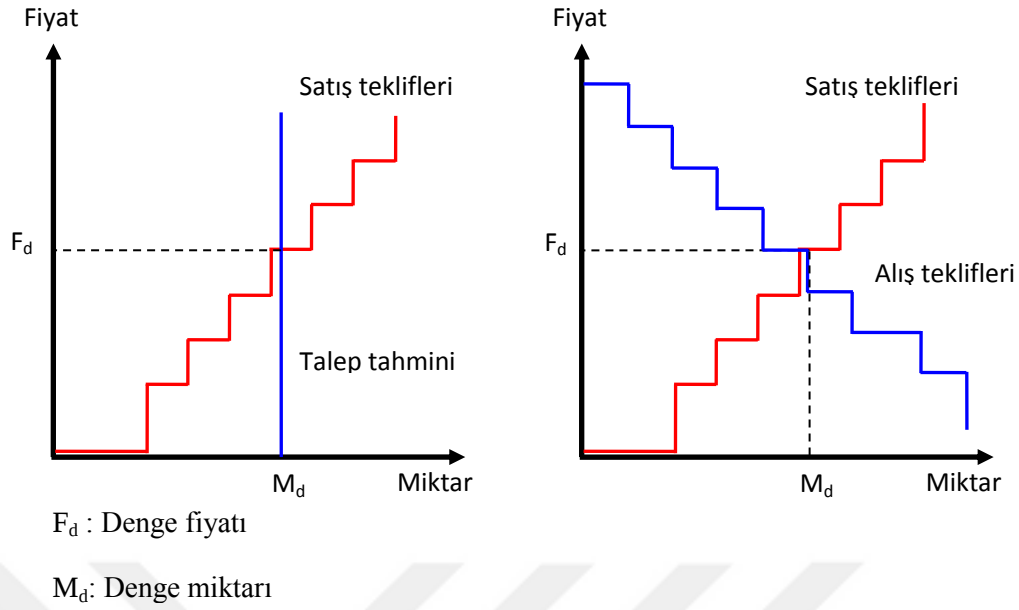
1.1.1. Merkezi Piyasalar (Havuz Modeli)

Bu türdeki piyasalarda, merkezi bir piyasa işletmecisi tarafından işletilen gelişmiş bir güç havuzu³ mevcuttur. Tüm üreticiler, havuza verecekleri elektrik enerjisi için fiyat ve miktar ikililerinden oluşan tekliflerini sunarlar. Söz konusu fiyat tekliflerinin, önceden belirlenmiş olan değişken maliyetler esas alınarak verildiği havuzlara “Maliyet Tabanlı Havuz” denir. Üreticilerin maliyetleri dikkate alınmaksızın istenilen fiyat tekliflerini verebilmelerinin önünde herhangi bir engel bulunmadığı havuzlar ise “Fiyat Tabanlı Havuz” olarak adlandırılır.

Havuz modelinde, piyasadaki arz ve talebin dengelenmesi için iki seçenek vardır. Bunlardan birincisi, piyasa işletmecisinin bir talep tahmini yaparak talebi karşılayacak miktarda üretimi sağlamak üzere bir yük dağıtımını gerçekleştirdiği durumdur ve diğerine göre nispeten daha basit bir piyasa yapısına karşılık gelmektedir. Zira, talep tarafının piyasada oluşacak fiyatlara duyarlı şekilde tüketim teklifi vermesi gibi bir imkan bulunmadığı için, ihtiyaç duyulan yük dağıtımını sadece üreticilerin verdiği fiyat teklifleri baz alınarak yapılan ekonomik sıralama sonucunda oluşturulur. Sadece üretim tarafının teklif verebildiği bu türdeki havuzlara “Tek Taraflı Havuz” denilmektedir. Daha gelişmiş bir piyasa yapısı anlamına gelen ikinci seçenek ise, üreticilere benzer şekilde tüketicilerin de fiyata duyarlı tüketim tekliflerinde bulunabilmesi ve piyasa işletmecisinin her iki taraftan gelen teklifler doğrultusunda oluşturduğu toplam arz ve toplam talep eğrilerinin kesişim noktasını bularak piyasadaki dengeyi sağlamasıdır. Bu türdeki havuzlara “Çift Taraflı Havuz” denilmektedir.⁴ Her iki havuz modelinde piyasadaki dengenin nasıl oluşturulduğu Şekil 4’te gösterilmektedir.

³ Bu ifade, İngilizce’deki “power pool”un karşılığı olarak kullanılmıştır.

⁴ Ülkemizdeki havuz modeli tek taraflı olarak başlamış olup Aralık 2011 tarihinden itibaren çift taraflı olarak işletilmektedir.



Şekil 4: Tek (solda) ve Çift (sağda) Taraflı Havuzlarda Fiyat Oluşumu

Piyanın dengelenmesinde temel alınan fiyat teklifleri, teklife konu elektrik enerjisi miktarının belirlenen fiyat üzerinden teslimatı/tüketimi zorunluluğunu taşımaktadır. Buradaki önemli bir nokta, piyasadaki arz-talep dengesinin bir fiyat düzeyinde sağlanmasından sonra katılımcıların mali uzlaştırılmasının hangi fiyat üzerinden yapılacağıdır. Serbest elektrik piyasalarında çok sık olarak karşılaşılan iki fiyatlandırma yöntemi vardır. Bunlardan birincisi her bir teklif sahibinin teklif ettiği fiyat üzerinden uzlaştırılmasına (pay-as-bid / teklif fiyatı uygulaması), ikincisi ise dengenin sağlanması için kabul edilen en son teklifin fiyatının baz alınarak (Şekil 4'te arz ve talebin kesiştiği fiyat teklifi olan F_d) her bir teklif sahibinin bu fiyat üzerinden uzlaştırılmasına (marginal pricing / marjinal fiyat uygulaması) dayanmaktadır.

Havuz modelinin bulunduğu bir piyasada ikili anlaşmaların da yer alması mümkündür. Bu ikili anlaşmalar, elektrik enerjisinin mevcut havuzdan temin edildiği durumlarda oluşabilecek fiyat farklılıklarına ilişkin finansal sözleşmeler olabileceği gibi (örneğin Nord Pool'daki Fark Sözleşmeleri), ülkemizde olduğu gibi sadece elektrik enerjisi teslimatına ilişkin fiziksel sözleşmeler de olabilir. Anlaşmaların fiziksel teslimat esaslı olarak yapıldığı durumlarda, tüketici ihtiyacı olan elektrik enerjisi miktarını yaptığı ikili anlaşma kapsamında bir üreticiden temin ederken, üretim ve tüketim değerleri arasında oluşabilecek küçük farklılıklar havuz aracılığıyla giderilir.

1.1.2. Merkezi Olmayan Piyasalar (İkili Anlaşmalar Modeli)

İkili anlaşmalar modeli, havuz modelinin alternatifidir ve piyasanın merkezi bir yapı tarafından işletilmesi yerine katılımcıların elektrik enerjisi ticaretini kendi aralarında yaptıkları anlaşmalar ile kendi belirledikleri fiyatlar üzerinden yapabilmelerine dayalıdır. Bu anlaşmalar genel olarak, satış tarafında bir üreticinin alış tarafında ise bir tüketicinin bulunduğu sözleşmelerdir. Ancak, müşterisine taahhüt ettiği miktarda elektrik enerjisini sisteme veremeyecek olan bir üreticinin, aradaki farkı karşılamak amacıyla bir ikili anlaşmada alıcı konumunda olması mümkün olduğu gibi, aslında kendisi tüketici olmayan ve üreticiler ile tüketiciler arasında bulunan bir toptan satış şirketi veya broker da satıcı konumunda bulunabilir.

Tüketicilerin elektrik enerjisi ihtiyaçlarını yaptıkları ikili anlaşmalar aracılığıyla karşıladıkları bir piyasa içerisinde, sistemin işletilmesi esnasında ortaya çıkan üretim ve tüketim miktarlarının sözleşmeye bağlanmış miktarlardan farklı olmaları gayet doğaldır. Bu nedenle, sistem işleticisinin sistemin kararlılığı koruyabilmek için bu farklılıkları izlemesi ve sistemdeki arz-talep dengesini sağlaması gerekir. Nitekim, Türkiye’de de olduğu gibi bazı gelişmiş elektrik piyasalarında (örneğin Nord Pool ve PJM), gerçek zamanlı dengeleme işlemleri için ayrıca bir “dengeleme piyasası”⁵ veya diğer adıyla “düzenleme güç piyasası”⁶ işletilmektedir.

Ayrıca, ikili anlaşma modeli ile birlikte katılımın gönüllülük esasına dayalı olduğu bir “güç borsası”⁷ da işletilebilir. Böylelikle piyasadaki katılımcılara, gün öncesinde veya gün içerisinde, üretim veya tüketim miktarlarını ayarlayarak herhangi bir dengesizliğe düşmemeleri için bir ortam sunulmuş olur. Bu durumda, ikili anlaşmalar modeli ile havuz modeli birlikte çalıştırılarak her ikisinin de avantajlarından faydalanılabilir. Bu şekilde işletilmekte olan piyasaların bulunduğu ülkeler, Hollanda (APX), Fransa (Powernext), İskandinav ülkeleri (Nord Pool) ve Almanya (EEX) olarak sıralanabilir.

⁵ Bu ifade, İngilizce’deki “balancing market”’in karşılığı olarak kullanılmıştır.

⁶ Bu ifade, İngilizce’deki “regulating power market”’in karşılığı olarak kullanılmıştır.

⁷ Bu ifade, İngilizce’deki “power exchange”’in karşılığı olarak kullanılmıştır.

1.2. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI

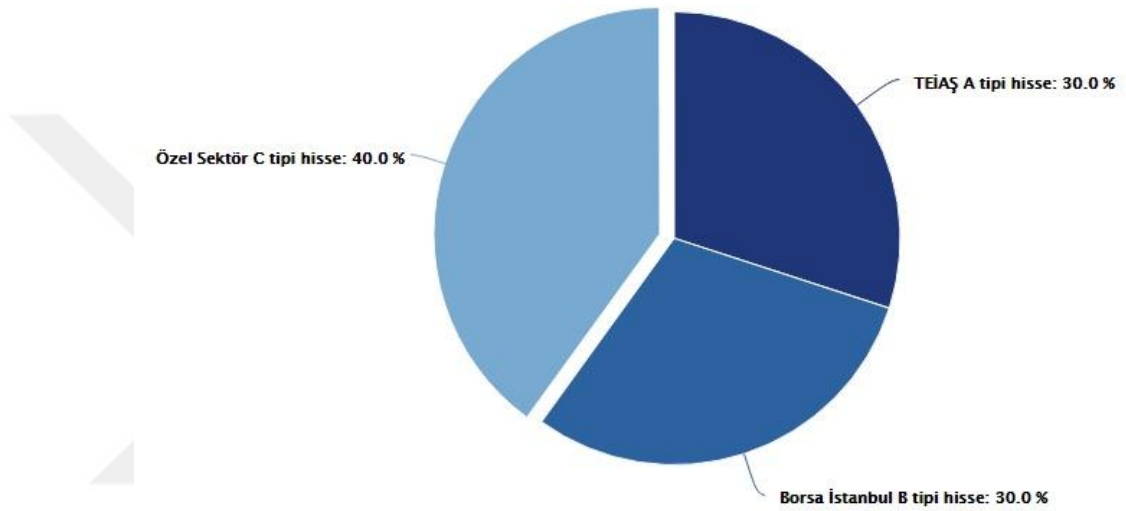
Ülkemizdeki elektrik piyasası, en yapısal dönüşümünü 2001 yılında çıkarılan 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ile geçirmiş olup ilk zamanlarda temelde fiyatların taraflar arasında serbestçe belirlendiği ikili anlaşmalara dayalı olan bir piyasa yapısındaydı. Özellikle, Aralık 2011 döneminde başlayan Gün Öncesi Piyasası'nın gelişimi ile başlangıçta % 25'ler seviyesinde işlem hacmine sahip olan havuz piyasası mevcut durumda toplam işlem hacminin % 50'den fazlasının gerçekleştiği bir piyasa kimliğine kavuşmuştur.

Havuz piyasası kapsamındaki alt piyasalar (gün öncesi piyasası, dengeleme güç piyasası ve gün içi piyasası), piyasadaki fiyatların oluştuğu yerler olup arz-talep dengesinin sağlandığı seviyelerde uygulanan marjinal fiyatlandırma ilkesine dayalı olarak işlemektedir. Özellikle gün öncesi piyasasında oluşan fiyatlar havuz piyasası için uzlaşma fiyatı olarak belirleyici olmakla beraber elektrik piyasasının diğer önemli ayağı olan ikili anlaşma fiyatlarının belirlenmesi için referans teşkil etmekte, ayrıca Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından düzenlenen tarifelerde baz alınmaktadır. Bu kapsamda havuz piyasasında belirlenen fiyatlar (çoğunlukla gün öncesi piyasasında belirlenen Piyasa Takas Fiyatı) elektrik ticareti açısından belirleyici bir unsur olarak göze çarpmaktadır

Türkiye elektrik piyasasının genel işleyişi Şekil 6'da gösterilmektedir. Üretim tarafında Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) (ve bağlı ortaklıkları), Yap-İşlet (Yİ), Yap-İşlet-Devret (YİD) ve İşletme Hakkı Devri (İHD) kapsamındaki sözleşmeler çerçevesinde alım garantili olarak faaliyet gösteren üretim şirketleri ve serbest üretim şirketleri yer almaktadır. Yİ, YİD ve İHD şirketleri ürettikleri elektrik enerjisini sadece Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş.'ye (TETAŞ) yaptıkları ikili anlaşmalar ile satabilmektedirler. Toptan Satış tarafında TETAŞ ve özel tedarik şirketleri yer almaktadır.

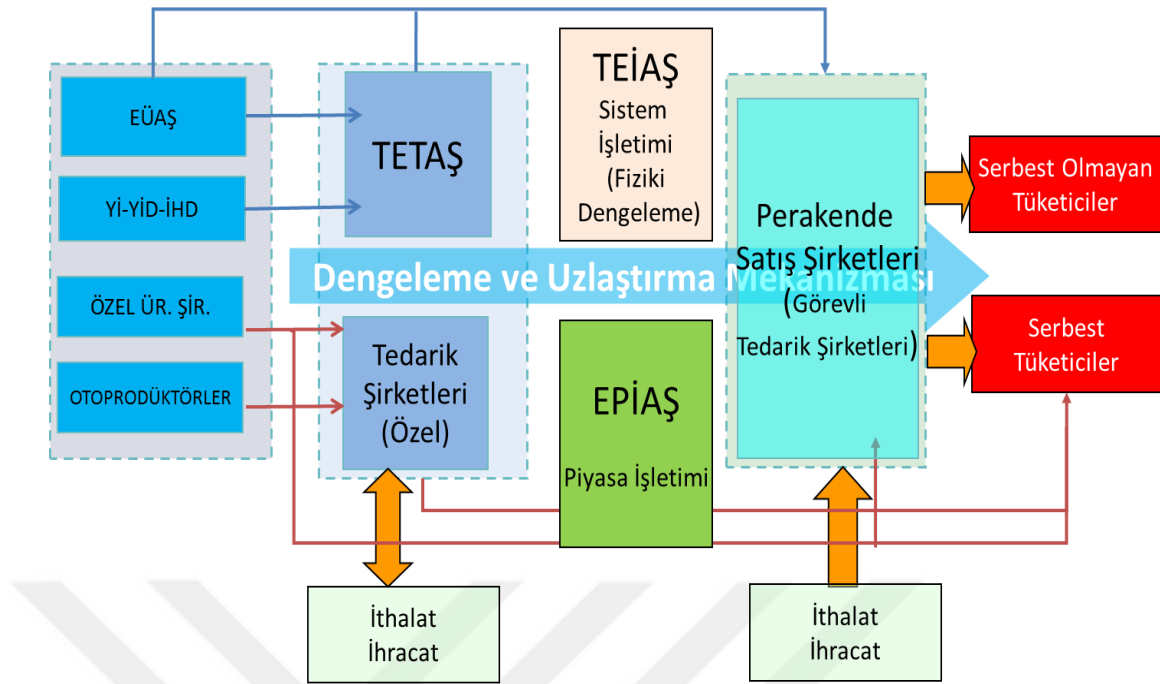
30.03.2013 tarihinde yürürlüğe giren 6446 sayılı yeni Elektrik Piyasası Kanununa göre elektrik iletim faaliyetinin yürütülmesi ve elektriğin fiziki olarak dengelenmesi, bu

bağlamda dengeleme güç piyasasının işletiminden Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) sorumlu kılınmıştır. 6446 sayılı Kanun, önceden TEİAŞ'ın sorumluluğunda bulunan havuz piyasasının işletiminin bağımsız bir kuruluş olan Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi (EPIAŞ) tarafından gerçekleştirilmesini öngörmüştür. Bu kapsamda ortaklık yapısı Şekil 5'te gösterilen EPIAŞ Mart 2015'te kurulmuş ve piyasa işletim faaliyetini Eylül 2015'ten itibaren yürütmeye başlamıştır.



Şekil 5: EPIAŞ'ın ortaklık yapısı

Dağıtım tarafında ise, toplam sayıları 21 olan ve 2013 yılı Eylül ayı itibariyle özelleştirmeleri tamamlanan dağıtım şirketleri lisanslarında belirtilen bölgelerde elektrik dağıtım faaliyetini yürütmektedirler. Önceleri dağıtım şirketlerinin sorumluluğunda bulunan perakende satış faaliyeti, 2013 yılından itibaren dağıtım şirketlerinden Türk Ticaret Kanununa göre kısmi bölünme yoluyla ayrılan 21 adet ayrı “görevli tedarik şirketi” tarafından gerçekleştirilmektedir.



Şekil 6: Türkiye Elektrik Piyasasının Yapısı

Şekil 6’da da görüldüğü üzere nihai kullanıcı tarafında serbest olan ve olmayan tüketiciler bulunmaktadır. Serbest tüketiciler yıllık elektrik tüketimi belirli bir limiti aşan ve tedarikçilerini seçme hakkına sahip olan tüketicilerdir. 9 milyon kWh ile başlatılan serbest tüketici limiti, piyasadaki serbestleşme ile birlikte kademeli ve hızlı bir şekilde düşürülmüş ve 2016 yılı için EPDK tarafından 3600 kWh olarak belirlenmiştir. Bu seviyedeki bir tüketim miktarı teorik olarak %86 civarında bir piyasa açıklık oranına denk gelmektedir. Serbest olmayan tüketiciler ise elektrik ihtiyaçlarını bölgelerindeki perakende satış şirketinden (görevli tedarik şirketinden) temin etmek zorundadırlar. Nihai olarak yakın bir gelecekte serbest tüketici limitinin 0’a düşürülmesi ile tüm tüketicilerin “serbest tüketici” olmaları öngörülmektedir. Piyasa mekanizması içerisinde elektrik ithalat ve ihracat faaliyetleri TETAŞ ve diğer özel tedarik şirketleri tarafından yapılabilmektedir. Bunun haricinde görevli tedarik şirketleri de, sadece dağıtım seviyesinden olmak kaydıyla elektrik ithal/ihraç etme imkanına sahiptir.

1.3. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT OLUŞUMU

Piyasa fiyatları esasen dengeleme ve uzlaştırma mekanizması aracılığıyla işletilmekte olan gün öncesi, gün içi ve gerçek zamanlı dengeleme piyasasında arz ve talep eğrilerinin kesişim noktasında marjinal fiyatlandırma prensibine (dengeyi sağlayan son üreticinin fiyatının ilgili saatin fiyatı olarak belirlenmesi) dayalı olarak oluşmaktadır. Arz-talep dengesinin en düşük maliyetle karşılanmasına yönelik tüm optimizasyon hesapları ve bu hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan üretim-tüketim profilinin mali uzlaştırması Piyasa Yönetim Sistemi (PYS) adı verilen bir yazılım aracılığıyla yürütülmektedir.

1.3.1. Gün Öncesi Piyasasında Fiyat Oluşumu

Gün öncesi piyasası (GÖP), bir sonraki günün elektrik talebinin gün öncesinden dengelenebilmesi için işletilmektedir. Bu açıdan bakıldığında gün öncesi piyasası, hem piyasanın daha öngörülebilir bir yapıda olmasını sağlayarak piyasa katılımcılarına risklerini asgari seviyeye indirebilmeleri için bir imkan sunmakta hem de sistemin gerçek zamanlı olarak işletilmesi zorunluluğundan kaynaklanan problemlerin çözümü için gün öncesinden dengelenmiş bir sistem bırakarak sistem işletmecisine yardımcı olmaktadır. Piyasanın işleyişi genel olarak şu şekildedir:

- Sistem işletmecisinin teklif bölgeleri (varsa) arasındaki kullanılabilir iletim kapasitelerini, piyasa katılımcılarının ise bir sonraki güne ait ikili anlaşma miktarlarını ve enerji alış/satış tekliflerini bildirmesi
- Toplanan veriler ışığında arz-talep dengesinin en düşük maliyetle kurulması ve ilgili enerji alış/satış talimatlarının üretilerek katılımcılara bildirilmesi
- Verilen talimatların katılımcılar tarafından kontrol edilmesi ve yapılan itirazların sonuçlandırılması
- Nihai dengeleme ile üretim-tüketim programının oluşturulması ve bir sonraki günün her bir saati için saatlik fiyatların (Piyasa Takas Fiyatı, PTF) duyurulması

1.3.2. Gün İçi Piyasasında Fiyat Oluşumu

Enerji ticaretinin gerçek zamana yakın saatlerde de yapılabilmesi için ülkemizde Temmuz 2015 tarihinden itibaren gün içi (intraday) piyasanın işletilmesine başlanmıştır. Halihazırda piyasa işletmecisi olan EPIAŞ tarafından işletilen bu piyasada elektriğin fiziki teslimatından 2 saat öncesine kadar alıŖ/satıŖ teklifleri verilebilmektedir. Gün öncesi piyasasının ve dengeleme güç piyasasının tamamlayıcısı olarak tasarlanan bu piyasada, tezgahüstü piyasalara benzer şekilde tekliflerin eşleŖtirilmesi usulüyle uzlaŖtırma gerçekteŖtirilmektedir. AlıŖ teklif fiyatları ile satıŖ teklif fiyatları karŖılaŖtırılmakta, miktarın alıŖ ya da satıŖ yönünde büyüklüğü nihai fiyatın ne olacağını belirlemektedir.

Gün içi piyasasında, yeni kurulan ve tamamlayıcı nitelikte bir piyasa olması nedeniyle asıl piyasa olan gün öncesi ve dengeleme güç piyasasına göre küçük hacimlerde işlem gerçekteŖtirilmektedir.

1.3.3. Dengeleme Güç Piyasasında Fiyat Oluşumu

Her ne kadar ilgili günün dengeleme faaliyetleri gün öncesinde yapılmıŖ olsa da, yapılan tüketim tahminlerinin mükemmel olamayışı baŖta olmak üzere, arızalar ve Ŗebekede oluŖan kısıtlar gibi nedenlerle üretim-tüketim dengesi gün içerisinde bozulabilmektedir. Bu nedenle sistemi gerçekte zamanda dengelerken ilgili yük alma (YAL) ve yük atma (YAT) talimatlarının en ekonomik Ŗekilde verilebilmesi için gerçekte zamanlı Dengeleme Güç Piyasası (DGP) işletilmektedir. Piyasanın genel işleyiŖi Ŗu Ŗekildedir:

- Piyasa katılımcılarının kesinleŖmiŖ günlük üretim planlarının, kullanılabilir durumdaki emre amade kapasitelerinin ve ilgili YAL-YAT tekliflerinin bildirilmesi
- Tekliflerin kontrol edilmesi ve gerekli düzeltmelerin yapılması
- Gün içerisinde verilecek talimatlar için YAL tekliflerinin düşükten yükseğe, YAT tekliflerinin ise yüksekten düşüğe doğru sıralanması

- Gerçek zamana gelindiğinde ihtiyaç duyulması halinde YAL ve YAT talimatlarının verilmesi
- İlgili saat geçtikten sonra eğer yeni talimat üretilmişse marjinal fiyatlandırma ile bu saatin fiyatının (Sistem Marjinal Fiyatı, SMF) belirlenmesi, aksi halde bu saat için gün öncesindeki fiyatın (PTF) gün içinde de geçerli olması

1.3.4. Gün Öncesi Piyasasında Fiyat Oluşumunun Detayları

Daha önce de belirtildiği gibi, havuzda oluşan fiyatlar mevcut durumda elektrik ticaretinin % 50'den fazlası için “takas fiyatı” niteliğinin yanı sıra hem ikili anlaşma fiyatlarının belirlenmesi için referans teşkil etmeleri ve tarife düzenlemelerinde baz alınıyor olmaları hem de yatırımcıların kararlarında dikkate alınmaları itibariyle büyük önem taşımaktadır. Mali açıdan bakıldığında ise, sadece gün öncesi piyasasında gerçekleşen yıllık işlem hacminin büyüklüğü 2015 yılında 28.59 milyar TL olmuştur (EPIAŞ, 2016, s.22). Dolayısıyla piyasa fiyatlarının başta düzenleyici ve işletici kurumlar olmak üzere piyasa oyuncuları ve faturayı ödeyen tüketiciler olmak üzere tahmin edilebilir olması haklı şekilde ilgi çeken bir konudur.

Tez çalışmasında modellenerek tahmin edilmesi hedeflenen fiyatlar GÖP'te oluşan PTF'ler olduğundan, bu alt bölümde PTF'nin oluşumuna ilişkin detaylara yer verilmektedir. Bu kapsamda öncelikle PTF'nin oluşumunda dikkate alınan tekliflerin tipleri ele alınmakta, sonrasında ise fiyat oluşumunun tam olarak nasıl gerçekleştiği açıklanmaktadır.⁸

⁸ İlgili açıklamaların yapılmasında, 14 Nisan 2009 tarihli ve 27200 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan *Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği* baz alınmıştır.

1.3.4.1 Gün Öncesi Piyasasında Sunulan Teklifler

Piyasa katılımcıları tarafından GÖP'e sunulan teklifler aşağıda açıklanan üç tipte olabilmektedir: Piyasa katılımcıları tarafından GÖP'e sunulan tüm bu teklifler; belirli bir teklif bölgesi, belirli bir gün ve belirli bir zaman aralığı için geçerlidir.⁹

- **Saatlik Alış/Satış Teklifi:** Bir piyasa katılımcısının, aktif elektrik enerjisi alışına/satışına yönelik olarak ertesi günün her bir saati için sunduğu ve ilgili saat için fiyat ve miktar bilgilerini içeren teklif türüdür. Bu teklifler, alış ve satış yönünde en fazla 32 kademeli olarak 0,1 MWh'e eşdeğer lotlar ve katları cinsinden verilebilir.
- **Blok Alış/Satış Teklifi:** Bir piyasa katılımcısının, aktif elektrik enerjisi alışına/satışına yönelik olarak ertesi günün birden fazla ardışık saati için geçerli olmak üzere sunduğu ve kapsadığı zaman aralığı için ortalama fiyat ile miktar bilgilerini içeren teklif türüdür. Bu teklifler, gün içerisindeki aynı veya farklı zaman dilimlerini içerebilir. Sistem İşletmecisi tarafından belirlenen blokların haricinde, piyasa katılımcılarının da kendilerine uygun bloklar tanımlaması mümkündür. Blok teklifler en az 4 saatlik bir dilimi kapsamalıdır ve bir piyasa katılımcısının verebileceği toplam blok teklif sayısı 50'yi geçemez. Blok tekliflerin kısmi olarak kabul edilmesi/edilmemesi mümkün değildir. Piyasa katılımcıları, en fazla 3 blok teklifi içermek üzere blok teklifler arasında bağlantı kurabilirler. Bu durumda; 2. blok teklifin kabulü 1. blok teklifin kabulüne, 3. blok teklifin kabulü ise 1. ve 2. blok teklifin kabulüne bağlı olur. Bu şekilde birbirine bağlanan tekliflerin tamamının aynı yönde (alış/satış) olması zorunludur.

⁹ Burada teklif bölgesinden kasıt; uzun vadeli planlamalardan yola çıkarak, dengeleme işlemlerinin gerektirmesi halinde ülke geneli için geçerli olan spot piyasanın birden fazla spot piyasaya bölünmesi yoluyla oluşturulan bölgelerdir. Piyasa ayrışımı (market splitting) yapılması anlamına gelen bu durum hakkında detaylı bilgi için Kölmek (2009) tarafından hazırlanmış olan uzmanlık tezine bakılabilir.

- **Esnek Satış Teklifi:** Bir piyasa katılımcısının, saatlik aktif elektrik enerjisi satışına yönelik olarak ertesi günün belirli bir saati ile ilişkili olmamak üzere sunduğu teklif türüdür.

1.3.4.2 Gün Öncesi Piyasasında Sunulan Tekliflerin Değerlendirilmesi¹⁰

Piyasa katılımcılarının teklifleri GÖP'e sunmalarının ardından, teklifler aşağıdaki şekilde değerlendirilmekte ve ilgili saatler için PTF hesaplanmaktadır:

- Tüm teklifler, teklif bölgeleri arasındaki iletim kısıtları dikkate alınmaksızın değerlendirilir ve bu şekilde oluşturulan arz ve talep eğrileri üzerinden ilgili günün her bir saati için tek bir Kısıtsız Piyasa Takas Fiyatı (KPTF) hesaplanır.
- KPTF'ye karşılık olarak öngörülen fiziksel elektrik akışının, teklif bölgeleri arasındaki iletim kısıtları ile belirlenen tahsis edilmiş iletim kapasitesini aşmaması durumunda KPTF, Nihai Piyasa Takas Fiyatı (NPTF) olarak geçerlilik kazanmış olur. Aksi durumda ise, tahsis edilen iletim kapasiteleri dikkate alınarak her bir teklif bölgesi için saatlik NPTF'ler ayrı ayrı hesaplanır.
- Bir blok satış teklifi, fiyat değerinin ilgili zaman dilimi için belirlenmiş olan takas fiyatlarının aritmetik ortalamasını aşmaması (küçük eşit olma durumu) halinde kabul edilir, Blok alım teklifleri için ise tam tersi durum (küçük eşit olma durumu) söz konusudur. Buradaki önemli ölçüt, blok tekliflerin; bir saat için mümkün olduğunca düşük bir KPTF'ye ve teklif bölgelerinin tamamı için mümkün olduğunca düşük NPTF'lere ulaşılacak şekilde değerlendirilmesidir. Diğer bir ifadeyle, kabul edilecek bir blok teklif, günün tamamına yönelik olarak yapılan değerlendirme açısından toplam dengeleme maliyetini düşürebilmelidir.
- Bir esnek satış teklifi; fiyat değerinin, en yüksek piyasa takas fiyatının hesaplandığı saatteki fiyat seviyesinden küçük veya bu seviyeye eşit olması halinde kabul edilir. Saatlik ve blok tekliflerin esnek tekliflere göre önceliği vardır.

¹⁰ Tekliflerinin değerlendirilmesine ilişkin kurallarda, 26 Mayıs 2016 tarihli ve 29725 sayılı Resmi Gazete yayımlanan ve 1 Haziran 2016'da yürürlüğe giren *Gün Öncesi Piyasası Tekliflerinin Yapısı ve Tekliflerin Değerlendirilmesine İlişkin Usul ve Esaslar* ile bazı değişiklikler yapılmıştır. Söz konusu değişiklikler, tezde ele alınan 2014 yılına ilişkin dönemi kapsamadığından yapılan açıklamalara dahil edilmemiştir.

- Farklı katılımcılar tarafından sunulan blok veya esnek tekliflerin aynı olması durumunda, öncelik sıralamasında teklifin verildiği an dikkate alınır.

Anlatılan kurallar çerçevesinde işletilen gün öncesi elektrik piyasası, hem alış hem de satış yönündeki tekliflerden yola çıkılarak toplam arz ve toplam talep eğrilerinin oluşturulduğu dikkate alındığında, Bölüm 1’de anlatılmış olan *Çift Taraflı Havuz Piyasası* şeklinde çalışmaktadır.

Burada ayrıca vurgulanması gereken bir husus tezde ele alınan dönemde yürürlükte olan *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Desteleme Mekanizması’nda (YEKDEM)* yer alan santrallerin oluşturduğu portföyün, 2016 yılına kadar fiyattan tamamen bağımsız bir üretim portföyü olarak işletilmesidir. Diğer bir ifadeyle, bu portföye karşılık gelen üretim kapasitesi, piyasada bir anlamda fiyat alıcı (price taker) bir katılımcı gibi hareket etmektedir.

Diğer önemli bir husus ise Görevli Tedarik Şirketlerinin, serbestleşme öncesi dönemden kaynaklanan mevcut sözleşmeler nedeniyle TETAŞ’la ve dağıtım özelleştirmeleri öncesi dönemden kaynaklanan sözleşmeler nedeniyle EÜAŞ’la yaptıkları ikili anlaşmalardaki enerji miktarlarından saatlik olarak ellerinde kalan fazlayı fiyat alıcı bir pozisyonda piyasaya arz etmeleridir.

Yukarıda sayılan iki hususun, diğer birçok muhtemel etkiye ilave olarak, fiyat oluşum mekanizmasının tamamen arz-talep dengesine dayalı olarak ürettiği saatlik fiyat sinyali üzerinde etkili olması kaçınılmazdır.

2. BÖLÜM

LİTERATÜRDEKİ ELEKTRİK FİYATI TAHMİNİ ÇALIŞMALARI

2.1. ELEKTRİK FİYATI TAHMİNİNİN ÖNEMİ

Elektrik piyasalarının serbestleşmesiyle birlikte, geleceğe dönük tüketim ve fiyat değerlerinin bilinmesi piyasada yer alan birçok taraf (örneğin üreticiler, tüketiciler, elektrik ticareti yapanlar, sistem/piyasa işletmecileri veya düzenleyiciler) için gittikçe artan bir öneme sahip olmaya başlamıştır (Gupta, 2013). 1990'ların başlarından beri görülmekte olan bu serbestleşme sürecinin bir sonucu olarak elektrik, artık birçok ülkede rekabet koşullarında ve piyasa kuralları altında alınıp satılmaktadır.

