

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIM SERİLERİNİN KAOTİK ANALİZİ  
KARADENİZ HAVZALARI ÜZERİNE BİR UYGULAMA**



**DOKTORA TEZİ**

**Aslihan ALBOSTAN**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı  
Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**ŞUBAT 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIM SERİLERİNİN KAOTİK ANALİZİ  
KARADENİZ HAVZALARI ÜZERİNE BİR UYGULAMA**

**DOKTORA TEZİ**

**Aslıhan ALBOSTAN  
(301072005)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bihrat ÖNÖZ**

**ŞUBAT 2015**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301072005 numaralı Doktora Öğrencisi **Aslıhan ALBOSTAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AKIM SERİLERİNİN KAOTİK ANALİZİ, KARADENİZ HAVZALARI ÜZERİNDE BİR UYGULAMA** ” 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

**Prof. Dr. Atıl BULU** .....  
Okan Üniversitesi

**Prof. Dr. C. Melek ALHAN** .....  
İstanbul Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :** **05 Aralık 2014**

**Savunma Tarihi :** **04 Şubat 2015**



*Merhum Emekli Öğretmen Mahmut Ünal ve Merhume Fatma Bahar İmamoğlu'na*





## ÖNSÖZ

Bu zorlu yolda bana olan inancını ve desteğini hiç esirgemeyen, yolumu her zaman aydınlatan çok değerli hocam Prof. Dr. Bihrat Önöz'e, çalışmaya değerli yorumları ile değer katan tez izleme jürilerim Prof. Dr. Kasım Koçak ve Yrd. Doç. Dr. Burak Barutcu'ya ve emeklerini asla ödeyemeyeceğim canım aileme teşekkürü borç bilirim.

Şubat 2015

Aslıhan Albostan  
(Çevre Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	4
1.2 Literatür Araştırması .....	5
<b>2. DİNAMİK SİSTEMLER VE KAOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 Giriş.....	11
2.2 Kaotik Sistemler.....	11
2.2.1 Lorenz Çekicisi .....	12
2.2.2 Hennon Çekicisi.....	13
2.2.3 Rössler Çekicisi.....	14
2.3 Kaotik Analiz Yöntemleri .....	14
2.3.1 Güç Spektrumu .....	15
2.3.2 Poincare Haritalamaları.....	16
2.3.3 Lyapunov Üstelleri.....	16
2.3.4 Faz Uzayının İncelenmesi.....	17
2.3.4.1 Faz Uzayının Yeniden Kurulması.....	18
<b>3. KAOTİK SİSTEMLERİN KARAKTERİZE EDİLMESİ .....</b>	<b>19</b>
3.1 Amaç .....	19
3.2 Lyapunov Üstelleri.....	19
3.2.1 Ayrık Zamanlı Sistemlerden Lyapunov Üstellerinin Hesaplanması.....	20
3.2.2 Lyapunov Üstellerinin Doğrudan Veriden Hesaplanması .....	20
3.3 Boyut Algoritmaları .....	22
3.3.1 Fraktal Boyut.....	23
3.3.2 Korelasyon (İlgi) Boyutu .....	25
3.3.3 Diğer Boyut Türleri.....	25
3.4 Faz Uzayının İncelenmesi .....	26
3.5 Faz Uzayının Yeniden Kurulması .....	27
3.6 Gömme Uzayı .....	28
3.6.1 Gömme Teoremi .....	29
3.7 Gömme Uzayının Parametreleri.....	30
3.7.1 Gömme Boyutunun Belirlenmesi.....	30
3.7.2 Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi.....	32
<b>4. ZAMAN SERİLERİNDEN SALINIMIN GİDERİLMESİ.....</b>	<b>35</b>
4.1 Fourier Analizi .....	35
4.2 Dalgacık Analizi.....	36

4.2.1	Ayrık Dalgacık Dönüşümü.....	38
4.2.2	Uygun Seviyenin Seçimi .....	39
4.2.2.1	Entropi Kavramı .....	39
4.2.2.2	Dalgacık Entropisinin Hesaplanması .....	40
<b>5.</b>	<b>SİSTEMİN MODELLENMESİ VE ÖNGÖRÜLEBİLİRLİĞİ.....</b>	<b>41</b>
5.1	Sistemlerin Modellenmesi .....	41
5.1.1	Genel Matematik Modeller .....	42
5.1.1.1	ARX Modelleri .....	45
5.2	Sistemin Öngörülebilirliği .....	46
5.2.1	ARX Modeli ile Öngörü.....	46
5.2.2	Lokal Öngörü Modeli .....	47
5.3	Değerlendirme İstatistikleri .....	50
<b>6.</b>	<b>HAVZALARIN KAOTİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ .....</b>	<b>53</b>
6.1	Çoruh Havzası .....	54
6.1.1	Dalgacık Analizi Uygulaması .....	54
6.1.2	Faz Uzayının Yeniden Kurulması .....	59
6.1.2.1	Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi .....	59
6.1.2.2	Gömme Boyutun Belirlenmesi .....	61
6.1.2.3	Çeker Boyutunun Belirlenmesi .....	65
6.2	Doğu Karadeniz Havzası .....	68
6.2.1	Dalgacık Analizi.....	69
6.2.2	Faz Uzayının Yeniden Kurulması .....	76
6.2.2.1	Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi .....	76
6.2.2.2	Gömme Boyutunun Belirlenmesi .....	81
6.2.2.3	Çeker Boyutunun Belirlenmesi .....	85
6.3	Yeşil Irmak Havzası .....	91
6.3.1	Dalgacık Analizi.....	92
6.3.2	Faz Uzayının Yeniden Kurulması .....	97
6.3.2.1	Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi .....	97
6.3.2.2	Gömme Boyutunun Belirlenmesi .....	100
6.3.3	Çeker Boyutunun Belirlenmesi .....	102
6.4	Batı Karadeniz Havzası .....	105
6.4.1	Dalgacık Analizi.....	106
6.4.2	Faz Uzayının Yeniden Kurulması .....	113
6.4.2.1	Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi .....	113
6.4.2.2	Gömme Boyutun Belirlenmesi .....	117
6.4.2.3	Çeker Boyutunun Belirlenmesi .....	120
6.5	Değerlendirme .....	124
<b>7.</b>	<b>SİSTEM KARAKTERİNİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR UYGULAMA</b>	<b>127</b>
7.1	Lyapunov Üstelleri .....	127
7.2	Değerlendirme .....	130
<b>8.</b>	<b>HAVZALARIN MODELLENMESİ VE ÖNGÖRÜLEBİLİRLİĞİ.....</b>	<b>133</b>
8.1	Lokal Öngörü.....	133
8.1.1	Çoruh Havzası .....	133
8.2	Doğu Karadeniz Havzası .....	139
8.2.1	Yeşil Irmak Havzası .....	148
8.2.2	Batı Karadeniz Havzası .....	153
8.3	ARX Modeli ve Öngörü .....	160
8.3.1	Çoruh Havzası .....	160

8.3.2 Doğu Karadeniz Havzası .....	165
8.3.3 Yeşil Irmak Havzası .....	173
8.3.4 Batı Karadeniz Havzası .....	178
8.4 Değerlendirme .....	185
<b>9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>189</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>193</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>201</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>241</b>





## KISALTMALAR

<b>A</b>	: Yaklaşım Parçası (Aproximation)
<b>AC</b>	: Otokorelasyon Fonksiyonu
<b>ADD</b>	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü
<b>AGF</b>	: Alçak Geçiren Filtre
<b>ANN</b>	: Artificial Neural Network
<b>AR</b>	: Auto Regressive
<b>ARMA</b>	: Auro Regressive Moving Average
<b>ARIMA</b>	: Auro Regressive Integrated Moving Average
<b>ARMAX</b>	: Auto Regressive Moving Average eXogenous Model
<b>ARX</b>	: Auto Regressive eXogenous
<b>ÇÇA</b>	: Çoklu Çözünürlük Analizi
<b>D</b>	: Detay Parçası (Detail)
<b>DWT</b>	: Discrete Wavelet Transform
<b>DSİ</b>	: Devlet Su İşleri
<b>FPE</b>	: Final Prediction Error
<b>KZFD</b>	: Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü
<b>M</b>	: Gömülü Boyut
<b>NLRARX</b>	: Nonlinear Auto eXogenous Model
<b>NRMSE</b>	: Normalized Root Mean Square Error
<b>OBF</b>	: Ortak Bilgi Fonksiyonu
<b>R<sup>2</sup></b>	: Correlation Coefficient
<b>RMSE</b>	: Root Mean Square Error
<b>SISO</b>	: Single Input Singe Output Model
<b>T</b>	: Erteleme Zamanı
<b>TISEAN</b>	: Time Series Analysis
<b>YEK</b>	: Yanlış En Yakın Komşular
<b>YGF</b>	: Yüksek Geçiren Filtre





