İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ BİRİM FİYATLARININ KAOTİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sercan MACİT

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ BİRİM FİYATLARININ KAOTİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sercan MACİT
301111023

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bihrat ÖNÖZ

HAZİRAN 2018

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301111023 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sercan MACİT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ BİRİM FİYATLARININ KAOTİK ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Bihrat ÖNÖZ** İstanbul Teknik Üniversitesi	……
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Kasım KOÇAK** İstanbul Teknik Üniversitesi	……
	Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ Yıldız Teknik Üniversitesi	……

Teslim Tarihi : 04 Mayıs 2018
Savunma Tarihi : 06 Haziran 2018

Biricik eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Bu zorlu ama bir o kadar güzel süreçte tez konusunun belirlenmesinden sonuna kadar her aşamada benden yardımını hiç esirgemeyen, büyük bir sabırla her zaman yanımda olan tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Bihrat Önöz'e büyük bir teşekkürü borç bilirim. Çalışma esnasında zorlandığım ve duraksadığım bölümlerde beni rahatlatan, tecrübeleriyle önümü aydınlatan, ne kadar yoğun olsa da bana zaman ayıran saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Aslıhan Albostan'a, elde ettiğim sonuçlar üzerine çok değerli fikirleriyle katkıda bulunan, engin tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Kasım Koçak'a çok ama çok teşekkür ederim. Ek olarak literatüre kazandırdığı programın üzerinden çok zaman geçmiş olmasına rağmen kendisine ulaştığım zaman bana son derece hoşgörü ile yaklaşan ve yardımını esirgemeyen şu an Londra Queen Mary Üniversitesi'nde akademisyenlik görevini sürdüren Prof. Joshua Reiss'e özel teşekkürlerimi sunarım. Son olarak ben bu çalışmayı sürdürürken bana sonsuz destek olan, bitirebilmem için elinden gelen her fedakarlığı gösteren ve bana olan inancını hiçbir zaman kaybetmeyen biricik eşim Başak Bengi Macit'e ve canım annem Feriha Macit, canım babam Mehmet Macit ve canım ablam Günseli Macit'e minnet dolu teşekkürlerimi sunarım. Özel olarak bu süreçteki çok değerli yardımlarından dolayı ikinci ailem olan Hacer Bengi ve Av. A. Haydar Bengi'ye çok ama çok teşekkür ederim.

Mayıs 2018

Sercan Macit
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ……..vii
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR xi
ÇİZELGE LİSTESİ..... xiii
ŞEKİL LİSTESİ..... xv
ÖZET……..xvii
SUMMARY…. xix
1. GİRİŞ…….. 1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı 2
1.2 Literatür Araştırması 2
2. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI 7
2.1 Elektrik Enerjisi Sektörünün Gelişimi 7
2.2 Türkiye Elektrik Piyasası Regülasyonları 8
2.2.1 Gün öncesi planlama dönemi 11
2.2.2 Gün öncesi piyasası dönemi 12
2.2.3 Gün içi piyasası dönemi 16
3. DİNAMİK SİSTEMLER VE KAOS TEORİSİ 19
3.1 Dinamik Sistemler 19
3.2 Kaos Nedir? 20
3.2.1 Lojistik tasvir 22
3.2.2 Lorenz çekicisi 25
3.2.3 Henon tasviri 27
3.2.4 Rössler çekicisi 28
3.3 Kaosun Nicel Belirleyicileri 29
3.3.1 Lyapunov üstelleri 29
3.3.2 Fraktallar ve fraktal boyut tespiti 31
4. LİNEER OLMAYAN ZAMAN SERİLERİNDE KAOTİK ANALİZ..... 35
4.1 Faz Uzayının Görsel İncelenmesi 35
4.2 Faz Uzayının Yeniden Kurulumu (FUYK) 36
4.2.1 Zaman gecikmesinin belirlenmesi 37
4.2.2 Gömme boyutunun belirlenmesi 38
4.3 Boyutlar 41
4.3.1 Kutu-sayma boyutu ve Hausdorff boyutu 43
4.3.2 Bilgi boyutu 44
4.3.3 Korelasyon integrali ve boyutu 45
4.3.4 Noktasal boyut 47
5. ZAMAN SERİSİNDE GÜRÜLTÜ AZALTIMI VE ÖNGÖRÜ 49
5.1 Basit Lineer Olmayan Gürültü Azaltımı 50
5.2 Gradyen Düşüşü Yöntemi ile Gürültü Azaltma 52
5.3 Lokal İzdüşüm Yöntemi ile Gürültü Azaltımı 53
5.4 Ne Kadar Gürültü Giderildiğinin Tespiti 55

5.5 Kaotik Zaman Serilerinde Öngörü 57
5.5.1 Lokal lineer haritalar yöntemi ile öngörü 57
5.5.2 Öngörü başarısını değerlendirme 59
6. UYGULAMA : TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ BİRİM FİYATLARININ KAOTİK ANALİZİ VE KISA DÖNEMLİ TAHMİN ÇALIŞMASI 61
6.1 Çalışılan Zaman Serisi Detayları 61
6.2 Gün Öncesi Planlama Dönemi 62
6.2.1 Zaman serisinde gürültü azaltımı 64
6.2.2 Zaman gecikmesinin belirlenmesi 66
6.2.3 Gömme boyutunun belirlenmesi 68
6.2.4 Faz uzayları 70
6.2.5 Korelasyon boyutu ve integralleri 72
6.2.5.1 Fraktal boyut ve kaos tespiti 77
6.2.6 Lyapunov üsteli hesaplanması ve kaos tespiti 78
6.3 Gün Öncesi Piyasası ve Gün İçi Piyasası Dönemi 79
6.3.1 Zaman serisinde gürültü azaltımı 81
6.3.2 Zaman gecikmesinin belirlenmesi 82
6.3.3 Gömme boyutunun yeniden belirlenmesi 84
6.3.4 Faz Uzayları 85
6.3.5 Korelasyon boyutu ve integralleri 88
6.3.5.1 Fraktal boyut ve kaos tespiti 92
6.3.6 Lyapunov üsteli hesaplanması ve kaos tespiti 93
6.4 Zaman Serilerinde Kısa Dönemli Tahmin Çalışması 94
6.4.1 Gün öncesi planlama dönemi öngörü 95
6.4.2 GÖP ve GİP dönemi öngörü 102
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 111
KAYNAKLAR 115
EKLER 119
ÖZGEÇMİŞ 129

KISALTMALAR

ANN : Artificial Neural Network
AR : Auto Regressive
DGP : Dengeleme Güç Piyasası
DSİ : Devlet Su İşleri
DUY : Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği
EDAŞ : Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
EKG : Elektrokardiyografi
EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EÜAŞ : Elektrik Üretim Anonim Şirketi
FUYK : Faz Uzayının Yeniden Kurulumu
GİP : Gün İçi Piyasası
GÖP : Gün Öncesi Piyasası
KAM : Kolmogorov – Arnold – Moser
KGÜP : Kesinleşmiş Gün Öncesi Üretim Planı
NDT : Nonlinear Dynamic Toolbox
NRMSE : Normalised Root Mean Square Error
OBF : Ortak Bilgi Fonksiyonu
OKF : Otokorelasyon Fonksiyonu
PTF : Piyasa Takas Fiyatı
R^2 : Korelasyon Katsayısı
RMSE : Root Mean Square Error
SGÖF : Sistem Gün Öncesi Fiyatı
SMF : Sistem Marjinal Fiyatı
TEAŞ : Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim Şirketi
TEAŞ : Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim Şirketi
TEDAŞ : Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TETAŞ : Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
TEK : Türkiye Elektrik Kurumu
TISEAN : Time Series Analysis
YEYK : Yanlış En Yakın Komşular

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Tez süresince izlenen adımlar 2
Çizelge 2.1 : Gün Öncesi Planlama – GÖP fark ve benzerlikler [17]. 16
Çizelge 3.1 : Lojistik Tasvir Periyot Çevrimleri 24
Çizelge 3.2 : Çekici Tiplerine Göre Lyapunov Üsteli Değerleri [28]. 31
Çizelge 6.1 : Çalışmada İzlenen Adımlar 61
Çizelge 6.2 : GOPlan ve GOPGIP Zaman Serileri Detayları 62
Çizelge 6.3 : GOPlan, ITE1, ITE2, ITE3 ve ITE4 Zaman Gecikmeler 68
Çizelge 6.4 : GOPGIP, ITE1, ITE2, ITE3 ve ITE4 Zaman Gecikmeleri 84
Çizelge 6.5 : GOPlan ITE4 ve GOPlan Öngörü Başarıları 99
Çizelge 6.6 : GOPlan ITE4 ve GOPlan Öngörü Başarıları 102
Çizelge 6.7 : GOPGIP ITE4 ve GOPGIP Öngörü Başarısı Karşılaştırma 106
Çizelge 6.8 : GOPGIPWD ITE4 ve GOPGIPWD Öngörü Başarısı 109

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çekici tipleri [3]. 4
Şekil 2.1 : Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketimi 2000-2016 [12]. 9
Şekil 2.2 : Türkiye Elektrik Piyasası Gelişim Süreci [11]. 10
Şekil 2.3 : Türkiye Piyasa Yapısı [16]. 14
Şekil 2.4 : Türkiye Elektrik Piyasası Hacimleri [15]. 14
Şekil 2.5 : PTF belirlenmesi [17]. 15
Şekil 2.6 : Farklı durumlarda PTF belirlenmesi [17]. 16
Şekil 2.7 : GİP Fiyat Aralığı [15]. 18
Şekil 3.1 : Denge Noktası Tipleri [20]. 21
Şekil 3.2 : Korunumlu ve Korunumsuz Çekici Örnekleri [22]. 22
Şekil 3.3 : r=2.8 durumunda nüfus gelişimi [21]. 23
Şekil 3.4 : r = 3.3 durumunda nüfus gelişimi [21]. 23
Şekil 3.5 : 3.4< r <4 durumunda bifürkasyon diyagramı 24
Şekil 3.6 : Lorenz Çekicisi 26
Şekil 3.7 : Henon Tasviri ve Çekicisi 27
Şekil 3.8 : Rössler Çekicisi 28
Şekil 3.9 : Yörüngeler arası mesafe [21]. 30
Şekil 3.10 : Lyapunov Üsteli – Zamana Bağlı Gösterimi 30
Şekil 3.11 : Cantor Kümesi 32
Şekil 4.1 : Zaman Gecikmesi – Faz Uzayı İlişkisi [18]. 36
Şekil 4.2 : Ortak Bilgi Fonksiyonu – Örnek [18]. 38
Şekil 4.3 : Φ dönüşümü ile Q çekicisinin A çekicisine dönüştürülmesi [30]. 39
Şekil 4.4 : Gömme Teoremi Geometrik Açıklaması [19] 40
Şekil 4.5 : Lorenz Denklemi YEYK [18]. 41
Şekil 4.6 : Öklit ve Topolojik Boyut Farkları [18]. 42
Şekil 4.7 : Kutu-Sayma Boyutu Hesabı [18]. 44
Şekil 4.8 : Korelasyon İntegrali Geometrik Gösterimi [18-19]. 45
Şekil 4.9 : Lorenz Çekicisi - Korelasyon İntegrali ve Boyutu [18] 47
Şekil 5.1 : Basit Lineer Olmayan Gürültü Azaltımı [28] 51
Şekil 5.2 : Lokal İzdüşüm Yöntemi ile Gürültü Azaltımı Görseli [28]. 55
Şekil 5.3 : Gauss Dağılımına Uyan Gürültü Boyutu Grafiği [28]. 57
Şekil 6.1 : GOPlan Zaman Serisi 63
Şekil 6.2 : GOPlan d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=15) 64
Şekil 6.3 : GOPlan ve GOPlan ITE4 Zaman Serileri 65
Şekil 6.4 : GOPlan ITE4 d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=4) 66
Şekil 6.5 : GOPlan Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=14 saat) 67
Şekil 6.6 : GOPlan ITE4 Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=12 saat) 68
Şekil 6.7 : GOPlan ve GOPlan ITE4 YEYK 69
Şekil 6.8 : Boyutlar arası %YEYK farkları 70
Şekil 6.9 : GOPlan ve GOPlan ITE4 Faz Uzayları Gösterimi 71
Şekil 6.10 : GOPlan Faz Uzayı (3D) 72

Şekil 6.11 : GOPlan ITE4 Faz Uzayı (3D) 72
Şekil 6.12 : GOPlan Serileri Korelasyon İntegralleri 73
Şekil 6.13 : GOPlan Serileri Korelasyon Boyutları 75
Şekil 6.14 : GOPlan Serileri Korelasyon Boyutu – Gömme Boyutu 78
Şekil 6.15 : GOPlan ITE4 Maksimum Lyapunov Üsteli 79
Şekil 6.16 : GOPGIP Zaman Serisi 80
Şekil 6.17 : GOPGIP d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=20) 80
Şekil 6.18 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 Zaman Serileri 81
Şekil 6.19 : GOPGIP ITE4 d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=4) 82
Şekil 6.20 : GOPGIP Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=14 saat) 83
Şekil 6.21 : GOPGIP ITE4 Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=12 saat) 83
Şekil 6.22 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 YEYK 84
Şekil 6.23 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 Boyutlar Arası YEYK Farkları 85
Şekil 6.24 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 Faz Uzayları 86
Şekil 6.25 : GOPGIP Faz Uzayı (3D) 87
Şekil 6.26 : GOPGIP ITE4 Faz Uzayı (3D) 87
Şekil 6.27 : GOPGIP Serileri Korelasyon İntegralleri 88
Şekil 6.28 : GOPGIP Serileri Korelasyon Boyutları 90
Şekil 6.29 : GOPGIP Serileri Korelasyon Boyutu – Gömme Boyutu 93
Şekil 6.30 : GOPGIP ITE4 Maksimum Lyapunov Üsteli 94
Şekil 6.31 : GOPlan ITE4 TISEAN Öngörü Korelasyonu 96
Şekil 6.32 : GOPlan ITE4 NDT Öngörü Korelasyonu 96
Şekil 6.33 : GOPlan TISEAN Öngörü Korelasyonu 97
Şekil 6.34 : GOPlan NDT Öngörü Korelasyonu 98
Şekil 6.35 : GOPlanWD ITE4 TISEAN Öngörü Korelasyonu 100
Şekil 6.36 : GOPlanWD TISEAN Öngörü Korelasyonu 101
Şekil 6.37 : GOPGIP ITE4 TISEAN Öngörü ve R^2 103
Şekil 6.38 : GOPGIP ITE4 NDT Öngörü ve R^2 103
Şekil 6.39 : GOPGIP TISEAN Öngörü ve R^2 104
Şekil 6.40 : GOPGIP NDT Öngörü ve R^2 105
Şekil 6.41 : GOPGIPWD ITE4 TISEAN Öngörü ve R^2 107
Şekil 6.42 : GOPGIPWD TISEAN Öngörü ve R^2 108

TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ BİRİM FİYATLARININ KAOTİK ANALİZİ

ÖZET

Kaos veya kaotik kelimeleri insanların günlük hayatta sıklıkla duyduğu, genellikle düzensiz, karışık bir ortamı tasvir etmek için kullanılan kavramlardır. Bu tanımlama kaos teriminin bilimsel anlamına benzer olsa da tam olarak kaosun karşılığı değildir. Bilimsel olarak açıklamak gerekirse kaos; rastgele gerçekleşen olaylardan oluşabilecek bir kavram değil, aksine fiziksel olaylar zincirlemesiyle ortaya çıkan bir olgudur. Sisteme dışarıdan bakıldığında her ne kadar rastgele bir yapı var gibi anlaşılıyor olsa da, bu noktalar aslında belli paramatrelerin etkisiyle bu dağılımı göstermektedirler. Kaos lineer sistemlerde gerçekleşebilecek bir olgu değildir; sadece lineer olmayan sistemlerde var olabilir. Kaotik analizin amacı lineer olmayan bir sistemde belli matematiksel analizler ve yöntemler aracılığıyla kaos varlığını tespit etmektir.

Elektrik enerjisi günümüzde her alanda en büyük ihtiyaçlardan biridir; Dünya'daki her ülke enerji ihtiyacını karşılayabilmek için çeşitli kaynaklarını ve üretim santrallerini kullanmakta, kaynağı mevcut değilse ithalat yaparak santraller aracılığıyla enerjisini üretmektedir. Öyle ki kişi başına düşen elektrik tüketim miktarı ülkelerin gelişmişlik seviyesini gösteren parametrelerden biri olarak kullanılmaktadır. Bu derece önemli bir ihtiyacı yönetebilmek için her ülke kendi iç piyasasını oluşturmak zorundadır. Enerji sektörü bu öneminden ötürü Türkiye ekonomisinde de çok büyük bir etkiye sahiptir. Sektörün iyi durumda olması hem elektrik piyasası katılımcılarının yani üreticilerin, hem de tüketicilerin yararınadır. Üreticiler, ürettikleri elektriği satabilmek için fiyat tekliflerini doğru bir şekilde yönetme kabiliyetine sahip olmak zorundadır; bu konuda iddialı hale gelebilmek için de santral verimliliklerini üst düzeyde tutmak, gelir gider dengelerini iyi bir şekilde yönetebilmeleri gerekmektedir. Elektrik enerjisi saatlik fiyatları üreticilerden gelen teklifler doğrultusunda şekillenmektedir; bu nedenle üreticilerin gelecekte fiyatların ne olabileceğine dair doğru öngörüde bulunması da etkinliklerini arttırmaktadır.

Bu çalışmada 2009-2017 yılları arasında Türkiye elektrik enerjisi birim fiyatlarından oluşan saatlik zaman serisinde kaos varlığı araştırılmış ve kısa dönemli fiyat tahmini çalışması yapılmıştır. Bahsedilen zaman dilimi Türkiye'deki elektrik piyasalarındaki değişimler göz önüne alınarak farklı dönemler için ayrı ayrı Piyasa Takas Fiyatı (PTF) üzerinden yapılmıştır. Gün öncesi planlama dönemi bir dönem, gün öncesi piyasası ve gün içi piyasası ayrı bir dönem olarak incelenmiştir. Çalışmada hedeflenen, fiyatlar için belli parametrelere bağlı bir modelleme yapmak değildir; kaotik analizde eldeki tek veri zaman serisinin kendisidir. İlk aşamada zaman serisinde lokal projektif gürültü azaltımı yoluyla gürültü giderimi yapılmış, ne derece giderildiği farklı boyutlarda korelasyon integralleri ve korelasyon boyutu incelemesi ile belirlenmiştir. Ortak bilgi fonksiyonu yoluyla sistemdeki zaman gecikmesi, yanlış en yakın komşular yöntemiyle uygun gömme boyutu belirlenmiş ve faz uzayı

yeniden kurulmuştur. Sistemde kaos olduğunun en büyük göstergeleri olarak kabul edilen pozitif Lyapunov üsteli ve fraktal boyutta çekici tespiti yapılmış; iki farklı zaman serisinde kaos varlığı kanıtlanmıştır. Sonrasında gürültü giderimi yapılmış zaman serilerinin faz uzaylarından faydalanarak lokal lineer haritalar yöntemiyle iki farklı program aracılığıyla öngörü çalışması yapılmıştır. Kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına hassas bağlı olma durumundan ötürü öngörü 100 saat gibi kısa bir dönem için yapılmıştır. Öngörü için tıpkı kaotik analizde de olduğu gibi herhangi bir modelleme yapılmamış, sadece zaman serisinden yararlanılmıştır. Lokal lineer haritalar yöntemiyle yapılan öngörüde iki zaman serisi için de başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Gün öncesi planlama dönemi için 85.2% R^2 ve 6.0% NRMSE hatası, gün öncesi ve gün içi piyasası dönemi için 92.1% R^2 ve 5.7% NRMSE hatası başarıyla hesaplanmıştır.

CHAOTIC ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY UNIT PRICES IN TURKEY

SUMMARY

The words “chaos” or “chaotic” are some commonly used terms in daily life to define the ambiguous and disordered situations. But in the contrary case, from scientific approach point of view, this definition can not express the concept of chaos since chaos theory actually is a mathematical method to analyse the systems ruled by laws of physics. The existence of chaos can not be the point in question in random systems. Looking from outside to a nonlinear time series, one can think the points are scattered randomly in phase space, but in chaotic systems those random-like points are actually there based on some critical events and parameters. Linear systems can not contain chaos but only nonlinear deterministic dynamical systems. The purpose of chaotic analysis is to identify the chaos existence by using some mathematical analysis and methods.

The main two characteristics of chaotic systems are an existence of an attractor with fractal dimension and the exponential divergence of trajectories in phase space, which also means sensitive dependence to initial conditions. An attractor can be defined as the place a linear or nonlinear system leans to in long term. If an anticonservative attractor shows sensitive dependence to initial conditions, it is called as a strange attractor and since this phenomenon covers main two characteristics of chaos, it is a strong evidence of chaos existence all by itself. Strange attractors show similarity with the whole system and their dimensions are not integer values but fractal. The sensitive dependence to initial conditions can be measured by Lyapunov exponents, in case of having a positive value this phenomenon physically states that trajectories diverge in phase space. Here the divergence means the neighbour points can arbitrarily get far apart due to the direction of their trajectories but they do not leave the attractor and in time might get close again.

Today electrical energy is one of the biggest needs in every field. All countries in the world use their energy sources and electrical energy production facilities to meet the energy need. In case of lack of energy sources, they import short ones from other countries to mitigate the risk of energy shortage. Per capita consumption of electrical energy is considered as a sign of development level of countries. In order to manage a need carrying this level of importance, every country has to consitute their own internal market. Energy sector is one of the most significant sectors in Turkey as well due to the size of capacity and volume. Having an above world-average level on per capita consumpion of electrical energy, Turkey has still way to go to reach the level of European countries. In early 2017, Turkey’s gross electrical energy consumption per capita was around 3350 kWh, whereas the world average was 2900 kWh. However, this number was close to 9000 kWh on average in Europe which shows the difference between Turkey and European countries. Electrical energy production in Turkey is based on different energy sources, as of July 2017 the distribution of the

energy production is as follows: 34% natural gas, 31% coal, 24% hydro, 6% wind, 2% geothermal and the rest 3% from other sources. However, this order is not the same when it comes to installed power levels for different sources. In early 2017, the installed power capacity of Turkey was 79,834 MW and 33% of this power was hydro-electric, 28% natural gas, 21.5% coal, 7.7% wind, 1.1% geothermal and the rest 7.4% other sources.

Like most of the European countries, a monopoly system in electricity market had existed till 1980s in Turkey, due to the public utility approach to electricity supplying. With the changes in economical conditions, this approach also changed after then and privatization and liberalization were considered as solution. Even though several changes were applied after 1980s, electricity market structure in Turkey started to become mature considerably after 2001 with the the establishment of EPDK and also EÜAŞ, TEİAŞ and TETAŞ. There has been several updates on the structure until 2015 but the most significant ones for this study are day-ahead planning, day ahead market, and intra-day market periods. Day-ahead planning had been designed as transitioning period to day-ahead market, and was active between 2009-2011. During this period, energy producers had been trained for the essentials of day-ahead market. Day-ahead market structure was initiated in 2011 and it has been active since then. The purpose of day-ahead structure was to give opportunity to energy producers to balance their liabilities agreed with bilateral agreements, which also enables more-balanced market and is more useful for market regulator. Intra-day market became active in 2015 as a subsidiary system to day-ahead market, since it gives the chance to players to change and play with their offers in shorter term which ends up with more stable system. In summary, energy producers in Turkey firstly arranges their electricity buying and selling by bilateral agreements with public or private institutions which gives them a long term stability. But due to some unexpected changes, those prices might need to change and be balanced. Therefore they use day-ahead market to balance the prices one day before. Players can use intra-day market as a last stop in case any unpredictable situation arises in the short term like a malfunction in production facility.

Within the scope of this study, chaos existence in the time series of electrical energy unit prices in Turkey between 2009-2017 has been searched and followed by short term prediction of the prices. As different energy market structures have been under operation during this time period, analysis have been done seperately for each to gain a better understanding on the changes. Day-ahead planning period considered as first time series and day-ahead and intra-day market considered as the second one. Modelling the system based on some critical parameters is not the aim of this study since the only data at hand are the time series itself. As a first step, assuming there will be noise like all other dynamical nonlinear systems have, noise reduction has been done by using local projective method. For noise reduction, several iterations have been done in TISEAN 3.0.1 programme and the level of the noise reduction for all iterations have been analysed by checking the correlation integrals and correlation dimensions in different embedding dimensions. The time delay of the system determined by mutual information function; first minimum of the mutual information function has been selected as appropriate time delay. Sufficient embedding dimension has been determined by fraction of false nearest neighbours calculation. Derived time delay and embedding dimension data enabled the reconstruction of the phase space. Attractor dimension has been calculated from correlation integral graphs in logaritmic scale for all embedding dimensions. Correlation dimension plots

from TISEAN 3.0.1 has also been used for visual inspection of attractor dimension. For both time series, fractal dimension of the attractor has been detected. To analyse the sensitive dependence on initial conditions Grassberger's Lyapunov exponent calculation has been used by TISEAN programme and maximum Lyapunov exponent has been found positive. Therefore, strange attractor with fractal dimension existence and positive Lyapunov exponent, the most effective ways to demonstrate chaos, have been shown. The short term prediction has been done by finding near neighbours to every point in the phase space and predicting the resulting points based on linear mapping. For day-ahead planning period, predictions have been completed with 85.2% R^2 and 6.0% NRMSE and 92.1% R^2, 5.7% NRMSE for day-ahead /intra-day market period.

1. GİRİŞ

Kaos kelimesi sözlük anlamıyla Türk Dil Kurumu'na göre "Evrenin düzene girmeden önceki biçimden yoksun, uyumsuz ve karışık durumu" [1] olarak tanımlanmıştır. Günlük hayatta da bu tanıma çok benzer şekilde insanlar karışıklık ve belirsizlik durumunu anlatabilmek için kaos veya kaotik kelimelerini kullanabilirler. Günlük kullanımının aksine konuya bilimsel bakıldığında bu tanımlamanın tamamiyle kaos kavramını açıklamadığı anlaşılır. İnsanlar genellikle bu kelimeyi hiçbir düzenin hakim olmadığı ortam veya durumlar için kullanmayı tercih ederler oysa kaos teorisi ya da kuramı, arkasında fiziksel kuralların hakim olduğu sistemleri açıklamak ve çözümlemek için kullanılan matematiksel bir yöntemdir. Tanım olarak rastsal kelimesiyle karıştırılmamalıdır; rastsal terimi arkasında hiçbir kuralın olmadığı, bir sonraki adımın kesinlikle tahmin edilemeyeceği sistemleri tanımlar. Kaos teorisinin ise temel önermeleri arasında "düzen düzensizliği yaratır", "düzensizliğin içinde de bir düzen vardır" gibi tanımlamalar mevcuttur [2].

Sir Isaac Newton'un temel fizik kurallarına göre gezegenimizin ileriki bir zamanda hangi yörüngeyi takip edeceği çok net bir şekilde hesaplanabilir, ancak olayın evren boyutuna baktığımızda bu yanlış bir sonuç doğurabilir. Çünkü Newton kuralları gezegenimizin hareketini sadece Güneş Sistemi'ndeki parametreleri göz önüne alarak hesaplamamıza yardımcı olur, diğer bilinmeyen astronomik paramatreleri devre dışı bırakır [3].

Kaosu daha iyi anlatabilmek için basit bir örnek olarak odada yakılan bir tütsüden çıkan dumanın izlediği yol verilebilir. Duman şekilleri dışarıdan izleyen birine göre tamamen bağımsız olarak nitelendirilebilir, halbuki dumanın anlık olarak izleyeceği yol çok sayıda parametreye bağlıdır. Odanın anlık basınç değişikliği, hava akımlarının anlık etkisi, sıcaklık ve daha pek çok etken dumanın şeklini etkileyecektir. Bunun modelini fiziksel olarak kurmak parametrelerin çokluğu ve anlık değişiklikler sebebiyle son derece zordur. Ancak yukarıda da bahsedildiği gibi son derece düzensiz olarak gözüken duman hareketi aslında fiziksel gerçekliklere bağlı olarak değişmektedir ve rastgele bir hareket söz konusu değildir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, 2009 yılından 2017 yılına kadar olan iki farklı piyasa döneminde katılımcıların yaptığı teklifler doğrultusunda arz ve talebe bağlı olarak oluşan saatlik elektrik enerjisi Piyasa Takas Fiyatı zaman serisinde kaos varlığı araştırılmıştır. 2009-2011 yılları arasında Gün Öncesi Planlama dönemi fiyatları ayrı olarak, 2011-2017 yılları arası Gün Öncesi Piyasası ve Gün İçi Piyasasının aktif olduğu dönem ayrı olarak incelenmiştir. Zaman serilerinde öncelikle gürültü azaltımı yapılmış, gürültü azaltımının başarısı korelasyon integralleri ve faz uzayı aracılığıyla belirlenmiştir. Sonrasında zaman gecikmesinin ve gömme boyutunun belirlenmesiyle faz uzayı yeniden kurulmuş, Lyapunov üstelleri ve fraktal boyuta sahip çekici tespiti ile kaos varlığı araştırılmıştır. Son olarak ise gürültü azaltımı yapılmış seri içerisinde farklı yöntemlerle 100 saatlik tahmin çalışması yapılmış ve tahmin başarısı RMSE, NRMSE ve R^2 gibi yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Özet olarak bu tezin amacı, Türkiye'deki elektrik enerjisi birim fiyatlarının kaotik bir karaktere sahip olup olmadığını incelemek ve kısa dönemli tahminde bulunmaktır.

Tez çalışmasında izlenen adımlar aşağıda Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Tez süresince izlenen adımlar

1)	Saatlik Verilerin Toplanması
2)	Saatlik Verilerin Düzenlenmesi (Piyasaya göre)
	a) Gün Öncesi Planlama Dönemi (2009-2011)
	b) Gün Öncesi Piyasası (2011-2015) ve Gün İçi Piyasası (2015-2017)
3)	Gürültü Analizi ve Gürültü Azaltımı
4)	Faz Uzaylarının Yeniden Kurulması – Zaman Gecikmesi ve Gömme Boyutu
5)	Korelasyon Integralleri ve Korelasyon Boyutu Hesabı
6)	Fraktal Boyut ve Lyapunov Üstelleri ile Kaosun Saptanması
7)	Kısa Dönem Tahmin Çalışması ve Hata Hesaplamaları

1.2 Literatür Araştırması

Her ne kadar günümüzde detaylı olarak bilinip kullanılıyor olsa da kaos teorisinin, daha doğrusu kaos kelimesinin bilimsel bir terim olarak 1960'lı yıllara kadar

literatürde bulunmadığı görülmektedir. Bu sürece kadar yapılan bazı çalışmalar varsa da elle tutulur bir kuram ortaya konamamıştır. Kaos kavramı ortaya atılmadan önce Fransız bilim adamı Henri Poincaré n-cisim problemini ortaya atarak bu konuda çok önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Poincaré temel olarak Newton ve Laplace'ın kendisinden önce ortaya attığı matematik kuramları üzerine çalışmış ve bunları geliştirmeye odaklanmıştır. Newton mekaniğine göre uzayda kütleye sahip iki gezegenin yörüngeleri formüller vasıtasıyla net olarak belirlenebilmektedir; fakat üç cisim olması durumunda gezegen yörüngeleri çok beklenmedik ve karmaşık bir hal alabilmektedir ve gelecekte izleyeceği yörünge tespiti çok zor hale gelmektedir. Poincaré bu çalışmayla beraber faz uzayı ve başlangıç durumuna bağlılık kavramlarını ortaya atmıştır. Eğer sistemin dinamikleri ve başlangıç anındaki durum tamamiyle biliniyorsa ileriye dönük tahminler başarıyla gerçekleştirilebilir. Ancak durum her zaman böyle değildir, başlangıç durumunda yapılan en ufak hata, bu tarz sistemlerde tahmin yapılan son zamanda çok büyük hatalara sebebiyet verebilir [3]. Aslında Poincaré bu çalışmasıyla kaos teorisinin temellerini atmış ancak kuramına bu ismi kazandıramamıştır.

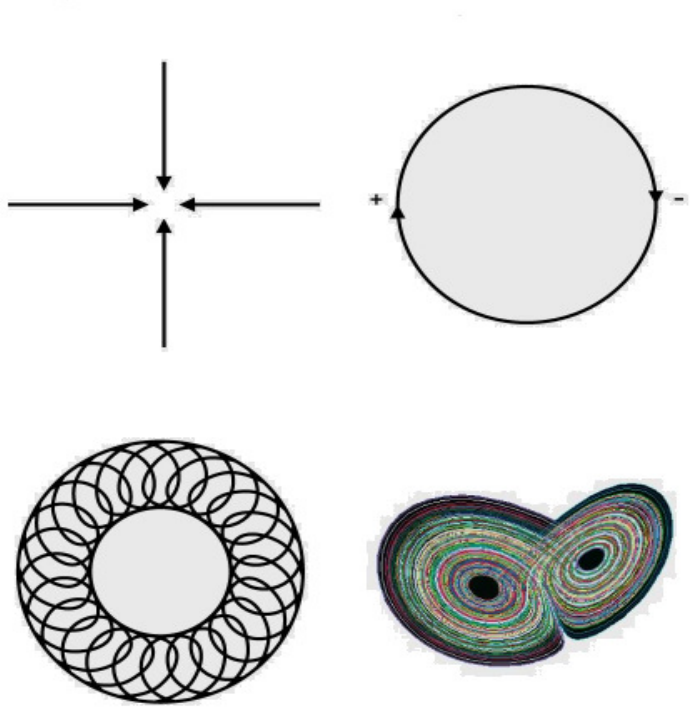
19.yy'ın sonlarına doğru Rus bilim adamı Aleksandr Lyapunov kaos tespiti için çok önemli bir kavram olan Lyapunov üstellerini ortaya atmıştır. Lyapunov üstelleri, faz uzayındaki yörüngelerin üstel ıraksamasının bir ölçütüdür ve pozitif olması kaos tespiti için çok önemli bir kriter olarak görülür. Pozitif Lyapunov üsteli bu tez kapsamında da kaos tespitini yapmak için yardımcı bir yöntem olarak kullanılmıştır.

Kolmogorov 20. yy'ın önemli matematikçilerinden biridir. Poincaré'ın çalışmalarını ilerletmeye çalışmış ve 1954'de integrallenebilir bir sistemde sisteme eklenen düzensizliğe ragmen yarı-periyodik hareketin korunabildiğini göstermiştir [3]. Bu çalışmanın arkasından 1962 yılında Jürgen Moser, 1963 yılında Vladimir Arnold bu çalışmayı detaylandırmış ve ilerletmişlerdir. Bu sebeple bu çalışma literatürde Kolmogorov-Arnold-Moser yani KAM teorisi olarak bilinir.

1960'lı yıllara gelindiğinde matematikçi ve meteorolojist Edward Lorenz'in çalışmaları göze çarpmaktadır. Hava tahmini üzerine çalışırken virgülden sonra 3 basamağa yuvarlamak yerine 6 basamağa yuvarladığında elde ettiği sonuçların birbirinden çok farklı olduğunu farketmiş ve başlangıç durumuna bağlılığın ne kadar önemli olduğunu tekrar tespit etmiştir. Bununla birlite kelebek etkisi kavramını da ortaya atmıştır. Buna ek olarak çalışmalarını görsel olarak bilgisayar alanında

göstermeyi başarmış ve çekici kavramını ilgili literatüre tanıtmıştır. Her ne kadar kaos teorisi temellerini ilk olarak Lorenz gündeme getirse de kaos teorisi terimi ilk olarak 1975 yılında James Yorke tarafından dile getirilmiştir.

Fizikçi David Ruelle garip çekici kavramını ilk olarak ortaya sunan kişi olmuştur. Garip çekicinin bir kaotik sistemin faz uzayındaki tanımlayıcısı olduğunu söylemiş ve ortaya dört farklı çekici tipi atmıştır. Bunlar sabit nokta, limit çevrim, limit torus çekicileri ve garip çekicidir [3]. Bu çekicilerin şekilleri aşağıda Şekil 1.1'de görülebilir.



Şekil 1.1 : Çekici tipleri [3].

Mitchell Feıiganbaum 1976 yılında normal dinamiklerden kaosa geçişi anlatan periyot eşleme kavramını ortaya atmıştır. Yaptığı önerme lojistik denklem üzerine olmuştur ve grafiksel olarak kaosa geçişi göstermiştir.

1973 yılında Benoît Mandelbrot fraktal boyut ve geometri kavramını ortaya atmıştır ve kendisinden once Lorenz'in, Feiganbaum'un çekicilerinin fraktal yani kesirli boyutlarda olduğunu göstermiştir. Kaotik sistemlerde çekici boyutunun tam sayı olamayacığını ve fraktal boyutta olması gerektiğini söylemiştir. Bu yaklaşım, gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında kaos varlığının tespiti amacıyla kullanılan yöntemlerden biri olmuştur.

Kaos teorisi kavramının bilim çevrelerine tanıtılmasından ve yaygınlaşmasından sonra bu konuda pek çok alanda çalışmalar yapılmıştır. Fizik, matematik, biyoloji, meteoroloji ve ekonomi alanlarında yapılan çalışmalar buna örnek olarak gösterilebilir. Özellikle doğal sistemler olan akustik, elektrik, doğal hava ve su akımları gibi zaman serilerinde çok önemli çalışmalar vardır. Ekonomi alanında döviz kurları üzerine yapılan hem kaos tespiti hem de tahmin içeren pek çok çalışma Türkiye'de ve Dünya'da görülebilmektedir.

Tez kapsamında incelenecek zaman serileri, fiyat birimi serileri olduğu için çalışma aynı zamanda bir ekonomi çalışmasıdır. Türkiye'de elektrik enerjisi birim fiyatlarında kaos tespiti için yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak fiyat tahminleri için AR yani regresyon yöntemleri ve ANN yani Yapay Sinir Ağları yöntemlerine dayanan pek çok çalışma mevcuttur [4-7]. Dünya'daki çalışmalara bakıldığında ise; bazı bölgelerin elektrik enerjisi fiyatları üzerine kaotik analizlerin yapıldığı bir takım çalışmalar mevcuttur. Liu ve ark. (2005) Kanada'nın New England bölgesindeki elektrik fiyatlarının kaotik analizini yapmış ve tahmin çalışması gerçekleştirmiştir. Her ne kadar tahmin çalışması sinir ağları yöntemine dayansa da zaman serisinin kaotik bir davranış gösterdiği faz uzaylarının oluşturulması, Lyapunov üstelleri ve fraktal boyutta çekici tespitleriyle net bir şekilde gösterilmiştir [8].

2. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI

2.1 Elektrik Enerjisi Sektörünün Gelişimi

Türkiye'de elektrik enerjisi günlük yaşama 19. yy'nin sonlarında girmiştir. İlk elektrik santrali Türkiye'de 1902 yılında Tarsus'ta kurulmuş takip eden yıllarda ilk termik santral İstanbul Silahtarağa'da devreye alınmıştır. Bu termik santralde Avusturya-Macaristan sermayeli olan Ganz Anonim Şirketi, Osmanlı Elektrik Anonim Şirketi adı altında faaliyet göstermiş ve elektrik üretimi gerçekleştirmiştir [6]. 1935 yılında Maden Tetkik ve Arama, Etibank, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, 1945 yılında İller Bankası ve 1953 yılında Devlet Su İşleri elektrik sektöründe faaliyet göstermeye başlamıştır. Bu dönemde çok sayıda hidroelektrik ve termik santralin inşaası tamamlanmış ve elektrik sistemine katkı yapması sağlanmıştır [9].

1960 yılına gelindiğinde Devlet Planlama Teşkilatı'nın kurulması ve planlı kalkınma dönemlerinin başlaması ile elektrik sektöründe de değişimler yaşanmıştır. 1963-1967 yılları arasında Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planı ve 1968-1972 yılları arasında İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı ile amaçlanan Türkiye elektrik sektöründeki tüm faaliyetlerin kamu otoritesi altına alınması olmuştur. Bu amacı gerçekleştirmek için elektrik üretim, dağıtım ve ticaretinden sorumlu olmak üzere Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) kurulmuştur [9].

Endüstride gerçekleşen değişikliklerden bahsetmeden önce genel olarak elektrik endüstrisi hakkında bilgi vermek gerekirse, fonksiyonel olarak dört bölümden oluşmaktadır: üretim, iletim, dağıtım ve arz. Üretim bir enerji kaynağının (petrol, doğal gaz, su, nükleer, rüzgar vb.) elektrik enerjisine dönüştürülmesi olayıdır. İletim, üretilen yüksek gerilimli elektriğin yüksek gerilim hatları üzerinden dağıtım hatlarına taşınması işlemidir. Dağıtım ise yüksek gerilimli elektriğin alçak gerilimli elektriğe dönüştürüldükten sonra taşınması işlemidir. Arz da elektriğin son kullanıcıya yani tüketiciye satılması işlemidir [10]. Yukarıda bahsedidiği gibi Türkiye'de 1980'li yıllara kadar elektrik, kullanıcılara dikey bütünleşik bir tekel tarafından sunulmaktaydı. Yani üretim, iletim ve dağıtım fonksiyonları tek bir elden idare

edilmekteydi; bunun nedeni ise elektrik enerjisi sunulması hizmetinin bir kamu hizmeti olarak görülüyor olmasıydı. Bu tekel sistemi sadece Türkiye'de değil, bu tarihlere kadar Avrupa'nın da çoğu ülkesinde böyle işliyordu. İstisna olarak A.B.D .'de özel mülkiyet altında işletilmesi söz konusuydu [10].

1980'li yıllara gelindiğinde Türkiye'de ve Dünya ülkelerinde bu sistemden başka bir sisteme geçiş görünmeye başlanmıştır. Bunun sebebi olarak ise 1970'lı yıllarda yaşanan petrol krizinin elektrik fiyatlarını arttırması görülmektedir. Değişen ekonomik koşullarla tüm dünyada serbestleştirme ve özelleştirme bir çözüm yolu olarak görülmeye başlanmıştır. Türkiye elektrik piyasasında dikey bütünleşik yapıda ilk değişiklik 1982 yılında 2705 sayılı kanun ile gerçekleşmiştir [9]. Bu kanunla beraber Türkiye'de elektrik santrali kurma yetkisine sahip TEK ve DSİ dışında, özel sektörün elektrik santrali kurmasına ve ürettiği elektriği TEK'e satmasına olanak sağlanmıştır. 1984 yılında çıkarılan kanunlarla bu olanak güçlendirilmiştir. 1993 yılında TEK, Bakanlar Kurulu kararı ile ikiye bölünerek elektrik piyasasında üretim ve iletimden sorumlu TEAŞ ve dağıtımdan sorumlu TEDAŞ kurulmuştur.

2001 yılında kamu yalnızca regülatör görevini üstlenmesi gerektiğine karar verir [11]. EPDK kurulur, 1984 yılında TEK'in bölünmesiyle ortaya çıkan TEAŞ bu tarihte 3 ayrı kuruma bölünür. Bunlar sadece iletimden sorumlu olacak TEİAŞ, üretimden sorumlu EÜAŞ ve ticaret ve taahhütten sorumlu TETAŞ'tır. Bunu takip eden süreçte Türkiye elekrik piyasasının rekabete açılmasını amaçlayan 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu yürürlüğe girmiştir. Bu kanunun amacı ilk maddesinde şöyle belirtilmiştir: "Elektriğin yeterli, kaliteli, sürekli, düşük maliyetli ve çevreyle uyumlu bir şekilde tüketicilerin kullanımına sunulması için, rekabet ortamında özel hukuk hükümlerine göre faaliyet gösterebilecek, mali açıdan güçlü, istikrarlı ve şeffaf bir elektrik enerjisi piyasasının oluşturulması ve bu piyasada bağımsız bir düzenleme ve denetimin sağlanmasıdır" [9].

2.2 Türkiye Elektrik Piyasası Regülasyonları

Kişi başına düşen elektrik tüketimi miktarı bir ülkenin gelişmişlik seviyesini gösteren parametrelerden biridir. Türkiye bu konuda her ne kadar Dünya ortalaması üzerinde olsa da Avrupa ülkelerinin epey gerisinde seyir göstermektedir. 2016 yılı sonunda kişi başına düşen brüt elektrik tüketimi 3350 kWh civarında, net tüketim miktarı ise 2900 kWh civarındadır. Dünya genelinde bu değer ortalama 2500 kWh iken

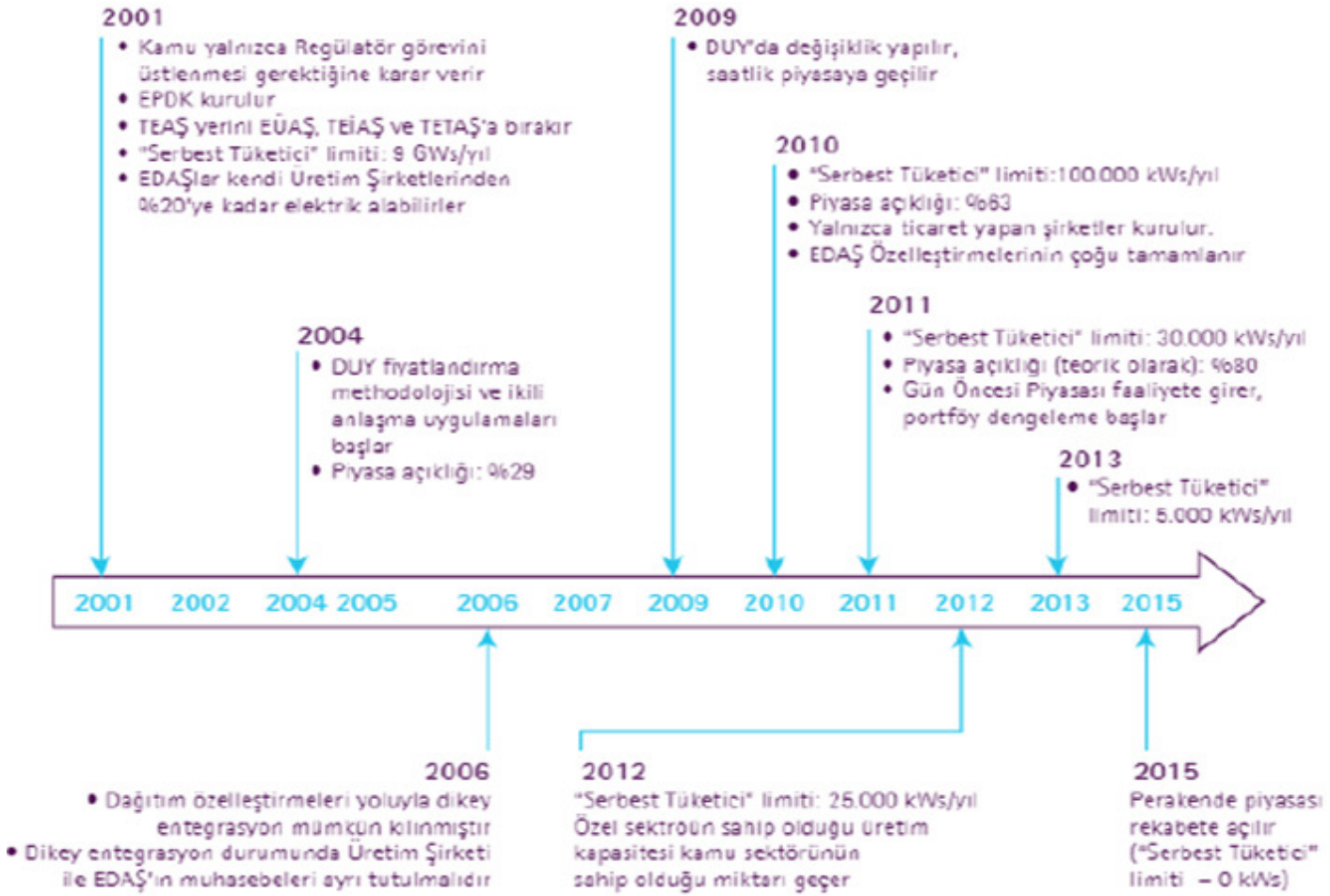
Avrupa'da ortalama 9000 kWh civarındadır ki bu da Türkiye ile Avrupa ülkeleri arasındaki enerji farkını net bir şekilde ortaya koymaktadır [12]. 2010 yılından 2016 yılına kadar gerçekleşen, Türkiye'nin elektrik enerjisi üretim ve tüketim değerleri brüt ve net olarak aşağıda Şekil 2.1'de görülmektedir.

TÜRKİYE KİŞİ BAŞINA KURULU GÜÇ - BRÜT ÜRETİM - ARZ - NET TÜKETİMİN YILLAR İTİBARİYLE DEĞİŞİMİ (2000-2016)					
YILLAR	KİŞİ BAŞINA				
	KURULU GÜÇ (W)	BRÜT ÜRETİM (kWh)	ARZ (kWh)	BRÜT TALEP (kWh)	NET TÜKETİM (kWh)
2000	402	1841	1799	1891	1449
2007	579	2714	2575	2692	2198
2008	585	2774	2649	2770	2264
2009	617	2685	2562	2675	2162
2010	676	2882	2761	2872	2348
2011	712	3088	2941	3101	2506
2012	754	3114	3049	3205	2577
2013	835	3132	3068	3213	2583
2014	895	3243	3150	3311	2669
2015	929	3325	3224	3375	2760
2016	**984**	**3438**	**3343**	**3499**	**2897**

Şekil 2.1 : Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketimi 2000-2016 [12].

2017 Temmuz ayı itibarıyla Türkiye elektrik üretiminin 34% 'ü doğal gazdan, 31% 'i kömürden, 24%'ü hidrolik enerjiden, 6% sı rüzgardan, 2%'si jeotermal enerjiden ve 3%'ü diğer kaynaklardan elde edilmektedir. Türkiye kurulu gücündeki sıralama ise elektrik üretimindeki sıralamayla aynı değildir. Kurulu güce bakıldığında 33% hidrolik enerji, 28% doğal gaz, 21.5% kömür, 7.7% rüzgar, 1.1% jeotermal, 7.4% ise diğer kaynaklar şeklindedir. Enerji santrallerinin sayısı açısından bakıldığında 2017 Temmuz ayı itibarıyla toplam 3098 santralden 613 adedi hidroelektrik, 288 adedi doğal gaz, 186 adedi rüzgar, 40 adedi kömür, 33 adedi jeotermal, 1773 adedi güneş, 165 adedi ise diğer kaynaklı santrallerden oluşmaktadır. Bu kurulu güç içerisinde, serbest üretim şirketleri 61.5%, EÜAŞ 25.1%, Yap-İşlet santralleri 7.6%, Yap-İşlet-Devret santralleri 1.7%, işletme hakkı devredilen santraller 2% ve lisanssız santraller 2%'lik paya sahiptirler [13].

Türkiye elektrik piyasasının olgunlaşması ve günümüzdeki halini alması 2001 yılından sonra olmuştur. Şekil 2.2'de 2001 yılından 2017 yılına kadar olan gelişmeler görülebilmektedir.



Şekil 2.2 : Türkiye Elektrik Piyasası Gelişim Süreci [11].

Bu tez kapsamında önem içeren noktaları özetlemek gerekirse, Türkiye 2009 yılı itibarıyla Gün Öncesi Planlama dönemine geçmiş ve saatlik piyasa aktif hale gelmiştir. Bu konu ile ilgili detaylar Bölüm 2.2.1'de verilmiştir. 2011 yılında ise Gün Öncesi Piyasası faaliyete girmiş olup, 2015 yılı ortasında Gün Öncesi Piyasası'nı daha iyi dengelemek adına Gün İçi Piyasası aktif hale getirilmiştir.

2.2.1 Gün öncesi planlama dönemi

Şekil 2.2'de görülebildiği gibi 2004 yılında Türkiye'de elektrik piyasasında Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği (DUY) ile Gün Öncesi Dengeleme Sistemi'ne geçilmiştir. Bu sistemle amaçlanan üretim verimliliğini arttırmak ve dengeyi daha iyi sağlamak olmuştur. Temel olarak bu yönetmelik günü üç zamanlı bir yapıda inceler: 06:00 – 17:00 arası gündüz, 17:00 – 22:00 arası puant ve 22:00 – 06:00 arası gece. Bu dönemlerde farklı ancak dönem içerisinde sabit kalacak şekilde fiyatlandırma uygulanmıştır. Ancak maliyetleri değişken olan üreticiler bu fiyatlandırma stratejisi karşısında zorlanmış, dolayısıyla daha verimli hale getirmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda 2009 yılında yayınlanan bir DUY ile piyasa değiştirilmiş ve saatlik fiyatlandırma yapılan Gün Öncesi Planlama'ya geçiş yapılmıştır [14].

Bunun yanında 2004 yılında uzun vadeli arz güvenliği ve yatırım teşviğini sağlamak amacıyla ikili anlaşmalar devreye alınmıştır. İkili anlaşmalar gerçek veya tüzel kişiler ile lisans sahibi tüzel kişiler arasında ya da lisans sahibi tüzel kişilerin kendi aralarında özel hukuk hükümlerine tabi olarak, elektrik enerjisi ve/veya kapasitenin alınıp satılmasına dair yapılan ve Kurul onayına tabi olmayan ticari anlaşmalar olarak tanımlanmıştır [14]. Buradaki tanımlamadan da anlaşılacağı üzere bu sözleşmeler, konusunu elektrik enerjisi ve/veya kapasite alım satımı oluşturan hukuki işlemlerdir. Asli unsurları elektrik tedariğinin belirli bir bedel karşılığında üstlenilmesine yönelik anlaşma olarak ikili anlaşmalar elektrik tedarik sözleşmelerinin bir türünü oluşturur. İkili anlaşmalar tedarikçilerin birbiri ile ya da serbest tüketicilerle yaptıkları anlaşmalardır. Bu sözleşmeler ile taraflar elektrik enerjisi birim fiyatı ile sözleşmeden doğacak hak ve yükümlülükler konusunda serbestçe anlaşabilirler, başlıca özelliği bu sözleşmelerin EPDK onayına tabi olmaması ve satış fiyatının taraflar arasında serbestçe belirlenebilmesidir [14].

Gün Öncesi Planlama dönemi planlanırken kalıcı bir piyasa olarak değil Gün Öncesi Piyasası'na bir geçiş süreci olarak tasarlanmıştır ve Aralık 2009- Aralık 2011 dönemi içerisinde aktif olmuştur. Bu süreçte katılımcılara aslında bir sonraki aşama olan GÖP için eğitimler verilmiş ve bu sisteme alışmaları sağlanmıştır.

Aralarındaki en büyük fark Gün Öncesi Planlama'da katılım zorunluyken, GÖP'te katılım isteğe bağlıdır [11].