Bununla birlikte, büyük ölçeklerde depolanamayışı ve elektrik sisteminin teknik koşulları nedeniyle anlık olarak üretilip tüketilmesinin gerekmesi, fiyatlandırma açısından elektriğe ekonomideki diğer mallardan farklı bir nitelik katmaktadır. Weron'a (2014) göre; elektriğin bu özelliği ve talebinin hava koşulları ile birlikte iş dünyasına ve günlük hayata ait aktivitelere bağlı olması, diğer piyasalarda görülmeyen ve günlük, haftalık, aylık veya yıllık seviyede mevsimsellikle birlikte çoğunlukla tahmin edilemeyen kısa süreli uç değerleri içeren fiyat dinamiklerine yol açmaktadır. Bu nedenle elektrik fiyatları, gelecek değerlerin tahmini için gerekli olan gözlenebilir eğilimleri gölgeleyen yüksek düzeyde oynaklığa sahiptir (Gupta 2013). Nitekim, günlük fiyatlar açısından bakıldığında; hazine bonolarında % 0,5'ten düşük, borsa endekslerinde % 1-1,5, doğalgaz ve petrol gibi mallarda ise % 1,5 ile 4 arasında gerçekleşen oynaklık oranı elektrik fiyatları söz konusu olduğunda % 50 seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Weron, 2006, s. 26).

Bununla birlikte elektrik fiyatlarının doğru tahmin edilmesine yönelik ilgi, fiyatların yapısından kaynaklanan zorluğa karşın artarak devam etmiştir. Çünkü elektrik fiyatı tahminleri piyasadaki oyuncuların karar alma mekanizmaları açısından yüksek derecede önemli bir girdidir ve oynaklığın yarattığı tahmin zorluğu araştırmacıları daha iyi

tahmin yapabilen tekniklerin geliştirilmesi yönünde teşvik etmektedir (Weron, 2014). Diğer taraftan, rekabetçi ve likit elektrik toptan satış piyasalarında üretim kapasitesi kaynaklı fiziksel riskler piyasadaki oyuncular için yüksek fiyatların yarattığı finansal risklere dönüşebilmektedir (Bunn, 2000). Bu da oyuncular açısından yönetilmesi gereken bir durum anlamına gelmektedir. Bu nedenledir ki, fiyatların oluştuğu elektrik piyasasının kurgusuna göre farklılık göstermekle birlikte, gelecekteki birkaç saatten birkaç güne kadar olan yakın dönem için fiyat tahmini yapılabilmesi büyük önem taşımaktadır (Girish, 2014).

Bu bağlamda, elektrik fiyatlarının doğru tahmin edilmesine yönelik ilgi bir ihtiyacın sonucudur. Bu ihtiyaç, ülkemizdeki gibi çift taraflı havuz mekanizmasının geçerli olduğu bir serbest elektrik piyasası üzerinden şu şekilde somutlaştırılabilir: Piyasada faaliyet göstermekte olan bir üretim tesisinin kazancı, tamamen kendi üretim maliyetlerini ve piyasadaki koşulları dikkate alarak sunacağı fiyat teklifi neticesinde dengelemede yer alıp almamasına bağlıdır. Bu üreticinin bir ikili anlaşması olması durumunda ise, satacağı elektrik için kendi üretim tesisini kullanmak veya daha düşük maliyetli olacağını tahmin ederek belirli saatlerde spot piyasadan alım yapmayı da düşünmek yönündeki kararları doğru fiyat tahmini yapmasına bağlıdır.

Diğer taraftan, üretici ile tüketici arasında aracılık yapan bir tedarikçi açısından, tüketici ile yaptığı anlaşmanın koşulları çerçevesinde tedarik etmekle yükümlü olduğu elektrik enerjisini hangi fiyattan temin edebileceğini bilmek çok önemlidir. Zira, oluşması beklenen fiyatların seviyesine göre tamamen spot piyasadan veya yapacağı ikili anlaşmalar aracılığıyla enerji temin etmeye veya bu ikisi arasında kendi pozisyonunu optimize eden bir dağılım yapmaya karar vermesi gerekmektedir. Diğer taraftan, piyasayı kurallarını belirleyerek düzenleyen taraf açısından fiyat oluşumunun sağlıklı olması ve güvenilir sinyaller üretmesi son derece önemlidir. Aksi takdirde uzun vadede piyasadaki oyuncular açısından büyük ticari riskler ortaya çıkacak ve bu durum piyasanın işleyişini doğal olarak zora sokacaktır.

Özetle, elektrik piyasasındaki fiyatların tahmini farklı taraflar açısından farklı gerekçeleri olmakla birlikte büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalara

bakıldığında, tahmini yapılan elektrik fiyatlarının genellikle gün öncesi piyasasında oluşan fiyatlar olduğu görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, oyuncuların gün öncesi piyasasında ertesi güne ait tüm bilinebilecek verileri değerlendirerek pozisyon almaları neticesinde oluşan dengeleme sonuçlarının diğer piyasalardaki dengeleme işlemlerine temel teşkil etmesi ve burada oluşan fiyatların oyuncular ile karar alıcılar için referans niteliğinde bir fiyat sinyali üretmesi olarak açıklanabilir.

2.2. ELEKTRİK FİYATI TAHMİNİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Fiyatların modellenmesi için yapılan çalışmalara bakıldığında, yapay sinir ağlarından denge modeli yaklaşımına kadar farklı araçların kullanıldığı göze çarpmaktadır. Weron (2006, s. 102), bu alandaki modelleme yaklaşımlarını 6 kategoride toplamaktadır:

- Üretim maliyeti modelleri: Talebi en düşük maliyetle karşılamayı amaçlayan üretim birimlerinin çalışmalarının benzetimi
- Denge (veya oyun teorik) modeller: Fiyat oluşum mekanizmasının piyasadaki oyuncuların davranışlarına dayalı olarak oyun teorik şekilde ele alınması
- Yapısal modeller: Fiyat dinamiklerinin, önemli fiziksel ve ekonomik faktörlerin elektrik fiyatları üzerinde etkileri modellenerek açıklanması
- Niteliksel (veya stokastik, ekonometrik, indirgenmiş form) modeller: Genellikle türev değerlemesi veya risk yönetimi amacıyla, elektrik fiyatlarının zaman içerisindeki istatistiksel özelliklerinin karakterize edilmesi
- İstatistiksel (veya teknik analiz) modeller: Tüketim tahminine yönelik istatistiksel tekniklerin doğrudan uygulanması veya ekonometrik modellerin elektrik piyasasına yönelik uygulamaları
- Yapay zeka (yani parametrik olmayan) modelleri: Fiyat oluşum süreçlerinin yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi yöntemler ile modellenmesi

Modellenmeye çalışılan elektrik fiyatları serbest piyasa koşullarındaki arz-talep dengesi çerçevesinde olduğundan, piyasada bulunan oyuncuların hareket stratejileri dikkate alınmaya çalışılarak oluşturulacak bir modelin saatlik fiyat tahmininden beklenen

sonuçları vermesinin zor olmasından ve birimlerin elektrik üretim maliyetleriyle birlikte fiyat oluşumunda etkili olabilecek birçok parametreye ilişkin veriye ulaşım imkanının kısıtlı olmasından dolayı saatlik elektrik fiyatı tahminine yönelik olarak yapılan çalışmaların Weron'un (2006) yaptığı sınıflandırmanın çoğunlukla son üçüne ait olduğu görülmektedir.

Elektrik fiyatlarının tahminine yönelik literatür çalışmalarında; AR, ARMA ve ARIMA modellerinin sıkça kullanıldığı göze çarpmaktadır. Bu kapsamda Cuaresma ve diğerleri (2004), Almanya'daki Leipzig Güç Borsası'nda oluşan gün öncesi saatlik elektrik fiyatlarını tahmin ettikleri çalışmada AR ve ARMA tipinde modeller oluşturmuş ve ani fiyat yükselişleri için ayrıca bir sıçrama bileşeni de kullanmışlardır. Yazarlar, sadece bir hafta için tahmin yapılan bu çalışmada, her bir saatin fiyatı için ayrı bir sabit ve sıçrama bileşenin kullanıldığı ARMA tipi modellerin daha başarılı olduğu sonucuna varmışlardır.

Weron ve Misiorek'in (2005) ABD'deki Kaliforniya elektrik piyasasında 1999 - 2000 yıllarına ait fiyat değerlerini kullanarak yaptıkları çalışmada, AR ve ARX (ilave açıklayıcı değişken olarak elektrik talebinin kullanıldığı) tipinde modeller geliştirilmiş ve ilave açıklayıcı değişken kullanmanın tahminleri iyileştirebildiği ifade edilmiştir. Benzer ama çok daha kapsamlı olan Weron ve Misiorek'in (2008) ABD'deki Kaliforniya elektrik piyasası (1999 - 2000 yılları) ve İskandinav ülkelerindeki NordPool elektrik piyasası (1998 - 1999 ile 2003 - 2004 yılları) için yapmış oldukları çalışmadaki AR, ARX (Kaliforniya için tüketim, Nord Pool için ise sıcaklık) ve TAR (eşik değer olarak bir gün önceki fiyat ortalaması ile 8 gün önceki fiyat ortalaması arasındaki farkın 0'dan büyük olup olmadığı kullanılmıştır) tipi modellerde, Kaliforniya için ARX, NordPool için ise 1999-2000 döneminde AR, 2003-2004 döneminde TAR tipi modelin daha iyi tahmin yaptığı görülmektedir. Ayrıca, her iki durumda da fiyatlardaki uç değerlerin kırılması tahminleri iyileştirebilmiştir.

Diğer bir çalışmada, Contreas ve diğerleri (2003) İspanya'daki ve Kaliforniya'daki elektrik piyasalarında 2000 yılı fiyatlarını kullanarak ARIMA ile tahmin yapmıştır. Bu çalışmada, oluşturulan modellere açıklayıcı değişken olarak İspanya için talep ve

hidroelektrik ünitelerin günlük kullanılabilir üretimleri, Kaliforniya için ise sadece talep dahil edilmiştir. Her iki piyasa için de tahmin edilecek fiyatın 24 saatten daha önceki değerleri kullanılmıştır ve bu durum aslında ileriye dönük fiyat tahmini açısından pek de kabul edilebilir değildir. Çünkü, bir sonraki gün için tahmin yapılacağına, eldeki fiyat verileri ancak 24 saat önceki değerlerden oluşmaktadır. Yine de bu çalışmada olduğu gibi fiyatın 24 saatten daha az gecikmeli değerlerinin kullanılması fiyat hareketlerini açıklamaya yönelik modelleme açısından anlamlıdır.

Saatlik elektrik fiyatlarının serbest piyasa koşulları altında arz-talep dengesine bağlı olarak oluşması ve bu süreçte her bir saat için oyuncular tarafından sunulan hacim-fiyat ikililerinden oluşan elektrik enerjisi alış ve satış tekliflerinin belirleyici olması, açıklanan çalışmaların haricindeki diğer birçok çalışmada da fiyat haricindeki açıklayıcı değişkenlerin kullanılmasının altyapısını oluşturmaktadır. Bu bağlamda Girish (2013), spot elektrik piyasasındaki fiyatları etkileyen faktörleri; yapısal (örneğin, yakıt fiyatları, iklim koşulları, sıcaklık, yağış miktarı, gün veya ay bilgisi ve ünite başına birim elektrik üretim maliyeti), operasyonel (örneğin, elektrik yükü/talebi, elektrik üretim seviyesi - yani arz açığı/fazlası, şebekedeki iletim kısıtları, şebeke bakım durumları), stratejik (örneğin, elektrik piyasasının yapısı, elektrik alım anlaşmaları, piyasa katılımcıları arasındaki ikili anlaşmalar) ve tarihi (geçmiş dönem fiyatları ve talepleri) olarak dört başlıkta sınıflandırmaktadır. Singh ve Mohanty (2015) ise daha basit bir sınıflandırma yaparak etkili faktörleri; sistem yükü, hidrolojik koşullar, yakıt fiyatları, ünitelerin çalışma karakteristikleri, emisyon izinleri ve iletim kapasitesi olarak sıralamaktadır.

Bu kapsamda, Nogales ve diğerleri (2002) ile Contreras ve diğerleri (2003) tarafından İspanya ve Kaliforniya elektrik piyasaları için oluşturulan dinamik regresyon ve transfer fonksiyonu bazlı modellemelerde talep değişkeni de kullanılmış ve talebin kullanıldığı modellerin başarılı olabildiği belirtilmiştir. Fiyat haricinde açıklayıcı değişkenin kullanıldığı diğer çalışmalara bakıldığında; Schmutz ve Elkuch (2004) tarafından doğalgaz fiyatlarının, kullanılabilir nükleer kapasitenin, sıcaklığın ve yağış miktarının yer aldığı çoklu regresyon modeli ile tahmin yapıldığı, Torro (2007) tarafından sıcaklığın, yağışın, barajlardaki su seviyesinin ve vadeli işlem piyasasındaki elektrik fiyatı ile spot piyasadaki fiyat arasındaki farkın ARIMAX tipi modelde, Giurguis ve

Felder’de (2004) ise akaryakıt ve doğalgaz fiyatlarının ARX tipi modelde ilave değişken olarak kullanıldığı görülmektedir.

Dışsal değişkenin kullanıldığı bu çalışmalara yönelik olarak, çalışılan piyasadaki mevcut elektriksel kurulu gücün kaynak dağılımı ile ilgili özelliklerin modellemelerde ele alınmaya çalışıldığı sonucuna varılabilir. Nitekim, termik tipteki santrallerin ağırlıklı olduğu bir elektrik sektörü için kullanılan yakıtların fiyatların ve santrallerin elektrik üretimindeki verimini etkileyen sıcaklığın veya hidroelektrik santrallerin ağırlıklı olduğu bir durum için yağış ve rezervuar seviyelerinin kurulan modellerde ilave değişken olarak kullanılması gayet anlamlıdır.

Finansal zaman serilerinde görüldüğü gibi elektrik piyasasında oluşan spot fiyatlarda da değişen varyans durumu ile karşılaşilmektedir. Bununla birlikte, AR, ARMA ve ARIMA tipindeki ekonometrik modellerin kullanılırken değişmeyen varyans varsayımı yapılmaktadır. Bu durumun yarattığı problemleri giderebilmek için Engle (1982) tarafından geliştirilen ARCH ve bunun genelleştirilmiş versiyonu GARCH modellerinden faydalanan çalışmalar bulunmaktadır. Weron (2006), ARCH ve GARCH modellerinin, yalın halde elektrik fiyatı tahmininde başarılı sonuçlar vermediklerinden, AR, ARMA ve ARIMA ile kurulan modellerle birlikte kullanıldığını belirtmektedir. Bu yönde yapılan çalışmalara örnek olarak Mugele ve diğerlerinin (2005) Avrupa’daki EEX, NordPool ve Ge SA elektrik piyasalarında ARMA-GARCH kullanılarak yaptıkları tahmin çalışması ile Swider ve Weber’in (2006) Almanya’daki RWE ve E.ON elektrik rezerv piyasalarındaki fiyatları spot piyasadaki fiyat bilgisini de kullanarak ARX-GARCH ve ARMAX-GARCH ile tahmin ettikleri çalışma gösterilebilir. Bu çalışmalarda GARCH’ın kullanılmasının tahminleri iyileştirdiği görülmektedir. Benzer şekilde, Garcia ve diğerlerinin (2005) İspanya ve Kaliforniya elektrik piyasalarını ele alan çalışmasında da ARIMA-GARCH modelinin yalın ARIMA’ya göre çok daha başarılı olduğu ancak bu durumun fiyatlarda yüksek oynaklıkların ve aşırılıkların bulunduğu dönemler için söz konusu olduğu sonucuna varılmıştır.

Elektrik fiyatlarındaki ani artış ve azalışların aşırı değerlerde gerçekleşebilmesi, fiyat oluşumunda farklı rejimlerin söz konusu olabileceğinden hareketle, tahmin çalışmalarını rejimler arasındaki geçişin doğrusal olmayan mekanizmaların kullanılmasına yönlendirmiştir. Weron (2006, s. 129) bu kapsamdaki çalışmaları, tercih edilecek rejimin gözlenebilen bir değişken ile belirlendiği (diğer bir ifadeyle belirli bir anda hangi rejimin geçerli olduğunun kesin şekilde bilindiği) ve gözlenemeyen bir değişken ile belirlendiği (diğer bir ifadeyle belirli bir anda hangi rejimin geçerli olduğunun olasılıklı olarak bilindiği) çalışmalar olarak ikiye ayırmaktadır.

Bu kapsamdaki çalışmalara örnek olarak, Weron ve Misiorek (2006) ile Misiorek ve diğerlerinin (2006) önceki dönem fiyatlarını kullanan bir eşik fonksiyonu (T) ile birlikte AR ve ARX (dışsal değişken sistem yükü kullanılmıştır) çalışmaları gösterebilir. Bu alandaki diğer türe örnek olarak ise, rejim değişiminin geçmiş dönem fiyatlarından yola çıkarak Markov değişim modeli ile açıklanmaya çalışıldığı Huisman ve Mahieu (2003) ile Huisman ve de Jong (2003) tarafından yapılan çalışmalar gösterilebilir.

Gün öncesi piyasasındaki saatlik elektrik fiyatlarının tahmininde kullanılan başka bir yöntem de yapay sinir ağlarıdır (YSA). YSA'ların bu türdeki bir zaman serisi için tahmin çalışmasında kullanılma nedeni, geleneksel yöntemler ile modellenmesi zor olan ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilmeleridir (Aggarwal ve diğerleri, 2009). Her ne kadar Weron (2006, s. 102) YSA'ları parametrik olmayan yöntemler arasında sınıflandırmış olsa da (bu sınıflandırmanın altında yatan neden, YSA'ların öğrenmeye çalışılan süreçlerdeki mekanizma ile fazla ilgilenmeden, girdi seti ile çıktı seti arasında bir bağlantı kurarak modelleme yapmalarıdır), öğrenme süreci sonrasında nöronlara atanan ağırlık değerlerinin girdilerin çıktılar üzerindeki belirleyiciliğini göstermesinden yola çıkarak YSA'ların yapısal ilişkilerin tespitinde etkin bir yöntem olarak kullanılabildiği söylenebilir.

Bu kapsamda yapılan çalışmalara örnek olarak Canejo ve diğerleri (2005) tarafından ABD'deki PJM piyasasında tahmin yapmaya yönelik olarak oluşturulan ve girdi olarak sadece geçmiş dönem fiyatlarını kullanan model verilebilir. Bu model, test edilen ve içlerinde ARIMA'nın da bulunduğu diğer modellere göre daha başarısız bulunmuştur.

Bu durumu, Weron'un (2006, s. 106) YSA'ların istatistiksel modellerle karşılaştırıldığında her zaman daha başarılı olmayabileceği değerlendirmesi ile örtüşmektedir. Ancak, Amjady (2006) ve Amjady ve Keynia (2008) tarafından İspanya için yapılan ve talep tahminini hiç kullanmayan çalışmalarda YSA'ların iyi sonuçlar verdiği, bu nedenle girdi seti iyi ayarlanmış bir YSA modelinin istatistiksel rakiplerini zorlayabileceği belirtilmiştir. Nitekim Pino ve diğerlerinin (2008) yine İspanya'daki piyasayı ele aldıkları çalışmada YSA'nın ARIMA'dan daha başarılı olabildiği ifade edilmektedir.

Benzer şekilde, Chogumaira ve Hiyama (2008) tarafından yapılan çalışmada geçmiş dönem fiyatları ve güncel talep verisi kullanılan YSA modelinin, elektrik fiyatlarının beklenmedik şekilde artış ve düşüş gösterdiği dönemler için bile ortalamada % 8 hata oranını yakalayabildiği ve bu bağlamda başarılı olduğu belirtilmektedir. Diğer taraftan Singal ve Swarup (2011), geçmiş dönem fiyatları ile birlikte tahmin yapılacak güne ve saate ilişkin bilginin, talebin ve talepteki değişimin girdi olarak kullanıldığı YSA modelinin, özellikle aşırı olmayan ani yüksek fiyat seviyelerinin görüldüğü dönemlerde elektrik fiyatlarını neredeyse birebir tahmin edebildiğini göstermiştir.

Literatürde, YSA'ların hibrit bir model oluşturmak üzere kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Zaman serisi şeklindeki elektrik fiyatı verilerinin Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) kullanılmak suretiyle kümelenerek YSA'ya sürülmesi sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Ismail ve Mansor'un (2011) Malezya, Gupta ve diğerlerinin (2013) Hindistan elektrik piyasalarında oluşan fiyatlar için yapmış oldukları çalışmalar Bulanık Mantık/YSAs türündeki hibrit modellere örnek olarak verilebilir. Verilerin kümelenmesine benzer bir yaklaşım, farklı fiyat oluşum karakteristiklerine sahip olduğunu düşünülen günlerin farklı YSA modelleriyle tahmin edilmesidir. Örneğin Wang ve Ramsay (1997), İngiltere'deki elektrik piyasası için Cumartesi, Pazar ve diğer tatil günlerinde oluşan fiyatları farklı modellerle tahmin etmeye çalışmıştır.

Elektrik fiyatı bilgisinin zaman bölgesinden (time domain) frekans bölgesine (frequency domain) taşınarak incelenmesinden sonra (yüksek ve düşük frekansları bileşenler şeklinde ayrıştırılarak veya ayrıştırılmayarak) YSA veya ekonometrik yöntemler ile

modellenmesi de literatürde karşılaşılan diğer bir yaklaşımdır. Zaman bölgesinden frekans bölgesine geçiş için Dalgacık Dönüşümü, Ayrık Kosinüs Dönüşümü ve Fourier Dönüşümü gibi yollara başvurulduğu görülmektedir. Bu kapsamdaki çalışmalara örnek olarak, Giri ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, ayrıştırma seviyesi üç olan beşinci dereceden Daubechies tipi dalgacık fonksiyonu ile elektrik fiyatı serisi dört seriye (ana seriye ait bir yaklaşık bileşen ve üç detay bileşen) bölünmüş ve YSA'ya girdi olarak bu şekilde sunulmuştur.

Dalgacık dönüşümünün kullanıldığı diğer bir çalışmada ise Wu ve Shahidehpour (2010) üç aşamalı olarak konumlandırılabilir hibrit modellemede, öncelikle fiyat serisi ile talep serisi arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek için ARMAX, artıklardaki değişen varyansı ele almak için de GARCH kullanmış, üçüncü olarak da talep serisi verisinin doğrusal ve durağan olmayan etkilerini ortaya çıkarmak için dalgacık dönüşümlü YSA yöntemiyle tahmin yapmıştır. Söz konusu çalışma ile PJM piyasası için birçok durum analizi yapılmış ve haftalık hataların (ortalama mutlak hata yüzdesi) % 5 seviyelerine indiği tahminler yapılmıştır. Diğer bir çalışmada Catalão ve diğerleri (2011), dalgacık dönüşümünü Bulanık Mantık/YSA ile hibritleyen bir modelleme yapmıştır.

Başka bir çalışmada Anbazhagan ve diğerleri (2010) Ayrık Kosinüs Dönüşümünü (AKD) ve YSA kullanarak zamana dayalı fiyat bilgisini frekans bölgesinde sınıflandırma yoluna gitmiş ve bu yöntemi İspanya ile New York elektrik piyasasındaki fiyatlara uygulamıştır. Bu çalışmada yazarlar, zaman serisi içerisinde korelasyonu daha açık ve yoğun şekilde ortaya koyabilmesi ve her zaman reel katsayılar ile işlem yapılabilmesi açısından AKD'nin tercih edildiğini belirtmişlerdir.

Fourier Dönüşümünün YSA ile birlikte kullanıldığı bir çalışmaya örnek olarak ise Aggarwal ve diğerlerinin (2014) New England elektrik piyasasında oluşan saatlik yük ve fiyatı tahmin etmeye yönelik çalışmaları örnek olarak verilebilir. Dalgacık dönüşümünün kullanıldığı benzer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da yük ve fiyat serileri Fourier dönüşümüne tabi tutulmuş, yüksek ve alçak frekansa sahip kümeler ayrıştırılarak ana ve detay fiyat/yük sinyalleri elde edilmiş ve daha sonra bu bileşen serileri ayrı ayrı YSA'ya sürülerek tahmin yapılmıştır.

Elektrik piyasasındaki fiyatların oynaklığını, fiyatları bileşenlerine ayırarak ele alan başka çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, Kim ve diğerlerinin (2005) transfer fonksiyonu, Canejo ve diğerleri (2005) ile Haiteng ve Niimura'nın (2004) ise ARIMA kullandıkları çalışmalarda, dalgacık dönüşümünden faydalanılmıştır. Dalgacık dönüşümünün kullanıldığı diğer bir çalışmada ise Tan ve diğerleri (2010) dalgacık dönüşümü ile ARIMA/GARCH'tan oluşan bir hibrit model geliştirmiş ve bu şekilde İspanya ile ABD'nin PJM piyasasındaki saatlik elektrik fiyatlarına yönelik olarak yaptıkları tahminleri başka bazı yöntemler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. ARIMA'dan ayrıca, Zhou ve diğerleri (2004) ile Zhou ve diğerlerinin (2006) Kaliforniya'daki elektrik fiyatlarını tahmin etmeye çalıştıkları modelde faydalanılmıştır. Bu çalışmada, saatlik elektrik fiyatları serisi periyodik olmayan trend bileşeni ve periyodik olan ayrı bir bileşen şeklinde ayrıştırılmış ve periyodik olan bileşen için mevsimsel ARIMA tipinde (SARIMA) bir model oluşturulmuştur.

İncelenen literatürdeki çalışmalarında ayrıca dikkat çeken bir husus, fiyatlardaki yüksek ve düşük aşırı değerlerin modellerdeki parametrelerin belirlenmesinde oynadıkları olumsuz rolün ele alındığı çalışmaların bulunmasıdır. Bu kapsamda, ele alınan fiyat serisi öncelikle bir ön işleminden geçirilmekte ve aşırı değerler serinin geneli ile uyumlu hale getirilmektedir. Bu çalışmalardan bazılarına örnek olarak Yamin ve diğerleri (2004), Canejo ve diğerleri (2005), Weron ve Misiorek (2008) verilebilir.

2.3. TÜRKİYE'DEKİ GÜN ÖNCESİ ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT TAHMİNİNE YÖNELİK ÇALIŞMALARI

Gün öncesi piyasasında oluşan saatlik elektrik fiyatlarının tahmin edilmesine yönelik olarak Türkiye'deki elektrik piyasası için yapılan çalışmalara bakıldığında, saatlik bazda işleyen bir elektrik piyasasının Aralık 2009'tan bu yana işletiliyor olmasına karşın yapılan çalışmaların azlığı ve bu çalışmalarda çoğunlukla henüz gerçek anlamda bir gün öncesi piyasasının işlerlik kazanmadığı Aralık 2011 öncesi dönemin ele alındığı göze çarpmaktadır.

Talaslı (2012) tarafından yapılan çalışmada Aralık 2009 ile Temmuz 2011 arasındaki dönemdeki gün öncesi planlama piyasasında oluşan saatlik elektrik fiyatları (SGÖF) kullanılmıştır. Bu çalışmada elektrik fiyatları, logaritmaları alındıktan sonra, deterministik bir fonksiyon ve çok faktörlü stokastik süreç ile modellenmiştir. Oluşturulan modelde, fiyatların günlük olağan seyri Brown hareketi ile açıklanmış olup fiyatlardaki şoklar, ilki uzun dönemli olanlar için kullanılan, diğer ikisi ise kısa dönemli şokları açıklamak üzere farklı ortalamaya dönüş hızlarına sahip olan üç sıçrama süreci ile modellenmiştir. Oluşturulan model ile Temmuz 2011 ve Eylül 2011 arasındaki dönemde yer alan fiyatlar saatlik değil haftalık ortalama bazında tahmin edilmiş ve buna rağmen haftalık hata oranı (haftalık ortalama mutlak hata yüzdesi, HOMHY) çoğunluğu % 10 civarında olmakla birlikte % 25'lerin üzerine çıkabilmiştir. Burada HOMHY Burada HOMHY hesaplamasında tahmin hatasının saatlik fiyatların haftalık ortalamasına oranı kullanılmıştır.

Diğer bir çalışmada ise Özgüner (2012), Ocak 2011 ile Aralık 2011 arasındaki dönemde gün öncesi planlama piyasasında oluşan saatlik elektrik fiyatları (SGÖF) üzerinde yapay sinir ağı kullanarak tahmin gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada girdi setinde; tahmin edilecek günün tipi (hafta sonu/içi), haftanın hangi günü ve saati için tahmin yapıldığı, tüketim tahmini, bir gün ve hafta önceki aynı saatte gerçekleşen fiyat ve tüketim değerleri ile bir önceki güne ait fiyat ve tüketim ortalamaları kullanılmış ve farklı mevsimlerden seçilen birer hafta için fiyat tahmini yapılmıştır. Yapılan tahminlerde % 4,77 (yaz ayında) ile % 12,08 (bahar ayında) arasında HOMHY değerleri elde edilmiştir. Fiyatlardaki aşırılıkların tahmin performansını olumsuz etkilediğinden hareketle, aşırı değerlerin setin genel trendi ile uyumlu hale getirilmesi sonucunda Şubat 2012'nin son iki haftası için yapılan tahminlerde, haftalık sırasıyla % 58,44 ve % 32,44 olan hatanın % 6,43 ve % 4,17 seviyelerine inebildiği görülmüştür. Burada, tahmin hatasının başarısı için kullanılan HOMHY'nin hesaplanmasında Talaslı'nın (2012) çalışmasındaki gibi hata miktarının "haftalık ortalama fiyat değeri"ne oranını baz alınmıştır. Weron ve Misiorek (2008) çalışmalarında belirtildiği gibi hata oranının bu şekilde hesaplanması düşük fiyat değerlerinden (özellikle 0'a yakın olanlar) kaynaklanan olumsuz etkinin giderilmesine imkan tanımaktadır. Ancak bu durumda,

düşük değerlerden aşırı şekilde sapan tahminlerin başarı performansına olan etkilerinin sınırlandırıldığı belirtilmesinde fayda vardır.

Yine 2011 yılındaki SGÖF değerlerinin kullanıldığı bir çalışmada Yıldırım ve diğerleri (2012), Mart 2011 fiyatları için ARX (girdi setinde bir gün önceki fiyat ve tüketim ile bir hafta önceki fiyat kullanılmıştır) ile Çok Değişkenli Uyumlu Regresyon Uzanımları (Multivariate Adaptive Regression Splines - MARS) modelleri ile tahmin yapmışlardır. Hata oranlarının ortalama mutlak hata (OMH) ve RMS hata şeklinde karşılaştırıldığı bu çalışmada MARS modelleri daha başarılı bulunmuştur.

SGÖF tahmini yapılan başka bir çalışmada ise Kölmek ve Navruz (2015), 2009 Aralık ile 2010 Kasım arasındaki dönemi ele almış ve hem YSA ile hem de AR modeli ile tahmin yapmışlardır. Bu çalışmada, Ekim 2010'daki ikinci, üçüncü ve dördüncü haftalar için YSA ve AR modelleri ile elde edilen sonuçlar HOMHY (buradaki hata hesaplamasında hatanın hafta ortalamasına değil tahmin yapılan saatin fiyatına oranı baz alınmıştır) üzerinden karşılaştırılmıştır. Girdi setinde, ikili anlaşma, takvim, günlük emre amade kapasite ve sıcaklık bilgileri test edilmekle birlikte en iyi tahmini yaptığı için tercih edilen YSA modelinin girdileri, 24 saat öncesi ve katlarındaki geçmiş dönem SGÖF değerleri ile tüketim tahmininden oluşmaktadır. AR modelinin girdileri ise 24, 48, 168 ve 336 saat önceki SGÖF değerleridir. Tahmin sonuçlarına göre ortalama % 14,15 hatalı tahmin yapan YSA modeli ortalama % 15,60 hatalı tahmin yapan AR modelinden daha başarılı bulunmuştur. Yazarlar ayrıca, SGÖF fiyatlarındaki aşırı değerlerin setin genel trendi ile uyumlu hale getirilmesi durumunda YSA ile yapılan tahminlerde hata oranının % 11,71'e düşebildiğini belirtmişlerdir.

Tayşi ve diğerleri (2015) ise, diğer çalışmaların aksine veri seti olarak gün öncesi piyasasının işler durumda olduğu görece güncel bir dönemi (Eylül 2013 - Ekim 2014 arası) inceleyen ve YSA ile SARIMA (PTF serisinde haftalık mevsimsellik olduğundan hareketle) modellerinin karşılaştırılmalı sonuçlarının gösterildiği bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmadaki HOMHY hesabında da sapma miktarı haftalık ortalama fiyata değil tahmin edilen saatin fiyatına bölünmüştür. Çalışmadaki YSA modelinin girdi seti, bir gün ve bir hafta önceki PTF değeri, son 24 saatteki ortalama PTF değeri ve takvim

bilgisinden (gün kodu için 1-7, iş günü kodu için 0-1 ve tatil günü kodu için 0-1) oluşmaktadır. AR modelinin girdi seti ise; 1 - 4 ve 24 - 27 saat önceki PTF değerlerinden oluşmaktadır. Veri setindeki her ayın üçüncü haftasının tahmin için seçildiği bu çalışmada, YSA modelinin hata oranı % 4,45 ile % 10,69 arasında, SARIMA modelinin hata oranı ise % 4,57 ile % 13,06 arasında değişmektedir. Yazarlar, hafta bazında yaptıkları karşılaştırmanın sonucunda, hata oranlarının birbirine yakın olduğunu ancak YSA modelinin genel ortalama hataya bakıldığında daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada oluşturulan modellerde dikkat çeken önemli bir nokta, hem YSA hem de SARIMA modelinde tahmin yapılırken aslında kullanılması mümkün olmayan girdilerin (YSA için son 24 saatteki ortalama PTF değeri, SARIMA için ise 1-4 saat önceki PTF değerleri) kullanılmış olmasıdır.