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 6.1 : Çoruh Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Özellikleri.....	52
Çizelge 6.2 : Çoruh Havzası İstasyonlarına Ait Zaman Gecikmeleri .....	57
Çizelge 6.3 : Çoruh Havzası İstasyonlarına Ait Gömme Boyutu.....	60
Çizelge 6.4: Çoruh Havzası İstasyonlarına Ait Çeke Boyutları.....	63
Çizelge 6.5 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Özellikleri.....	66
Çizelge 6.6 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Zaman Gecikmeleri.....	74
Çizelge 6.7 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Gömme Boyutu.....	83
Çizelge 6.8: Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Çeker Boyutları.....	84
Çizelge 6.9 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Özellikleri.....	89
Çizelge 6.10 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonlarına Ait Zaman Gecikmeleri .....	94
Çizelge 6.11 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonlarına Ait Gömme Boyutları.....	102
Çizelge 6.12: Yeşil Irmak Havzası İstasyonlarına Ait Çeker Boyutları.....	103
Çizelge 6.13 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Özellikleri.....	110
Çizelge 6.14 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Zaman Gecikmeleri .....	117
Çizelge 6.15 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Gömme Boyutları.....	118
Çizelge 6.16: Batı Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Çeker Boyutları.....	128
Çizelge 7.1 : İstasyonların Lyapunov Üstelleri.....	132
Çizelge 8.1 : Çoruh Havzası Çeşitli Gömme Boyutlarına ait RMS.....	137
Çizelge 8.2 : Doğu Karadeniz Havzası Çeşitli Gömme Boyutlarına ait RMS.....	146
Çizelge 8.3 : Yeşil Irmak Havzası Çeşitli Gömme Boyutlarına ait RMS.....	151
Çizelge 8.4 : Batı Karadeniz Havzası Çeşitli Gömme Boyutlarına ait RMS.....	158
Çizelge 8.5 : Çoruh Havzası İstasyonlara ait ARX Modelleri ve FPE.....	163
Çizelge 8.6 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlara ait ARX Modelleri ve FPE...178	
Çizelge 8.7 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonlara ait ARX Modelleri ve FPE.....	178
Çizelge 8.8 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonlara ait ARX Modelleri ve FPE.....	184
Çizelge 8.9 : İstasyonlara ait Lokal Öngörü ve ARX modeli R <sup>2</sup> Karşılaştırması...187	



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Lorenz Çekicisi .....	13
Şekil 2.2 : Hennon Çekicisi .....	13
Şekil 2.3 : Hennon Çekicisi .....	14
Şekil 2.4 : Yörüngelerin Değişimi .....	17
Şekil 3.1 : Lyapunov Üstellerinin Hesaplanması .....	21
Şekil 3.2 : Çekici Dönüşümü .....	29
Şekil 3.3 : Gömme Teoremi .....	30
Şekil 4.1 : Ayrık Dalgacık Dönüşümü .....	38
Şekil 4.2 : İşaret Ayırıştırma İşlemi .....	39
Şekil 5.1: AR(1)'e ait Korelasyon Yapısının Şematik Gösterimi .....	43
Şekil 6.1: Türkiye Akarsu Havzaları .....	51
Şekil 6.2: Çoruh Havzası Akım Gözlem İstasyonları .....	52
Şekil 6.3: Çoruh Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri .....	53
Şekil 6.4: Çoruh Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları .....	55
Şekil 6.5: Çoruh Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Çekerler .....	58
Şekil 6.6: Çoruh H.Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait YEK Grafikleri .....	61
Şekil 6.7: Çoruh Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutları .....	64
Şekil 6.8: Doğu Karadeniz Havzası Akım Gözlem İstasyonları .....	66
Şekil 6.9a: Doğu Karadeniz İstasyonları Entropi Grafikleri .....	67
Şekil 6.9b: Doğu Karadeniz İstasyonları Entropi Grafikleri .....	69
Şekil 6.10a: Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü .....	71
Şekil 6.10b: Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü .....	73
Şekil 6.11a: Doğu Karadeniz Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonucu Elde Edilen Parçalara ait Çekerler .....	78
Şekil 6.11b: Doğu Karadeniz Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonucu Elde Edilen Parçalara ait Çekerler .....	81
Şekil 6.12a: Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait YEK Grafikleri .....	79
Şekil 6.12b: Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait YEK Grafikleri .....	81
Şekil 6.13a: Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutu Grafikleri .....	85
Şekil 6.13b: Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutu Grafikleri .....	87
Şekil 6.14: Yeşil Irmak Havzası Akım Gözlem İstasyonları .....	89
Şekil 6.15: Yeşil Irmak Havzası Entropi Grafikleri .....	90
Şekil 6.16: Yeşil Irmak Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü .....	92
Şekil 6.17: Yeşil Irmak Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonucu Elde Edilen Parçalara ait Çekerler .....	95
Şekil 6.18: Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait YEK Grafikleri .....	97

<b>Şekil 6.19:</b> Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutu Grafikleri.....	100
<b>Şekil 6.20:</b> Batı Karadeniz Havzası Akım Gözlem İstasyonları.....	102
<b>Şekil 6.21a:</b> Uygulamada Kullanılan Batı Karadeniz İstasyonları Entropi Grafikleri.....	104
<b>Şekil 6.21b:</b> Uygulamada Kullanılan Batı Karadeniz İstasyonları Entropi Grafikleri.....	106
<b>Şekil 6.22a:</b> Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları.....	107
<b>Şekil 6.22b:</b> Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları.....	109
<b>Şekil 6.23a:</b> Seri ve Dalgacık Analizi Sonucu Elde Edilen Parçalara ait Çekerler.....	111
<b>Şekil 6.23b:</b> Seri ve Dalgacık Analizi Sonucu Elde Edilen Parçalara ait Çekerler.....	113
<b>Şekil 6.24a:</b> Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait YEK Grafikleri .....	114
<b>Şekil 6.24b:</b> Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait YEK Grafikleri .....	116
<b>Şekil 6.25a:</b> Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutu Grafikleri.....	120
<b>Şekil 6.25b:</b> Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutu Grafikleri.....	124
<b>Şekil 7.1 :</b> Havzalara ait Lyapunov Üstelleri.....	132
<b>Şekil 8.1 :</b> Çoruh Havzası Öngörü Performansı.....	131
<b>Şekil 8.2 :</b> Çoruh Havzası A Parçası Öngörü Performansı.....	133
<b>Şekil 8.3a :</b> Doğu Karadeniz Havzası Öngörü Performansı.....	136
<b>Şekil 8.3 b :</b> Doğu Karadeniz Havzası Öngörü Performansı.....	138
<b>Şekil 8.4a :</b> Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı.....	142
<b>Şekil 8.4b :</b> Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı.....	145
<b>Şekil 8.5 :</b> Yeşil Irmak Havzası Öngörü Performansı.....	147
<b>Şekil 8.6 :</b> Yeşil Irmak Havzası A Parçası Öngörü Performansı.....	149
<b>Şekil 8.7a :</b> Batı Karadeniz Havzası Öngörü Performansı.....	150
<b>Şekil 8.7b :</b> Batı Karadeniz Havzası Öngörü Performansı.....	152
<b>Şekil 8.8a :</b> Batı Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı.....	155
<b>Şekil 8.8b :</b> Batı Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı.....	157
<b>Şekil 8.9 :</b> Çoruh Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	159
<b>Şekil 8.10:</b> Çoruh Havzası Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	161
<b>Şekil 8.11a :</b> Doğu Karadeniz Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	163
<b>Şekil 8.11b :</b> Doğu Karadeniz Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	165
<b>Şekil 8.12a</b> Doğu Karadeniz Havzası Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	167
<b>Şekil 8.12b :</b> Doğu Karadeniz Havzası Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	169
<b>Şekil 8.13 :</b> Yeşil Irmak Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	171
<b>Şekil 8.14 :</b> Yeşil Irmak Havzası Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	173
<b>Şekil 8.15a :</b> Batı Karadeniz Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	176