Gün Öncesi Planlama'da fiyatlandırma "Merit Order" adı verilen bir yapıdadır. Her sabah bir sonraki gün için Piyasa İşletmecisi katılımcılardan teklifleri toplar ve hepsini değerlendirir. Her saat için teklifler en ucuzdan en pahalıya sıralanır, öngörülen tüketimin karşılandığı noktada son kabul edilen katılımcının teklifi o saatin fiyatı olur ve tüm üreticilerden bu fiyatta enerji satın alımı yapılır. Bu fiyata Sistem Gün Öncesi Fiyatı (SGÖF) adı verilir. Üreticilerin bir sonraki gün için üretmeyi garanti ettiği üretim miktarı ise Kesinleşmiş Gün Öncesi Üretim Planı (KGÜP) olarak adlandırılır [11]. Sistemin genel hatlarına bakıldığında açıkça görülebileceği gibi daha düşük fiyat verebilme şansı olan üreticiler enerji satmak için ön sıralarda yer almaktadır. Üreticinin daha düşük fiyat verebilmesi ise giderlerinin düşük, verimliliğinin yüksek olması ile alakalıdır. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklı santraller kaynak maliyetleri düşük olduğundan ilk sıralarda kendilerine yer bulabilmektedirler. Konvansiyonel enerji santralleri ise bu konuda giderlerini iyi kontrol etmek ve verimliliklerini üst seviyede tutmak zorunda kalırlar.

Gün Öncesi Planlama ile bir sonraki günün saatlik fiyatlandırması ve enerji üretimi etkin bir şekilde tahmin edilmeye çalışılır. Ancak bunun yanında dalgalanmaları giderebilmek adına gerçek zamanlı dengelemelerin yapıldığı Dengeleme Güç Piyasası da (DGP) tamamlayıcı olarak rol alır. Bu piyasa da Gün Öncesi Planlama ile aynı mantıkla çalışır. Piyasa işletmecisi öngördüğü dengesizliği, katılımcılardan yük alma ve yük atma tekliflerini alarak ve bunları değerlendirerek dengeler. Bu dengeleme sonucu oluşan saatlik fiyata ise Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) adı verilir.

2.2.2 Gün öncesi piyasası dönemi

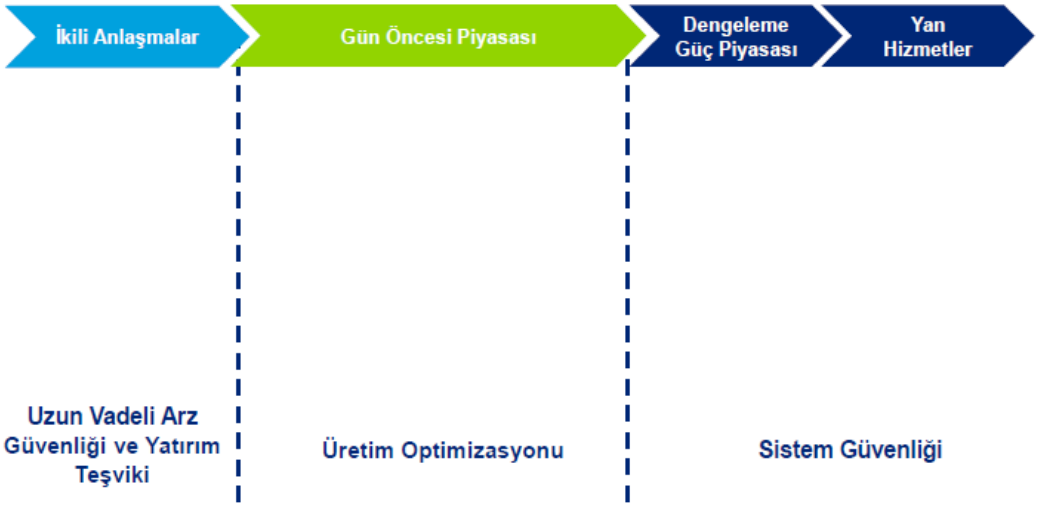
Bölüm 2.2.1'de bahsedildiği gibi Gün Öncesi Planlama'dan GÖP'e geçiş öncesi katılımcılara gerekli anlaşmalar imzalatılmış ve bu piyasaya dair eğitimler çeşitli zaman aralıklarıyla verilmiştir. Ayrıca bazı gerçek olmayan sistemlerde katılımcılara

durumu daha iyi gösterebilmek adına denemeler yapılmış, onların bu gerçek olmayan sistemde işlem yapmalarını sağlayarak sistemi daha iyi anlamaları sağlanmıştır. Bunun yapılmasındaki temel amaç Gün Öncesi Planlama ile GÖP arasındaki temel farktan kaynaklanmaktadır. Daha önceden de bahsedildiği gibi Gün Öncesi Planlama'da katılım zorunluyken, GÖP'de katılım isteğe bağlıdır. Katılımcıların bu piyasaya dahil olmalarını teşvik etmek amacıyla bu eğitimler ve deneme sürümleri ayarlanmıştır. Her ne kadar bu amaca yönelik çalışıldıysa da GÖP devreye alındıktan sonra uzun bir süre beklenen katılım sağlanamamıştır, katılımcılar bu sistemden uzak durmuşlardır [11].

Bu piyasanın amacı; piyasa katılımcılarına üretim ve tüketim ihtiyaçları ile ikili anlaşmalar yoluyla sözleşmeye bağlanmış yükümlülüklerini gün öncesinde dengeleme olanağı vererek portföy optimizasyonu yapmalarına olanak sağlamaktır. Bu piyasa sistem işletmecisi açısından da çok avantajlıdır çünkü gün öncesinden dengelenmiş bir sistem gerçek zamanda yönetilmek zorunda kalınacak dengesizliği azaltacağından, hem frekans değişimlerinin azaltılmasını kolaylaştırarak elektrik kalitesini geliştirecek hem de altyapının zaman içerisinde yaşlanmasını geciktirerek maliyetleri düşürecektir. GÖP'ün Gün Öncesi Planlama'dan farklarının başında dengeleme birimi değil portföy bazlı oluşu gelir. Üretim miktarı katılımcıların bildirdikleri tüketim tahmini ile değil, her katılımcının kendi portföyü bazında dengelenir. Diğer başlıca farklardan biri de talep tarafının tüketeceği yükü fiyattan bağımsız tüketim tahmini olarak bildirdiği bir piyasanın aksine artık talep tarafının tüketeceği yükü fiyat seviyelerine göre ayarlayabiliyor olmasıdır [11].

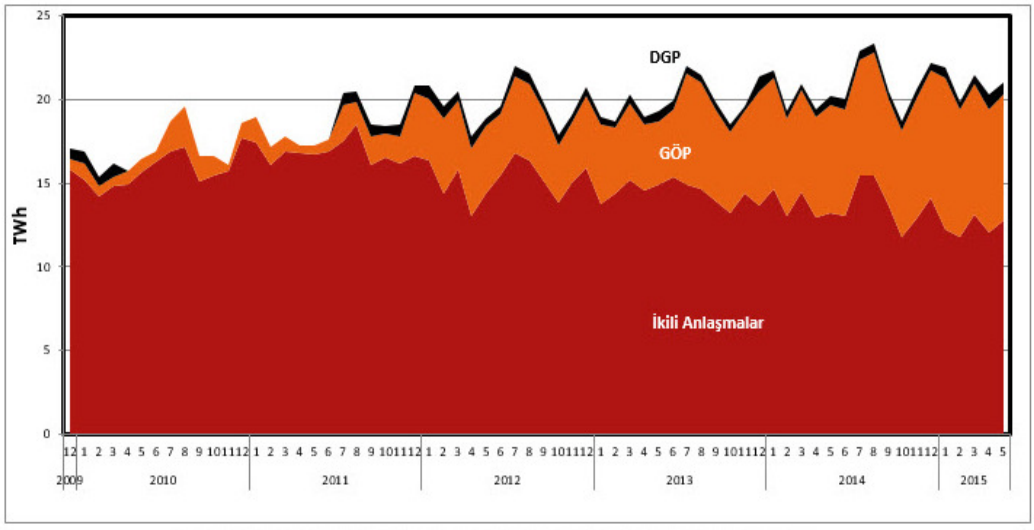
Sorulması gereken soru GÖP'ün amacı hem katılımcıların hem sistem yöneticisinin işini kolaylaştırmak ve daha dengeli hale getirmek iken neden katılımcılar bir süre bu piyasaya girmekten kaçınmışlardır? Piyasadaki fiyat riskinden kurtulmak isteyen alıcı ve satıcılar için esas araç, uzun dönemli ikili anlaşmalar yaparak alış ve satış fiyatlarının sabitlenmesi veya kendilerini riske atmayacak başka bir referans değere bağlanmasıdır. Gerçek zamana yaklaştıkça fiyat riski de artacağından, riskten kaçınmak isteyen piyasa oyuncuları için ikili anlaşmalar GÖP'e göre daha tercih edilir olmuştur [15].

Türkiye elektrik piyasasısın temel yapısı Şekil 2.3'te görülebilmektedir. Bu şekil kronolojik olarak piyasanın nasıl oluştuğuna dair güzel bir fikir vermektedir.



Şekil 2.3 : Türkiye Piyasa Yapısı [16].

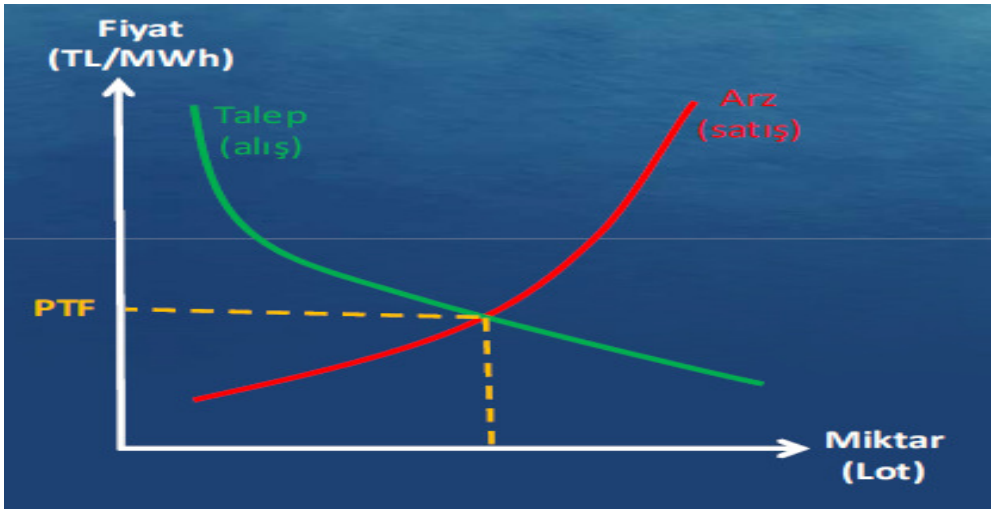
2009 – 2015 yılları arasında Türkiye elektrik piyasası hacimleri ise Şekil 2.4'te açıkça görülebilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere ikili anlaşmalar hala piyasada çok aktif şekilde yer almaktadır. Ancak GÖP'ün tamamen devreye girdiği 2011 yılından itibaren piyasa hacminde ciddi bir artış söz konusu olmuştur ve 2015 yılında yüksek bir orana ulaşmıştır. Bunlara ek olarak belirtilmelidir ki piyasadaki ikili anlaşmaların çoğu temel olarak en az bir tarafı kamu olan anlaşmalardır. İki tarafı özel kuruluşlar olan ikili anlaşmaların sayısı çok daha az boyuttadır. Ancak zaman içerisinde özellikle 2011 yılından sonra bu özel – özel anlaşmaların sayısında da bir artış gözlenmiştir.



Şekil 2.4 : Türkiye Elektrik Piyasası Hacimleri [15].

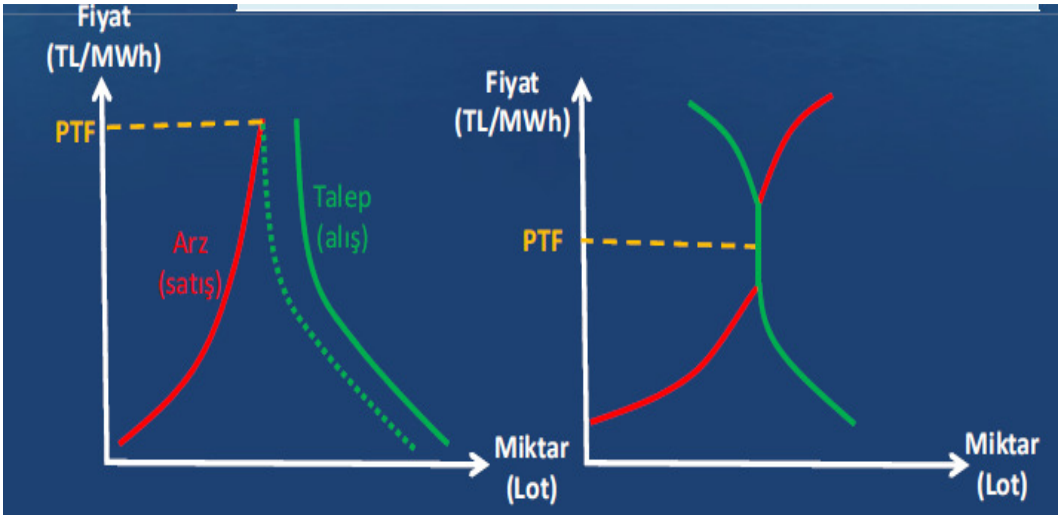
GÖP devreye girdiğinde avantajlarından bir diğeri ise tasarlanan teklif bölgeleri, sistem işletmecisine gün öncesinde kısıt yönetimi yapabilme imkanı sağlamasıdır. Bölgesel fiyatlandırma yoluyla teklif bölgeleri Türkiye'nin ihtiyaç duyduğu yatırımların yönlendirilmesine yardımcı olacaktır. Bir örnek vererek açıklamak gerekirse; elektrik üretiminin yoğun olduğu Doğu bölgesinde sistem kısıtları sebebiyle iletilemeyen elektrik, bölgede arz fazlası oluşturacaktır ve elektrik fiyatlarını daha düşük bir noktaya çekecektir. Elektrik fiyatlarının düşük olması bazı yatırımcıları teşvik edecek ve bölgeye sanayi yatırımlarının artmasını sağlayarak gelişmesini sağlayacaktır. Bir diğer taraftan tüketimin yoğun olduğu batı bölgelerinde ise elektrik fiyatları yüksek seviyede kalacak ve bu elektrik üretim yatırımcılarını bölgeye çekecek ve sonuç olarak fiyatları dengeye getirecektir. Bahsedilen koşullar gerçekleştiğinde, ülke çapında bölge bazında daha dengeli bir üretim, tüketim ve gelişme sağlanacaktır. Ancak maalasef GÖP ile planlanan bu kurgu bir tasarım olarak kalmış ve işlemler tek teklif bölgesi bazında sürdürülmüştür [11].

GÖP'te elektrik almayı isteyen katılımcıların almaya talip oldukları miktarın, elektrik satacak katılımcıların satmaya niyet ettiği miktarla eşit olduğu fiyat diliminin piyasanın temizlenme fiyatı olduğu belirtilir ve o saatin Piyasa Takas Fiyatı (PTF) bu şekilde belirlenir [8]. Şekil 2.5'te görülebileceği üzere temel ekonomi prensibi olarak arz yani satış fiyatı eğrisi ile talep yani alış fiyatı eğrilerinin kesiştiği noktada PTF belirlenir.



Şekil 2.5 : PTF belirlenmesi [17].

Arz ve talep eğrilerinin kesişmemesi durumunda alış teklif miktarları tüm katılımcıları eşit oranda etkileyecek şekilde azaltılarak kesişme sağlanır ve PTF belirlenir. Eğer eğriler birden fazla noktada kesişiyorsa kesişen noktaların ortalama değeri PTF'yi oluşturur [17]. Şekil 2.6'da bir örnek görülebilir.



Şekil 2.6 : Farklı durumlarda PTF belirlenmesi [17].

Bu noktaya kadar bahsedilen noktaların bir özeti niteliğinde Gün Öncesi Planlama ile GÖP arasındaki temel farklar ve benzerlikler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Gün Öncesi Planlama – GÖP fark ve benzerlikler [17].

Gün Öncesi Planlama	Gün Öncesi Piyasası
Katılım zorunludur	Katılım isteğe bağlıdır
Piyasa Katılım Anlaşması'nın imzalanması yeterlidir	PKA'ya ilave GÖP Katılım Anlaşması'nın imzalanması zorunludur
Dengeleme birimi bazlıdır	Portföy bazlıdır
Üretim miktarı, katılımcıların bildirdikleri tüketim tahmini ile dengelenir	Her katılımcı kendi portföyünü dengeler
Gün öncesinde referans fiyat SGÖF belirlenir	Gün öncesinde referans fiyat PTF belirlenir
Günlük olarak saatlik bazda gerçekleştirilir	Günlük olarak saatlik bazda gerçekleştirilir

2.2.3 Gün içi piyasası dönemi

Gün Öncesi Piyasası (GİP), Türkiye elektrik enerjisi piyasalarında Temmuz 2015'te devreye girmiştir. GİP'in devreye girmesi, GÖP'ün zayıflaması veya önemini

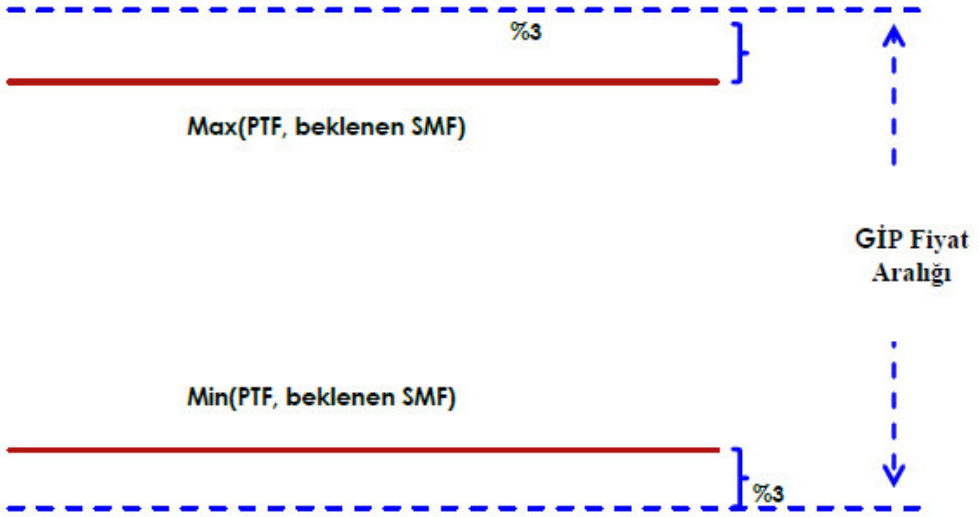
kaybedip kaybetmeyeceği gibi soru işaretleri oluşturmuştur. GÖP, 2.2.2'de bahsedildiği gibi bütün alış ve satış tekliflerinin toplanmasına müteakiben hepsinin bir anda eşleştirildiği bir ticaret ortamı sağlarken, GİP bu işlemlerin zamana yayıldığı, piyasa katılımcılarının anlık alış ve satış fiyatlarını görüntülüyebildiği daha esnek bir ticaret ortamı sağlamaktadır [15].

Bir başka tabirle GÖP, ikili anlaşmalarla uzun dönemli elektrik alış ve satışını ayarlamış piyasa katılımcılarının bir gün sonrası için eksiklerini ve fazlalıklarını dengelemelerine imkan sağlayan bir ortam yaratmaktadır. GİP ise GÖP'te öngörülen enerji dengesini sağlamış ancak santral arızaları, tahmin edilemeyen yenilenebilir üretimler gibi gerçek zamana kadar olan sürede gerçekleşen öngörülemeyen faktörler sebebiyle dengesizliğe uğramış katılımcılar için bir çözüm durağıdır. Ticaret zamanı gerçek zamana yaklaştıkça öngörülmeyen arz ve talep şoklarına yakalanma olasılığı artacağından riski GÖP'e göre daha yüksektir. Aslında GİP'in amacı dengesizlikten dolayı oluşacak ekstra maliyetten kaçınmaktır. Piyasa katılımcılarının dengesizlikten kaçınmaya çalışmalarının nedeni DGP'de oluşan fiyatlara kalmak istememeleridir. DGP'de olşan fiyatlara maruz kalmak istememelerinin temel sebepleri ise gerçek zamanda oluşan fiyatların riskini taşımak istememeleri ve ödemek zorunda kaldıkları ceza tutarlarıdır. Dengesizliğe yakalanan katılımcılara hem PTF hem SMF'nin alış yönünde yüksek, satış yönünde düşük olanı uygulanmakta hem de buna ek olarak 3% ceza uygulanmaktadır [15].

GÖP ile GİP'in üretici açısından nasıl bir fark yarattığını incelemek için örnek olarak 90MW üretim kapasiteli ve enerji üretim maliyeti 150TL/MWh olan bir üretici ele alınsın. GÖP teklifini maliyetini gidermek ve kar etmek adına 160TL/MWh olarak veren ancak GÖP fiyatının 130 TL/MWh olarak belirlenmesiyle teklifi kabul görmeyen üretici GİP'e yönlenecektir. Benzer mantıkla bu üreticinin GİP'te 150 TL/MWh altında teklif vermesi maliyetlerini karşılamayacağından ötürü doğru olmayacağından teklifini en düşük bu seviyede verecektir. Gerçek zamanda oluşacak fiyatların 146.3 (150/1.03) TL/MWh'nin üzerine çıkacağı beklentisi oluştuğu durumda üretici elektriğini satabilecek hale gelecek dolayısıyla üretimini yapabilecektir [15]. Şekil 2.7'de GİP fiyat aralığını özetleyen bir şekil görülebilmektedir.

Diğer önemli nokta ise GİP'in aktif hale gelmesiyle gerçekleşen ticarete göre gün içerisinde SMF değeri de değişecektir. Dengesizlik içerisinde olan üreticiler GİP'i

kullanarak enerji alış ve satış işlemi gerçekleştirdiğinde, gerçek zamanda bu dengesizliği dengeleme ihtiyacı azalacak ve bunun bir sonucu olarak SMF değerleri PTF'e yaklaşacaktır. GİP'in temel amaçlarından biri de zaten burada bahsedildiği gibi sistem yöneticisine daha dengede bir sistem bırakılmasıdır. Özet olarak GİP, GÖP'ün etkinliğini azaltmayacak, aksine bir tamamlayıcı unsur olacaktır [12].



Şekil 2.7 : GİP Fiyat Aralığı [15].

Bu tez çalışması kapsamında GÖP ile GİP dönemlerinin ayrılmamasının sebebi GÖP'ün hala piyasada çok aktif bir şekilde kullanılıyor oluşudur. GİP piyasa hacminde çok büyük bir yer tutmamaktadır ve aslında amacı bahsedildiği gibi GÖP'ü tamamlamaktır.

3. DİNAMİK SİSTEMLER VE KAOS TEORİSİ

3.1 Dinamik Sistemler

Sistem tanımlaması, bir amacı gerçekleştirebilmek için bir bütün oluşturan ve karşılıklı ilişki içerisinde bulunan bileşenler topluluğu şeklinde yapılabilir. Sistemi oluşturabilmek için en az iki farklı bileşene ihtiyaç vardır. Temel olarak ikiye, statik ve dinamik olarak ayrılabilmektedirler. Statik sistemler zaman hariç farklı parametrelere bağlı olan sistemler olarak tanımlanırken, dinamik sistemler zaman parametresine bağlı yani zaman içerisinde değişim gösteren sistemler olarak tanımlanabilir. Doğada gerçekleşen her olayda zaman en önemli parametrelerden biridir ve dinamik sistemler de gerçek zamanlı doğal olayları tanımlayabilmek adına statik sistemlere göre tercih edilirler.

Bilimde ve doğada insan tarafından incelenen sistemlerin neredeyse hepsinde dalgalanmalar söz konusudur. Bahsedilen dalgalanmanın ne olduğu ve hangi boyutta olduğu incelenen veri setinin neyle alakalı olduğuna göre değişmektedir. Bir inşaat mühendisi yapacağı köprüye hasar verebilecek titreşimleri, bir makine mühendisi otomobil şaftındaki oluşan dengesizlikleri, elektrik mühendisi lineer olmayan devrelerdeki dalgalanmaları, bir jeolog deprem anındaki sarsıntıyı, bir biyolog ekosistemdeki bazı hayvan türlerinin sayısındaki oynamaları, bir kalp cerrahı insan kalbinde meydana gelebilecek düzensiz kalp atışını, bir ekonomist piyasada herhangi bir sebepten meydana gelebilecek ani değişimleri inceler. Bunlar bu büyük alanlar içerisinde verilebilecek çok küçük örneklemelerdir. Dinamik sistemler lineer ve lineer olmayan olmak üzere iki ana kategoride değerlendirilir. Bir dinamik sistemde, sistemi tanımlayan denklemlerden en az birinin lineer olmaması durumunda bu sistem lineer olmayan bir dinamik sistem olarak adlandırılır. Doğadaki sistemlerin neredeyse hepsi lineer olmayan sistemlerdir ancak bilim adamları ilk yaklaşım olarak genellikle lineer bakış açısı kullanmaya çalışırlar. Bunun sebebi de lineer sistemlerin çözümlemesinin lineer olmayan sistemlere göre çok daha kolay olmasıdır. Lineer olmayan sistemler, matematiksel olarak çözümü çok zor hatta bazen çözümü

mümkün olmayan sadece yaklaşımlar yapılabilecek sistemlerdir. Ancak bu tez kapsamında incelenecek bir sistemin kaotik olması konusu sadece lineer olmayan sistemler için geçerlidir [18].

Bir denklemin analizi için sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Doğadaki süreçlerin yapısı karmaşık ve karşılıklı olarak ilişkilidir. Çok az dinamik sistemin doğası çevreden yalıtılmış şekildedir ve kendi içinde tamdır. Bunun sonucu olarak dinamik denklem sistemleri doğada gerçekleşen olayları daha kolay ve iyi bir şekilde tanımlayabilmektedir. Durumu açıklamak için n. mertebeden bir denklem ele alınırsa, denklem açık şekilde (3.1)'deki gibi yazılabilir [19].

$$y^{(n)} = F\left(t, y, y', y'', \dots, y^{(n-1)}\right) \tag{3.1}$$

Bu sistem eldeki durum değişkenleri $x_1, x_2, \dots, x_n$ olmak üzere eşitlik (3.2) ile çok boyutlu birinci mertebeden bir denklem sistemi haline getirilebilir.

$$x_1 = y,\ x_2 = y',\ x_3 = y'', \dots,\ x_{(n-1)} = y^{(n-2)}, x_n = y^{(n-1)} \tag{3.2}$$

(3.2)'de eşitliklerin her iki yanı t'ye göre türevlenirse (3.1) ve (3.2)'den (3.3)'e ulaşılır.

$$x_1' = x_2,\ x_2' = x_3$$

$$x_3' = x_4, \dots, x_{(n-1)}' = x_n,\ x_n' = g(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{3.3}$$

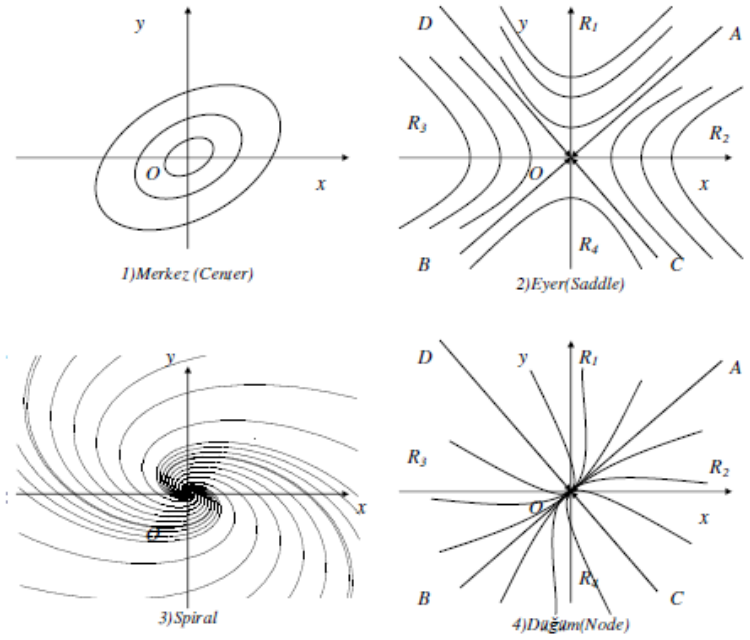
Bu indirgeme sadece lineer değil lineer olmayan sistemleri de kapsamaktadır. Bu işlem sayesinde başka herhangi bir işleme gerek kalmaksızın yüksek mertebeden bir diferansiyel denklem sistemi birinci mertebeden bir sisteme indirgenebilmektedir [19].

3.2 Kaos Nedir?

Kaos teriminin ne olduğu hakkında genel bir giriş olarak bazı bilgiler Bölüm 1'de verilmişti. Aslında kaos teriminin evrensel olarak tam olarak kabul edilmiş bir karşılığı mevcut değildir. Ancak herkesin hemfikir olduğu nokta kaosun deterministik bir sistemde başlangıç koşullarına hassas bağlı olma özelliği gösteren uzun dönemli aperiyodik bir davranış olduğudur. Bu tanımlamada açıklanması gereken üç nokta vardır. Deterministik sistem burada daha önceden de belirtildiği

gibi gerçekleşen olayların çeşitli bilimsel yasalarla belirlendiği sistemdir. Sistem içindeki düzensizlikler rastsal değildir ve gürültü sebebiyle oluşmamıştır; kendi doğasından kaynaklanan lineer olmayan davranışlardan kaynaklanmaktadır. Başlangıç koşullarına hassas bağlı olma durumu sistem içindeki yörüngelerin birbirinden çok hızlı bir şekilde ayrılması durumudur bu sebeple seçilen iki nokta arasındaki farkın bir sonraki adımda ne kadar olacağı bu noktaların başlangıç koşulunda nerede olduğu ile alakalıdır. Aperiyodik uzun dönemli davranış özelliği yörüngelerin sabit bir noktaya, periyodik ya da yarı periyodik bir denge noktasına doğru çekilmediğini ifade eder.

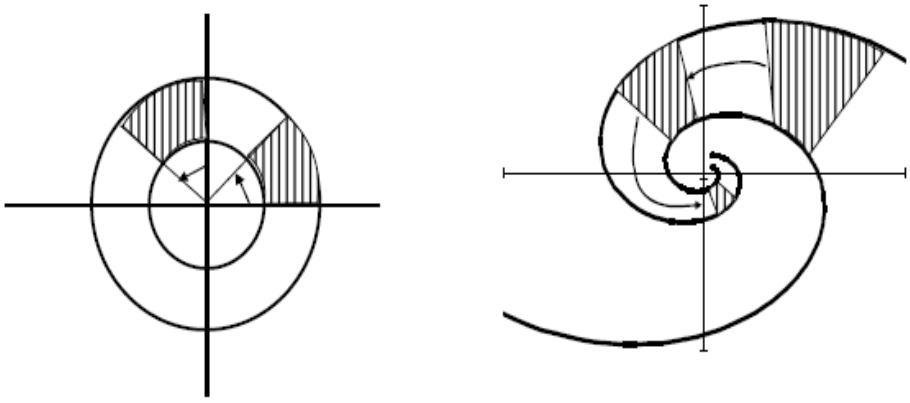
Kaosu daha iyi anlayabilmek için çekici tabirinin ne anlama geldiğini anlamak çok önemlidir. Bu tez kapsamında kaostan, dolayısıyla lineer olmayan sistemlerden bahsedileceği için yukarıda da anlatıldığı gibi aperiyodik çekiciler hakkında konuşulacaktır. Ancak lineer olmayan sistemleri anlayabilmek için lineer sistemleri de anlamak gerekmektedir çünkü lineer olmayan sistemler de aslında çekici noktalarına yakın yerlerde lineere yakın davranış gösterebilmektedir, bu sistemler arasındaki asıl fark denge noktaları dışında oluşmaktadır. Lineer sistemlerde oluşan bazı denge noktası tipleri Şekil 3.1'de görülebilmektedir.



Şekil 3.1 : Denge Noktası Tipleri [20].

Çekici, lineer veya lineer olmayan bir sistemin uzun dönemde dengeye ulaşacağı yer olarak tanımlanır. Çekici sistemin tipine ve dinamiklerine göre bir denge noktası, limit çevrim, torus veya garip bir çekici olabilir. Çekici eğer çevresindeki yörüngeleri bir diğer deyişle faz eğrilerini kendine doğru çekiyorsa kararlı, eğer kendisinden dışarı doğru itiyorsa kararsız çekici olarak tanımlanır. Aynı zamanda buna ek olarak eğer faz eğrileri birbirlerine çekici çevresinde yakınlaşıyorsa yani aralarındaki mesafe azalıyorsa korunumsuz bir çekici olarak adlandırılır. Eğer çekici etrafında yörüngeler arasındaki mesafe sabit kalıyorsa korunumlu çekicidir. Korunumlu ve korunumsuz çekici örnekleri Şekil 3.2'de görülebilir.

Eğer bir sistemde kararlı ve korunumsuz bir çekici başlangıç durumuna hassas bağlı olma koşulunu gösteriyorsa buna garip çekici adı verilir ve sistemdeki kaos varlığının görsel bir kanıtı olarak kabul edilir [21]. Garip çekiciler genellikle belli ve sınırlı bir hacim içerisindedir ve çekim havuzu tarafından sınırlandırılmaktadır, uzun dönemde bir limit kümesidir, çekici içerisinde başlayan herhangi bir yörünge hareket boyunca kümenin içinde kalır ve fraktal yani kesirli boyuta sahiptirler.



Şekil 3.2 : Korunumlu ve Korunumsuz Çekici Örnekleri [22].

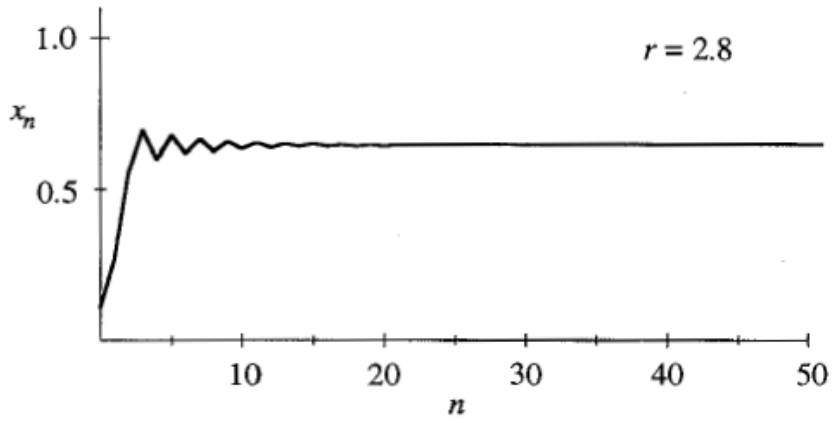
3.2.1 Lojistik tasvir

Avustralya'lı bilim adamı Robert May 1976 yılında en basit lineer olmayan sistemlerin bile çok karışık dinamiklere sahip olabileceğini lojistik tasviri ortaya atarak kanıtladı. Lojistik tasvir Robert May tarafından geliştirilen ve nüfus gelişimini zamana ve belli parametrelere bağlı olarak tanımlayan bir denklemdir. Denklem (3.4)'te görülmektedir.

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n) \tag{3.4}$$

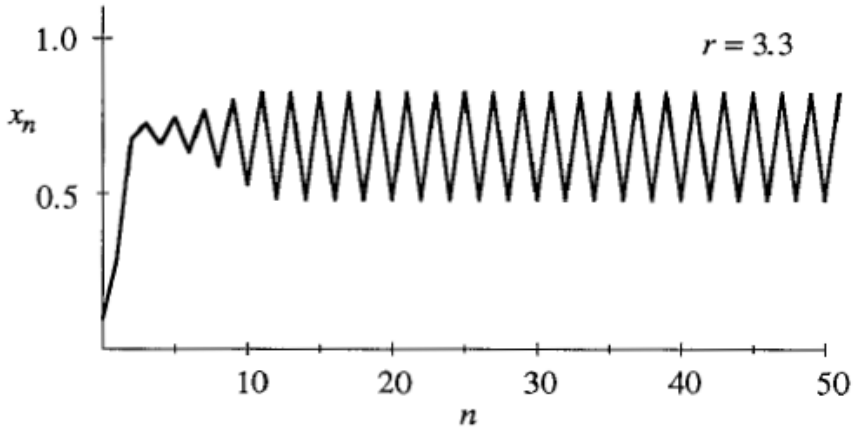
Burada x_n nüfusu n. jenerasyonda boyutsuz olarak ifade eden bir ölçüdür, r ise nüfus büyüme oranını ifade etmektedir.

Robert May, bu denklemde farklı r değerlerini kullanarak toplam popülasyonun nereye ulaşacağını dair analizler yapmıştır. Küçük nüfus büyüme oranları yani r < 1 için nüfus, zaman sonsuza giderken sıfıra yakınlaşmaktadır. Büyüme oranının daha fazla örneğin 1 < r < 3 olması durumunda , sistem uzun vadede bir denge sayısına ulaşmaktadır. Nüfusun nasıl bir yol izlediği Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3 : r=2.8 durumunda nüfus gelişimi [21].

r değerinin 3'den büyük değer alması durumunda ise uzun vadede dengeden daha farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. Örneğin büyüme oranı r=3.3 olduğunda popülasyon ilk olarak artış göstermekte sonra düşüşe geçmektedir ve belli bir periyotta uzun dönemde sürekli olarak artış ve azalış salınımı göstermektedir. Her iki iterasyonda bir nüfus değeri kendini tekrarlamaya başlar, buna periyot-2 çevrimi adı verilir [20]. Nüfus gelişimi Şekil 3.4'de görülebilir.



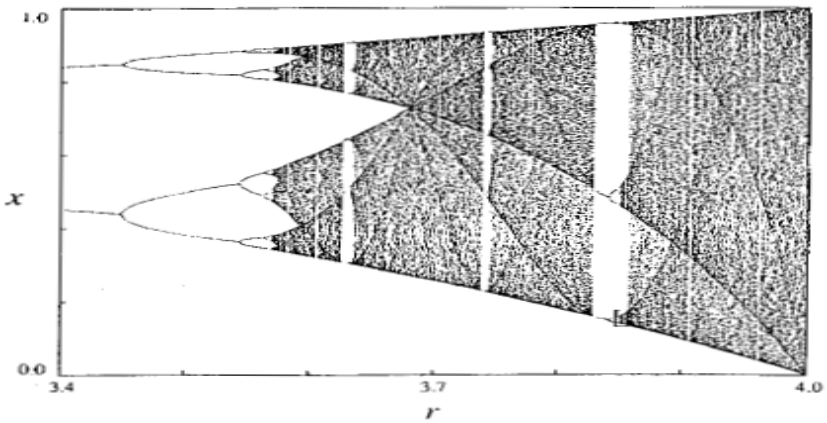
Şekil 3.4 : r = 3.3 durumunda nüfus gelişimi [21].

Büyüme oranı r'nın değeri 3.5 olduğunda ise nüfus kendi değerini dört jenerasyonda bir tekrarlamaya başlar yani kendi r=3.3'deki periyodunu ikiye katlar. Buna periyot-4 çevrimi adı verilir. Büyüme oranının değişen değerlerinde periyot çevrimleri de değişir. Farklı r değerlerine göre periyot çevrimi sayıları Çizelge 3.1'de görülebilir.

Çizelge 3.1 : Lojistik Tasvir Periyot Çevrimleri

Büyüme Oranı: r_n	Periyot
$r_1=3$	Periyot-2
$r_2=3.449\ldots$	Periyot-4
$r_3=3.54409\ldots$	Periyot-8
$r_4=3.5644\ldots$	Periyot-16
$r_5=3.568579\ldots$	Periyot-32
$r_\infty=3.569946$	∞

Çizelge 3.1'de de görülebildiği gibi r=3.57 değerini geçtiğinde artık sistemde kaosun hakim olduğu söylenebilir. Peki r değeri 3.57'den büyük değer aldığında neler olmaktadır? Aslında şu ana kadar yapılan denemelere göre bu durumda beklenen kaos seviyesinin r'nin artışıyla daha da artmasıdır. Ancak aksine sistem bu durumda kaos ve düzenin karışımı şeklinde ilerlemektedir. Farklı r değerlerinde oluşan bifürkasyon diyagramları Şekil 3.5'de görülebilmektedir. Bu diyagram aynı zamanda lineer olmayan dinamik sistemlerin bir sembolü haline gelmiştir [21].



Şekil 3.5 : 3.4< r <4 durumunda bifürkasyon diyagramı

3.2.2 Lorenz çekicisi

Bölüm 1.2'de bahsedildiği gibi 1960'lı yıllara kadar kaos teorisi üzerine yapılan bazı çalışmalar olmuş olsa da sınırlı sayıda ve beli bir çerçevede kalmıştır. 1963 yılında Edward Lorenz 'Deterministik Aperiyodik Akış' adlı çalışmasıyla atmosferik olayların üzerine kurduğu çok basit bir matematik modelin belli koşullar altında tahmin edilemez sonuçlar verdiğini göstererek kaos teorisinin önünü açmıştır [18]. Lorenz'in tespit ettiği durum aslında kaosun bizzat kendisidir ancak bu tanımlama literatüre 1975 yılında Yorke tarafından kazandırılmıştır. Lorenz bu çalışmayla lineer olmayan bu sistemde başlangıç durumuna hassas bağlı olma kriterini kanıtlamıştır. Birbirine çok yakın iki noktadan yola çıkan yörüngeler zamanla birbirinden uzaklaşmakta ve normal yollarla tahmin edilmesi mümkün olmayan bir hale gelmektedir. Lorenz'in gösterdiği aynı zamanda bir sistemin kaotik davranış göstermesinin yalnızca dış etkenlere bağlı değil, sistemin kendi iç karakteri ve başlangıç şartları ile bağıntılı olduğudur [23]. Kaotik sistemler zaman boyutunda düzensiz davranış gösterirler, başlangıç şartlarına hassasiyet yüksek boyuttadır, farklı periyodik salınımlar sınırsız sayıdadır, gürültüye benzer karakterde geniş güç spektrumuna sahiptirler, genliği ve frekansı tam olarak anlaşılamayan ancak sınırlı bir alanda aktivite gösterirler [24].

Lorenz'in 1963 yılındaki çalışmasıyla ortaya çıkardığı denklemler (3.5)'te gösterilmektedir.

$$x' = s(-x + y) \tag{3.5a}$$

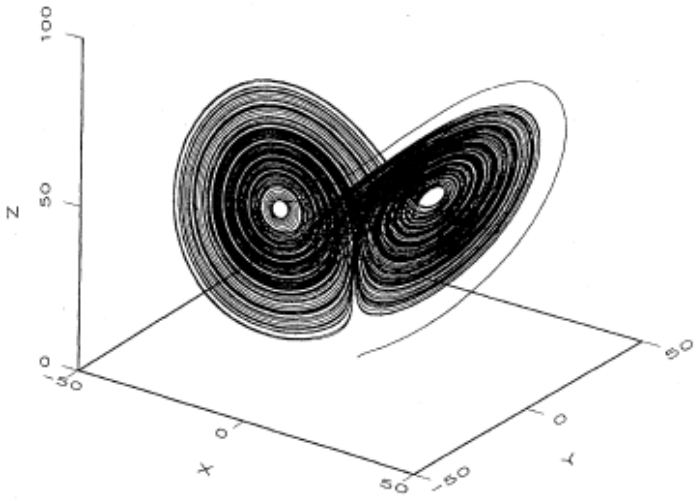
$$y' = rx - y - xz \tag{3.5b}$$

$$z' = -bz + xy \tag{3.5c}$$

$$s, r, b > 0 \tag{3.5d}$$

Bu denklemlerde sırasıyla parametreler s,r ve b'dir. Lorenzin kurduğu sistemin genel özelliği spektrumu geniş bir frekans bölgesine yayılmış aperiyodik salınımlar üretiyor olmasıdır. Sistem s=10, r=28 ve b=2.66 olması durumunda kaotik davranış göstermektedir. Lorenzin bu çalışmayla faz uzayında gösterdiği çekicinin şekli Şekil 3.6'da görülebilmektedir. Lorenz çekicisi her ne kadar yukarıdaki şekille gösterilse

de gerçekte üç boyutlu uzayda bir hacim işgal etmez. Bu çekici ne bir boyutlu yani bir doğru, ne iki boyutlu yani bir düzlemdir.



Şekil 3.6 : Lorenz Çekicisi

Çekici boyutu daha sonra Bölüm 3.3.2'de bahsedileceği gibi fraktal boyuttadır yani bir tam sayı değil kesirli bir sayıdır. Lorenz çekicisi 2.06 gibi bir değere sahiptir. Şekildeki görüntü iki boyutta aktarıldığı için yörüngeler birbirinin kesiyor gibi görülmektedir. Ancak üç boyutlu düzlemde gösterimde yörüngeler birbirini hiç bir zaman kesmemektedir.

Çekici, Şekil 3.6'da görülebileceği gibi bir kelebek kanadını andırmaktadır ve iki bölümden oluşur. Lorenz'in kurduğu sistem hava rejimlerinin atmosferdeki kaotik davranışının niteliksel özelliklerinin anlaşılmasına yardım ederken aslında hava rejimlerinin gelişimini tam olarak yansıtmamaktadır. Örnek olarak çekici sol kanadı üzerinde birbirine yakın rastgele iki nokta dikkate alınsın. Faz uzayında seçilen bu iki farklı noktanın yörüngelere bağlı olarak başlangıç gelişimi takip edilebilir. Bu koşullar altında üç farklı ihtimal değerlendirilebilir: Seçilen iki noktanın yörüngeleri çekicinin sol kanadı üzerinde kalabilir, yörüngelerden biri sol kanatta kalırken diğeri sağ kanada geçebilir ya da her iki yörünge de sağ kanada geçebilir. Bahsedilen üç durumda da yörüngelerin birbirinden uzaklaşması söz konusudur bu da anlık yapılacak tahminlerin farklı sonuç vereceği anlamına gelmektedir. Atmosferik olaylar temelde kaotiktir ancak başlangıç durumunun ne olduğunu belirlemek için seçilen bir noktaya çok yakın noktalarda yapılmış yeterli sayıda hava öngörüsü olması durumunda hava rejimleri için öngörü yapılabilir [25].

3.2.3 Henon tasviri

Matematikçi Michel Henon 1976 yılında, Lorenz'in öncesinde yaptığı gibi kaotik sistemlerin gerilme ve katlanma özelliklerini gösteren Henon Tasviri'ni öne sürdü. Henon tasviri kaotik sistemlerdeki bu karakteristiği gösteren en basit model olması sebebiyle önemlidir. Matematiksel bir model olarak öne sürülmüş olsa da bazı fiziksel sistemlerin de dinamiklerini karşılamaktadır [26]. Henon tasviri (3.6)'daki denklemlerle ifade edilir.

$$x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + by_n \tag{3.6a}$$

$$y_{n+1} = x_n \tag{3.6b}$$

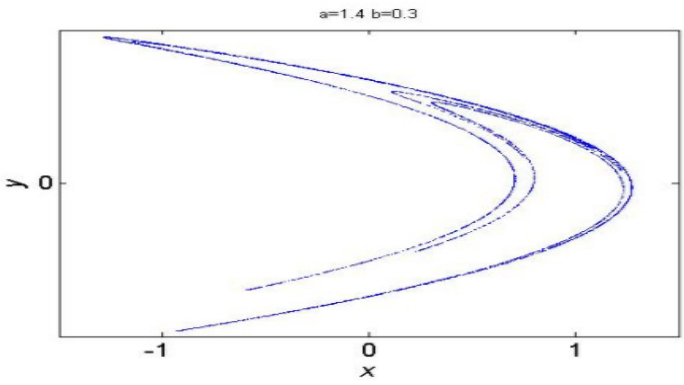
Ya da bir başka gösterişle (3.7)'deki gibi de yazılabilir.

$$x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + bx_{n-1} \tag{3.7}$$

Çekici, faz uzayı içerisinde yörüngelerin global olarak yakınsadığı bir altkümedir, bir nokta, periyodik veya aperiyodik bir yörünge veya bunların hepsinin birleşiminden oluşabilir. En ilginç durum ise aperiyodik tekrarlayan çekicilerdir, diğer adıyla garip çekici olarak adlandırılır [26]. Henon haritasının (3.8)'deki gibi iki çözümü vardır.

$$x_0 = \frac{-(1-b) \mp \sqrt{(1-b)^2 + 4a}}{2a} \tag{3.8}$$

Henon tasvirinde a=1.4, b=0.3 değerlerini aldığında garip çekici ortaya çıkmaktadır, görseli Şekil 3.7'de görülebilir.



Şekil 3.7 : Henon Tasviri ve Çekicisi

3.2.4 Rössler çekicisi

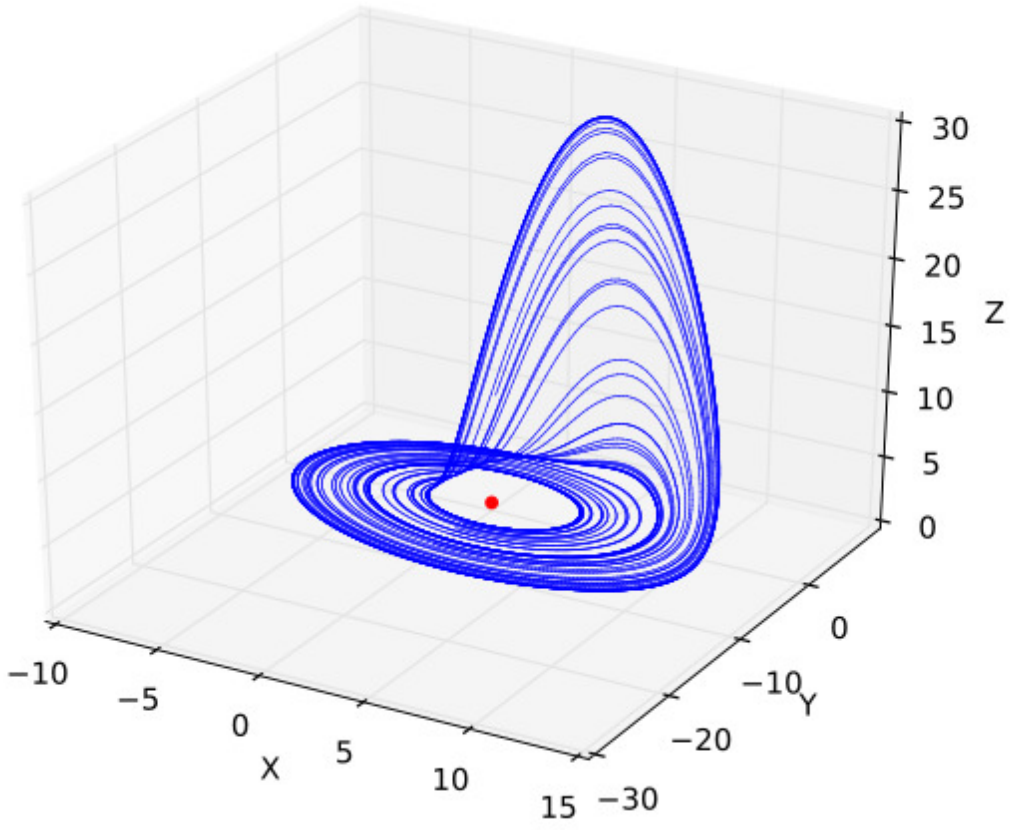
Alman biyokimyacı Otto Eberhard Rössler 1976 yılında kaotik sistemler literatürüne Rössler çekicisini kattı. Rössler sistemi kimyasal reaksiyonların dinamiği ile ortaya çıkmıştır ve lineer olmayan üç diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Bu denklemler sürekli zamanlı bir dinamik sistemi oluşturmakta ve fraktal olarak tanımlanan Rössler çekicisini meydana getirmektedir. Rössler sistemini oluşturan denklemler (3.9)'da görülebilir.

$$x' = -y - z \tag{3.9a}$$

$$y' = x + ay \tag{3.9b}$$

$$z' = b + z(x - c) \tag{3.9c}$$

Rössler çekicisinin a=0.2, b=0.2 ve c=5.7 değerlerinde aldığı görüntü Şekil 3.8'de görülebilmektedir [27].



Şekil 3.8 : Rössler Çekicisi

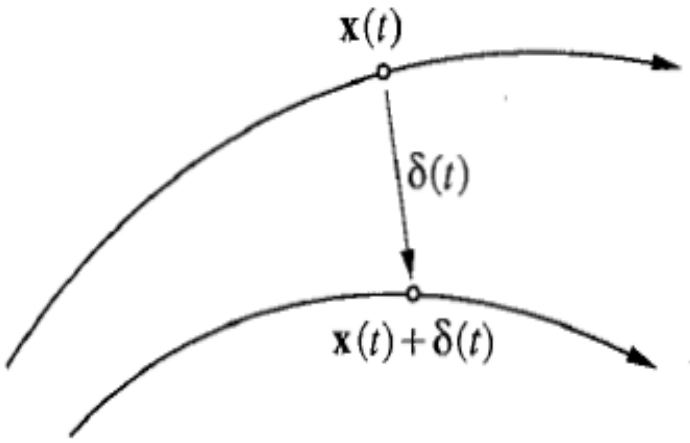
3.3 Kaosun Nicel Belirleyicileri

Kaos tespiti için nümerik tekniklere girmeden önce ilk uygulanabilecek yöntem görsel inceleme metodudur. Bazı sistemlerde görsel olarak periyodik davranış tespit edilebilir bu tarz sistemlerde kaosun var olmadığı net bir şekilde bellidir; daha önceden de bahsedildiği gibi kaos için aperiyodik bir davranış gereklidir. Bunun yanında faz uzaylarının görsel olarak incelenmesi de kaosun varlığına dair kanıtlar ortaya sunabilir.

Lineer olmayan bir sistemde kaotik davranış için daha önceden de belirtildiği gibi başlangıç durumuna hassas bağlı olma koşulu bir diğer deyişle yörüngelerin faz uzayında üstel olarak ıraksaması, zaman serisinin düzensiz bir salınım göstermesi, otokorelasyon fonksiyonunun eksponansiyel olarak azalması, Poincare kesit düzleminin bir kısmının tamamen düzensiz şekilde olması, güç spektrumunun küçük frekanslarda geniş bantlı gürültü yapısına sahip olması, sistemdeki çekicinin fraktal boyuta sahip olması gibi kriterler sayılabilir. Sıralanan kriterlerde zaman serisinin düzensiz bir salınım göstermesi kriterini incelemek, grafiksel olarak yorumlamalarda kişilere göre değişebileceğinden pek sağlıklı sonuç vermeyebilir. Verilerin normal dağılıma uymuyor olması durumunda ise otokorelasyon fonksiyonu doğru sonuçlar vermeyebilmektedir. Güç spektrumundaki geniş bantlı gürültü kriteri ise yine pek güvenilir bir karar mekanizması değildir sebebi ise bu kriterin kaotik sistemler dışında stokastik süreçlerde de görülebiliyor oluşudur. Kaotik davranış için en güvenilir kriterler yörüngelerin üstel ıraksama göstermesi başka bir deyişle pozitif Lyapunov üstelinin var olması ve fraktal boyuta sahip bir çekici varlığıdır [23]. Bu tez kapsamında da kaos varlığı kanıtı için bu iki kriter kullanılacaktır.