2.4. TEZ ÇALIŞMASININ KATKISI

Bu çalışmada ele alınan fiyatlar gün öncesi piyasasında oluşan saatlik piyasa takas fiyatlarıdır (PTF). Önceki çalışmalarda ele alınan dönemlerde ele alınan sistem gün öncesi fiyatları (SGÖF), gün öncesi piyasası devreye girmeden önceki dönemde uygulamada olan gün öncesi planlama piyasasında oluşan fiyatlardır ve oluşum mekanizması itibarıyla PTF'den önemli farklılıklar içermektedir.

Öncelikle, gün öncesi planlama döneminde talep tarafın fiyata bağlı olarak elektrik alış teklifi verememekteydi. Gün öncesi piyasasında ise talep tarafı fiyata bağlı alış teklifi sunabilmektedir. Diğer bir ifadeyle, gün öncesi planlama dönemi tek taraflı havuza, gün öncesi piyasası dönemi ise çift taraflı havuza denk gelmektedir (bkz. Şekil 4).

Diğer bir fark, gün öncesi planlama döneminde istisnasız tüm piyasa katılımcılarının gün öncesi dengeleme işlemlerine katılması gerekmekteyken gün öncesi piyasasına katılımın tercihe bağlı olmasıdır. Bu durum, saatlik fiyatlar arzın ve talebin tamamen piyasadaki oyuncuların sundukları teklifler dikkate alınarak marjinal fiyatlandırma prensibi ile dengelenmesi neticesinde hesaplandığından, gün öncesi planlamada ve gün öncesi piyasasında fiyat oluşumu açısından önemli bir farklılık yaratmaktadır.

Fiyat oluşumu açısından yaklaşıldığında, kısıt yönetiminin gün öncesi planlama döneminde gün öncesinde, gün öncesi piyasası döneminde ise tamamen gerçek zamanlı dengeleme piyasasında yapılıyor olması önemli bir farkı işaret etmektedir. Çünkü, kısıt yönetiminin gün öncesinde yapılması, iletim sisteminin belirli bölgelerinde ortaya çıkması beklenen sistem kısıtları (örneğin, hat/santral arızaları ve bakımlarından veya tamamen o bölgedeki tüketim-üretim profilinden kaynaklanabilen) nedeniyle bazı santrallerin ihtiyaç duyulan saatlerde istenilen bir seviyede üretim yapması zorunluluğunun fiyatı hesaplayan optimizasyon denkleminde bir kısıt olarak yer alması anlamına gelmektedir. Bu tür optimizasyon kısıtlarının bulunup bulunmaması ise diğer tüm koşulların aynı olması halinde bile farklı saatlik fiyatlar oluşması anlamına gelmektedir.

Ayrıca, elektrik sisteminde artan yenilenebilir enerji kapasitesi ve teşvik mekanizmasından (YEKDEM) yararlanarak bu portföyünde içerisinde yer alan (dolayısıyla fiyat oluşumu açısından bir anlamda fiyattan bağımsız teklif hacmi olarak değerlendirilen) santrallerinin, döviz kurları ile piyasa koşullarına bağlı olarak gittikçe artan toplam kapasitesi de fiyat oluşumu açısından gün öncesi planlama ile gün öncesi piyasa (özellikle günümüze yakın yılları) dönemlerini birbirinden ayırmaktadır.

Bu çerçevede bakıldığında, önceki çalışmalarda bu tez çalışmasındaki gibi gün öncesi piyasasındaki fiyat oluşumunun çalışıldığı tek çalışma Tayşi ve diğerleri (2015) tarafından yayınlanan ve Eylül 2013 - Ekim 2014 arasındaki dönemin ele alındığı makaledir. Bu dönem, tez çalışmasında ele alınan dönemle büyük oranda örtüşmektedir. Ancak, bu çalışmada oluşturulan YSA tahmin modelinde son 24 saate ait PTF bilgisinin, SARIMA tahmin modelinde ise son 1-4 saate ait PTF bilgisinin kullanılmış olması ve bu durumun fiyat tahmini yapılması açısından oluşturduğu çelişkiden hareketle, bu tezde oluşturulan modellerin gün öncesi piyasasında gerçek anlamda PTF tahmini yapan ilk çalışma olduğu söylenebilir.

Diğer taraftan, modelleme yöntemi açısından bakıldığında, daha önceki çalışmalarda SARIMA ve AR tipi ekonometrik modeller, Markov değişim modeli ve YSA tipi modeller kullanılmıştır. Ancak söz konusu çalışmaların hiç birisinde saatlik elektrik

fiyatı serisinin doğası gereği gösterdiği yüksek oynaklığı doğrudan ele alan bir yöntem kullanılmamıştır. Bu tez çalışmasında ise, ele alınan zaman serisini yaklaşık ve detay bileşenler şeklinde ayrıştırmaya imkan tanıyan Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transformation) saatlik elektrik fiyatı serisine uygulanmış ve bu yöntem ile tahmin performansının iyileşebildiği gösterilmiştir.

Önceki çalışmalarda modellerin girdi setinde geçmiş dönem fiyatları ile birlikte tüketim miktarı, ikili anlaşma, takvim ve saat, günlük emre amade kapasite ve sıcaklık bilgileri kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında ise, fiyatlar üzerindeki açıklayıcı rollerinin incelenmesine yönelik olarak; tüketim miktarı, ikili anlaşma ve takvim ile saat bilgilerine ilave olarak YEKDEM üretimi, toplam elektrik alış teklifi hacmi ve toplam elektrik satış teklifi hacmi girdi setinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Dalgacık Dönüşümünün kullanıldığı ve kullanılmadığı modeller için karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

Diğer taraftan, yapay sinir ağı ve dalgacık dönüşümünün kullanıldığı modellerin haricinde geliştirilen ekonometrik modellerde, daha önceki çalışmalarda değinilmeyen hata terimleri arasındaki ardışık ilişki ele alınarak giderilmiştir. Ayrıca, yapay sinir ağları ve ekonometrik modelleme, PTF'lerin dalgacık dönüşümü ile ayrıştırılmış olan yaklaşık ve detay bileşenleri üzerinde hibrit bir yaklaşım ile uygulanmıştır. Sonrasında, geliştirilen tüm modeller tahmin başarıları açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3. BÖLÜM

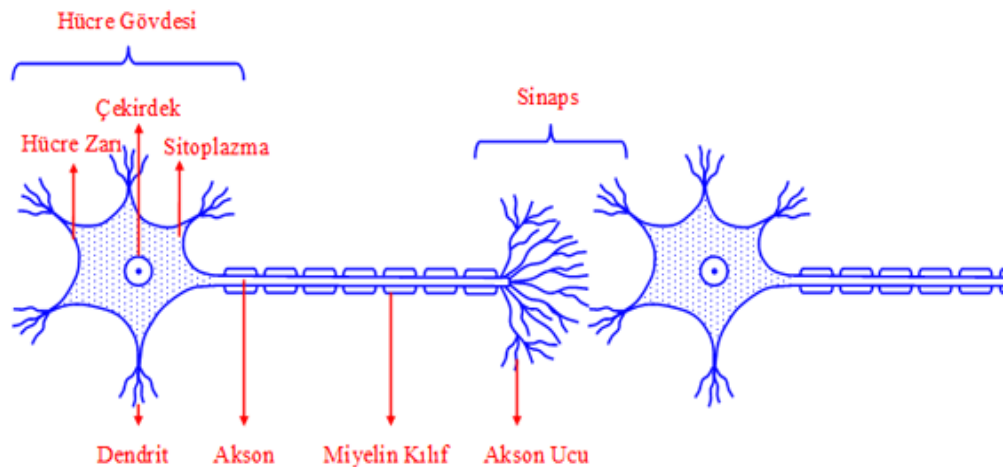
FİYAT TAHMİN MODELLERİNİN ALTYAPISI

Bu bölümde, ekonometrik yaklaşımın haricindeki, modellerin oluşturulmasında kullanılan Yapay Sinir Ağları ve Dalgacık Dönüşümü konuları ele alınmaktadır.

3.1. YAPAY SİNİR AĞLARI

Sinir hücrelerinden oluşan büyük ve karmaşık bir ağ olarak tanımlanabilecek olan insan beyni, çok gelişmiş ve hızlı bir öğrenme kabiliyetine sahiptir. Günlük, endüstriyel ve ekonomik tüm faaliyetleri kolaylaştıran bilgisayarlardan tamamen farklı şekilde işliyor olsa da beynimiz, karmaşık ve doğrusal olmayan bir şekilde işleyen paralel bir bilgisayar yapısı olarak ifade edilebilir (Haykin,1994, s.24).

Yukarıdaki tanımdan hareketle yapay sinir ağı (YSA), insan beynine gelişmiş özelliklerini sağlayan ve Şekil 7’de gösterilmekte olan sinir hücrelerinin (nöronlar) yapay olarak modellenmesine ve bu modellenmiş hücrelerden insan beyninin öğrenme özelliklerini taklit edebilen yapay bir ağ kurulmasına dayalıdır.



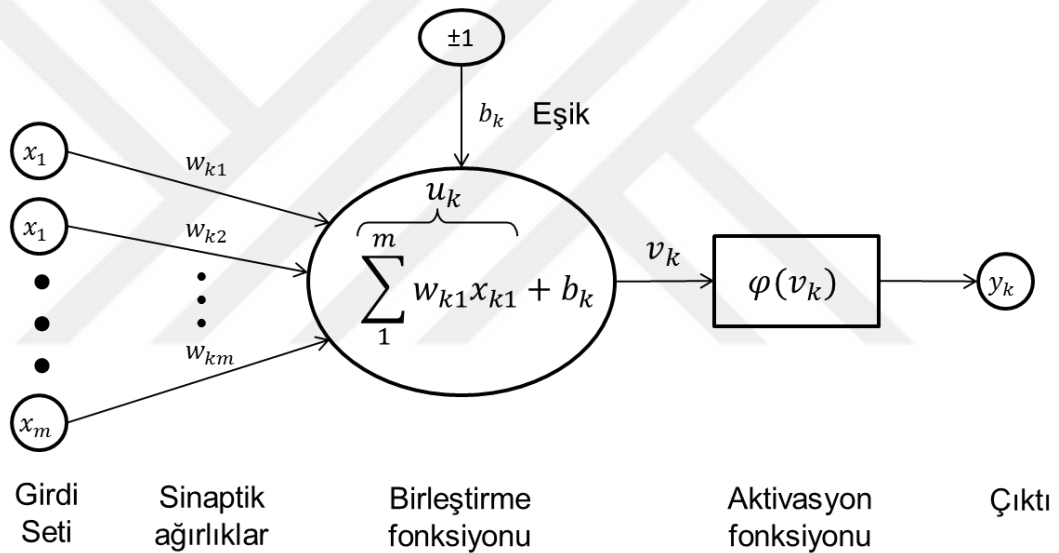
Şekil 7: Sinir hücresinin yapısı¹¹

¹¹ http://www.fenokulu.net/yeni/Fen-Konulari/Konu/Sinir-Hucresi-Noron-ve-Yapisi_1576.html

YSA'yı oluşturan yapay sinir hücreleri için şu temel varsayımlar söz konusudur (Hamzaçebi, 2011, s.11):

- i. Bilgi işleme süreci basit elemanlar olan sinir hücreleri vasıtasıyla yürür
- ii. Sinyaller sinir hücreleri arasındaki bağlantılarla iletilir
- iii. Sinir hücreleri arasındaki bağlantıların birer ağırlık değeri vardır
- iv. Her bir sinir hücresinde, net girdinin bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilmesi ile bir net çıktı elde edilir

Bu çerçevede, bir yapay sinir hücresi Şekil 8'deki gibi gösterilebilir:



Şekil 8: Yapay sinir hücresinin gösterimi¹²

Şekil 8'deki gösterime göre k sinir hücresindeki y_k çıktısı; $x_i: i = 1, 2, \dots, m$ girdi setindeki her bir girdinin farklı w_{ki} ağırlıkları ile çarpılması neticesinde ortaya çıkan değerlerin, birleştirme fonksiyonu içerisinde bir araya getirilmesi, b_k eşik değeri ile toplanması ile net girdi olan v_k 'nin elde edilmesi ve bu v_k 'nin bir $\varphi(\cdot)$ aktivasyon fonksiyonundan geçirilmesi ile bulunur. Buradaki b_k eşik değeri net girdi için bir anlamda doğrusal dönüşüm sağlar ve girdilerin birleştirilmesi sonucunda 0 sonucu bile ortaya çıksa hücrede pozitif veya negatif bir girdi oluşturur.

¹² Haykin, 1994, s.33'teki şekilden yola çıkılarak hazırlanmıştır.

Şekil 8’de birleştirme fonksiyonun en yaygın şekilde kullanılan genel toplam versiyonu gösterilmektedir. Ancak, birleştirme fonksiyonu için uygulamanın niteliğine göre kullanılabilecek çeşitli alternatifler vardır. Bunlardan bazıları Tablo 1’de gösterilmektedir.

Birleştirme fonksiyonu	Birleştirme fonksiyonunun işlevi
$v_k = \prod_i w_{ki}x_i$	Girdilerin ve ağırlıkların çarpılması
$v_k = \max(w_{ki}x_i)$	Girdilerin ve ağırlıkların çarpılması neticesinde elde edilen değerlerden en büyük olanın alınması
$v_k = \min(w_{ki}x_i)$	Girdilerin ve ağırlıkların çarpılması neticesinde elde edilen değerlerden en büyük olanın alınması
$v_k = \sum_i \text{sgn}(w_{ki}x_i)$	Girdilerin ve ağırlıkların çarpılması neticesinde elde edilen değerlerin işaret fonksiyonundan geçirilmesi ve sonuçların toplanması
$v_k = \sum_i w_{ki}x_i$	Girdilerin ve ağırlıkların çarpılması neticesinde elde edilen değerlerin toplanması

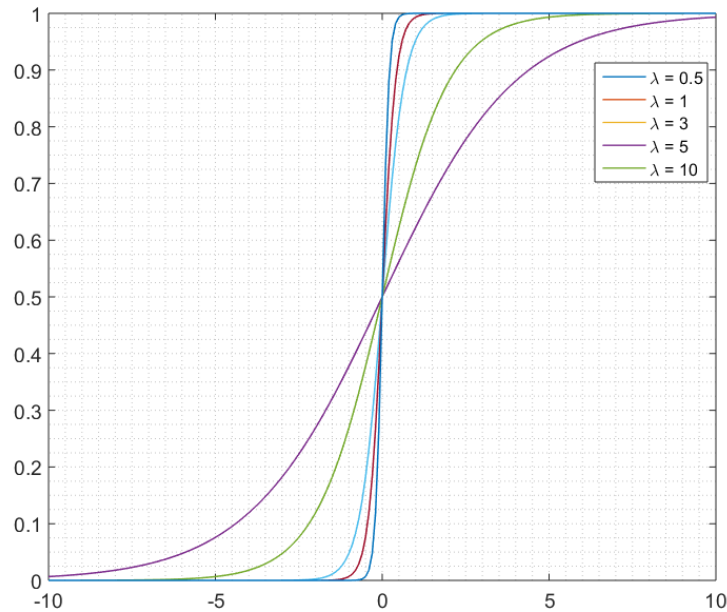
Tablo 1: Birleştirme fonksiyonu türleri

Çıktının oluşturulmasındaki son aşama net girdinin $\varphi(\cdot)$ aktivasyon fonksiyonunda geçirilmesidir. Aktivasyon fonksiyonu, sinir hücresinin nasıl davranacağını belirleyen önemli bir faktördür ve literatürde *sıkıştırma* veya *eşik fonksiyonu* olarak da adlandırılır. Zira aktivasyon fonksiyonu ile çıktı, $[0, 1]$ veya $[-1, 1]$ aralığında sınırlandırılır. Uygulamaya veya ağ yapısına bağlı olarak değişik fonksiyonlar kullanılabilmektedir (Hamzaçebi, 2011, s. 46). Bunlardan bazıları Tablo 2’deki gibidir.

Aktivasyon fonksiyonu	Aktivasyon fonksiyonun biçimi
Basamak	$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & v \geq x \\ 0 & v < x \end{cases}$
Doğrusal	$\varphi(v) = v$
Kısmi doğrusal	$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & v \geq \frac{1}{x} \\ v & \frac{1}{x} > v > -\frac{1}{x} \\ 0 & v \leq -\frac{1}{x} \end{cases}$ $x > 0$
Hiperbolik tanjant	$\varphi(v) = \tanh(v) = \frac{e^v - e^{-v}}{e^v + e^{-v}}$
Sigmoid	$\varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda v}}, \lambda > 0$

Tablo 2: Aktivasyon fonksiyonu türleri

En yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonu *sigmoid*'dir. Farklı λ değerleri için çizilmiş olan sigmoid fonksiyonları Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9: Sigmoid fonksiyonları

Matematiksel olarak modellenmiş sinir hücrelerinin çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanması ile oluşan YSA'ların birbirlerinden farklı özellikleri vardır. Bununla birlikte, YSA'ların sahip olduğu genel özellikleri şu şekilde sıralamak mümkündür (Öztemel, 2006, s.31):

Makine öğrenmesi: YSA'lar temel olarak bilgisayarların olayları öğrenerek benzer durumlar karşısında benzer kararlar vermesini sağlar.

Bilinen programlama yöntemlerinden ayrışma: YSA'lar sıradan bilgisayar programlamalarında kullanılan farklı bir bilgi işleme yöntemine sahiptir.

Bilginin saklanması: Diğer programlama uygulamalarının aksine bilgi, bir veri tabanında veya programın içerisinde değildir. YSA'larda bilgi, sinaptik ağırlıklar vasıtasıyla ağ içerisindeki bağlantılarda saklanır. Dolayısıyla, ağırlıklarda saklı olan bu bilginin ortaya çıkarılması ve yorumlanması kolay değildir.

Örnekleri kullanarak öğrenme: YSA'ların olayları öğrenebilmesi bu olaylarla ilgili örneklerin kendilerine gösterilmesi ile mümkündür. YSA'lar, bu örneklerden çıkardıkları sonuçlar ile genellemeler yapabilir ve öğrenme sağlayabilir. Dolayısıyla, doğru bir öğrenme için ilgili olayın tüm yönleriyle ağa gösterilmesi büyük önem taşır.

Öğrenme sonrası test yapılması: Öğrenme sonrasında istenen performansın sağlanabilmesi için YSA'ların teste tabi tutulması gerekir. Bu nedenle öğrenme süreci için ağa gösterilecek olan örnekler *eğitim seti* ve *test seti* olmak üzere ikiye ayrılır. Eğitim seti ile öğrenmeye tabi tutulan ağ, kendisine daha önce gösterilmeyen test seti üzerinde istenilen ölçüde doğru sonuçlar veriyorsa öğrenme tamamlanır. Aksi takdirde ise ağın yeniden (gerekirse ilgili olaya ilişkin yeni örnekler de gösterilerek) eğitilmesi gerekir.

Görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretme: YSA'lar kendilerine gösterilen örnekler ile sağlanan öğrenme sonrasında daha önce görmedikleri örnekler hakkında bilgi üretebilir.

Algılama için kullanılabilme: YSA'lar çoğunlukla algılamaya yönelik bilgilerin işlenmesi için kullanılmaktadır.

Örüntü (patern) ilişkilendirme ve sınıflandırma yapabilme: Öğrenme süreci ile kazandıkları genelleme yapabilme özellikleri sayesinde YSA'lar, örüntüleri tanımada ve girdilerin istenilen şekilde gruplandırılmasında/sınıflandırılmasında etkin şekilde kullanılabilir.

Kendi kendine organize olma ve öğrenme: YSA'lar, daha önce kendilerine gösterilen örneklerden yola çıkarak, yeni durumlara uyum sağlayabilir ve sürekli olarak yeni olayları öğrenebilir.

Eksik bilgi ile çalışabilme: Öğrenme süreçleri tamamlandıktan sonra YSA'lar, kendilerine gösterilen yeni örneklerde eksik bilgi olmasına rağmen çalışabilir ve başarılı sonuçlar verebilir. Bu noktada önemli olan, eksik bilginin taşıdığı önemdir. Eksik bilgi durumunda ağın performansının düşmemesi bu bilginin ağ açısından önemli bir bilgi olarak öğrenilmediği, aksi durum ise bu bilginin ağ için önemli olduğu anlamına gelir.

Hata toleransı: YSA'ların eksik bilgiye rağmen çalışabilme yetenekleri, hatalara karşı toleranslı oldukları anlamına gelir. Dolayısıyla, ağ içerisindeki bir hücrenin çalışamaz duruma gelmesine rağmen ağ doğru çalışmaya devam edebilir. Bunu sağlayan unsur, bozulan hücrenin yüksek sorumluluk taşımamasıdır. Diğer taraftan, hücrelerin önem derecesinin öğrenme süreci neticesinde ağ tarafından belirlenmesi, ağın bilgisinin yorumlanamaması anlamına gelmektedir.

Belirsiz/tam olmayan bilgileri işleyebilme: Öğrenme süreciyle olayları öğrenmiş olan YSA'lar, belirsiz bilgi durumlarında dahi öğrendikleri olaylar ile ilişki kurabilir.

Dereceli bozulma (graceful degradation): YSA'ların sahip oldukları hata toleransı, ağ içinde yaşanan hatalardan (eksik bilgi veya bozulan hücre durumu) kaynaklanan

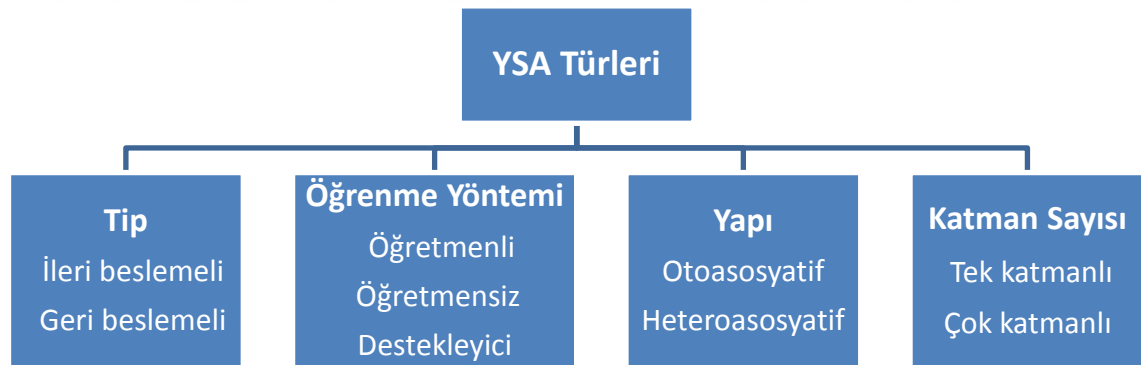
bozulmanın dereceli olmasını sağlar. Bu sayede ağlar, bir problem yaşandığında hemen bozulmazlar.

Dağıtık belleğe sahip olma: YSA’larda bilgi sinaptik ağırlıklar vasıtasıyla ağ içerisindeki bağlantılarda saklandığından, tek bir bağlantının anlamı yoktur. Çünkü öğrenilen bir olayın bütünü ağın tamamı tarafından karakterize edilir. Diğer bir ifadeyle bilgi tüm ağa dağıtılmıştır ve YSA’lar bu nedenle dağıtık bir belleğe sahiptir.

Sadece sayısal bilgi ile çalışma: YSA’lar sadece numerik bilgi ile çalışırlar. Bu nedenle, eğer varsa, sembolik ifadeler ile gösterilen bilginin ağa sayısal olarak sağlanması gerekir.

3.1.1. Yapay Sinir Ağı Türleri

Farklı uygulamalarda kullanılan ve farklı özellikleri olan YSA’ları, tiplerine, katman sayılarına, yapılarına ve öğrenme algoritmalarına göre Şekil 10’da gösterildiği gibi sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 10: YSA türleri (Hamzaçebi, 2011, s. 19)

3.1.1.1 Tiplerine Göre Yapay Sinir Ağları

YSA’lar tiplerine göre, nöronların aralarındaki bağlantının şekli esas alınarak ileri beslemeli ve geri beslemeli olarak sınıflandırılır.

İleri Beslemeli Ağlar: Bilginin girdi birimlerinden çıktı birimlerine ileri doğru iletildiği ağ türüdür. Dolayısıyla, ileri beslemeli ağlarda geri besleme özelliği yoktur.

Geri Beslemeli Ağlar: Bilgi iletiminin sadece ileri doğru olmadığı, geriye doğru da bilgi iletiminin gerçekleşebildiği ağ türüdür. Dolayısıyla, geri beslemeli ağlarda geri besleme özelliği vardır ve ağın çıktısı aynı zamanda bir girdi olarak kullanılabilir.

3.1.1.2 Öğrenme Yöntemine Göre Yapay Sinir Ağları

YSA'ların genel özelliklerinde de belirtildiği üzere YSA'ların çalışması bir öğrenme süreci ile başlar ve bu süreç, ağa gösterilen örnekler kullanılarak nöronlar arasındaki bağlantılara verilecek en uygun ağırlıkların belirlenmesini amaçlar. Bu kapsamda öğrenme süreci matematiksel olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$w^{yeni} = w^{eski} + \Delta w$$

Diğer bir ifadeyle ağırlıklar, öğrenme süreci içerisinde sürekli olarak bir Δw değişim miktarı ile güncellenir. Bu değişim miktarı, belirli bir kurala göre belirlenir ve bu kurallara öğrenme algoritması denir. En uygun ağırlık setini bulmak için çeşitli öğrenme algoritmaları mevcuttur. Bu algoritmalar *öğretmenli*, *öğretmensiz* ve *destekleyici* olmak üzere üç başlık altında toplanmaktadır.

3.1.1.2.1. Öğretmenli (Supervised) Öğrenme

Öğrenme sürecinin bir parçası olan eğitim sürecinde, çıktıların hedeflenen değerlerinin ağa gösterildiği algoritmaya öğretmenli öğrenme algoritması denir. Bu öğrenme türünde girdi ve çıktı setleri ağa verilir, ağ girdiyi kullanarak ürettiği çıktıyı hedeflenen çıktı ile karşılaştır ve ortaya çıkan hata en aza indirilecek şekilde ağırlıklar güncellenir. Bu güncelleme işlemi hata kabul edilebilir bir seviyeye indirilene kadar devam eder. YSA'ların öğrenme süreçlerinde kullanılan en yaygın ölçüm yöntemi RMS hata ölçümüdür. Bu türe örnek olarak Algılayıcılar (perceptrons), Geri Yayılım (Back Propagation) Ağı ve Boltzman Makinesi verilebilir. Literatürde en yaygın olarak karşılaşılan örnek, bu tezde de kullanılmış olan Geri Yayılım Ağı'dır.

3.1.1.2.2. Öğretmensiz (Unsupervised) Öğrenme

Bu öğrenme türünde çıktılar ağı verilmez. Bu türdeki öğrenme algoritmaları geçmiş veri kümesinde bulunan istatistiksel bilgilerin elde edilmesini hedefler. Dolayısıyla, girdiler aynı zamanda çıktı görevi görür, hem girdi hem de çıktı olan bilgiler arasındaki kural ve ilişkiler araştırılarak içlerinden en uygun olanı bulunur. Bu öğrenme türündeki YSA'lara örnek olarak Adaptif Rezonans Teorisi (ART), Hopfield Ağı ve Kohonen Ağı verilebilir.

3.1.1.2.3. Destekleyici (Reinforcement) Öğrenme

Bu öğrenme türünde, öğretmenli öğrenmede olduğu gibi bir öğretmen öğrenme sürecinde ağı yardımcı olur. Ancak, öğretmenli öğrenmede olduğu gibi ağı çıktı değerleri gösterilmez, bunun yerine ağı oluşturduğu çıktının doğru ve yanlış olduğuna dair yönlendirme yapılır ve ağıdan öğrenme sürecini bu şekilde tamamlayarak ilgili ağırlıkları belirlemesi beklenir. Bu öğrenme türünün kullanıldığı ağlara örnek olarak Doğrusal Vektör Parçalama (Linear Vector Quantization) modeli gösterilebilir (Öztemel, 2006, s. 115).

3.1.1.3 Yapısına Göre Yapay Sinir Ağları

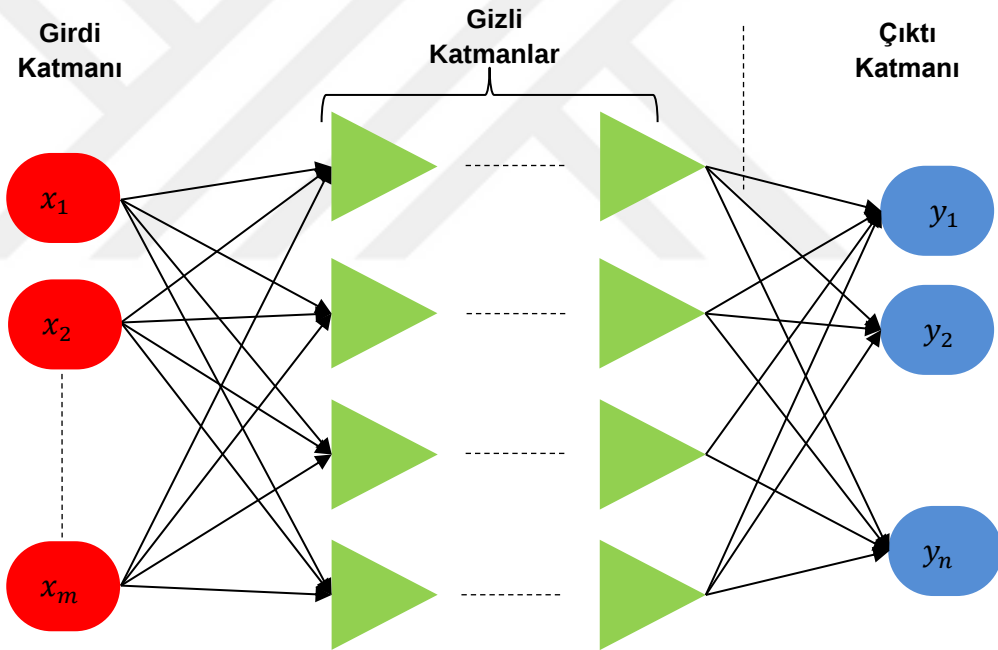
YSA'lar otoasosyatif ve heteroasosyatif olmak üzere iki yapı sınıfı altında incelenebilir.

Otoasosyatif Ağlar: Hopfield Ağları gibi girdi nöronlarının aynı zamanda çıktı nöronu olarak görev yaptığı ağlara verilen isimdir.

Heteroasosyatif Ağlar: Algılayıcılar (tek ve çok katmanlı) ve Kohonen Ağı gibi farklı girdi ve çıktı nöronlarının bulunduğu ağlara verilen isimdir.

3.1.1.4 Katman Sayısına Göre Yapay Sinir Ağları

YSA'ların temel taşları olan nöronlardan, benzer özellikleri gösterenlerden oluşan öbeğe katman denir. Örneğin, girdilerin ağına alındığı nöronların bulunduğu katmana *Girdi Katmanı*, ağıın içerisinde bulunan ve dışarı ile doğrudan irtibatı olmayan nöronların bulunduğu katmanlara *Gizli Katmanlar*, çıktıların elde edildiği nöronların bulunduğu katmana ise *Çıktı Katmanı* denir. Bu çerçevede YSA'lar, tek katmanlılar ve çok katmanlılar olmak üzere ikiye ayrılır. Karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmedeki becerileri nedeniyle yaygın şekilde kullanılmakta olan Çok Katmanlı YSA için genel görünümü gösteren şema Şekil 11'de verilmektedir. Tek bir nörondan oluşan tek katmanlı algılayıcıların şematik gösterim için ise Şekil 8'e bakılabilir.



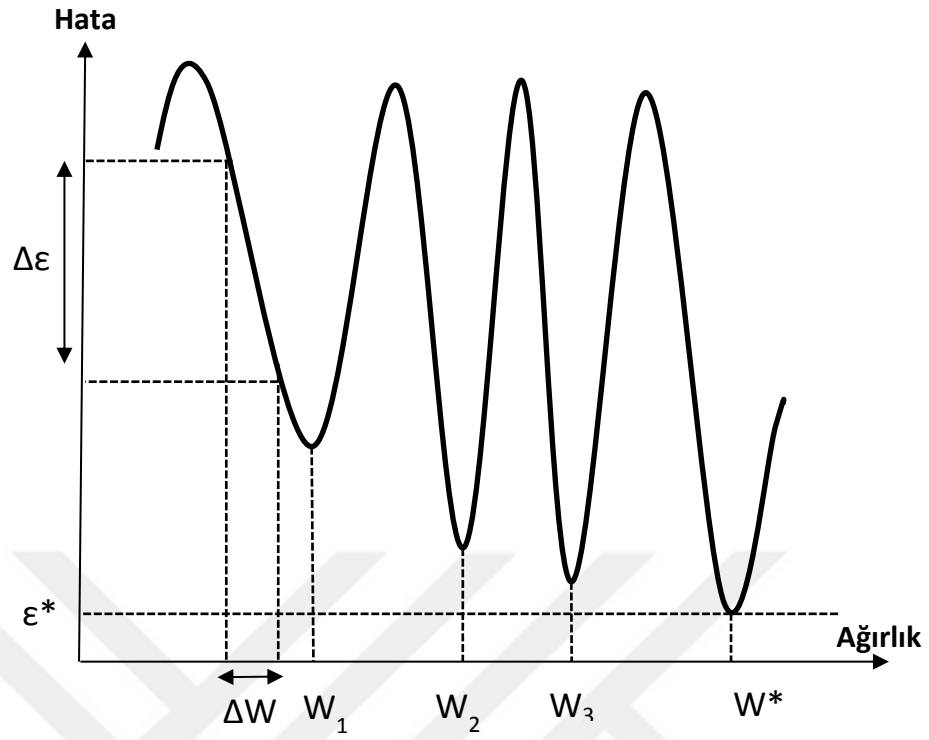
Şekil 11: Çok Katmanlı YSA

3.1.2. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme

Daha önce de belirtildiği gibi YSA'larda farklı öğrenme algoritmaları söz konusu olabilmektedir. Bununla birlikte, tek katmanlı ve çok katmanlı ağlar için öğrenme algoritmaları genelleştirilerek incelenebilir. Yapay sinir ağlarında öğrenmenin nasıl

gerçekleştiğine dair detaylı açıklama EK-1’de verilmektedir. Burada anlatılmakta olan öğrenme süreçlerinin işleyişinde temel amaç, ağı en düşük hata miktarına ulaşacak şekilde eğitime tabi tutulması ve nihayetinde en düşük hatayı sağlayan ağırlıkların bulunmasıdır.