<b>Şekil 8.15b</b> : Batı Karadeniz Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	178
<b>Şekil 8.16a</b> : Batı Karadeniz Havzası Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	179
<b>Şekil 8.16b</b> : Batı Karadeniz Havzası Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.....	181





## AKIM SERİLERİNİN KAOTİK ANALİZİ KARADENİZ HAVZALARI ÜZERİNDE BİR UYGULAMA

### ÖZET

Kendiliğinden doğada var olan sistemlere, doğal sistemler denir. Doğal sistemler, insan yapılı sistemlere göre daha karmaşık ve analizi zor sistemlerdir. Çevredeki değişimlere tepkisi bakımından ise sistemler, dinamik ve statik sistemler olarak ayrılabilir. Doğal sistemler, çevredeki değişikliklere uğrayan sistemler olduğundan çoğunlukla dinamik sistem sınıfında incelenirler. Dinamik sistemler, kararlı ve kararlı olmayan davranışlar gösterebilmektedir, sistem davranışlarının belirlenmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Doğal sistemler, kontrol altına alınabilen sistemler değildir. Bu sebeple, sistemlerin doğru analiz edilerek, karakterlerin en etkin şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Sistemlerin karakterlerinin doğru belirlenerek modellenmesi ve öngörülmesi, iklim değişimi ve küresel ısınmanın etkisi ile artan önem kazanmaktadır.

Su canlıların en temel ihtiyacıdır. Bu sebeple, bu ihtiyaca yönelik hizmet veren Su havzalarının doğru analizi ve etkin yönetimi çok önemlidir. Akarsu akımlarının yeterli ve doğru bir şekilde modellenmesi için akımı oluşturan süreçler hakkında ayrıntılı ve yeterli bilgiye sahip olmak gerekir. Literatürde, akarsu akımlarını meydana getiren süreçlerin birbirleriyle doğrusal olmayan etkileşim içinde oldukları kabul gören bir varsayımdır. Ancak araştırmacılar arasında bu ilişkinin türü hakkında bir uzlaşma sağlanamamıştır. Akarsu akımlarının stokastik doğrusal olmayan yapıda olabileceğini söyleyen geleneksel araştırmacılar ile deterministik doğrusal olmayan yapıda olabileceğini söyleyen kaotik hidrologistler arasındaki tartışma sürmektedir.

Bu çalışma, kaos teorisinin temel matematiksel açıklamalarından, Türkiye Karadeniz sahilinde yer alan 4 havza üzerindeki, akım gözlem istasyonlarına ait günlük akım serilerinin analizinin uygulanmasına kadar bir çok konuyu kapsamaktadır. Çalışma literatürdeki örneklerden farklı olarak, faz uzayının kurulumu esnasında, dalgacık analizi uygulamasını da içermektedir. Dalgacık analizi ile serilerin içerdiği gürültünün giderimini de çalışma kapsamında incelemektedir. Literatürde, serilerin içerdiği gürültünün kaotik analiz kapsamındaki etkisi belirtilmiş olmasına rağmen, Türkiye’de kaotik analiz kapsamında Dalgacık Analizi kullanımına Hidroloji literatüründe şuana kadar yapılan incelemelerde rastlanmamıştır. Doğal serilerin içerdiği gürültünün frekansının belirli olmaması nedeniyle Dalgacık Analizi uygulanırken, uygun seviyede gürültü giderimi yapılması için, bilgi (enformasyon) kriteri kullanılmış ve seviye, dalgacık entropisi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrılan parçalar, yaklaşım (A) ve detay (D), üzerinde her bir istasyon için kaotik analiz, öngörü ve sistem modelinin belirlenmesi uygulamaları yapılmış ve serilerin orijinal halleri ile karşılaştırılarak; gürültünün bu tip uygulamalarda sistem üzerindeki etkisi inceleme altına alınmıştır. Çalışmada kullanılan, DSI’ye ait 22 adet akım gözlem istasyonlarının hepsi uzun kayıtlara (30 yıl ve üzeri) sahip olduğu için, elde edilen sonuçlar kullanılan seriler ile havzaların karakterini belirleyecek uzunluktadır. Çalışmadan elde edilen başarılı

sonuçlar, kullanılan yöntemlerin gerek ileriye gerek geriye yönelik akım tahminleri için başarılı sonuçlar sağlamasının yanı sıra, eksik istasyonların verilerinin tamamlanması konusunda da uygulanabilirliğinin bir göstergesidir. Su havzalarının doğru analizinin yapılması için, her geçen gün ilerleme gösteren bilim ve teknolojinin sunduğu imkanlar değerlendirmeye alınmalıdır. Günümüzde, gelişimi halen devam eden kaotik analiz ile Su havzalarının karakterlerinin belirlenmesi ve davranışlarının modellenmesi Hidroloji alanında çalışan araştırmacıların ilgisini çekmiş ve her geçen gün çekmeye devam etmektedir. Çalışmada kullanılan veri, içme suyu temini, sulama ve enerji üretimini karşılanması gibi birçok amaca hizmet veren günlük nehir akımı serileridir. Veri setleri üzerinde uygulanan Kaotik Analiz, başarılı sonuçlar elde etmemizi sağlamıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde, kaotik analizin diğer veri kümeleri üzerinde de uygulanması önerilmektedir. Türkiye’de bu güne kadar yapılan Hidrolojik araştırmalarda, havza bazında kaotik analiz araştırmasına rastlanmamıştır. Havza istasyonlarının tamamının incelenerek, havzaların karakterlerinin belirlenmesi Su kaynakları yönetimi için büyük önem arz etmektedir. Özellikle, günlük akım verileri ile havza analizi ve analiz neticesinde ileriye dönük tahminlerin yapılması, Su kaynaklarının etkin kullanımını için büyük fayda sağlayacaktır. Bu nedenle, çalışmanın Türkiye’de yapılan Su ve diğer doğal kaynaklarla ilgilenen araştırmacılara örnek teşkil edecek niteliktedir.



## **CHAOTIC ANALYSIS OF RIVER FLOW SERIES A CASE STUDY ON KARADENIZ RIVER BASIN**

### **SUMMARY**

Natural systems are the systems those exist in nature and independent from all human involvement. Natural systems are more complex and difficult to analyze than the human or social systems. Systems can be categorized according to their responses to the environmental impacts as statics and dynamic. Since natural systems are strongly responsive to the environmental impacts, they are considered in the dynamic system category. Dynamic systems can exhibit both stable and/or unstable behavior and they can be determined by non-linear and linear methods. Natural systems are not controllable thus, proper analyses are an asset to identify the system behavior. The accurate analysis of natural system characteristics are getting more important by the effect of global warming and climate change. Water is an indispensable need for all living organisms. Therefore, accurate analysis and effective management of river systems are very important. For achieving an accurate analysis, it is necessary to have sufficient information about the forming processes of river flows. The dynamics of forming process of river systems is assumed to have nonlinear interaction with each other. But, in literature, there is not any consensus between the researchers for the forming processes of river flow systems. The approaches on whether the river flows can be analyzed by stochastic or dynamic is still a continuing debate.

According to the theory of dynamical systems, the evolution of the system can be represented by a trajectory in the phase space. The coordinates of the phase space indicate the state variables, which are necessary to demonstrate the evolution of the system. Transforming a time series into the geometry of a single moving point along a trajectory, where each of its points corresponds to a state of the system, carries out the identification. An attractor can be in the forms of; a point, a finite set of points, a curve, a manifold, or even a complicated set with a fractal structure. If the variable is scalar then the attractor is a subset of the real number line. Describing the attractors of chaotic dynamical systems has been one of the achievements of chaos theory. If a strange attractor is chaotic, exhibiting sensitive dependence on initial conditions, then any two arbitrarily close alternative initial points on the attractor, after any of various numbers of iterations, will lead to points that are arbitrarily far apart (subject to the confines of the attractor), and after any of various other numbers of iterations will lead to points that are arbitrarily close together. Thus a dynamic system with a chaotic attractor is locally unstable yet globally stable. Once some sequences have entered the attractor, nearby points diverge from each other but never depart from the attractor. Chaos theory concerns deterministic systems whose behavior can in principle be predicted. Chaotic systems are predictable for a while and then appear to become random. Chaos depends on the structure of the system as it is based on occurrence of certain parameters. Chaos occurs often in unstable, complex and nonlinear systems. Complex systems are the systems where various number of elements interact with one

another by many degrees of freedom. A non-linear system is the system in which the rules of alternation may also alter during the alternation process by the environmental effects, so the system may give unexpected responses. There are some points to determine a system as chaotic those are listed in perspective: time series should exhibit irregular oscillations, autocorrelation function should exhibit an exponential decay, power spectrum of small frequency band should have wide band noise structure, a random Poincare section view, at least one Lyapunov exponent must be positive, a chaotic set must have fractal dimension. However; those criteria are not robust such as, autocorrelation function analysis are not reliable if the data set do not have normal probability distribution function or power spectrum analysis do not always present the evidence whether the sampled data set is deterministic. Further more, the power spectrum may have a wide range of noise band in small frequencies in both stochastic and deterministic data sets. Therefore, the fractal dimension analysis and Lyapunov exponents are considered the most reliable evidence of chaos.