3.3.1 Lyapunov üstelleri

Daha önceden de bahsedildiği gibi kaos varlığı için aranan şartlardan biri incelenen lineer olmayan sistemde çekici etrafında yörüngelerin birbirinden üstel olarak ıraksıyor olmasıdır ve bu kriterin ne boyutta olduğu Lyapunov üsteli ile tanımlanır. Dolayısıyla Lyapunov üsteli tanımı verilirken incelenmesi gereken öncelikle yörüngeler arası mesafedir, fiziksel olarak gösterimi Şekil 3.9'da görülebilir. Şekil 3.9'daki yörüngelerin çekici etrafında olduğu varsayılsın, $x(t)$ t anında çekici üzerindeki bir nokta olarak, $x(t)+\delta(t)$ ise bu noktadan $\delta(t)$ uzakta bir nokta olarak kabul edilsin.



Şekil 3.9 : Yörüngeler arası mesafe [21].

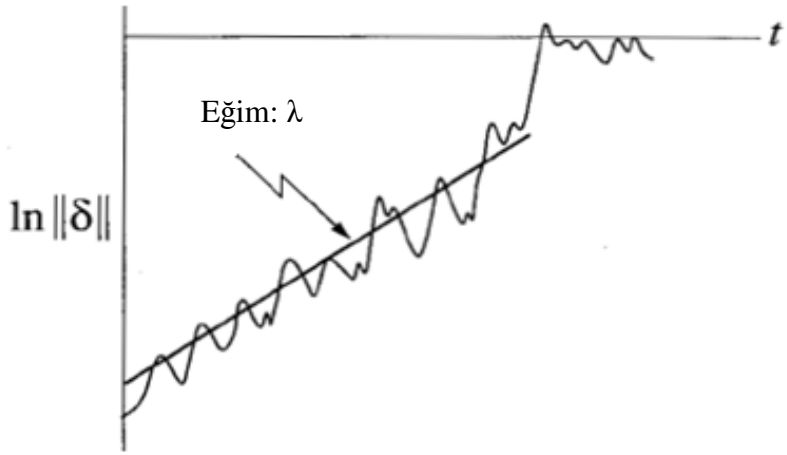
Bu durumda komşu yörüngelerin birbirinden ayrılma hızı zamana bağlı olarak (3.10)'daki gibi tanımlanabilir.

$$\|\delta_{(t)}\| = \|\delta_0\| e^{\lambda t} \tag{3.10}$$

Bu denklemde Lyapunov üsteli λ olarak tanımlanmıştır. λ değeri yukarıdaki denklemde çekilirse:

$$\lambda = \frac{1}{t} ln \left[\frac{\delta_{(t)}}{\delta_0} \right] \tag{3.11}$$

Kaotik olan sistemlerde komşu yörüngeler birbirinden eksponansiyel olarak ayrıldığından eğer $ln\|\delta_{(t)}\|$ grafiği zamana göre çizilirse Şekil 3.10'daki gibi bir görüntü ortaya çıkar.



Şekil 3.10 : Lyapunov Üsteli – Zamana Bağlı Gösterimi

Eğri hiç bir zaman tam olarak lineer düz bir eğri değildir. Üstel ıraksamanın şiddeti çekici çevresinde değişmektedir ve salınımlara sebep olan budur. Şekilde görüldüğü gibi mevcut olan pozitif Lyapunov üsteli sistemde kaosun varlığını gösterir. En yüksek Lyapunov üsteli sistemde uzun dönemde en etkili olan değerdir ve çeşitli çekici ve hareket tipleri için hangi değer aralıklarında olabileceği Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Çekici Tiplerine Göre Lyapunov Üsteli Değerleri [28].

Hareket/Çekici Tipi	Maksimum Lyapunov Üsteli
Sabit Nokta	$\lambda < 0$
Limit Çevrim	$\lambda = 0$
Kaotik	$0 < \lambda < \infty$
Gürültü	$\lambda = \infty$

3.3.2 Fraktallar ve fraktal boyut tespiti

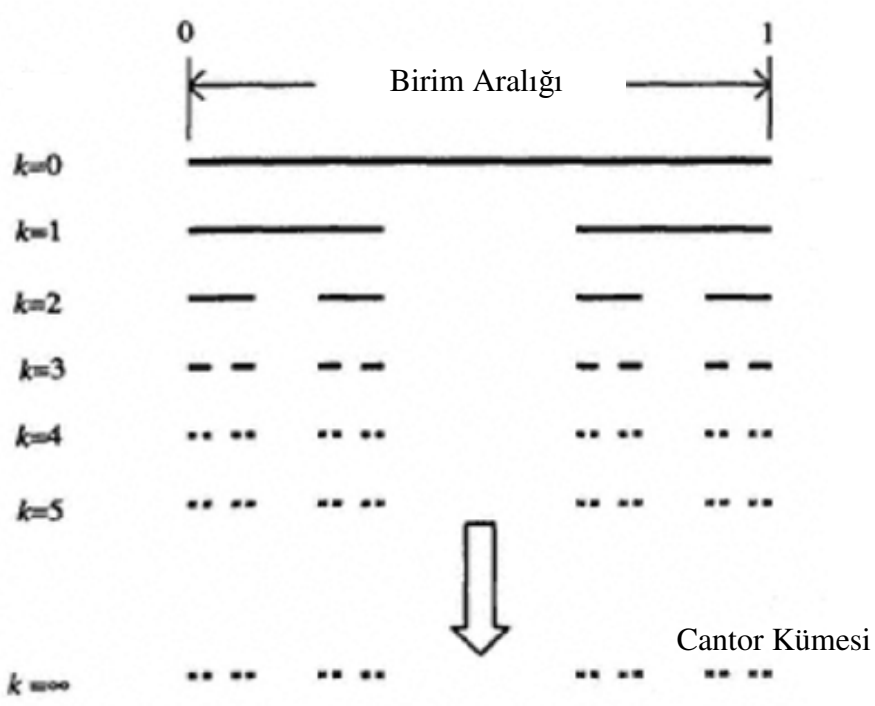
Fraktal tanımlaması ilk olarak matematikçi Benoit Mandelbrot tarafından 1979 yılında ortaya atılmıştır ve sonsuz küçük ayrıntıya sahip karışık geometride olan yapılardır. Fraktalların en önemli özelliği kendine benzerlik karakteristiğine sahip olmalarıdır; fraktalın en küçük parçası sistemin kendisine benzemektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi kaotik sistemlerde aranan en temel özelliklerden biri sistemin bir garip çekiciye sahip olmasıdır. Bu çekicinin fraktal yani kesirli bir boyuta sahip olması kaos kanıtı için kullanılan parametrelerden biridir.

Diferansiyel denklemlerle tanımlanmış bir sistemin boyutu eğer üçten az ise sistem kaotik davranış gösteremez. Bunun sebepi yörüngelerin birbirini kesmeme zorunluluğu olmasıdır. Buradan yola çıkarak akış tarzı olan bir kaotik sistemde, örneğin bir zaman serisi, sisteme ait garip çekicinin boyutu ikiden büyük olmak zorundadır. İkiden çok az bir miktar daha büyük olması bile bunun için yeterli olabilmektedir [28]. Buna en basit örnek olarak Bölüm 3.2.2'de işlenen Lorenz denklemleri verilebilir. Lorenz denklemlerinde sistem 3 boyuta sahiptir ve Lorenz çekicisi boyutu 2.06 gibi bir değere sahiptir. Bu değerler bahsedilen koşulları tamamen sağlamaktadır. Çekici boyutunun değeri bir tamsayı değil, fraktal yani kesirli bir yapıdadır.

Fraktalların oluşması ancak dinamik sistemlerle mümkün olabilmektedir. Eğer bir sistemin kaynağında değişim yoksa bir sabitlik varsa o sistem bir fraktal yaratamaz.

Bunun sebebi olarak ise fraktalların tanımlanmış bir kuralı izlemek zorunda olması gösterilebilir. Tanımlanmış bir kural dendiğinde daha önceden de bahsedildiği gibi akla hemen deterministik sistemler gelmektedir. Arkasında deterministik bir kural olan bir sistem geometrik olarak kendine benzer bir fraktal yaratabilmektedir. Deterministik olmayan, rastsal bir kurala göre oluşturulan sistem fraktalları ise yalnızca istatiksel olarak kendine benzerlik gösterebilirler [19].

Literatürde fraktalların kendine benzerlik özelliğini tanımlamak için gösterilebilecek en güzel örnek Cantor kümesidir. Başka örnekler olarak Koch eğrisi ve Mandelbrot kümesi verilebilir ancak fraktal yapının en basit ve anlaşılabilir formu budur. Cantor kümesinin nasıl oluşturulduğu Şekil 3.11'de görülebilir.



Şekil 3.11 : Cantor Kümesi

Şekil 3.11'de [0,1] kapalı aralığı üçe bölünür ve tam ortasındaki parça kümeden çıkartılır. Bu işlem sürekli olarak tekrarlanır ve bu iterasyonlarla ortaya çıkan kümeye Cantor kümesi adı verilir. İterasyonların her adımında oluşan kümeler, k=1 ile oluşturulan ilk yapıya benzerlik göstermektedir, ve her birinin tıpkı k=1'de olduğu gibi toplam üçte birlik bir kısmı boşluktur. Bu gerçek iterasyon sayısı sonsuza giderken de değişmez. Dolayısıyla Cantor kümesi, fraktalların kendine benzerlik özelliğini bu şekilde çok net olarak gösterebilmektedir. Fraktal boyutun kaotik bir

sistemde nasıl hesaplandığına dair bilgiler Bölüm 4.4'te verilecektir. Bu hesabı tam olarak anlayabilmek için öncelikle korelasyon boyutu ve korelasyon toplamı ya da integrali terimlerine aşina olmak ve nasıl hesaplandıklarını bilmek gerekmektedir.

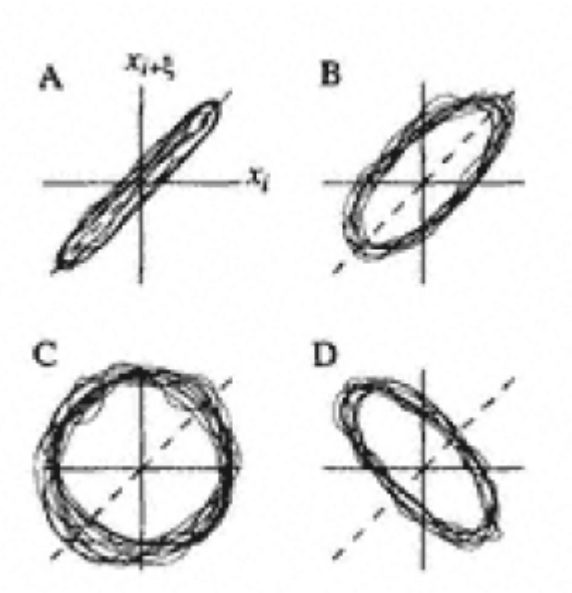
4. LİNEER OLMAYAN ZAMAN SERİLERİNDE KAOTİK ANALİZ

Bu bölüme kadar yapılan incelemelerde kaos teriminin ne anlama geldiği, hangi sistemlerde kaosun görülebileceği, kaos tespiti yapabilmek için hangi parametrelere bakılması gerektiği gibi konuların üzerinde durulmuş ve bazı kaotik sistemlerden örnekler verilmiştir. Bu bölümde aşamalı olarak lineer olmayan bir sistemde kaotik analizin nasıl yapılacağı üzerinde durulacak ve kaos tespiti için gereken parametreler daha detaylı olarak incelenecektir.

4.1 Faz Uzayının Görsel İncelenmesi

Kaos tespiti için ilk adım faz uzayında yörüngelerin görsel olarak incelenmesi metodudur. Faz uzayını gecikmeli kordinatlar yoluyla doğru bir şekilde görüntülemek için sistemin doğru zaman gecikmesinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu konuyla ilgili detay bilgi Bölüm 4.2'de faz uzayının yeniden kurulumu bölümünde verilecektir. Doğru zaman gecikmesini seçmek için kullanılan bazı yöntemler vardır ancak sistemi inceleyen kişi, ilk olarak farklı zaman gecikmesi durumlarında faz uzayının nasıl olduğunu görüntüleyebilir ve gecikmenin ne mertebede olması gerektiğine aynı zamanda görsel olarak sistemde ilk bakışta bir çekicinin mevcut olup olmadığına dair tahmin yürütebilir. Zaman gecikmesinin çok küçük olması durumunda koordinatlar birbirine çok yakın olacak ve faz uzayında bunları birbirinden ayırmak mümkün olmayacaktır. Elde, bu tez kapsamında incelendiği gibi saatlik bir zaman verisi olduğu düşünülürse, zaman gecikmesini bir saat gibi bir değer seçmek koordinatları birbirinden ayırmaya yetmeyecek ve faz uzayı bir doğru şeklinde görüntülenecektir. Bu görüntü, incelemeyi yapan kişiye sisteme dair herhangi bir fikir vermez. Bunun yanında zaman gecikmesi gereğinden yüksek boyutta seçilirse bu sefer kordinatlar birbirinden bağımsız hale gelecek sistem yine doğru bir şekilde incelenemeyecektir. Temel olarak söylenmek istenen şudur, sahip olunan zaman serisi $X(t)$ gibi bir seri olsun, zaman gecikmesi eklenerek elde edilen yeni koordinatlar $X(t + \mu)$ olsun. Burada μ, belirlenen zaman gecikmesidir. Bu koordinatlar iki boyutlu bir grafikte çizdirildiğinde gecikmeli

koordinatlar yöntemiyle faz uzayı incelenmesi yapılmış olur, elde edilen grafik *(X(t), X(t + μ))* olarak çizdirilir. Faz uzayı görsel olarak üç boyutta incelenmek istenirse grafik *(X(t), X(t + μ), X(t + 2μ)* olarak çizdirilebilir. Bu durumu örneklendirmek adına farklı zaman gecikmelerinde faz uzayının nasıl hal aldığı Şekil 4.1'de görülebilir.



Şekil 4.1 : Zaman Gecikmesi – Faz Uzayı İlişkisi [18].

Şekil 4.1'de A şeklinde zaman gecikmesi çok küçük seçildiğinden koordinatlar faz uzayında birbirlerinden ayrılamamıştır ve doğruya yakın bir görünüm vermişlerdir. B şeklinde zaman gecikmesi daha büyük seçilmiş koordinatlar arası biraz açılmış ancak asıl C şeklinde doğru zaman gecikmesiyle çekici tam olarak net görüntülenebilmiştir. D'de, zaman gecikmesinin gereğinden büyük seçilmesi durumunda koordinatlar birbirinden bağımsız olmaya başlamış ve şekli doğru yorumlamak zorlaşmıştır.

4.2 Faz Uzayının Yeniden Kurulumu (FUYK)

Bölüm 4.1'de aslında bu bölümde anlatılacak terimlerin bir kısmından kısaca bahsedilmiştir. Bu bölümde zaman gecikmesi μ'nün belirlenmesinde kullanılan yöntemler, gömme boyutunun ne anlama geldiği ve nasıl belirlendiği işlenecektir. Faz uzayının yeniden kurulması (FUYK) kaos analizi için ilerleyen aşamalarda kullanılacak önemli paramatrelerin belirlenmesinde önemli bir rol oynayacaktır. FUYK'den önce aslında lineer olmayan dinamik bir sistemden toplanan bilginin gürültü giderimin yapılması gerekmektedir. Çünkü gürültü mevcudiyeti sistemin

doğru bir şekilde incelenmesinin önüne geçebilmekte ve yanlış yorumlanmasına sebep olmaktadır. Bu tez kapsamında da gürültü gideriminin yapılmasına önem verilmiş, nasıl yapıldığı ve ne mertebede olduğu Bölüm 5'de detaylı olarak anlatılmıştır.

4.2.1 Zaman gecikmesinin belirlenmesi

Zaman gecikmesinin belirlenmesindeki temel amaç ardışık koordinatların bağımsızlığını sağlayacak yeterli seviyede bir zaman gecikmesi bulmaktır. Bu değeri bulabilmek için kullanılan yöntemlerden biri otokorelasyon fonksiyonunun (OKF) kurulmasıdır. Otokorelasyon fonksiyonu *f(μ),* eldeki fonksiyon *x(m)* olursa denklem (4.1)'deki gibi bir hal alır.

$$f(\mu) = \frac{\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}(x(m+\mu) - \bar{x})}{\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}((x(m) - \bar{x})^2} \tag{4.1}$$

Otokorelasyon fonksiyonun ilk sıfır değerini aldığı gecikme değeri seçilecek zaman gecikmesi için güzel bir ipucu verir. Ancak düşünülmesi gereken nokta şudur, OKF lineer bağımlılığın bir ölçütünü verir halbuki lineer olmayan bağlılığı ne düzeyde açıklayabileceği şüphelidir [29]. Bunun yanında sistemde gürültü olması durumunda OKF'nin vereceği sonuçlar yine güvenilmez olacaktır.

OKF'nin nasıl olduğunu incelemek kaos analizi için faydalı olabilir ancak yukarıda bahsedildiği gibi lineer bağımlılığı incelediği için sonuçlardan tam olarak emin olmak için alternatif bir yöntem olan Ortak Bilgi Fonksiyonu (OBF) kurulumu da yapılmalıdır.

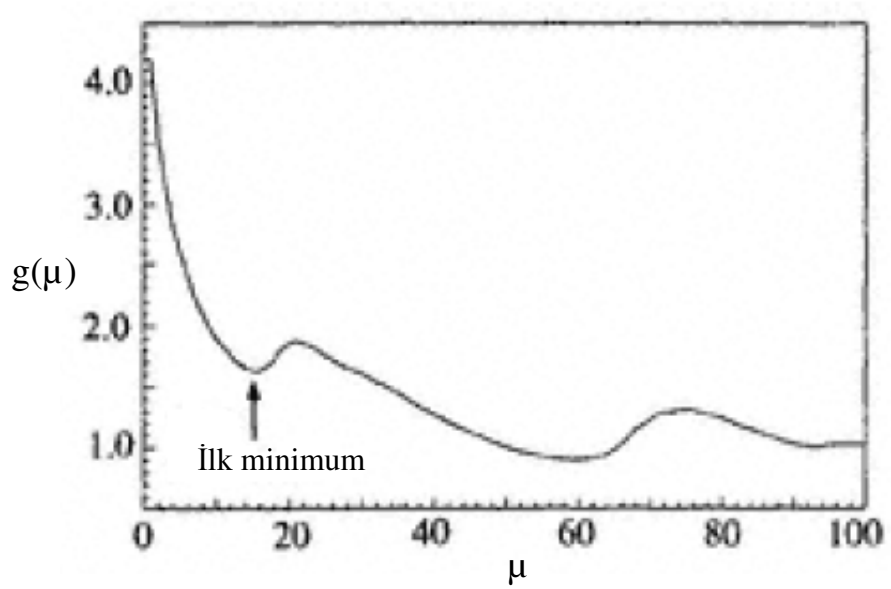
OBF iki değişken arasındaki lineer bağlılığı değil genel bağlılığı inceler. Zaman serisinde birbirine komşu olan noktaların *x(t)*, *x(t + μ)* istatistiksel olarak ne derece bağlı olup olmadıklarının bir ölçütünü belirlemektedir. Zaman gecikmesi μ'ye bağlı OBF fonksiyonu *g(μ)* (4.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$g(\mu) = \sum_t P\big(x(t), x(t+\mu)\big)\log\left(\frac{P(x(t), x(t+\mu))}{P(x(t)) * P(x(t+\mu))}\right) \tag{4.2}$$

Bu denklemde $P\big(x(t)\big)$ve $P(x(t+\mu))$ zaman gecikmesine bağlı ardışık koordinatların iki ayrı olasılık dağılımı, $P(x(t), x(t+\mu))$ ise ikisinin ortak olasılık

dağılımıdır [19]. Denklemlerden de anlaşılacağı üzere OBF'nin amacı aslında daha önce Şekil 4.1'de gösterilen çekicinin net bir şekilde gecikmeli koordinatlarda görülebilmesini sağlayacak gecikme değerini belirlemektir.

OBF grafiğine ilişkin örnek görsel Şekil 4.2'de verilmiştir. Bahsedildiği gibi zaman gecikmesi OKF'de otokorelasyon eğrisinin sıfıra ulaştığı değer, OBF'de ilk minimumu aldığı nokta olarak seçilir.



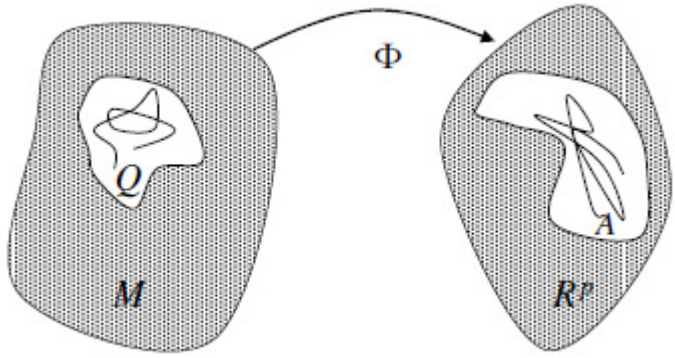
Şekil 4.2 : Ortak Bilgi Fonksiyonu – Örnek [18].

4.2.2 Gömme boyutunun belirlenmesi

Bölüm 4.2.1'de görülen zaman gecikmesi belirlendikten sonra FUYK'nin ilk adımı gerçekleşir, çekiciyi karakterize edebilmek için diğer ihtiyaç olan parametre gömme boyutudur. Gömme boyutunun nasıl belirlendiğini anlamadan önce, gömme uzayının ve teoreminin ne olduğundan bahsetmek daha doğru olacaktır. FUYK aşamasında yapılmaya çalışılan teorik olarak aslında eldeki zaman serisine ait özellikleri, kaotik özellikler ve çekiciler gibi, zaman serisini temsil edebilecek bir faz uzayı oluşturarak bu faz uzayı üzerinde incelemektir. Dolayısıyla faz uzayında oluşturulan çekici zaman serisindeki gerçek çekicinin özelliklerini taşımak zorundadır ve bunu doğru şekilde yapabilmenin yolu da doğru gömme boyutunu belirlemekten geçer.

Bunu daha matematiksel anlatmak gerekirse; bir Q çekicisi üzerinde, F dinamiği yörünge noktalarını $Q \subset M$ 'de üretmekte olsun. Burada ihtiyaç olan sadece zaman serisi ölçümünden sistemin tüm değişmez niceliklerinin elde edilebilmesini sağlayacak $A \subset R^p$ çekicisini oluşturmaktır. A çekicisi gerçek sistemin boyutları,

üstelleri gibi tüm önemli geometrik özelliklerini taşımak zorundadır. Bu durumun özeti görsel olarak Şekil 4.3'de görülebilmektedir.

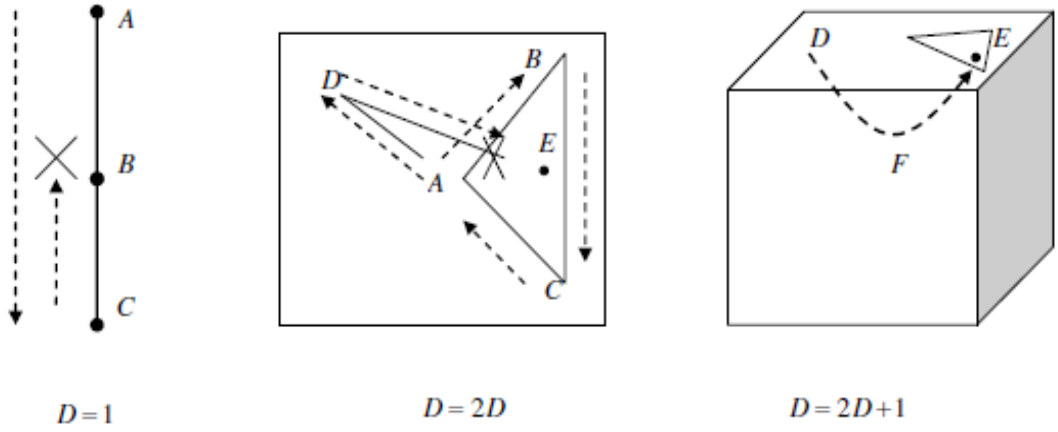


Şekil 4.3 : Φ dönüşümü ile Q çekicisinin A çekicisine dönüştürülmesi [30].

FUYK işlemini yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri zaman serisindeki gerçek çekiciyi olduğundan daha düşük bir boyutta faz uzayına gömmemektir. Eğer bu yapılırsa gerçek çekicinin özellikleri faz uzayına yansıtılamamış olur. Örnek vermek gerekirse, lineer olmayan bir sistemde bir boyuta sahip bir çekici olsun. Bu çekici iki boyutlu bir uzayda görüntülenmeye çalışıldığında bir boyuta sahip doğruların kesişme ihtimali olacaktır. Böyle bir durum hangi noktaların hangi noktalarla komşu olduğunu anlamakta bir belirsizlik yaratacaktır. Ancak bu çekici üç boyutlu bir uzayda görüntülendiğinde bu durum ortadan kalkacaktır. Gömme boyutu dört olarak seçildiğinde yine bir problem yaratmayacaktır. Bu durum kaotik sistemlerdeki yörüngelerin tekilliği şartı için esastır. D_G gömme boyutu yukarıda belirtilen esaslardan ötürü $D_Ç$ çekici boyutunun iki katından bir fazla olarak $D_G = 2D_Ç + 1$ seçilmelidir. Gömme boyutu seçimi minimum olarak belirlenen gömme boyutundan çok daha yüksek mertebede de yapılmamalıdır.

Bir başka örnek olarak Lorenz sistemi verilebilir. Lorenz çekicisi Bölüm 3.2.2'de bahsedildiği gibi 2.06 gibi bir fraktal boyuta sahiptir. Lorenz çekicisi beş boyutlu bir uzaya gömüldüğünde herhangi bir belirsizlik durumu yaşanmadan doğru bir şekilde görüntülenebilecektir [29].

Gömme teoreminin görsel olarak anlatımı Şekil 4.4'te görülmektedir. Bu yöntem sadece minimum olması gereken gömme boyutunun belirlenmesini sağlar yani gömme boyutuna sadece bir sınır koşulu getirir.



Şekil 4.4 : Gömme Teoremi Geometrik Açıklaması [19].

Olması gereken doğru gömme boyutunun tam olarak belirlenebilmesi için kullanılan dört farklı yöntem vardır: kovaryans matrisinin tekil-değer analizi, sistem sabitlerinin doyma yöntemi, yanlış en yakın komşular (YEYK) yöntemi ve gerçek vektör alanları yöntemi. Bu tez kapsamında literatürde en çok kullanılan ve diğerlerine göre kaotik analizde daha doğru ve güvenilir sonuçlar veren YEYK yöntemi kullanılacaktır.

YEYK yönteminin kullanımı ve hesabı direkt olarak zaman serisindeki bilgilerden gelir.

Gömme boyutu D_G, zaman gecikmesi μ olan bir faz uzayında bir noktanın koordinatlarını belirleyebilmek için eşitlik (4.3) kullanılır.

$$y(t) = [s(t), s(t+\mu) \dots s(t+(D_G-1)\mu)] \tag{4.3}$$

Belirlenen bu noktaya en yakın olan komşu nokta $y^{NN}(t)$ olarak kabul edilirse ve bu noktada (4.3)'e benzer şekilde eşitlik (4.4)'teki gibi ifade edilirse.

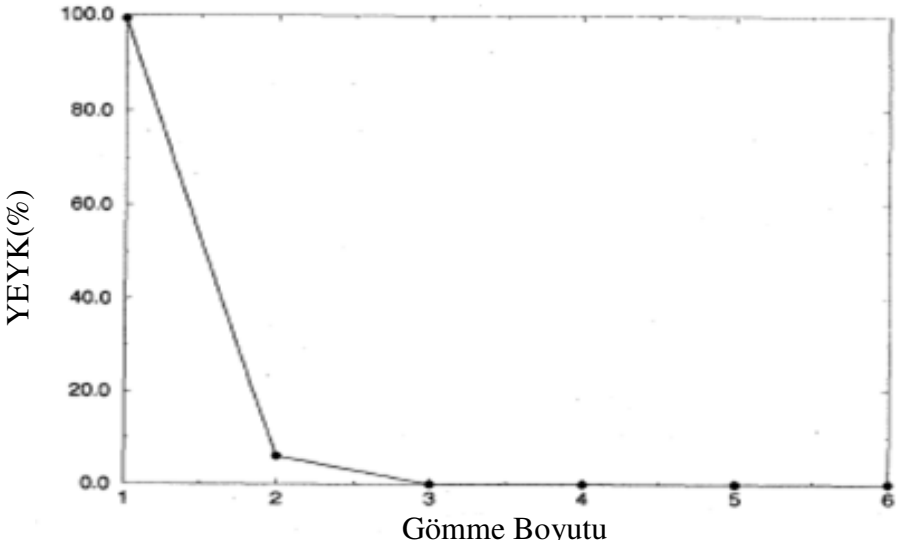
$$y^{NN}(t) = [s^{NN}(t), s^{NN}(t+\mu) \dots s^{NN}(t+(D_G-1)\mu)] \tag{4.4}$$

bu iki komşu nokta arasındaki mesafe olan$R_d(t)$ (4.5) ile belirtilir.

$$R_d(t)^2 = \sum_{d=1}^{D_G} [(s(t+(d-1)\mu) - (s^{NN}(t+(d-1)\mu)]^2 \tag{4.5}$$

Teorik olarak yanlış en yakın komşu yüzdesinin sıfıra indiği boyut minimum gömme boyutu olarak belirlenir. Şekil 4.5'de Lorenz çekicisi için yapılan YEYK hesaplaması ve yüzdesel olarak sıfıra indiği boyut değeri görülebilir. Gömme boyutu

3 olarak seçildiğinde YEYK yüzdesi sıfıra inmektedir ancak daha önceden bahsedilen yörüngelerin tekilliği ilkesini karşılayabilmek için gömme boyutunun 5 olarak seçilmesi daha sağlıklı sonuç vermektedir.



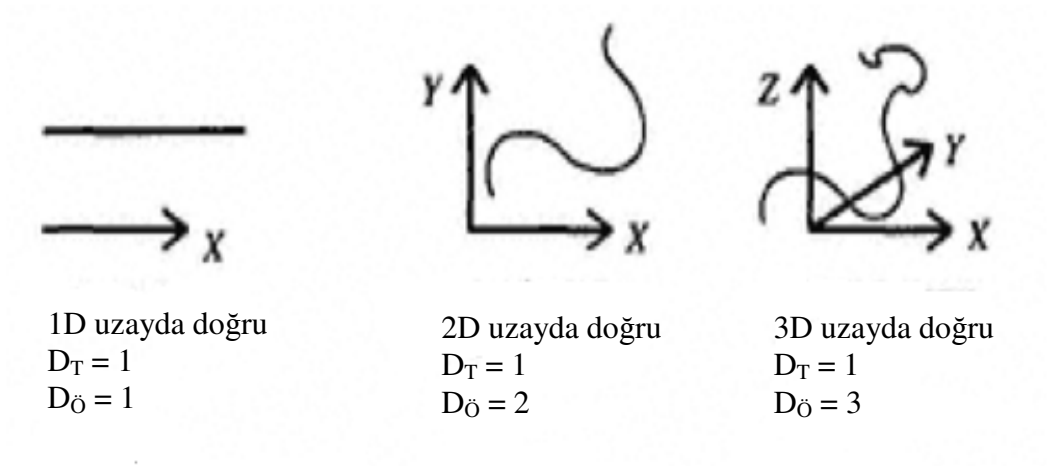
Şekil 4.5 : Lorenz Denklemi YEYK [18].

4.3 Boyutlar

Genel olarak bir objenin boyutundan bahsedildiğinde insanların aklına sıfır boyutlu 0D (noktalar), bir boyutlu 1D (doğrular), iki boyutlu 2D (yüzeyler) ve üç boyutlu 3D (hacimler) gelir. Peki daha yüksek boyutlu 4D, 5D, 6D gibi objeleri kavrayabilmek mümkün müdür? Ya da tam sayı olmayan boyuta sahip objeler mevcut mudur ve nasıl kavranabilir? Kaos varlığının kanıtlarından biri olarak kabul edilen fraktal boyuta ve ötesine geçmeden önce en basit olarak öklit boyutu, $D_{\ddot{O}}$ ve topolojik boyut D_T'den bahsetmek gerekmektedir. İki boyut tanımlaması da fraktal boyutta değildir ve tam sayı değeri alırlar [18].

Öklit boyutu en basit anlatımıyla bir objenin konumunu tanımlamak için gerekli minimum koordinat sayısıdır. Bunun yanında topolojik boyut daha karışık bir kavramdır. Matematiğin bir dalı olan topoloji, objelerin şeklini ve formunu nitel olarak tanımlar ve objelerin şekil değiştirdiğinde ana özelliklerini kaybetmediğini aynı boyutta olduğunu söyler. Örneğin düz bir çizgi ve bu çizgiden oluşturulmuş S şeklinde bir eğri topolojik olarak aynıdır [18]. Poincare topolojik boyutu şöyle tanımlar: Bir geometrik objenin topolojik boyutu bu objeyi parçalara ayırmak için kullanılan diğer geometrik objelerin topolojik boyutundan bir fazladır. Dolayısıyla

basit olarak örneklemek gerekirse, noktalar geometrik olarak başka parçalara ayrılamaz bu sebeple topolojik boyutu 0'dır. Eğrileri parçalara ayırmak için noktalar kullanılır bu sebeple $D_{T,eğri} = 1$, yüzeyleri parçalamak için eğriler kullanılır, $D_{T,yüzey} = 2$, hacimleri bölmek için eğriler kullanılır dolayısıyla $D_{T,hacim} = 3$ olarak kabul edilir. Bir başka örnek olarak üç boyutlu bir koordinat sisteminde bir eğri olduğu düşünülsün. Bu eğriyi uzayda tanımlamak için bütün koordinat değerlerinin bilinmesi gerekmektedir, bu sebeple $D_Ö = 3$'tür, bu eğriyi parçalara ayırmak için ise topolojik boyutu 0 olan noktalar kullanılması gerektiğinden eğrinin topolojik boyutu $D_T = 1$'dir. Şekil 4.6'da bir eğrinin farklı koordinatlarda oluşan öklit ve topolojik boyut farkları görülebilir.



1D uzayda doğru	2D uzayda doğru	3D uzayda doğru
$D_T = 1$	$D_T = 1$	$D_T = 1$
$D_Ö = 1$	$D_Ö = 2$	$D_Ö = 3$

Şekil 4.6 : Öklit ve Topolojik Boyut Farkları [18].

Fraktal objelerin kendine benzerlik özelliği sebebiyle, benzerlik boyutundan da bahsedilmelidir. Benzerlik boyutu ölçeklendirme ile alakalıdır. Örnek olarak her biri ε değerinde birimlere sahip bir doğru, bir yüzey ve bir hacim düşünülsün. Yani $L = 1$ uzunluğundaki doğru ε uzunluğunda N sayıda eşit birim doğrulara, $A = 1$ alanına sahip yüzey N sayıda kenar uzunluğu ε olan birim karelere, $V = 1$ hacmine sahip bir küp N sayıda kenar uzunluğu ε olan birim küplere ayrılmış olsun. Böyle bir durumda matematiksel olarak gösterim denklem (4.6)'daki gibi olacaktır.

$$L = N\varepsilon = 1 \tag{4.6a}$$

$$A = N\varepsilon^2 = 1 \tag{4.6b}$$

$$V = N\varepsilon^3 = 1 \tag{4.6c}$$

Boyuttan bağımsız genel olarak tanımlamak gerekirse benzerlik boyutu D_B (4.7)'deki halini alır.

$$N\varepsilon^{D_B} = 1, \qquad D_B = \frac{\log(N)}{\log(1/\varepsilon)} \tag{4.7}$$

Bu hesaplamalara ve daha önceden bahsedilen bilgilere göre eğri, yüzey ve hacim gibi bilinen objelerin öklit, topolojik ve benzerlik boyutları aynı değere sahiptir, $D_{Ö} = D_T = D_B$. Bu boyutlar arasındaki farklar Cantor kümesi gibi fraktal yapıya sahip bir yapı incelendiğinde ortaya çıkar. Bölüm 3.3.2'de bahsedildiği gibi Cantor kümesi [0,1] aralığında kapalı bir verinin üçte birlik kısmının çıkarılmasıyla ve bunun devamlı olarak iterasyonuyla elde edilir. Şekil 3.11'deki birinci ve ikinci iterasyon karşılaştırıldığında, ikinci iterasyonun birinci iterasyondaki yapının aynısı ve daha küçüğü iki adet kümeye sahip olduğu görülür, yani $N = 2,\ \varepsilon = 1/3$'tür. (4.7)'deki eşitliğe göre benzerlik boyutu hesabı yapılırsa $D_B = \log(2)/\log(3) = 0.6309$ olur. Cantor kümesinin benzerlik boyutu görüldüğü gibi kesirli yani fraktal boyuttadır. Cantor kümesi öklit boyutu $D_{Ö} = 1$, topolojik boyutu $D_T = 0$, ve benzerlik boyutu $D_B = 0.6309$'dur. Dolayısıyla $D_T < D_B < D_{Ö}$ olarak gösterilebilir. Bir başka açıdan bakılırsa sahip olduğu boyut değeri sebebiyle Cantor kümesi ne bir doğru ne de bir eğri olarak değil, ikisinin arasında başka bir yapı olarak görülebilir [18].

Lineer olmayan sistemlerde kaosu karakterize etmek için kullanılan çeşitli boyut türleri vardır; bunlar arasında kutu sayma boyutu, bilgi boyutu ve korelasyon boyutu sayılabilir. Bu tez kapsamında kaos tespiti için Bölüm 4.3.3.'te bahsedileceği gibi korelasyon integralleri ve korelasyon boyutu yardımıyla fraktal boyutta çekici tespiti yapılmaya çalışılacaktır.

4.3.1 Kutu-sayma boyutu ve Hausdorff boyutu

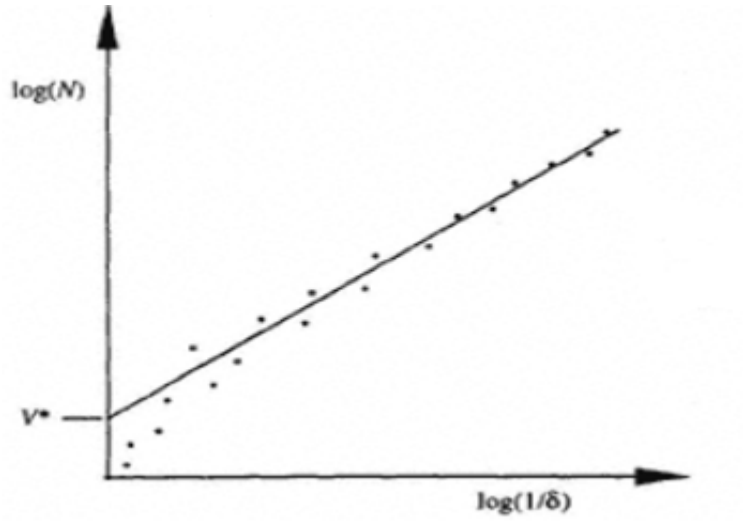
Bu noktaya kadar öklit, topolojik ve benzerlik boyutlarından bahsedildi ancak bunlar dışında fraktal boyutlar yaratan başka boyut tanımlamaları da mevcuttur. Hausdorff boyutu, D_H bunlardan biridir. Mandelbrot fraktal bir objeyi Haussdorff boyutu topolojik boyutunu geçen obje olarak tanımlamıştır. Bunun yanında kutu-sayma boyutu da Hausdorff boyutuna yakın bir tanımlamaya sahiptir. Kutu-sayma metodu bu bölümde daha detaylı olarak da bahsedileceği gibi bir objeyi tanımlamak için kaç

adet kutuya veya hiperküpe ihtiyaç olduğunu sorgularken, Hausdorff boyutunda objenin büyüklüğünün ne olduğu ve bu objenin büyüklüğünü ölçebilmek için hangi boyuta sahip hiperküplere ihtiyaç olduğu sorgulanır.

Kutu-sayma boyutu, D_{KS} matematiksel olarak tanımlaması aslında benzerlik boyutu ile aynıdır. Fraktal obje N adet, δ kenar uzunluğuna sahip hiperküple doldurulmaya çalışılır. Temel olarak formulü benzerlik boyutuyla aynıdır ve (4.8)'deki gibidir ancak iki boyut kavramı birbiriyle karıştırılmamalıdır.

$$D_{KS} = \frac{log(N)}{log(1/\delta)} \tag{4.8}$$

Benzerlik boyutu hesabı için fraktalın kendine tamamiyle benzeyen parçalarına ihtiyaç vardır, kutu-sayma boyutu için ise birbirine benzeyen kutular ile doldurulacak objenin varlığı yeterlidir. Bu sebeple kutu-sayma boyutu incelenecek fraktal objenin tipi konusunda daha büyük bir esneklik sağlar [18]. Şekil 4.7'de bir örnek görülebilir.



Şekil 4.7 : Kutu-Sayma Boyutu Hesabı [18].

4.3.2 Bilgi boyutu

Kaotik karakteri anlayabilmek için kullanılan metodlardan biri bilgi boyutu, D_i'dir. Kutu-sayma metodundakiyle aynı şekilde sistemdeki çekici kenar uzunluğu δ olan hiperküplerle kaplanır. Bilgi boyutunun kutu sayma boyutundan farkı ise şudur: kutu-sayma metodunda çekiciyi kaplayan kutuların adedi sayılırken, bilgi boyutunda çekicinin ne kadarlık kısmının bu hiperküplerle kaplandığıyla ilgilenilir. Bu sebeple

bilgi boyutunda hesaplamanın içine olasılık hesapları da katılır. Temel olarak bilgi boyutu hesabı (4.9)'daki gibi gösterilir.

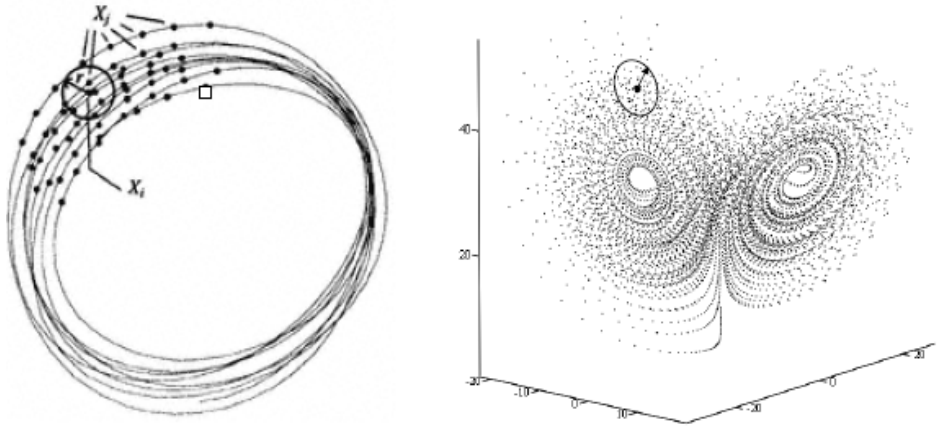
$$D_i = \lim_{\delta \to 0} \left[\frac{I(\delta)}{log(1/\delta)} \right] \tag{4.9}$$

Burada $I(\delta)$ olarak tanımlanan Shannon entropisidir. P_i değeri, çekicinin bir bölümünün, tanımlanan δ kenar uzunluklu, i sayılı hiperküple kaplanma olasılığı olarak tanımlandığında, Shannon entropisi (4.10)'daki halini alır [18].

$$I(\delta) = -\sum_{i=1}^{N} P_i \, log(P_i) \tag{4.10}$$

4.3.3 Korelasyon integrali ve boyutu

Korelasyon boyutu hesaplama olarak kutu-sayma ve bilgi boyutlarına göre görece olarak daha hızlı ve verimli olması sebebiyle kaotik analizde en çok tercih edilen yöntemdir. Faz uzayındaki eğrilerin birbirleriyle kesişmemeleri, bu eğrilerin uzayda çekiciler etrafında sürekli olarak boşlukları doldurmalarına neden olur. Korelasyon integrali hesaplaması, bu boşlukları dolduran eğriler üzerindeki noktalarda farklı boyutlarda belirlenen hiperkürelerin içerisine giren nokta sayısına dayanır. Geometrik olarak korelasyon integralini anlamak, matematiksel olarak anlamakta çok faydalı olacaktır. Şekil 4.8'de görünen şekiller bu konuda yardımcı olacaktır.



Şekil 4.8 : Korelasyon İntegrali Geometrik Gösterimi [18-19].

Şekillerde de görülebildiği gibi *r* çapa sahip bir hiperküre çekici etrafındaki yörüngelere yerleştirilir. Faz uzayında her bir noktanın tam yerini belirlemek için gömme boyutu sayısına bağlı sayıda koordinat sayısına ihtiyaç vardır. Örneğin

konumları S_i ve S_j olan iki nokta arasındaki mesafe 3D uzayda tanımlanmak istenirse iki noktanın $S_i = (x_i, y_i, z_i)$ ve $S_j = (x_j, y_j, z_j)$ koordinatlarına ihtiyaç olur. Korelasyon integrali hesaplamasında, N adet eleman sayısına ve *r* çapına sahip hiperküreler çekici etrafındaki her noktanın ayrı ayrı merkezine oturtulur ve bu *r* mesafesi içerisinde faz yörüngeleri üzerinde kaç nokta olduğu sayılır. Bu işlem farklı gömme boyutları için tekrarlanır yani her boyut için farklı *r* değerlerine göre korelasyon integrali hesaplaması yapılır. Hiperküre merkezindeki S_i noktası ile dışarıdaki herhangi bir S_j noktası arasındaki mesafe $\|(S_i - S_j)\|$ olarak hesaplanır. $(r - \|(S_i - S_j)\|)$ hesaplaması ise bu mesafenin hiperküre yarıçapından vektörel olarak büyük olup olmadığını gösterir. Eğer mesafe *r* yarıçapından büyükse noktası hiperküre dışarısında kalmış demektir dolayısıyla hesaplamaya dahil edilmez. Burada ilgilenen mesafenin değerinin ne olduğu değil, noktanın hiperküre içerisinde olup olmadığıdır. Bu nedenle matematiksel olarak bu işlemi gerçekleştirebilmek için Heaviside basamak fonksiyonu, Θ kullanılır. Heaviside fonksiyonu içerisindeki değer 0'dan küçük veya 0'a eşit olduğunda 0 değerini, 0'dan büyük olduğunda ise 1 değerini verir. Eşitlik (4.11)'de görülebilir.

$$\Theta(x) = 0, x \leq 0\,;\ \Theta(x) = 1, x > 0 \tag{4.11}$$

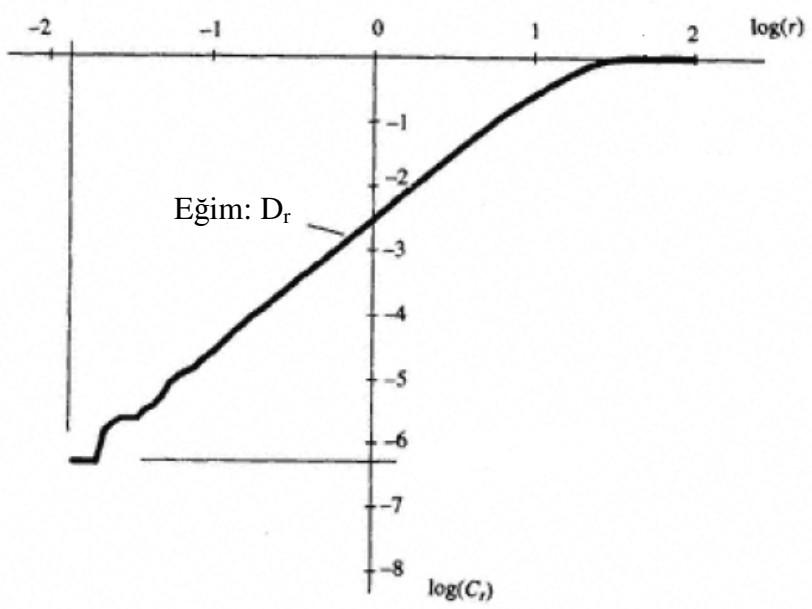
Bu fonksiyon yoluyla hiperküre içerisinde kaç nokta olduğu tam olarak sayılabilir. Korelasyon integrali, C_r hesaplaması bu açıklamalar dahilinde (4.12)'deki şeklini alır.

$$C_r = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1, J \neq i}^{N} \Theta(r - \|(S_i - S_j)\|) \tag{4.12}$$

Korelasyon integrali değerinin alabileceği en yüksek değer 1'dir. Bu değer hiperkürenin çapı, çekicinin en büyük çapından daha büyük bir değer aldığında ortaya çıkar diğer bir deyişle hiperküre bütün çekiciyi kapsamış, bütün noktalar küre içerisinde demektir. Alabileceği en düşük değer ise $2/[N(N-1)]$'dir. Bu durum çember içerisinde bir adet komşu olduğunda ortaya çıkar, korelasyon toplamı en yakın komşuyu iki defa sayar, pay kısmında bulunan 2 değerinin sebebi budur [18].

Korelasyon boyutu hesaplaması, korelasyon integrali aracılığıyla yapılır. Korelasyon boyutu, D_r hiperküre hacmi *r* ve korelasyon integrali C_r ile orantılıdır. Aralarındaki

ilişki $C_r \propto r^{D_r}$ olarak gösterilebilir. Bu eşitlikten korelasyon boyutunun *log(r)* – *log(C_r)* grafiğindeki eğimden hesaplanabildiği gerçeği ortaya çıkmaktadır. Korelasyon integrali ve boyutunun ne anlam ifade ettiği Şekil 4.9'da görülebilmektedir.



Şekil 4.9 : Lorenz Çekicisi - Korelasyon İntegrali ve Boyutu [18]

Korelasyon integrali ve boyutu bu tez kapsamında analizlerin pek çok bölümünde kullanılmıştır. Bölüm 5'te anlatılacağı gibi gürültü giderimi sonrası, ne kadar azaltıldığını hesaplama noktasında korelasyon boyutu kullanılmış ayrıca korelasyon integrali grafikleri gürültü seviyesini anlayabilmek açısından görsel olarak da incelenmiştir. Bunun yanında daha da önemli olarak; çekici boyutunun fraktal yapıda olduğunu gösterebilmek adına korelasyon integrallerinden her gömme boyutu için korelasyon boyutu hesabı yapılmış ve çekici boyutu belirlenmiştir.

4.3.4 Noktasal boyut

Noktasal boyut, D_P temel olarak korelasyon boyutu hesabıyla direkt olarak alakalıdır. Adından anlaşılacağı gibi odak yeri bir noktadır, korelasyon integrali bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi bir bütün olarak tüm noktaların birbirleri arasındaki mesafeye bağlı kalarak bir sonuç çıkarırken, noktasal boyut çekici üzerindeki spesifik bir noktanın diğer noktalara mesafesini göz önüne alır. Yani belirlenen bu nokta çevresinde farklı *r* çapında hiperküreler içerisine kaç nokta girdiği hesaplanır

ve bunun için yine Heaviside basamak fonksiyonu kullanılır. Seçilen noktanın etrafındaki komşu noktası sayısı P_r eşitlik (4.13)'teki gibi hesaplanır.

$$P_r = \frac{1}{(N-1)} \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \Theta(r - \|S_i - S_j\|) \tag{4.13}$$

Aynı korelasyon integrali ve boyutu ilişkisi gibi P_r değeri noktasal boyut D_P ve r ile orantılıdır, yani $P_r \propto r^{D_P}$olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla noktasal boyut, D_P değeri $log(r) - log(P_r)$ grafiğindeki eğimden hesaplanabilmektedir.

5. ZAMAN SERİSİNDE GÜRÜLTÜ AZALTIMI VE ÖNGÖRÜ

Fiziksel olaylardan kaynaklanan bütün zaman serileri doğası gereği gürültü içermektedir. Gürültü, sistemin dinamiklerinin farklı bir şekilde algılanmasına sebep olabileceği için zaman serisi içerisinde istenmeyen bir veridir. Sistem dinamiklerini farklı göstermesi bu tez kapsamında yapılacak kaotik analiz için sorun teşkil etmekte aynı zamanda ileriye dönük tahmin çalışmasında başarı oranının düşmesine sebep verebilmektedir. Bu bölümde dinamik sistemlerde mevcut olabilecek gürültü tiplerinden, bunların nasıl giderilebileceği ve giderilen gürültünün nasıl kontrol edileceğinden sonrasında ise sadece zaman serisinden ileriye dönük tahmin çalışmasının nasıl yapılacağından bahsedilecektir.

Zaman serisi içerinde gürültünün varlığından bahsedildiğinde bunun ne çeşit bir gürültü olduğunu ayırt etmek gerekmektedir. Gürültü iki tipte görülebilir; ölçüm gürültüsü ve dinamik gürültü. Ölçüm gürültüsü isminden de anlaşılabileceği gibi sistemin dinamikleriyle hiç bir ilgisi olmayan ve ölçüm cihazının ve prosesinin kendisiyle alakalı bir durumdur. Bu çalışmada elektrik enerjisi birim fiyatları gibi finansal bir veri inceleneceği için ölçüm hatası mevcut değildir, bu tipte seriler için önemli olan dinamik gürültüdür. Çalışılan konu eğer kalp ritmiyle alakalı olan bir EKG ölçümü olsaydı, bu noktada ölçüm hatasından da bahsedilebilirdi.

Öncelikli olarak yapılması gereken her ne kadar gürültünün var olduğu tahmin edilse de bunu bazı parametreler yardımıyla kanıtlamaktır. Bu konuda uygulanabilecek farklı yöntemler mevcuttur ve genellikle görsel yolla tespit kullanan yöntemlerdir. Faz uzayı çizildiğinde çekici varlığı kendini net bir şekilde belli etmiyorsa ve kendine benzerlik ilkesi tespit edilemiyorsa ve birbirine yakın olan yörüngeler birbirinden üstel olarak değil dağınık bir şekilde ayrılıyorsa ilk aşamada bu tespitler gürültü varlığı için önemli kanıtlar olarak görülebilir. Bunun yanında görsel incelemeye ek olarak, öngörü başarısı hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın belli bir seviyeyi geçmiyorsa bu da gürültü varlığı için bir kanıt olarak görülebilir. Gürültü varlığı öngörü başarısını ciddi oranda etkileyebilen bir parametredir çünkü ilerleyen bölümlerde de bahsedileceği gibi çoğu yöntem zamanda ve faz uzayında birbirine

yakın noktaların bir sonraki adımda hangi noktaya vardıklarına dayanır. Gürültü olması durumunda, bir sonraki adım gerçekçi olmayan bir noktaya gittiğinde tahmin için problem yaratır. Bu sebeple tahmin çalışması yapılmadan önce deterministik sinyali gürültü sinyalinden ayırmak gerekmektedir. Literatürde gürültü azaltımı için kullanılan pek çok yöntem mevcuttur. Kalman filtresi, Wiener filtresi, hareketli ortalamalar, lineer olmayan filtreler, dalgacık dönüşümü, basit lineer olmayan gürültü azaltma yöntemi, gradyen düşüşü yöntemi ve lokal izdüşüm yöntemi bazı örnekler olarak gösterilebilir. Bu çalışma kapsamında basit lineer olmayan gürültü azaltma yöntemi, gradyen düşüşü ile gürültü azaltma yöntemi ve lokal izdüşüm gürültü azaltma yöntemi anlatılacaktır. Analizlerde ise literatürde lineer olmayan zaman serilerinde en iyi sonucu verdiği görüldüğü için lokal izdüşüm yöntemi kullanılmış bu yöntemde farklı iterasyonlar ile sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1 Basit Lineer Olmayan Gürültü Azaltımı

Gürültü azaltımı temel olarak öngörü ile aynı mantığa dayanmaktadır. Zaman serisindeki verileri kullanarak ileriye dönük tahmin yapmak yerine, yine zaman serisi verilerini kullanarak gürültülü olan noktalar daha iyi değerlerle değiştirilir yani konsept çok benzerdir. Ancak önemli bir fark da mevcuttur, tahmin için doğal olarak sadece tahmin başlangıç noktasının gerisindeki değerler kullanılırken gürültü azaltımı için gürültüye sahip verinin öncesi ve sonrası analizde kullanılabilir. Bu da gürültü azaltımının doğruluğu için bir avantaj teşkil eder.