Şekil 12’de gösterilmekte olduğu üzere; eğer en düşük hata miktarına ϵ^* denilecek olursa, hedef bu hatayı sağlayan W^* ağırlık setine ulaşmaktır. Eğitim süreci boyunca, hatadaki değişime ($\Delta\epsilon$) paralel olarak ağırlıklar belirli bir miktarda (ΔW) sürekli olarak değiştirilir. Süreç içerisinde yakalanandan daha düşük bir hata oranına ulaşıp ulaşılmadığı sürekli olarak kontrol edilmelidir. Aksi takdirde en iyi çözüm (diğer bir ifadeyle global optimum) olan W^* ağırlık seti yerine yerel çözümler (diğer bir ifadeyle yerel optimum) olan W_2 veya W_3 setinde takılıp kalınabilir. Bu durumdan momentum katsayısı olan α ile kaçınılmaya çalışılır. Bununla birlikte, eğer durdurma kriteri olarak ağı belirli bir hata miktarını sağlaması konulmuşsa, global minimuma ulaşılmadan öğrenmenin durdurulması söz konusu olabilir. Ancak bu durum, ağ zaten istenilen performansı gösterdiğinden bir sorun değildir. Diğer taraftan, ağırlıkların başlangıç değerlerinin yanlış seçilmesi veya girdi setinin ağa veriliş sırası ağı öğrenme sürecinin istenildiği kadar iyi sonuçlanmasını engelleyebilir. Bu tür sorunları gidermek için çeşitli önlemler alınarak en iyi çözüme ulaşmak mümkün olsa da bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Dolayısıyla, yapay sinir ağlarının en iyi çözümü değil kabul edilebilir bir çözümü ürettiklerini söylemek daha doğru olacaktır (Öztemel, 2006, s.33).



Şekil 12: YSA'nın öğrenme sürecinde hatanın gelişimi ve ağ ağırlıkları¹³

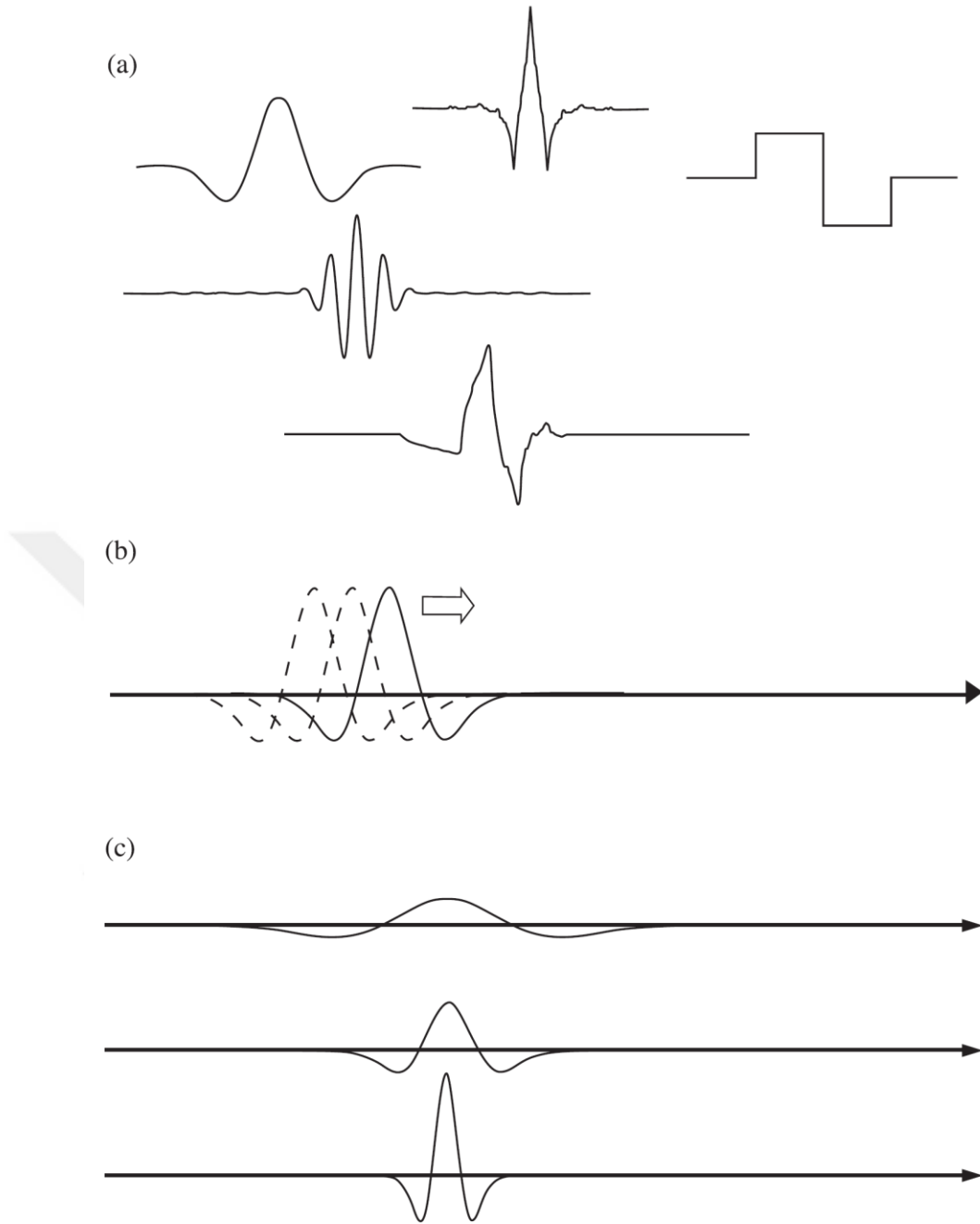
¹³ Bu şeklin oluşturulmasında Öztemel'de (2006, s.82-83) yer alan grafiklerden faydalanılmıştır.

3.2. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ

Dalgacık dönüşümü, bir işaretin içerisindeki bilginin daha faydalı bir gösterim şekliyle ifade edilmek üzere dönüştürülmesi için kullanılmaktadır. Bu dönüşüm, küçük bir dalgaya benzeyen ve hem genişliği hem de genliği üzerinde çalışılan işarete göre değiştirilebilen *dalgacık* adı verilen fonksiyonlar ile yapılmaktadır. Dalgacık dönüşümü matematiksel olarak, Fourier dönüşümünde olduğu gibi, bir işaretin dalgacık fonksiyonu ile katlanması (*convolution*) ifade eder (Addison, 2002, s.2).

Her ne kadar altındaki düşünceler çok önceden beri var olsa da, dalgacık dönüşümün günümüzde bilinen şekliyle uygulamalı matematik alanında kullanılmaya başlaması 1980'lerin başlarında gerçekleşmiştir (Küçük, 2006). Bu tarihlerde sismik işaretlerin sonlu süreye sahip ve titreşimli bir işaretin farklı şekilleri kullanılarak modellenmesi ile başlayan ancak sınırlı kalan çalışmalar, 1990'ların başında hız kazanmış ve dalgacık dönüşümünün işaret işleme alanında günümüzdeki yaygın kullanımının altyapısını oluşturmuştur (Addison, 2002, s.1; Küçük, 2006).

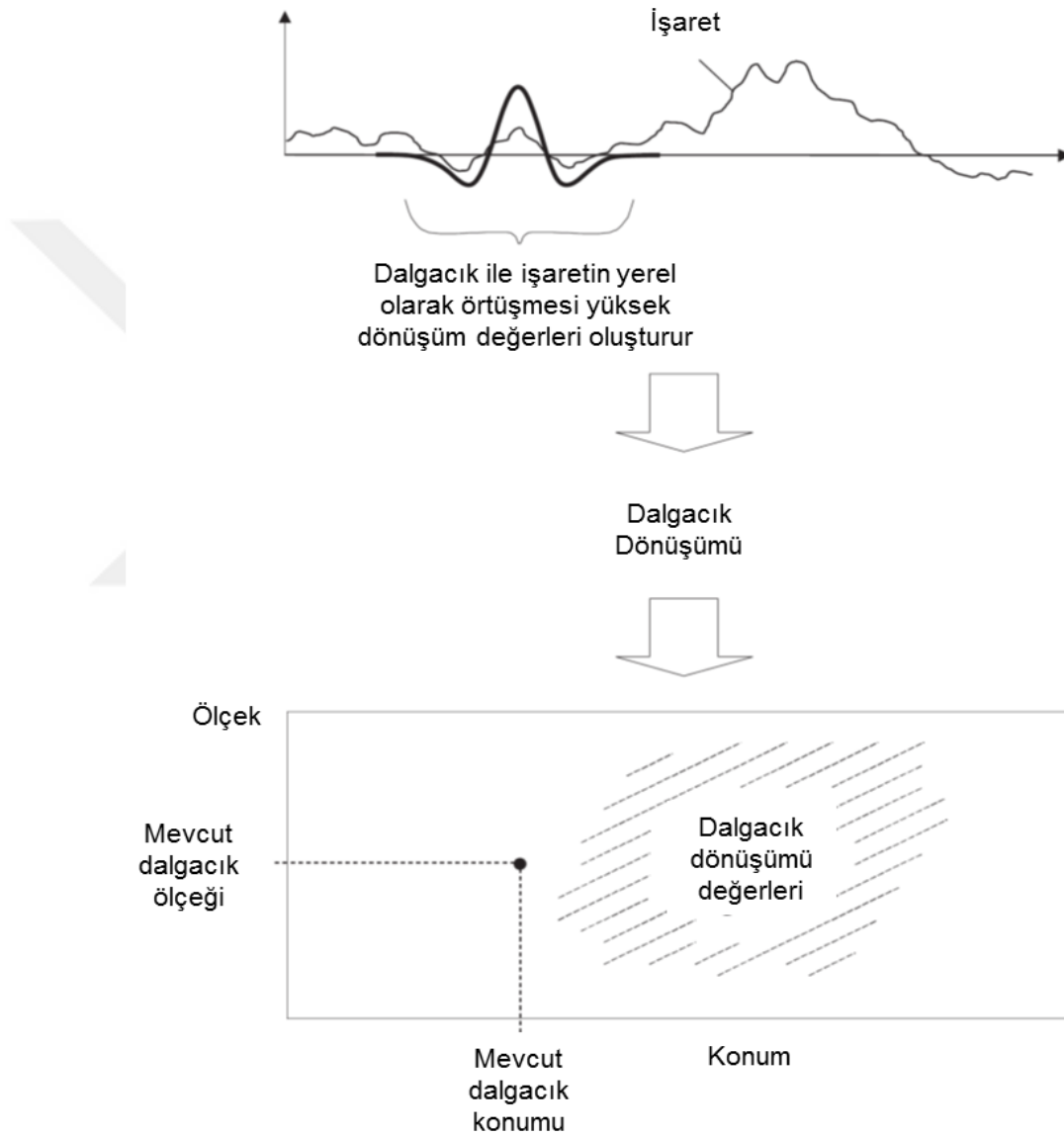
Dalgacık dönüşümü dalgacık fonksiyonlarının işaret ile katlanmasına dayalı olduğundan, bu işlem sırasında kullanılan dalgacıklar ölçeklendirilebilir (yani sıkıştırma veya genişletme) ve işaret üzerinde farklı konumlara kaydırılabilir. Şekil 13'te farklı dalgacık fonksiyonları ve dönüşüm sırasındaki konumlandırma ile ölçeklendirme görülmektedir.



Şekil 13: Farklı dalgacık fonksiyonları (a), konumlandırma (b), ölçeklendirme (c)
(Addison, 2002, s.3)

Bu çerçevede, bir işaretin dalgacık dönüşümü, bir dalgacık fonksiyonunun Şekil 13'te gösterildiği şekilde farklı ölçeklendirme değerleri ile bu işaret üzerinde katlanması ile gerçekleşir. Eğer dalgacık, işaret üzerindeki belirli bir noktada ve ölçeklendirme değerinde sinyal ile Şekil 14'teki üstte bulunan grafikte görüldüğü gibi örtüşüyorsa bu nokta için dönüşüm değeri (yani ilgili katsayı) yüksek olacaktır. Aksi durumda ise

düşük bir dönüşüm değeri elde edilecektir. Bu işlemin tüm işaret boyunca dalgacığın farklı ölçeklerdeki şekilleri için yapılmasıyla, işaret için 2 boyutlu dönüşüm düzlemini Şekil 8’de alta bulunan grafikte görüldüğü gibi dolduran dönüşüm değerleri elde edilmiş olur. Bu işlemi yapılacak uygulamaya göre *Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)* veya *Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD)* şeklinde yapmak mümkündür.



Şekil 14: Dalgacık dönüşümünün şematik gösterimi (Addison, 2002, s.4)

Dalgacık dönüşümünde kullanılacak olan dalgacık fonksiyonları iki temel şartı sağlamalıdır:

1. Sonlu enerjiye sahip olma: Bir fonksiyonun dalgacık olarak kullanılabilmesi için toplam enerjisinin sonlu olması gerekmektedir. Eğer dalgacık fonksiyonu $\psi(t)$ ile ve taşıdığı enerji E ile gösterilecek olursa bu durum sürekli bir fonksiyon için matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir (Addison, 2002, s.9):

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

2. Ortalamanın 0 olması: Dalgacık fonksiyonun ortalaması “0” olmalıdır (Mallat, 2009, s.102). Bu durum sürekli bir fonksiyon için matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

Diğer bir ifadeyle, eğer $\hat{\psi}(f)$, $\psi(t)$ dalgacık fonksiyonunun;

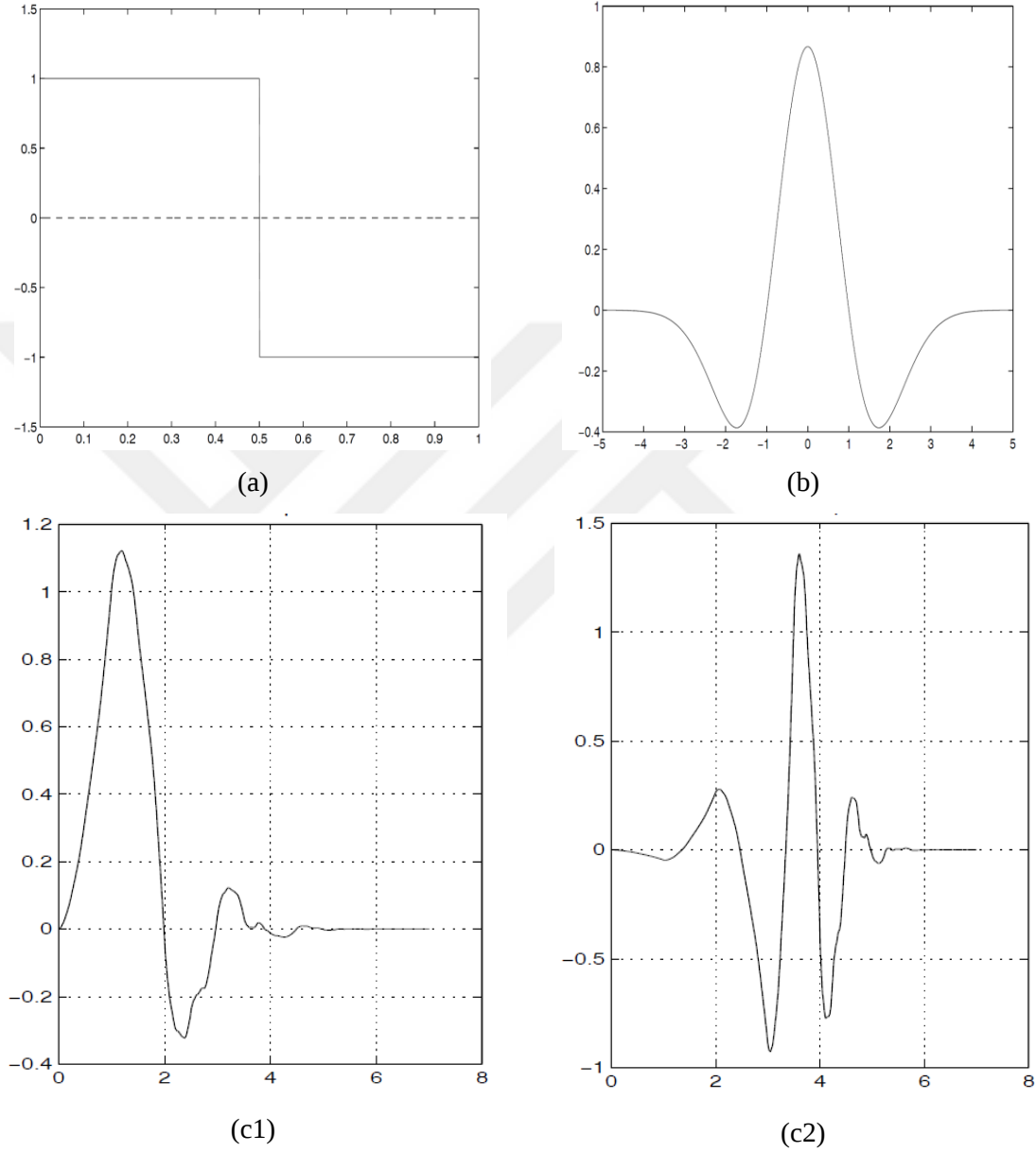
$$\hat{\psi}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i(2\pi f)t} dt \quad (3)$$

denklemleri ile ifade edilebilecek olan Fourier dönüşümü ise aşağıdaki şartın sağlanması gerekmektedir (Addison, 2002, s.9):

$$C_{\psi} = \int_0^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty \quad (4)$$

Bu şart, dalgacık fonksiyonunun herhangi bir 0 frekans bileşeni olmayacağı (yani $\hat{\psi}(0) = 0$) anlamına gelir. Bu durumda $\psi(t)$ dalgacık fonksiyonunun ortalaması 0'dır demektir. (4) numaralı denklem ile ifade edilen koşul “*uygunluk şartı*” ve C_{ψ} “*uygunluk sabiti*” olarak bilinir.

İfade edilen bu şartları sağlayan ve literatürde sıklıkla kullanılan dalgacık fonksiyonu türlerinden bazıları; *Haar*, *Meksikalı Şapkası* ve *Daubechies* dalgacık fonksiyonları olarak sıralanabilir. Bu dalgacıklar Şekil 15'te gösterilmektedir:

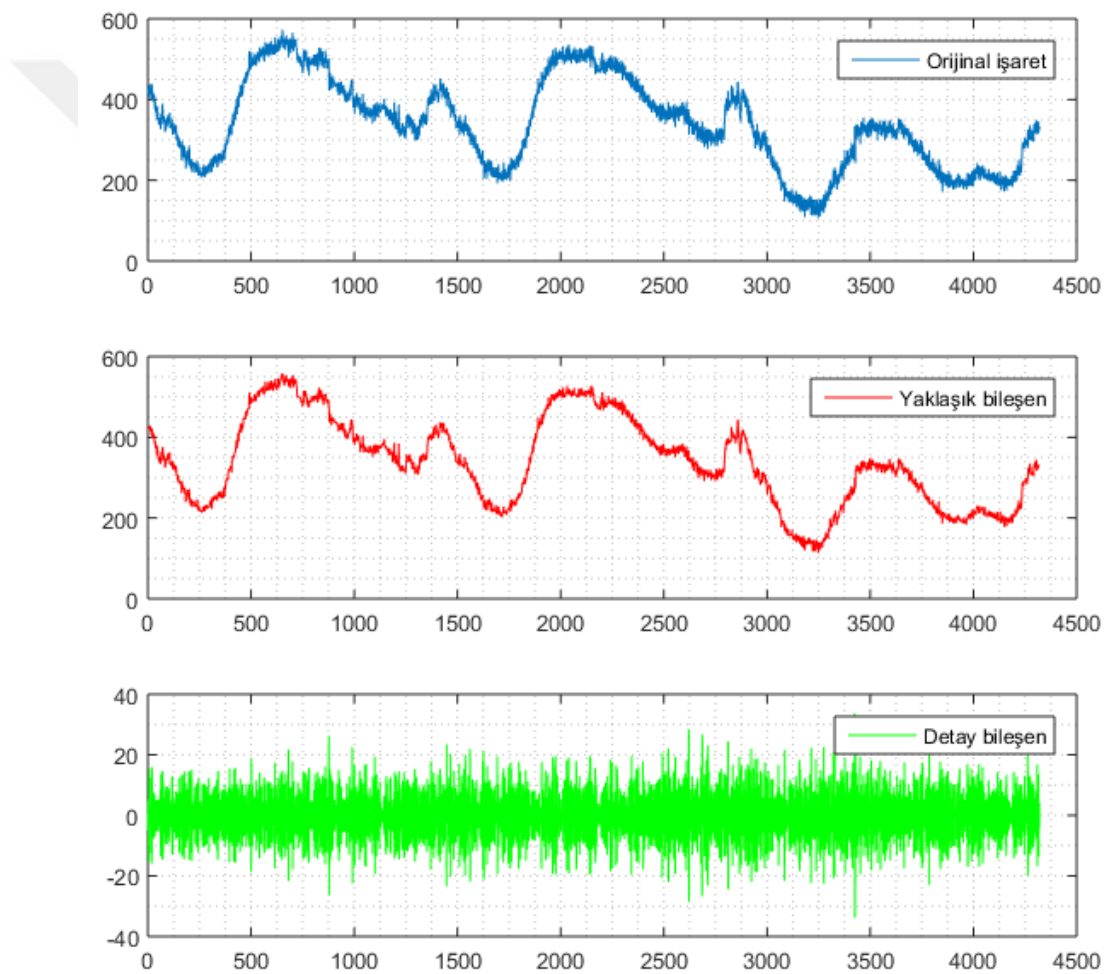


Şekil 15: Dalgacık fonksiyonları

(a) Haar, (b) Meksikalı Şapkası, (c) 4. derece Daubechies (c1: ölçek fonksiyonu, c2: dalgacık fonksiyonu)¹⁴

¹⁴ Şekiller, Hennie ter Morsche tarafından hazırlanan Wavelet Basics başlıklı bilgi notundan alınmıştır.

Dalgacık fonksiyonunu işaret işleme alanında çok kullanılır hale getiren temel özellik, bu dönüşümün Fourier dönüşümünün aksine değişken zaman pencereleri vasıtasıyla değişken zaman ve frekans çözünürlükleri sunmasıdır. Dalgacık dönüşümü, işlediği işareti önce farklı frekans bantlarına ayırıştırır ve sonrasında bu bantları zaman alanında analiz eder (Polikar, 2009). Eğer yaygın kullanımından örneklandırmek gerekirse dalgacık dönüşümü, işaretin, yüksek ve düşük frekanslı bileşenlerine (yaklaşık ve detay bileşenler) ayrılarak analiz edilmesine ve işlenmesine olanak sağlar. Bu ayrıştırma işleminin bir örneği Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16: Dalgacık dönüşümü örneği

Dalgacık dönüşümünün bu özelliği, yüksek derecede oynaklığa sahip olan zaman serilerinin analizinde sıklıkla kullanılmalarını sağlamıştır. Bu kapsamdaki çalışmalardan bazılarını örnek olarak; Pramanik ve diğerlerinin (2011) Brezilya’da günlük nehir akış

hızını, Jammazi'nin (2012) WTI ham petrol fiyatını, Catalão'nun (2011b) Portekiz'deki rüzgar enerjisinden elektrik üretim miktarını, Taşcıkaraoğlu'nun (2011) ise Türkiye'deki rüzgar hızını tahmin etmeye yönelik çalışmaları gösterilebilir.

Daha önce belirtildiği üzere dalgacık dönüşümünün yapılacak uygulamaya göre *Sürekli Dalgacık Dönüşümü* ve *Ayrık Dalgacık Dönüşümü* olmak üzere 2 temel türü vardır.

3.2.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık fonksiyonu olma özelliklerini sağlayan bir $\psi(t)$ fonksiyonu kullanılarak yapılan dalgacık dönüşümünün matematiksel gösterimi, diğer bir ifadeyle Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD), (5) numaralı denklemdeki gibidir.

$$W(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad a > 0, b \in \mathbb{R} \quad (5)$$

Burada $W(a, b)$ $x(t)$ işaretinin dalgacık dönüşümü, $w(a)$ dalgacığa ait ölçek fonksiyonu, $\psi^*(\cdot)$ dalgacık fonksiyonunun karmaşık eşleniği, b ise dalgacık fonksiyonunun üzerinde çalışılan işaret boyunca kaydırılmasını sağlayan katsayıdır.

Bir dalgacık fonksiyonu için $w(a)$ tipik olarak $1/\sqrt{a}$ olarak alınır. Böylelikle, dalgacık fonksiyonları bir anlamda normalize edilmiş ve dönüşümde kullanılan tüm dalgacık fonksiyonları aynı enerji seviyesine sahip olmuş olur. Bu durumda, dönüşümde kullanılan normalize edilmiş dalgacık fonksiyonu aslında (6) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilir.

$$\psi_{a,b}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (6)$$

Dolayısıyla sürekli dalgacık dönüşümü matematiksel olarak (7) numaralı denklemdeki ifade edilebilir.

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (7)$$

Dalgacık dönüşümün daha sade şekildeki ifadesi (8) numaralı denklemde verilmektedir. Burada $\langle \cdot \rangle$ operatörü iç çarpımı ifade etmektedir.

$$W(a, b) = \langle x, \psi_{a,b}^* \rangle \quad (8)$$

SDD ile dönüştürülen $x(t)$ işareti, Ters Sürekli Dalgacık Dönüşümü (TSDD) yapılarak geri elde edilebilir. Bu geri dönüşüme ilişkin formül (9) numaralı denklemdeki gibidir.

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{a^2} W(a, b) \psi_{a,b} da db \quad (9)$$

(4) numaralı denklemden hatırlanacağı üzere C_ψ dalgacık fonksiyonuna ait “*uygunluk sabiti*”dir ve fonksiyonun bir dalgacık olarak kabul edilebilmesi için “0” ortalamaya sahip olması şartından gelmektedir. Eğer (9) numaralı denklemde integral işlemi a parametresi için 0’den değil de belirli bir a_c değerinden başlatılacak olursa, yani;

$$x_c(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{a_c}^{\infty} \frac{1}{a^2} W(a, b) \psi_{a,b} da db \quad (10)$$

olursa, $x(t)$ işaretinin belirli bir eşik frekans değerinin altındaki bileşenleri geri dönüştürülmüş olur. Böylelikle, işaretin farklı frekans aralıklarına ait kısımları geri dönüştürülerek incelenmesi veya yaygın uygulamalarda olduğu gibi işaretin filtrelenerek gürültüden arındırılması gibi işlemler yapılabilir. Bu gürültü süzme işleminin genel grafiksel gösterimi için Şekil 10’a ve literatürde yer alan örnek bir çalışma için Vatansever ve diğerlerinin (2002) çalışmasına bakılabilir.

3.2.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD)

Dalgacık dönüşümün günümüzdeki uygulamalarında olduğu gibi sayısal işaret işlemede veya zaman serisi analizinde kullanılabilmesi, dönüşümün sayısal ortamda yapılabilen ayrık versiyonunun kullanılır hale gelebilmesi ile mümkün olmuştur. Polikar (2009) bunun Daubechies tipi dalgacığa da ismini veren Ingrid Daubechies tarafından a ve b parametrelerinin ayrık hale getirilmesi ile ortonormal baz dalgacık fonksiyonlarının elde edilebilmesinin sağlanması ve sonrasında Stephane G. Mallat (1989) tarafından Çoklu Çözünürlük Analizi'nin Ayrık Dalgacık Dönüşümünün (ADD) hesaplanmasında kullanılabileceğinin gösterilmesi ile mümkün olduğunu ifade etmektedir.

Bu noktadan hareketle, $a = a_0^m$ ve $b = nb_0a_0^m$ alınarak dalgacık fonksiyonu $\psi(t)$ ayrık biçimde şöyle gösterilebilir (Lee, 1994; Addison, 2002, s.65):

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0a_0^m}{a_0^m}\right), \quad a_0 > 1, \quad b_0 > 0 \quad (11)$$

Burada m ve n sırasıyla, ölçeği ve işaret üzerinde kaydırılma miktarını belirleyen tam sayılardır. Bu durumda (5) numaralı denklem ile verilen SDD, ayrık dalgacıklar cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$W_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t - nb_0a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (12)$$

veya iç çarpım şeklinde ifade edilecek olursa;

$$W_{m,n} = \langle x, \psi_{m,n}^* \rangle$$

Yaygın uygulamada olduğu gibi $a_0 = 2$ ve $b_0 = 1$ alındığında (bu durumda dalgacıklar birim enerjiye sahip olur), (11) numaralı denklem ile gösterilen dalgacık formülü şöyle olacaktır:

$$\psi_{m,n}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi^*\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}t - n) \quad (13)$$

Dolayısıyla (12) numaralı denklemdeki ADD formülü ayrık biçimde şu şekle gelecektir:

$$W_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (14)$$

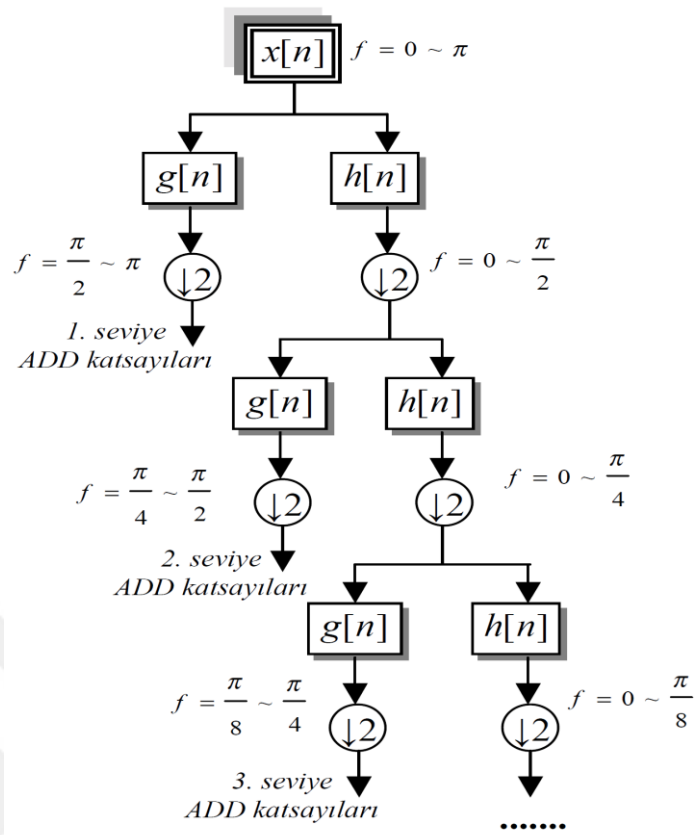
Bu durumda eğer ADD'den orijinal işareti elde etmek için yapılacak olan Ters Ayrık Dalgacık Dönüşümü (TADD) (15) numaralı denklemdeki gibi olur.

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} W_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (15)$$

Dolayısıyla, bir işaretin üzerinde ADD işlemi uygulanırken işaret ile dalgacık fonksiyonunun iç çarpımı alınırken, işaretin TADD yapılarak geri elde edilmesi sonsuz toplamalarla sağlanmaktadır.

Bu matematiksel altyapı ile birlikte ADD'nin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan önemli faktör, ADD'nin bilgisayar ortamında sayısal işaretler (veya zaman serileri) üzerinde bir sayısal algoritma ile uygulanabilmesi olmuştur. Mallat'ın (1989) çoklu çözünürlük gösterimi hakkındaki çalışmasında ADD işleminin, işaret üzerinde döngülü biçimde düşük-geçirgen ve yüksek-geçirgen filterelerin uygulanması ve elde edilen serinin bir veri kaybı olmayacak şekilde 2 ile örnek azaltmaya (downsampling) tabi tutulması ile gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir (Polikar, 2009). Grafiksel olarak Şekil 17'de gösterilmekte olan bu işlem, çoklu çözünürlük gösteriminden yola çıkılarak (17) numaralı denklemde gösterildiği gibi işaretin yaklaşık ve detay bileşenlerine ayrılmasına dayanır (Addison, 2002, s.70). Burada; m_0 belirli bir ölçeği, $w_{m_0,n}$ dalgacık fonksiyonunun ölçek fonksiyonunu, $S_{m_0,n}$ ise işaretin ölçek fonksiyonu ile katlanması sonucunda ortaya çıkan yaklaşık bileşen katsayılarını ifade etmektedir.

$$x(t) = \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{m_0,n} w_{m_0,n}}_{\text{Yaklaşık bileşen}} + \underbrace{\sum_{m=-\infty}^{m_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} W_{m,n} \psi_{m,n}(t)}_{\text{Detay bileşen}} \quad (16)$$



Şekil 17: Ayrık Dalgacık Dönüşümü akış şeması (Vatansever ve diğerleri, 2002)

Şekil 17’de farklı seviyelerde elde edilen dalgacık dönüşümü katsayılarının her bir adımda nasıl oluştuğu ve bu süreç içerisinde orijinal işaretin aslen $[0, \pi]$ aralığında olan frekans dağılımının farklı seviyelerdeki ADD bileşenlerinde nasıl değişmekte olduğu görülmektedir. Şekilde görülmekte olan $g[n]$ ve $h[n]$ sırasıyla, yüksek ve düşük geçirgen filtrelerdir ve dönüşümde kullanılan dalgacık fonksiyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu durumda, orijinal $x[n]$ işaretinden yüksek ve düşük frekanslı ADD katsayılarının elde edilmesi (17) numaralı denklemde gösterildiği gibi olmaktadır.