This study covers many issues from brief Mathematical description of chaos theory to the implementations of those methods on daily gauge river discharge data of 4 basins on Karadeniz Coast, Turkey. As a contribution to the literature, Wavelet Analysis was also implemented on the data to analyze the noise effect on phase space reconstruction. Since the certain noise frequency in natural data can not be determined, the information criteria was used to determine the proper level for Wavelet Analysis. Beside the original data, Approximation (A) and Detail (D) components of the Wavelet Analysis were both examined in chaotic analysis to observe the effect of noise on the phase system. The data of 22 gauge stations of General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ), were gathered for the analysis. The data length of the stations have long records (30 years and more), the results are considered to be reasonable to determine the characteristics of the systems. As the first step of chaotic analysis, phase space system parameters; delay time (T) and embedding dimension (m) were determined to reconstruct the phase space. Delay time (T) was calculated by using Average Mutual Information (AMI) function which is a nonlinear form of autocorrelation function. Embedding dimension (m) was calculated by using False Nearest Neighbor (FNN) algorithm. After the reconstruction of phase space, the dimension of the attractor occurred on the phase was calculated by using Correlation Dimension algorithm. The package program TISEAN 3.0.1 (Time Series Analysis) was used. The program which was written by Hegger et. al. 1999, is the most popular program in literature. The results signify the chaotic behavior of the observed system that all of the data set have fractal dimensions. In addition, it is also observed that the approximation (A) components have less amount of dimension than the original data set, which is a proof of the effect of noise component on systems. The increase of the dimension makes it difficult to monitor the attractor on the phase space. As a conclusion remark, the main characteristic of the system is hidden by the noise.

Lyapunov exponents method is another reliable criteria to determine the chaotic behavior. Rosenstein et. al. (1993) algorithm was used for calculating Lyapunov exponents. Although the exponents have a very small amount (less than 1), a positive exponent is considered to be enough to determine the chaotic character (Khatibi, 2012). Thus, the data sets in the study were proven to exhibit the chaotic behavior.

In the last part of the case study, Local Approximation Method were examined to predict the data. The method based on the chaotic dynamics of the systems. Both the original data and approximation component (A) were used for prediction. The results of both series, show good performance of prediction ( $R^2 > 0.9$ ), as a matter of fact; the approximation component exhibited better performance than the original data sets. As

an explanation in details for each basins, all approximation components of the basin data have super prediction performance ( $R^2 > 0.99$ ) though, in the original data set Doğu Karadeniz basin was observed to have less prediction performance than the other basins. Doğu Karadeniz basin have a different physical hydrological characteristics. By reason of the river regime in the basin having big variation over time, the results signify the fact that, Local Approximation method is not very successful to catch the peaks in the data set. Auto Regressive eXogenous (ARX) model was also used in the study to compare the prediction performance of the Local Approximation Model. As it was in Local Approximation model, again the A component of the data sets exhibit a super prediction performance while the original data have less prediction performance. The performance of ARX methods were also less than the Local Approximation. Thus, the Local Approximation Method is a better prediction model than ARX model since it is believed that the Local Model detects the dynamics of the system better than ARX. Apart from the prediction performance on original data sets, both models exhibited the same performance on approximation (A) component ( $R > 0.99$ ). ARX models are based on the nonlinear dynamics in the systems where Local Model base on chaotic dynamics. But, both models were observed to be sensitive on the noise component in the data sets. Therefore, it is strongly recommended to de-noise the data sets to obtain a better performance.

In conclusion, the successful results of the case study prove that the both methods can achieve good results for forward or backward predictions. Beside, they can also be applicable for estimating the missing data in the data sets. Data is the most important part of accurate analysis of natural systems. Considering the data collection is a World wide issue for researches, new developed methods should be used for missing data estimation and data prediction. Therefore, the study is a good example for further researches on data analysis of natural systems.

The progress on the development of new methods in science and technology should be taken into account to perform more accurate analysis of Hydrological Systems. Nowadays, most of the hydrologists around the World are drawn into the new era of Chaotic Analysis. Unfortunately this era is not very popular among hydrologists in Turkey. However, considering the ongoing water shortage in Turkey, water systems must be well analyzed to build up effective management policies. Daily river data are highly important in drinking water supply , irrigation and energy production. Our main motivation for this study was the lack of nonlinear analysis researches in Turkey on daily river flows. The successful results obtained from the study have convinced us that the chaotic analysis is very useful to determine main characteristics of the river basins. It also provides a better modeling. After all, it is believed this study will be a novel approach for further studies in Turkish River Basin Systems.



## 1. GİRİŞ

Sir Isaac Newton, 1687'de yayınlanan kitabı *Philosophia Naturalis Principia Mathematica*, klasik mekaniğin temelini yaratmıştır ve tarihte en önemli bilimsel kitaplardan biridir. Çalışmasında Newton evrensel kütle çekimini ve hareketin üç kanununu ortaya koymuş ve sonraki üç yüzyıl boyunca bu bakış açısı bilim dünyasına egemen olmuştur. Newton dünyadaki nesnelere hareketleri ile gökyüzündeki nesnelere aynı doğal yasalar ile yönetildiklerini kendi kütle çekim kanunu ile Kepler'in gezegen hareketleri kanunu arasındaki tutarlılıklar ile göstermiştir. Newton o zamana kadar çözülmemiş iki boyutlu problemi çözmüş, yani dünyanın güneş etrafındaki hareketini, birbirlerine uyguladıkları yerçekiminin ters-kare kanununu tanımlamıştır. Newton'u takip eden matematikçiler ve fizikçiler, Newton'un analitik metodunu üç boyutlu probleme yani güneş, dünya ve aydan oluşan sisteme uyarlamaya çalışmışlardır. Ancak mevcut metodların bu problemi çözmek için yeterli olmadığı görülmüştür. 1800'lerin sonlarına doğru Poincaré, bu tür problemlerin çözümleri için geometrik yaklaşımlar geliştirmiştir. Poincaré başlangıç şartlarına duyarlı, periyodik olmayan davranışlar gösteren kararlı sistemlerde, kaosu tanımlayan böylece sistem üzerine uzun süreli tahminlerin yapılamayacağını belirten ilk kişidir. Doğrusal olmayan salınımlar büyük ölçüde radyo, radar ve lazer teknolojilerinde hayati gelişmeler sağlamıştır. Teorik yapıda ise salınımlar yeni matematiksel teknikler keşfedilmesine neden olmuştur. 1950'li yıllarda yüksek hızlı bilgisayarların keşfi dinamik için bir dönüm noktası olmuştur. Bilgisayarlar yardımıyla denklemlerin o zamana kadar mümkün olmayan incelemeleri yapılmıştır. Bu türden doğrusal olmayan uygulamalar, Lorenz'in 1963'te keşfettiği garip çekicilere kadar devam etmiştir. Lorenz hava durumunun niçin tahmin edilemeyen yapıya sahip olduğunu anlamak için bir konveksiyon rulolar modeli geliştirmekte uğraşırken çözüm için makineye verdiği sayılar çok küçük değişikliklerle işleme konulduğunda çok farklı sonuçlar gözlemlenmiştir. Sonuçlarının yorumu olarak; ilk garip çekiciyi bulanlar, üç boyutlu çizimle kaosu görülen bir yapısının olduğunu göstermiştir. 1981'de, Eckmann ve Ruelle, akışkanlardaki türbülansın başlangıcı konusunda yeni bir teori