Zaman serisindeki gerçek değerler s_n olsun, bu durumda s_n değeri, deterministik sinyalden kaynaklanan x_n ve gürültü sinyali η_n'nin toplamı olacaktır. Deterministik sinyale ait s_n noktası ise bir f fonksiyonu ile kendinden önceki verilerle bağlantılıdır. Matematiksel olarak bu özet eşitlik 5.1'de görülebilmektedir.

$$s_n = x_n + \eta_n \,, \quad x_n = f(x_{n-m}, \dots, x_{n-1}) \tag{5.1}$$

Burada η_n gürültü sinyalinin, gerçek seriyle hiç bir ilgisi ve hiç bir korelasyonu mevcut değildir. Gürültü genliği $\sigma = \sqrt{(\eta)^2}$ olarak gösterilebilir. Gürültü azaltımında hedeflenen, formülasyondan da anlaşılabileceği gibi s_n değerini x_n değerine mümkün olan en iyi şekilde yaklaştırmaktır. En basit şekilde yapılabilecek, seriyi gürültüden arındırabilmek için ölçüm değerlerini tahmin değerleriyle değiştirmektir. Daha güvenilir bir yöntem olarak gürültülü ölçüm değerleriyle tahmin

değerleri arasında lineer bir kombinasyon kurulabilir ancak bu işlem kaotik sistemlerde pek faydalı olmaz. Bunu sebebi tahmin yapılmaya çalışılan noktanın yine gürültüye sahip ölçüm değerlerine dayanmasıdır ve kaotik sistemlerin doğası gereği bu hata payını oldukça yükseltecek ve serinin gerçekçiliğini bozacaktır.

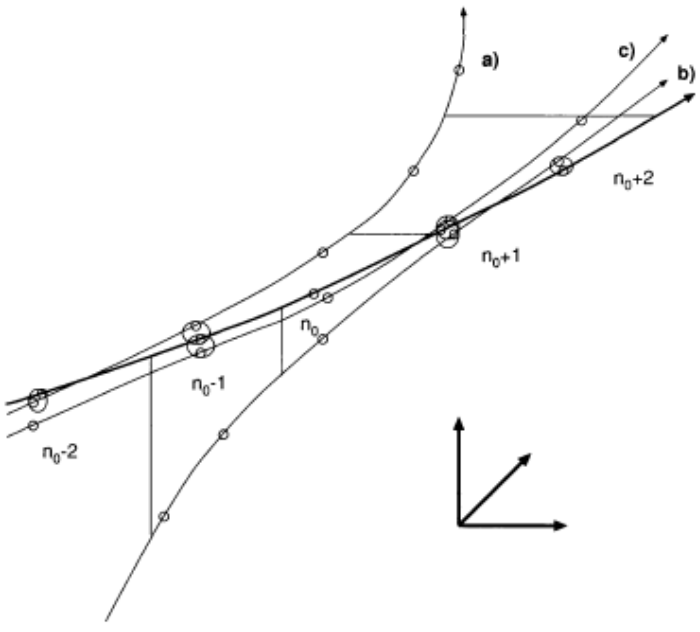
Bu noktada kullanılabilecek en iyi yöntem şudur, eşitlik (5.1) baz alındığında aşağıdaki (5.2) denklemi ortaya çıkar [28].

$$x_n - f(x_{(n-m)}, \dots, x_{(n-1)}) = 0 \tag{5.2}$$

Seri içerisinde orta bir nokta alındığında ki bu orta nokta $x_{n-m/2}$ olsun. Bu noktada doğal haliyle f fonksiyonu bilinmemektedir, bir yaklaşım uygulayabilmek için f fonksiyonu lokal sabit bir fonksiyon olarak düşünülsün. $x_{n_0-m/2}$ yerine $\hat{x}_{n_0-m/2}$ değerini tahmin edebilmek için s_{n_0}'a yakın olan $s_n = f(s_{n-m+1}, \dots, s_n)$ gecikmeli vektörleri oluşturulur. Bu durumda $s_{n-m/2}$ ortalama değeri temizlenmiş $x_{n_0-m/2}$ değeri yerine kullanılır. $U_\varepsilon(s_{n_0})$ değeri s_{n_0} çevresindeki alınan nokta sayısını temsil ederken, denklem eşitlik (5.3)'te görülebilmektedir [28].

$$\hat{x}_{n_0-m/2} = \frac{1}{\left|U_\varepsilon(s_{n_0})\right|} \sum_{s_n \in U_\varepsilon(s_{n_0})} s_{n-m/2} \tag{5.3}$$

Bu işlem aynı zamanda görsel olarak Şekil 5.1'de görülebilir.



Şekil 5.1 : Basit Lineer Olmayan Gürültü Azaltımı [28].

5.2 Gradyen Düşüşü Yöntemi ile Gürültü Azaltma

Bölüm 5.1'de bahsedildiği gibi gürültü azaltımı için f fonksiyonuna bir yaklaşım getirmek gerekmektedir. Basit lineer olmayan gürültü azaltımında f fonksiyonu lokal sabit bir fonksiyon olarak düşünülmüştü, şimdi de bu fonksiyonu çok iyi bir yaklaşım yapıldığını farzederek $\hat{f}$ fonksiyonunun var olduğu düşünülsün. Bu durumda denklem eşitlik (5.4)'teki gibi olur.

$$\hat{x}_n = \hat{f}(x_{n-m}, \dots, x_n) + \acute{\eta}_n \tag{5.4}$$

Bu eşitlikte $\acute{\eta}_n$ değeri yaklaşım yapılan $\hat{f}$ fonksiyonu içerisinde kalan gürültüyü temsil etmektedir. Bu değer orijinal gürültü değeri η değerinden daha düşük seviyede olacaktır. Bu noktada amaçlanan gürültü azaltımını en iyi şekilde yapabilmek için bu değerin sıfır olması gerekmektedir. $\acute{\eta}_n$ değeri sıfır kabul edildiğinde $\hat{x}_n$ değerinin sayısal olarak çözümlenmesi gerekmektedir ve kaotik sistemlerde bu işlem çok zordur. Bu sebeple bu yöntemde başka bir yol izlenmektedir [28].

Daha gerçekçi olan, $\acute{\eta}_n$ değerini sıfırlamak yerine karesel ortalama hatalarının karekökünü minimize etmektir. Denklem (5.5)'teki halini alır.

$$e^2 = \sum_{n=0}^{N} \acute{\eta}_n{}^2 = \sum_{n=0}^{N} (\hat{x}_n - \hat{f}(\acute{x}_{n-1}))^2 \tag{5.5}$$

Bu denklemi çözmenin en kolay yolu gradyen düşüşünü kullanmaktır. Eşitlik (5.6)'daki gibi olur.

$$\hat{x}_n = s_n - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial e^2}{\partial s_n}$$

$$= (1-\alpha)s_n + \alpha\left[\hat{f}(s_{n-1}) + \hat{f}'(s_n)(s_{n+1} - \hat{f}(s_n))\right] \tag{5.6}$$

Bahsedildiği gibi bu yöntem sistem dinamiklerine güzel bir yaklaşım kullanıldığında mümkün olmaktadır. Ancak mevcut gürültü bu imkanı kısıtlamaktadır. Bu yönteme kıyasla lokal izdüşüm yöntemi daha güvenilir ve doğru sonuçlar vermektedir. Bahsedilen sebeplerden dolayı bu tez kapsamında gürültü azaltımı için lokal izdüşüm yöntemi kullanılmıştır ve detayları Bölüm 5.3'te verilmiştir.

5.3 Lokal İzdüşüm Yöntemi ile Gürültü Azaltımı

Bu gürültü azaltımı yöntemi literatüre Avusturyalı istatistik ve fizikçi Peter Grassberger tarafından kazandırılmıştır. Daha önce bahsedilen iki metoda göre daha sofistike bir yöntem olarak görülmektedir. Temel olarak bu yöntem zaman serisinin görece olarak düşük boyuta sahip bir dinamik sistem ve yüksek boyuta veya rastsal bir düzene sahip gürültüden oluştuğu gerçeğine dayanır. Gürültünün etkisiyle veri düşük boyutlu manifolddan daha yüksek boyuta geçiş yapmaktadır. Yöntemin amacı da bu düşük boyutlu manifoldu tespit etmek ve verinin bu manifold üzerine izdüşümünü almaktır, bu şekilde gürültüden kurtulmak amaçlanmaktadır [31].

Bu işlem yapılırken en büyük problem seride gürültü olması sebebiyle gömme boyutu değerinin tam olarak tespit edilememesidir. Eğer bu işlemde gömme boyutu *m,* olması gerekenden daha yüksek seçilirse, gözlemlenen değerler referans noktanın çevresinde küçük bir alanda yaklaşık olarak lineer ilişkiler sergileyen daha düşük boyut değerine sahip *d* boyutlu bir manifolda indirgenebilir. Dolayısıyla gözlemlenen her değerin $q=m-d$ boyutuna sahip parçaları bu izdüşüm yoluyla sıfırlanarak *d* boyutuna indirgenir [32].

Grassberger bu yöntemde izdüşümün, gözlemlenen her değerin ortadaki koordinatlarında yapılması gerektiğini savunmuştur. Örneğin $m=3$ olduğunda sadece orta noktadaki tek değerde izdüşüm alınmalı, $m=7$ olduğunda ilk ve son iki gözlem değerine dokunulmamlı sadece ortadaki üç noktada blok olarak izdüşüm yapılmalıdır. Başlangıç koşullarına hassas bağlı olma ilkesi sebebiyle son gözlem değerlerinin koordinatlarındaki büyük değişiklikler ileriki aşamalarda hata payını arttırabilecektir. Aynı şekilde ilk gözlem değerlerindeki değişiklikler zamanda geriye doğru benzer bir problem yaşatacaktır. Bu yöntem zaman serisinde geçmiş ve gelecek değerleri inceleyerek aradaki orta değerleri buna göre düzenleme esasına dayanır. Her gözlemin tam orta noktası düzeltilirse bu yöntem Bölüm 5.1'de anlatılan basit lineer olmayan gürültü azaltımı ile çok benzer bir hale gelir [32]. Bahsedildiği gibi daha sofistike bir yöntem olması sebebiyle tez kapsamında bu yöntem uygulamaya alınmıştır.

Kaotik sistemlerde gömme teorisine göre eğer gömme boyutu yeteri kadar büyükse gerçek sistemi birebir temsil eden bir çekici gömme uzayında bulunmaktadır. Bunun diğer anlamı, eğer sistem gürültü içermiyorsa her s_n vektörü gömme uzayı içerisinde

bir $\widetilde{M}$ manifoldu içerisinde bulunur. Ancak gerçekçi olan doğal olarak bu değildir. Gürültü varlığı sebebiyle her s_n için θ_n düzeltmesi uygulanmak zorundadır. θ_n, $\widetilde{M}$ manifolduna dik olacak şekilde $s_n - \theta_n \in \widetilde{M}$ haline getirilir. Bu tablo, vektörler $\widetilde{M}$ manifoldundan daha yüksek boyuta gömüldüğünde gerçekleşmektedir, aksi takdirde işlem yapılamaz. Dikeylik kavramı dendiğinde akla Öklit metriklerini kullanmak gelebilir ancak bu kaotik sistemlerde en iyi seçim değildir. Bunun sebebi ise vektörlerin geçici bir bilgiye sahip olmasıdır. İki vektörün orta noktaları birbirine yakınken, ilk veya son kısımları birbirinden çok uzakta olabilir. Bunun sebebi yörüngelerin pozitif Lyapunov üsteli varlığı sebebiyle birbirinden hızla ayrılabiliyor olmasıdır. Yukarıda bahsedilen ilk ve son kısımlar yerine orta noktaların düzeltilmesinin temelinde bu sebep yatar. Bu durumu tanımlayabilmek için bir P tensörü yaratılsın ve tanımlaması (5.7)'deki gibi olsun.

$$P_{i,j} = \begin{cases} 1: i = j \; ve \; 1 < i,j < m \\ 0: \qquad diğer \end{cases} \tag{5.7}$$

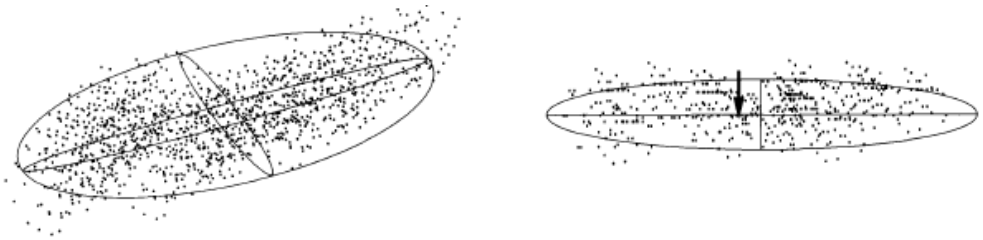
Burada m gömme boyutudur ve bahsedilen sebeplerden dolayı yüksek boyutta seçilmelidir. Bu noktada a_n^i, $\widetilde{M}$ manifoldunun $s_n - \theta_n$ noktasında normal vektörleri olacak şekilde (5.8) ve (5.9)'da belirtilen koşullarla (5.10)'da belirtilen minimizasyon problemi çözülmek zorunda kalır [33].

$$a_n^i(s_n - \theta_n) + b_n^i = 0, \quad i = q+1, \dots, m \tag{5.8}$$

$$a_n^i P a_n^j = \delta_{ij} \tag{5.9}$$

$$\sum_i (\theta_i P^{-1} \theta_i) = min \tag{5.10}$$

Lokal izdüşüm yöntemi ile gürültü azaltımının görsel olarak anlatımı Şekil 5.2'de görülebilir. Bunu sayfada anlatabilmek için şöyle bir yöntem izlenmiştir. İki boyutlu bir yüzeyde bulunan noktalar kümesi düşünülsün ve gürültünün etkisiyle bu noktalar üçüncü boyuta fırlamış kabul edilsin. Bir yaklaşım olarak nokta dağılımı bir elipsoid ile temsil edilirse, iki boyutlu elips yüzeyine indirgenir ve gürültü bu şekilde giderilmiş olur. Her gürültü giderimi yönteminde olduğu gibi burada en önemli nokta gürültü azaltımını doğru yaparak serinin gerçek değerlerini yok etmemektir.



Şekil 5.2 : Lokal İzdüşüm Yöntemi ile Gürültü Azaltımı Görseli [28].

5.4 Ne Kadar Gürültü Giderildiğinin Tespiti

Gürültü azaltımı yukarıda belirtilen yöntemlerden biriyle yapıldıktan sonra incelenmesi gereken nokta gürültünün ne kadar giderildiğidir. Gürültü genliğinin ne mertebeden hangi mertebeye düştüğünün anlaşılması gerekmektedir. Bu tespit için kullanılabilecek iki yöntem mevcuttur. Bunlardan ilki her gömme boyutu için çizdirilen korelasyon integrallerinin görsel olarak incelenmesidir. İkincisi ise daha sayısal bir yöntem olarak farklı gömme boyutlarında korelasyon boyutu farklarını ortaya çıkararak bir gürültü genliği hesabı yapmaktır. Aslında bahsedilen yöntemlerin ikisi de birbirleriyle ilişkilidir sebebi ise korelasyon integrali ile korelasyon boyutu değerlerinin birbirine bağlı olmasıdır.

Zaman serisinde mevcut olan gürültü faz uzayı kurulduğunda da noktalar halinde orada mevcut olacaktır. Bu gürültü faz uzayındaki çekicinin boyutunu da arttıracak ve çok yüksek olması durumunda çekici boyutunu gömme boyutuna eşit hale getirecektir. Bölüm 4.3.3'te bahsedildiği gibi korelasyon boyutu değeri, korelasyon integrali ve vektörel uzaklık değerinin logaritmik ölçekte grafiğindeki eğimden yani $log(\varepsilon) - log(C_\varepsilon)$ grafiğinden hesaplanmaktadır. Gürültü seviyesinin seride yüksek olması korelasyon integrali değerlerinin eğimini yükseltecek; en kötü koşulda, hesaplanan boyut gömme boyutuna eşit hale gelecektir. Gürültü seviyesinin iyi bir şekilde giderilip giderilmediği görsel olarak korelasyon integrallerinin eğimine ve aynı zamanda artan gömme boyutlarında lineer doğru şekline ne kadar yakın olduğuna bakılarak farkedilebilir. Bu karşılaştırma uygulama esnasında Bölüm 6'da da gösterilecektir.

Bunun yanında daha objektif bir veri olarak farklı gömme boyutlarından korelasyon boyutları arasındaki farklar kullanılabilmektedir. Aslında bu yöntem de subjektif bir değerlendirme bölümü içermektedir. Daha detaylı anlatabilmek için örnek olarak gömme boyutu *m* olan bir sistem alınsın. Gömme boyutu *m* ve *m-1* için hesaplanan

korelasyon integralleri *C(m,ε)* ve *C(m-1,ε)* karşılaştırılmak istendiğinde sistemde hiç gürültü olmaması halinde iki boyuta ait integral eğrileri sabit bir farkla ilerlemek durumunda kalacaktır. Oluşacak sabit fark ise boyutlar arası lokal genişleme oranına bağlıdır ve bu da korelasyon entropisi ile ilgilidir. Ancak gerçekte sistemde gürültü mevcut olduğundan *m* boyutundaki korelasyon integrali değeri, *m-1* boyuttaki korelasyon integrali ve sistemdeki gürültü bir boyutlu bir seri olarak düşünüldüğünde bu serinin oluşan korelasyon integrali ile doğru orantılıdır. Matematiksel olarak eşitlik (5.11)'deki ifade edilebilir [18].

$$C(m,\varepsilon) \propto C(m-1,\varepsilon) * (C_{gürültü}(\varepsilon)) \tag{5.11}$$

$C_{gürültü}(\varepsilon)$ değeri gürültünün bir boyuttaki dağılımının korelasyon integrali değeridir. Genellikle Gauss dağılımına uyan gürültü için korelasyon integrali eşitlik (5.12)'deki gibi ifade edilir ve σ ile belirtilen gürültü genliğidir.

$$C_{gürültü}(\varepsilon) \propto \mathrm{erf}(\frac{\varepsilon}{2\sigma^2}) \tag{5.12}$$

Korelasyon integralleri için belirtilen eşitlik (5.11)'den korelasyon boyutuna geçmek $D(m,\varepsilon) = \partial \ln(C(m,\varepsilon))/\partial \ln(\varepsilon)$ eşitliğiyle mümkün olmaktadır. Bu eşitlik (5.11)'e uygulandığında korelasyon boyutlarındaki karşılaştırma eşitlik (5.13)'teki gibi olur.

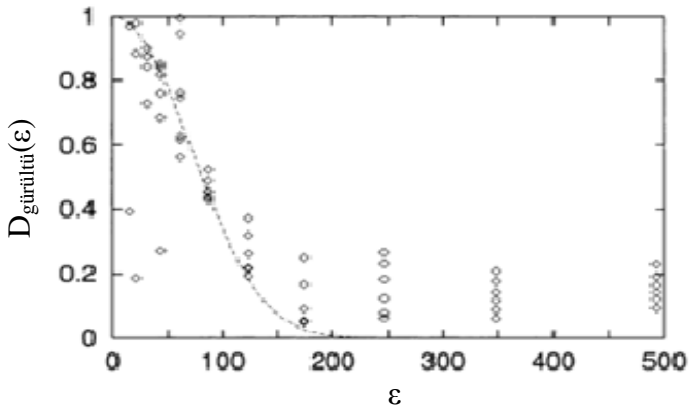
$$D(m,\varepsilon) = D(m-1,\varepsilon) + D_{gürültü}(\varepsilon) \tag{5.13}$$

Son durumda Gauss dağılımına uyan gürültü için gürültü boyutu eşitlik (5.14)'teki halini alır [28].

$$D_{gürültü}(\varepsilon) = \frac{\varepsilon \exp(-\frac{\varepsilon^2}{4\sigma^2})}{\sigma\sqrt{\pi}\mathrm{erf}(\frac{\varepsilon}{2\sigma})} \tag{5.14}$$

Özetle gürültü genliğini belirleyebilmek için bu tez kapsamında farklı gömme boyutları için hesaplanan korelasyon boyutları belirlenecek, boyutlar arasındaki farkları çıkartılarak grafiksel olarak gösterilecek, bu fark değerlerinden oluşan grafiğin hangi gürültü genliği ile uyumlu olduğuna bakılacaktır. Bu çalışmada beklenen sistemde gürültü azaltımı yapılmadan önce yüksek bir gürültü genliği yani ε yatay ekseninde daha yayılmış bir boyut grafiği görmek, gürültü azaltımı yapıldıktan

sonra ise fark değerlerinin küçük bir ε alanına sıkışmış olduğunu görmektir. Görsel olarak dağılımın nasıl olduğu Şekil 5.3'te görülebilir.



Şekil 5.3 : Gauss Dağılımına Uyan Gürültü Boyutu Grafiği [28].

5.5 Kaotik Zaman Serilerinde Öngörü

Bölüm 5'de bahsedildiği gibi zaman serilerinde öngörü mantığı gürültü giderimi mantığıyla çok benzemektedir. Gürültü gideriminde avantaj belirlenen bir noktanın ilerisini ve gerisini aynı anda hesaba katabiliyor olmaktır ancak öngörüde bu mümkün değildir. Çünkü öngörüde amaçlanan eldeki zaman serisini belli bir noktaya kadar kullanarak sonrasını tahmin etmektir, dolayısıyla son noktanın ilerisi hesaba dahil edilememektedir. Zaman serilerinde öngörü için kullanılan pek çok yöntem mevcuttur. Otoregresif modeller, otoregresif hareketli ortalama yöntemi, yapay sinir ağları, lineer olmayan filtereler, basit lineer olmayan öngörü yöntemi, lokal lineer haritalar yöntemi bunlardan sadece bazılarıdır. Bu çalışma kapsamında basit lineer olmayan öngörü yöntemi ve lokal lineer haritalar yönteminden bahsedilecektir. Basit lineer olmayan öngörü yönteminin mantığı tamamiyle Bölüm 5.1'de anlatılan basit lineer olmayan gürültü azaltımı ile aynı olduğundan bunun detayına girilmeyecektir. Lokal lineer haritalar yöntemi detayları ise Bölüm 5.5.1'de verilmiştir.

5.5.1 Lokal lineer haritalar yöntemi ile öngörü

Lokal yöntemler adından da anlaşılacağı gibi global yöntemlerin aksine seriyi bölge bölge lokal olarak inceleyerek sonuca giden yöntemlerdir. Zaman serisi yeteri kadar büyük ve detaylı ve gürültü seviyesi düşük ise çok iyi derecede tahmin başarısı verebilmektedirler. Lokal lineer haritalar yöntemini anlatmadan önce bir miktar lineer filtrelerden biri olan otoregresif (AR) modellerden bahsetmek gerekmektedir.

AR modeline göre mevcut veri, geçmişteki verinin lineer kombinasyonundan ve ek olarak gürültü değerinden oluşur, eşitlik (5.15)'teki halini alır [28].

$$x_n = \sum_{j=1}^{M_{AR}} a_j x_{n-j} + \eta_n \tag{5.15}$$

AR modelinde olduğu gibi global dinamikleri kapsayan tek bir model üretmek yerine yeni bir lokal model ile her bir nokta için kendi içerisinde bir tahmin yapılabilir. Bu eşitlik (5.16)'daki gibi gösterilebilir [28].

$$\hat{s}_{n+1} = A^{(n)}(s_n) + b^{(n)} \tag{5.16}$$

Bu noktada parantez içerisindeki n, *(n)* terimi daha önce bölüm 5.1'de de bahsedilen komşu noktalar alanını temsil etmektedir. Lokal alanda olması gereken lineer denklem, belirlenen komşu alandaki noktaların çizilen lineer doğruya göre karesel ortalama hatanın karekökü hesaplanarak belirlenir. Bu denklem belirlendikten sonra (5.16)'daki denklem adımı takip edilerek bir sonraki adım tahmin edilmeye çalışılır. Dolayısıyla bu komşu alanını vektörel olarak belirlemek veya minimum komşu sayısını belirleyerek bir alan yaratmak öngörü için atılması gereken önemli bir adımdır. Belirlenen alandaki komşu sayısı faz uzayı parametrelerine de bağlı olduğundan, gömme boyutu ve zaman gecikmesini de doğru kullanmak son derece önem teşkil eder.

Özetle bu yöntemde amaçlanan lokal bir alanda hatanın minimize edildiği bir lineer denklem oluşturmak ve bunu bir sonraki adım için kullanmaktır. Zamanda birbirine yakın olan noktalar faz uzayında da birbirine yakındır. Faz uzayı yeniden oluşturulurken zaten zaman gecikmesi ve gömme boyutu parametreleri belirlenmiştir. Minimum komşu sayısı veya alanı da belirlendikten bu alanda birbirine zamanda ve faz uzayında yakın olan noktaları en düşük hatayla temsil edecek lineer bir harita çıkarılır ve bu lineer harita komşu alanının merkezinde bulunan noktanın bir sonraki adımını tahmin etmek için kullanılır. Basit lineer olmayan öngörü yönteminde ise daha önceden de bahsedildiği gibi bir sonraki noktayı tahmin edebilmek için bu komşu alanı içerisinde bir ortalama hesabı yapılır. Gömme boyutunun yüksek olduğu durumlar için güzel sonuçlar vermektedir. Ancak tahmin edilebileceği gibi belli alanda ortalama almak öngörüyü belli bir süre sonra periyodik hale getirecek bu da gerçekçiliğini yitirmesine sebep olacaktır.

5.5.2 Öngörü başarısını değerlendirme

Bu tez kapsamında yapılan öngörünün başarısını belirleyebilmek için üç adet temel istatistik kriteri tercih edimiştir. İstatistik kriterleri Karesel Ortalama Hatanın Karekökü (RMSE), Normalize Edilmiş Karesel Ortalamanın Karekökü (NRMSE) ve Korelasyon Katsayısı (R^2) olarak belirlenmiştir. Başarı sonuçları iki farklı yöntemle yapılan öngörülerde karşılaştırmalı olarak gösterimiştir. Karesel Ortalama Hatanın Karekökü adından da anlaşılacağı üzere gerçek değerler ile öngörü değerleri arasındaki sayısal farkların karelerinin toplamının karekökü olarak ifade edilir. Öngörülen değerin gerçek değerden yüksek ya da düşük olmasını incelemez; bu kriter hatanın karesi alınarak bertaraf edilir. Önemli olan öngörünün gerçek noktadan ne kadar uzakta olduğudur. Her zaman pozitif değere sahiptir, alabileceği en iyi değer 0'dır. Hesaplanan RMSE değeri 0 değerinden ne kadar yüksekse öngörü başarısı o kadar düşük demektir. Eşitlik (5.17)'deki gibi ifade edilir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_{i,gerçek} - X_{i,öngörü})}{N}} \tag{5.17}$$

Normalize Edilmiş Karesel Ortalamanın Karekökü, NRMSE ise RMSE'nin boyutsuz hale getirilmiş halidir. NRMSE hata değerlerini karşılaştırabilmek için daha uygun bir kriterdir. Temel olarak iki farklı yöntemle RMSE boyutsuz hale getirilebilir. Birinci yaklaşım olarak RMSE, öngörü yapılan bütün serideki en yüksek gerçek değer ile en düşük gerçek değer arasındaki fark değerine bölünebilir. İkinci yaklaşım ise RMSE değerini serideki gerçek değerlerin ortalamasına bölmektir. Bu tez kapsamında ikinci yaklaşım kullanılmıştır. Eşitlik (5.18)'deki gibi ifade edilebilir.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{X_g}} \tag{5.18}$$

Yine boyutsuz kriterlerden biri olan korelasyon katsayısı R^2 gerçek değer ile öngörü değeri arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü ölçmektedir. Minimum değer olarak -1, maksimum olarak 1 değerini alır. Her öngörünün gerçek değerle aynı olduğu bir modelde R^2, 1 değerini alacaktır. Eşitlik (5.19)'daki gibi ifade edilebilir.

$$R^2 = \frac{N\sum(X_g X_{ö}) - (\sum X_g)(\sum X_{ö})}{\sqrt{N(\sum X_g^2) - (\sum X_g)^2}\sqrt{N(\sum X_{ö}^2) - (\sum X_{ö})^2}} \tag{5.19}$$

6. UYGULAMA : TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ BİRİM FİYATLARININ KAOTİK ANALİZİ VE KISA DÖNEMLİ TAHMİN ÇALIŞMASI

Bu tez kapsamında Türkiye'de elektrik enerjisi birim fiyatlarının kaotik analizi gerçekleştirilmiş, kaos tespiti yapılmaya çalışılmış ve sonrasında kısa dönemli bir tahmin çalışması uygulanmıştır. Analizler için literatürde güvenilir ve doğru sonuçlar veren paket programlardan iki tanesi kullanılmıştır. Gürültü giderimi, faz uzayının yeniden kurulması ve kaos tespiti için yapılan hesaplamalarda R.Hegger, H.Kantz ve T.Schreiber'ın Mart 2007 yılında sürdüğü TISEAN 3.0.1 paket programı kullanılmıştır [33]. Bu program tamamen akademik amaçlar güdülerek yazılmıştır ve literatürde en yaygın olarak kullanılan programdır. Kaos analizinin yanı sıra kısa dönemli tahmin çalışması için de kullanılmıştır. Bunun yanında 2001 yılında J.Reiss tarafından yazılan Nonlinear Dynamics Toolbox (NDT) programı da öngörü çalışmalarında kullanılmıştır [34]. Çalışmada hangi adımların takip edildiği ve bu adımlarda hangi programın kullanıldığı Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 : Çalışmada İzlenen Adımlar

Adım	Program
1) Orijinal seride korelasyon boyutu ve gürültü genliği tespiti	TISEAN 3.0.1
2) Gürültü Azaltımı ve yeni serilerde gürültü genliği tespiti	TISEAN 3.0.1
3) Tüm serilerde korelasyon integrali karşılaştırması	TISEAN 3.0.1
4) Zaman gecikmesi ve gömme boyutu, faz uzayları	TISEAN 3.0.1 ve NDT
5) Korelasyon integalinden fraktal boyut hesabı	TISEAN 3.0.1
6) Lyapunov üsteli hesabı	TISEAN 3.0.1
7) Kısa dönemli öngörü çalışması	TISEAN 3.0.1 ve NDT

6.1 Çalışılan Zaman Serisi Detayları

Tez kapsamında, 2009 Aralık ayından 2017 Ekim ayına kadar olan PTF değerleri inceleme altına alınmıştır. Bölüm 2'de bahsedilen piyasa değişiklikleri sebebiyle bu zaman serisi bir bütün olarak incelenmek yerine ikiye bölünmüştür. Gün Öncesi

Planlama dönemi 2009 yılında henüz yeni devreye alınmış ve GÖP'e bir geçiş süreci olarak düşünülmüş olduğundan tüm zaman serisinin 2009 Aralık – 2011 Aralık arası dönemi Gün Öncesi Planlama dönemi verisi olarak incelenmiş ve seri ismi GOPlan olarak belirlenmiştir. Tez içerisinde GOPlan ismiyle gösterilen sonuçların hepsi bu döneme aittir. Bunun yanında GÖP dönemi 2011 Aralık ayından başlayacak şekilde alınmıştır ve yine Bölüm 2'de bahsedilen sebebplerden dolayı GİP'in aktif olduğu dönemden ayrılmamıştır. Çalışmada 2011 Aralık – 2017 Ekim arası olan zaman serisi GÖP ve GİP'in aktif olduğu dönem olarak mevcutur ve GOPGIP serisi olarak isimlendirilmiştir. Tez içerisinde GOPGIP ismiyle gösterilen sonuçların hepsi bu döneme aittir.

GOPlan ve GOPGIP serilerinin uzunluğunun ne kadar olduğu ve genel detay bilgiler Çizelge 6.2'de görülebilmektedir.

Çizelge 6.2 : GOPlan ve GOPGIP Zaman Serileri Detayları

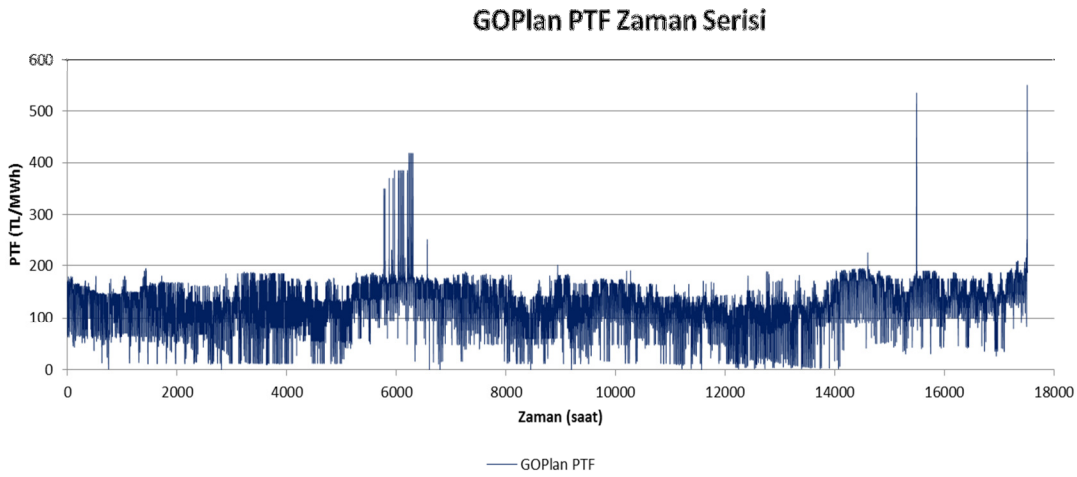
Seri Adı	Veri Uzunluğu (saat)	Zaman Aralığı	Ortalama PTF (TL/MWh)	Standart Sapma
GOPlan	17520	01.12.2009-30.11.2011	122.6	46.1
GOPGIP	51168	01.12.2011-01.10.2017	150.3	50.5

6.2 Gün Öncesi Planlama Dönemi

Bu bölüm içerisinde farklı başlıklar altında 2009 Aralık-2011 Aralık ayları arasında PTF değerlerinden oluşan GOPlan zaman serisinde kaos analizi yapılacak, öngörü çalışması ayrı bir ana başlık altında incelenecektir. GOPlan zaman serisi Şekil 6.1'de görülebilmektedir.

Zaman serisinde gürültü azaltımı yapmadan önce sistemde ne kadar gürültü olduğunun analinizin yapılması geremektedir. Bu analizi yapmadan önce henüz zaman gecikmesi belirlenmiş olmasa da farklı zaman gecikmeleriyle faz uzayı çizilebilir ve gürültü azaltımı yapılmadan çekicinin faz uzayında açıkça görülüp görülmediği incelenebilir. Bu görsel inceleme serideki gürültü varlığıyla ilgili ciddi

bir kanıt verir. Orijinal zaman serisi ve gürültü azaltımı yapılmış serilerde faz uzayları, zaman gecikmeleri ayrı ayrı hesaplandıktan sonra Bölüm 6.2.2'de verilecektir.

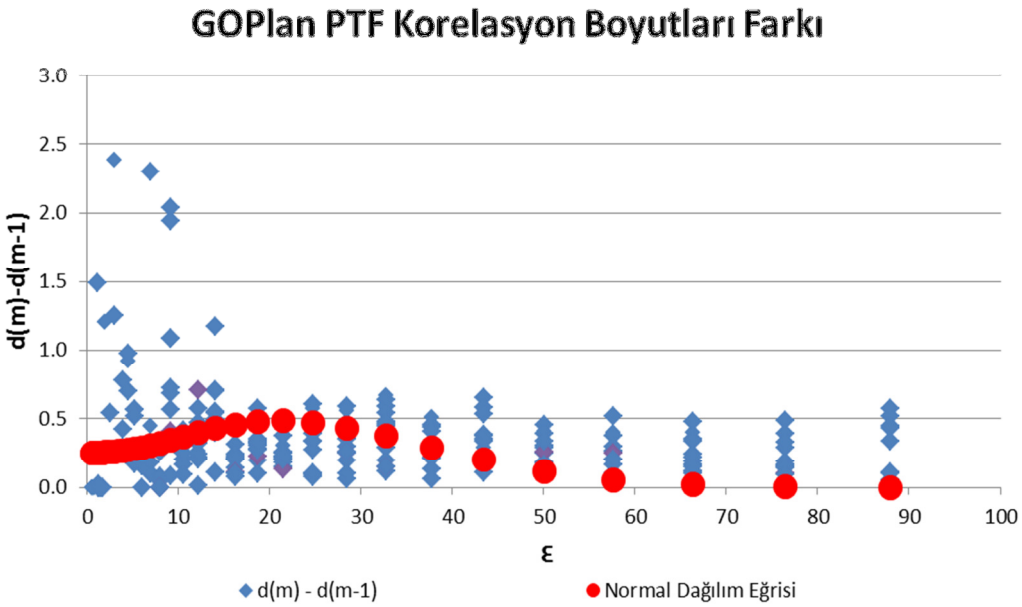


Şekil 6.1 : GOPlan Zaman Serisi

Serideki gürültünün varlığını matematiksel olarak anlayabilmek için Bölüm 5.4'de anlatıldığı gibi korelasyon boyutu hesabı kullanılacaktır. Korelasyon boyutu hesabı için TISEAN 3.0.1 programı kullanılmıştır. Bu programda korelasyon integralleri ve korelasyon toplamları d2 komutu aracılıgıyla hesaplanır. Bu komutta seçilmesi gereken en önemli parametreler zaman gecikmesi ve maksimum kullanılacak gömme boyutunun doğru bir şekilde seçilmesidir. Zaman gecikmesi hesabı her ne kadar Bölüm 6.2.2'de anlatılacak olsa da bu analizi yapmak için öncesinde gürültü giderimi yapılmamış GOPlan serisinde, OBF aracılığıyla belirlenmiştir. Maksimum gömme boyutu ise doğru bir şekilde yüksek olarak seçilmelidir. Burada amaç tamamen doğru gömme boyutu değerini kullanmak değildir çünkü zaten her boyut için ayrı ayrı korelasyon integrali ve boyutu hesaplanmaktadır. Bu komutta kullanılan maksimum gömme boyutu seçimi hesaplamaya bir sınır koşul getirir ve hangi gömme boyutuna kadar hesap yapılacağını belirtir. Ancak tabi ki bu değeri çok düşük seçmek sistemle ilgili bazı verileri kaçırmak anlamına gelebileceğinden yeteri büyüklükte seçilmelidir. Değerlendirmeler sonucu zaman gecikmesi OBF ile 14 saat, maksimum gömme boyutu ise 20 olarak belirlenmiştir.

Analizler d2 komutu ile tamamlandıktan sonra ortaya çıkan korelasyon boyutu değerleri ardışık olarak birbirinden çıkartılır, $D(m,\varepsilon) - D(m-1,\varepsilon)$ ve vektörel uzaklık ε yatay eksende olacak şekilde grafiğe aktarılır. Bölüm 5.4 eşitlik (5.13)'te anlatıldığı

gibi ardışık boyutlar arasındaki fark gürültü ile ilgili bilgi vermek durumundadır. Eşitlik (5.14)'te gösterildiği gibi farklı gürültü genliği σ değerleriyle her ε için hesap yapılarak gürültünün Gauss dağılımı çıkartılır ve boyut farkı hesaplarıyla birlikte grafik üzerinde çizilir. En iyi dağılımı saglayan σ değeri zaman serisinde ε biriminde gürültü genliği olarak seçilir. GOPlan serisi için yapılan hesaplamalarla ve grafiklerle gürültü genliğinin 15 olduğu görülmüştür. Şekil 6.2'de korelasyon boyutu farkları ve gürültü için çizilen Gauss dağılımı görülebilmektedir.



Şekil 6.2 : GOPlan d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=15)

6.2.1 Zaman serisinde gürültü azaltımı

GOPLan zaman serisinde gürültü azaltımı için Bölüm 5.3'te anlatılan lokal izdüşün yöntemi kullanılmıştır. Analizler TISEAN 3.0.1 programının ghkss komutu ile yapılmıştır. Farklı iterasyonlarda sonuçların ne seviyede olduğu korelasyon boyutu farklarından gürültü genliği hesaplama ve korelasyon integrallerinin görsel incelenmesi yollarıyla kontrol edilmiş ve 4. Iterasyonun (ITE4) en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Ghkss komutunda belirlenmesi gereken en önemli parametreler zaman gecikmesi, gömme boyutu ve vektörel uzunluk birimi cinsinden (ε) komşu alanının genişliğidir.

Zaman gecikmesi Bölüm 6.2'de de bahsedildiği gibi GOPlan serisinin OBF analiznden gelmektedir ve 14 saat olarak seçilmiştir.

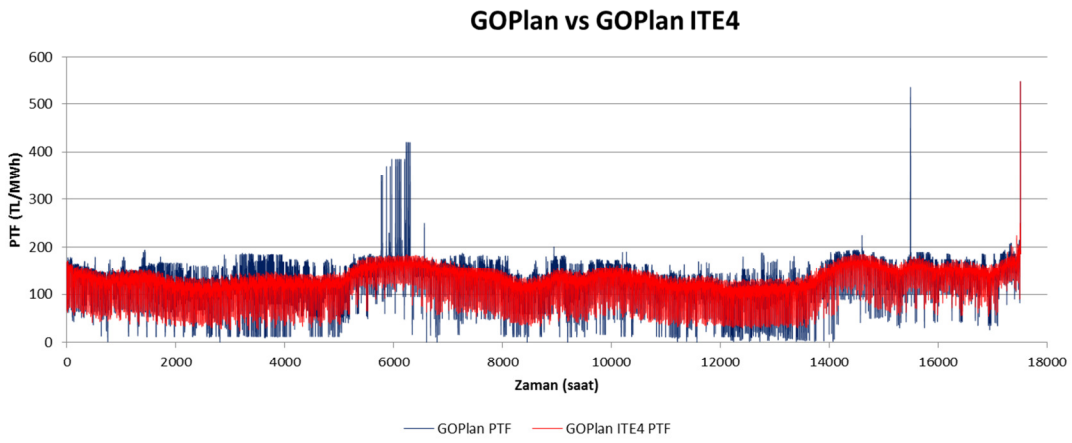
Gömme boyutu henüz YEYK analizi yapılmadığı için tam bilinememektedir ancak zaten bu analiz için gömme boyutunun tam olarak belirlenmesine ihtiyaç yoktur. Bu kabulle analizler için maksimum gömme boyutu 20 olarak belirlenmiştir.

Komşu alanının genişliği bu analiz kapsamında en önemli parametredir. Bu genişliği olması gerekenden küçük seçmek alan içerisine yeteri kadar nokta alınamamasına sebep olacak ve analizi yanlış yere yönlendirecektir. Mutlaka gürültü genliğinden yüksek boyutta olmak zorundadır, literatürde gürültü genliğinin 3 katını almak yeterli bir seçim olarak görülmektedir [25]. Bu sebeple gürültü genliği 15 olarak belirlenen GOPlan serisinde komşu alanı genişliği 45 olarak belirlenmiştir.

Bu bölümde daha önceden bahsedildiği gibi ghkss komutu ile 4 iterasyon yapılmıştır. Yeni zaman serileri GOPlan ITE1, GOPlan ITE2, GOPlan ITE3 ve GOPlan ITE4 olarak isimlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmaların neticesinde en iyi sonucun ITE4 olduğu belirlenmiştir ve bu bölüm kapsamında analizler için orijinal seriyle kıyaslamalı olarak GOPlan ITE4 serisinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Bölüm 5.1'de anlatılan basit lineer olmayan gürültü azaltımı da TISEAN 3.0.1 programında kullanılabilecek bir yöntemdir ve GOPlan zaman serisi için denenmiştir. TISEAN'da bu işlemi nrlazy komutu gerçekleştirmektedir. Bu yöntemden alınan sonuçlar yeterli seviyede görülmediği için analizlerde kullanılmamıştır. Sebebi ise farklı iterasyonlarda PTF değerlerini gereğinden fazla düşürmüş olmasıdır.

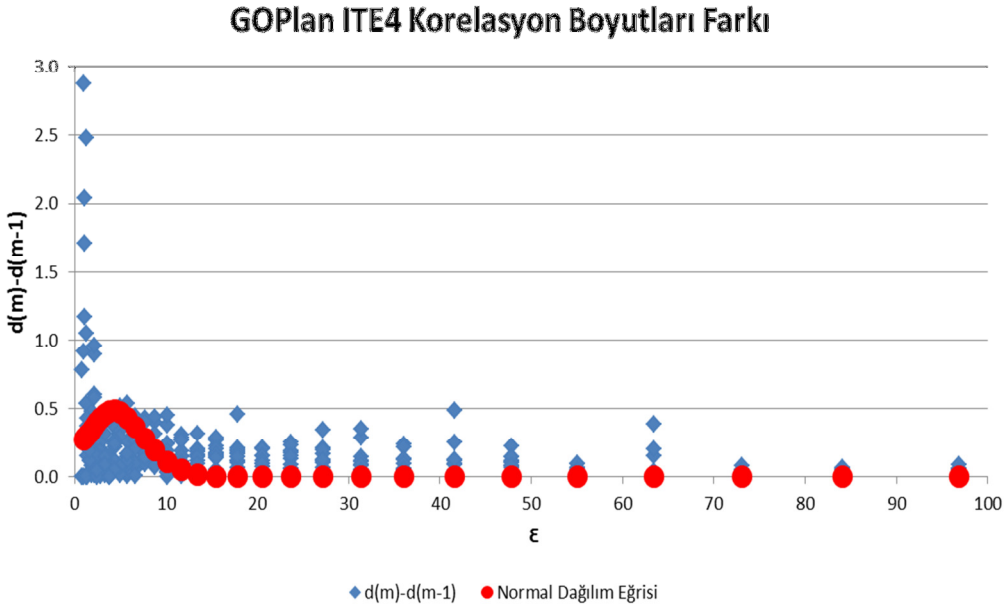
Gürültü azaltımı ghkss komutu ile yapıldıktan sonra oluşan GOPlan ITE4 zaman serisi GOPlan orijinal serisi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.3'te görülebilmektedir.



Şekil 6.3 : GOPlan ve GOPlan ITE4 Zaman Serileri

Bu aşamadan sonra yapılması gereken yeni çıkarılan GOPlan ITE4 serisinde korelasyon boyutu farkları hesabıyla gürültü genliğini belirlemek ve ne kadarının ortadan kaldırıldığını ortaya çıkartmaktır. Bunun yanında iki seriye ait korelasyon integralleri de görsel olarak incelenecektir. Korelasyon integralleri ve boyutu değerleri ve grafiklerinden ayrıca Bölüm 6.2.4'te de bahsedileceği gibi bu bölümde sadece korelasyon boyutu farkları ve gürültü genliği hesabı gösterilecektir. GOPlan ve GOPlan ITE4 serilerinin korelasyon integrali grafikleri ve bu grafiklerden gürültü varlığının nasıl anlaşıldığı Bölüm 6.2.4'te anlatılacaktır.

GOPlan ITE4 serisi için korelasyon boyutu farkları TISEAN 3.0.1 programında d2 komutu ile hesaplanmış ve eşitlik (5.14) yardımıyla gürültü genliği σ hesabı yapılmıştır. SOnuçlar Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre gürültü genliği GOPlan ITE4 serisiyle σ=4 değerine düşmüştür. Hatırlanacağı üzere orijnal seride bu değer 15'ti.



Şekil 6.4 : GOPlan ITE4 d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=4)

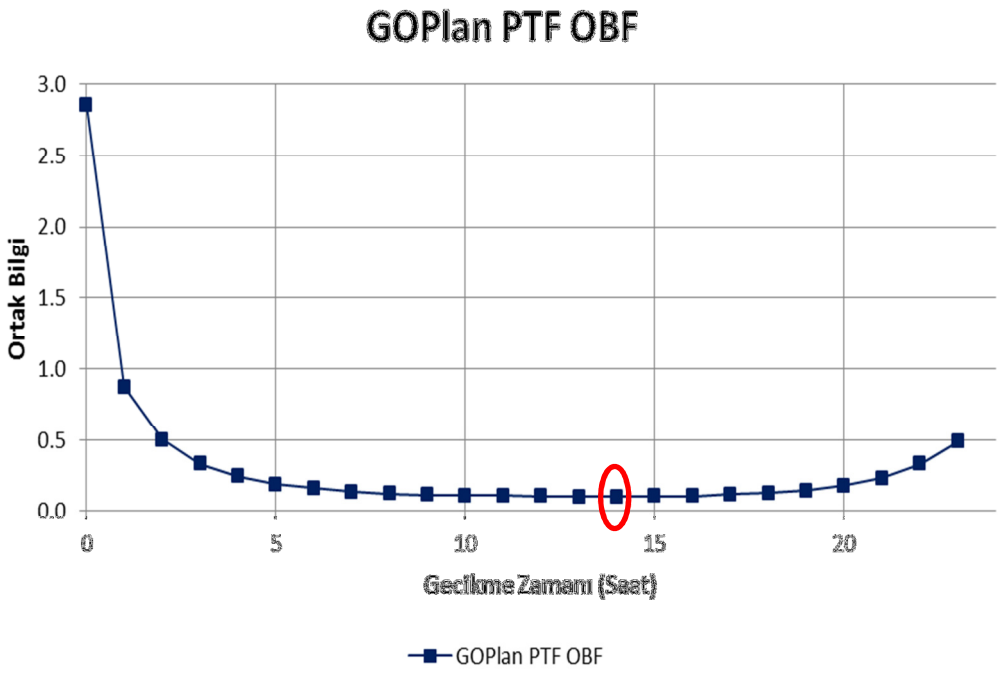
6.2.2 Zaman gecikmesinin belirlenmesi

Zaman gecikmesinin belirlenmesi FUYK aşamasında en önemli adımlardan birisidir. Zaman gecikmesini doğru bir şekilde belirleyememek faz uzayının doğru olarak görüntülenememesine sebep olacaktır. Tez kapsamında zaman gecikmesi belirlenmesi için TISEAN 3.0.1 programında mutual komutu kullanılmıştır, bu komut Bölüm 4'te bahsedilen OBF ile tamamıyla aynı işlevdedir. Zaman gecikmesi

için TISEAN 3.0.1 programında OKF işlevini gören corr komutu da kullanılabilirdi ancak lineer olmayan zaman serilerinde OBF daha güvenilir sonuçlar verdiği için mutual komutuyla işlem yapılmıştır.

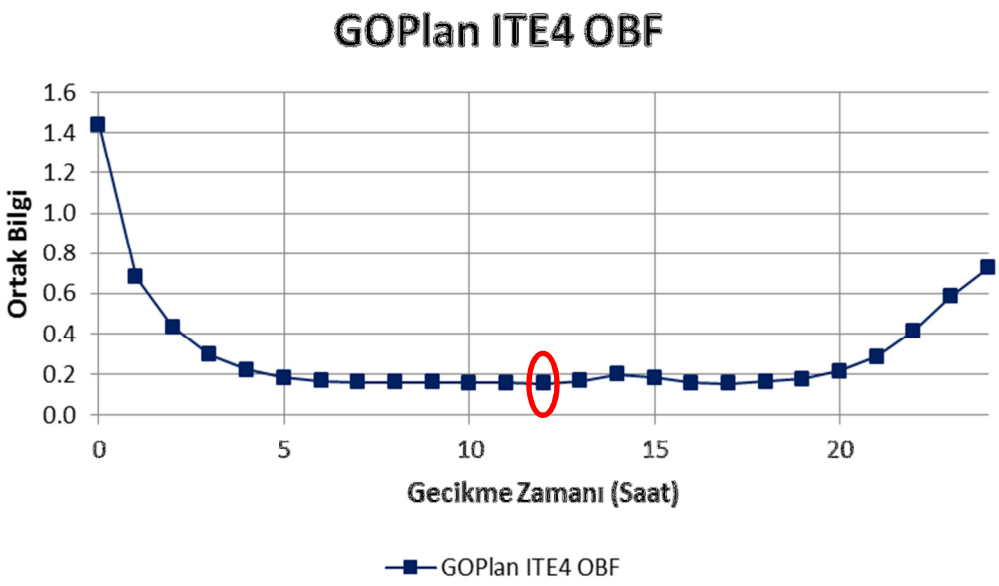
Zaman gecikmesi OBF'nin ilk minimum değerini aldığı nokta olarak seçilir. Bu parametrenin belirlenmesinin amacı faz uzayını ve çekiciyi doğru bir şekilde görüntüleyebilmek için yörüngelerin arasını açmaktır. Dolayısıyla ilk minimum değerde birbirileri arasında olan yakınlık ilişkisi en aza indiğinden bu noktanın seçimi doğrudur.

GOPlan serisinin zaman gecikmesi zaten analiz edilmiş ve 14 saat olarak belirlenmişti. Şekil 6.5'te GOPlan serisine ait OBF görülebilir.



Şekil 6.5 : GOPlan Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=14 saat)

Gürültü azaltımı yapıldıktan sonra bu işlemi tekrarlamak gerekmektedir bunun sebebi ise mevcut gürültünün zaman gecikmesi değerini olması gerekenden daha yüksek çıkarma ihtimalidir. Bu sebeple alınan her iterasyon için zaman gecikmesi tekrar hesaplanmıştır. GOPlan ITE 4 serisi için OBF Şekil 6.6'da görülmektedir. İlk minimum nokta olarak zaman gecikmesi 12 saat seçilmiştir. Ayrıca her iterasyon için zaman gecikmesi değerinin ne olduğu Çizelge 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.6 : GOPlan ITE4 Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=12 saat)

Çizelge 6.3 : GOPlan, ITE1, ITE2, ITE3 ve ITE4 Zaman Gecikmeler

Zaman Serisi	Zaman Gecikmesi
GOPlan	14 saat
GOPlan ITE1	12 saat
GOPlan ITE2	12 saat
GOPlan ITE3	12saat
GOPlan ITE4	12 saat

Çizelge 6.3'den görülebileceği gibi farklı iterasyonlar için zaman gecikmesi değişmemiş ve 12 değerinde sabit kalmıştır. Grafiklerde zaman gecikmesi olarak 9 saatten sonra OBF'nin düşüş oranı azaldığı için dışarıdan bakan birine sabit ilerlemekte olarak gözükebilir. Ancak zaman gecikmesi değerleri nümerik olan en küçük OBF'nin alındığı noktalar olarak seçilmiştir. Diğer iterasyonlara ait OBF grafikleri Ek A'da görülebilir.