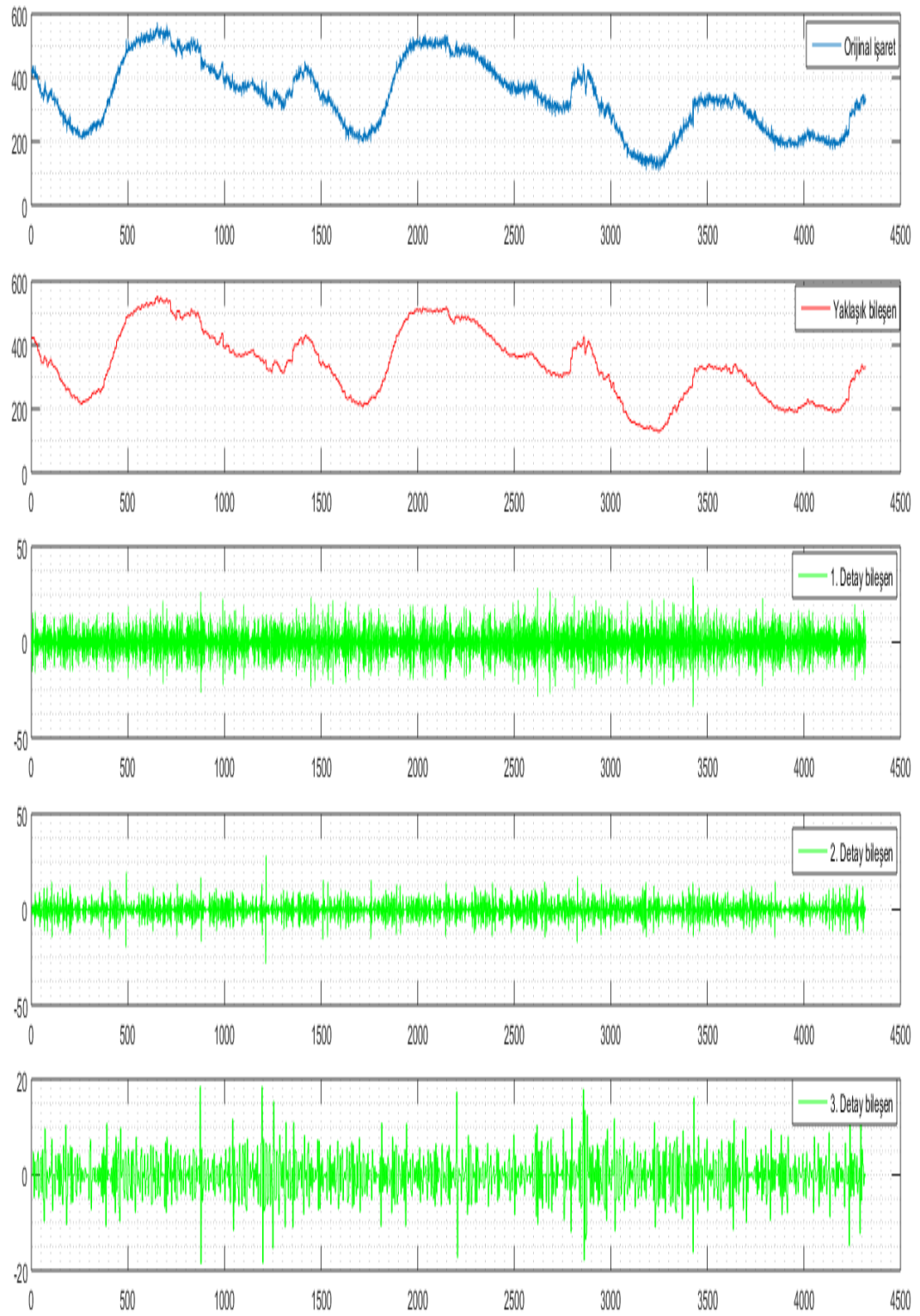
$$\begin{aligned}
 y_{yüksek}[k] &= \sum_n x[n] \cdot g[2k - n] \\
 y_{düşük}[k] &= \sum_n x[n] \cdot h[2k - n]
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Burada, N $x[n]$ serisindeki toplam örnek sayısı olmak üzere, düşük ve yüksek geçirgen filtreler arasındaki ilişkin 18 numaralı denklemdeki gibidir.

$$h[N - 1 - n] = (-1)^n g[n] \quad (18)$$

(17) numaralı denklemle ile esasen 1. seviye ADD katsayıları elde edilmektedir. Böylelikle, $g[n]$ filtresinin çıktısı ile orijinal sinyale ait 1. seviye “*detay bileşen*”, $h[n]$ filtresinin çıktısı ile ise orijinal sinyale ait 1. seviye “*yaklaşık bileşen*” elde edilmektedir. Diğer seviyedeki yaklaşık ve detay bileşenler ise, bir önceki seviyede elde edilen yaklaşık bileşenin yeniden yüksek ve düşük geçirgen filtreden geçirilmesi sürecinin işletilmesiyle elde edilmektedir. Dolayısıyla, eğer bir işaretin l seviyesindeki ADD dönüşümüne ait katsayıların bulunmasına kadar gidilecek olursa, toplamda 1 adet *yaklaşık bileşen* ve l adet *detay bileşen* elde edilmiş olur.

Şekil 10’da gösterilen dalgacık dönüşümü örneği “*Haar*” tipinde bir dalgacık fonksiyonu kullanılarak yapılan ve 1. seviye ile sınırlı tutulan bir ADD neticesinde ortaya çıkan yaklaşık ve detay bileşenlere ait katsayıların TADD ile tekrar geri dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Eğer bu ADD işlemi 3. seviyeye kadar yapılırsa, yaklaşık ve detay bileşenlerin zaman eksenindeki gösterimi Şekil 18’deki gibi olacaktır.



Şekil 18: Orijinal işaret ile Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile elde edilen bileşenler

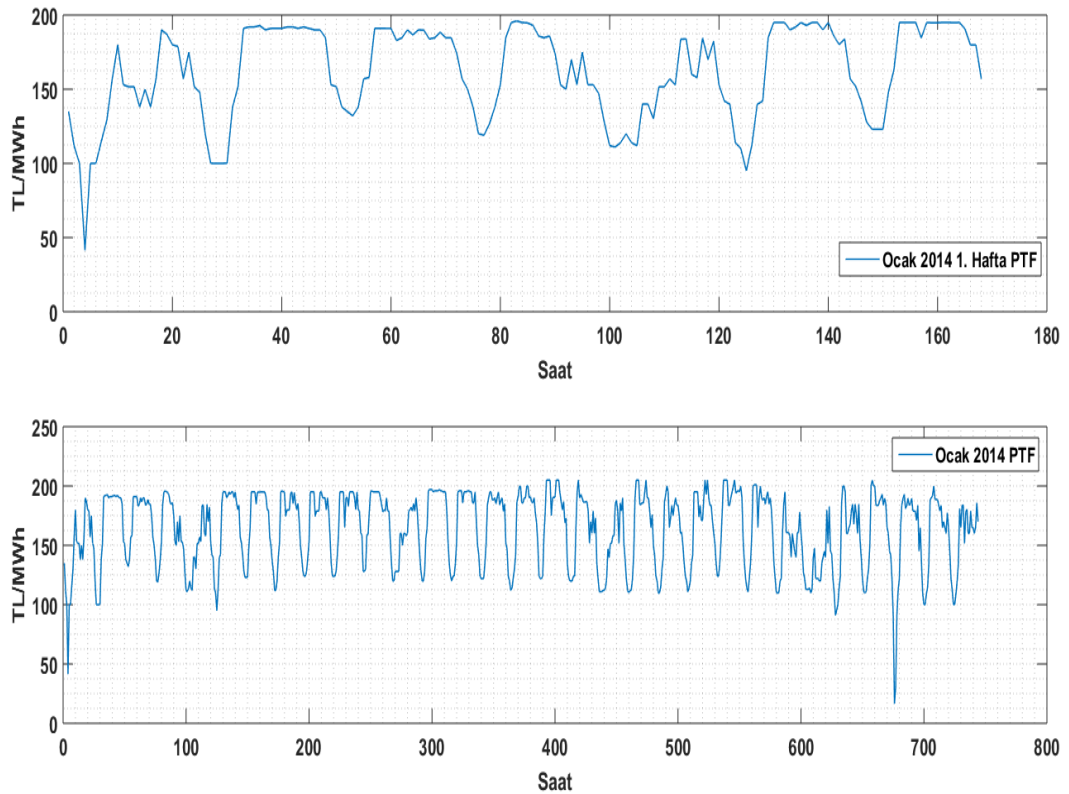
4. BÖLÜM

TÜRKİYE GÜN ÖNCESİ ELEKTRİK PİYASASINDA FİYAT TAHMİNİ

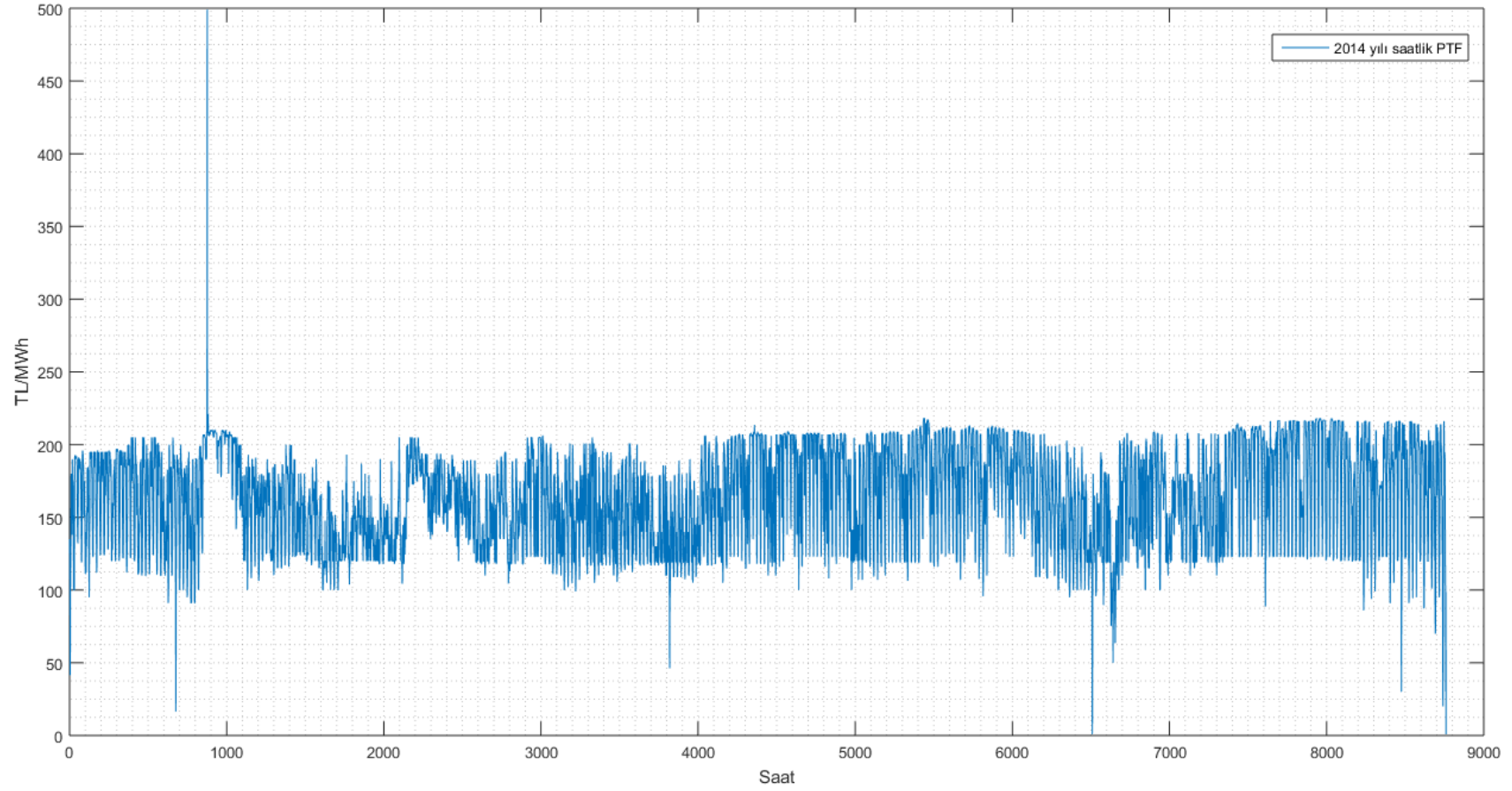
4.1. MODELDE KULLANILAN FİYATLAR

Fiyat tahminine yönelik modellemelerde kullanılan fiyat serisi 2014 yılına ait saatlik piyasa takas fiyatları (PTF) olup Şekil 20’de gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere saatlik PTF değerleri yıl içerisinde oynak bir seyir izlemektedir.

Ayrıca, eğer Ocak ayına ait ilk hafta ile ayın tamamının Şekil 19’da gösterilen PTF değerlerine bakılacak olursa, PTF serisinin günlük bir dönemselliğe sahip olduğu da göze çarpmaktadır.



Şekil 19: 2014 yılı Ocak ayına ait saatlik PTF değerleri



Şekil 20: 2014 yılı saatlik PTF değerleri

Şekil 20’de çizilmiş olan PTF değerleri yıl boyunca sadece 2 saatte aşırı düşük bir değere inmiş ve 1 TL/MWh’nin altında gerçekleşmiştir. PTF’nin en yüksek değeri ise grafikte açık bir sıradışı durum olarak göze çarpmaktadır. Bu durum Şubat ayının 2. haftasındaki bir güne ait olup bu gündeki PTF değeri 499,03 TL/MWh ile yılın en yüksek değeridir.

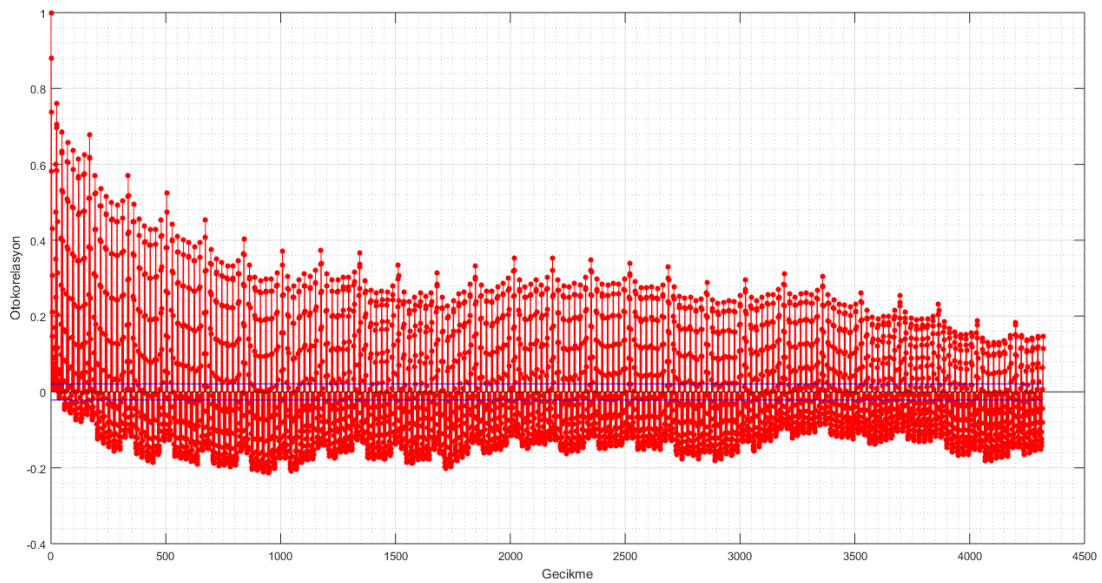
Yukarıda ifade edilen türden yüksek sıra dışı durumlar, elektrik üretiminin ağırlıklı şekilde bağımlı olduğu doğalgazın temininde, zorlu kış koşulları ile artan ısınma ihtiyacına (dolayısıyla doğalgaz tüketimi) paralel olarak elektrik santralleri tarafında yaşanan sıkıntılardan veya büyük ölçekli arızalardan (santral veya iletim hattı) kaynaklanmaktadır. Bu durumda, düşen emre amade elektrik üretim kapasitesi kaynaklı olarak saatlik elektrik temin maliyeti çok yükselebilmektedir. Diğer taraftan, düşük sıra dışı fiyatlar, elektrik enerjisi temininde fiyattan bağımsız teklif olarak değerlendirilen YEKDEM kapsamındaki üretimin çok yüksek olması, saatlik talepte beklenmeyen bir düşüş ortaya çıkması veya toplam ikili anlaşma hacminin talebin tamamına yakın miktarını karşılaması nedeniyle ilave net yük alma talimatı üretilmemesi gibi durumlardan kaynaklanmaktadır.

Yukarıda kısaca ifade edilen aykırı durumların, fiyat oluşum mekanizmasını öğrenmeye çalışan bir modelin öğrenme sürecini yanlış yönlendiriyor olacağından hareketle, ele alınan fiyat serisinde bazı düzeltmeler yapılmasının faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Literatürde bu tür durumlarda, oluşan aykırı değerın kırılması veya aykırı değerin yerine komşu değerler kullanılarak enterpolasyonla daha uygun bir değer konulması gibi yöntemler kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, fiyat serisi üzerinde yapılacak ve seride önemli değişikliklere neden olabilecek bu türden işlemlerin olumsuz etkileri de göz önünde alınarak şu şekilde bir yöntem izlenmiştir: Saatlik bazdaki yıllık fiyat serisinin en yüksek aykırı değer olan 499,03 TL/MWh haricinde sadece bir kez 220 TL/MWh seviyesinin üzerine çıktığı tespit edilmiş ve bu yüksek aykırı değerler 220 TL/MWh ile sınırlandırılmıştır. En düşük aykırı değerlerde yapılacak düzeltme işlemi için görece yüksek bir alt sınır belirlemenin sonuçları dikkate alınarak 10 TL/MWh değeri alt sınır olarak

kullanılmıştır. PTF'nin bu alt sınırın altında çıktığı saatlerin sayısı sadece 2'dir ve fiyat bu saatlerde 1 TL/MWh'nin altında gerçekleşmiştir. Bu iki değerin haricinde PTF aslında hiçbir zaman 15 TL/MWh'nin altına inmemiştir. Dolayısıyla getirilen alt ve üst sınırın, serideki aykırı verileri düzelttiği ancak (toplamda 8760 saate ait PTF değerinin söz konusu olduğu göz önüne alındığında) serinin genelinde kayda değer bir oynama yapmadığı değerlendirilmektedir.

Bu çerçevede, kullanılan zaman serisinin otokorelasyon grafiği Şekil 21'deki gibidir.



Şekil 21: 2014 yılı PTF serisinin otokorelasyonu

4.2. YAPAY SİNİR AĞI MODELİ

Fiyat tahmini için yapılan YSA modellemesi MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fiyat tahmini için kurulacak YSA'nın eğitimi için kullanılacak olan öğrenme seti, fiyat tahmini yapılacak günden önceki 90 günün saatlik verilerini içerecek şekilde ayarlanmıştır. Böylelikle her modellemede ağ, saatlik fiyata ilişkin toplamda 2160 adet PTF verisi ile öğrenmeye tabi tutulmuştur. Bu öğrenme setinin yaklaşık % 75'i ağı eğitilmesi için, geri kalan % 25'i ise modelin öğrenme sonuçlarının kontrolü amacıyla doğrulamaya yönelik olarak kullanılmıştır. Öğrenme sürecini böylelikle

tamamlayan YSA daha sonra istenilen saatlik fiyat tahminini yapmak üzere çalıştırılmıştır.

YSA modelinde kullanılan öğrenme algoritması için tahmin amaçlı modellemelerde yaygın şekilde kullanılan öğrenme algoritması olan “Levenberg-Marquardt” algoritması kullanılmıştır. Gizli katmanda, girdi katmanındaki girdi sayısında nöron yer almaktadır. Modelin girdi seti olarak ise, Şekil 21’de gösterilmekte olan otokorelasyon değerlerinden yola çıkılarak PTF’nin 24, 25, 48, 72 ve 168 gecikmeli değerleri tercih edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, belirli bir saate ait PTF değerinin tahmini için bir gün önce aynı saat ile bu saatten bir önceki saate ve sırasıyla 2 gün, 3 gün ve 1 hafta önceki aynı saate ait geçmiş döneme ait PTF değerleri kullanılmıştır.

Aslında, tahmin edilecek saatin özellikle 1, 2, 3 ve 23 saat önceki PTF değerleri ile korelasyonu yüksektir. Ancak, tahmin modelinin sonucunda elde edilmek istenen bir sonraki güne ait gün öncesi piyasasındaki PTF değerleri olduğundan ve 24 saatten önceki PTF değerlerinin tamamı fiyat tahminin yapılacağı saat itibariyle var olmadığından, söz konusu saatlere ait yüksek korelasyonlu PTF değerlerinin fiyat tahmininde kullanılması uygun olmayacaktır. Bununla birlikte fiyat tahminin haricinde, sadece fiyat oluşumu mekanizması incelenmeye çalışıldığında veya piyasa izleme faaliyetlerine yönelik olarak geriye dönük fiyat izlemesi yapılacağına bu saatlerin verileri kullanılabilir.

Bu çerçevede, YSA modelinin girdileri ve çıktısı Tablo 3’te listelenmektedir.

Girdi Seti	Çıktı
PTF_{t-24}	PTF_t
PTF_{t-25}	
PTF_{t-48}	
PTF_{t-72}	
PTF_{t-168}	

Tablo 3: YSA modelinin girdileri ve çıktısı

Modelin sonuçlarının sağlıklı şekilde tartışılabilmesi bakımından; tek bir güne, haftaya veya aya ait tahmin sonuçları yerine, her mevsimden bir aya ait sonuçların incelenmesinin ve karşılaştırılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, belirlenen aylar için o ay içerisindeki tüm saatlerin tahmini yapılmış ve modelin başarısı hem aylık hem de haftalık hata sonuçlarına bakılarak incelenmiştir. Modelde seçilen aylara ilişkin bilgiler Tablo 4’te verilmektedir.

Mevsim	Ay	Gün sayısı	Saat sayısı
İlkbahar	Mayıs 2014	31	744
Yaz	Temmuz 2014	31	744
Sonbahar	Eylül 2014	30	720
Kış	Aralık 2014	31	744

Tablo 4: YSA modelinin performans incelemesinde seçilen aylar

Oluşturulan modelin başarısı tahmin edilen PTF değeri ile gerçek PTF değeri karşılaştırılarak yapılmıştır. Her ne kadar karşılaştırma yapmak için iki değer arasındaki farkı incelemek mümkün olsa da, hatayı fazla cezalandıran bir yöntem olması ve literatürdeki çalışmalarda da sıklıkla kullanılması nedeniyle, tahmin performans ölçütü olarak *Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi* (OMHY) kullanılmıştır. Böylelikle; bir aya ait aylık hata oranı bu ay içerisindeki tüm saatlerde yapılan tahminlerde ortaya çıkan hata, bir haftaya ait hata oranı ise bu hafta içerisindeki tüm saatlerde yapılan tahminlerde ortaya çıkan hata dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Seçilen bu yöntemin matematiksel gösterimi (19) numaralı denklemdeki gibidir:

$$OMHY = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(PTF_{g,i} - PTF_{t,i})}{PTF_{g,i}} \right| \times 100 \quad (19)$$

Bu denklemdeki sembollerin karşılığı ise Tablo 4’teki gibidir;

Sembol	Açıklaması
N	Tahmin yapılan toplam saat sayısı (haftalık için 168, aylık için 744 veya 720)
$PTF_{g,i}$	i saatindeki gerçek PTF değeri
$PTF_{t,i}$	i saatindeki tahmini PTF değeri
i	Tahmin yapılan saat

Tablo 5: YSA modelinin girdileri ve çıktısı

4.2.1. Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçları

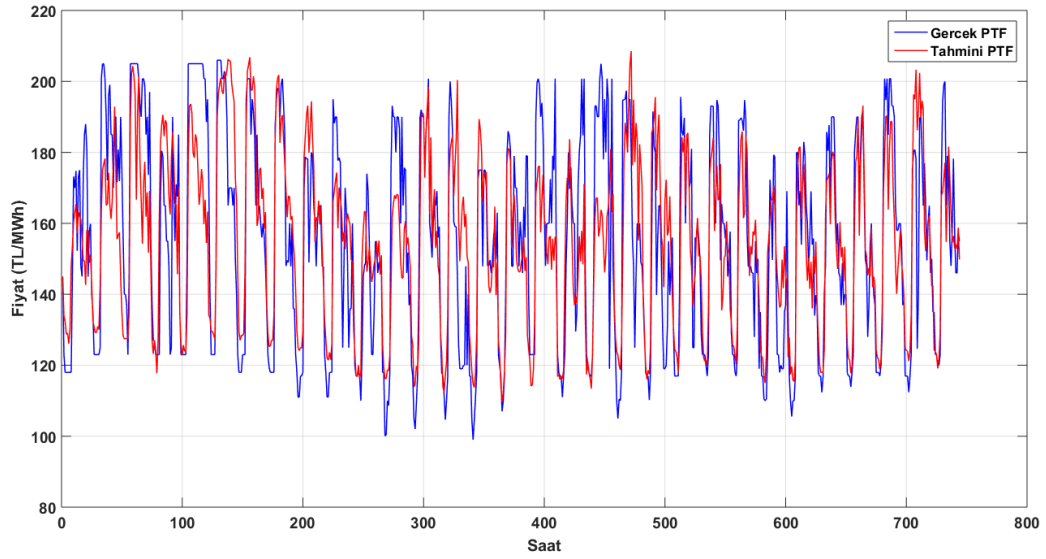
YSA modeli kullanılarak tahmini yapılan ilk ay Mayıs 2014'tür. YSA'nın öğrenme şeklinin doğal bir sonucu olarak her öğrenim sonrasında ağı, birbirine yakın olmakla birlikte tamamen eşit olmayan sonuçlar üretebildiği dikkate alınarak öğrenme ve sonrasındaki tahmin süreci 3 kez tekrar edilmiş ve her bir tahminin hata sonucu ile bu hata performanslarının ortalaması ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Buna göre, ilkbahar mevsimindeki ay olarak seçilen Mayıs için tahmin sonuçları Tablo 6'daki gibi gerçekleşmiştir:

Mayıs 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	11.77	9.81	9.61	8.11
			Aylık Hata (%)	9.55
Mayıs 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	11.08	9.47	9.62	7.83
			Aylık Hata (%)	9.21
Mayıs 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	11.69	9.44	10.15	8.09
			Aylık Hata (%)	9.58
Mayıs 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	11.51	9.57	9.79	8.01
			Aylık Hata (%)	9.45

Tablo 6: Mayıs 2014'e ait YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Mayıs ayındaki PTF'lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 22'de gösterilmektedir.



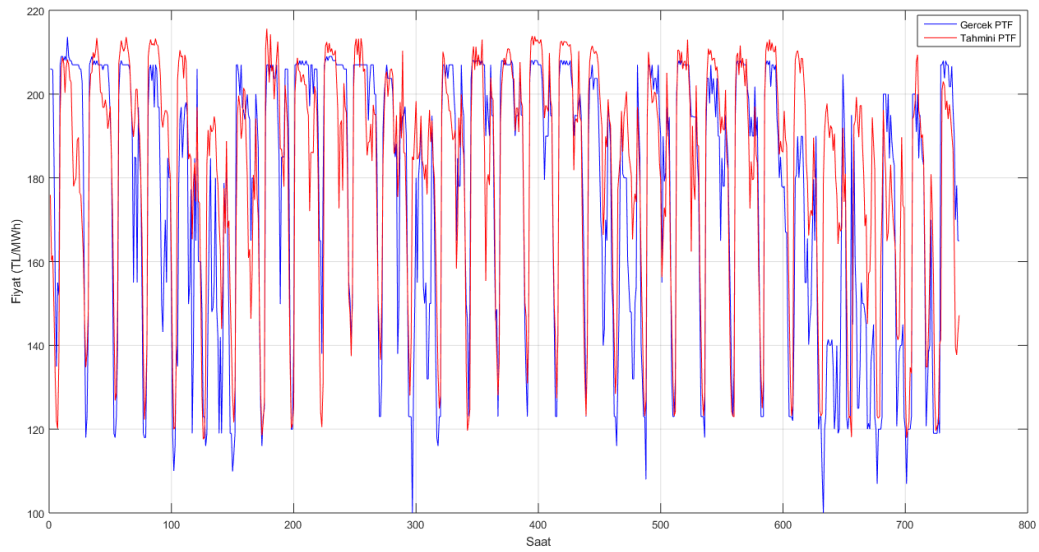
Şekil 22: Mayıs 2014'e ait gerçek ve YSA tahmini PTF değerleri

Yaz mevsimindeki ay olarak seçilen Temmuz için tahmin sonuçları Tablo 7'deki gibi gerçekleşmiştir:

Temmuz 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	10.52	7.51	6.08	11.62
Aylık Hata (%)				9.21
Temmuz 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.48	7.19	5.58	11.41
Aylık Hata (%)				8.72
Temmuz 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.16	7.35	5.72	11.00
Aylık Hata (%)				8.64
Temmuz 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.72	7.35	5.79	11.34
Aylık Hata (%)				8.86

Tablo 7: Mayıs 2014'e ait YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Temmuz ayındaki PTF'lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 23'te gösterilmektedir.



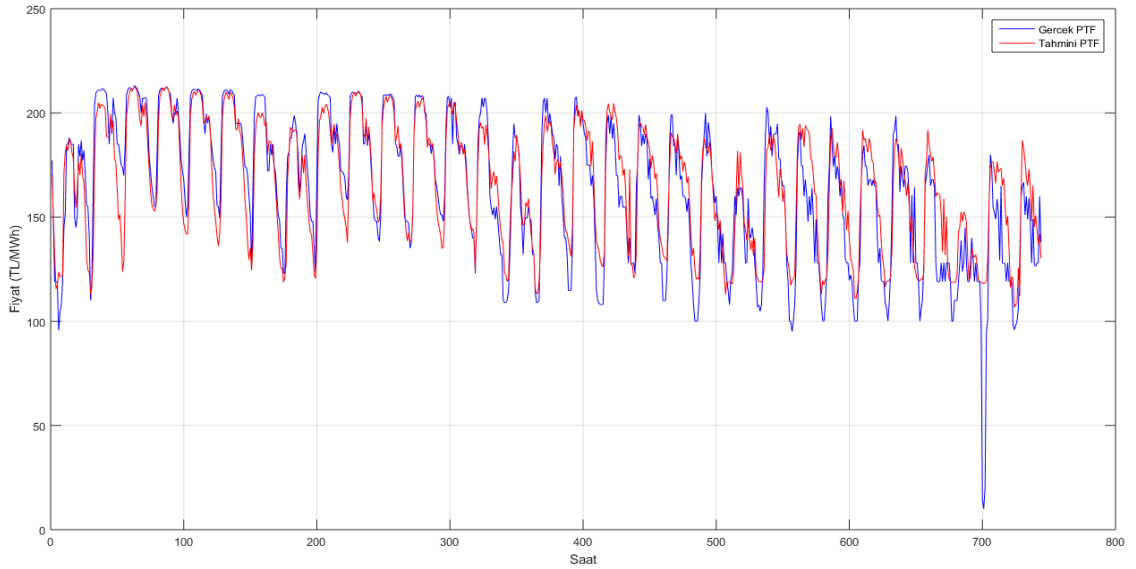
Şekil 23: Temmuz 2014'e ait gerçek ve YSA tahmini PTF değerleri

Sonbahar mevsimdeki ay olarak seçilen Eylül için tahmin sonuçları Tablo 8'deki gibi gerçekleşmiştir:

Eylül 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.07	4.11	7.15	9.55
			Aylık Hata (%)	9.75
Eylül 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.57	4.04	6.70	8.49
			Aylık Hata (%)	9.29
Eylül 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.65	4.20	6.57	8.56
			Aylık Hata (%)	9.41
Eylül 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.43	4.12	6.80	8.87
			Aylık Hata (%)	9.49

Tablo 8: Eylül 2014'e ait YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Eylül ayındaki PTF'lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 24'te gösterilmektedir.



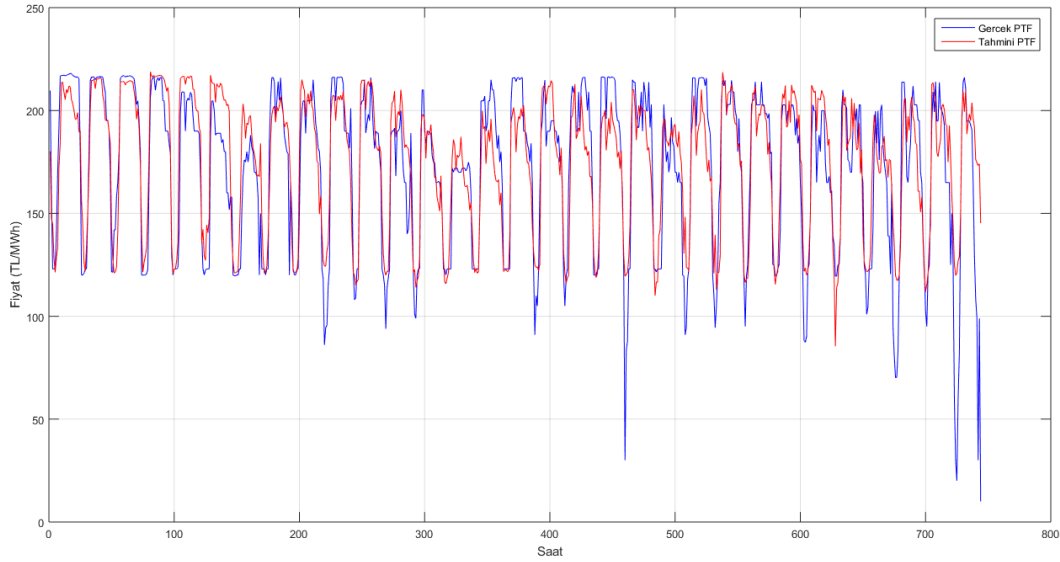
Şekil 24: Eylül 2014'e ait gerçek ve YSA ile tahmini PTF değerleri

Son olarak, kış mevsimdeki ay olarak seçilen Aralık için tahmin sonuçları Tablo 9'daki gibi gerçekleşmiştir:

Aralık 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	7.71	8.12	10.62	8.86
Aylık Hata (%)				13.26
Aralık 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	7.79	8.47	9.90	8.93
Aylık Hata (%)				13.16
Aralık 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	8.35	8.42	9.79	9.01
Aylık Hata (%)				13.22
Aralık 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	7.95	8.34	10.10	8.93
Aylık Hata (%)				13.22

Tablo 9: Aralık 2014'e ait YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Aralık ayındaki PTF'lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 25'te gösterilmektedir.