öne sürmüşlerdir. Birkaç yıl sonra, May (1976) yineleme haritalarında (iterated mapping) kaosu ilk örneklerini sergilemiştir. May'ın yaptığı önemli katkılardan biri de kaosu pedagojisi üzerine verdiği çalışmalarıdır. Feigenbaum (1978) ise kesin ve evrensel tanımlar ortaya koyarak düzenden kaosa geçişin doğasını incelemiştir. Bu yolla birçok farklı sistemin kaotik olabileceğini ortaya koymuştur. Bu kişiler gerek akışkanlardaki gerekse yarı iletkenlerdeki, elektronik devrelerdeki ve kimyasal reaksiyonlardaki kaosu yapısını incelemiş ve test ederek, Kaos Teorisi Literatürü'ne değerli katkılarda bulunmuş bilim adamlarıdır. Son zamanlarda yapılan dikkate değer bir kısım çalışmada Mandelbrot'ya (1997) aittir. Mandelbrot, yeni bir geometrik anlayış oluşturmuş ve grafikleri bilgisayar ortamında elde etmeyi başarmıştır. II. Dünya Sava sonunda, MIT (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü)'de hava tahminleri üzerine bilgisayar destekli araştırmalarda bulunan E. Lorenz, 1963'te icad ettiği minyatür meteoroloji modeliyle meslektaşlar şaşırtmıştı. Lorenz, ilkel bilgisayarını kullanarak havayı en basit şekilde ifade edilebilen bir hale indirgemştir. Havadaki ısı-basınç ilişkilerini, rüzgârın yönünü, siklon gruplamalarını sayısal olarak, her gün 12 denklem yardımıyla kaydedebilen bir algoritmayı geliştirmiştir. Rüzgâr ve hava sıcaklıkları, Lorenz'in yazıcısından satır satır dökülürken dünyadaki gerçekleşme biçimiyle aynı davranışları gösterdiği gözlenmiştir. Dahası, bu listelenen değerlerden hareketle tahminlerde de bulunabilmiştir.

Dinamik sistemler teorisine göre, bir sistemin zamansal evrimi faz uzayındaki yörüngeleri ile temsil edilebilir. Faz uzayının koordinatları, sistemin evrimini tam olarak gösterebilmek için gerekli olan durum değişkenlerinden meydana gelir. Faz portreleri, geçici bir durumdan sonra bütün yörüngeleri kendi üzerine çeken ve "çekici" olarak adlandırılan özgün parametrelere sahiptir. Yörüngeleri çekici tarafından yakalanan bütün başlangıç değerleri bir çekici sahası tanımlar. Deterministik değişim gösteren sistemler nokta, limit çevrim ve tor gibi düşük boyutlu çekicilere sahiptir. Bu tip çekiciler tam sayı gibi bir boyutla karakterize edilebilir. Bu çekicilerin önemli bir özelliği üzerine yakınsayan yörüngelerin birbirlerinden sabit bir mesafede kalmasıdır. Bu durum sistemin uzun süre öngörülebilir olmasına olanak sağlar. Kaosu meydana gelmesi, belirli parametrelere bağlı olduğu gibi sistemin yapısına da bağlıdır. Kaos genellikle kararsız, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde ortaya çıkmaktadır. Karmaşık sistemler, çok sayıda elemanın birbiriyle etkileştiği, pek çok serbestlik derecesi olan yani çeşitli davranış şekilleri gösterebilen, sistemlerdir. Doğrusal olmayan bir sistem, değişim anında değişim kurallarının da değiştiği bir sistemdir ve sistem, dışarıdan

gelebilecek etkilere karşı açıksa, sistemde beklenmeyen davranış biçimleri görülebilir. Kaotik hareket için, zaman serisinin düzensiz salınım göstermesi, otokorelasyon fonksiyonunun eksponensiyel olarak azalması, güç spektrumunun küçük frekanslarda geniş bantlı gürültü yapısına sahip olması, Poincare kesit düzleminin bir bölümünün tamamen ve düzensiz bir şekilde dolması, Lyapunov karakteristik üstellerinin en az bir tanesinin pozitif olması, kaotik bir kümenin boyutunun fraktal olması kriterleri sıralanabilir. Sıralanan kriterlerden, otokorelasyon fonksiyonu, verilerin normal dağılıma uymaması durumunda güvenilir değildir. Benzer şekilde güç spektrumu da, bir zaman serisinin deterministik bir süreçten örneklenip örneklenmediği konusunda kesin bir kriter ortaya koymaz. Güç spektrumunda geniş bantlı gürültü, gerek stokastik gerekse deterministik süreçlerde ortaya çıkabilmektedir (Koçak, 1996).

Dinamik bir sistemin çekicisinin asimtotik sınırları bu dinamiği tanımlayan bağımsız değişkenler tarafından oluşturulan bir faz uzayındaki yörüngeler ile temsil edilebilir. Düzenli bir ( $\Delta t$ ) zaman aralıklarında örneklenmiş tek bir durum değişkenine ait zaman serisinden hareketle faz uzayının yeniden kurulması mümkündür. Bunun için önce “çekici” için gerekli bilgilerin zaman serisinden tahmin edilmesi gereklidir (Koçak, 1996).

Dinamik sistemler, kararlı ve kararlı olmayan davranışlar gösterebilmektedir, sistem davranışlarının belirlenmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda doğrusal olmayan yöntemlerin, doğrusal yöntemlere üstünlüğü ispatlanmıştır (Sivakumar ve Singh, 2011). Doğrusal olmayan yöntemler içerisinde, düzensizliğin ifadesi olarak kabul edilebilen kaosu en belirgin özelliği başlangıç şartlarına sıkı bağımlılığıdır. Dinamik sistemlerin doğrusal olmayan davranışı Deterministik ve/veya stokastik süreçlere de uyum gösterebilirler. Deterministik bir sistemin başlangıç durum denklemleri biliniyorsa sistemin sonraki davranışı belirlenebilir. Bazı basit deterministik dinamik sistemlerin bile önceden kestirilmesi zor anlamında rastgele davranışlar ortaya koyduğu bilinmektedir (Koçak, 1996). Bunun yanında; kaotik sistemlerde, sistemin zaman içindeki gelişimini belirleyebilmek için başlangıç şartlarını sonsuz hassasiyetle bilmek gerekmektedir. Faz uzayının belirlenmesi, dinamik sistemler üzerinde yapılan çalışmaların en önemli aşamasıdır. Sistemin tanımlanması, sistem bileşenlerinin belirlenmesi ve sisteminin davranışının gözlenmesi ya da öngörülmesi gibi çalışmalar için faz uzayının belirlenmesi gerekmektedir.

Akarsu akımlarının yeterli ve doğru bir şekilde modellenmesi için akımı oluşturan süreçler

hakkında ayrıntılı ve yeterli bilgiye sahip olmak gerekir. Literatürde, akarsu akımlarını meydana getiren süreçlerin birbirleriyle doğrusal olmayan etkileşim içinde oldukları kabul gören bir varsayımdır. Ancak araştırmacılar arasında bu ilişkinin türü hakkında bir uzlaşma sağlanamamıştır. Akarsu akımlarının stokastik doğrusal olabileceğini söyleyen geleneksel araştırmacılar ile deterministik doğrusal olmayan olabileceğini söyleyen kaotist hidrolojistler arasındaki tartışma sürmektedir (Sivakumar vd., 2001; Sivakumar ve Jayawardena 2002; Sivakumar vd., 2007).