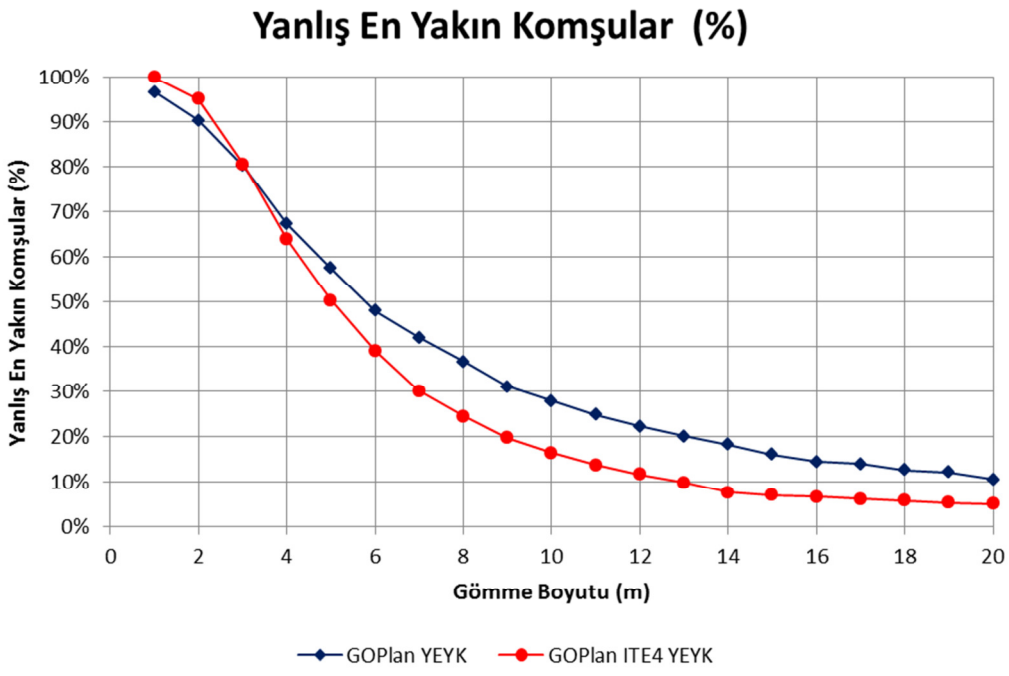
6.2.3 Gömme boyutunun belirlenmesi

Gömme boyutu belirlenmesi için Bölüm 4.2.2'de anlatıldığı gibi Yanlış En Yakın Komşular (YEYK) yöntemi kullanılmıştır. YEYK hesabı için TISEAN 3.0.1 paket programında false_nearest komutuyla analiz yapılmış ve uygun gömme boyutu bazı kabuller yapılarak seçilmiştir. İdeal koşullarda gereken gömme boyutu YEYK

yüzdesinin sıfıra indiği nokta olarak seçilir ancak bazı koşullar altında örneğin gürültünün tam giderilememesi veya sistem dinamiklerinin buna uygun olmaması durumunda minimum değerine ulaştığı nokta için bir kabul yapmak zorunda kalınır.

TISEAN 3.0.1 programındaki false_nearest komutunda kullanılması gereken en önemli parametreler maksimum hangi gömme boyutuna kadar analiz yapılacağı ve zaman gecikmesi değeridir. Zaman gecikmesi değerleri zaten bir önceki adımda hesaplanmıştı, maksimum hangi gömme boyutuna kadar analiz yapılacağı ise gürültü analizinde de seçildiği gibi 20 olarak belirlenmiştir.

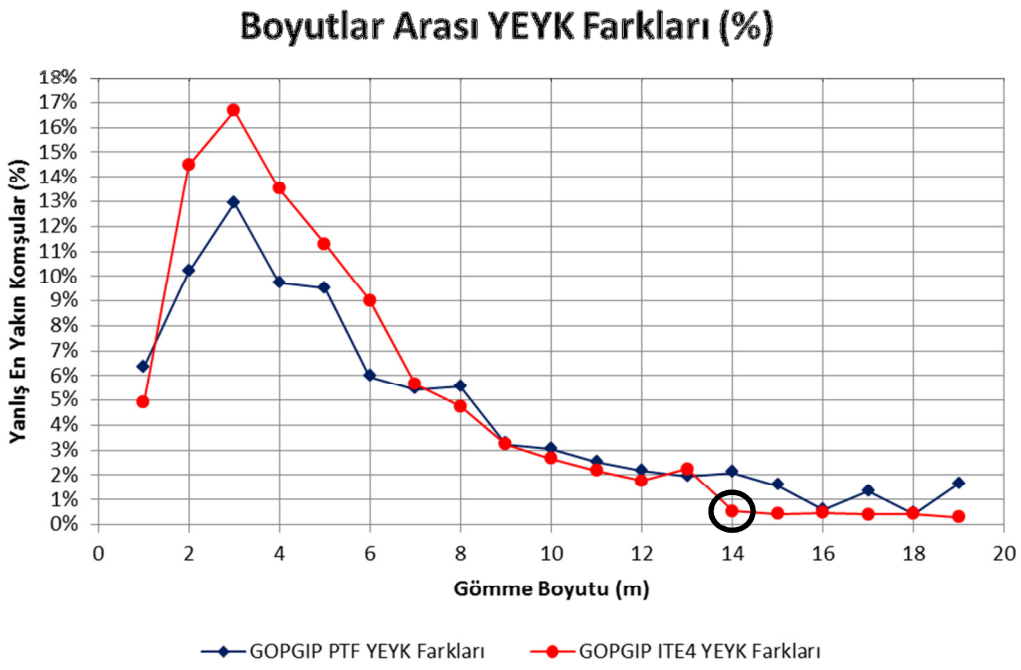
GOPlan ve GOPlan ITE4 zaman serilerine ait yüzdesel YEYK eğrileri Şekil 6.7'de görülebilir.



Şekil 6.7 : GOPlan ve GOPlan ITE4 YEYK

Şekil 6.7'de görülebildiği gibi GOPlan zaman serisinde YEYK değerleri yüksek seviyelerde seyretmektedir. GOPlan ITE4 zaman serisinde de yüzdesel YEYK değeri 20'ye kadar hiç bir gömme boyutunda sıfır değerine ulaşmamaktadır. Ayrıca özellikle boyut 14 değerinden sonra azalma yüzdesi çok düşük seviyede seyretmektedir ve neredeyse sabit kalmaktadır. Bu sebeple burada gömme boyutu seçimi için bir kabul yapılmıştır. Gömme boyutuna yüzdesel YEYK değerinin azalma yüzdesinin en düşük seviyeye indiği boyut değeri uygun gömme boyutu

olarak seçilmiştir. Boyutlar arası yüzdesel YEYK farkları iki zaman serisi için Şekil 6.8'de görülebilmektedir.

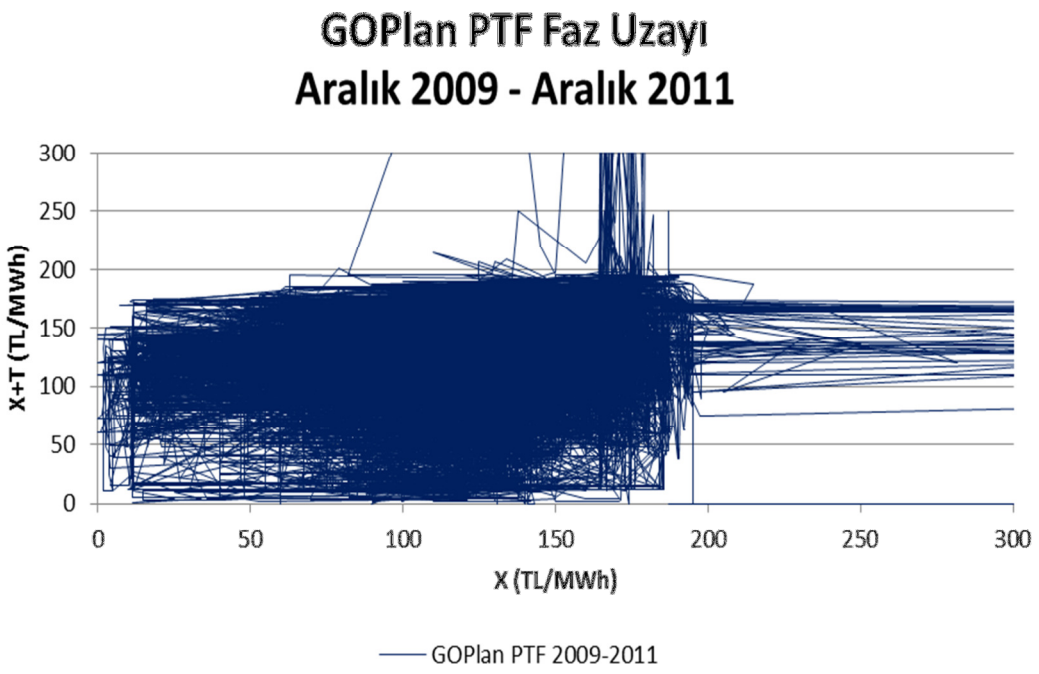


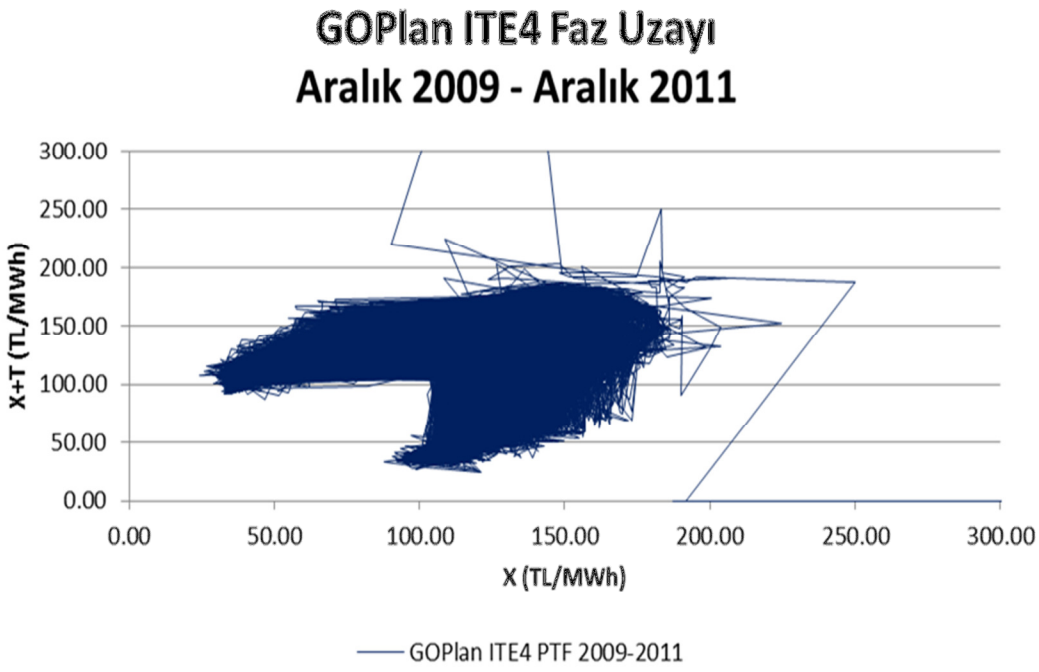
Şekil 6.8 : Boyutlar arası %YEYK farkları

Şekil 6.8'de de görülebildiği gibi gömme boyutu 14 değerinden sonra farklar 1%'in altına inmekte ve neredeyse sabit bir şekilde devam etmektedir. Bu kabul yapılarak GOPlan ITE4 serisi için gömme boyutu 14 olarak seçilmiştir.

6.2.4 Faz uzayları

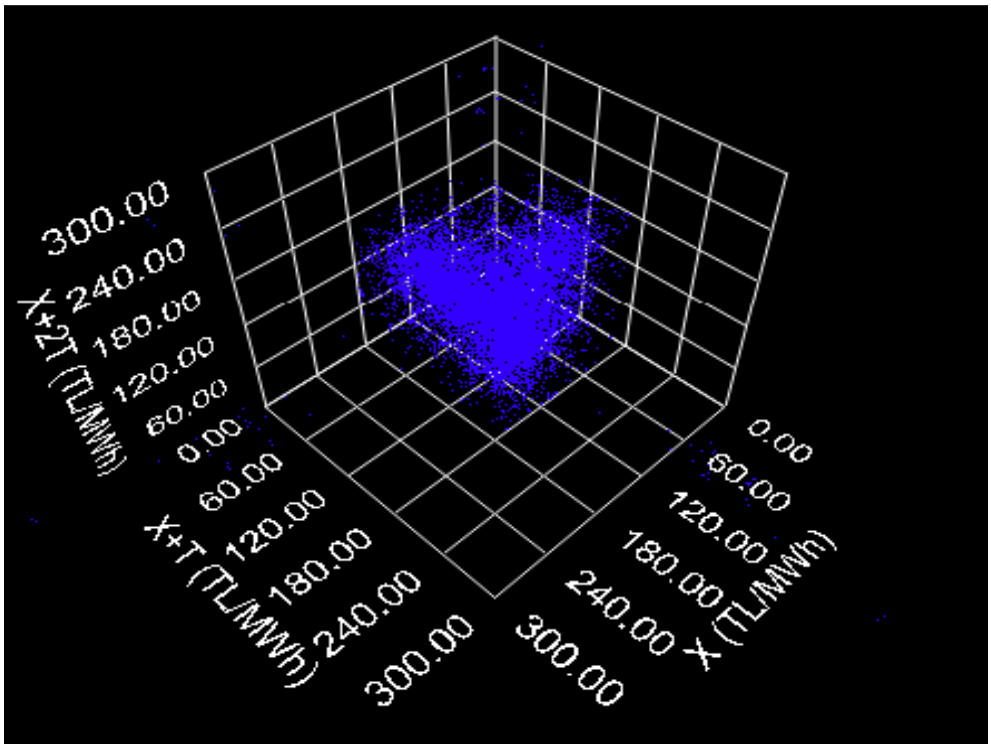
Zaman gecikmesi ve gömme boyutunun belirlenmesinden sonra bir sonraki adım faz uzaylarının çizilmesidir. Faz uzayları çizilmeden önce beklenen, GOPlan serisinde gürültü varlığı sebebiyle karışık ve çekicinin belli olmadığı bir faz uzayı, GOPlan ITE4 serisinde çok daha düzenli ve çekicinin kendini belli ettiği bir faz uzayı görülmesidir. GOPlan ve GOPlan ITE4 serilerine ait faz uzayları Şekil 6.9'da görülebilir. Bunun yanında diğer iterasyonlara ait (GOPlan ITE1, GOPlan ITE2 ve GOPlan ITE3) faz uzayları EK B'de verilmiştir. Çizilen faz uzayları bütün zaman serisi üzerinden zaman gecikmesi düşünülerek çizilmiştir. Şekil 6.9'da Aralık 2009 – Aralık 2011 aralığındaki bütün noktalar hesaba katılmıştır. Bunun yanında yıl yıl faz uzaylarının nasıl bir hal aldığı da incelenebilir. Bütün serilere ait Aralık 2009 – Aralık 2010 ve Aralık 2010 – Aralık 2011 arasını kaplayan zaman serileri için faz uzayları ayrı ayrı yine EK B'de gösterilmiştir.



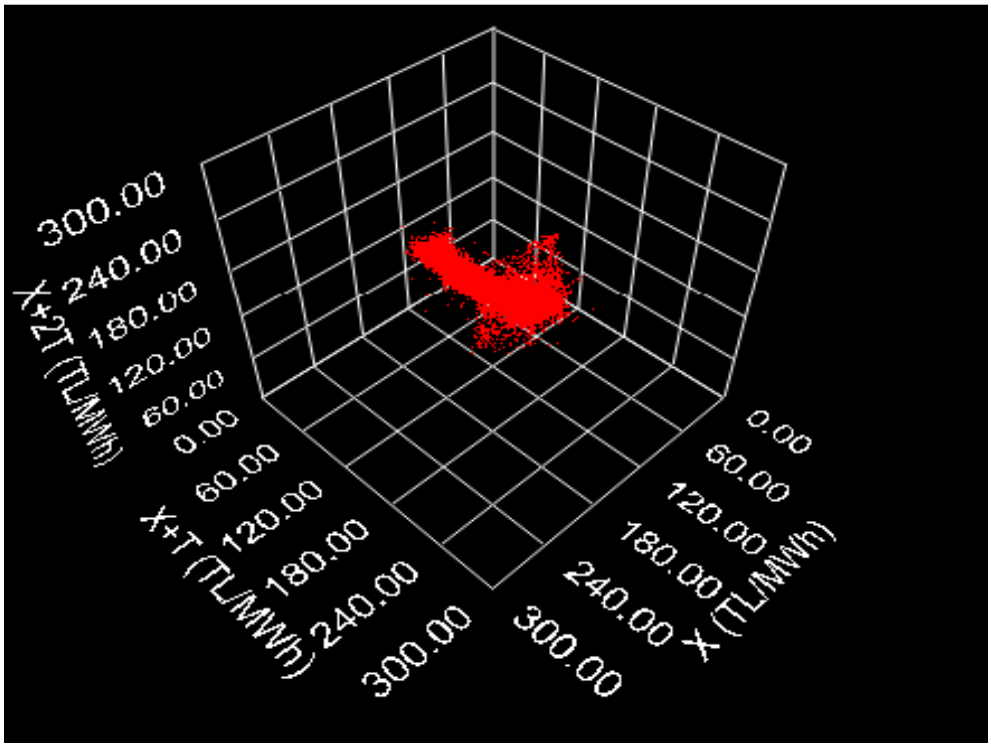


Şekil 6.9 : GOPlan ve GOPlan ITE4 Faz Uzayları Gösterimi

Şekil 6.9'da faz uzaylarının iki boyutlu düzlemde gösterimi bulunmaktadır. Şekillerden de anlaşılabileceği gibi gürültü azaltımı yapılmış ITE4 serisi faz uzayında çekiciyi çok daha net bir şekilde gösterebilmektedir. Üç boyutlu düzlemde GOPlan serisinin gösterimi NDT programı ile Şekil 6.10'daki gibi, GOPlan ITE4 serisinin gösterimi ise Şekil 6.11'daki gibi olacaktır [34].



Şekil 6.10 : GOPlan Faz Uzayı (3D)

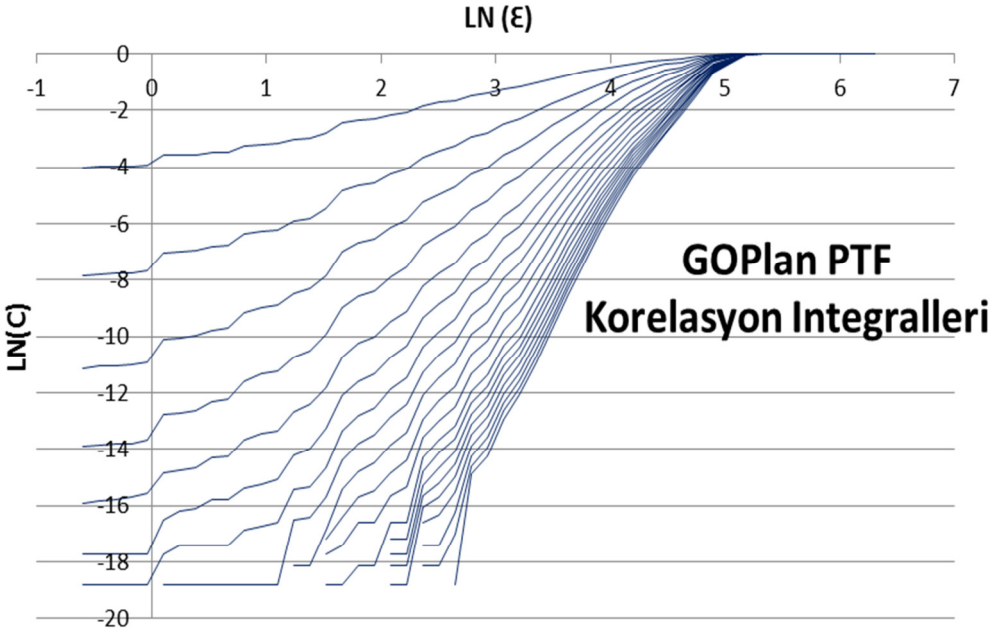


Şekil 6.11 : GOPlan ITE4 Faz Uzayı (3D)

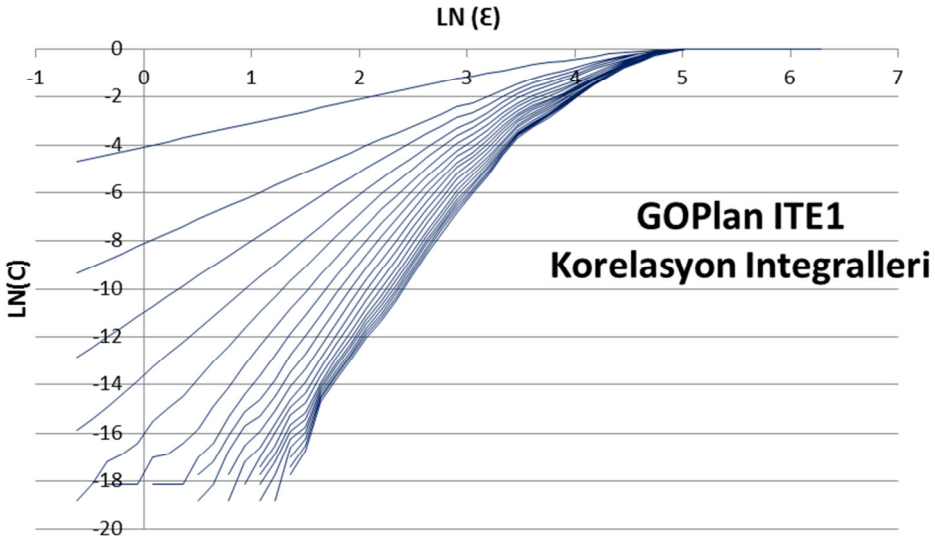
6.2.5 Korelasyon boyutu ve integralleri

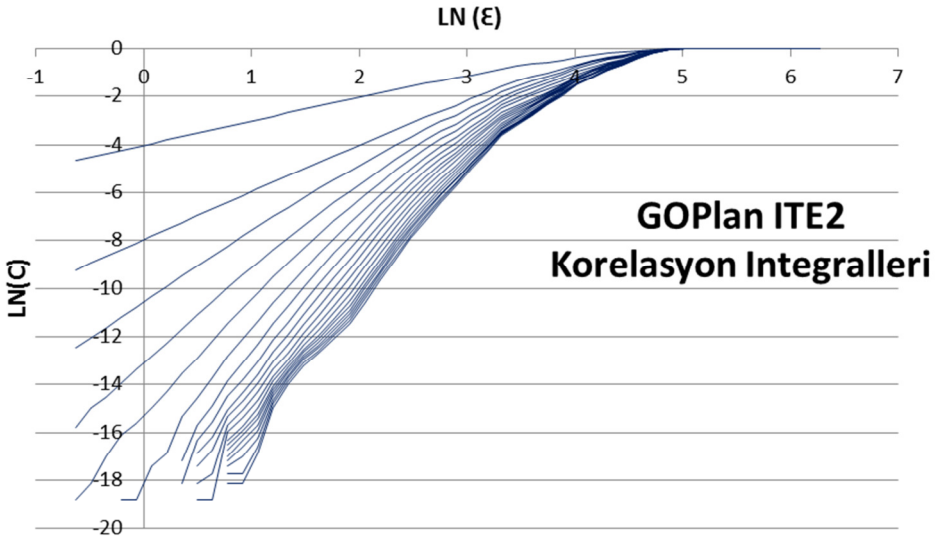
Koralesyon integrallerini hesaplama ve boyutunu belirleme kaotik sistemde var olan garip çekicinin fraktal yapıda olduğunu kanıtlamak için kullanılır. Bunun yanında

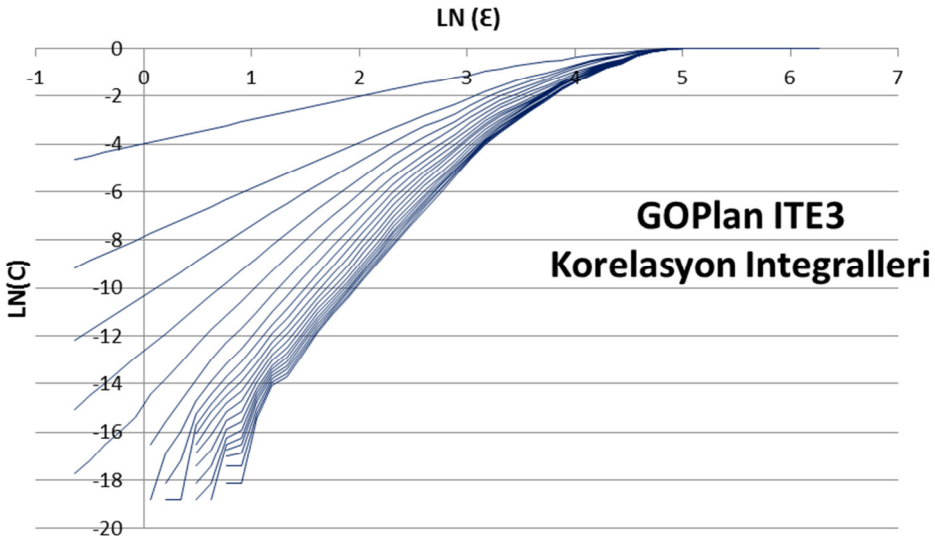
Bölüm 6.2.1'de de bahsedildiği gibi gürültü azaltımını görsel olarak anlayabilmek için de korelasyon integrali grafikleri kullanılabilir. Daha öncesinde Bölüm 5.4'te de bu konuyla ilgili detay bilgiler verilmişti. Gürültünün fazla olduğu seride korelasyon integrali eğrilerinin eğimi artar ve en kötü koşula sahip olması durumunda eğim gömme boyutunun kendisine eşit hale gelir. Bu durumda orijinal zaman serisi GOPlan ve gürültü azaltımı yapılmış zaman serileri GOPlan ITE1, ITE2, ITE3 ve ITE4 korelasyon integralleri çizdirilerek karşılaştırma yapılabilir, hangi eğrilerin eğiminin daha düşük olduğu ve sabit bir eğime sahip bir doğru şekline hangisinin daha yakın olduğu görsel olarak incelenebilir. Bölüm 6.2.1'de de bahsedildiği gibi korelasyon boyutu ve integrali hesaplaması için TISEAN 3.0.1 paket programında d2 komutu kullanılmıştır. Programda d2 komutu sonuç olarak, seçilen boyut aralığı için her gömme boyutunda korelasyon integrali, korelasyon boyutu ve korelasyon entropisi değerlerini çıkartır. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından gün öncesi planlama dönemine ait tüm zaman serileri için hesaplanan korelasyon integralleri Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Hesaplamalar 1 ile 20 gömme boyutu değerleri arasında her seri için belirlenen uygun zaman gecikmesi değerleri ile yapılmıştır. Grafikler korelasyon boyutu hesaplamasında kullanılan ölçekte olması için logaritmik ölçekte çizdirilmiştir. Kısacası grafiklerdeki her eğrinin eğim değeri, o gömme boyutu için korelasyon boyutunu vermektedir



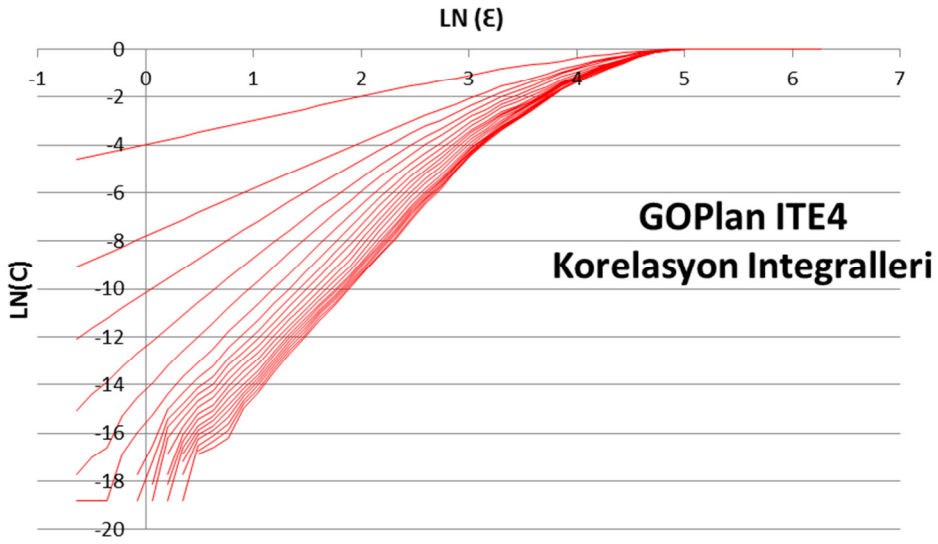
Şekil 6.12 : GOPlan Serileri Korelasyon İntegralleri





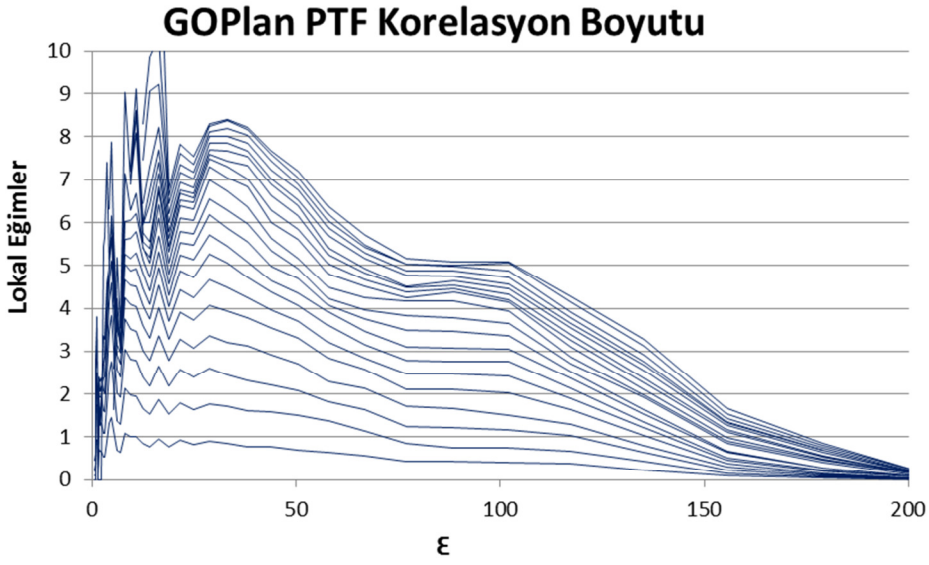


Şekil 6.12 (devam) : GOPlan Seriler Korelasyon İntegralleri

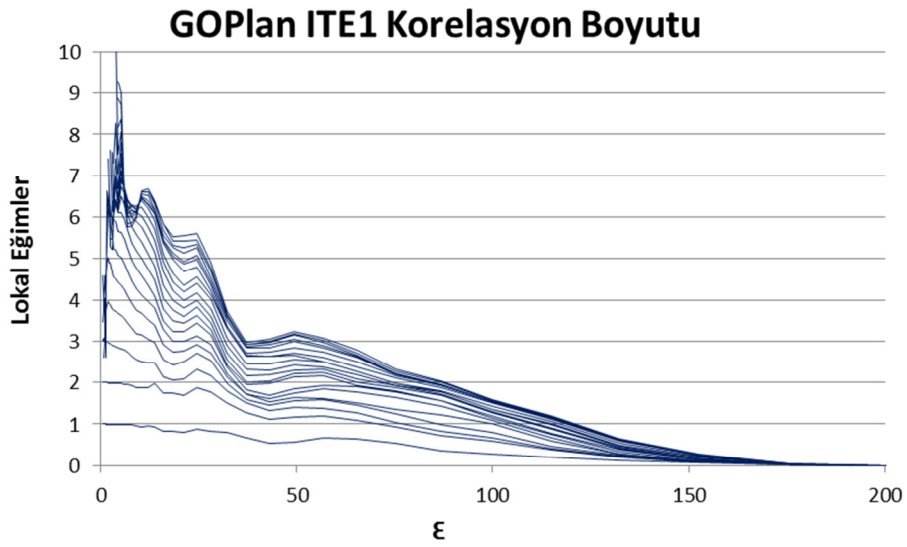


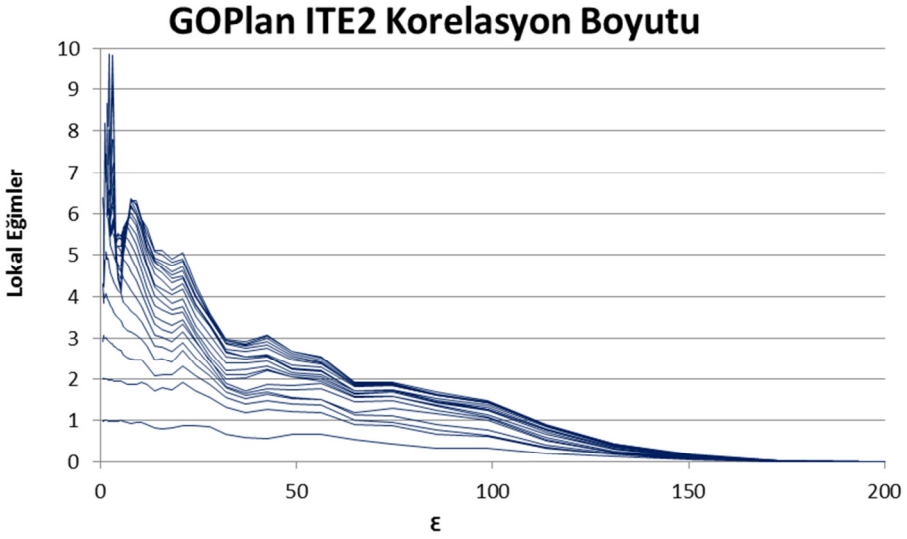
Şekil 6.12 (devam): GOPlan Serileri Korelasyon İntegralleri

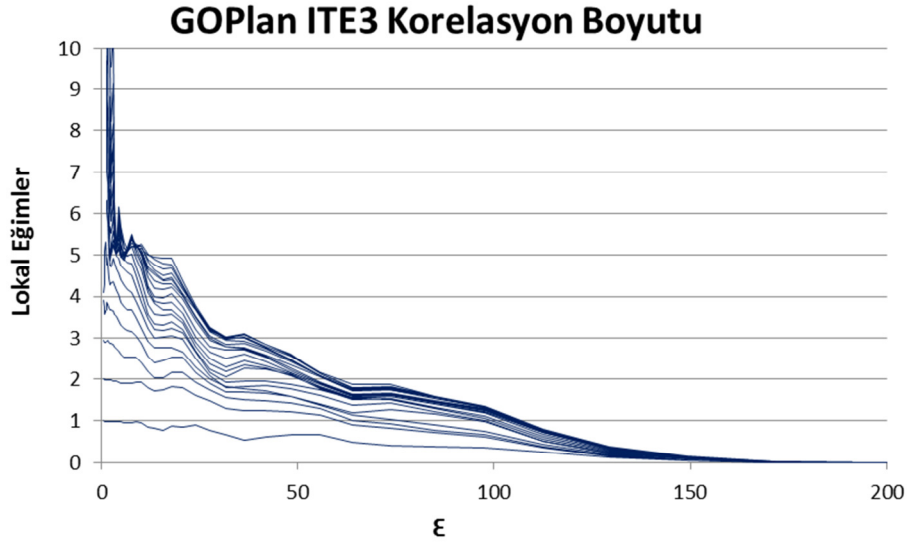
Şekil 6.12'de görülebildiği gibi 4.iterasyona doğru korelasyon integrali eğimleri azalmaktadır. ITE3 ile ITE4 serileri arasında çok az da olsa bir fark mevcuttur, bu da ITE4 zaman serisinin gürültü azaltımı için yeterli olabileceğine dair bir kanıttır. Eğimlerdeki düşüş bu grafiklerde görsel olarak görülebildiği gibi korelasyon boyutu grafiklerinde de görülecektir çünkü zaten korelasyon boyutu bu grafiklerdeki eğim değerlerinden hesaplanmaktadır. Şekil 6.13'te bütün GOPlan, GOPlan ITE1, GOPlan ITE2, GOPlan ITE3 ve GOPlan ITE4 serilerine ait korelasyon boyutu grafikleri görülmektedir. Yine aynı şekilde grafiklerdeki eğriler 20'ye kadar farklı gömme boyutlarını temsil etmektedir.



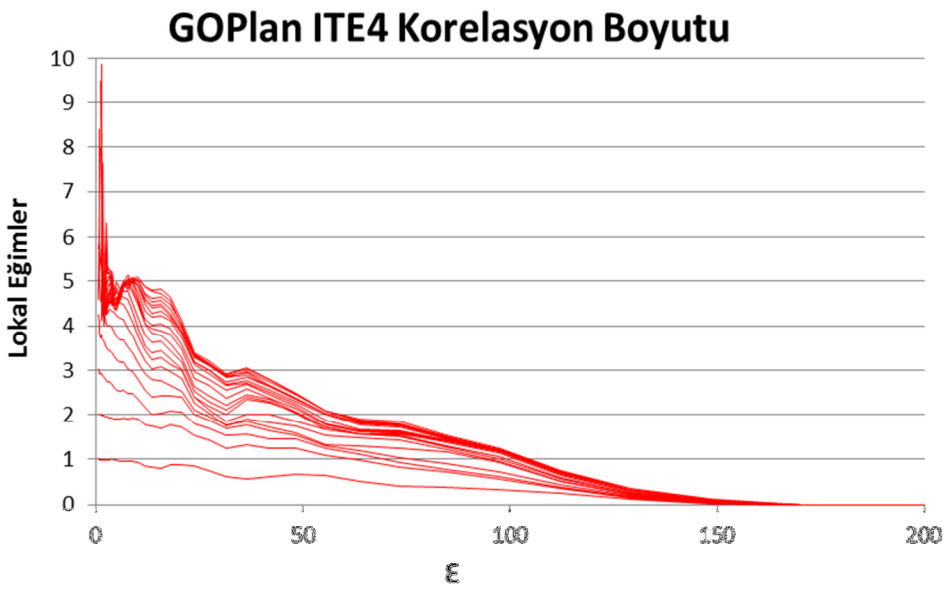
Şekil 6.13 : GOPlan Serileri Korelasyon Boyutları







Şekil 6.13 (devam): GOPlan Serileri Korelasyon Boyutları

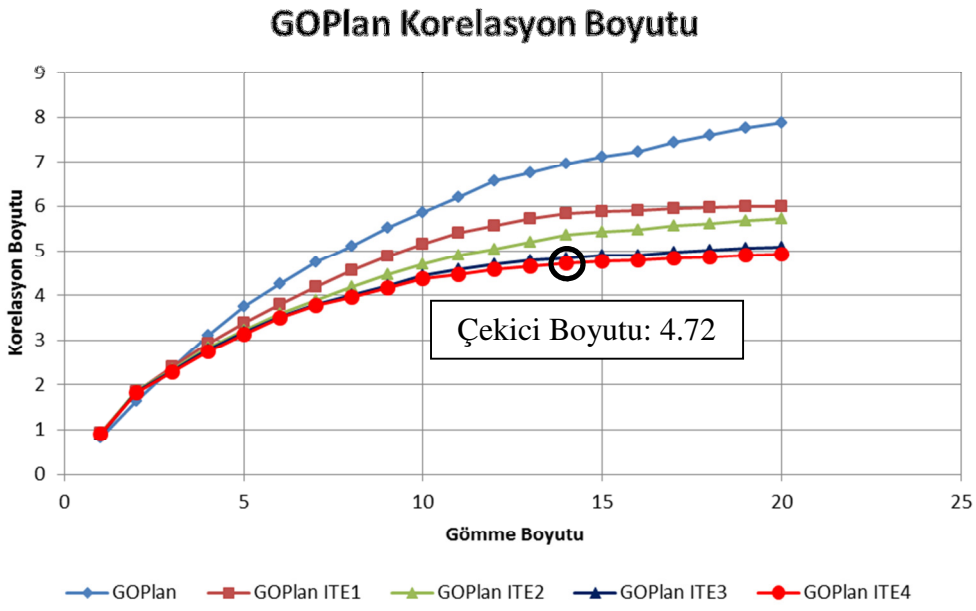


Şekil 6.13 (devam): GOPlan Serileri Korelasyon Boyutları

6.2.5.1 Fraktal boyut ve kaos tespiti

Kaotik sistemlerde kaos olduğunun en güçlü kanıtlarından birisi sistemde var olan çekicinin fraktal yani kesirli bir boyuta sahip olmasıdır. Bu bölümde her gömme boyutu için ayrı ayrı korelasyon boyutu değerleri çizdirilecek ve bütün GOPlan serilerinde nasıl ilerledikleri incelenecektir. Fraktal boyut hesabı için, matematiksel hesap dışında kullanılan görsel yöntemlerden bir diğeri ise korelasyon boyutu grafiklerinde gömme boyutu yükseldikçe eğrilerin bir plato oluşturuyor olmasıdır. Örnek olarak Şekil 6.13 son grafikte görülebileceği gibi 6.gömme boyutu eğrisinden sonra korelasyon boyutu 4 ile 5 arasında bir plato oluşmuştur. Bu sebeple GOPlan ITE4 serisinde çekici boyutunun 4 ile 5 arasında bir değer alması beklenmektedir. Şekil 6.14'te bütün zaman serileri için korelasyon boyutu hesapları gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi GOPlan ITE4 serisi için yapılan hesaplarda gömme boyutu 20 değerine doğru korelasyon boyutu değerleri bir doyum noktasına ulaşmaktadır. Bölüm 6.2.3'te anlatıldığı gibi GOPlan ITE4 serisi uygun gömme boyutu değeri 14 olarak belirlenmişti. Bu gömme boyutu değerinde korelasyon boyutu artık doyum noktasına neredeyse ulaşmış olup 4.72 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu serideki çekici boyutunun fraktal boyutta olduğu gösterilmiş bu da sistemde kaos varlığı için güçlü bir kanıt oluşturmuştur. Bunun yanında hesaplanan boyut değeri bu bölümde yukarıda bahsedilen görsel inceleme sonucu ulaşılan

korelasyon boyutunun 4 ile 5 arasında değer alması beklentisine de tamamen uymaktadır.

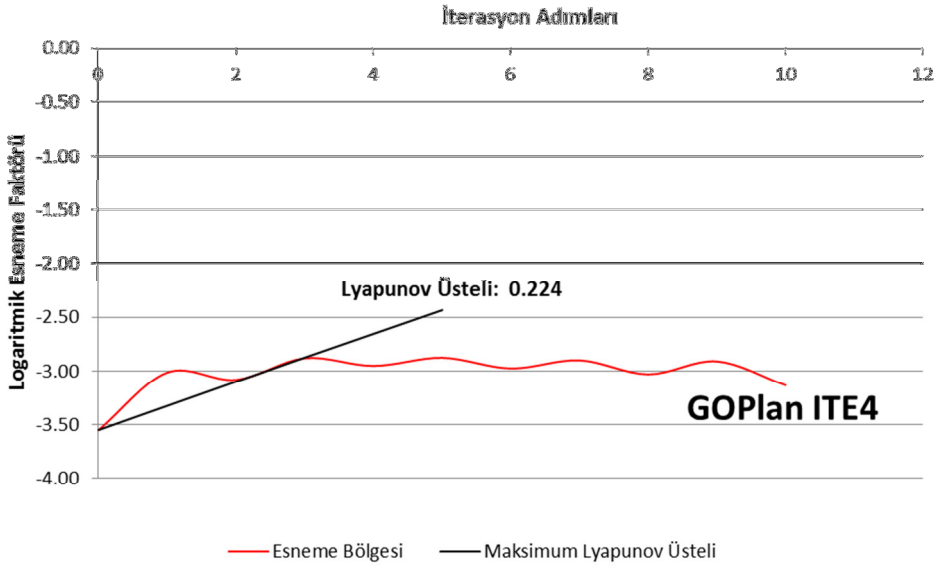


Şekil 6.14 : GOPlan Serileri Korelasyon Boyutu – Gömme Boyutu

6.2.6 Lyapunov üsteli hesaplanması ve kaos tespiti

Pozitif Lyapunov üsteli varlığı lineer olmayan sistemlerde kaos varlığı için en önemli iki kanıttan birisidir. Lyapunov üsteli, faz uzayında yörüngelerin birbirinden ayrılma ölçüsünü verir ve kaotik sistemlerde başlangıç durumuna hassas bağlılık kriterini sağlar. Lyapunov üsteli hesaplamaları TISEAN 3.0.1 paket programında lyap_r komutu ile gerçekleştirilmiştir. Bu komutta girdi olarak kullanılan en önemli parametreler zaman gecikmesi, gömme boyutu ve minimum komşu alanı genişliğidir. Uygulamada GOPlan ITE4 serisi kullanılmıştır. zaman gecikmesi ve gömme boyutu değerleri daha önceden belirlenen ve anlatılan değerlerle aynı seçilmiş, komşu alanı genişliği de gürültü azaltımı yapıldıktan sonra serilerden hesaplanan gürültü genliği değeri olan 4'ten büyük olması açısından 5 seçilmiştir. Bunun yanında iterasyon sayısı olarak program kendiliğinden 50 değerini seçmektedir ancak yörüngelerin ayrılma oranının belli bir iterasyon sayısında sabitlenmesi beklenmektedir, bu sabitlenme gerçekleştiğinde program hesabı durdurur. Program çıktı olarak ise iterasyon sayısına karşılık esneme faktörünün logaritmasını verir. Bu esneme bölgesine uydurulan lineer eğrinin eğimi maksimum Lyapunov üstelinin değerini verir. Pozitif değerde olması kaos için yeterli kanıttır. GOPlan ITE4 serisine ait

esneme faktörü grafiği Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Bu grafiğe uydurulan eğrinin eğimi yani maksimum Lyapunov üsteli 0.224 olarak hesaplanmıştır. GOPlan ITE4 serisinde kaos varlığı fraktal boyut tespitinden sonra pozitif Lyapunov üsteli ile de kanıtlanmıştır.



Şekil 6.15 : GOPlan ITE4 Maksimum Lyapunov Üsteli

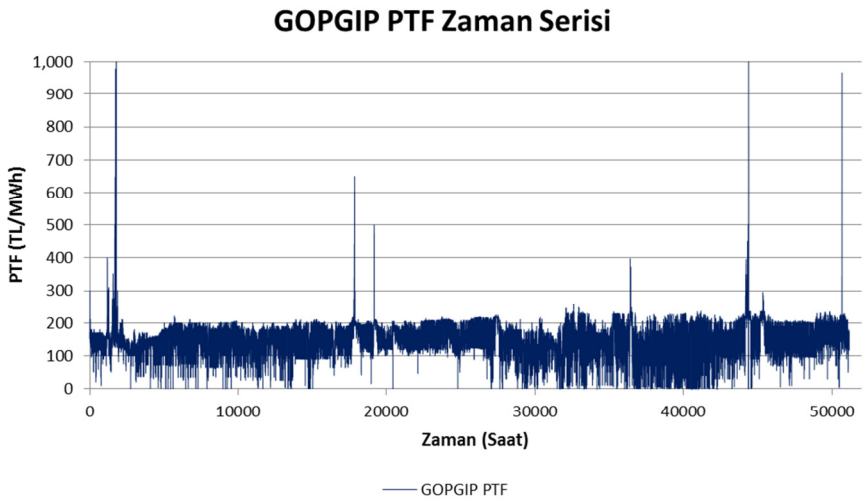
6.3 Gün Öncesi Piyasası ve Gün İçi Piyasası Dönemi

Bu bölüm içerisinde farklı başlıklar altında 2011 Aralık - 2017 Ekim ayları arasında PTF değerlerinden oluşan GOPGIP zaman serisinde kaos analizi yapılacak, öngörü çalışması ayrı bir ana başlık altında incelenecektir. GOPlan zaman serisi Şekil 6.16'da görülebilmektedir.

Zaman serisinde gürültü azaltımı yapmadan önce sistemde ne kadar gürültü olduğunun analinizin yapılması geremektedir. Bu analizi yapmadan önce henüz zaman gecikmesi belirlenmiş olmasa da farklı zaman gecikmeleri ile faz uzayı çizilebilir ve gürültü azaltımı yapılmadan çekicinin faz uzayında açıkça görülüp görülmediği incelenebilir. Bu görsel inceleme serideki gürültü varlığıyla ilgili ciddi bir kanıt verir. Orijinal zaman serisi ve gürültü azaltımı yapılmış serilerde faz uzayları zaman gecikmesi ayrı ayrı hesaplandıktan sonra Bölüm 6.3.2'de verilecektir.

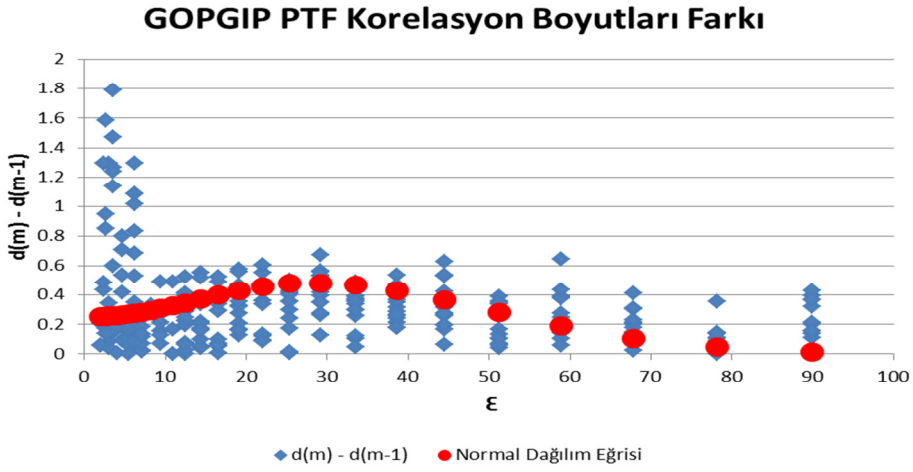
Bu bölüm içerisinde GOPGIP serisinin analizi için izlenen adımlar Bölüm 6.2'de anlatılan GOPlan serisi analizi ile tamamen aynıdır. Fark ise sadece sonuçlardır. Bu

sebeple önceden detaylıca anlatılan yöntemler bu bölümde tekrar edilmeyecek sadece sonuçlara yer verilecektir.



Şekil 6.16 : GOPGIP Zaman Serisi

Serideki gürültünün varlığını matematiksel olarak anlayabilmek için Bölüm 5.4'te anlatıldığı gibi korelasyon boyutu hesabı kullanılacaktır. Bu programda korelasyon integralleri ve korelasyon toplamları d2 komutu aracılığıyla hesaplanır. Bu komutta seçilmesi gereken en önemli parametreler zaman gecikmesi ve gömme boyutu değerleridir. GOPGIP serisi için zaman gecikmesi 14 saat, maksimum gömme boyutu ise 20 olarak belirlenmiştir. Bölüm 6.2'deki aynı yöntemlerle korelasyon boyutu farklarından gürültünün Gauss dağılımı çıkarılmıştır, sonuçlar Şekil 6.17'de görülebilmektedir. GOPlan serisi için gürültü genliğinin 20 olduğu görülmüştür.

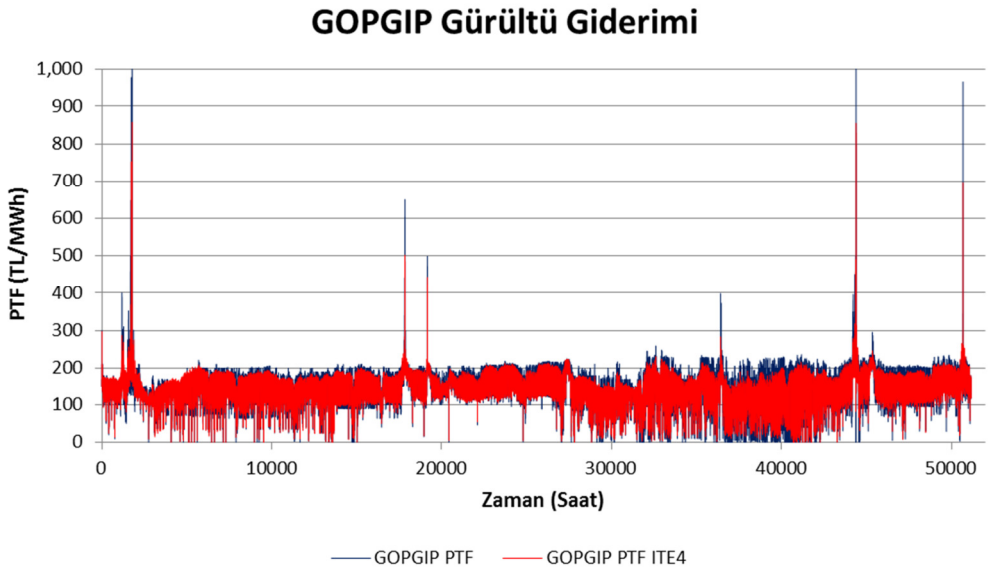


Şekil 6.17 : GOPGIP d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=20)

6.3.1 Zaman serisinde gürültü azaltımı

GOPGIP zaman serisinde gürültü azaltımı için Bölüm 5.3'te anlatılan lokal izdüşüm yöntemi kullanılmıştır. Analizler TISEAN 3.0.1 programının ghkss komutu ile yapılmıştır. Farklı iterasyonlarda sonuçların ne seviyede olduğu korelasyon boyutu farklarından gürültü genliği hesaplama ve korelasyon integrallerinin görsel incelenmesi yollarıyla kontrol edilmiş ve 4. Iterasyonun (ITE4) en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Ghkss komutunda belirlenmesi gerekn en önemli parametreler zaman gecikmesi, gömme boyutu ve vektörel uzunluk birimi cinsinden (ε) komşu alanının genişliğidir. Bölüm 6.2.1'de GOPlan serisi için anlatılan aynı yöntemler kullanılarak bu parametreler belirlenmiştir. Maksimum gömme boyutu yine 20'ye kadar seçilmiş, zaman gecikmesi OBF ile 14 olarak belirlenmiştir. Komşu alanının genişliği ise daha önceden bahsedildiği gibi gürültü genliğinin 3 katı olarak seçilmiş dolayısıyla GOPGIP serisi için 60 olarak belirlenmiştir.