Şekil 25: Aralık 2014'e ait gerçek ve YSA tahmini PTF değerleri

4.2.2. Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçlarının Analizi

YSA modelinin tahmin performansının sadece belirli bir gün, hafta veya ay yerine yıl içerisindeki tüm aylar için incelenmesi, modelin başarısı açısından daha bütüncül bir inceleme imkanı sunmuştur. Çünkü, farklı enerji kaynaklarına (örn. su, rüzgar, doğalgaz) dayalı santrallerin yılın farklı mevsimlerindeki emre amadelik oranları değişebilmektedir ve bu durumun fiyat teklif stratejilerine, dolayısıyla da piyasadaki fiyat oluşumuna etkisi kaçınılmazdır.

Bu çerçevede bir değerlendirme yapılacak olursa, aylık ortalama hata oranları baz alındığında, en düşük aylık OMHY % 8,86 ile Temmuz ayına aittir. En yüksek OMHY ise % 13,22 ile Aralık ayı için elde edilmiştir.

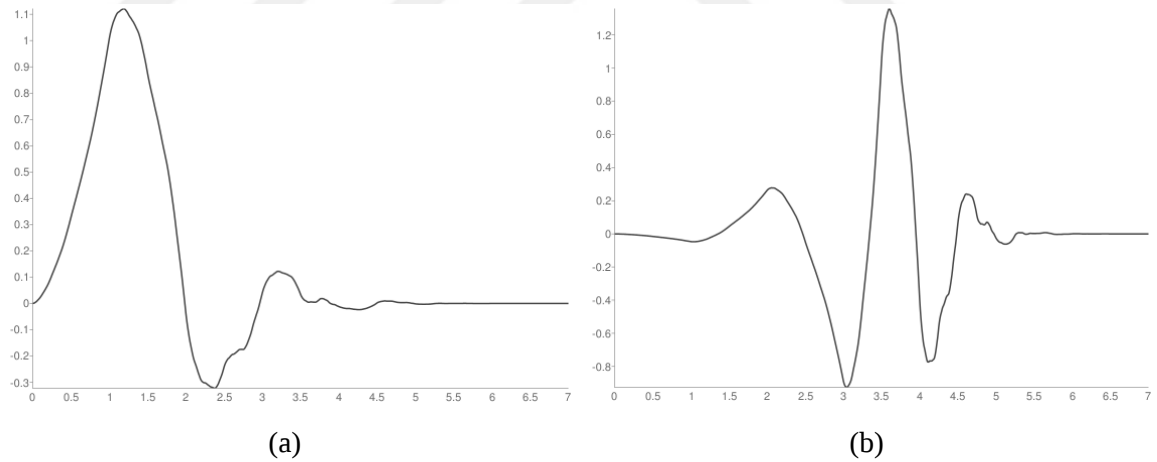
Tahminlerde elde edilen en düşük ve en yüksek hata oranlarına bakılacak olursa; en düşük OMHY % 8,64 ile Temmuz, en yüksek OMHY ise % 13,26 ile Aralık ayına aittir. Aralık ayı için elde edilen sonuç Şekil 25 ışığında yorumlanacak olursa, YSA

modelinin başarısının PTF'nin aşırı derecede düştüğü saatlerde zayıfladığı sonucuna ulaşılabilir.

4.3. AYRIK DALGACIK DÖNÜŞÜMLÜ YAPAY SİNİR AĞI MODELİ

Tahmin edilmeye çalışılan PTF serisinin fazlasıyla oynak bir özellik göstermesi mevcut YSA modelinde bir bütün halinde öğrenilmekte ve netice olarak model, öğrendiği ilişkiye bağlı olarak tahmin yapmaktadır. Bu nedenle, PTF tahmini yaparken serinin bu özelliğinin ele alınması, daha iyi bir modelleme yapılmasını ve böylelikle de hata oranı daha iyi olan tahminler yapmaya imkan tanıyabilir.

Bu kapsamda, modelleme ve fiyat tahmini işlemlerinde ADD kullanılarak tahmin performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada tercih edilen dalgacık, zaman serisi analizinde sıklıkla tercih edilen 4. derece Daubechies (Daubechies4) tipi dalgacık fonksiyonudur. Bu dalgacık türüne ait grafiksel gösterim Şekil 26'da verilmektedir.

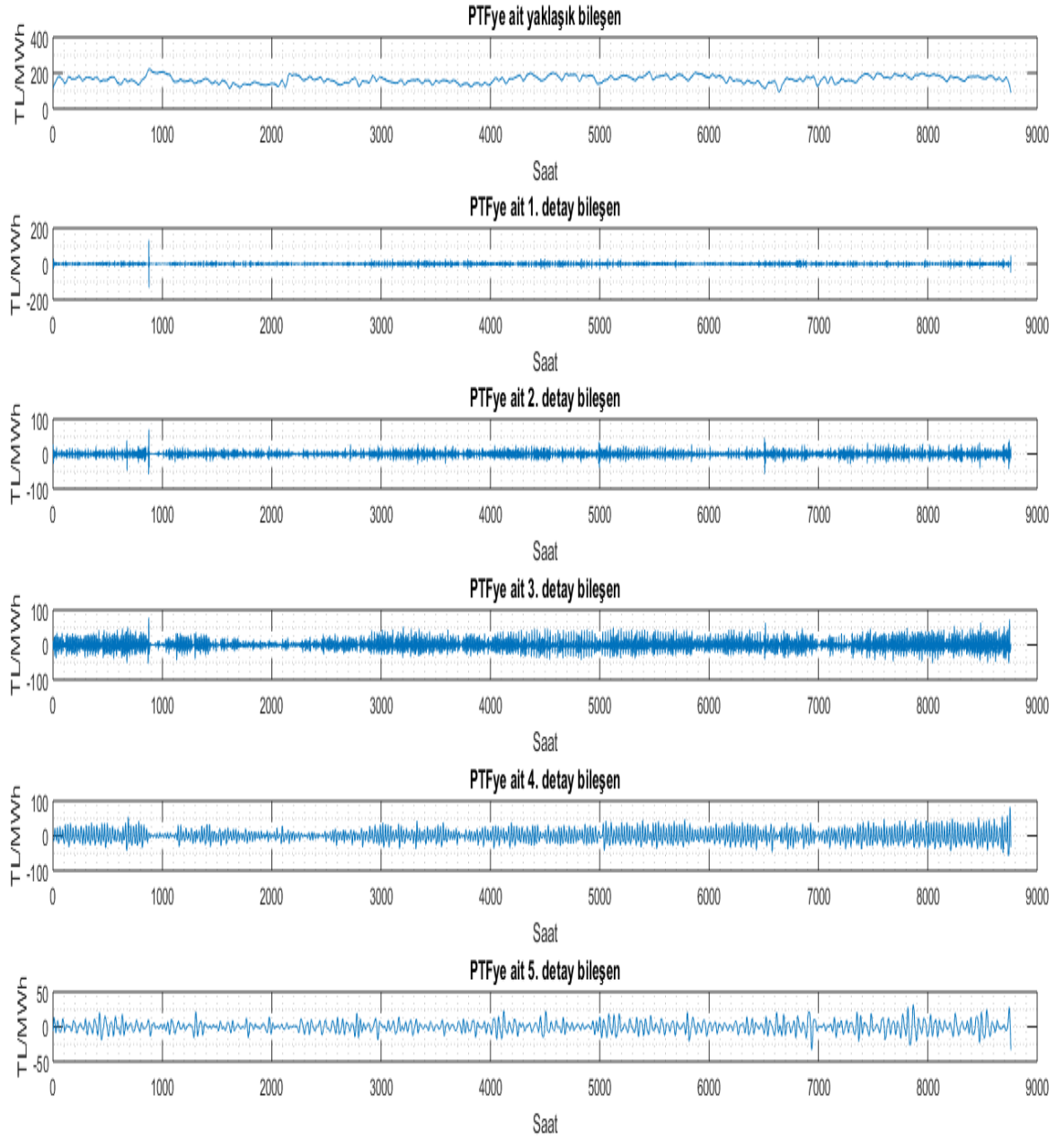


Şekil 26: Daubechies4 dalgacığına ait (a) ölçek ve (b) dalgacık fonksiyonları¹⁵

Şekil 20'de gösterilmekte olan 2014 PTF değerleri üzerinde, Daubechies4 dalgacığı kullanılarak 5. seviyede ADD işlemi yapılmıştır. Bu şekilde elde edilen PTF'ye ait yaklaşık ve detay bileşenlerin yer aldığı 6'lı grafik Şekil 27'de; PTF değerleri, yaklaşık

¹⁵ Bu Şekiller, Hennie ter Morsche tarafından hazırlanan Wavelet Basics başlıklı bilgi notundan alınmıştır.

bileşen ve detay bileşenlerin toplamının yer aldığı 3'lü grafik ise Şekil 28'de gösterilmektedir.



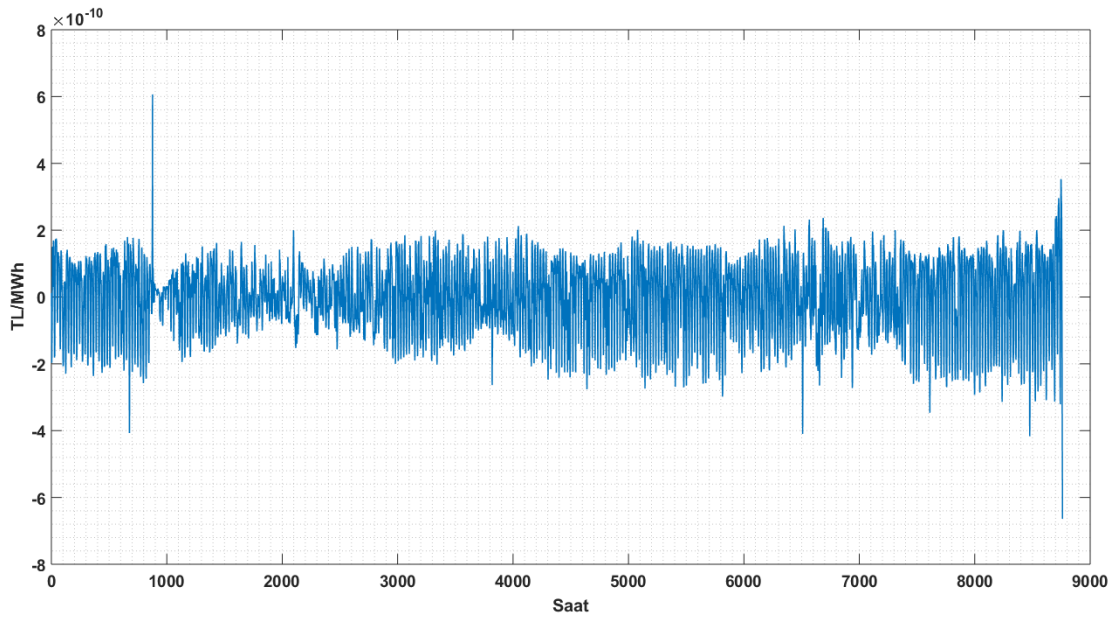
Şekil 27: 2014 yılı PTF değerlerine ait yaklaşık ve detay bileşenler



Şekil 28: 2014 yılı PTF, yaklaşık bileşen ve detay bileşenler toplamı değerleri

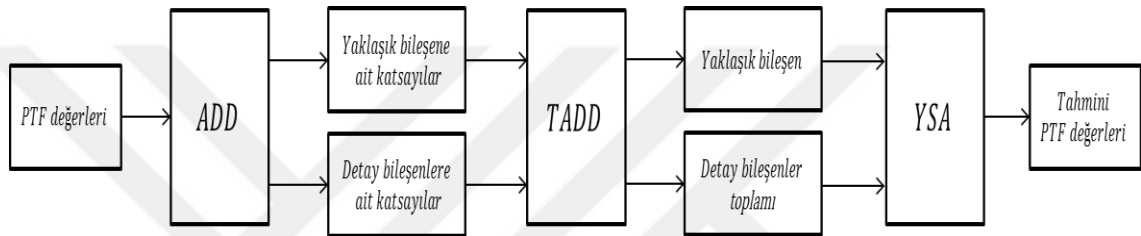
Bölüm 3.2’den hatırlanacağı üzere, ADD işlemi bir seriye ait yaklaşık ve detay bileşenleri elde etmeye imkan tanımaktadır ve elde edilen bileşenler, orijinal seri ile aynı düzlemde (PTF’yi ele alacak olursak zaman bölgesinde saatlik şekilde) olmadığı gibi, tercih edilen ADD seviyesine bağlı olarak farklı uzunluklara sahiptir. Dolayısıyla, elde edilen bileşenlerin orijinal seri ile karşılaştırılması ancak bu bileşenleri ayrı ayrı TADD işlemine tabi tutulması ile mümkün olabilir. Şekil 27’de ve 28’de yer alan karşılaştırmalı analiz de bu şekilde yapılmıştır. Yani, önce PTF değerlerine ADD işlemi uygulanarak 1 adet yaklaşık ve 5 adet detay bileşen elde edilmiş, sonrasında ise bu bileşenler ayrı ayrı geri dönüştürülmüştür.

Burada yapılan ayrıştırma işlemi ile çok oynak olan PTF değerleri, Şekil 28’de görüldüğü üzere, büyük ölçüde daha kararlı hareket eden bir yaklaşık bileşen ve yüksek oynaklığa sahip bir detay bileşenler toplamı halini almıştır. Burada yapılan işlemlerin, modellemede ve fiyat tahmininde kullanılacak olan seride bir değişiklik yapmaması önemlidir. Aksi halde, fiyat tahmini doğru değerler üzerinde yapılmamış olacaktır. Bu durum, orijinal PTF ile yaklaşık ve detay bileşenlerin toplamı arasındaki farkın gösterildiği Şekil 29 ile doğrulanmıştır. Buradaki çok küçük farklar, işlemlerin sayısal ortamda yapılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 29: 2014 PTF’leri ile yaklaşık ve detay bileşenler toplamı arasındaki fark

Modelleme işlemleri literatürde sıklıkla rastlandığı gibi (örneğin, Shafieh-khah ve diğerleri, 2011 ile Wu ve Shahidehpour, 2010) doğrudan ADD işlemi ile edilen bileşenler üzerinde de yapılabilir. Bu durumda, farklı bir seri üzerinde çalışılmakla birlikte, elde edilen sonuçlar ve gerçek değerler TADD işlemi kullanılarak zaman düzleminde karşılaştırılabilir. Bununla birlikte bu çalışmada, ADD ile elde edilen bileşenler TADD ile geri dönüştürülmüş, modelleme işlemlerine bu geri dönüştürülen ve orijinal seriyi eksiksiz şekilde ifade eden bileşenler üzerinden devam edilmiş ve bu YSA ile ekonometrik yaklaşım kullanılarak fiyat tahmini yapılmıştır. Bu bölümde anlatılan YSA bazlı modelleme işlemleri için süreç akışı Şekil 30'daki gibidir.



Şekil 30: Dalgacık dönüşümlü PTF tahminine ait süreç akış şeması

4.3.1. Ayırık Dalgacık Dönüşümlü Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçları

ADD ile YSA birlikte kullanılarak yapılan modelleme ve tahminde sonuçların karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi için Bölüm 4.2.'deki dönemler ve model girdileri kullanılmıştır. Dolayısıyla, tahmini yapılan ilk ay Mayıs 2014'tür. Öğrenme ve sonrasındaki tahmin süreci 3 kez tekrar edilmiş ve her bir tahminin hata sonucu ile bu hata performanslarının ortalaması ayrı ayrı hesaplanmıştır.

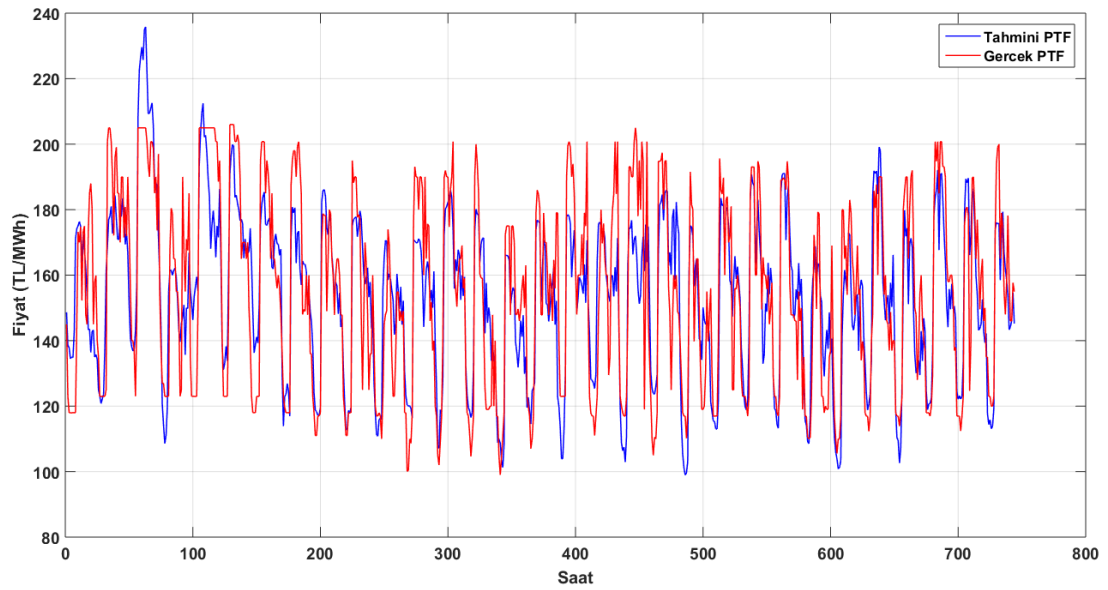
Buna göre, Mayıs için tahmin sonuçları Tablo 10'daki gibi gerçekleşmiştir:

Mayıs 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.55	8.28	8.48	7.40
			Aylık Hata (%)	8.28
Mayıs 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.66	8.83	8.91	7.35
			Aylık Hata (%)	8.44

Mayıs 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.20	8.07	8.77	7.76
			Aylık Hata (%)	8.21
Mayıs 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.47	8.40	8.72	7.51
			Aylık Hata (%)	8.31

Tablo 10: Mayıs 2014'e ait ADD'li YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Mayıs ayındaki PTF'lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 31'de gösterilmektedir.



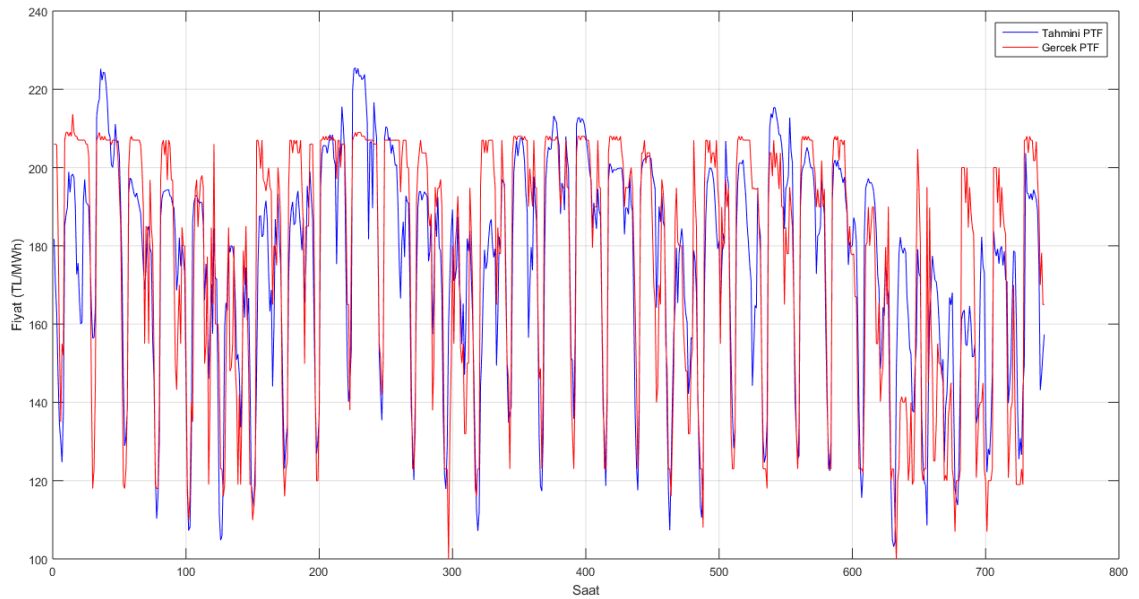
Şekil 31: Mayıs 2014'e ait gerçek ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri

Yaz mevsimindeki ay olarak seçilen Temmuz için tahmin sonuçları Tablo 11'deki gibi gerçekleşmiştir:

Temmuz 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	8.53	7.47	5.06	8.96
			Aylık Hata (%)	8.08
Temmuz 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	8.75	7.21	5.40	8.37
			Aylık Hata (%)	7.94
Temmuz 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	9.52	7.67	6.13	8.85
			Aylık Hata (%)	8.37
Temmuz 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	8.93	7.45	5.53	8.72
			Aylık Hata (%)	8.13

Tablo 11: Mayıs 2014'e ait ADD'li YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Temmuz ayındaki PTF'lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 32'de gösterilmektedir.



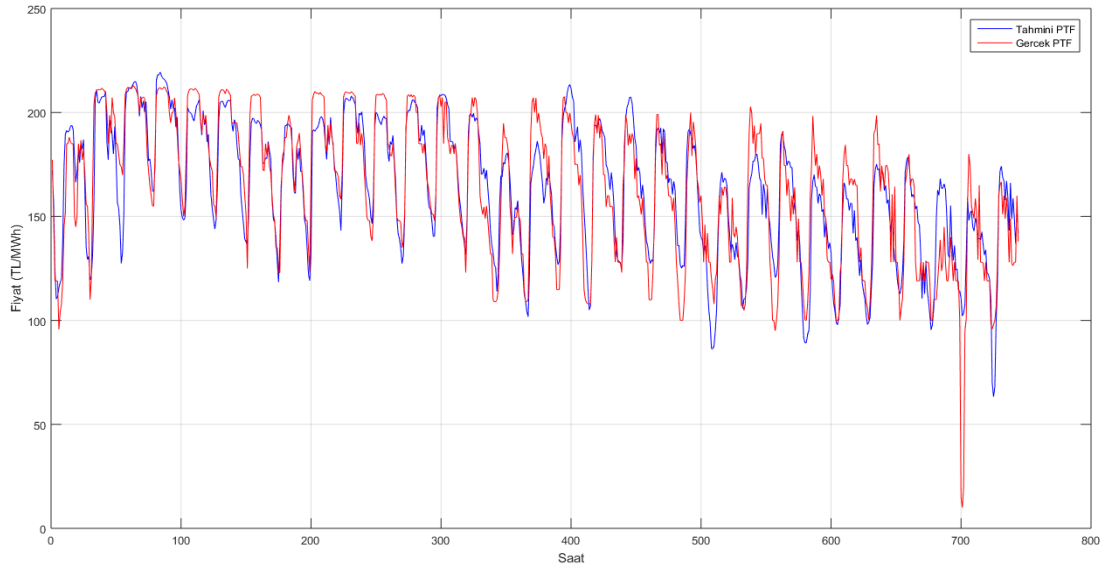
Şekil 32: Temmuz 2014'e ait gerçek ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri

Sonbahar mevsimdeki ay olarak seçilen Eylül için tahmin sonuçları Tablo 12’deki gibi gerçekleşmiştir:

Eylül 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.99	4.32	6.80	7.77
			Aylık Hata (%)	8.99
Eylül 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.12	4.23	7.17	8.57
			Aylık Hata (%)	9.18
Eylül 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.09	4.52	6.95	8.63
			Aylık Hata (%)	9.19
Eylül 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.40	4.36	6.97	8.32
			Aylık Hata (%)	9.12

Tablo 12: Eylül 2014’e ait ADD’li YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Eylül ayındaki PTF’lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 33’te gösterilmektedir.



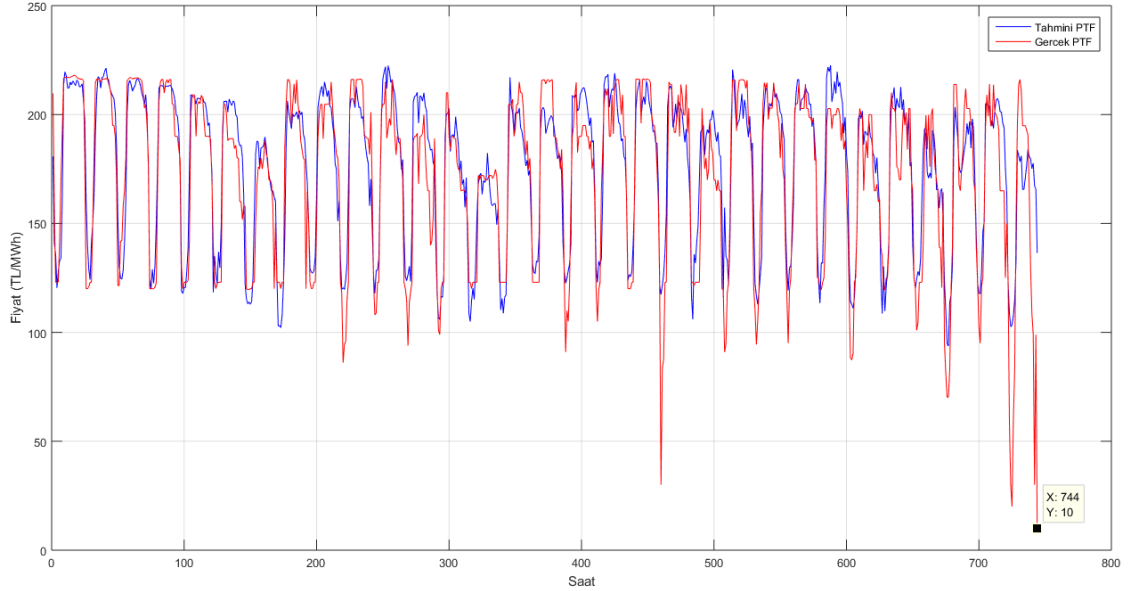
Şekil 33: Eylül 2014'e ait gerçek PTF ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri

Son olarak, kış mevsimindeki ay olarak seçilen Aralık için tahmin sonuçları Tablo 13'teki gibi gerçekleşmiştir:

Aralık 2014 Tahmin Sonuçları - 1				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	6.71	8.70	9.84	8.04
Aylık Hata (%)				11.93
Aralık 2014 Tahmin Sonuçları - 2				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	6.53	7.62	10.21	8.51
Aylık Hata (%)				12.08
Aralık 2014 Tahmin Sonuçları - 3				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	6.31	7.84	9.55	7.92
Aylık Hata (%)				11.94
Aralık 2014 Ortalama Tahmin Sonuçları				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	6.52	8.05	9.87	8.16
Aylık Hata (%)				11.99

Tablo 13: Aralık 2014'e ait ADD'li YSA tahmin modeli sonuçları

Bu sonuçlara göre, Aralık ayındaki PTF'lerin gerçek ve tahmini değerlerine ilişkin bir örnek grafiksel olarak Şekil 34'te gösterilmektedir.



Şekil 34: Aralık 2014'e ait gerçek PTF ve ADD'li YSA tahmini PTF değerleri

4.3.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümlü Yapay Sinir Ağı Modelinin Sonuçlarının Analizi

Aylık ortalama hata oranları baz alındığında, en düşük aylık OMHY % 8,13 ile Temmuz ayına aittir. En yüksek OMHY ise % 11,99 ile Aralık ayı için elde edilmiştir.

Tahminlerde elde edilen en düşük ve en yüksek hata oranlarına bakılacak olursa; en düşük OMHY % 8,08 ile Temmuz, en yüksek OMHY ise % 12,08 ile Aralık ayına aittir. Aralık ayı için elde edilen sonuç Şekil 34 ışığında yorumlanacak olursa, ADD'li YSA modelinin başarısının, yalın YSA modelinde olduğu gibi PTF'nin aşırı derecede düştüğü saatlerde zayıfladığı sonucuna ulaşılabilir.

Diğer taraftan, ayrık dalgacık dönüşümü ile elde edilen sonuçların, sağlanan başarı artışı bakımından incelenmesi önemlidir. Bu çerçevede, yalın YSA ve ADD'li YSA modellerinin aylık hata ortalamaları bazında karşılaştırılması Tablo 14'te verilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yalın YSA	ADD'li YSA	İyileşme
Mayıs	9.45	8.31	1.14
Temmuz	8.86	8.13	0.73
Eylül	9.49	9.12	0.37
Aralık	13.22	11.99	1.23
ORTALAMA	10.26	9.39	0.87

Tablo 14: Yalın YSA ve ADD'li YSA tahmin modellerinin sonuçları

Bu çerçevede, ADD'nin tahmin sonuçlarını aylık bazda; en yüksek % 1.23, en düşük % 0.37 ve ortalama % 0.87 oranında iyileştirdiği görülmektedir. Dolayısıyla PTF tahmininde ayırık dalgacık dönüşümü kullanılması tahmin başarısını belirgin şekilde artırmıştır.

4.4. DIŞSAL DEĞİŞKENLERİN TAHMİNLERE ETKİSİ

Önceki bölümlerde, yapay sinir ağı ve ayırık dalgacık dönüşümü kullanılarak oluşturulan PTF tahmin modellerinde girdi olarak sadece geçmiş dönem fiyatlarına yer verilmiştir. Bu bölümde saatlik bazda kullanılabilecek bazı değişkenlerin modelin başarısı üzerindeki etkileri tartışılmaktadır.

Elde edilen sonuçların sağlıklı şekilde karşılaştırılması teminen, sadece bir aya ait sonuçlar yerine daha önceki tahminlerde en iyi ve en kötü performansa sahip ayların sonuçlarının incelenmesi öngörülmüştür. Bu kapsamda, en iyi ay olarak Temmuz, en kötü ay olarak ise Aralık ayı verileri ele alınmıştır.

Bu kapsamda, PTF verisi gibi saatlik olarak elde edilen ve fiyat oluşumunda etkisi olduğu değerlendirilen tüketim miktarı, toplam ikili anlaşma hacmi, YEKDEM portföyü üretimi, teklif edilen alış miktarı, teklif edilen satış miktarı, tahmin yapılan saat ve tahmin yapılan gün bilgileri birer girdi olarak tahmin modelinde kullanılabilir. Takip

eden alt bölümlerde bu verilerin girdi olarak kullanılması ile oluşturulan modellerden elde edilen sonuçlar incelenmektedir.

4.4.1. Tüketim Girdisinin Tahminlere Etkisi

PTF marjinal fiyatlandırma prensibi ile elektrik arzı ve talebi arasındaki dengenin sağladığı noktada oluşmaktadır. Dolayısıyla, bir saatte oluşması beklenen tüketim tahminin o saat için piyasa oyuncuları tarafından verilen alış ve satış teklifleri (özellikle satış) üzerinde belirleyici bir role sahip olması beklenen bir durumdur. Bir sonraki gün için teklifler piyasa yönetim sistemine girilmeden önce yük dağıtım merkezi tarafından yapılan tüketim tahmini mevcut olduğundan MWh cinsinden olan bu veri tahmin yapılırken kullanılabilir. Tüketim tahmini kullanılarak elde edilen sonuçlar yalnız YSA ve ADD'li YSA durumu için ayrı ayrı olarak Tablo 15'te gösterilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yalnız YSA	ADD'li YSA	İyileşme
Temmuz	8.98	8.30	0.68
Aralık	12.71	11.43	1.28
ORTALAMA	10.85	9.87	0.98

Tablo 15: Talep Tahmini girdisinin tahminlere etkisi

4.4.2. İkili Anlaşma Girdisinin Tahminlere Etkisi

Piyasadaki oyuncuları kendi aralarında yaptıkları veya serbest bir tüketicinin bir üretici yada tedarikçi ile yaptığı ikili anlaşmalar özel hukuk hükümlerine tabidir ve sözleşme fiyatları tamamen taraflar arasında belirlenmektedir. Diğer taraftan bir ikili anlaşmaya konu tüketim miktarı tüketim tahminin içerisinde dikkate alınmakla birlikte fiyat oluşumuna etki eden teklif hacimleri içerisinde doğal olarak yer almamaktadır. Dolayısıyla, MWh cinsinden olan toplam ikili anlaşma hacminin fiyat oluşumu üzerinde etkili olması beklenebilir. Bu kapsamda, ikili anlaşma miktarı bilgisi kullanıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 16'da gösterilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yaln YSA	ADD'li YSA	İyileşme
Temmuz	8.69	8.45	0.24
Aralık	13.05	11.85	1.20
ORTALAMA	10.87	10.15	0.72

Tablo 16: ikili Anlaşma girdisinin tahminlere etkisi

4.4.3. YEKDEM Portföyü Üretimi Girdisinin Tahminlere Etkisi

Enerji kaynağına göre farklılaştırılmış alım garantili fiyatlar üzerinden doğrudan satın alınan YEKDEM portföyüne dahil olan üretim tesislerinde üretilecek elektrik enerjisi bir fiyat teklifi ile ticarete konu edilmemekte olup fiyat oluşumu açısından muafiyetli üretim niteliğindedir. Diğer bir ifadeyle, buradaki hacim gün öncesi dengeleme işlemleri açısından 0 TL/MWh fiyat ile piyasaya arz edilmiş gibi değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, bu portföye ait hacmin fiyat oluşumu üzerinde etkisi olması beklenebilir. Bu kapsamda, YEKDEM portföyü için yapılan saatlik üretim tahmini bilgisi kullanıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 17’de gösterilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yaln YSA	ADD'li YSA	İyileşme
Temmuz	8.96	8.64	0.32
Aralık	12.55	12.21	0.34
ORTALAMA	10.76	10.43	0.33

Tablo 17: YEKDEM portföyü üretim tahmini girdisinin tahminlere etkisi

4.4.4. Toplam Alış Miktarı Girdisinin Tahminlere Etkisi

Çift taraflı bir havuz olarak işleyen gün öncesi piyasasında fiyat oluşumu, satıcıların satış teklifleri ile alıcıların alış teklifleri değerlendirilerek elde edilen toplam arz eğrisi ile toplam talep eğrisinin kesiştirilmesi ile gerçekleştiğinden, ilgili hacimlerin

PTF'nin belirlenmesinde etkili olacağı değerlendirilebilir. Çünkü, alıcılar veya satıcılar, kendi pozisyonlarını gelir veya maliyet açısından optimize etmek amacıyla daha fazla/az elektrik arz/talep etmeyi düşünebilirler.