## **1.1 Tezin Amacı**

Sistem teorisine göre, sistem; mantıki bir bütünlüğü ve tutarlığı olan fikir ve prensipler topluluğu, karşılıklı ilişki ve etkileşim içerisinde bulunan parçaların meydana getirdiği bir bütün veya belirli kurallara göre işleyen bir mekanizma olarak tanımlanmıştır. Sistemler bir çok alt grupta incelenebilmektedir. Kendiliğinden doğada var olan sistemlere, doğal sistemler denir. Doğal sistemler, insan yapılı sistemlere göre daha karmaşık ve analizi zor sistemlerdir. Çevredeki değişimlere tepkisi bakımından ise sistemler, dinamik ve statik sistemler olarak ayrılabilir. Doğal sistemler, çevredeki değişikliklere uğrayan sistemler olduğundan çoğunlukla dinamik sistem sınıfında incelenirler. Dinamik sistemler, kararlı ve kararlı olmayan davranışlar gösterebilmektedir, sistem davranışlarının belirlenmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda doğrusal olmayan yöntemlerin, doğrusal yöntemlere üstünlüğü gösterilmiştir (Sivakumar ve Singh, 2011). Doğrusal olmayan yöntemler içerisinde, düzensizliğin ifadesi olarak kabul edilebilen kaosu en belirgin özelliği başlangıç şartlarına sıkı bağımlılığıdır. Bu nedenle, kaotik sistemlerde, sistemin zaman içindeki gelişimini belirleyebilmek için başlangıç şartlarını sonsuz hassasiyetle bilmek gerekmektedir. Doğal sistemlerin bir parçası olarak düşünülmesi gereken Su havzaları, birçok amaç ve maksat için kullanılmaktadır. Bu maksatlardan; içme su temini, sulama ve enerji üretimi, günümüzde en büyük hedef olarak görülen sürdürülebilir kalkınma açısından çok önemli faktörlerdir. Bu maksatların etkin olarak yerine getirilebilmesi için, havzaların güvenilir analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye Karadeniz sahilinde yer alan 4 havza üzerindeki, 22 istasyona ait akım verileri inceleme altına alınmıştır. Kullanılan veri 30 yıl ve üzerinde kayıt altına alınmış olan uzun kayıtlı istasyonlara ait olmakla birlikte, incelenen veri kümelerinde eksik veri



bulunmamaktadır. Veri analizinde kullanılan yöntemlerin gürültü hassasiyeti yapılan araştırmalarda sıkça ortaya konulmaktadır. Doğal verilerin ölçüm sonuçlarının gürültü içerdiği bilinmekte olduğu için, Dalgacık analizi ile elde edilen, yaklaşım (A) bileşeni de kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak, gürültü karakterli yüksek frekans bileşeninin uygulanan kaotik analiz yöntemlerindeki etkisi incelenmiştir. Dalgacık Analizi yapılırken, seviye belirlemede yapılan çalışmalara katkı olarak entropi kavramı kullanılmıştır. Çalışmada, bunun yanı sıra; hem serinin orijinal hali hem de yaklaşım bileşeni için lokal öngörü yöntemi kullanılarak öngörü yapılmış ve bileşenlerin öngörü performansları inceleme altına alınmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen sonuçlar; serinin salınımlarından ayrılmış olan yaklaşım bileşeninin, öngöründe daha iyi başarımlar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Hidrolojik serilerden, günlük akım verilerinin içerdiği gürültünün kaotik analizdeki etkisi son yıllarda birçok araştırmacının ilgisini çeken konu haline dönmüştür. Bu yönde yapılan araştırmalarda, serinin kendisine uygulanan dalgacık analizi ile parçalamaya dair henüz bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma kaotik analiz yöntemlerin, su kaynaklarının analizinde başarılı olduğu ortaya koymuştur. Bu sebeple, elde edilen sonuçlar Türkiye literatüründe henüz pek ilgi görmeyen kaotik analiz yöntemlerinin etkinliği vurgulamaktadır.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Güvenilir ve doğru akım tahmini su kaynakları yönetimi için gereklidir. Akım modelleri ve tahminler aynı zamanda su kaynaklarının planlaması ve optimizasyonu için de önemlidir. Bu nedenle, birçok başka nedenlerin yanı sıra, akarsu dinamiklerini anlamak Hidroloji ve su kaynaklarının en önemli sorunlardan birini oluşturmaktadır. Bu amaçla, birçok veri odaklı model geliştirilmiş ve bu alanda araştırmalar halen devam etmektedir.

Günlük akım verileri üzerinde yapılan ilk kaos araştırmasını Wilcox vd. 1990 yılında yapmışlardır. Birleşik Devletlerdeki Reynolds dağlarının kar erimesi üzerinde yapılan bu çalışmada, korelasyon boyutları yöntemi ile yeniden kurulan faz uzayında oluşan çekicide beklenen düşük dereceli fraktal (tam sayı olmayan) boyuta rastlanmamış ve bölgedeki kar erimelerinin rastgele hareketinin fiziksel veya iklimsel ilişkiler ile ilgili olduğu ve kaotik bir hareket olmadığı sonucuna varılmıştır. Fakat Jayawardana ve Lai 1994 yılında yaptıkları çalışmalarında, Hong Kong'daki günlük nehir akım verileri üzerinde yaptıkları araştırmada kaosa rastlamış ve öngörü yapmışlardır. Bu çalışma nehir akımları üzerinde lokal öngörü

yöntemi kullanılarak kaotik öngörü yapılan ilk çalışma olup, sonuçlar kurulan bir otoregresif modeli ile de karşılaştırılmıştır. Kaotik karakter göz önünde bulundurularak yapılan öngörünün otoregresif modeli karşısındaki üstünlüğü belirlenmiştir.

Nehir akımları üzerinde yapılan kaotik hareketi belirleme çalışmaları Porporato ve Ridolfi (1997) ile devam etmiştir. Çalışmalarında Po nehrinden elde edilen günlük akımlar için faz uzayı yeniden kurulmuş ve korelasyon boyutu yöntemi ile oluşan çekicininin fraktal boyuta sahip olduğu ve böylece hareketin kaotik olduğu belirlenmiştir. Daha sonra çalışmada lokal öngörü yöntemi ile öngörü yapılmış ve burada serinin içerdiği gürültünün öngöründe etkisi belirlenmiştir. Gürültü giderimi için Schrieber'in 1993 yılında yaptığı çalışmada önerdiği doğrusal olmayan gürültü giderimi metodu kullanılmıştır. Gürültü eklenmiş bir veri kümesi otoregresif hareketli ortalama modeli (ARMA) ile türetilerek, önerilen metodun başarımı test edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, serinin sa

hip olduğu gürültünün, öngöründe etkin olduğu ve öngörü başarımını düşürdüğü gözlenmiştir.

Liu vd. (1997) yılında yaptıkları çalışmada, Birleşik Devletler'in 28 akım gözlem istasyonunun günlük akım verilerini kullanarak, seriden oluşturulacak faz uzayının analizi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Gözlenmiş akım serilerinin yanı sıra, 13 tane de aynı uzunlukta istatistik özellikleri bilinen seri türetilmiştir. Seri türetimi için ARMA modeli kullanılmış ve serilerin bir kısmına gürültü eklemesi yaparak stokastik karakterli davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Orjinal ve türetilmiş serilerin korelasyon boyutlarını hesaplamış ve lokal öngörü yöntemi ile kaotik öngörü denemişlerdir. Serilerin öngörülebilirliğinin de havzaların fiziksel özelliği ile değil, serilerin ölçüm sıklığı (günlük/aylık/yıllık vb) ile ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, ellerindeki hem gözlenmiş hem türetilmiş veri ile, günlük nehir akımlarının geniş bir aralıkta, deterministik karakter ile gürültülü stokastik karakter arasında değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Stokastik karakterli olarak nitelendirilen, gürültülü serinin öngörü başarımını düşürdüğü ve gürültüsü giderilmiş serinin ise deterministik karakter göstererek öngöründe daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, türetilmiş serilere gürültü eklenerek gürültünün faz uzayındaki etkisi incelenmiş ve eklenen gürültünün yeniden kurulan faz uzayında oluşan çekicininin fraktal boyutunu yükselttiği gözlenmiştir..

Krasovskia vd. 1999 yılında, İskandinav akımlarının oluşturduğu sistemin boyutlarını bulmak için bir çalışma yapmıştır. Kullanılan veri İskandinav havzalarındaki 49 istasyondan temin edilmiş 66 yıllık, aylık akım serileridir. İstasyonlar seçilirken, İskandinav akımlarının

karakterini en belirgin şekilde gösteren havzalar seçilmiştir. Akım rejimleri, yılın değişik zamanlarındaki oluşumlarına göre yüksek ve düşük karakterli değişim göstermektedir. Çalışmada bu veri seti kullanılmış ve ilk olarak seriler bütün olarak ele alınıp, fraktal boyutları hesaplanmıştır. Seriler daha sonra entropilerine göre sınıflandırılarak gruplara ayrılmış ve bu ayrılan her bir grubun içsel boyutu incelenmiştir. Grupların içsel boyutları araştırılırken Krasovskia'nın 1999 yılında oluşturduğu entropi tabanlı boyut analizi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada hem verinin bütünü hem de oluşturulan parçaların boyutları ile İskandinav akımlarının mevsimsel davranışı ilgili bilgi sahibi olunacağı belirlenmiştir. Kuzey İskandinav bölgesinin akımlarının davranışının daha kararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Pasternack, 1999 yılında yaptığı çalışmada günlük akım verileri üzerinde korelasyon boyutları yöntemi ile faz uzayının uygun gömme boyutunu ve oluşacak çekicinin fraktal boyutunu bulmak için bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında, korelasyon boyutları yönteminin sonuçlarının güvenilirliğini de değerlendirmeye almıştır. Gömme boyutu 5'ten küçük olan çekicilerin kaotik hareketi tam olarak göstermediğini ve 3. boyuttan sonra, veri gömüldüğü zaman karakterini kaybettiğini ileri sürmüştür. Kullandığı akım serilerinin lognormal dağılıma uyduğunu kabul etmiş, ve deterministik karakterli olduğu bilinen atmosferik veriler ile karşılaştırdığında, lognormal dağılıma uyan verilerin içsel etki içinde kaldığını gözlemlemiştir. Sonuç olarak, korelasyon boyutları yönteminin hidrolojik serilerin üzerinde etkin bir yöntem olmadığını belirtmiş ve hidrolojik serilerin stokastik karakterli davranış içinde yer aldığını vurgulamıştır. Fakat, bu çalışma çok fazla eleştiri almıştır. Liaw vd. 2001 yılında makale üzerine yayınladığı bir eleştiride, yapılan çalışmada gömme boyutu ve erteleme zamanının yanlış hesaplandığını tespit etmiştir.