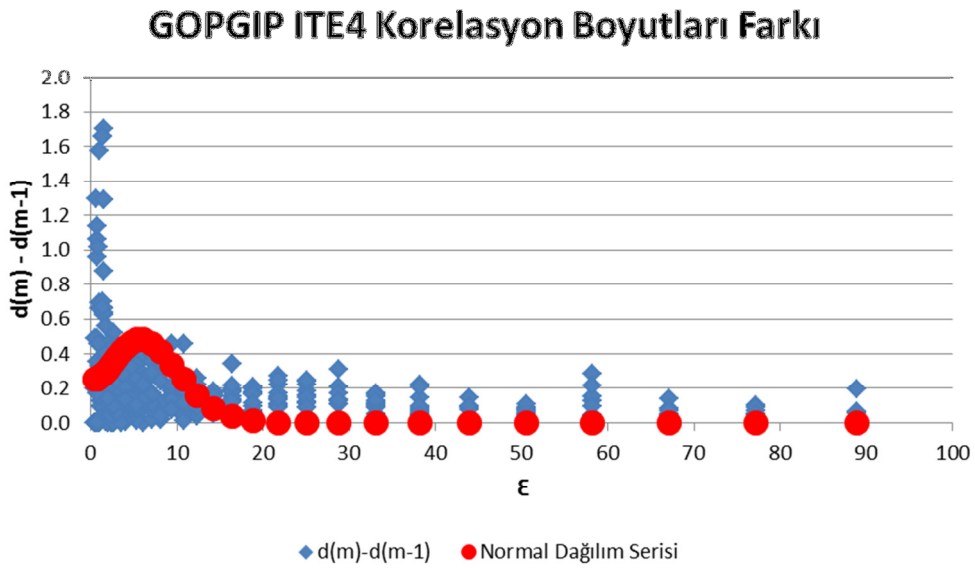
Bu bölümde daha önceden bahsedildiği gibi ghkss komutu ile 4 iterasyon yapılmıştır. Yeni zaman serileri GOPGIP ITE1, GOPGIP ITE2, GOPGIP ITE3 ve GOPGIP ITE4 olarak isimlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmaların neticesinde en iyi sonucun ITE4 olduğu belirlenmiştir ve bu bölüm kapsamında analizler için orijinal seriyle kıyaslamalı olarak GOPGIP ITE4 serisinin kullanılmasına karar verilmiştir. Gürültü azaltımı ghkss komutu ile yapıldıktan sonra oluşan GOPGIP ITE4 zaman serisi GOPGIP orijinal serisi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.18'de görülebilmektedir.



Şekil 6.18 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 Zaman Serileri

Bu aşamadan sonra yapılması gereken yeni çıkarılan GOPGIP ITE4 serisinde korelasyon boyutu farkları hesabıyla gürültü genliğini belirlemek ve ne kadarının ortadan kaldırıldığını ortaya çıkartmaktır. Bunun yanında iki seriye ait korelasyon integralleri de görsel olarak incelenecektir. Korelasyon integralleri ve boyutu değerleri ve grafiklerinden ayrıca Bölüm 6.3.4'te de bahsedileceği gibi bu bölümde sadece korelasyon boyutu farkları ve gürültü genliği hesabı gösterilecektir. GOPGIP ve GOPGIP ITE4 serilerinin korelasyon integrali grafikleri ve bu grafiklerden gürültü varlığının nasıl anlaşıldığı Bölüm 6.3.4'te anlatılacaktır.

GOPGIP ITE4 serisi için korelasyon boyutu farkları TISEAN 3.0.1 programında d2 komutu ile hesaplanmış ve eşitlik (5.14) yardımıyla gürültü genliği σ hesabı yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre gürültü genliği GOPlan ITE4 serisiyle σ=4 değerine düşmüştür. Hatırlanacağı üzere orijinal seride bu değer 20'ydi.

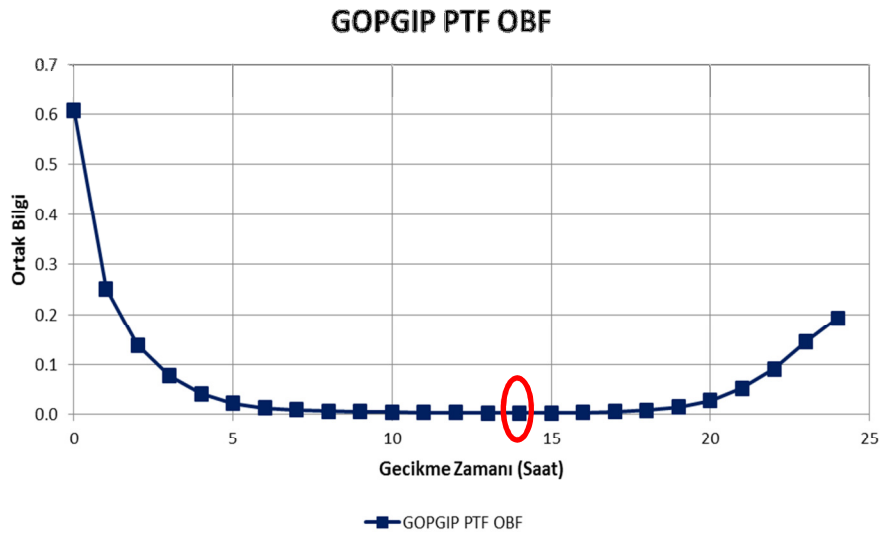


Şekil 6.19 : GOPGIP ITE4 d2 ve Gürültü Gauss Dağılımı (σ=4)

6.3.2 Zaman gecikmesinin belirlenmesi

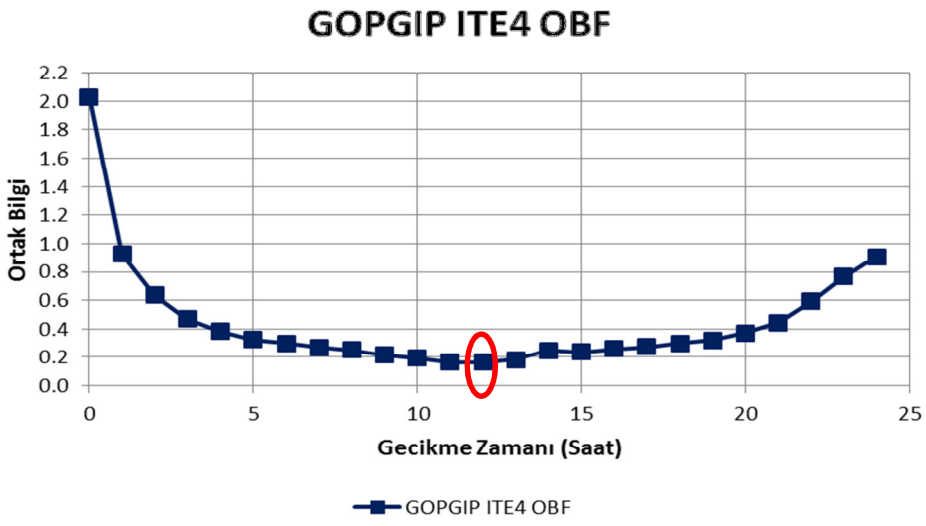
Tez kapsamında zaman gecikmesini belirlemek için TISEAN 3.0.1 programında mutual komutu kullanılmıştır, bu komut Bölüm 4'te bahsedilen OBF ile tamamıyla aynı işlevdedir. Zaman gecikmesi için TISEAN 3.0.1 programında OKF işlevini gören corr komutu da kullanılabilirdi ancak lineer olmayan zaman serilerinde OBF daha güvenilir sonuçlar verdiği için mutual komutuyla işlem yapılmıştır.

Zaman gecikmesi OBF'nin ilk minimum değerini aldığı nokta olarak seçilir. GOPGIP serisinin zaman gecikmesi zaten analiz edilmiş ve 14 saat olarak belirlenmişti. Şekil 6.20'de GOPGIP serisine ait OBF görülebilir.



Şekil 6.20 : GOPGIP Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=14 saat)

Gürültü azaltımı yapıldıktan sonra bu işlemi tekrarlamak gerekmektedir bunun sebebi ise mevcut gürültünün zaman gecikmesi değerini olması gerekenden daha yüksek çıkarma ihtimalidir. Bu sebeple alınan her iterasyon için zaman gecikmesi tekrar hesaplanmıştır. GOPlan ITE 4 serisi için OBF Şekil 6.21'de görülmektedir. İlk minimum nokta olarak zaman gecikmesi 12 saat seçilmiştir. Ayrıca her iterasyon için zaman gecikmesi değerinin ne olduğu Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.21 : GOPGIP ITE4 Ortak Bilgi Fonksiyonu (μ=12 saat)

Çizelge 6.4 : GOPGIP, ITE1, ITE2, ITE3 ve ITE4 Zaman Gecikmeleri

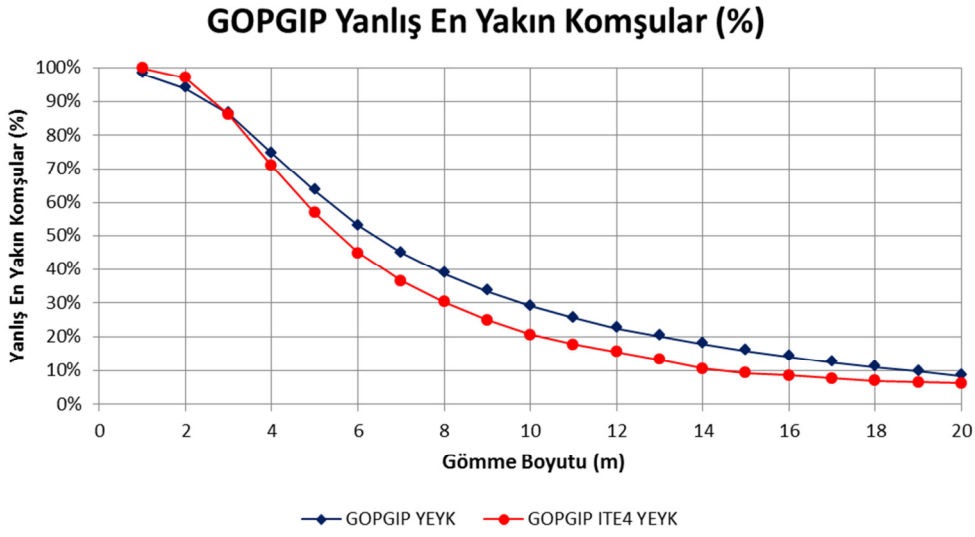
Zaman Serisi	Zaman Gecikmesi
GOPGIP	14 saat
GOPGIP ITE1	12 saat
GOPGIP ITE2	12 saat
GOPGIP ITE3	12saat
GOPGIP ITE4	12 saat

Çizelge 6.4'te görülebileceği gibi farklı iterasyonlar için zaman gecikmesi değişmemiş ve 12 değerinde sabit kalmıştır. Zaman gecikmesi değerleri nümerik olarak en küçük OBF'nin alındığı noktalar olarak seçilmiştir. Diğer iterasyonlara ait OBF grafikleri Ek A'da görülebilir.

6.3.3 Gömme boyutunun yeniden belirlenmesi

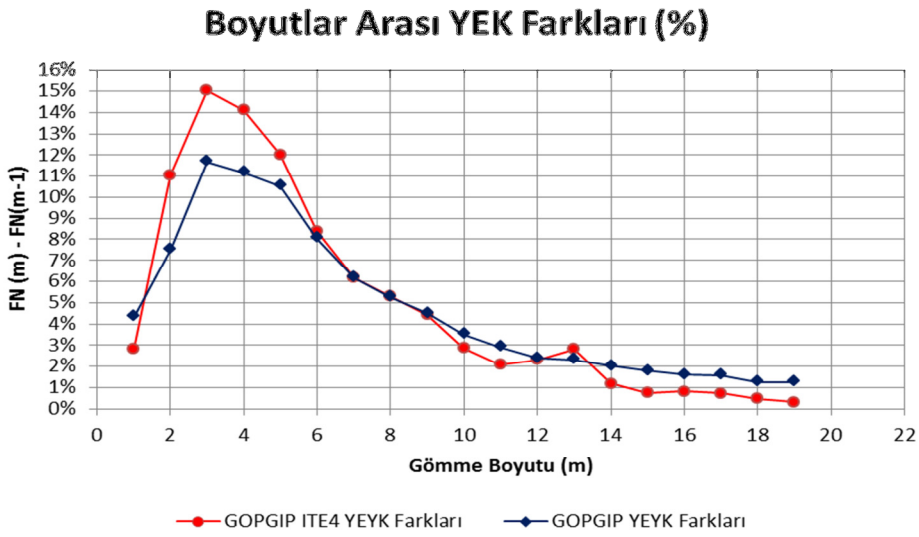
Gömme boyutu belirlenmesi için Bölüm 4.2.2'de anlatıldığı gibi Yanlış En Yakın Komşular (YEYK) yöntemi kullanılmıştır. YEYK hesabı için TISEAN 3.0.1 paket programında false_nearest komutuyla analiz yapılmış ve uygun gömme boyutu bazı kabuller yapılarak seçilmiştir. Yapılan kabuller GOPlan serisi için yapılan ve Bölüm 6.2.3'de anlatılan kabullerle aynıdır.

GOPGIP ve GOPGIP ITE4 zaman serilerine ait yüzdesel YEYK eğrileri Şekil 6.22'de görülebilir.



Şekil 6.22 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 YEYK

Şekil 6.22'de görülebildiği gibi GOPGIP zaman serisinde YEYK değerleri yüksek seviyelerde seyretmektedir. GOPGIP ITE4 zaman serisinde de yüzdesel YEYK değeri 20'ye kadar hiç bir gömme boyutunda sıfır değerine ulaşmamaktadır. Ayrıca özellikle boyut 14 değerinden sonra azalma yüzdesi çok düşük seviyede seyretmektedir ve neredeyse sabit kalmaktadır. Bu sebeple burada gömme boyutu seçimi için bir kabul yapılmıştır. Gömme boyutuna yüzdesel YEYK değerinin azalma yüzdesinin en düşük seviyeye indiği boyut değeri uygun gömme boyutu olarak seçilmiştir. Boyutlar arası yüzdesel YEYK farkları iki zaman serisi için Şekil 6.23'te görülebilmektedir.

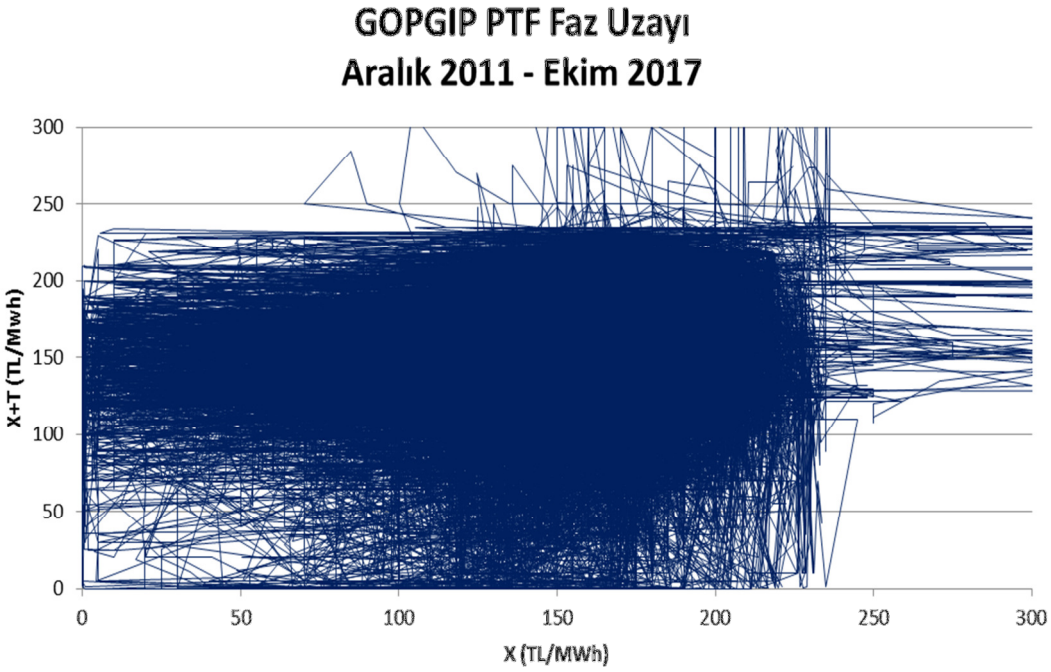


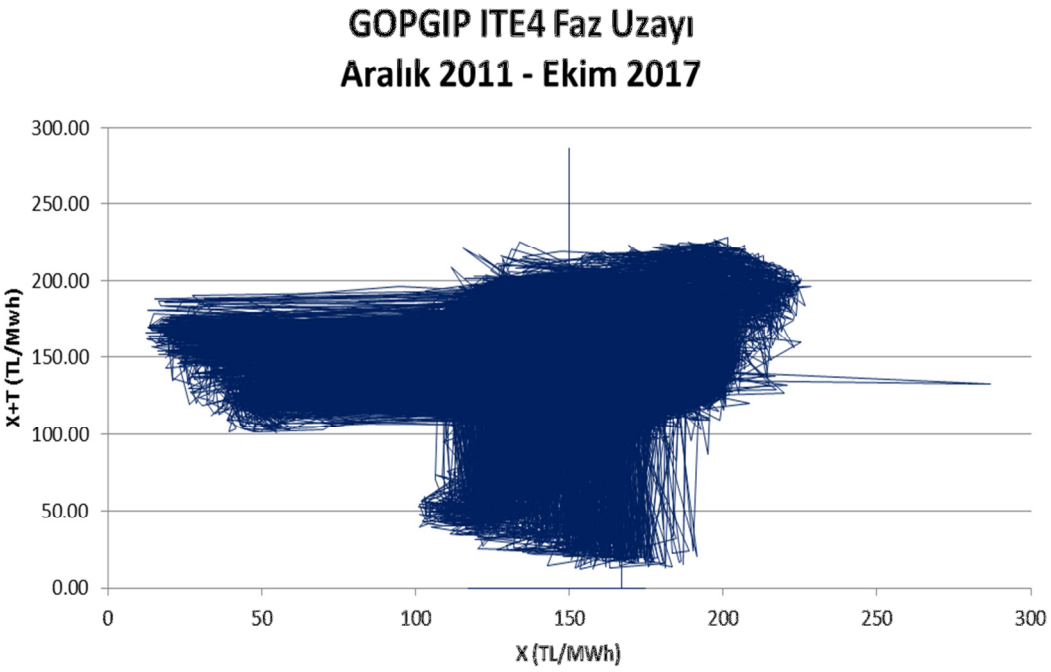
Şekil 6.23 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 Boyutlar Arası YEYK Farkları

Şekil 6.23'te de görülebildiği gibi gömme boyutu 14 değerinden sonra farklar 1%'in altına inmekte ve neredeyse sabit bir şekilde devam etmektedir. Bu kabul yapılarak GOPGIP ITE4 serisi için uygun gömme boyutu 14 olarak seçilmiştir.

6.3.4 Faz Uzayları

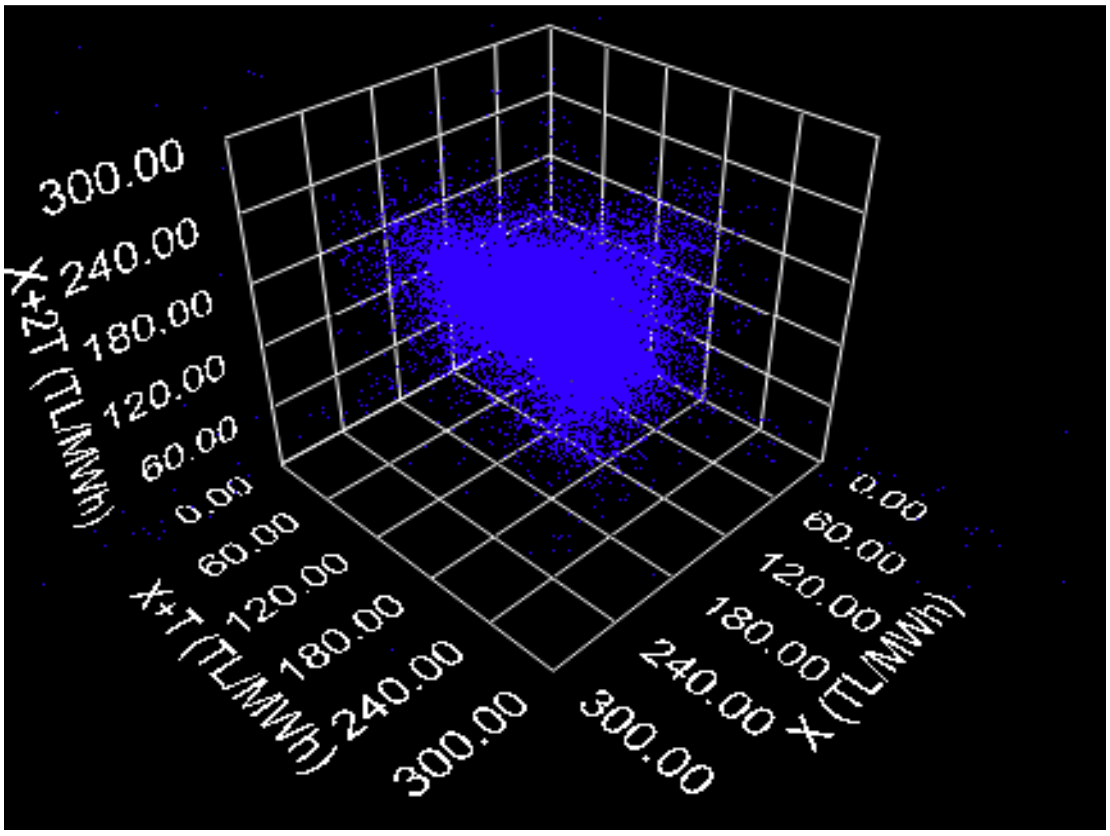
GOPGIP ve GOPGIP ITE4 serilerine ait faz uzayları Şekil 6.24'te görülebilir. Çizilen faz uzayları bütün zaman serisi üzerinden zaman gecikmesi düşünülerek çizilmiştir. Şekil 6.24'te Aralık 2011 – Ekim 2017 aralığındaki bütün noktalar hesaba katılmıştır. Bunun yanında yıl yıl faz uzaylarının nasıl bir hal aldığı da incelenebilir. Diğer iterasyonlara ait (GOPGIP ITE1, GOPGIP ITE2 ve GOPGIP ITE3) faz uzaylarının yıl yıl nasıl şekil aldığı EK B'de verilmiştir.



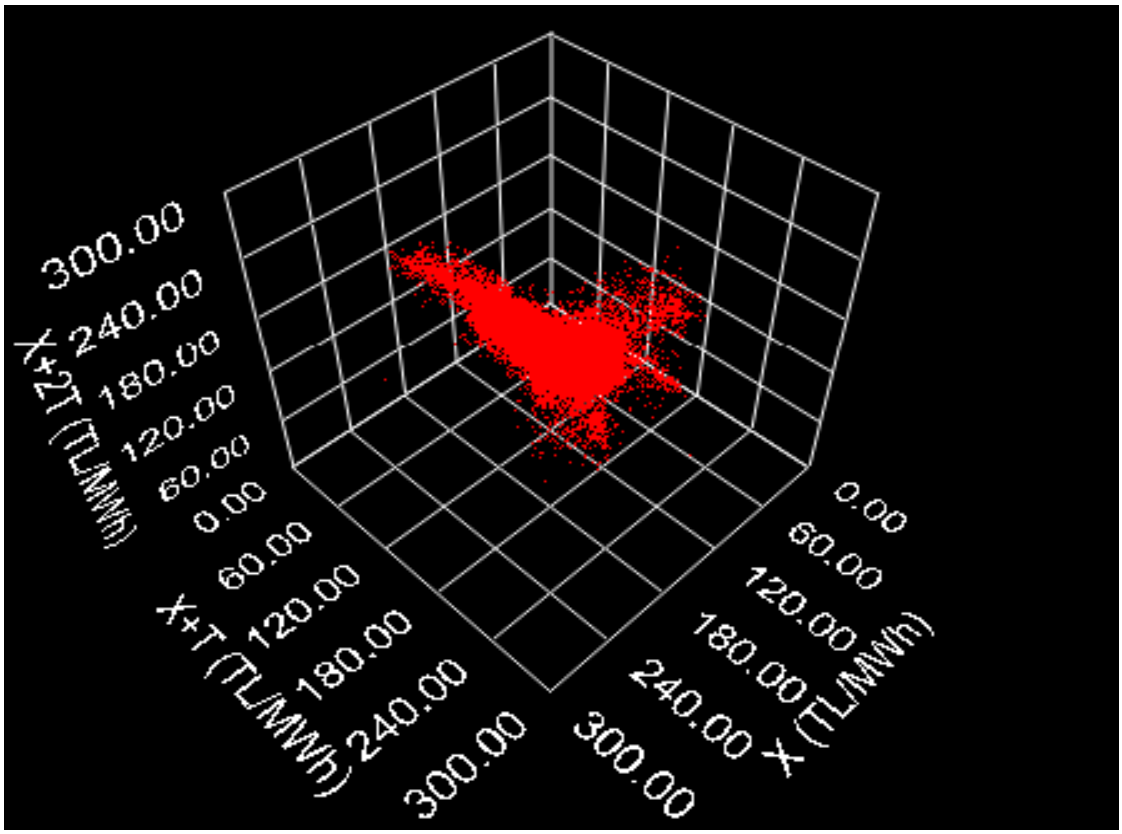


Şekil 6.24 : GOPGIP ve GOPGIP ITE4 Faz Uzayları

Şekil 6.24'te faz uzaylarının iki boyutlu düzlemde gösterimi bulunmaktadır. Şekillerden de anlaşılabileceği gibi gürültü azaltımı yapılmış ITE4 serisi faz uzayında çekiciyi çok daha net bir şekilde gösterebilmektedir.Üç boyutlu düzlemde GOPGIP serisinin gösterimi Şekil 6.25'teki gibi, GOPGIP ITE4 serisinin gösterimi ise Şekil 6.26'daki gibi olacaktır.



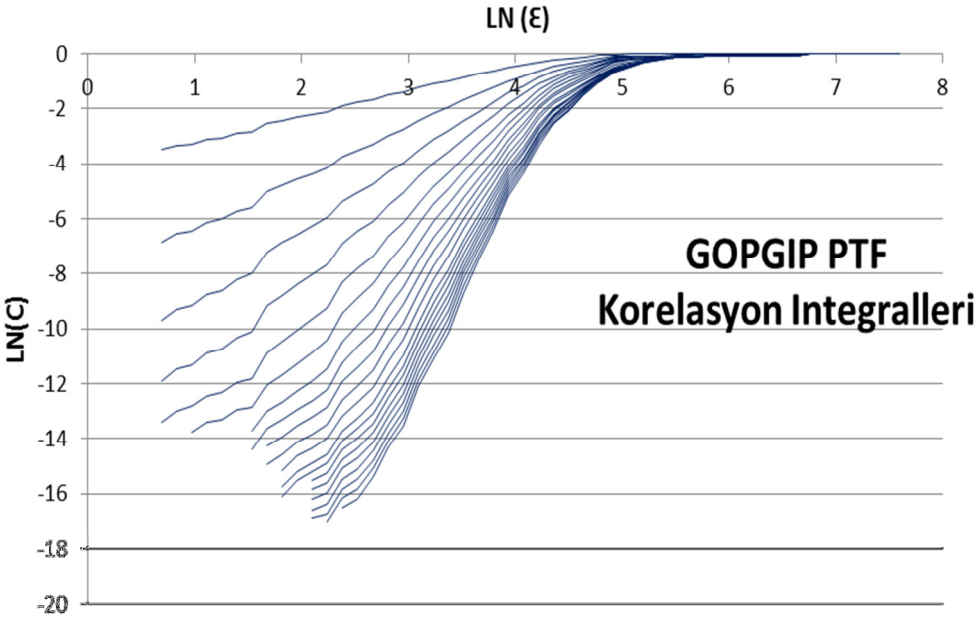
Şekil 6.25 : GOPGIP Faz Uzayı (3D)



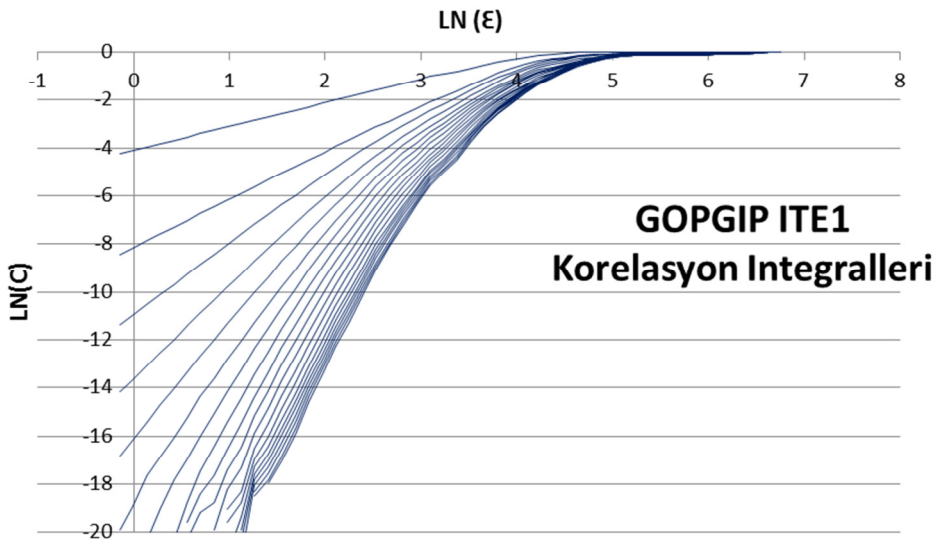
Şekil 6.26 : GOPGIP ITE4 Faz Uzayı (3D)

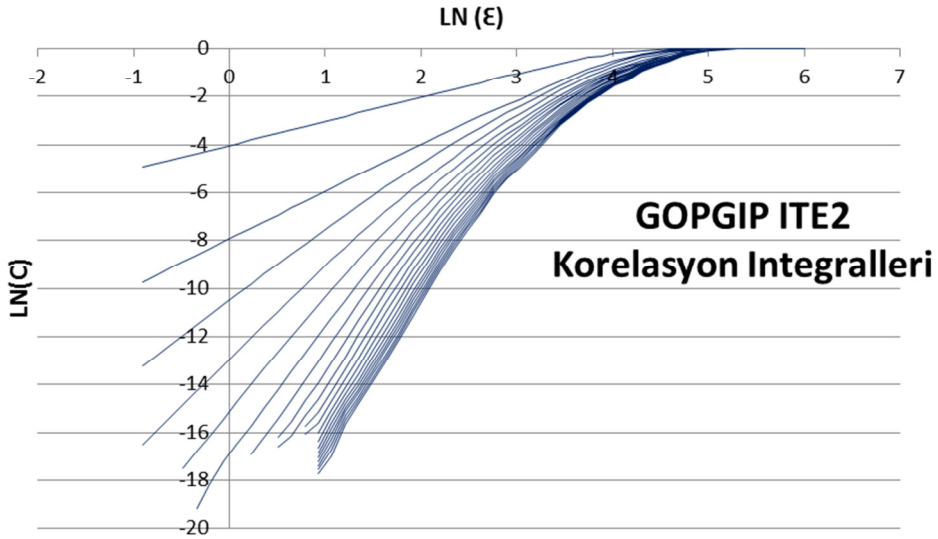
6.3.5 Korelasyon boyutu ve integralleri

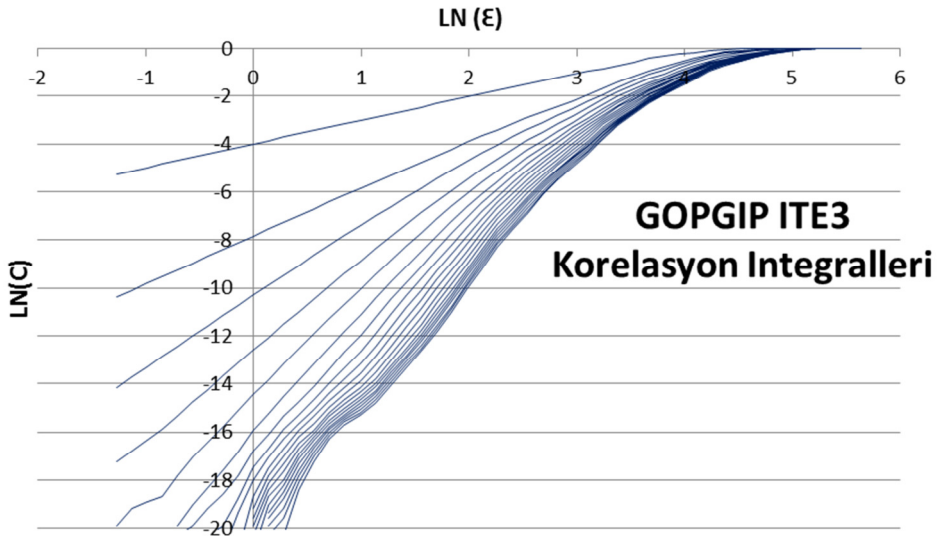
Koralesyon integrallerini hesaplama ve boyutunu belirleme kaotik sistemde var olan garip çekicinin fraktal yapıda olduğunu kanıtlamak için kullanılır. Bunun yanında Bölüm 6.2.1'de de bahsedildiği gibi gürültü azaltımını görsel olarak anlayabilmek için de korelasyon integrali grafikleri kullanılabilir. Orijinal zaman serisi GOPGIP ve gürültü azaltımı yapılmış zaman serileri GOPGIP ITE1, ITE2, ITE3 ve ITE4 korelasyon integralleri çizdirilerek karşılaştırma yapılabilir, hangi eğrilerin eğiminin daha düşük olduğu ve sabit bir eğime sahip bir doğru şekline hangisinin daha yakın olduğu görsel olarak incelenebilir. Bölüm 6.2.1'de de bahsedildiği gibi korelasyon boyutu ve integrali hesaplaması için TISEAN 3.0.1 paket programında d2 komutu kullanılmıştır. Programda d2 komutu sonuç olarak, seçilen boyut aralığı için her gömme boyutunda korelasyon integrali, korelasyon boyutu ve korelasyon entropisi değerlerini çıkartır. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından GÖP ve GİP dönemine ait tüm zaman serileri için hesaplanan korelasyon integralleri Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Hesaplamalar 1 ile 20 gömme boyutu değerleri arasında her seri için belirlenen uygun zaman gecikmesi değerleri ile yapılmıştır. Grafikler korelasyon boyutu hesaplamasında kullanılan ölçekte olması için logartimik ölçekte çizdirilmiştir. Kısacası grafiklerdeki her eğrinin eğim değeri, o gömme boyutu için korelasyon boyutunu vermektedir.



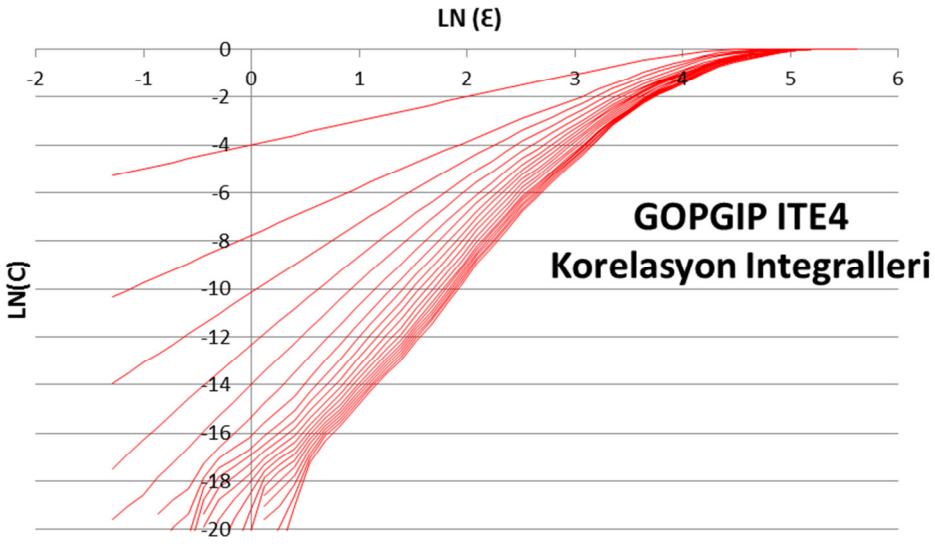
Şekil 6.27 : GOPGIP Serileri Korelasyon İntegralleri





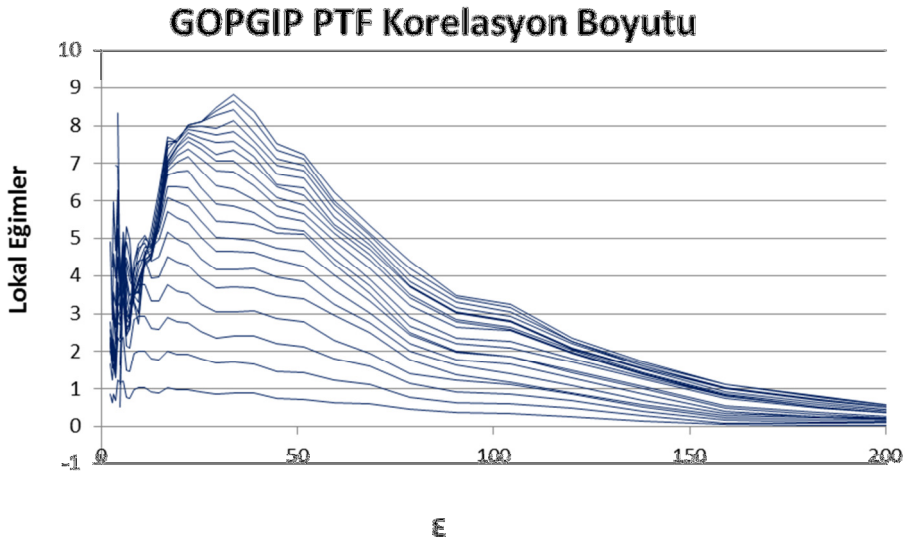


Şekil 6.27 (devam): GOPGIP Seriler Korelasyon İntegralleri

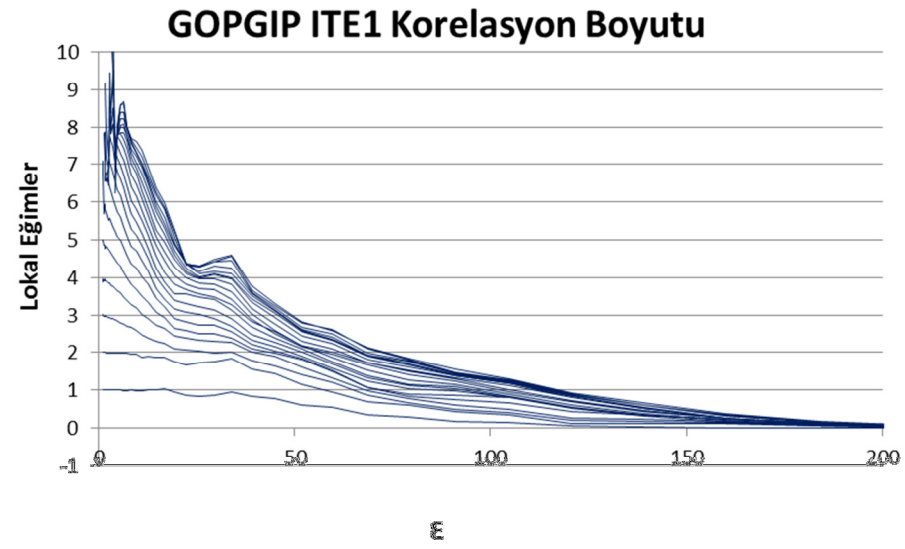


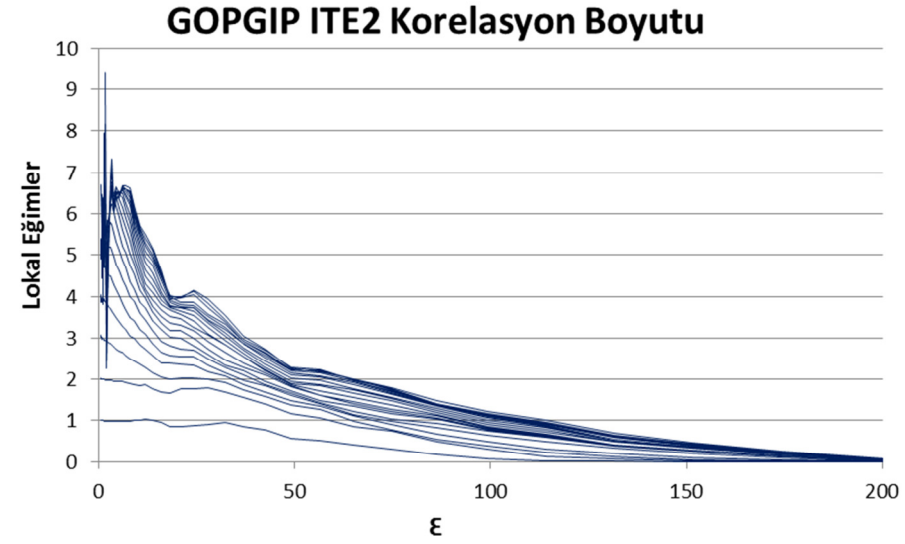
Şekil 6.27 (devam): GOPGIP Seriler Korelasyon İntegralleri

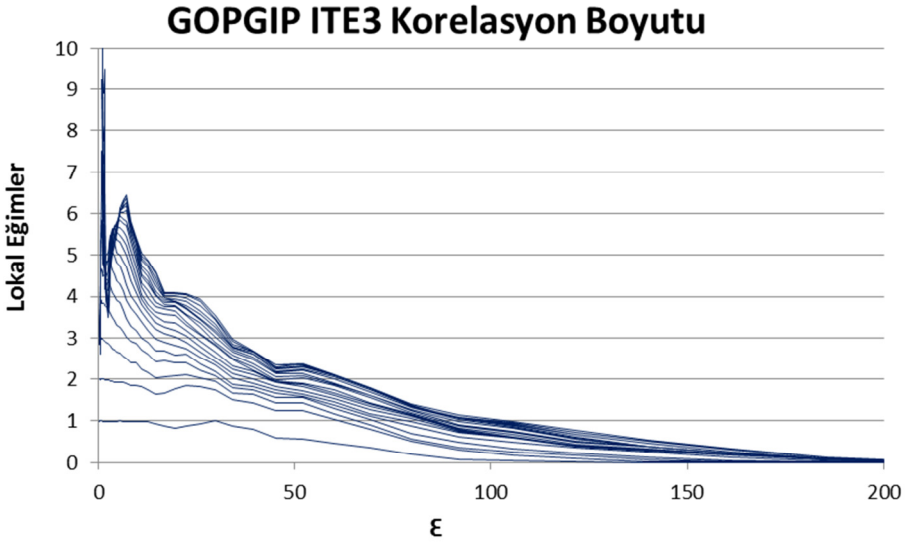
Şekil 6.27'de görülebildiği gibi 4. iterasyona doğru korelasyon integrali eğimleri azalmaktadır. ITE3 ile ITE4 serileri arasında çok az da olsa bir fark mevcuttur bu da ITE4 zaman serisinin gürültü azaltımı için yeterli olabileceğine dair bir kanıttır. Eğimlerdeki düşüş bu grafiklerde görsel olarak görülebildiği gibi korelasyon boyutu grafiklerinde de görülecektir çünkü zaten korelasyon boyutu bu grafiklerdeki eğim değerlerinden hesaplanmaktadır. Şekil 6.28'de bütün GOPGIP, GOPGIP ITE1, GOPGIP ITE2, GOPGIP ITE3 ve GOPGIP ITE4 serilerine ait korelasyon boyutu grafikleri görülmektedir. Yine aynı şekilde grafiklerdeki eğriler 20'ye kadar farklı gömme boyutlarını temsil etmektedir.



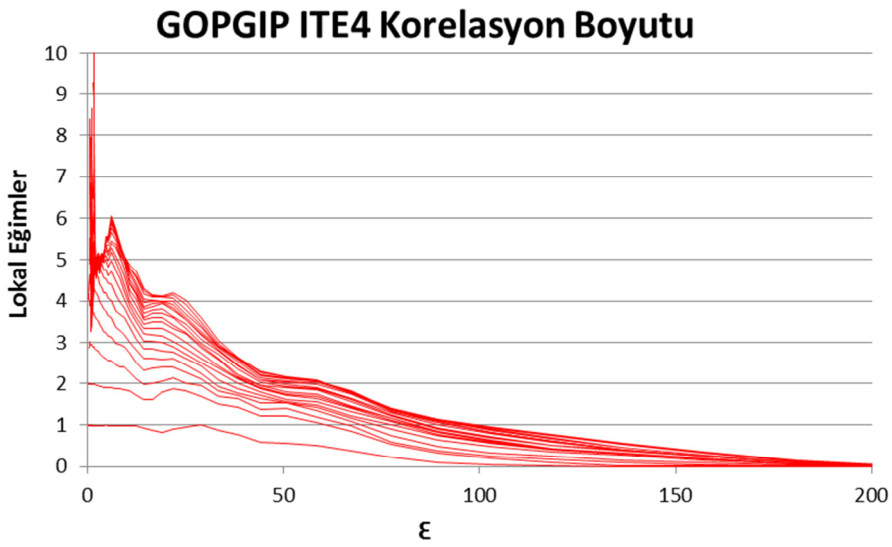
Şekil 6.28 : GOPGIP Serileri Korelasyon Boyutları







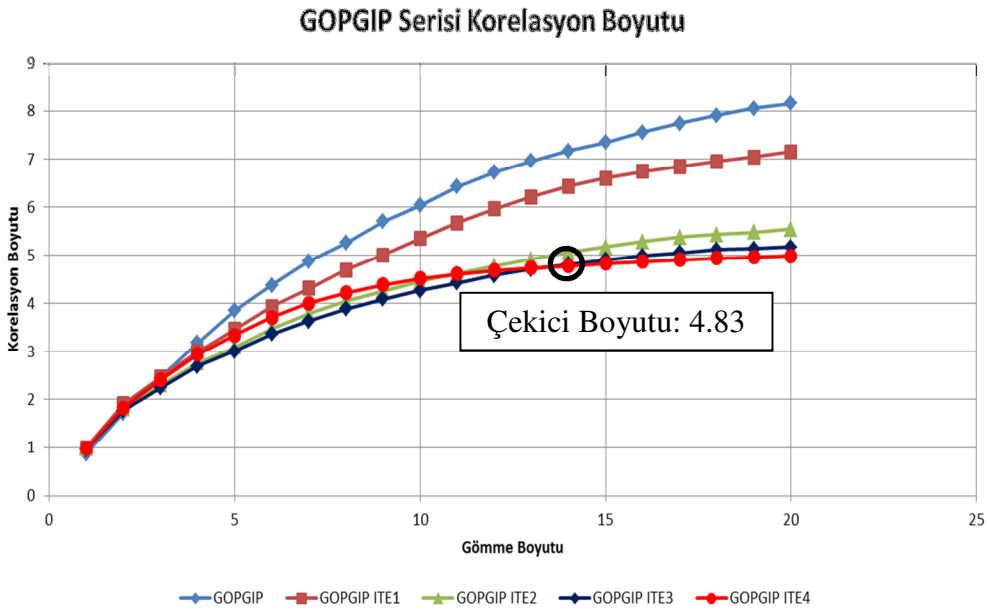
Şekil 6.28 (devam): GOPGIP Serileri Korelasyon Boyutları



Şekil 6.28 (devam): GOPGIP Serileri Korelasyon Boyutları

6.3.5.1 Fraktal boyut ve kaos tespiti

Kaotik sistemlerde kaos olduğunun en güçlü kanıtlarından birisi sistemde var olan çekicinin fraktal yani kesirli bir boyuta sahip olmasıdır. Bu bölümde her gömme boyutu için ayrı ayrı korelasyon boyutu değerleri çizdirilecek ve bütün GOPGIP serilerinde nasıl ilerledikleri incelenecektir. Fraktal boyut hesabı için matematiksel hesap dışında kullanılan yöntemlerden bir diğeri ise görsel olarak korelasyon boyutu grafiklerinde gömme boyutu yükseldikçe eğrilerin bir plato oluşturuyor olmasıdır. Örnek olarak Şekil 6.28'in son grafiğinde görülebileceği gibi 8.gömme boyutu eğrisinden sonra korelasyon boyutu 5'e yakın yerde bir plato oluşmuştur. Bu sebeple GOPGIP ITE4 serisinde çekici boyutunun 5'e yakın bir değer alması beklenmektedir. Şekil 6.29'da bütün zaman serileri için korelasyon boyutu hesapları gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi GOPGIP ITE4 serisi için yapılan hesaplarda gömme boyutu 20 değerine doğru korelasyon boyutu değerleri bir doyum noktasına ulaşmaktadır. Bölüm 6.3.3'te gösterildiği gibi GOPGIP ITE4 serisi uygun gömme boyutu değeri 14 olarak belirlenmişti. Bu gömme boyutu değerinde korelasyon boyutu artık doyum noktasına neredeyse ulaşmış olup 4.83 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu serideki çekici boyutunun fraktal boyutta olduğu gösterilmiş, bu da sistemde kaos varlığı için güçlü bir kanıt oluşturmuştur. Bunun yanında hesaplanan boyut değeri bu bölümde yukarıda bahsedilen görsel inceleme sonucu ulaşılan korelasyon boyutunun 5'e yakın değer alması beklentisine de tamamen uymaktadır.

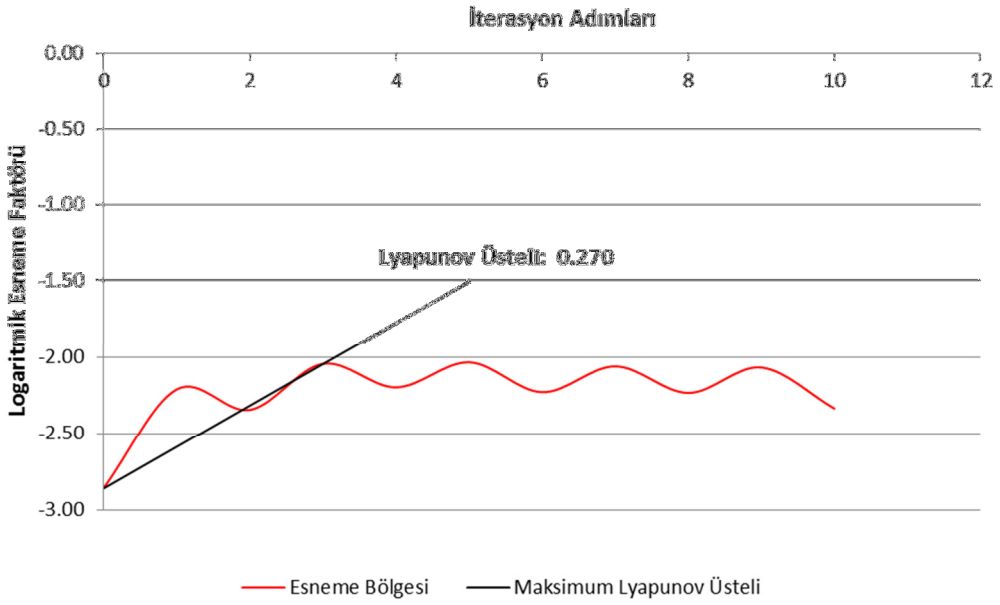


Şekil 6.29 : GOPGIP Serileri Korelasyon Boyutu – Gömme Boyutu

6.3.6 Lyapunov üsteli hesaplanması ve kaos tespiti

Pozitif Lyapunov üsteli varlığı lineer olmayan sistemlerde kaos varlığı için en önemli iki kanıttan birisidir. Lyapunov üsteli, faz uzayında yörüngelerin birbirinden ayrılma ölçüsünü verir ve kaotik sistemlerde başlangıç durumuna hassas bağlılık kriterini sağlar. Lyapunov üsteli hesaplamaları TISEAN 3.0.1 paket programında lyap_r komutu ile gerçekleştirilmiştir. Bu komutta girdi olarak kullanılan en önemli parametreler zaman gecikmesi, gömme boyutu ve minimum komşu alanı genişliğidir. Uygulamada GOPGIP ITE4 serisi kullanılmıştır. Zaman gecikmesi ve gömme boyutu değerleri daha önceden belirlenen ve anlatılan değerlerle aynı seçilmiş, komşu alanı genişliği de gürültü azaltımı yapıldıktan sonra serilerden hesaplanan gürültü genliği değeri olan 4'ten büyük olması açısından 5 seçilmiştir. Bunun yanında iterasyon sayısı olarak program kendiliğinden 50 değerini seçmektedir ancak yörüngelerin ayrılma oranının belli bir iterasyon sayısında sabitlenmesi beklenmektedir, bu sabitlenme gerçekleştiğinde program hesabı durdurur. Program çıktı olarak ise iterasyon sayısına karşılık esneme faktörünün logaritmasını verir. Bu esneme bölgesine uydurulan lineer eğrinin eğimi maksimum Lyapunov üstelinin değerini verir. Pozitif değerde olması kaos için yeterli kanıttır. GOPGIP ITE4 serisine ait esneme faktörü grafiği Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Bu grafiğe uydurulan eğrinin eğimi yani maksimum Lyapunov üsteli 0.270 olarak hesaplanmıştır. GOPGIP

ITE4 serisinde kaos varlığı fraktal boyut tespitinden sonra pozitif Lyapunov üsteli ile de kanıtlanmıştır.



Şekil 6.30 : GOPGIP ITE4 Maksimum Lyapunov Üsteli

6.4 Zaman Serilerinde Kısa Dönemli Tahmin Çalışması

Bu tez kapsamında öngörü için Bölüm 5.5.1'de bahsedilen lokal lineer haritalar yöntemi kullanılmıştır. Gürültü azaltımı yapılmış olan GOPlan ITE4 ve GOPGIP ITE4 ve yapılmamış olan GOPlan ve GOPGIP zaman serilerinde öngörü TISEAN 3.0.1 paket programı ve NDT programı aracılığıyla yapılmış, öngörü başarısı iki program için de değerlendirilip karşılaştırılmıştır.

TISEAN 3.0.1 paket programı Bölüm 5.5.1'de bahsedilen yöntemin tamamen aynısını kullanmaktadır. Programda öngörü için lfo_run komutu kullanılmıştır, bu komut için en önemli parametreler gömme boyutu, zaman gecikmesi ve tahmin edilecek nokta sayısıdır. Gömme boyutu ve zaman gecikmesi değerleri iki programda da zaman serilerinin daha önceden belirlenen değerlerine uygun olarak seçilmiştir. Tahmin edilen nokta sayısı ise 100 saat olarak belirlenmiştir. Bu belirlemede temel sebep kaotik sistemlerde uzun dönemli tahminin son derece zor olmasıdır. Bunun yanında mevcut piyasada fiyat teklifleri maksimum 5 gün sonraya kadar verilebilmektedir. 100 saat tahmini 4 günden bir miktar daha fazla bir zaman dilimi olduğu için tahmin için yeterli görülmüştür.