Bu kapsamda, alıcıların TL/MWh cinsinden bildirdikleri alış tekliflerinin saatlik bazdaki toplam hacimlerine ilişkin bilgi kullanıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 18'de gösterilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yalın YSA	ADD'li YSA	İyileşme
Temmuz	7.93	7.63	0.30
Aralık	12.85	11.72	1.13
ORTALAMA	10.39	9.68	0.72

Tablo 18: Toplam Alış Teklifi girdisinin tahminlere etkisi

4.4.5. Toplam Satış Miktarı Girdisinin Tahminlere Etkisi

Toplam alış miktarı bilgisinin modele dahil edilmesindeki motivasyondan hareketle, satıcıların TL/MWh cinsinden bildirdikleri satış tekliflerinin saatlik bazdaki toplam hacimlerine ilişkin bilgi kullanıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 19'da gösterilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yalın YSA	ADD'li YSA	İyileşme
Temmuz	7.92	7.77	0.15
Aralık	12.65	12.05	0.60
ORTALAMA	10.29	9.91	0.38

Tablo 19: Toplam Satış Teklifi girdisinin tahminlere etkisi

4.4.6. Gün Bilgisi Girdisinin Tahminlere Etkisi

Literatürde yer alan çalışmalarda, tahmin modelinde hangi güne ilişkin olarak tahmin yapıldığına dair bilginin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca bazı çalışmalarda (bkz. Weron ve Misiorek, 2005 ile Wang ve Ramsay, 1997), hata performansı genel olarak değerlendirilmeyip tahmin yapılan güne göre inceleme yapılmaktadır. Bu durumun temel nedeni, çeşitli gruplamalar yapmak mümkün olmakla birlikte (örneğin hafta içi ve hafta sonu şeklinde) tüketim artışı veya azalışları başta olmak üzere günlerin birbirlerinden farklı özelliklerinden yola çıkarak gün bilgisinin bir girdi olarak kullanılması durumunda tahminde iyileşme sağlanabilecek olmasıdır. Bu kapsamda, tahmin yapılacak saatlerin hangi güne ait oldukları birer gün kodu verilerek ([0-7]) kullanıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 20’de gösterilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yalın YSA	ADD’li YSA	İyileşme
Temmuz	8.45	7.78	0.67
Aralık	12.42	11.82	0.60
ORTALAMA	10.44	9.80	0.63

Tablo 20: Gün Bilgisi girdisinin tahminlere etkisi

4.4.7. Saat Bilgisi Girdisinin Tahminlere Etkisi

Şekil 19’da gösterilmiş olan haftalık ve aylık PTF grafiğinde de görüldüğü üzere, PTF’nin günlük olarak benzer bir seyre sahiptir. Dolayısıyla, her bir günün aynı saatinde PTF’nin belirli bir fiyat karakteristiğe gösterdiği düşünülebilir. Bu noktadan hareketle, tahmin yapılacak saatin bilgisi birer kod verilerek ([1-24]) kullanıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 21’de gösterilmektedir.

AY	Ortalama Hata (%)		
	Yalın YSA	ADD'li YSA	İyileşme
Temmuz	9.21	8.14	1.07
Aralık	13.03	12.27	0.76
ORTALAMA	11.12	10.21	0.92

Tablo 21: Saat Bilgisi girdisinin tahminlere etkisi

4.5. YSA MODELLERİNİN SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, farklı girdi setleri kullanılarak oluşturulan modellerinin tahmin performansları hata oranı baz alınarak karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma yapılırken, bir önceki bölümde olduğu gibi en iyi hata performansının elde edildiği Temmuz ayına ve en kötü hata performansının elde edildiği Aralık ayına ait sonuçlar ele alınmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar Tablo 22’de gösterilmektedir.

İlave Girdi	Ortalama Hata (%)			
	Temmuz		Aralık	
	Yalın YSA	ADD'li YSA	Yalın YSA	ADD'li YSA
-	8.86	8.13	13.22	11.99
Tüketim	8.98	8.30	12.71	11.43
İkili Anlaşma	8.69	8.45	13.05	11.85
YEKDEM Üretimi	8.96	8.64	12.55	12.21
Toplam Alış Miktarı	7.93	7.63	12.85	11.72
Toplam Satış Miktarı	7.92	7.77	12.65	12.05
Gün Bilgisi	8.45	7.78	12.42	11.82
Saat Bilgisi	9.21	8.14	13.03	12.27
Ortalama	8.63	8.11	12.81	11.92
Minimum	7.92	7.63	12.42	11.43
Maksimum	9.21	8.64	13.22	12.27

Tablo 22: Tahmin Modellerinin hata performanslarının karşılaştırılması

Tablo 22'deki sonuçlar incelendiğinde, geçmiş dönem PTF değerlerine ilave olarak değişken kullanımı ile oluşturulan modellerin tahmin başarılarının sadece geçmiş dönem PTF'lerinin kullanıldığı modellere göre analizi şu şekildedir:

Tüketim: İlave değişken olarak saatlik tüketim tahmini bilgisinin kullanılması Temmuz ayındaki tahminlerin performansını Yalın YSA ve ADD'li YSA durumlarının her ikisinde de olumsuz etkilemiştir. Tahmin hatasının daha yüksek gerçekleştiği Aralık ayı için ise tersi bir durum söz konusudur ve hata oranı % 0,5 civarında iyileşmiştir.

İkili Anlaşma: İlave değişken olarak piyasa katılımcılarının kendi aralarında yaptıkları ikili anlaşmaların toplam hacmine ait bilginin kullanılması Temmuz ayındaki tahminlerin performansını Yalın YSA için olumlu, ADD'li YSA için ise olumsuz etkilemiştir. Aralık ayı için ise hata oranı her iki durum için iyileşmiştir.

YEKDEM Üretimi: İlave değişken olarak fiyat oluşumu bakımından muafiyetli üretim olarak değerlendirilen YEKDEM portföyünde yer alan santrallerin saatlik üretim tahminin kullanılması Temmuz ayındaki tahminlerin performansını Yalın YSA ve ADD'li YSA durumlarının her ikisinde de olumsuz etkilemiştir. Aralık ayı için ise tersi bir durum söz konusudur ve hata oranı iyileşmiştir.

Toplam Alış Miktarı: İlave değişken olarak talep tarafında sisteme girilen enerji alış tekliflerinin toplam hacminin saatlik değerlerinin kullanılması hem Temmuz hem de Aralık aylarındaki tahminlerin performanslarını Yalın YSA ve ADD'li YSA durumlarının her ikisinde de olumlu etkilemiştir.

Toplam Satış Miktarı: İlave değişken olarak arz tarafında sisteme girilen enerji satış tekliflerinin toplam hacminin saatlik değerlerinin kullanılması Temmuz ayındaki tahminlerin performansını Yalın YSA ve ADD'li YSA durumlarının her ikisinde de olumlu etkilemiştir. Aralık ayında ise hata performansı, Yalın YSA için olumlu, ADD'li YSA için olumsuz etkilenmiştir.

Gün Bilgisi: İlave değişken olarak tahmin yapılacak saati hangi güne ait olduğuna dair bilginin kullanılması hem Temmuz hem de Aralık aylarındaki tahminlerin

performanslarını Yalın YSA ve ADD'li YSA durumlarının her ikisinde de olumlu etkilemiştir.

Saat Bilgisi: İlave değişken olarak tahminin hangi saat için yapılacağına dair bilginin kullanılması hata performansını; Temmuz ayında Yalın YSA için kötüleştirilmiş ve ADD'li YSA için belirgin bir değişime neden olmamış iken, Aralık ayında Yalın YSA için iyileştirmiş ADD'li YSA için ise kötüleştirmiştir.

Yalın YSA – ADD'li YSA: Oluşturulan farklı modellerin tamamında, PTF'nin oynaklığından kaynaklanan modelleme ve tahmin zorluğunu iyileştirmek için uygulanan Ayırık Dalgacık Dönüşümü ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

4.6. EKONOMETRİK MODEL¹⁶

Fiyat tahmini için yapılan ekonometrik modeller Eviews yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Fiyat modellerinde kullanılan girdi seti, tahminin yapılacağı günden önceki 90 günün saatlik verilerini içermektedir. Bu kapsamda öncelikle, 2014 PTF serisinin durağan olup olmadığı incelenmiştir. Tablo 23'te verilen ADF birim kök testi sonuçlarına göre, ele alınan serinin % 1 anlamlılık düzeyinde durağan olduğu değerlendirilmektedir.

Gecikme uzunluğu: 27 (Otomatik- SIC'e dayalı, azami gecikme =36)

	t-İstatistiği	Olasılık*
Genişletilmiş Dickey-Fuller test istatistiği	-7.190805	0.0000
Kritik test değerleri: 1% seviyesi	-3.430923	
5% seviyesi	-2.861678	
10% seviyesi	-2.566885	

*MacKinnon (1996) tek taraflı p-değerleri.

Tablo 23: 2014 PTF serisi için ADF Testi sonuçları

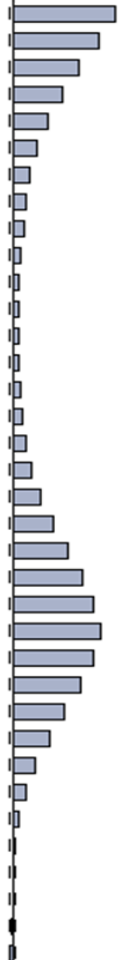
PTF serisinin kurulacak modelin tespiti için incelenen otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon değerleri Şekil 35'te görülmektedir. Buradan yola çıkılarak, PTF'nin AR

¹⁶ Fiyat tahminine yönelik ekonometrik modellerin oluşturulmasında, tahmin başarısı ve Akaike Bilgi Kriteri (AIC) dikkate alınmıştır.

tipindeki bir model ile tahmin edilebileceği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda PTF tahmini için (20) numaralı denklemdeki gibi bir model oluşturulmuştur. Burada, ptf_t t saatindeki tahmin edilecek PTF değerine, ptf_{t-i} ise PTF'nin i saat önceki değerine karşılık gelmektedir.

$$ptf_t = c + \beta_1 ptf_{t-24} + \beta_2 ptf_{t-72} + \beta_3 ptf_{t-96} + \beta_4 ptf_{t-144} + \beta_5 ptf_{t-168} + u_t \quad (20)$$

YSA ve ADD'li YSA modellerinin en başarısız olduğu aya ait tahmin sonuçlarının ekonometrik modelin sonuçları ile karşılaştırılabilmesini teminen, 20 numaralı denklem ile son 3 aya ait PTF değerleri kullanılarak oluşturulan model Aralık 2014 için çalıştırılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre belirlenen ve Tablo 24'te verilmekte olan regresyon katsayıları % 95 güven aralığında anlamlıdır.

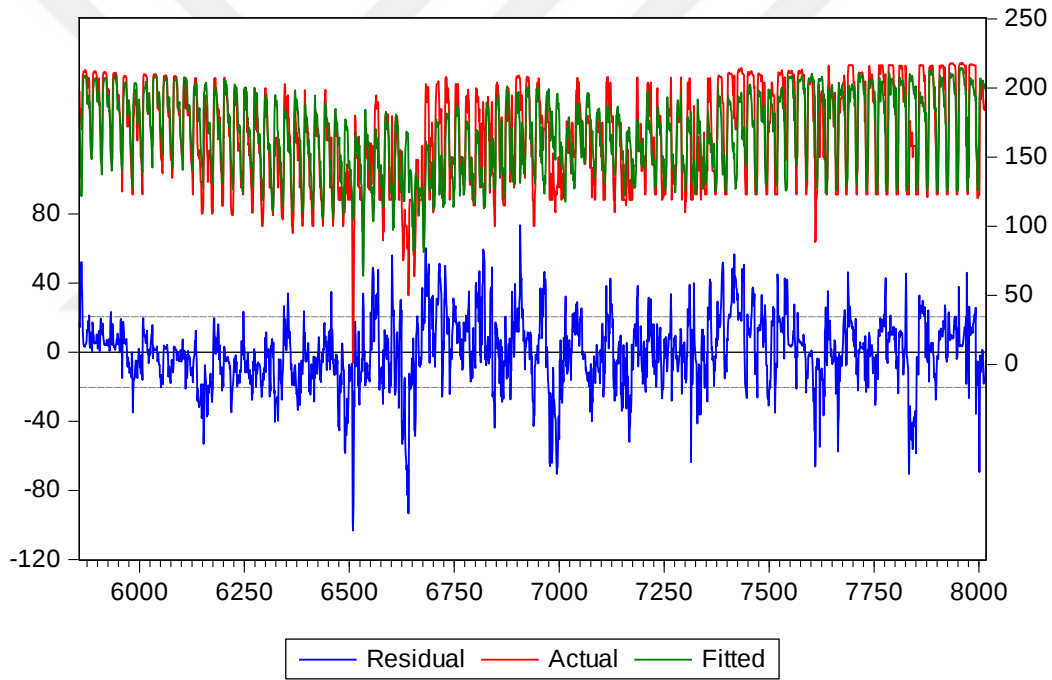
Otokorelasyon	Kismi Otokorelasyon	OK	KOK	Q-İst.	Olas.	
		1	0.880	0.880	6781.5	0.000
		2	0.738	-0.157	11560.	0.000
		3	0.581	-0.147	14519.	0.000
		4	0.430	-0.062	16141.	0.000
		5	0.307	0.023	16966.	0.000
		6	0.211	0.013	17358.	0.000
		7	0.146	0.026	17546.	0.000
		8	0.114	0.053	17659.	0.000
		9	0.091	-0.024	17733.	0.000
		10	0.074	-0.023	17781.	0.000
		11	0.061	0.004	17814.	0.000
		12	0.052	0.009	17837.	0.000
		13	0.055	0.057	17863.	0.000
		14	0.060	0.007	17895.	0.000
		15	0.073	0.036	17941.	0.000
		16	0.089	0.020	18011.	0.000
		17	0.117	0.074	18132.	0.000
		18	0.169	0.138	18383.	0.000
		19	0.248	0.174	18926.	0.000
		20	0.350	0.180	19999.	0.000
		21	0.474	0.235	21971.	0.000
		22	0.601	0.225	25146.	0.000
		23	0.705	0.171	29510.	0.000
		24	0.760	0.098	34582.	0.000
		25	0.697	-0.302	38847.	0.000
		26	0.585	-0.116	41856.	0.000
		27	0.449	-0.067	43625.	0.000
		28	0.314	-0.026	44494.	0.000
		29	0.203	-0.007	44857.	0.000
		30	0.117	-0.025	44977.	0.000
		31	0.060	-0.014	45008.	0.000
		32	0.030	-0.020	45016.	0.000
		33	0.011	-0.022	45017.	0.000
		34	0.001	0.005	45017.	0.000
		35	-0.009	-0.016	45018.	0.000
		36	-0.017	-0.020	45021.	0.000

Şekil 35: 2014 PTF serisi için korelasyon değerleri

c	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
9.84	0.396	0.105	0.080	0.179	0.183

Tablo 24: Aralık 2014 PTF'lerine ait AR modelinin katsayıları

Hesaplanan regresyon katsayılarına göre 20 numaralı denklemde öngörülen hata terimlerinin değişimi Şekil 36'da görülmektedir. Modelde koşullu değişen varyans soruna işaret eden bu durum, yapılan ardışık ilişki testiyle de doğrulanmıştır. Bu durumu gidermek için, hata terimleri yaygın olarak¹⁷ kullanılan GARCH (1,1) ile modellenmekle birlikte, hata terimleri grafiğine göre ARCH (1)'in de yeterli olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, GARCH terimi istatistiksel olarak anlamlı çıkmamıştır.



Şekil 36: AR tipindeki PTF modelinin hata terimleri

Bu çerçevede, (20) numaralı denklemdeki PTF modeli (21) numaralı denklemdeki hali almıştır.

¹⁷ Örnek bir çalışma olarak Giurguis ve Felder'e (2004) bakılabilir.

$$ptf_t = c + \beta_1 ptf_{t-24} + \beta_2 ptf_{t-72} + \beta_3 ptf_{t-96} + \beta_4 ptf_{t-144} + \beta_5 ptf_{t-168} + u_t$$

$$\sigma_t^2 = c_1 + \alpha_1 u_{t-1}^2$$
(21)

Tablo 25’te gösterilen yeni modelin regresyon katsayıları (sabit terim hariç), % 95 güven aralığında anlamlıdır.

c	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	c_1	α_1
-3.715	0.116	0.188	0.15	0.141	0.42	129.102	0.706

Tablo 25: Aralık 2014 PTF’lerine ait AR-ARCH modelinin katsayıları

Oluşturulan yeni modelin değişen varyans sorununu ortadan kaldırdığı, sonuçları Tablo 26’da verilmekte olan ARCH-LM testi ile doğrulanmıştır.

F-istatistiği	0.341977	Olas. F(1,741)	0.5589
Örn. *R-kare	0.342742	Olas. Ki-Kare(1)	0.5583

Tablo 26: AR-ARCH tipindeki PTF modelinin ARCH-LM testi sonuçları

AR ve ARCH tipindeki modeller ile oluşturulan tahminlerin sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için, Aralık 2014 için yapılan PTF tahminlerinde elde edilen hata oranları (OMHY) Tablo 27’de verilmektedir.

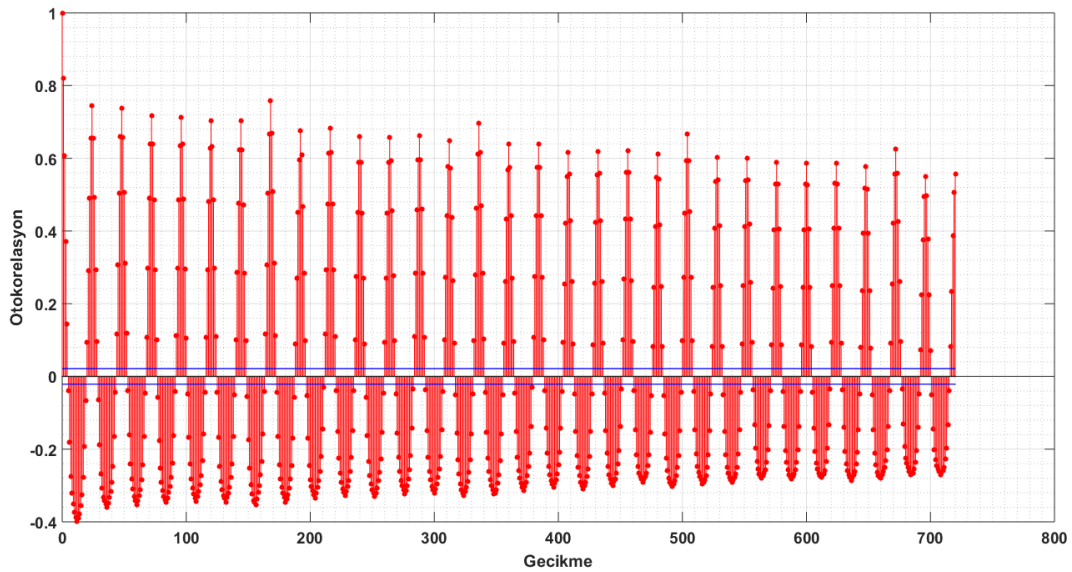
AR Modeli				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	8.24	7.95	9.56	8.59
			Aylık Hata (%)	12.97
AR-ARCH Modeli				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	8.70	10.97	9.09	7.76
			Aylık Hata (%)	13.85

Tablo 27: Aralık 2014’e ait ekonometrik modellerin sonuçları

4.7. HİBRİT MODEL

Birleşik Krallıktaki elektrik fiyatlarının tahmin edildiği çalışmada dalgacık dönüşümü kullanan Yao ve diğerleri (2000), fiyat serisinin yaklaşık bileşenlerini YSA ile tahmin ederken detay bileşenlerinin, yüksek frekanslı şekilde dalgalandıklarından, YSA ile tahmin edilmesinin zor olduğundan bahsetmiştir. Bu nedenle söz konusu çalışmada, fiyata ilişkin detay bileşeninin geçmiş dönemdeki detay bileşenlerinin ağırlık ortalaması ile belirlenmesi tahmin edilmesi tercih edilmiştir.

Bu bağlamda, detay bileşenlerini ayrıca ele alacak bir modelleme yapmanın faydalı olabileceği düşünülmüştür. 2014 PTF serisinin 4. dereceden Daubechies tipi dalgacık fonksiyonu kullanılarak yapılan 5. seviyedeki dalgacık dönüşümünden elde edilen detay bileşenlerinin toplamına (bundan sonra detay bileşen olarak anılacaktır) ait otokorelasyon grafiği Şekil 37’de gösterilmektedir.



Şekil 37: 2014 PTF serisinin detay bileşeninin otokorelasyonları

Şekil 37’ye bakıldığında, 24 saat (bir gün) ve katlarındaki gecikmelere ilişkin korelasyonların yüksek olduğu, 168 saat (bir hafta) ve katlarındaki gecikmelere ilişkin korelasyonların ise günlüklerden daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Diğer taraftan, PTF serisinin detay bileşeni Tablo 28’deki ADF testi sonuçlarına göre durağandır.

Gecikme uzunluğu: 35 (Otomatik- SIC'e dayalı, azami gecikme =36)

	t-İstatistiği	Olasılık*
Genişletilmiş Dickey-Fuller test istatistiği	-26.62253	0.0000
Kritik test değerleri: 1% seviyesi	-3.430924	
5% seviyesi	-2.861678	
10% seviyesi	-2.566885	

* MacKinnon (1996) tek taraflı p-değerleri.

Tablo 28: 2014 PTF serisinin detay bileşeni için ADF Testi sonuçları

Şekil 38'de verilen korelasyon grafiklerinden yola çıkılarak, detay bileşen serisinin AR tipi bir model ile modellenebileceği düşünülmüştür.

Otokorelasyon	Kısmi Otokorelasyon	OK	KOK	Q-İst.	Olas.	
		1	0.819	0.819	5881.2	0.000
		2	0.606	-0.197	9102.6	0.000
		3	0.371	-0.198	10306.	0.000
		4	0.145	-0.133	10490.	0.000
		5	-0.039	-0.058	10503.	0.000
		6	-0.180	-0.069	10787.	0.000
		7	-0.275	-0.060	11449.	0.000
		8	-0.320	-0.033	12349.	0.000
		9	-0.351	-0.115	13426.	0.000
		10	-0.373	-0.128	14647.	0.000
		11	-0.388	-0.115	15966.	0.000
		12	-0.399	-0.125	17361.	0.000
		13	-0.390	-0.086	18693.	0.000
		14	-0.378	-0.148	19945.	0.000
		15	-0.354	-0.138	21045.	0.000
		16	-0.325	-0.177	21972.	0.000
		17	-0.277	-0.145	22647.	0.000
		18	-0.193	-0.076	22973.	0.000
		19	-0.066	-0.011	23012.	0.000
		20	0.094	0.038	23090.	0.000
		21	0.290	0.147	23827.	0.000
		22	0.490	0.194	25939.	0.000
		23	0.654	0.188	29698.	0.000
		24	0.744	0.160	34565.	0.000
		25	0.655	-0.258	38340.	0.000
		26	0.493	-0.111	40477.	0.000
		27	0.293	-0.081	41232.	0.000
		28	0.097	-0.046	41314.	0.000
		29	-0.065	-0.028	41351.	0.000
		30	-0.189	-0.048	41666.	0.000
		31	-0.269	-0.039	42301.	0.000
		32	-0.308	-0.048	43133.	0.000
		33	-0.331	-0.054	44099.	0.000
		34	-0.342	-0.030	45129.	0.000
		35	-0.351	-0.054	46216.	0.000
		36	-0.359	-0.063	47351.	0.000

Şekil 38: 2014 PTF serisinin detay bileşeni için korelasyon değerleri

Bu kapsamda, detay bileşen serisi (*det*) için 22 numaralı denklemdeki model oluşturulmuştur.

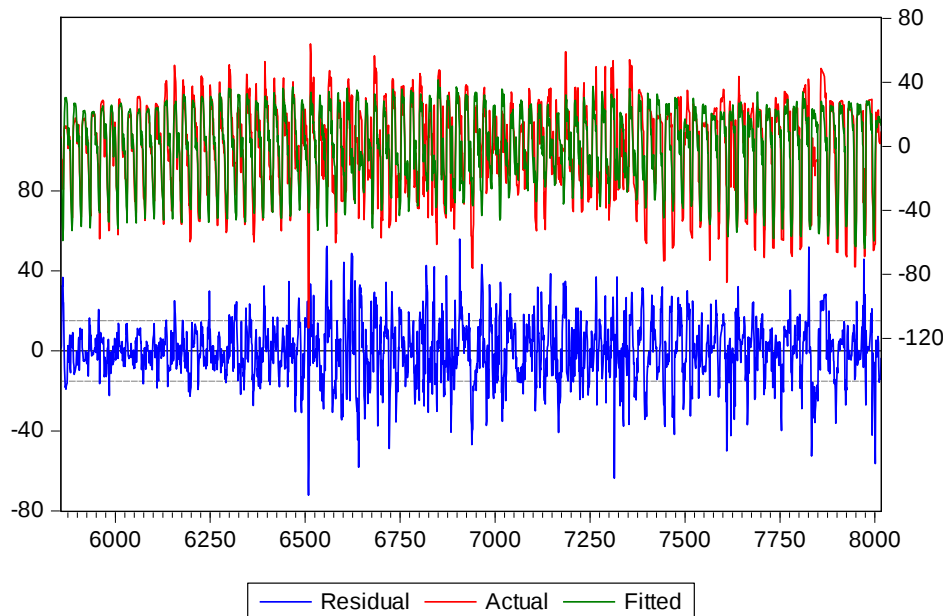
$$\begin{aligned} det_t = c + \beta_1 det_{t-24} + \beta_2 det_{t-48} + \beta_3 det_{t-72} + \beta_4 det_{t-96} \\ + \beta_5 det_{t-168} + \beta_6 det_{t-336} + \beta_7 det_{t-504} + u_t \end{aligned} \quad (22)$$

Tablo 29’da gösterilen bu modele ait regresyon katsayıları (sabit terim hariç), % 95 güven aralığında anlamlıdır.

c	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
-0.049	0.127	0.148	0.139	0.107	0.204	0.098	0.166

Tablo 29: Aralık 2014 için hesaplanan AR modelinin katsayıları

Hesaplanan regresyon katsayılarına göre (22) numaralı denklemde öngörülen hata terimlerinin değişimi Şekil 39’da görülmektedir. Modelde koşullu değişen varyans sorununa işaret eden bu durum, yapılan ardışık ilişki testiyle de doğrulanmıştır. Bu durumu gidermek için, hata terimleri GARCH (1,1) ile modellenmiş ve değişen varyans sorunun ortadan kalktığı, sonuçları Tablo 30’da verilmekte olan ARCH-LM testi ile doğrulanmıştır.



Şekil 39: AR tipindeki PTF detay bileşen modelinin hata terimleri

F-istatistiği	0.001008	Olas. F(1,741)	0.9747
Örn.*R-kare	0.001009	Olas. Ki-Kare(1)	0.9747

Tablo 30: AR-GARCH tipindeki PTF detay bileşen modelinin ARCH-LM testi sonuçları

Bu çerçevede, PTF serisinin detay bileşenlerine ilişkin (22) numaralı denklemdeki model (23) numaralı denklemdeki hali almıştır.

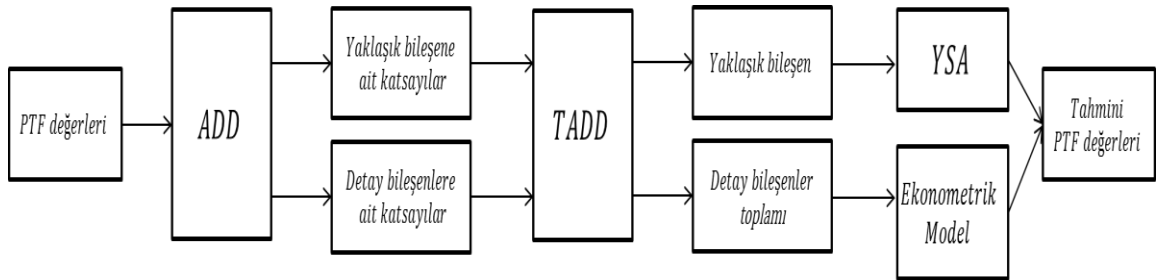
$$\begin{aligned}
 det_t &= c + \beta_1 det_{t-24} + \beta_2 det_{t-48} + \beta_3 det_{t-72} + \beta_4 det_{t-96} \\
 &\quad + \beta_5 det_{t-168} + \beta_6 det_{t-336} + \beta_7 det_{t-504} + u_t \\
 \sigma_t^2 &= c_1 + \alpha_1 u_{t-1}^2 + \gamma_1 \sigma_{t-1}^2
 \end{aligned} \tag{23}$$

Tablo 31’de gösterilen yeni modelin regresyon katsayıları, % 95 güven aralığında anlamlıdır.

c	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	c_1	α_1	γ_1
0.343	0.151	0.147	0.159	0.127	0.189	0.085	0.118	45.415	0.587	0.27

Tablo 31: Aralık 2014 PTF detay bileşenine ait GARCH modelinin katsayıları

Detay serisinin modellenmesinden sonra, süreç akışı Şekil 40’ta görüldüğü gibi kurgulanan hibrit modelin hata performansı incelenmiştir.



Şekil 40: Hibrit model ile PTF tahminine ait süreç akış şeması

Yapılacak karşılaştırmada kullanılmak üzere yine Aralık 2014’e ait PTF’ler tahmin edilmiştir. Serinin ADD ile ayrıştırılan; yaklaşık bileşeni YSA modeli ile, detay bileşeni ise AR-GARCH modeli tahmin edilmiş ve iki tahmin birleştirilerek asıl PTF tahminleri oluşturulmuştur. Burada önemli bir husus; karşılaştırmada kullanılan Yalın YSA ve ADD’li YSA tahminleri yapılırken detay bileşenlerinin gecikmelerinin yaklaşık

bileşenin tahminindeki girdi setinden farklı olarak ekonometrik modeldeki gecikmeler esas alınarak belirlenmesidir. Yine önceki bölümde olduğu gibi tahmin modelleri üçer kez çalıştırılmış ve hataların ortalama değerleri Tablo 32’de görüldüğü gibi gerçekleşmiştir.

ADD’li YSA				
(yaklaşın bileşen için ortalama tahmin hatası: % 3.58)				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	6.48	7.87	9.28	7.38
Aylık Hata (%)				11.56
ADD’li YSA + AR (Detay bileşen için)				
(yaklaşın bileşen için ortalama tahmin hatası: % 3.60)				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	5.94	7.29	8.97	7.04
Aylık Hata (%)				11.17
ADD’li YSA + AR-GARCH (Detay bileşen için)				
(yaklaşın bileşen için ortalama tahmin hatası: % 3.60)				
Hafta	1	2	3	4
Hata (%)	6.01	7.38	9.14	7.17
Aylık Hata (%)				11.30

Tablo 32: Aralık 2014 PTF’lerine ait karşılaştırmalı hata ortalamaları

4.8.TAHMİN MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

PTF tahminine yönelik olarak kurulan yalın yapay sinir ağı (Yalın YSA) ve ayrık dalgacık dönüşümlü yapay sinir ağı (ADD’li YSA) modellerinin başarılarına ilişkin karşılaştırma Tablo 22’de verilmişti. Bu alt bölümde, PTF’nin doğrudan ekonometrik bir modelle tahmin edilmesi ve PTF’nin ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak ayrıştırılması neticesinde ortaya çıkan yaklaşık ve detay bileşenlerin ayrı ayrı modellenmesi ile elde edilen sonuçlar önceki Yalın YSA ve ADD’li YSA modellerinin sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Bu kapsamda hazırlanan karşılaştırma Tablo 33’te görülmektedir.

	Aralık 2014 PTF tahminindeki Ortalama Hata (OMHY - %)
Yalın YSA	13.22
ADD'li YSA	11.99
ADD'li YSA (gecikmeler güncellenmiş)	11.56
AR	12.97
AR-ARCH	13.85
ADD'li YSA + AR (Detay bileşen için)	11.17
ADD'li YSA + AR-GARCH (Detay bileşen için)	11.30
Ortalama	12.29
Minimum	11.17
Maksimum	13.22

Tablo 33: Aralık 2014 için PTF tahmin modellerinin karşılaştırması

Tablo 33'te sunulan sonuçlara göre, en kötü hata performansı % 13.22 ile Yalın YSA modeline aittir. ADD'li YSA ile iyileşen başarı oranı, detay bileşenin tahminine ilişkin YSA modelinin girdi setindeki gecikme kademeleri ekonometrik modeldeki gecikmelerden yola çıkılarak güncellendiğinde daha da iyileşmiş ve % 11.56 oranına gelmiştir.