Bu tarihten sonra yapılan çalışmalarda, hidrolojik karakterli serilerin de faz uzayının yeniden oluşturulması esnasında, korelasyon boyutları yöntemi kullanılarak, hem seriye ait çekicinin fraktal boyutunun hem de bu integralin doyuma ulaştığı noktanın çift logaritmik ekseninde gömme boyutunu hesaplanabildiği kabul edilmiştir. Literatür araştırmasında, 2000 yılından itibaren yapılan çalışmaların daha çok, serinin kaotik karakteri belirlendikten sonra bu karakteri göz önünde bulundurarak öngörü ve serilerin eksik verilerinin tamamlanması üzerine yoğunlaşmıştır.

Lambrakis, 2000 yılında yaptığı çalışmada, Girit Adası günlük akımlarını kullanmıştır. lokal öngörü ile yaptığı öngörünün yapay sinir ağları (ANN) kullanılarak yapılan öngörüye göre daha başarılı olduğu sonucuna varmıştır. Özellikle kısa süreli öngöründe kaotik karakterin göz

önünde bulundurulmasının, öngörü başarısını arttırdığı da vurgulanmıştır. Lisi ve Willi 2001 yılında yaptıkları çalışmada, 1921 yılından beri kayıtlı Adige Nehri (İtalya) günlük ortalama akımları üzerinde en büyük Lyapunov üsteli yöntemleri ile kaos araştırması yapmış ve en büyük Lyapunov üstelini 0.007 olarak hesaplamışlardır. Literatürde eskiden beri kullanılan bu yöntemde, Lyapunov'un 1. Yöntemi ile serinin kendisinden, herhangi dinamik denklem olmadan bulunun en büyük kökün pozitif olması halinde, bu seri davranışının ıraksak olduğunun göstergesi olarak kabul edilmektedir (Lisi ve Willi, 2001). Kaotik karakterli serilerin de ıraksak davranış gösterdiği göz önünde bulundurulursa; bulunan köklerden herhangi birinin pozitif olması, serinin kaotik olduğunun da bir kanıtıdır. Günümüzde, gözlenmiş serilerden Lyapunov üstellerinin hesaplanmasında kullanılan en yaygın yöntem Rosenstein (1993), yöntemidir. Çalışmada bunlara ek olarak, Lokal Öngörü ve ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) modelleri ile öngörü yapılmış ve 3-günlük öngörüye kadar lokal öngörü yöntemi ile daha başarılı sonuçlar elde edildiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada yer alan önemli bir diğer nokta ise, korelasyon boyutları belirli bir noktadan sonra doyuma ulaştığı ve gömme boyutu artsa da korelasyon boyutu değişmediği için öngörü yapılırken, sadece grafikte elde edilen doyum noktasının değil eğer arzu edilirse ondan sonra gelen herhangi bir noktanın da gömme boyutu olarak seçilebileceği vurgulamışlardır. Elshorbagy yaptığı çalışmada (2002), eksik akımların tamamlanması üzerinde durmuş, serilerin kaotik davranışlarını göz önünde bulundurarak gerek geriye gerek ileriye yönelik eksik veri tamamlanması üzerine hem tek değişkenli hem çok değişkenli seriler üzerinde, araştırmalar yapmış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Hidroloji alanında yapılan sistem modellemeleri çalışmaları genelde iki temel varsayım yaklaşımı üzerinden yapılmaktadır. Bunlar stokastik ve kaotik varsayımlardır. Hidrolojik verilerin sonsuz serbestlik derecesine sahip olduğunu düşünen stokastik varsayımlar üzerinde çalışan araştırmacılar, Hidrolojik sistemlerin otoregresif ve/veya otoregresif hareketli ortalamalar yöntemleri ile modellemişler ve başarılı sonuçlarda elde etmişlerdir (Al-Awadhi ve Jolliffe, 1998; Chang vd., 2004). Bu yaklaşıma ek olarak Marques (2006), Pekarova vd. (2009), Tongal (2013a, 2013b) yaptıkları çalışmalarda, inceledikleri akım modellerine, mevsimsellik indisini de katarak, kurulan modelere mevsimsellik indislerini de eklemişlerdir. Ancak bu modelleri kullanmak için, verilerin Gaussian dağılıma ve durağanlığa sahip olduğu kabulünün yapılması gereklidir. Son dönemlerde yapılan çalışmalarda Hidrolojik serilerin kaotik ve doğrusal olmayan yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Khokhlov vd. (2008), yaptığı

çalışmada, akım serilerinin stokastik modellere başarılı cevaplar vermesine rağmen, içerisinde halen doğrusal olmayan dinamikleri barındırdığını ispatlamıştır. Günlük akım serilerinin yanı sıra diğer hidrolojik veriler kullanılarak da kaotik analiz çalışmaları yapılmıştır. Göl seviyesi yüksekliği (Frison vd.,1999), yağış verisi (Dhanya ve Kumar, 2011) gibi bir çok veri üzerinde çalışmış ve yapılan çalışmaların sonucunda Hidrolojik verilerin kaotik davranışa sahip olduğu ispatlanmıştır. Khatibi vd. (2012), yaptıkları çalışmada, Kızılırmak nehri üzerindeki tek bir istasyonda, nehir seviyesi-nehir akımı üzerinde iki değişkenli model üzerinde çalışarak, kaotik davranışı her iki seri içinde ispatlamış ve lokal öngörü modeli ile öngörü de yaparak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Bunun yanı sıra, nehir akımı verileri kullanarak, kaotik davranışa uygun yapay sinir ağı modelleri kurarak, öngörü yapılan çalışmalar da mevcuttur (Araghinejad vd., 2011; Deka vd., 2012; Kuo-Lin, 2011; Vafakhah, 2012; Wu ve Chau, 2010 , Tongal vd., 2013b).

Yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen başarılı sonuçlar, araştırmacıların, kaotik analiz yöntemlerini kullanmaları konusunda teşvik oluşturmuş ve bu kullanılan yöntemlerin geliştirilmesine de vesile olmuştur. Kaos teorisinin Hidroloji alanında kullanımını halen geliştirmekte olan, yeni ve yeniliklere açık bir araştırma konusu haline gelmiştir.



## 2. DİNAMİK SİSTEMLER VE KAOS

### 2.1 Giriş

Bir veya birden fazla bağımlı değişkenin, bir veya birden fazla bağımsız değişkene göre türevlerini içeren denkleme diferansiyel denklem denir (Barmish, 1984). Diferansiyel denklemler, özellikle tanımlanmış bir zaman aralığında belirli yasalara uyan durumların matematiksel olarak modellenmesinde kullanılan güçlü araçlardır. Buradaki ana unsur hareket halindeki (dinamik) sistemlerin incelenmesidir. Bazı doğal sistemleri, altlarında her ne kadar karmaşık ve çözümlenmesi imkânsız sistemler bütünü barındırsa da, oldukça basit matematiksel modeller ile modellenmektedir. Burada temel sorun varsayımların gerçeği çözümlenmedeki etkisi veya sonucudur. Oluşturulan bazı diferansiyel denklem modelleri durumu tam olarak açıklayamayabilir, ancak asıl önemli olan , sistemin çözümü hakkında genel bir fikir verebilmesidir (Barmish,1984). Aynı bakış açısından diferansiyel denklemler gerçek dünyadada, özel şartlar altında, son derece karmaşık çözüm uzaylarına sahip olmakta ve nicelden çok nitel analizler ile açıklanmaktadır. Bu nitel analizler aynı zamanda doğada gözlenebilen ancak kesin çözümlere ulaştırılamayacak sistemlerin analizine de ışık tutmakta ve kaosun neden var olduğu ve matematiksel olarak nasıl tanımlanacağı gibi sorulara yanıt vermektedir.