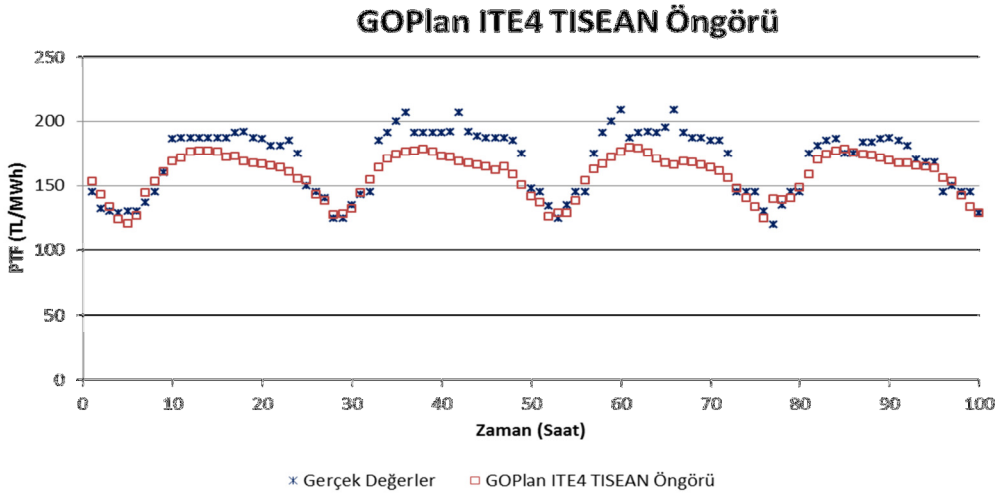
NDT programı temel olarak öngörü için aynı yöntemi kullanmaktadır. Her nokta etrafında bulunan komşu noktalar faz uzayında belirlenir, ve her bir noktanın bir sonraki adımda nereye doğru yön aldığı bellidir. Her noktada lineer haritalama yöntemi baz alınarak en küçük kareler yöntemiyle bir sonraki adım yaratılır ve öngürü bu şekilde devam ettirilir [35].

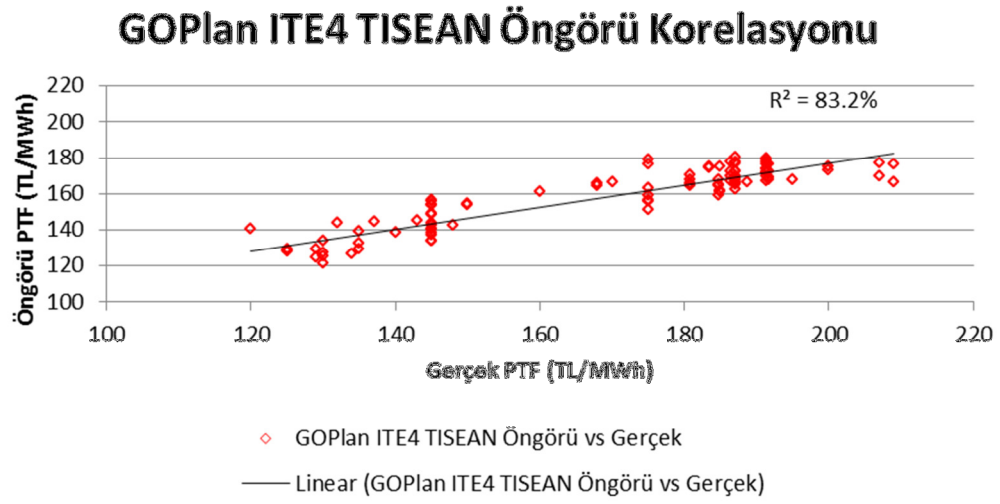
Orijinal zaman serisi ve gürültü giderimi yapılmış zaman serileri dışında bir uygulama olarak hafta içi ve hafta sonu günlerinin ayrı ayrı öngörüde ne gibi bir etkisi olduğunu anlayabilmek amacıyla bir çalışma daha yapılmıştır. Öngörü yapılan 4 günden bir miktar fazla olan süreç hem gün öncesi planlama hem de GÖP ve GİP dönemi serilerinde hafta içine denk gelmektedir. Bu noktada akla gelen soru hafta içi dönemi öngörüsü için zaman serilerinde sadece hafta içine ait enerji birim fiyatları kullanılsaydı sonucun ne olacağıdır. Bu yöntem kullanılarak hafta içi için yapılan öngörü başarısı yükseltilebilir mi? Teorik olarak bu sorunun cevabı evettir, sebebi ise faz uzayında noktaların birbirine daha çok yaklaştırılacağı gerçeğidir. Daha benzer komşu noktaların varlığı lineer haritalama yöntemiyle yapılan öngörünün başarısını da arttıracaktır. Bu soruya yanıt verebilmek amacıyla hem GOPlan hem de GOPGIP serilerinde hafta sonu değerleri çıkartılmış ve sadece hafta içi değerlerin var olduğu GOPlanWD ve GOPGIPWD serileri oluşturulmuştur. Doğal olarak oluşturulan bu serilerde de gürültü mevcut olacaktır. Gürültü giderimi yapabilmek amacıyla bölüm 6.2.1 ve 6.3.1'de anlatılan yöntemler izlenmiş ve yine en başarılı serinin 4.iterasyona ait seri olduğu tespit edilmiştir. Bu seriler de benzer bir adlandırmayla GOPlanWD ITE4 ve GOPGIPWD ITE4 isimleri verilmiştir.

6.4.1 Gün öncesi planlama dönemi öngörü

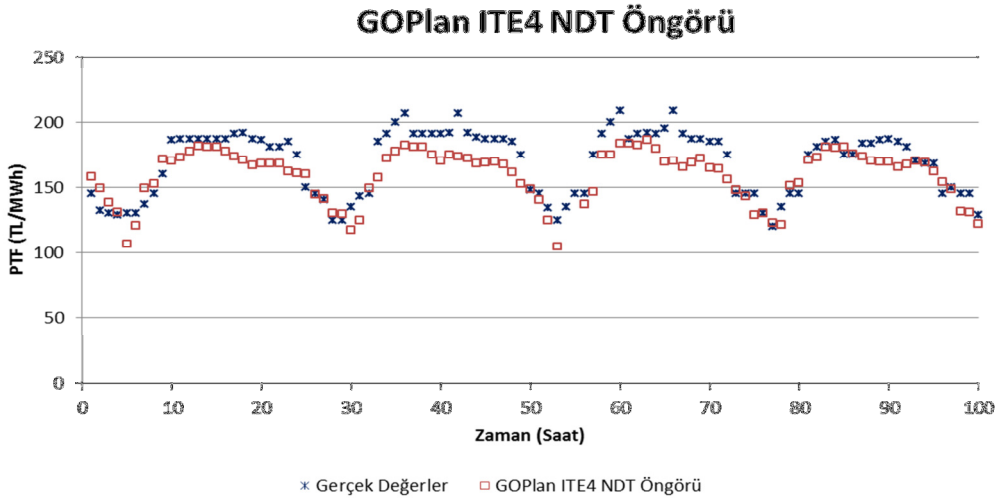
Öngörü için gürültü giderimi yapılmış ve seviyesi kanıtlanmış GOPlan ITE4 serisi ve karşılaştırma amaçlı orijinal serinin kendisi olan GOPlan serisi kullanılmıştır. Öngörü çalışması serinin son 100 saatlik bölümü için yapılmıştır. Hem TISEAN 3.0.1 programı hem de NDT programı zaman serisinin büyük bir bölümünü dinamikleri anlamak için kullanmaktadır.

GOPlan ITE4 serisinde TISEAN 3.0.1 ve NDT programlarıyla yapılan 100 saatlik öngörünün gerçek değerlerle karşılaştırması ve öngörünün R^2 başarısı Şekil 6.31 ve 6.32'de görülebilmektedir. Bunun yanında GOPlan serisi ile yapılmış çalışma sonuçları Şekil 6.33 ve 6.34'de verilmiştir.

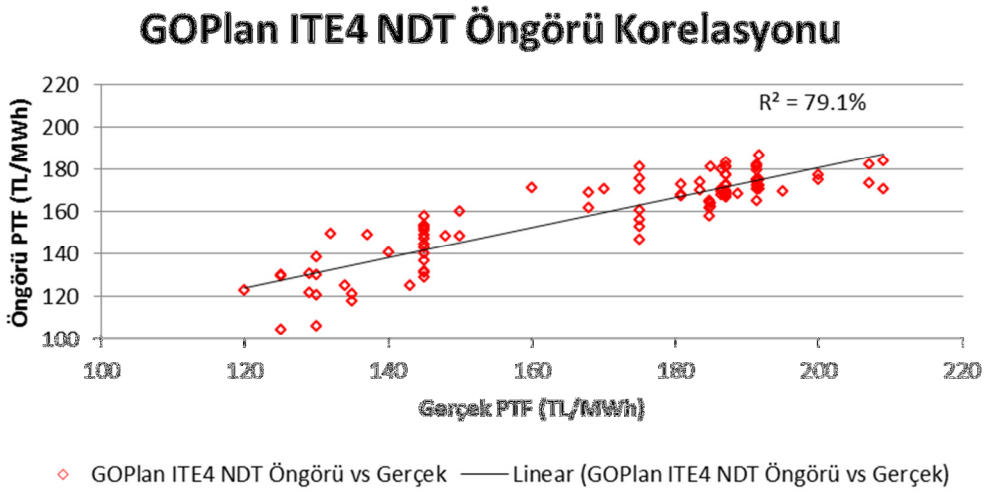




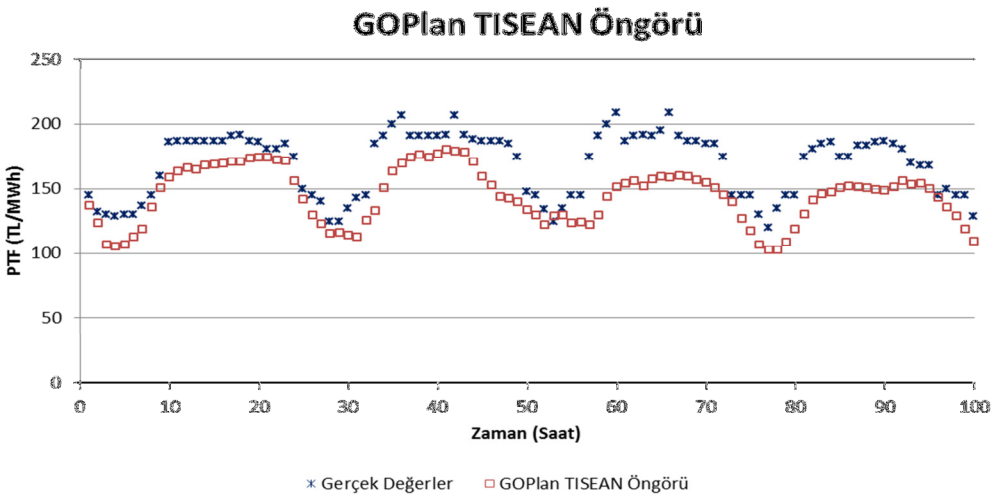
Şekil 6.31 : GOPlan ITE4 TISEAN Öngörü Korelasyonu

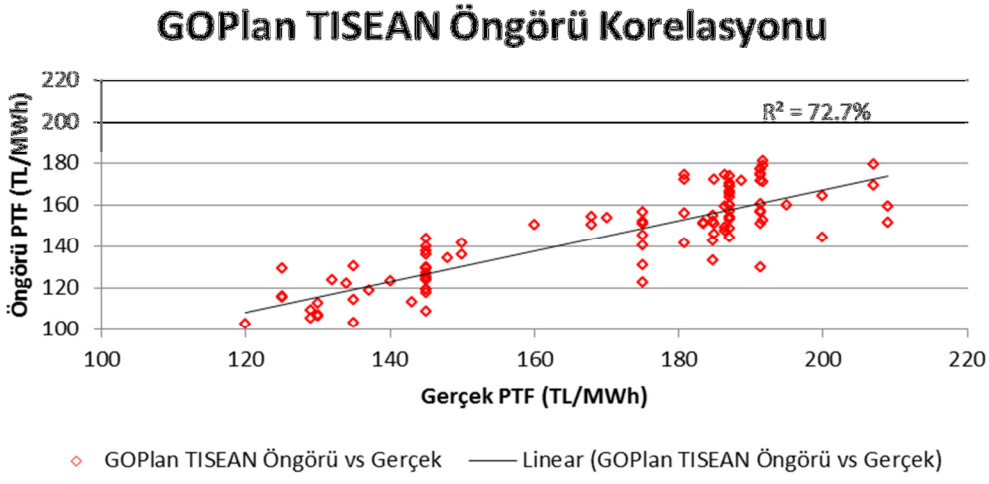


Şekil 6.32 : GOPlan ITE4 NDT Öngörü Korelasyonu

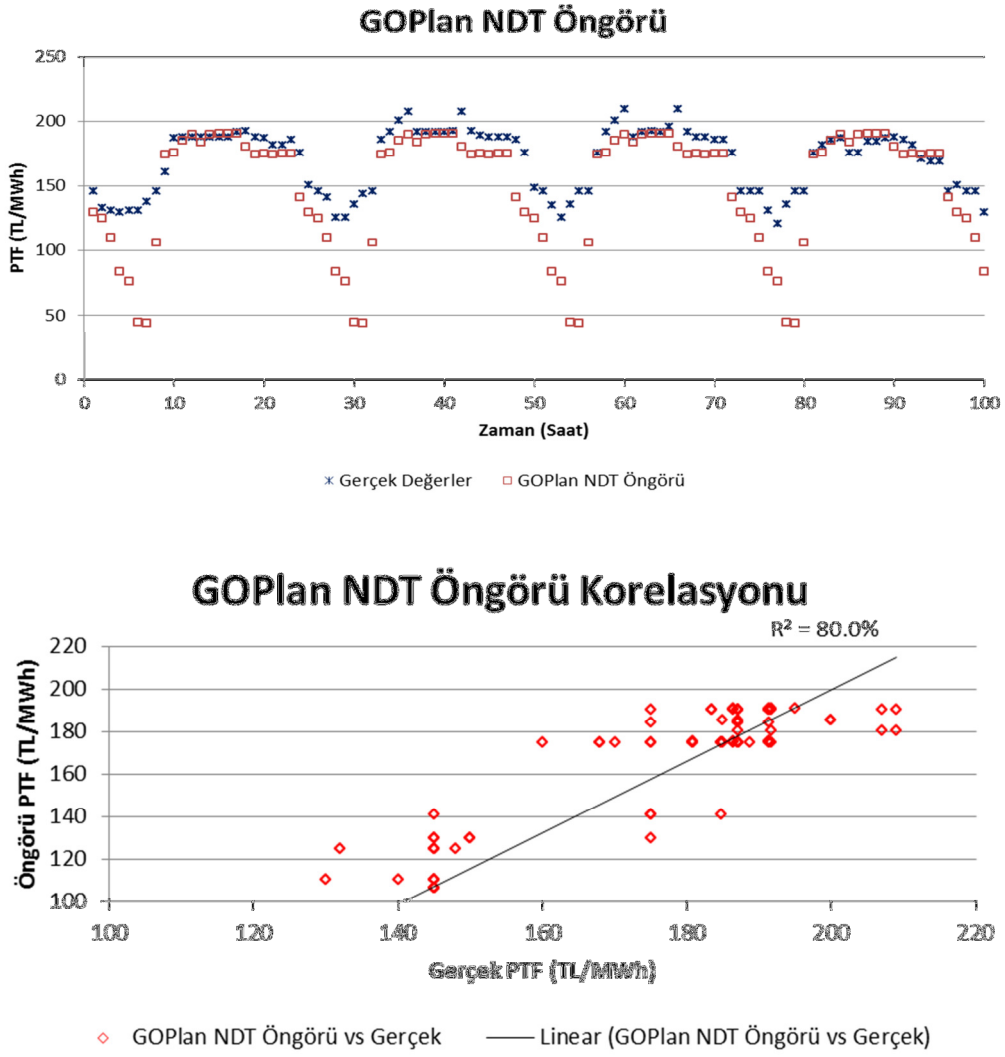


Şekil 6.32 (devam): GOPlan ITE4 NDT Öngörü Korelasyonu





Şekil 6.33 : GOPlan TISEAN Öngörü Korelasyonu



Şekil 6.34 : GOPlan NDT Öngörü Korelasyonu

Hem GOPlan ITE4 hem de GOPlan serisi ile yapılan öngörülerde R^2 başarısı şekillerde de görülebildiği çok yüksek seviyelerde değildir.GOPlan ITE4 serisi baz alınarak TISEAN 3.0.1 progamıyla yapılan öngörü R^2 başarısı 83.2%, NDT programı ile yapılan öngörü başarısı R^2 79.1% civarında elde edilmiştir. GOPlan serisi kullanılarak yapılan çalışmada TISEAN programıyla R^2 başarısı 72.7%, NDT programıyla 80% elde edilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi başarı kriteri için sadece R^2 kriterinin kullanılması doğru değildir. Bütün kriterlerin dahil edildiği karşılaştırma Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Öngörü değerleri genel olarak gerçek değerlerle benzer bir eğilimde gözükse de gerçekte meydana gelen bazı yüksek ve düşük PTF değerleri öngörü başarısını düşürmektedir. Gürültü giderimi yapılmış GOPlan ITE4 serisine bakıldığında öngörünün özellikle gün içerisindeki yüksek PTF değerlerini yakalayamadığı

görülür. Bunun temel sebebi lokal izdüşüm yöntemi ile gürültü azaltımı yapılırken gerçek serideki noktaların bir miktar aşağıya çekilmiş olmasıdır. GOPlan ITE4 serisinde düşürülmüş noktalar mevcut olduğundan öngörü yapılırken de lineer haritalama ile bu yüksek noktalara ulaşılamamaktadır. Ancak serinin genel davranışının yani artış ve azalış karakterinin gerçekle çok benzediğini söylemek mümkündür. GOPlan serisi ile yapılan öngörü çalışmasına bakıldığında ise özellikle NDT programıyla yapılan çalışmada gün içerisindeki yüksek noktaların yaakalanabildiği görülmektedir. Ancak Şekil 6.33'te görülebileceği gibi özellikle düşük noktalarda öngörü çok başarısız kalmış ve gerçek değerlerle arasındaki fark yüksek seviyelerde gerçeklemiştir. Her ne kadar R^2 başarısı kabul edilebilir bir seviyede olsa da bu fark NRMSE değerini kötü bir seviyeye çekmiştir.

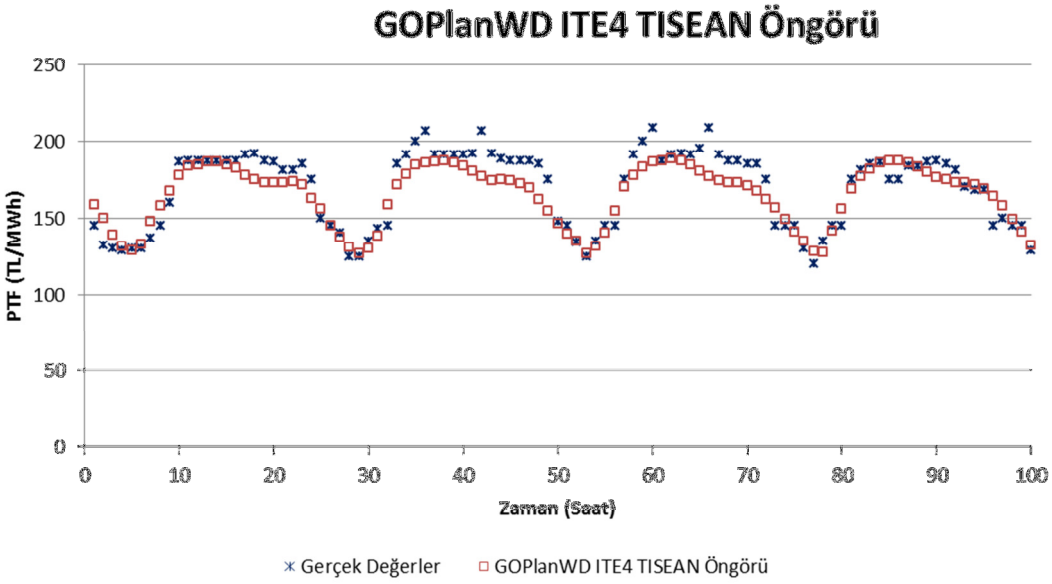
Bu sebeple Çizelge 6.5'de paylaşılan sonuçlara da dayanarak GOPlan ITE4 serisi ile yapılan öngörü başarısının GOPlan serisine göre daha yüksek seviyede olduğunu söylemek rahatlıkla mümkündür. Yani gürültü giderimi yapılmış seri daha iyi sonuç vermiştir.

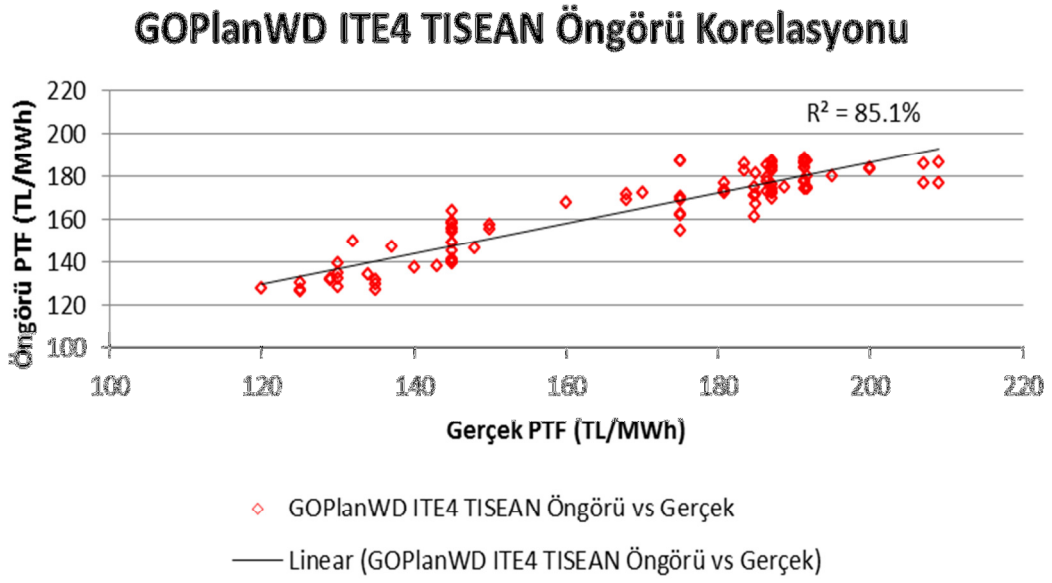
Çizelge 6.5 : GOPlan ITE4 ve GOPlan Öngörü Başarıları

Seri Adı / Program	Öngörü Miktarı (saat)	R2 (%)	RMSE (TL/MWh)	NRMSE (%)
GOPlan ITE4 / TISEAN	100	83.2	16.2	9.6
GOPlan ITE4 / NDT	100	79.1	15.3	9.1
GOPlan / TISEAN	100	72.7	27.9	16.5
GOPlan / NDT	100	80	34.4	20.3

Bu çalışmaya ek olarak daha önceden de bahsedildiği gibi sadece hafta içi günlerini içeren gürültü azaltımı yapılmamış GOPlanWD serisi ve gürültü azaltımı yapılmış GOPlanWD ITE4 serisi aynı dönem ile karşılaştırmak amacıyla öngörü için kullanılmıştır. Bu çalışma benzer bir sonuç elde edileceği öngörüsüyle sadece TISEAN 3.0.1 programı ile gerçekleştirilmiştir. GOPlanWD ITE4 serisine ait öngörü

korelasyonu Şekil 6.35'te, GOPlanWD serisine ait öngörü korelasyonu Şekil 6.36'da görülebilmektedir.

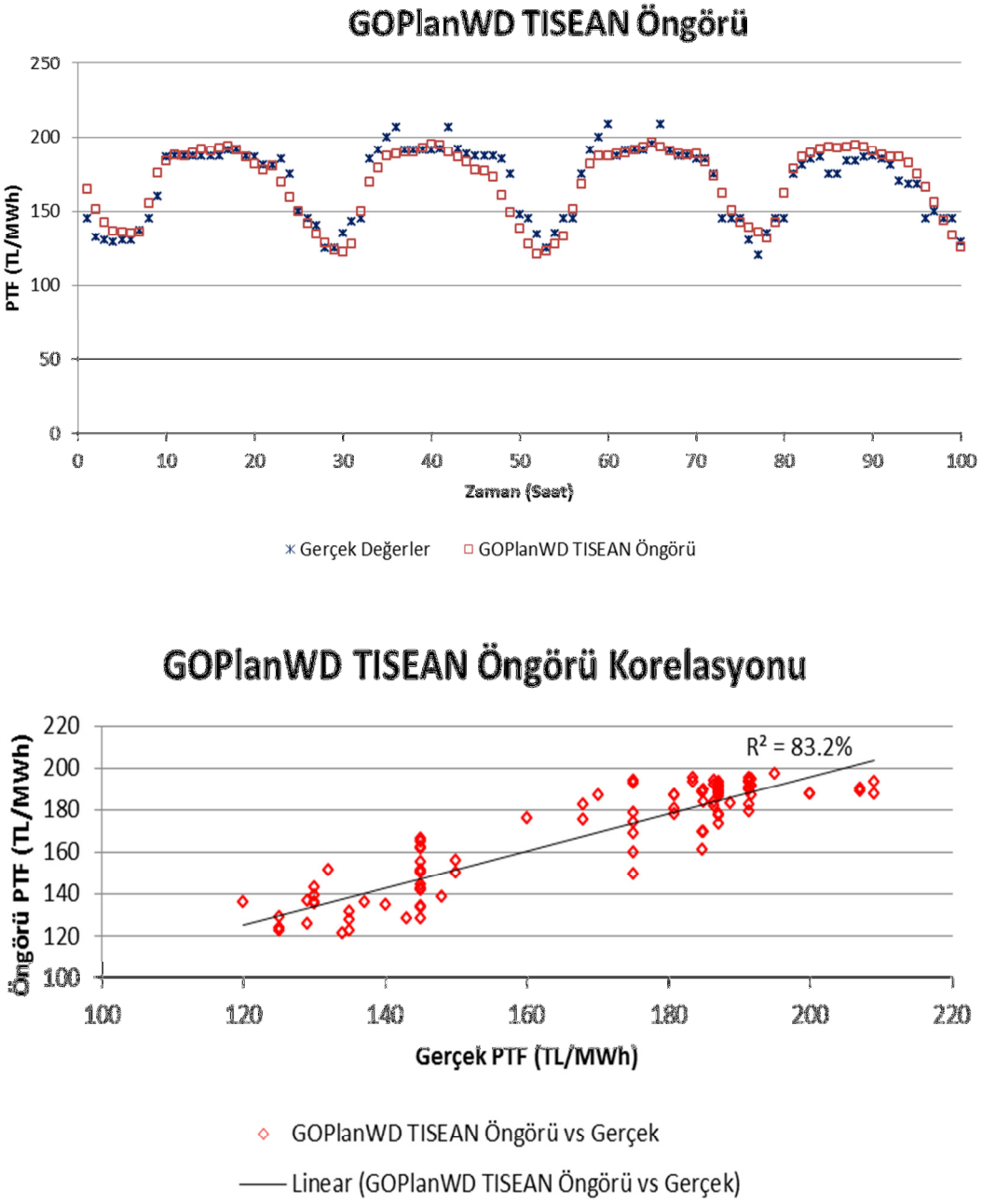




Şekil 6.35 : GOPlanWD ITE4 TISEAN Öngörü Korelasyonu

Şekil 6.35'te görülebildiği gibi GOPlanWD ITE4 serisi ile yapılan öngörüde başarı oranı yükselmiştir. İlk grafikte görsel olarak karşılaştırma yapıldığında bu seri ile yapılan öngörü ile GOPlan ITE4 serisiyle yakalanamayan yüksek PTF değerlerinin çok daha başarılı bir şekilde tahmin edildiği açıkça görülebilmektedir. Bu noktadan hareketle, tahmin edildiği gibi sadece hafta içi geçmiş değerlerin dahil edildiği seri ile hafta içi dönemi öngörüsü için daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Hafta

sonu değerlerinin seride mevcut olması lineer haritalamada başarının düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 6.36 : GOPlanWD TISEAN Öngörü Korelasyonu

GOPlanWD serisi ile yapılan çalışmada da GOPlan serisi ile yapılana kıyasla daha yüksek başarı seviyesi elde edilmiştir. İlk grafikte açıkça görülebildiği gibi yüksek PTF değerleri çok daha başarılı bir şekilde tahmin edilmiş fakat son bölümde öngörünün gerçek değerlere göre biraz yüksek seyretmesi sebebiyle başarı bir miktar

etkilenmiştir. Hafta içi değerlerinin kullanıldığı GOPlanWD ve GOPlanWD ITE4 serilerinde elde edilen öngörü başarıları Çizelge 6.6'da görülebilmektedir.

Sonuç olarak bu bölümde gün öncesi planlama dönemi serileri ile ilgili olarak yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir. Gürültü giderimi yapılmış GOPlan ITE4 serisinde öngörü başarısı, gürültü giderimi yapılmamış orijinal GOPlan serisine göre daha yüksek seviyelerde kalmış, TISEAN 3.0.1 ve NDT programları benzer sonuçlar vermişlerdir. Öngörü eğilimi genel olarak başarılı olsa da üst noktaları yakalamada özellikle gürültü giderimi yapılmış seride sıkıntı yaşanmıştır. Sadece hafta içi günlerinin dahil edildiği seriler kullanıldığında başarı oranının özellikle NRMSE kriterinin ciddi oranda iyileştiği görülmektedir. Gürültü azaltımı yapılmış ve yapılmamış orijinal seride başarı seviyesi birbirine çok yakın seviyede kalmıştır.

Çizelge 6.6 : GOPlan ITE4 ve GOPlan Öngörü Başarıları

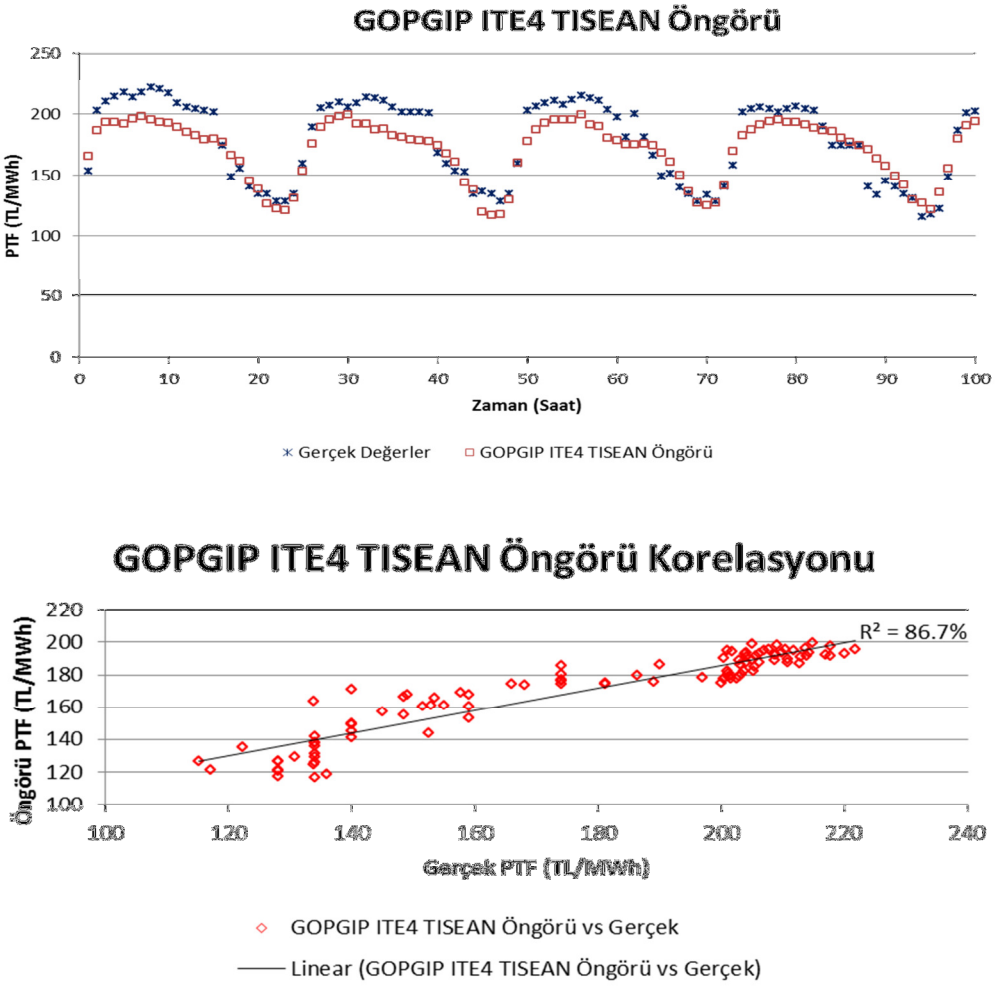
Seri Adı / Program	Öngörü Miktarı (saat)	R2 (%)	RMSE (TL/MWh)	NRMSE (%)
GOPlanWD ITE4 / TISEAN	100	85.2	11.6	6.6
GOPlanWD / TISEAN	100	83.2	10.2	6.0

6.4.2 GÖP ve GİP dönemi öngörü

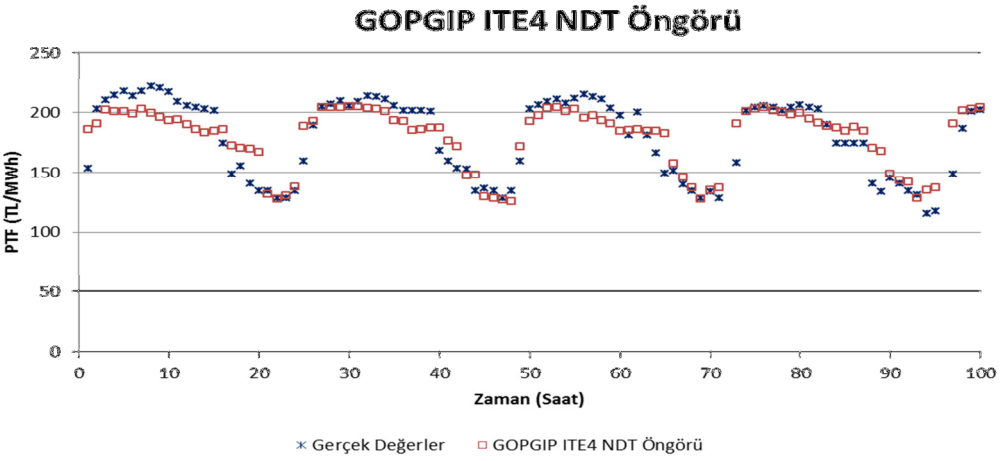
Öngörü için gürültü giderimi yapılmış ve seviyesi kanıtlanmış GOPGIP ITE4 serisi ve karşılaştırma amaçlı orijinal serinin kendisi olan GOPGIP serisi kullanılmıştır. Öngörü çalışması serinin son 100 saatlik bölümü için yapılmıştır. Hem TISEAN 3.0.1 programı hem de NDT programı zaman serisinin büyük bir bölümünü dinamikleri anlamak için kullanmaktadır. Noktaların faz uzayında nereden nereye hareket ettiğine dair elde ne kadar fazla sayıda örnek olursa tahmin için o kadar faydalı olacaktır.

Bu çalışmada yapılanlar temel olarak GOPlan serisinde uygulanan adımlarla tamamen aynı niteliği taşımaktadır. Tek fark çalışılan zaman serisinin GOPlan serileri değil, GÖP ve GİP dönemini birlikte temsil eden GOPGIP serileri olmasıdır. GOPGIP ITE4 serisinde TISEAN 3.0.1 ve NDT programlarıyla yapılan 100 saatlik

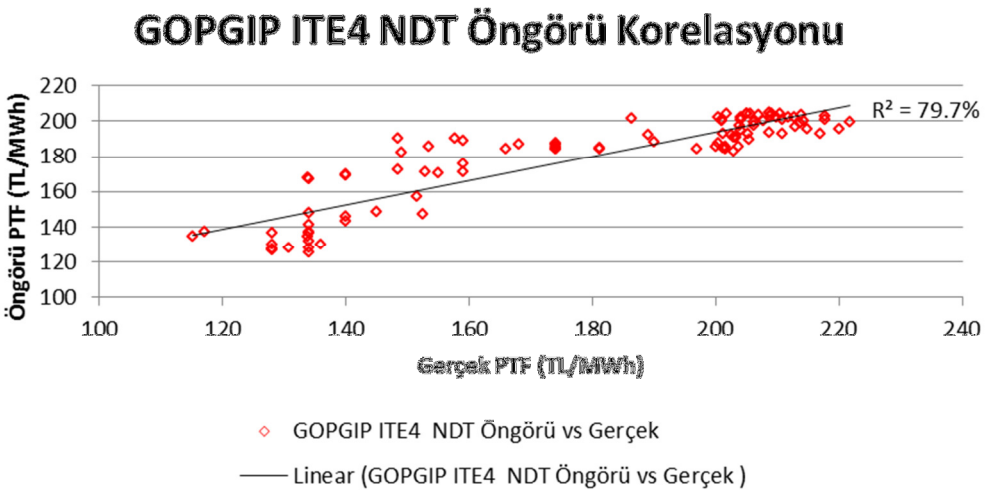
öngörünün gerçek değerlerle karşılaştırması ve öngörünün R^2 başarısı Şekil 6.37 ve 6.38'de görülebilmektedir. Bunun yanında GOPGIP serisi ile yapılmış çalışma sonuçları Şekil 6.39 ve 6.40'ta verilmiştir.



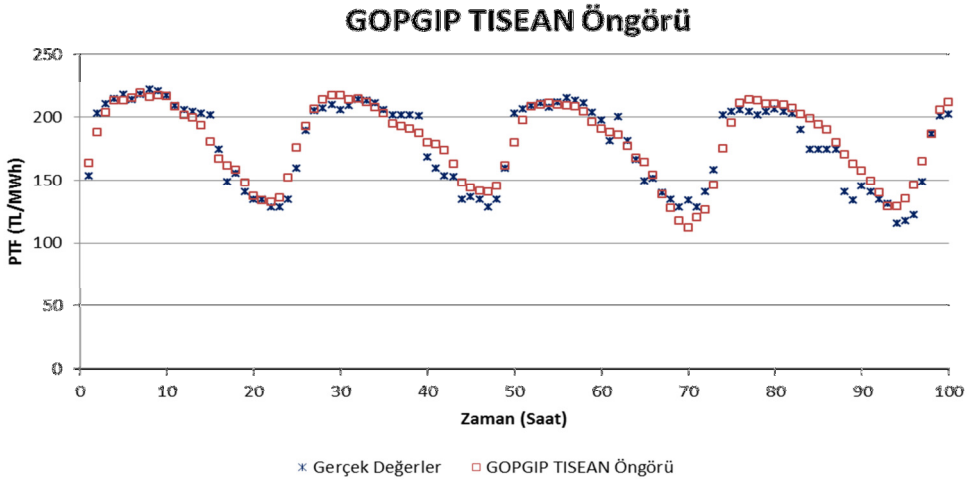
Şekil 6.37 : GOPGIP ITE4 TISEAN Öngörü ve R^2

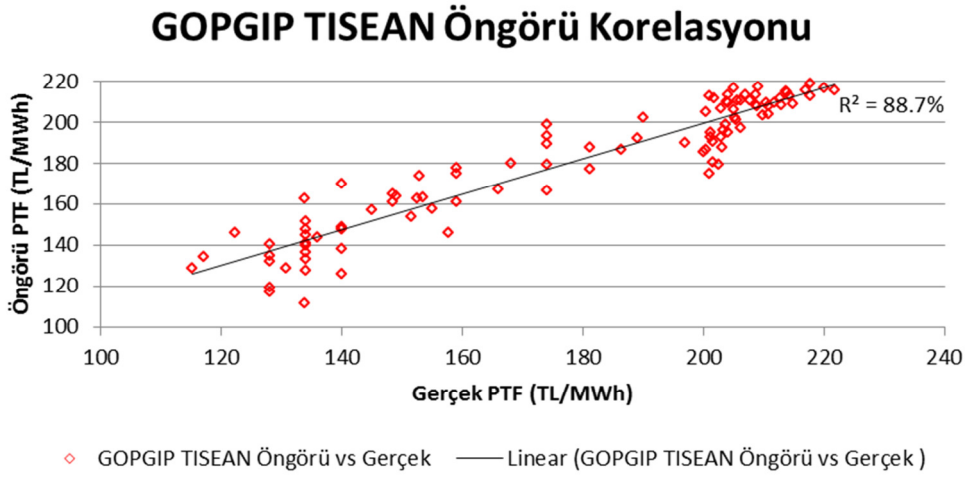


Şekil 6.38 : GOPGIP ITE4 NDT Öngörü ve R^2

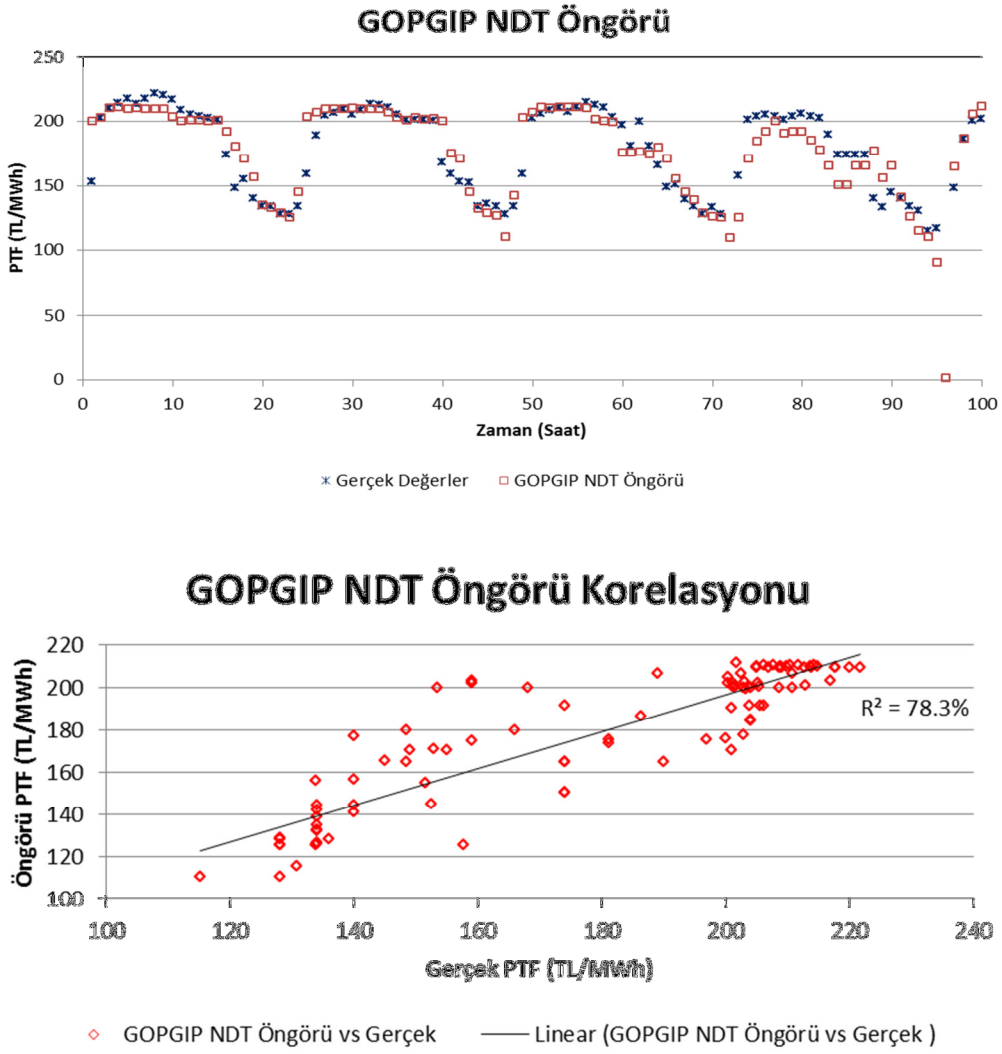


Şekil 6.38 (devam): GOPGIP ITE4 NDT Öngörü ve R^2





Şekil 6.39 : GOPGIP TISEAN Öngörü ve R^2



Şekil 6.40 : GOPGIP NDT Öngörü ve R^2

GOPGIP ITE4 hem de GOPGIP serileri ile yapılan öngörülerde R^2 başarısının GOPlan serileri ile kıyaslandığında daha yüksek boyutta olduğu açıkça görülebilmektedir. GOPGIP ITE4 serisi baz alınarak TISEAN 3.0.1 programıyla yapılan öngörü R^2 başarısı 86.7%, NDT programı ile yapılan öngörü başarısı R^2 79.7% civarında elde edilmiştir. GOPGIP serisi kullanılarak yapılan çalışmada TISEAN programıyla R^2 başarısı 88.7%, NDT programıyla 71.7% elde edilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi başarı kriteri için sadece R^2 kriterinin kullanılması doğru değildir. Bütün kriterlerin dahil edildiği karşılaştırma Çizelge 6.7'de verilmiştir.

GOPGIP serilerinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta öngörü başarısının gürültü giderimi yapılmamış seride daha yüksek olduğu gerçeğidir. Aslında benzer bir durum GOPlan serilerinin görsel incelemesi esnasında da görülmüştü ancak

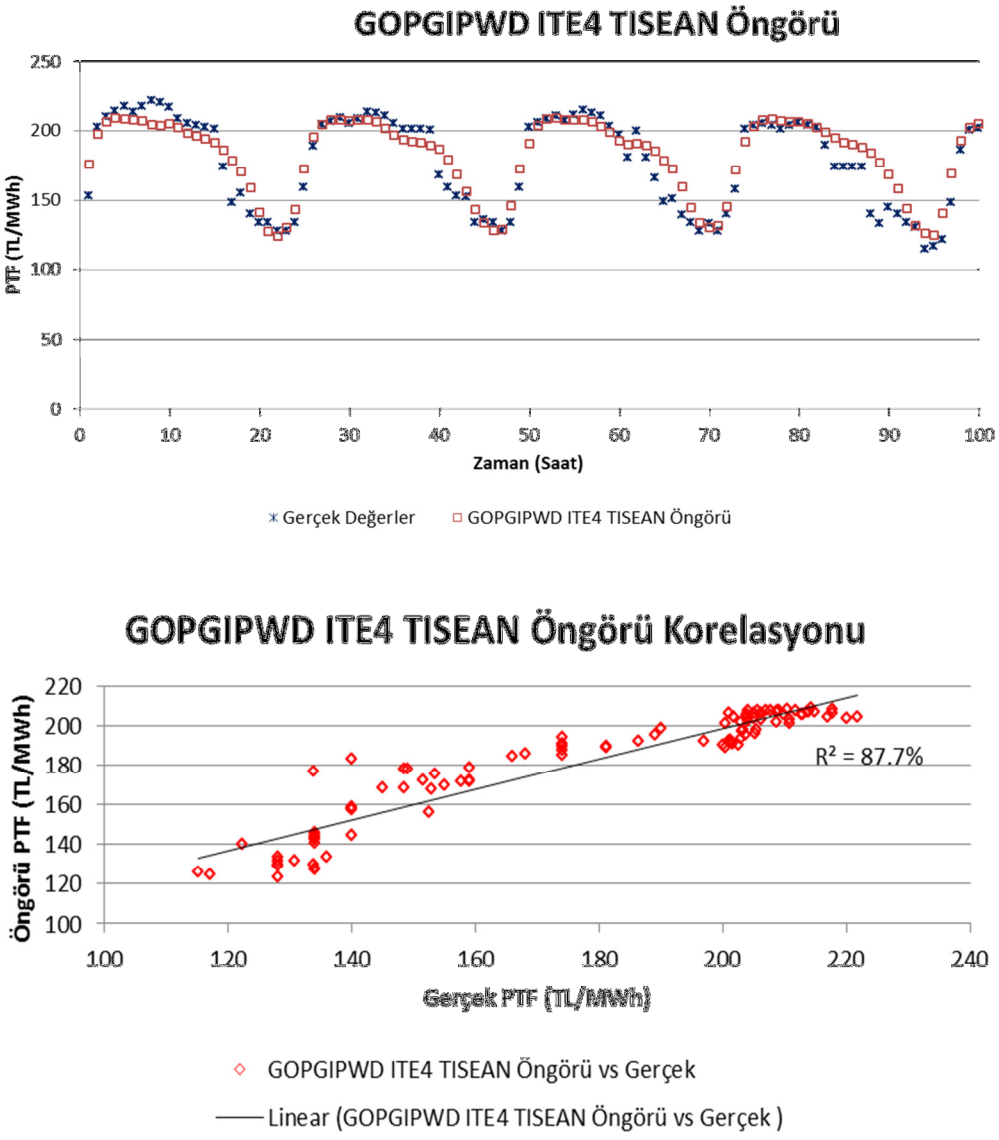
korelasyon katsayısı R^2 değerleri gürültü giderimi yapılmış seride daha iyi boyutta bulunmuştu. Temel olarak gürültü giderimi yapılmamış seride başarının daha iyi bulunması durumu, GOPlan serilerinde olduğu gibi gürültü giderimi yapılmış seride yüksek PTF değerlerine ulaşamama ile açıklanabilir. ITE4 serilerinde her ne kadar gürültü azaltıldığı kanıtlanmış olsa da sistemin kendi dinamiklerinde bir değişikliğe sebep olunmadığı kanıtlanamaz. Ayrıca öngörü kısa dönemli olduğu için başarı, hangi dönemde öngörü yapıldığı ile de ilgilidir. Özellikle aykırı noktaların çokça olduğu bir döneme denk gelindiğinde öngörü başarısı ciddi oranda düşecektir. GOPGIP ITE4 serisinde de yaşanan buna benzer bir durumdur.Gürültü azaltımı esnasında yüksek noktaların bir kısmı lokal izdüşüm yöntemi ile düşürülmüş olduğundan GOPGIP ITE4 serisi ile yapılan öngörü GOPGIP serisi ile yapılan öngörüye göre daha başarısız kalmaktadır. Bu, GOPlan serilerinde olduğu gibi sonuca sadece görsel olarak değil, R^2 ve NRMSE başarısı olarak da yansımaktadır. GOPGIP serisi ile elde edilen öngörü başarısı GOPGIP ITE4 serisine göre özellikle TISEAN programında her açıdan daha yüksek gözükmektedir.

Çizelge 6.7 : GOPGIP ITE4 ve GOPGIP Öngörü Başarısı Karşılaştırma

Seri Adı / Program	Öngörü Miktarı (saat)	R2 (%)	RMSE (TL/MWh)	NRMSE (%)
GOPGIP ITE4 / TISEAN	100	86.7	15.4	8.6
GOPGIP ITE4 / NDT	100	79.7	14.9	8.4
GOPGIP / TISEAN	100	88.8	11.3	6.3
GOPGIP / NDT	100	78.3	18.8	10.5

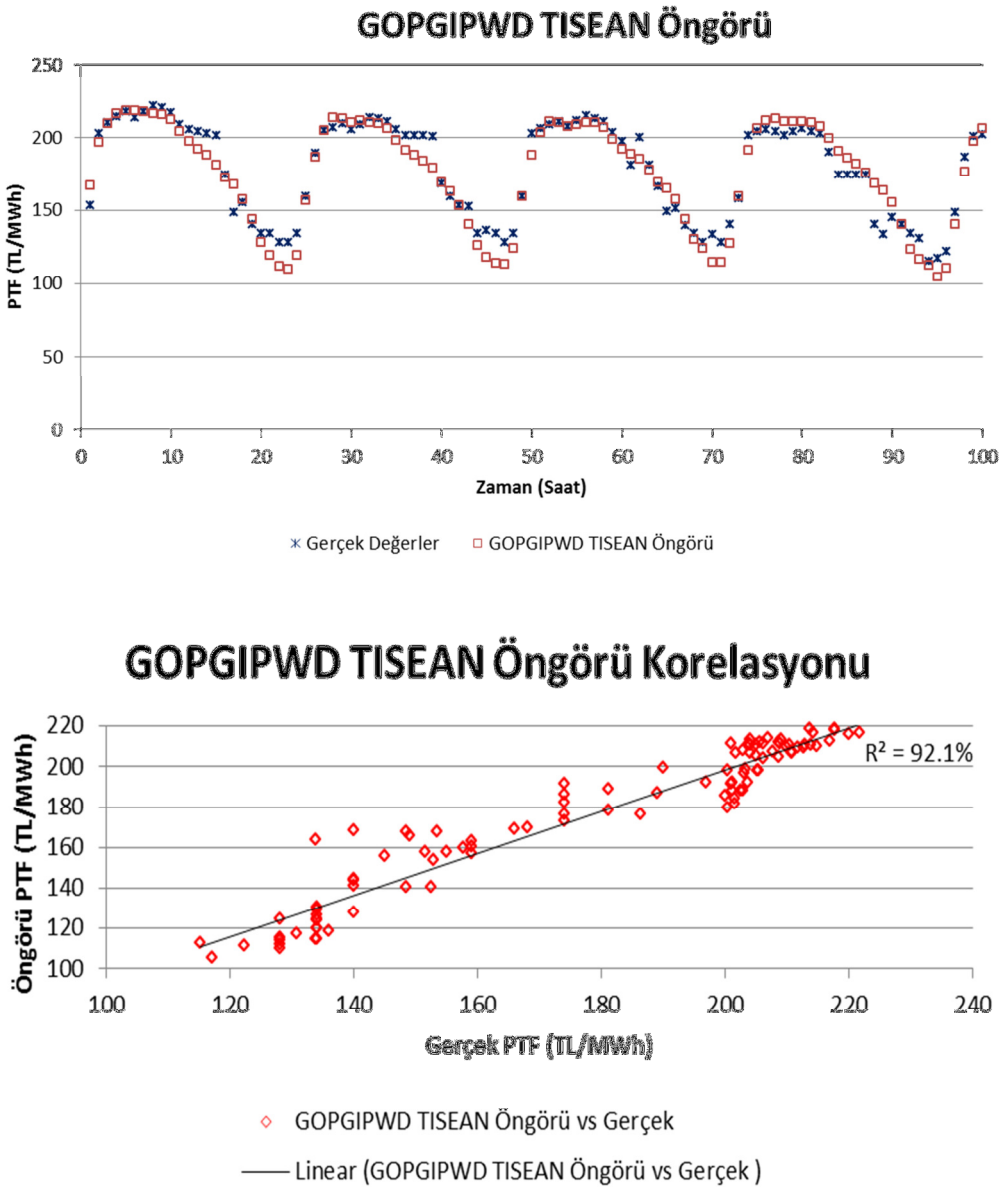
Bu çalışmaya ek olarak daha önceden de bahsedildiği gibi sadece hafta içi günlerini içeren gürültü azaltımı yapılmamış GOPGIPWD serisi ve gürültü azaltımı yapılmış GOPGIPWD ITE4 serisi aynı dönem ile karşılaştırmak amacıyla öngörü için kullanılmıştır. Çalışma benzer bir sonuç elde edileceği öngörüsüyle sadece TISEAN 3.0.1 programı ile gerçekleştirilmiştir. GOPlanWD ITE4 serisine ait öngörü

korelasyonu Şekil 6.41'de, GOPlanWD serisine ait öngörü korelasyonu Şekil 6.42'de görülebilmektedir.



Şekil 6.41 : GOPGIPWD ITE4 TISEAN Öngörü ve R^2

Şekil 6.41'de görülebildiği gibi GOPGIPWD ITE4 serisi ile yapılan öngörüde başarı oranı yükselmiştir. İlk grafikte görsel olarak karşılaştırma yapıldığında bu seri ile yapılan öngörü ile GOPGIP ITE4 serisiyle yakalanamayan yüksek PTF değerlerinin çok daha başarılı bir şekilde tahmin edildiği açıkça görülebilmektedir. Bu noktadan hareketle tahmin edildiği gibi sadece hafta içi değerlerin dahil edildiği seri ile hafta içi dönemi öngörüsü için daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Hafta sonu değerlerinin seride mevcut olması lineer haritalamada başarının düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 6.42 : GOPGIPWD TISEAN Öngörü ve R^2

GOPGIPWD serileri ile yapılan çalışmada GOPGIP serileri ile yapılana kıyasla daha yüksek başarı seviyesi elde edilmiştir. İlk grafikte açıkça görülebildiği gibi yüksek PTF değerleri çok daha başarılı bir şekilde tahmin edilmiş bu sebeple başarı oranı her kriterde yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Hafta içi değerlerinin kullanıldığı GOPGIPWD ve GOPGIPWD ITE4 serilerinde elde edilen öngörü başarıları Çizelge 6.8'de görülebilmektedir.