Yalın YSA'dan sonra en düşük başarı, % 12.97 ile AR tipindeki ekonometrik modele aittir. Artıklardaki değişen varyans problemini gidermek için oluşturulan ARCH modeli tahmin performansı açısından AR modelinden daha kötü sonuç vermektedir. Benzer bir sonuç, ADD'li YSA + GARCH modelinde de görülmüştür.

Tablo 32'deki sonuçlardan da anlaşıldığı üzere, PTF serisinin yaklaşık ve detay bileşenine ayrılmasından sonraki hata performansındaki iyileşmenin ana kaynağı yaklaşık bileşenin tahmininde ulaşılan düşük hata oranıdır. Diğer bir ifadeyle, hatanın önemli kısmı detay bileşenin tahmininde yaşanmaktadır. Bu sonuç Yao ve diğerlerinin (2000) çalışmasındaki tespit ile örtüşmektedir.

Bu çerçevede, PTF serisin yaklaşık ve detay bileşenlerini ayrı ayrı ele alınması için bir hibrit model geliştirilmiştir. Yaklaşık bileşenlerin YSA ile detay bileşenin ise ekonometrik bir model ile ele alındığı hibrit model olan ADD'li YSA + AR, % 11.17 ile en iyi hata performansına sahiptir. Dolayısıyla, geliştirilen hibrit model başarılı olarak değerlendirilmektedir.



SONUÇ

Dünya genelinde elektrik piyasalarında yaşanan serbestleşme, halihazırda büyük ölçeklerde depolanması mümkün olmayan elektrik enerjisinin tamamen piyasa koşulları içerisinde alınıp satılmasına imkan tanımıştır. Bu kapsamda sağlanan ilerlemenin bir sonucu olarak gelişmiş piyasalarda, elektrik enerjisinin saatlik, yarım saatlik veya birkaç dakikalık bazda farklı fiyatlar üzerinden ticaretinin yapılabildiği bir noktaya gelinmiştir. Bu gelişmeye paralel olarak ortaya çıkan piyasa mekanizmalarıyla elektriğin; gün öncesi, gün içi ve gerçek zamanlı dengeleme piyasalarında geçmişteki durumun aksine tamamen arz-talep dengesine bağlı fiyatlardan ticarete konu edilmesi mümkün olmuştur.

Yaşanan bu gelişme doğal olarak piyasadaki oyuncularda pozisyon optimizasyonu ihtiyacını ortaya çıkarmış ve bir taraftan yukarıda ifade edilen farklı piyasalardaki işlemlere aktif katılımı, diğer taraftan ise risk yönetimi imkanı sağlamak üzere sunulan türev araçları etkin şekilde kullanmayı teşvik etmiştir. Gün öncesi piyasası, sayılan piyasa mekanizmaları arasında ekonomik açıdan öne çıkmaktadır. Çünkü, gerçek zamanlı dengeleme piyasası, gerçek zamanda arzda ve talepte ortaya çıkan beklenmedik farklılıklar ile sistem kısıtlarından kaynaklanan sorunları yönetmek amacıyla işletilmektedir. Gün içi piyasası ise, gün öncesi piyasasında gerçekleştirilen işlemler neticesinde ortaya çıkan üretim-tüketim dengesi ve yük dağıtımı ile gerçek zamana doğru geldikçe ortaya çıkan üretim-tüketim dengesi ve yük dağıtımı arasındaki boşluğu doldurarak piyasa oyuncularına bir pozisyon yönetimi aracı sunmaktadır. Son olarak, farklı risk yönetimi araçları sunan türev piyasalar, diğer piyasalarda gelecekte gerçekleşecek işlemler neticesinde ortaya çıkması beklenen ve oyuncuları adlıkları pozisyonlar nedeniyle risk altına sokacak durumların oluşturabileceği belirsizliği yönetmeyi sağlamaktadır. Gün öncesi piyasası ise, oyuncuların ertesi güne ait tüm bilinebilecek verileri değerlendirerek pozisyon aldıkları, bu neticede oluşan dengeleme sonuçlarının diğer piyasalardaki dengeleme işlemlerine temel teşkil ettiği ve oyuncular ile karar alıcılar için referans niteliğinde bir fiyat sinyali üreten bir piyasa olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda, gün öncesi piyasasında oluşan fiyatların; önceden bilinebilmesi önemli bir konu olarak öne çıkmış ve tez kapsamında incelenmiş olan birçok çalışmada da görüldüğü üzere mümkün olduğunca doğru şekilde tahmin edilmesine yönelik olarak farklı modeller geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise, Türkiye’de işletilmekte olan gün öncesi piyasasında ortaya çıkan saatlik fiyatların tahmin edilmesi üzerine çalışılmıştır. Yapılan çalışmanın üç temel katkısı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, gerçek anlamda 1 Aralık 2011 tarihinde işletilmeye başlanan gün öncesi piyasasının artan serbestleşme ve piyasa derinliği bakımından güncel bir durumunu yansıtan bir dönemi olan 2014 yılının incelenmiş olmasıdır. İkincisi, daha önceki çalışmalarda kullanılmayan ancak fiyat oluşumu üzerinde etkisi olduğu değerlendirilen değişkenlerin fiyat tahmininde kullanılmasıdır. Üçüncüsü ise yüksek derecede oynak olan PTF’nin sadece olduğu gibi tahmin edilmesi yerine bu olumsuz özelliği ele almak üzere dalgacık dönüşümünün kullanılması ve böylelikle tahmin başarısının iyileştirilebildiğinin gösterilmesidir.

Bu kapsamda, Ayrık Dalgacık Dönüşümü ve Yapay Sinir Ağları kullanılarak oluşturulan modellerle yapılan tahminler, belirli bir hafta ya da ay yerine farklı mevsimlerdeki ayların tüm saatleri için elde edilmiş ve böylelikle sağlıklı bir sonuç analizi yapılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en iyi tahmin yaz mevsiminden seçilen ay olan Temmuz ayında, en kötü tahmin ise kış mevsiminden seçilen Aralık ayında gerçekleşmiştir. En iyi ve en kötü tahmin yapılan aylara ilişkin sonuçların, geçmiş PTF değerleri ile birlikte başka değişkenler kullanılarak oluşturulan farklı modeller ile ne kadar değiştiği ayrıca incelenmiştir.

Bu çerçevede elde edilen sonuçlara göre, tahmin yapılan saatin hangi saat olduğuna dair bilgi haricindeki diğer bilgiler (tüketim, ikili anlaşma miktarı, YEKDEM portföyü üretimi, toplam alış miktarı, toplam satış miktarı ve tahmin yapılan günün hangisi olduğu bilgisi) kullanılarak oluşturulan modellerin tahminleri, sadece geçmiş PTF değerleri kullanılarak oluşturulan modellerin tahminlerine göre daha başarılı sonuçlar üretebilmiştir. Sadece geçmiş dönem PTF değerleri kullanılarak yapılan tahminler ile

karşılaştırıldığında, ilave olarak kullanılan değişkenlerden sadece toplam alış miktarının tüm durumlarda hata oranını iyileştirdiği görülmüştür.

Diğer taraftan, PTF'nin tahmin yapmayı zorlaştıran yüksek oynaklığının ayrıca ele alınmasını sağlayan dalgacık dönüşümü'nün kullanılmasının tahminler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, Ayrık Dalgacık Dönüşümü kullanılarak PTF serisi yaklaşık ve detay bileşenlerine ayrılmış ve bu bileşenlerden Ters Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile görece daha kararlı ve daha oynak hareket eden iki ayrı PTF serisi elde edilmiştir. Daha sonra bu 2 seri için ayrı tahminler yapılarak elde edilen sonuçlar birleştirilmiş ve bu durumda tahminlerin belirgin derecede iyileştiği gözlenmiştir. Buradan hareketle, dalgacık dönüşümünün oynak bir seri olan PTF'nin tahminde kullanılmasının başarılı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Ayrıca, tahmin için geliştirilen ekonometrik modelin, sadece yapay sinir ağı ile oluşturulan modelden iyi, dalgacık dönüşümlü yapay sinir ağı modelinden ise kötü sonuç verdiği görülmüştür. PTF serisindeki oynaklığı daha iyi ele almak için geliştirilen ve PTF'lerin yaklaşık bileşenlerinin yapay sinir ağı, detay bileşenlerinin ise ekonometrik yöntem ile hibrit şekilde modellenmesi başarılı sonuç vermiştir.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, PTF'lerin tahmininde dalgacık dönüşümünün kullanılması ve PTF'nin görece daha kararlı veya oynak hareket eden farklı bileşenlerinin yapay sinir ağı ile ekonometrik yaklaşımı birleştiren hibrit bir model ile ele alınması durumunda daha başarılı tahminler yapılabilmektedir.

Saatlik elektrik fiyatlarının ayrıştırılarak tahmin edilmesi sürecinde göze çarpan bir husus, görece daha oynak olan detay bileşenin tahminindeki zorluktur. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda bu bileşenin daha başarılı şekilde modellenmesi üzerine odaklanılabilir. Ayrıca, elektrik fiyatlarının arz-talep dengesine dayalı şekilde oluştuğundan hareketle, fiyat oluşumunda doğal olarak etkisi bulunan parametrelerin (örneğin saatlik emre amade üretim kapasitesi, sıcaklık, elektrik kullanılabilir doğalgaz miktarı bilgileri) saatlik bazda kullanılabilecek şekilde paylaşılmasının faydalı olabileceği değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda, doğalgaz toptan satış piyasasının elektrik piyasasına benzer şekildeki EPİAŞ bünyesinde dengeleme ve uzlaştırma işlemlerine tabi hale gelmesine yönelik olarak çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olan doğalgazın işlem gördüğü dinamik bir piyasanın olması, elektrik fiyatlarının oluşumunda ve tahmininde arz miktarları ile maliyet bileşeni bakımından önemli bir girdi sağlayabilecektir.

Ayrıca, 2001 yılında başlayan serbestleşme süreci ile çok oyunculu bir görünüme kavuşan piyasanın daha rekabetçi bir hale gelmesinin fiyat oluşumunda arz-talep dengesinin belirleyiciliğini artıracığından hareketle, bu yöndeki gelişmelere paralel olarak fiyat tahmininde yaşanan zorluğun da hafifleyeceği söylenebilir. Diğer taraftan Bölüm 4.1’de yer alan 2014 yılı PTF değerlerine ilişkin açıklamalardan yola çıkılarak, fiyatların beklenilenin aksine yıl içerisinde belirli bir seviyenin üzerine pek çıkmadığı görülmektedir. Bu durumun, doğrudan bir piyasa aksaklığı olduğu sonucuna varmak mümkün olmasa da düşündürücü olduğu belirtilmelidir. Satış tekliflerinin üzerinde belirli bir yönlendirme olması ile açıklanabilecek olan bu hususun ortadan kalkması, bir yandan fiyat değerlerini daha oynak hale getirirken, diğer yandan arz-talep dengesinin belirleyiciliğini artırabilecektir. Fiyat tahmini başarısı açısından hem olumlu hem de olumsuz sonuçlar ortaya çıkaracak olan bu durum, piyasadaki gelişime ve derinleşmeye paralel olarak daha net şekilde yorumlanabilir.

KAYNAKÇA

- Addison, P. S. (2002). *The Illustrated Wavelet Transform Handbook Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*, Londra, Taylor & Francis.
- Aggarwal, S.K., Saini, L.M., Kumar, A. (2009). Electricity Price Forecasting in Deregulated Markets: A Review and Evaluation. *Electrical Power and Energy Systems* 31, 13-22.
- Amjady, N. 2006. Day ahead price forecasting of electricity markets by a new fuzzy neural network. *IEEE Trans Power Syst*, 21(2), 887–896.
- Amjady, N. and Keynia, F. 2008. Day ahead price forecasting of electricity markets by a mixed data model and hybrid forecast method. *Electrical Power and Energy Systems*, 30, 533–546.
- Barroso, Luiz Augusto, Cavalcanti, Teofilo H., Giesbertz, Paul ve Purchala, Konrad (2005). Classification of Electricity Market Models Worldwide, Paper 102, on behalf of CIGRE Task Force C5.2.1
- Bunn, D. W. (2000). Forecasting loads and prices in competitive power markets. *Proceedings of the IEEE* 88 (2), 163-169.
- Kim, C.-I., Yu, I.-K. and Song, Y.H. (2002) *Prediction of system marginal price of electricity using wavelet transform analysis, Energy Conversion and Management* 43, 1839–1851.
- Catalão, J.P.S., Pousinho, H.M.I. ve Mendes, V.M.F. (2011a). Short-Term Electricity Prices Forecasting in a Competitive Market by a Hybrid Intelligent Approach, *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1061-1065.
- Catalão, J.P.S., Pousinho, H.M.I. ve Mendes, V.M.F. (2011b). Short-Term wind power forecasting in Portugal by neural networks and wavelet transform, *Renewable Energys*, 52, 1245-1251.
- Chogumaira, E. ve Hiyama, T. (2008). Estimation of Short-Term Wholesale Electricity Prices Using A Combination of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic, *The International Conference on Electrical Engineering*, No. O-184.
- Conejo, A.J., Plazas, M.A., Espinola, R., Molina, A.B. (2005). Day-ahead Electricity Price Forecasting Using the Wavelet Transform and ARIMA Models. *IEEE Transactions on Power Systems* 20 (2), 1035-1042.

- Contreras, J., Espinola, R., Nogales, F.J., Conejo, A.C. (2003). ARIMA Models to Predict Next-Day Electricity Prices. *IEEE Transactions on Power Systems* 18(3), 1014-1020.
- Cuaresma, J.C., Hlouskova, J., Kossmeier, S., Obersteiner, M. (2004). Forecasting Electricity Spot-Prices Using Linear Univariate Time-Series Models. *Applied Energy* 77, 87-106.
- Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ). 2015 Faaliyet Raporu, İstanbul, Mart 2016.
- Engle, R.F. (1982). Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation, *Econometrica* 50, 987–1007.
- Garcia, R.C., Contreras, J., van Akkeren, M. ve Garcia, J.B.C. (2005). A GARCH Forecasting Model to Predict Day-ahead Electricity Prices, *IEEE Transactions on Power Systems* 20(2), 867–874.
- Giri, R., Chowdhury, A., Ghosh, A., Panigrahi, B. K. ve Mohapatra, A. Electricity price forecasting: A hybrid wavelet transform and evolutionary- ANN approach, *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on*, New Delhi, 1-6.
- Girish, G. P. ve Vijayalakshmi, S. (2013). Determinants of Electricity Price in Competitive Power Market, *International Journal of Business and Management* 8 (21), 70-75.
- Girish, G. P. ve Vijayalakshmi, S. (2014). Forecasting Electricity Prices in Deregulated Wholesale Spot Electricity Market: A Review, *International Journal of Energy Economics and Policy* 4(1), 32-42.
- Guirguis, H.S. ve Felder, F.A. (2004) Further advances in forecasting day-ahead electricity prices using time series models, *KIEE International Transactions on PE* 4-A(3), 159–166.
- Gupta, A., Chawla, P. ve Chawla, S. (2013). Short Term Electricity Price Forecasting Using ANN and Fuzzy Logic under Deregulated Environment, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 10(2), 3852-3858.
- Haiteng, X., Niimura, T. (2004). Short-Term Electricity Price Modeling and Forecasting Using Wavelets and Multivariate Time Series, *IEEE Power Systems Conference and Exposition PES*, no 1, 10-13 October 2004.
- Hamzaçebi, C. (2011). Yapay Sinir Ağları: Tahmin Amaçlı Kullanımı Matlab ve Neurosolutions Uygulamalı. Bursa, Ekin Basım Yayın Dağıtım.
- Haykin, S. (1994). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Macmillan, New York.

- Huisman, R., Mahieu, R. (2003). Regime Jumps in Electricity Prices, *Energy Economics* 25, 425–434.
- Huisman, R., de Jong, C. (2003). Option Pricing for Power Prices with Spikes, *Energy Power Risk Management* 7.11, 12–16.
- Hunt, Sally (2002). *Making Competition Work in Electricity*, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2002
- (IEA) International Energy Agency (2005). *Lessons From Liberalized Electricity Markets*, Paris.
- Ismail, Z. ve Mansor, R. (2011) Fuzzy Logic Approach for Forecasting Half hourly Malaysia Electricity Load Demand”, International Symposium on Forecasting - Prague proceedings, 1-16.
- Jammazi, R. ve Aloui, C. (2012). Crude oil price forecasting: Experimental evidence from wavelet decomposition and neural network modeling. *Energy Economics*, 34, 828-841.
- Kölmek, F. (2009). Serbest Elektrik Piyasalarında Kısıt Yönetimi. Uzmanlık Tezi, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara.
- Kölmek, F. (2012). Elektrik Piyasasında Sistem İşletimi Üzerine. Enerji Piyasası Bülteni, 21, 25-27.
- Kölmek ve Navruz (2015). Forecasting the day-ahead price in electricity balancing and settlement market of Turkey by using artificial neural networks, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23, 841-852.
- Küçük, M. ve Ağralıoğlu, M. (2006). Dalgacık dönüşüm tekniği kullanılarak hidrolojik akım serilerinin modellenmesi, *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 5(2), 69-80
- Lee, D. T. L. ve Yamamoto, A. (1994). Wavelet Analysis: Theory and Applications, Aralık 1994 Hewlett-Packard Journal, 44-52.
- Mallat, S. G. (1989). A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), 674-693.
- Mallat, S. G. (2009). *A Wavelet Tour of Signal Processing, The Sparse Way*, Boston, Academic Press.
- Misiorek, A., Trück, S., Weron, R. (2006) Point and Interval Forecasting of Spot Electricity Prices: Linear vs. Non-Linear Time Series Models, *Stud. Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 10(3), Art. 2.

- Morsche, Hennie ter. Wavelet Basics, https://www.win.tue.nl/casa/meetings/seminar/previous/_index_files/wavelets1.pdf
- Mugele, Ch., Rachev, S.T. ve Trück, S. (2005). Stable Modeling of Different European Power Markets, *Investment Management and Financial Innovations* 2(3), 65-85.
- Nogales, F.J., Contreras, J., Conejo, A.J., Espinola, R. (2002). Forecasting Next-Day Electricity Prices by Time Series Models. *IEEE Transactions on Power Systems* 17 (2), 342-348.
- Özgüner, E. (2012). Short Term Electricity Price Forecasting in Turkish Electricity Market, *Doktora Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
- Öztemel, E. (2006). Yapay Sinir Ağları. İstanbul, Papatya Yayıncılık,.
- Pino, R., Parreno, J., Gomez, A., Priore, P. (2008). Forecasting Next Day Price of Electricity in the Spanish Electricity Market Using Artificial Neural Networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21, 53-62.
- Polikar, R. (2009). The Story of Wavelets. IMACS/IEEE CSCC'99 Proceedings, 5481-5486.
- Pramanik, N., Panda, R. K. Ve Singh, A. (2011). Journal of Hydroinformatics, 13(1), 49-63.
- Schmutz, A. ve Elkuch, P. (2004) Electricity price forecasting: Application and experience in the European power markets, *Proceedings of the 6th IAEE European Conference*, Zurich.
- Shafie-khah, M., Moghaddam, M. P. ve Sheikh-El-Eslami, M.K. (2011). Price forecasting of day-ahead electricity markets using a hybrid forecast method, *Energy Conversion and Management*, 52, 2165–2169.
- Shahidehpour, M., Yamin, H. ve Z. Li, Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling and Risk Management. John Wiley & Sons, 2002.
- Singal, D. and Swarup, K. S. (2011). Electricity Price Forecasting Using Artificial Neural Networks. *Electrical Power and Energy Systems*, 33, 550-555.
- Singh, N. and Mohanty, S.R. (2015) A Review of Price Forecasting Problem and Techniques in Deregulated Electricity Markets. *Journal of Power and Energy Engineering*, 3, 1-19.
- Sinir Hücresi (Nöron) ve Yapısı. (t.y.). Erişim: 2 Mart 2006, http://www.fenokulu.net/yeni/Fen-Konulari/Konu/Sinir-Hucresi-Noron-ve-Yapisi_1576.html

- Swider, D.J. and Weber, C. (2006). Extended ARMA Models for Estimating Price Developments on Day-Ahead Electricity Markets, *Electric Power Systems Research* 77(5/6), 583-593.
- Talasli, İ. (2012). Stochastic Modeling off Electricity Markets, *Doktora Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
- Tan, Z., Zhang, J., Wang, J., & Xu, J. (2010). Day-ahead electricity price forecasting using wavelet transform combined with ARIMA and GARCH models. *Applied Energy*, 87(11), 3606–3610.
- Taşçıkaraoğlu, A. ve Uzunoğlu, M. (2011). Dalgacık Dönüşümü ve Yapay Sinir Ağları İle Rüzgar Hızı Tahmini. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 106-111.
- Tayşi, Z. C., Biricik, G. Ve Bozkurt, Ö. Ö (2015). Türkiye Elektrik Piyasası için Fiyat Tahmin Sistemlerinin Değerlendirilmesi. 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 620-623.
- Torro, H. (2007). Forecasting Weekly Electricity Prices at Nord Pool. *Nota di Lavoro* 88.
- Vatansever, F., Uysal, F. ve Uzun, A. (Aralık 2002). Ayrık Dalgacık Dönüşümü İle Gürültü Süzme, ELECO`2002 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Bursa.
- Wang, A. and Ramsay, B. (1997). Prediciton of system marginal price in the UK Power pool using neural networks”, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 2116-2120.
- Wang, A. and Ramsay, B. (1998). A neural network based estimator for electricity spot pricing with particular reference to weekend and public holidays. *Neurocomputing*, 23, 47–57.
- Weron, R., Misiorek, A. (2005). Forecasting Spot Electricity Prices with Time Series Models, *Proceedings of International Conference on the European Electricity Market EEM*, Lodz, Polonya 10-12 May 2005.
- Weron R. (2006). *Modeling and Forecasting Electricity Loads and Prices: A Statistical Approach*, Wiley, Chichester.
- Weron R., Misiorek, A. (2006). Short-Term Electricity Price Forecasting with Time Series Models: A Review and Evaluation, HSC Research Reports HSC/06/01, Hugo Steinhaus Center, Wroclaw University of Technology.
- Weron, R., Misiorek, A. (2008). Forecasting Spot Electricity Prices: A Comparison of Parametric and Semiparametric Time Series Models, *International Journal of Forecasting*, 24, 744-763.

- Weron, R. (2014) Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future, *International Journal of Forecasting* 30, 1030-1081.
- Wu, L., ve Shahidehpour, M. (2010), A Hybrid Model for Day-Ahead Price Forecasting, *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(3), 1519-1530.
- Yamin, H.Y., Shahidehpour, S.M. and Li, Z. (2004). Adaptive short-term electricity price forecasting using artificial neural networks in the restructured power markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 26(8), 571–581.
- Yao, S. J., Zhang, L. Z ve Cheng, X. Y. (2000). Prediction of System Marginal Prices by Wavelet Transform and Neural Networks. *Electric Machines and Power Systems*, 28. 983-993.
- Yıldırım, M. H., Özmen, A., Bayrak, Ö. T. ve Weber, G. W. (2012). Electricity price modelling for Turkey. *Operations Research Proceedings 2011*, 39-44.
- Zhou, M., Yan, Z., Ni, Y. ve Li, G. (2004). An ARIMA approach to forecasting electricity price with accuracy improvement by predicted errors. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 233–238.
- Zhou, M., Yan, Z., Ni, Y., Li, G. ve Nie, Y. (2006). Electricity price forecasting with confidence-interval estimation through an extended ARIMA approach, *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, 153(2), 233–238.

EKLER

EK-1: YAPAY SİNİR AĞLARINDA ÖĞRENME

Tek Katmanlı Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme

YSA’larda öğrenme temel olarak ağ içerisindeki ağırlıkların en uygun değerlerinin bulunması anlamına gelmektedir. Böylelikle, ağ eğitilmiş ve kendisine daha önce gösterilmemiş örnekler/olaylar hakkında sonuç üretebilir hale gelir. Bu çerçevede, eğitim sürecini şu şekilde özetlemek mümkündür:¹⁸

1. Bağlantıların ağırlıkları (w) için rastgele başlangıç değerleri atanır.
2. Girdi setinden bir girdi vektörü (x_i) seçilir.
3. Ağın çıktısı ($y_i = \varphi(v_i)$) hesaplanır (burada $v_i = \sum_i w_i x_i + b$)
4. Hedeflenen çıktı değeri (t_i) ile ağın çıktısı (y_i) karşılaştırılır ve aradaki fark ($e_i = t_i - y_i$) bulunur.
5. Hesaplanan fark kullanılarak ağ içerisindeki ağırlıklar aşağıdaki gibi güncellenir.

$$w^{yeni} = w^{eski} + \eta(t_i - y_i)x_i$$

$$b^{yeni} = b^{eski} + \eta(t_i - y_i)$$

Buradaki η , hataların katsayıların güncellenmesinde ne oranda etkili olacağını belirleyen öğrenme katsayısı veya öğrenme oranı olarak adlandırılan pozitif bir sabittir. Bu terimin çok küçük olması yavaş bir öğrenme sürecine, çok büyük olması ise hızlı ama hatalı bir öğrenmeye sebep olabileceğinden, terimin seçimi ağın öğrenmesi açısından çok önemlidir.

6. Hedeflenen çıktı değeri ile ağın çıktısı arasındaki hata istenilen seviyeye düşene kadar 2 numaralı adıma dönülerek iterasyona devam edilir.

¹⁸ Burada sürecin anlatılmasında Hamzaçebi’de (2011, s. 33) yer alan açıklamalardan faydalanılmıştır.

Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme

Çok katmanlı YSA'larda, tek bir nöron yerine farklı katmanlarda yer alan nöron grupları bulunduğundan, tek katmanlı YSA'lara göre çok daha karmaşık bir öğrenme süreci söz konusudur. Çünkü ağın büyüklüğüne göre, üretilen çıktının hedeflenen çıktı ile karşılaştırılması sonucunda güncellenmesi gereken çok sayıda ağırlık katsayısı vardır. Bu noktadan hareketle, çok katmanlı YSA'lardaki karmaşık öğrenme süreci aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Hamzaçebi, 2011, s. 51-52 ve Öztemel, 2006, s. 77-80):

x	Girdi vektörü
t	Hedeflenen çıktı vektörü (t_k : k. nöronun hedeflenen çıktısı)
δ_k^c	y_k çıktı nöronunda oluşan hata sonucunda w_{jk}^c ağırlıkları için belirlenen düzeltme payı
δ_j^g	Gizli katmandaki nöronların w_{ij}^g ağırlıkları için belirlenen düzeltme payı
η	Öğrenme oranı
α	Momentum katsayısı
b_j^g	j. gizli nöron için eşik değeri ağırlığı
b_k^c	k. çıktı nöronu için eşik değeri ağırlığı
v_j^g	j. gizli nöron için net girdi
v_j^c	k. çıktı nöronunun net girdisi.
y_j^g	j. gizli nöronun çıktısı. Diğer bir ifadeyle,

$$y_j^g = \varphi(v_j^g) = \varphi\left(\sum_i w_{ij}^g x_i + b_j^g\right)$$

y_k^c k. çıktı nöronunun çıktısı. Diğer bir ifadeyle,

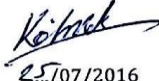
$$y_k^c = \varphi(v_j^c)$$

olmak üzere;

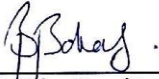
Adım	Yapılacaklar
1	Bağlantıların ağırlıkları için rassal başlangıç değerleri atanır. Öğrenme parametreleri (η , α) atanır ve durdurma kriteri (maksimum iterasyon sayısı, ulaşılması hedeflenen hata oranı) belirlenir.
2	Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar Adım 3-10 tekrarlanır.
3	Eğitim kümesindeki her bir girdi-çıkı seti için Adım 4-9 tekrarlanır
4	Girdi vektöründen x_i girdi seti alınır ve gizli katman nöronlarına gönderilir.
5	j. gizli katman nöronunun net girdisi (v_j^g) ve çıktısı (y_j^g) hesaplanır: $y_j^g = \varphi(v_j^g) = \varphi\left(\sum_i w_{ij}^g x_i + b_j^g\right)$
6	Çıktı katmanındaki nöronlar net girdilerini (v_j^c) aktivasyon fonksiyonundan geçirerek kendi çıktılarını (y_k^c) üretir: $y_k^c = \varphi(v_j^c)$
7	Her bir çıktı nöronunda hata düzeltme payı hesaplanır. $\delta_k^c = (t_k - y_k^c) \varphi'(v_j^c)$ Burada $\varphi'(\cdot)$ aktivasyon fonksiyonunun türevidir. Sonrasında, gizli katmanı çıktı katmanına bağlayan ağırlıklarda ve eşik değeri ağırlıklarında yapılması gereken değişim miktarı hesaplanır: $\Delta w_{jk}^{c,yeni} = \eta \delta_k^c y_j^g + \alpha \Delta w_{jk}^{c,eski}$ $\Delta b_k^{c,yeni} = \eta \delta_k^c + \alpha \Delta b_k^{c,eski}$ Burada, $\Delta(\cdot)^{eski}$ ifadesi bir önceki iterasyonda hesaplanan değişim miktarını, $\Delta(\cdot)^{yeni}$ ise mevcut iterasyon için hesaplanan değişim miktarını etmektedir. Dolayısıyla, α momentum katsayısı kullanılarak bir önceki değişim miktarlarının belirli bir oranda bir sonraki değişime eklenmesi sağlanır. Böylelikle, ağırlık öğrenme sırasında (hata performansı bakımından) yerel bir optimum noktasına takılmasının önüne geçilmeye ve global optimum noktaya ulaşabilmesi amaçlanmaktadır.

8	Her bir gizli katman nöronu için net hata girdisi hesaplanır. $\delta_j^{g,net} = \sum_k \delta_k^c w_{jk}^c$ Net hata girdisi yardımıyla her bir gizli nöron için hata bilgi değeri hesaplanır. $\delta_j^g = \delta_j^{g,net} \varphi'(v_j^g)$ Böylelikle, girdi katmanını gizli katmana bağlayan ağırlıklarda ve eşik değeri ağırlıklarında yapılması gereken değişim miktarını hesaplanır: $\Delta w_{ij}^{g,yeni} = \eta \delta_j^g x_i + \alpha \Delta w_{ij}^{g,eski}$ $\Delta b_j^{g,yeni} = \eta \delta_j^g + \alpha \Delta b_j^{g,eski}$
9	Çıktı katmanında ve gizli katmanda yer alan her bir nöronunun sahip olduğu ağırlıklar aşağıdaki gibi güncellenir. $w_{jk}^c = w_{jk}^{c,eski} + \Delta w_{jk}^{c,yeni}$ $w_{ij}^g = w_{ij}^{g,eski} + \Delta w_{ij}^{g,yeni}$ $(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p)$
10	Durdurma kriterinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir.

EK-2: ETİK KURUL İZİNİ

 HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ TEZ ÇALIŞMASI ETİK KURUL İZİN MUAFİYETİ FORMU
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ İKTİSAT ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA Tarih: <u>25</u>/07/2016 Tez Başlığı / Konusu: Türkiye Elektrik Piyasasında Fiyat Oluşumunun Analizi ve Fiyat Tahmin Modelleri Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmam: 1. İnsan ve hayvan üzerinde deney niteliği taşımamaktadır, 2. Biyolojik materyal (kan, idrar vb. biyolojik sıvılar ve numuneler) kullanılmasını gerektirmemektedir. 3. Beden bütünlüğüne müdahale içermemektedir. 4. Gözlemsel ve betimsel araştırma (anket, ölçek/skala çalışmaları, dosya taramaları, veri kaynakları taraması, sistem-model geliştirme çalışmaları) niteliğinde değildir. Hacettepe Üniversitesi Etik Kurullar ve Komisyonlarının Yönergelerini inceledim ve bunlara göre tez çalışmamın yürütülebilmesi için herhangi bir Etik Kuruldan izin alınmasına gerek olmadığını; aksi durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim. Gereğini saygılarımla arz ederim.  <u>25/07/2016</u> Adı Soyadı: Fatih KÖLMEK Öğrenci No: 19661142684 Anabilim Dalı: İktisat Programı: Doktora Statüsü: ☐ Y.Lisans ☐ Doktora ☒ Bütünleşik Dr.
<u>DANIŞMAN GÖRÜŞÜ VE ONAYI</u>  Doç. Dr. Bahar Bayraktar SAĞLAM Detaylı Bilgi: http://www.sosyalbilimler.hacettepe.edu.tr Telefon: 0-312-2976860 Faks: 0-3122992147 E-posta: sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr

EK-3: ORJİNALLİK RAPORU

	HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ İKTİSAT ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA	
Tarih: 26/07/2016	
Tez Başlığı / Konusu: Türkiye Elektrik Piyasasında Fiyat Oluşumunun Analizi ve Fiyat Tahmin Modelleri Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam <u>109</u> sayfalık kısmına ilişkin, 26/07/2016 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % <u>4</u> 'dir. Uygulanan filtrelemeler: 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç, 2- Kaynakça hariç 3- Alıntılar hariç/dâhil 4- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim. Gereğini saygılarımla arz ederim.  26/07/2016 Adı Soyadı: Fatih KÖLMEK Öğrenci No: 19661142684 Anabilim Dalı: İktisat Programı: Doktora Statüsü: ☐ Y.Lisans ☐ Doktora ☒ Bütünleşik Dr.	
<u>DANIŞMAN ONAYI</u> UYGUNDUR.  Doç. Dr. Bahar Bayraktar SAĞLAM	