Sonuç olarak bu bölümde GÖP ve GİP serileri ile ilgili olarak yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir. Gürültü giderimi yapılmamış orijinal GOPGIP serisinde öngörü başarısı, gürültü giderimi yapılmış GOPGIP ITE4 serisine göre daha yüksek

seviyelerde kalmış, özellikle TISEAN 3.0.1 programı net olarak daha iyi sonuçlar göstermiştir. GOPGIP ITE4 serisinde öngörü başarısı hem TISEAN hem NDT programı için yakın seviyelerde kalmıştır. GOPGIP serilerinde yapılan çalışma üst noktaları yakalama konusunda GOPlan serilerindeki çalışmaya göre daha başarılı gözükmektedir. Bunun sebebi olarak veri sayısının ve uzunluğunun seri karakterini öğrenme anlamında daha uzun olması gösterilebilir. Sadece hafta içi günlerinin dahil edildiği seriler kullanıldığında, başarı oranının hem R^2 hem de NRMSE kritererlerinde ciddi oranda iyileştiği görülmektedir. Hafta içi serilerinde de gürültü azaltımı yapılmamış serinin başarı oranı gürültü azaltımı yapılmış serideki öngörü başarısına göre daha yüksek seviyede olmuştur.

Çizelge 6.8 : GOPGIPWD ITE4 ve GOPGIPWD Öngörü Başarısı

Seri Adı / Program	Öngörü Miktarı (saat)	R2 (%)	RMSE (TL/MWh)	NRMSE (%)
GOPGIPWD ITE4 / TISEAN	100	87.7	12.6	7.1
GOPGIPWD / TISEAN	100	92.1	10.2	5.7

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tezde amaçlanan, Türkiye elektrik enerjisi birim fiyatlarında kaos varlığını araştırmak ve sadece zaman serisinden yararlanarak kısa dönemli tahmin çalışması yapmaktır. Tez içeriğinde, Türkiye elektrik piyasası hakkında genel bilgiler, incelenecek zaman serileri için arka plan bilgileri, kaos teorisinin temel matematiksel açıklamaları, kaos tespit yöntemleri ve öngörü çalışması bulunmaktadır. Literatürde Türkiye elektrik enerjisi fiyatları üzerine yapılmış olan herhangi bir kaotik analiz çalışmasına rastlanmamıştır. Öngörü için çeşitli yöntemlerle yapılmış pek çok çalışma bulunuyor olsa da bu çalışmalar koas teorisine dayanmamaktadır.

Uygulamanın ilk aşamasında zaman serileri Türkiye'deki elektrik piyasası değişim tarihlerine göre ikiye ayrılmış, gün öncesi planlama bir dönem, GÖP ve GİP farklı bir dönem olarak incelenmiştir. Zaman serileri GOPlan ve GOPGIP olarak ikiye ayrıldıktan sonra gürültü giderimi yapılmıştır. Gerçek hayatta her veride olduğu gibi bu serilerde de gürültünün varlığı çok olasıdır. Literatürde lineer olmayan zaman serileri analizinde en çok kullanılan ve en güvenilir programlardan biri olan TISEAN 3.0.1 paket programı kullanılmıştır. İlk olarak serilerdeki gürültü genliğinin ne kadar olduğunu tespit etmek için analiz yapılmış, gürültü giderimi sonrası bu genliğin hangi noktaya indiği incelenmiştir. Bunun yanında korelasyon integrallerinin şekli itibariyle serideki gürültü varlığı için görsel analiz de yapılmıştır. Gürültü gideriminde iki seride de farklı iterasyonlar denenmiş ve 4.iterasyonların iki seri için de uygun olduğu tespiti yapılmıştır. İterasyon sayısını daha da fazla almak serinin kendi dinamiklerini bozacağından minimum kabul edilebilir seviye olarak 4.iterasyon belirlenmiştir.

Gürültü seviyesi açısından kabul edilebilir seriler elde edildikten sonra kaotik analize geçilmiştir. Zaman serilerini temsil edecek faz uzaylarının kurulması atılması gereken ilk adımdır. Bunun için öncelikle bütün serilerde zaman gecikmesi TISEAN 3.0.1 programında OBF yardımıyla elde edilmiştir. Yine aynı programda YEYK yöntemiyle her seri için uygun gömme boyutu tespit edilmiş ve FUYK aşaması tamamlanmıştır. Faz uzayları görsel olarak 2D ve 3D grafiklerde TISEAN3.0.1 ve

NDT programları yardımıyla incelenmiş, çekici varlığı araştırılmıştır. Kaotik analizde matematiksel yapılan incelemeler bilimseliik açısından ne kadar önemli olsa da görsel incelemeler de pek çok adımda yardımcı olmaktadır. FUYK aşaması tamamlandıktan sonra çekici boyutunu ve serilerdeki gürültü seviyesini anlamamızı sağlayan korelasyon integali ve korelasyon boyutu hesapları TISEAN 3.0.1 programı ile yapılmıştır. Gürültü gideriminde iterasyon sayısına karar vermede yardımcı olan korelasyon integralleri her iterasyon için görsel olarak gösterilmiştir. Bir sonraki adımda lineer olmayan sistemlerde kaos varlığının en önemli iki kanıtından biri olan çekici boyutunun fraktal olması kriteri test edilmiştir. Çekici boyutu korelasyon integrali grafiğinden her gömme boyutunda ayrı ayrı hesaplanmış ve nasıl ilerlediği incelenmiştir. İki zaman serisi için de çekici boyutları tespit edilmiş, belli bir gömme boyutundan sonra sabit bir değere çok yaklaştığı görülmüştür. Çekici boyutlarının iki zaman serisinde de 5'e yakın değer aldığı görülmüş ve fraktal yani kesirli yapıda olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntemle serilerdeki kaos varlığı bir yönden kanıtlanmıştır. Bunun yanında YEYK yöntemiyle belirlenen gömme boyutu değerleriyle, hesaplanan çekici boyutlarının yörüngelerin tekilliği ilkesi açısından çok önemli olan 2D+1 kriterini sağladığı görülmüştür. Çekici boyutları korelasyon integrallerinden matematiksel olarak yapılan hesaplamanın yanında korelasyon boyutu grafiklerinde de görsel olarak incelenmiştir. Görsel olarak grafiklerde tespit edilen çekici boyutu ile hesaplanan çekici boyutu değerlerinin son derece uyumlu olduğu görülmüştür.

Lineer olmayan sistemlerde kaos varlığının diğer önemli kriteri pozitif Lyapunov üsteli varlığıdır. Bunun anlamı aslında yörüngelerin birbirinden hızlı bir şekilde ayrılıyor oluşu yani diğer bir deyişle başlangıç durumuna hassas bağlılık koşuludur. Lyapunov üstelleri TISEAN 3.0.1 paket programı yardımıyla hesaplanmıştır. Esneme faktörü logartimik ölçekte her iterasyon için hesaplanmış ve bu grafikteki eğim maksimum Lyapunov üstelinin değerini vermiştir. İki seri de için de pozitif Lyapunov üsteli tespiti yapılmış ve serilerin ikisinin de kaotik olduğu tam olarak kanıtlanmıştır. Bu adımla birlikte kaotik analiz başarıyla tamamlanmıştır.

Uygulamanın son aşamasında zaman serilerinde kısa dönemli tahmin çalışması yapılmaya çalışılmıştır. Kaotik sistemlerde daha önceden anlatılan başlangıç durumuna hassas bağlılık sebebiyle öngörü başarısı kısıtlıdır ve özellikle uzun dönem için başarı değerinin yüksek olması ihtimali epey düşüktür. Bu sebeple kısa

zamanlı öngörü olması açısından iki seride de 100 saatlik bir çalışma yapılmıştır ve iki serinin de son 100 saatlik bölümü tahmin edilmiştir. İncelenen zaman serilerinin toplam zaman uzunluğuna bakıldığından 100 saat görece olarak düşük ve uygun bir seviyedir. Zaman serilerinde öngörü için hem TISEAN 3.0.1 programı hem de NDT programı kullanılmış, sonuçlar iki program için de ayrı ayrı verilmiştir. İki program da lokal lineer haritalar yöntemini kullanmaktadır.

GOPlan serilerinde yapılan çalışmalar genel olarak GOPGIP serilerinde yapılan öngörüye göre daha başarısız kalmıştır. Genel olarak GOPlan serilerinde gürültü giderimi yapılmış serilerin yüksek PTF değerlerini yakalamada problem yaşadığı tespit edilmiştir. Ancak başarı kriterleri karşılaştırıldığında gürültü gideriminin öngörü başarısına faydası olduğu net bir şekilde görülmüştür. Hafta içi serileri ile yapılan çalışma ise öngörü değerlerini gerçek değerlere daha yakın noktalara çekmiş özellikle NRMSE başarısının yükseldiği görülmüştür. Gün öncesi planlama döneminde en yüksek başarı oranı R^2 85.2% ve 6.0% NRMSE olarak gösterilmiştir.

GOPGIP serilerinde ise GOPlan çalışmasındakinin aksine gürültü giderimi yapılmamış seri ile yapılan öngörünün daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. GOPlan öngörüleriyle karşılaştırıldığında başarı seviyeleri daha yüksek seviyelerde kalmıştır. Bunun sebebi olarak serinin daha uzun bir veriye sahip olması gösterilmiştir. Hafta içi serileri ile yapılan çalışma gün öncesi planlama dönemiyle benzer bir davranış göstermiş ve daha başarılı olmuştur. GÖP ve GİP döneminde en yüksek başarı oranı R^2 92.1% ve 5.7% NRMSE olarak gösterilmiştir.

Özet olarak hem gün öncesi planlama döneminde hem de GÖP ve GİP dönemleri için ayrı ayrı kaos tespiti yapılmış ve 100 saatlik öngörü çalışması başarılı bir şekilde yapılmıştır. Elektrik enerjisi birim fiyatlarının tahmini bu piyasadaki üreticiler için son derece önemlidir. Tahmin çalışması ne kadar doğru olursa teklifi de o derecede iyi verebilecek ve elektriği uygun bir şekilde satabileceklerdir. Bundan sonraki bir adım olarak elektrik enerjisi birim fiyatları zaman serisinin farklı periyotlarında tahmin çalışması yürütülebilir ve buradaki başarı oranlarına bakılabilir. Bu tez kapsamında kullanılan yöntem fiyat tahminleri için yapılan ve çeşitli parametrelere dayanan matematiksel modellerin yanında bir karşılaştırma kriteri olarak kullanılabilir. Ayrıca bu çalışmanın benzeri SMF üzerinde uygunabilir ve bu çalışmada PTF üzerine yapılan kaotik analiz ve öngörü sonuçlarıyla karşılaştırma yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Url-1 <http://www.tdk.gov.tr>, erişim tarihi 05.02.2018.

[2] Url-2 <http://tr.wikipedia.org>, erişim tarihi 05.02.2018.

[3] Oestreicher C. (2007). A history of chaos theory, *Dialogues in Clinical Neuroscience, Vol 9 , No 3,* 279-289.

[4] Yıldız, C. & Gani, A. & Tekin, M. & Keçecioğlu, F. & Açıkgöz, H. & Şekkeli, M. (2016). Price forecasting model for Turkish day-ahead elecricitiy market using neural network, *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Antalya, Turkey: November 3-5.

[5] Kölmek, M.A. & Navruz, İ. (2015). Forecasting the day-ahead price in electricity balancing and settlement market of Turkey by using artificial neural networks, *Turk J Elec Eng & Comp Sci,* 23, 841-852.

[6] Gökgöz, F. & Filiz, F. (2016). Electricity price forecasting in Turkey with artificial neural network models, *Investment Management and Financial Innovations,* Vol 13 (3-1).

[7] Özmen, A. & Yıldırım, M.H. & Bayrak, Ö.T. & Weber, G.W. (2011). Electricity price modeling for Turkey, *International Conference on Operations Research,* (pp 39-44), Zurich, Switzerland : August 30-September 3.

[8] Liu, Z. & Yang, H. & Lai, M. (2005). Electricity price forecasting model based on chaos theory, The 7th International Power Engineering Conference, IPEC 2005, doi: 10.1109/IPEC.2005.206950, Singapore, November 29-December 2.

[9] Çetintaş, H. & Bicil, İ.M. (2015). Elektrik piyasalarında yeniden yapılanma ve Türkiye elektrik pyasasında yapısal dönüşüm, *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi,* Vol.2, No.2.

[10] Ünal, O. (2007). Elektrik piyasası oluşumu, *Ankara Barosu Dergisi*, Yıl:65, Sayı:4, 83-98.

[11] Accenture, (2013), "Türkiye Elektrik Piyasası'nda Elektrik Ticareti".

[12] Url-3 <https://www.teias.gov.tr>, erişim tarihi 11.02.2018.

[13] Url-4 <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>, erişim tarihi 15.02.2018

[14] Özel, Ç. & Büyüktanır, B.G.Ö. & Özel, F. (t.y). Elektrik piyasalarında elektrik sağlama amaçlı sözleşmeler, *Journal of Yaşar University*, Cilt:8, Sayı: Özel.

[15] TENVA, (2015). Gün öncesi piyasası ve gün içi piyasası karşılaştırması, Erişim: 17.02.2018, http://www.tenva.org

[16] Deloitte, (2011). "Türkiye elektrik piyasasının geleceği, serbestleşen bir piyasa için olası gelecek senaryoları"

[17] Ünal, K., (2011). Gün öncesi piyasası, *Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi (PMUM).*

[18] Addison P.S., (1997). *Fractals and Chaos: An Illustrated Course,* IOP Publishing Bristol and Philadelphia.

[19] Çoban G., (2007). *Zaman serilerinde faz uzayının oluşturulması ve kaosun tespiti:döviz kurları üzerine bir uygulama.* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[20] Ross, S.L. (1984). *Differential Equations, Third Edition,* John Wiley and Sons, Inc, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.

[21] Strogatz, S.H. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos, With Applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering,* Addison-Wesley Publishing Company.

[22] Baker, G.L. & Gollub, J.P. (1996). *Chaotic Dynamics an Introduction,* Cambridge University Press, Cambridge, UK.

[23] Albostan, A. (2015). *Akım serilerinin kaotik analizi Karadeniz havzaları üzerine bir uygulama.* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.

[24] Aihara, K. (2002). Chaos in neural systems, The Handbook of Brain Theory and Neural Networks: Second Edition, 208-212, *The MIT Press*, Cambridge, USA.

[25] Koçak, K. (t.y). Kaos ve Atmosfer, Erişim: 21.02.2018, http://web.itu.edu.tr

[26] Wen, H. (2014). *A review of the Henon map and its physical interpretations*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.

[27] Yüzgeç, U. & Eser, M. (2014). Rössler tabanlı kaotik farksal gelişim algoritması, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt:1, Sayı:2.

[28] Kantz, H. & Schreiber T. (2003). *Nonlinear Time Series Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK

[29] Abarbanel, H.D.I. (1993). The analysis of observed chaotic data in physical systems, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 65, No.4.

[30] Urbach, R.M.A. (2000). *Footprints of Chaos in Markets: Analyzing Nonlinear Time Series in Financial Markets and Other Real Systems*, Prentice Hall, Great Britain

[31] Elshorbagy, A. (2013). Noise reduction approach in chaotic hydrologic time series revisited, Canadian Water Resources Journal, 26:4, 537-550, doi:10.4296/crwj2604537.

[32] Kostelich, E.J. & Schreiber, T. (1993). Noise reduction in chaotic time-series data: A survey of common methods, Physical Review E, Vol. 48, No. 3.

[33] Hegger, R. & Kantz, H. & Schreiber, T. (2007). TISEAN 3.0.1, Nonlinear time series analysis, Retrieved October 1, 2017, Available from https://www.pks.mpg.de/~tisean/Tisean_3.0.1/index.html.

[34] Reiss J.D. (2001), Nonlinear Dynamics Toolbox (NDT), Retrieved November 1, 2017

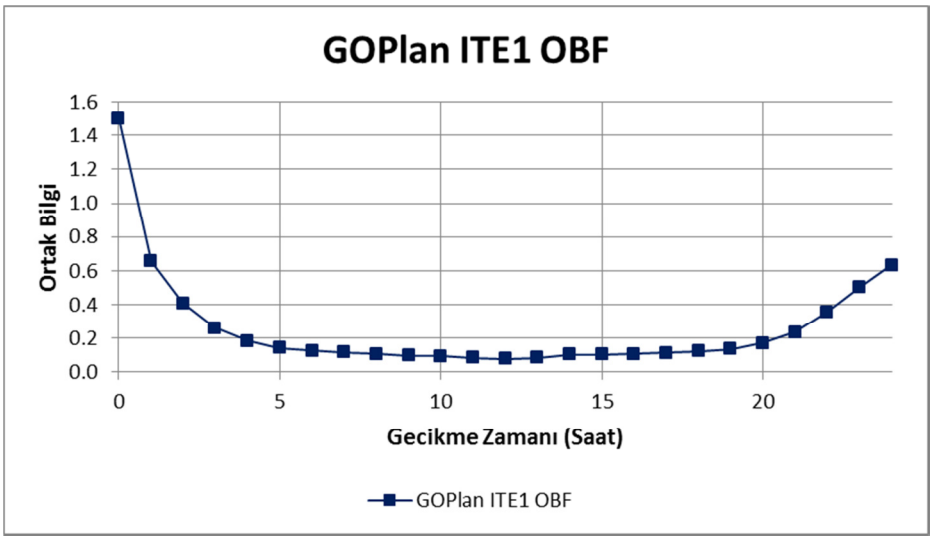
[35] Reiss J.D. (2001). *The Analysis of Chaotic Time Series.* (PhD Thesis). Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.

EKLER

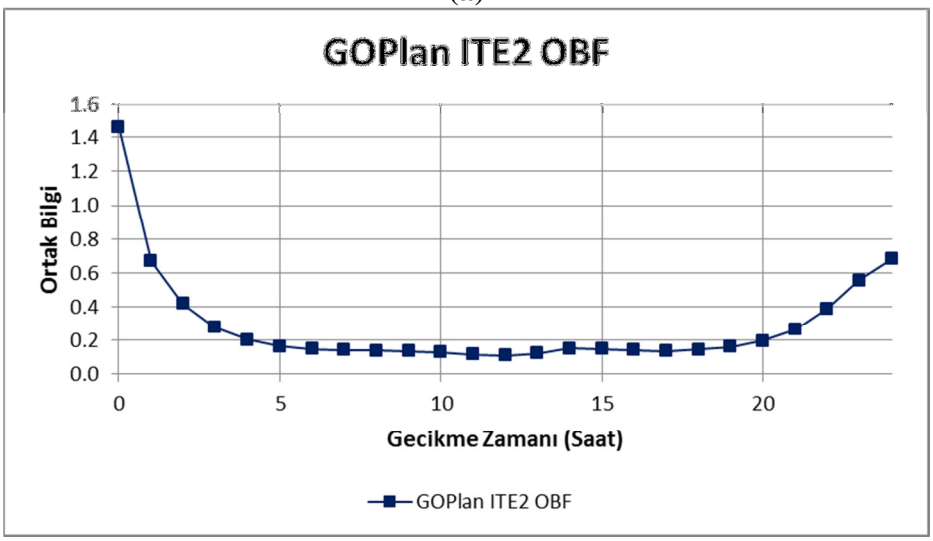
EK A: GOplan ITE1, GOPlan ITE2, GOPlan ITE3 ve GOPGIP ITE1, GOPGIP ITE2, GOPGIP ITE3 OBF Grafikleri

EK B: GOPlan ve GOPGIP Bütün Seriler İçin Faz Uzayları

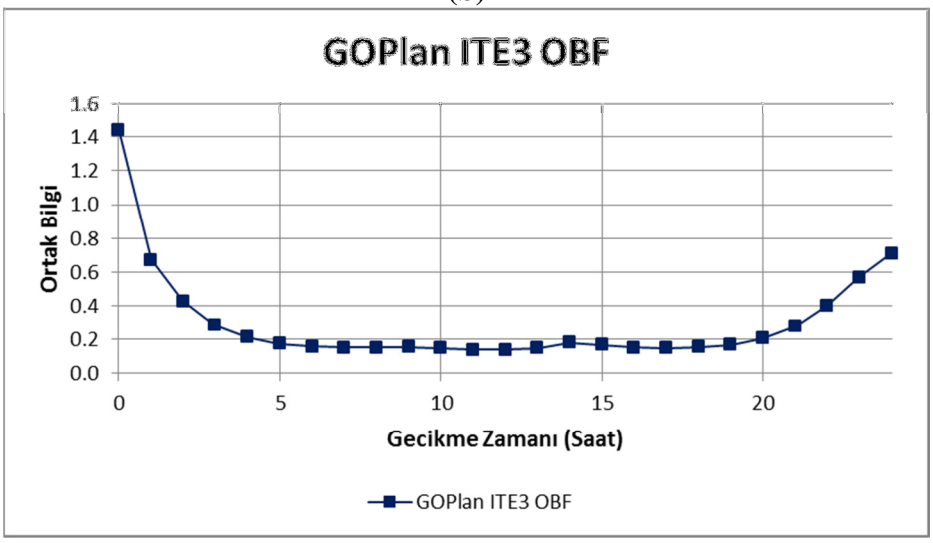
EK A: GOplan ITE1, GOPlan ITE2, GOPlan ITE3 ve GOPGIP ITE1, GOPGIP ITE2, GOPGIP ITE3 OBF Grafikleri



(a)

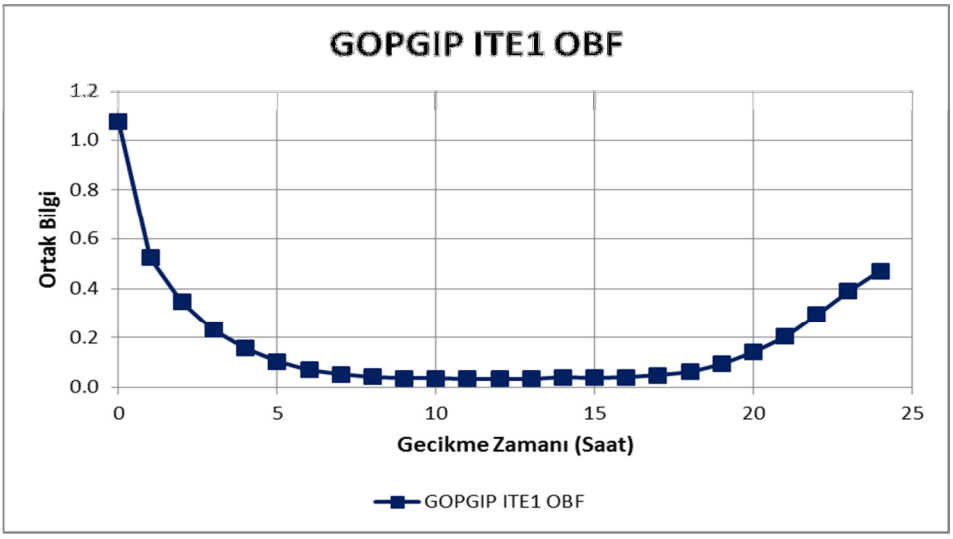


(b)

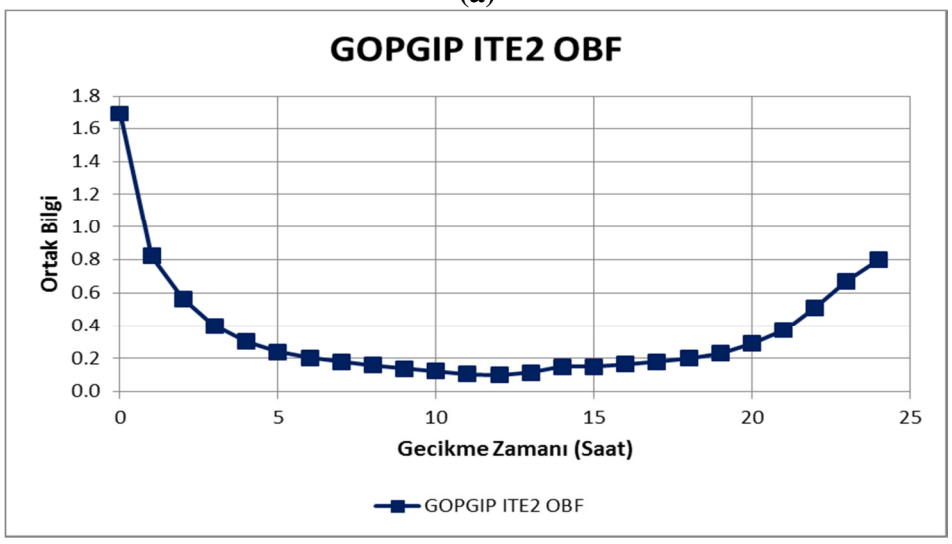


(c)

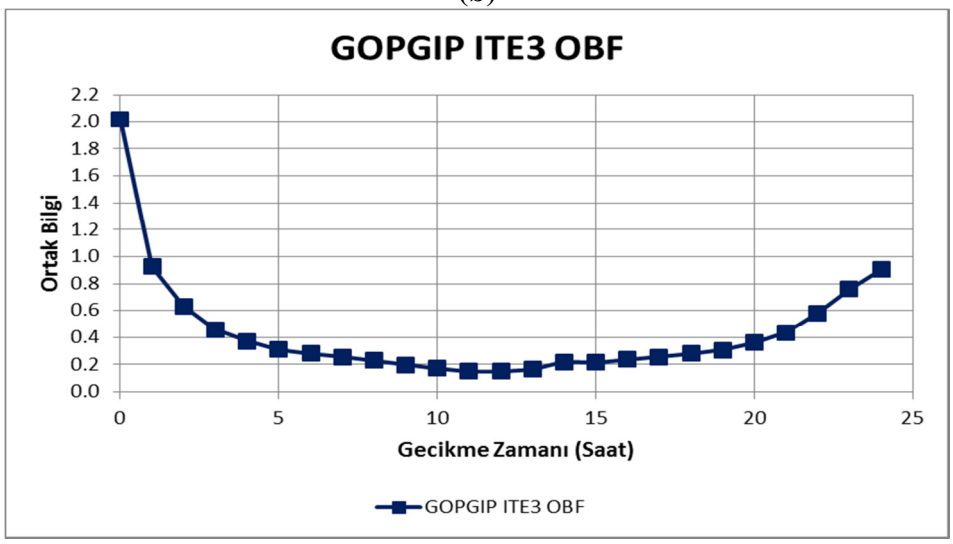
Şekil A.1: OBF Grafikleri (a)GOPlanITE1. (b)GOPlan ITE2. (c)GOPlan ITE3.



(a)



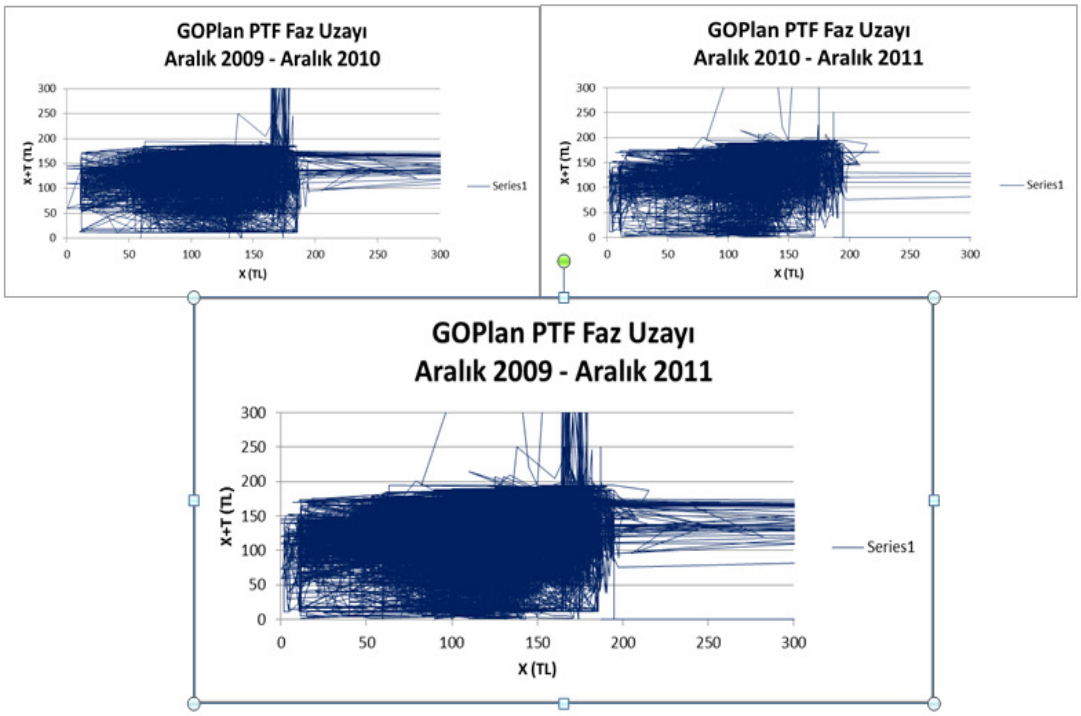
(b)



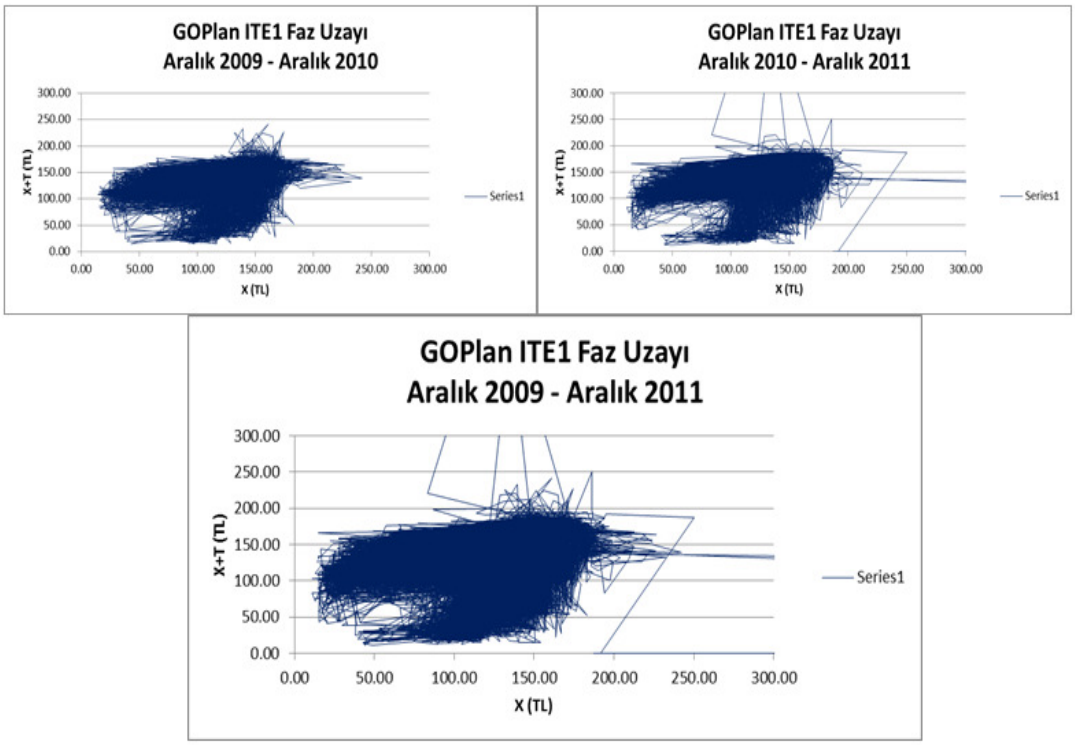
(c)

Şekil A.2: OBF Grafikleri (a)GOPGIP ITE1. (b)GOPGIP ITE2. (c)GOPGIP ITE3.

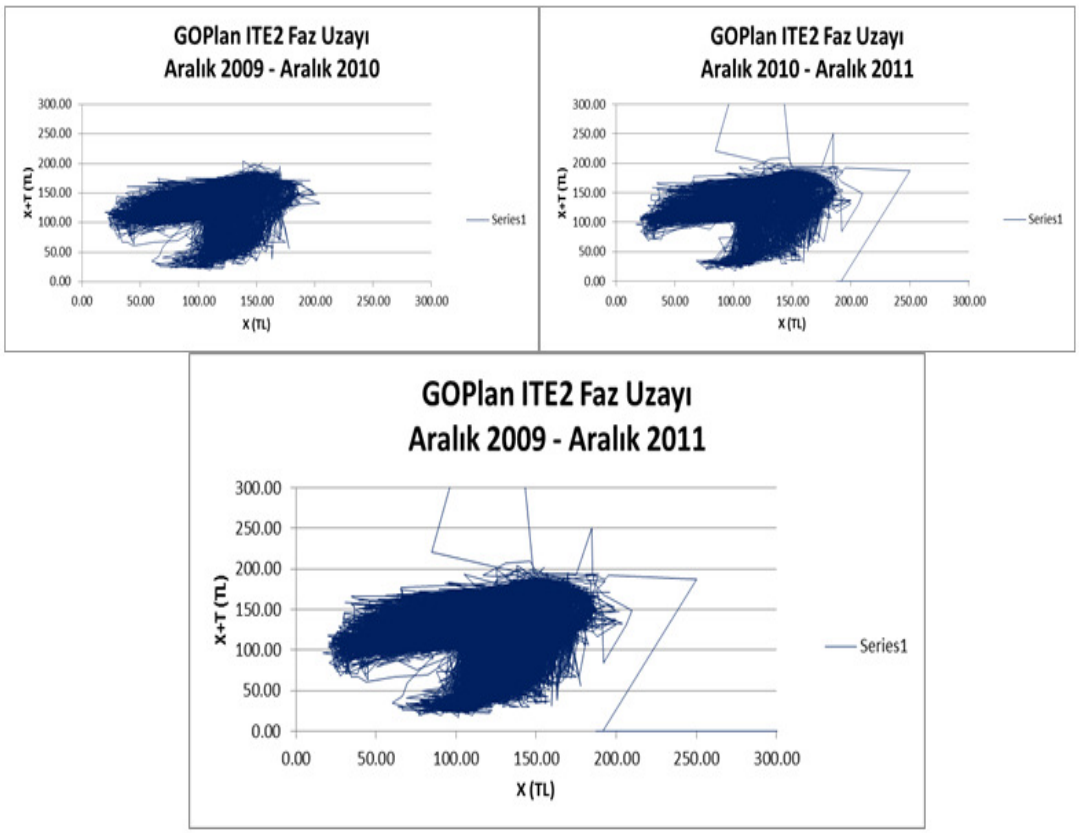
EK B: GOPlan ve GOPGIP Bütün Seriler İçin Faz Uzayları



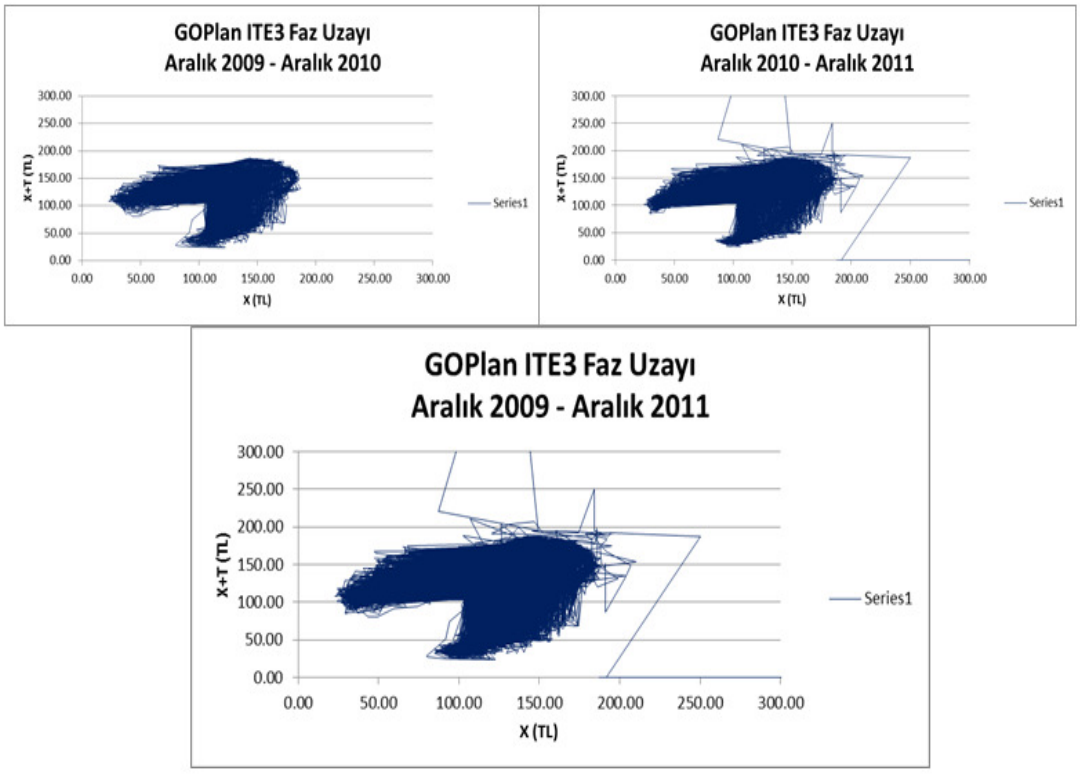
Şekil B.1: GOPlan PTF Faz Uzayları



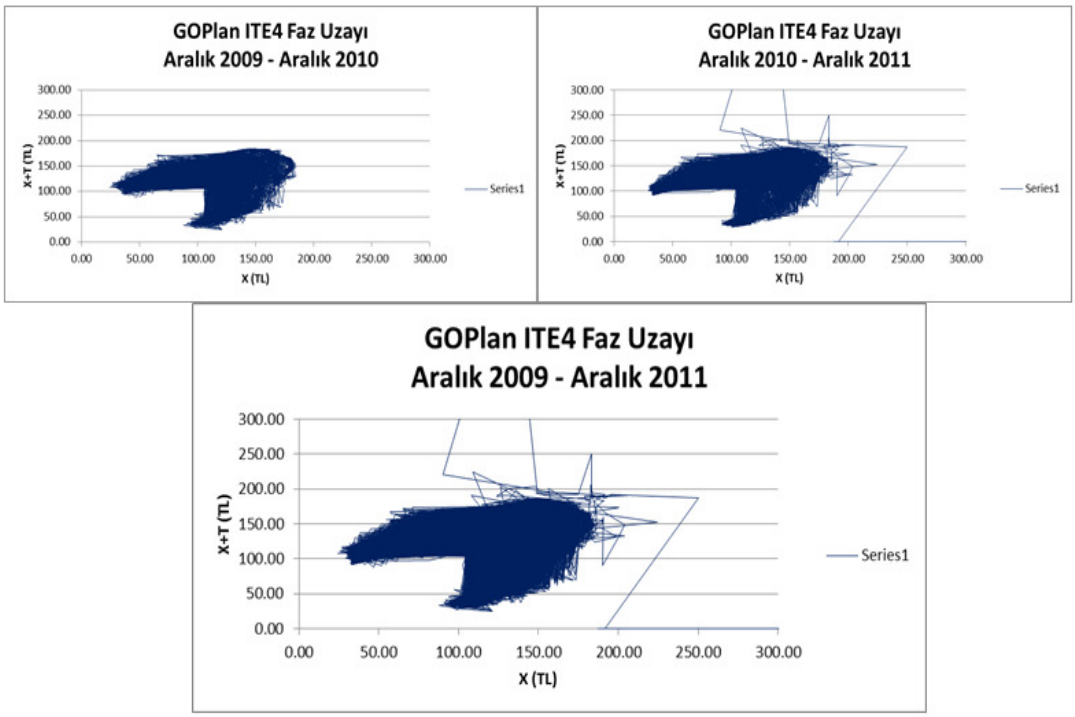
Şekil B.2: GOPlan ITE1 Faz Uzayları



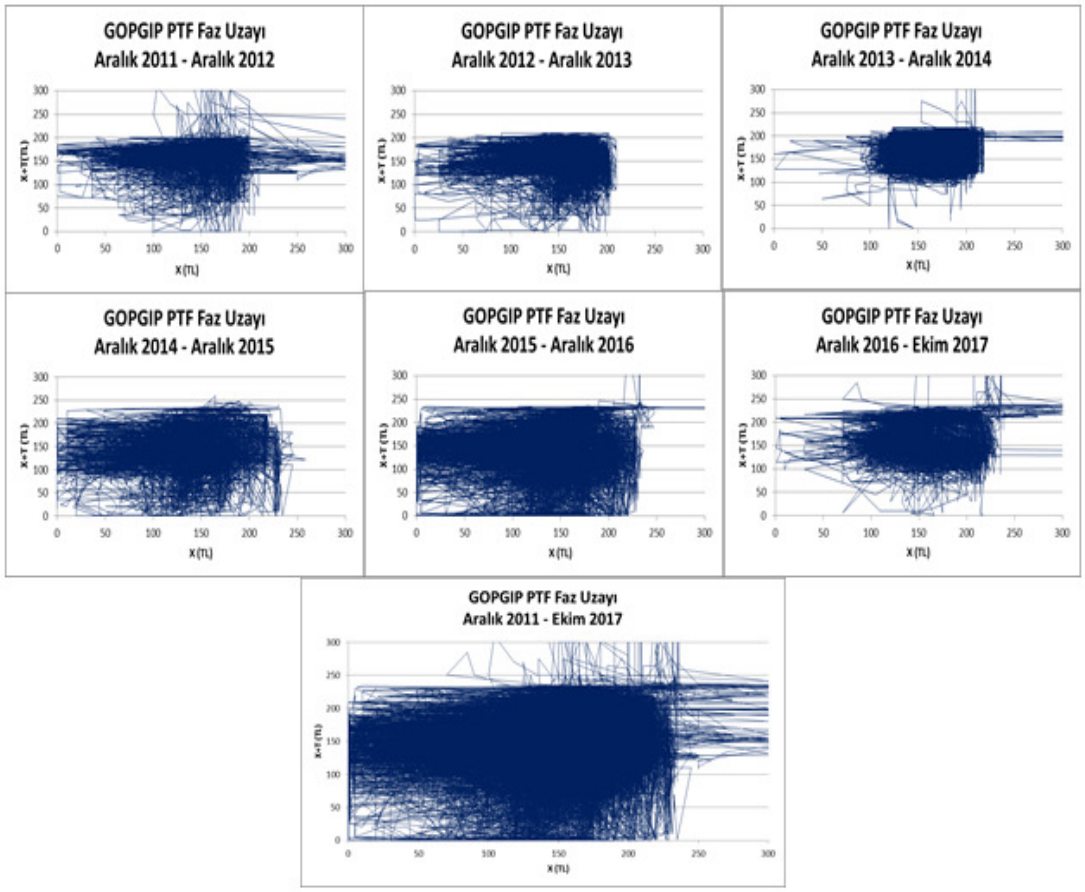
Şekil B.3: GOPlan ITE2 Faz Uzayları



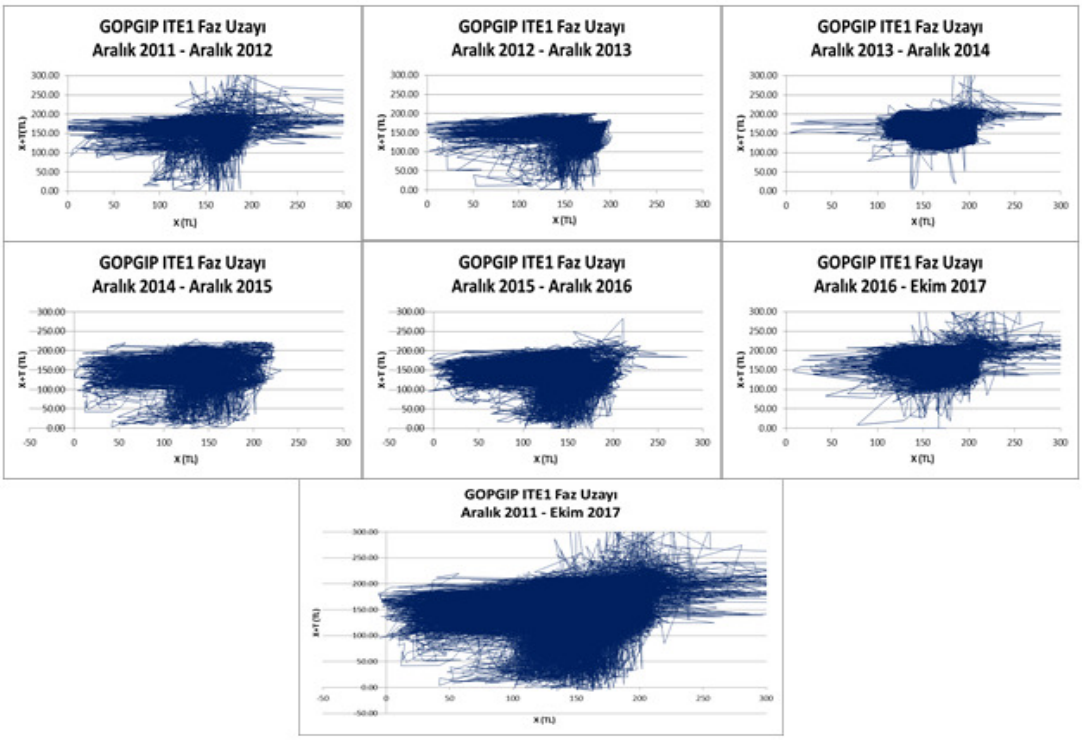
Şekil B.4: GOPlan ITE3 Faz Uzayları



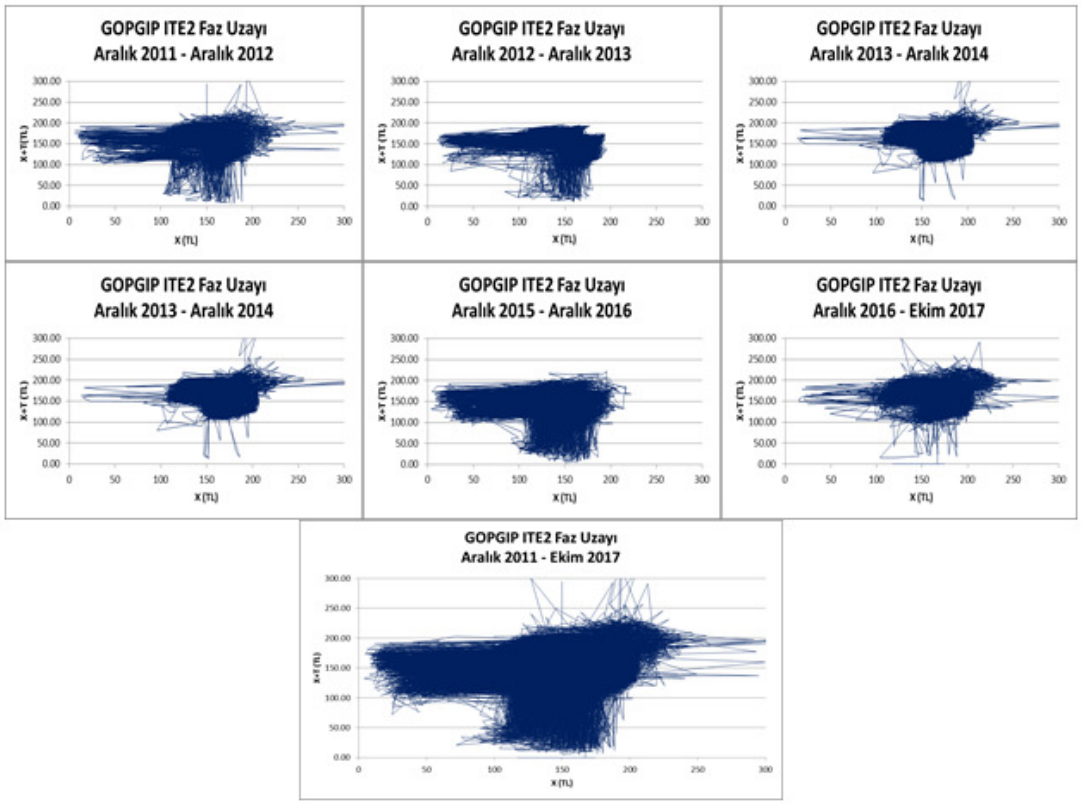
Şekil B.5: GOPlan ITE4 Faz Uzayları



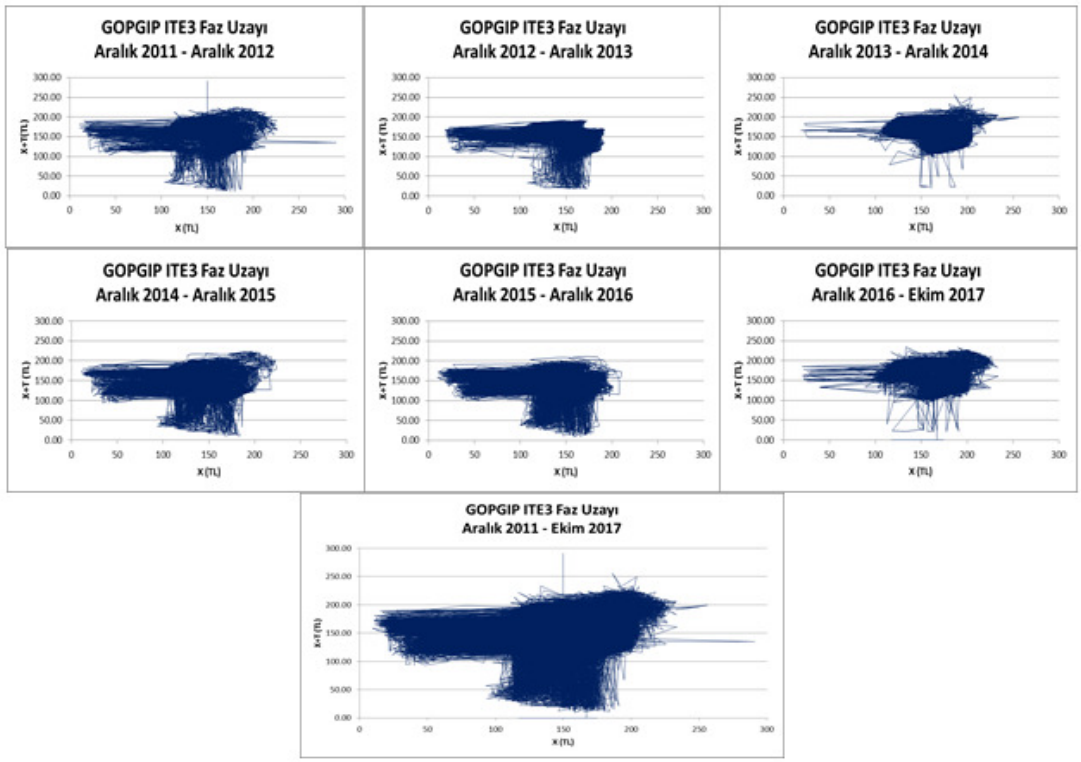
Şekil B.6: GOPGIP PTF Faz Uzayları



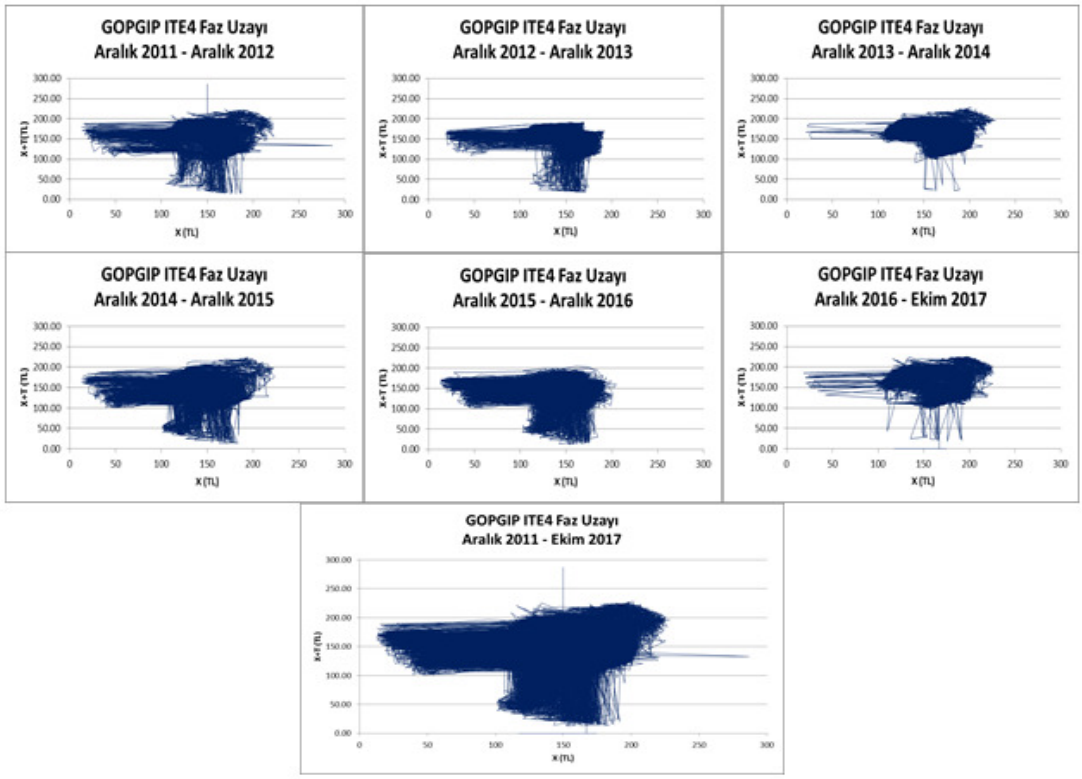
Şekil B.7: GOPGIP ITE1 Faz Uzayları



Şekil B.8: GOPGIP ITE2 Faz Uzayları



Şekil B.9: GOPGIP ITE3 Faz Uzayları



Şekil B.10: GOPGIP ITE4 Faz Uzayları

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Sercan Macit

Doğum Tarihi ve Yeri: 18/11/1988, Bursa

E-posta : macitsercan@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011-2014: Performans & Yakıt Ekonomisi Mühendisi, Ford-Otosan, İstanbul
- 2014-2016: Kıdemli Mühendis – Performans & Yakıt Ekonomisi, Ford-Otosan, İstanbul
- 2016 - mevcut: Performance, Efficiency, Drivability Attribute Leader & Workpackage Team Leader, Jaguar Land Rover (via Alten UK), Gaydon, UK

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Macit, S., Önöz, B., 2018. Türkiye Elektrik Enerjisi Birim Fiyatlarının Kaotik Analizi. *International Congress of Energy, Economy and Security,* April 21-22, 2018 Istanbul, Turkey.