### 2.2 Kaotik Sistemler

1960'lı yıllara dek çeşitli bilim adamları tarafından sürdürülen çalışmaların başlangıç durumuna hassas bağlı sistemlerin doğası ile ilgili görünür bir çalışma ortaya koyamadığı gözlenir. Ancak literatürde deneysel sonuçlardan elde edilen beklenmedik sonuçlara yönelik olarak bu kapalı kutu, Edward Lorenz adında Amerikalı bir bilim adamı tarafından tekrar açılır. Bazı atmosferik süreçler, ne kadar basit yapıda olursa olsun tahmin süresini büyük oranlarda düşürür. Başlangıçta Lorenz bunun bir bilgisayar hatasından kaynaklandığını düşünerek, çok düşük boyuta (low-dimensional) sahip diferansiyel sistemlerin kararsız

yörüngeler izleyebileceğine dikkat çekmiştir. Ondan sonra gelenler de bu tip yapıların, topoloji adı verilen ve matematiğin derin analiz gerektiren dallarından birinin uzantısı olabileceğini belirtmiştir (smale nale). Ayrıca bu tarz sistemleri tanımlayacak sözcük olan kaos, 1975 yılında aralarında Yorke'nin de bulunduğu bilim adamları tarafından literatüre kazandırılmıştır.. Kaotik sistem, ilk koşullara büyük hassasiyetle bağımlı bir sistemdir. Birbirine çok yakın iki noktadan başlayan yörüngeler, daha sonra aynı yönde gitmeleri gerekirken, kaotik sistemlerde bu yörüngeler zamanla uzaklaşmakta ve kestirimi imkânsız hale gelmektedir. Bir sistemin kaotik davranış göstermesi sadece dış etkenlere bağlı değildir, sistemin kendi iç dinamiği ve başlangıç şartları ile sıkı ilişki içindedir. Kaotik sistemler; zaman boyutunda düzensiz davranış gösterir, başlangıç şartlarına hassas bir duyarlılık gösterirler, sınırsız sayıda değişik periyodik salınımlar ihtiva ederler, gürültü benzeri geniş güç spektrumuna sahiptirler, genliği ve frekansı tespit edilemeyen ancak sınırlı bir alanda değişen işaretler ihtiva ederler (Aihara, 2002).

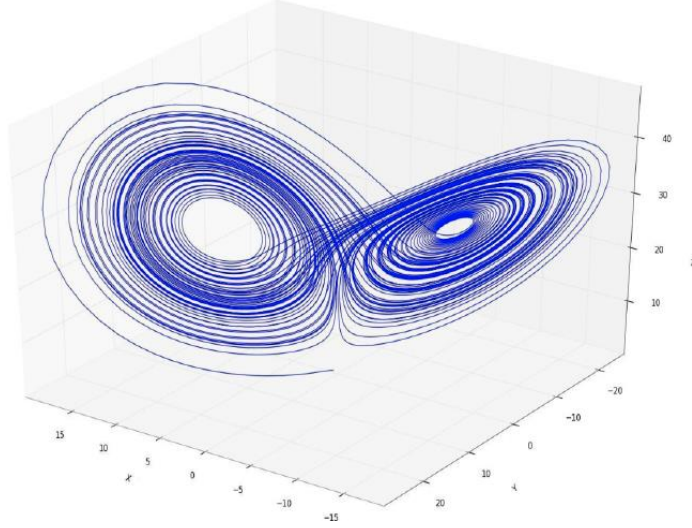
### 2.2.1 Lorenz Çekicisi

Kaotik sürekli zamanlı dinamik sistemlerden birisi Lorenz çekicisidir. Lorenz kaotik sistemi üç boyutlu akışkan konveksiyonu için bir model olarak sunulmuştur. Bu çalışmalarda üç değişkenden ikisi sıcaklık, diğeri hız alanı katsayısıdır. Lorenz denklemleri ;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= s(-x + y) \\ \dot{y} &= rx - y - xz \\ \dot{z} &= -bz + xy \\ s, r, b &> 0\end{aligned}\tag{2.1}$$

olarak ifade edilmiştir (Eşitlik (2.1)). Burada; s, r ve b durum değişkenleridir. Sistemin karakteristik özelliği, spektrumu geniş bir frekans bölgesine yayılmış periyodik olmayan salınımlar üretmesidir. Sistemin kaotik davranış sergilediği parametre değerleri; s=10, r=28 ve b=2,66'dır. Şekil 2.1'de söz konusu parametre değerlerine ait Lorenz çekicisinin görüntüsü gösterilmiştir.





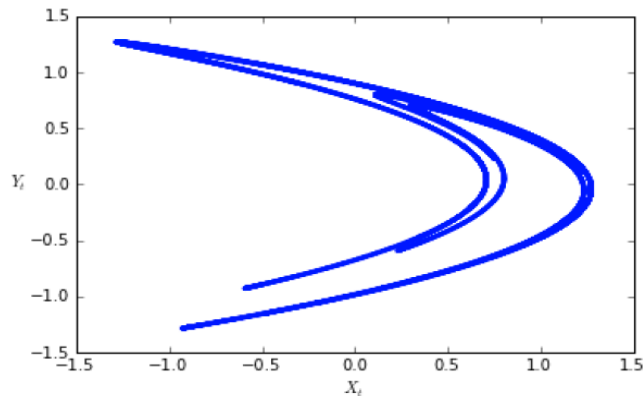
Şekil 2.1 : Lorenz Çekicisi.

### 2.2.2 Hennon Çekicisi

İki boyutlu kesikli zamanlı dinamik sistemlerden biri olarak, Fransız astronom Henon tarafından ortaya konmuştur. Sistemin dinamik denklemleri;

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= 1 + y_t - ax_t^2 \\ y_{t+1} &= bx_t \end{aligned} \quad (2.2)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Henon çekicisine ait  $a = 1.4$  ve  $b = 0.3$  için Henon çekicisi görüntüsü Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



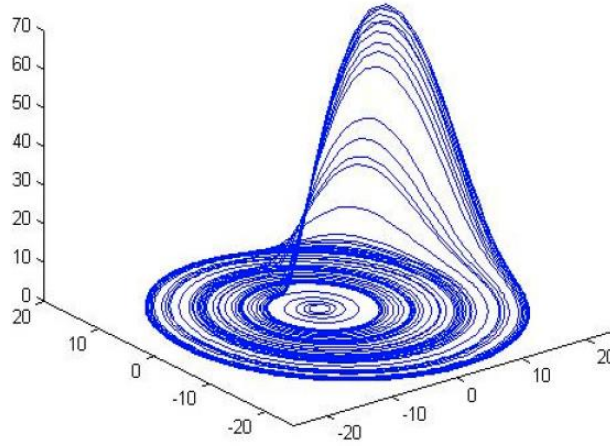
Şekil 2.2 : Hennon Çekicisi.

### 2.2.3 Rössler Çekicisi

Kaotik sürekli zamanlı dinamik bir sistem olan Rössler çekicisi, kimyasal reaksiyonların dinamiği ile ortaya çıkmıştır. Sistemin dinamik denklemleri;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -(y + z) \\ \dot{y} &= x + ay \\ \dot{z} &= b + z(x - c)\end{aligned}\tag{2.3}$$
$$a, b, c > 0$$

biçiminde (Eşitlik (2.3)) ifade edilmiştir. Rössler çekicisine ait  $a = 0.2$ ,  $b = 0.2$  ve  $c = 5.7$  parametre değerleri için görüntü Şekil 2.3'te verilmiştir. Literatürde, Lojistik denklem, Duffing, Chua, Van der pol gibi daha fazla kaotik sistem olmasına rağmen bu çalışmada yukarıda bahsi geçen üç sistem örneklendirilmiştir.



Şekil 2.3 : Rossler Çekicisi.

### 2.3 Kaotik Analiz Yöntemleri

Kaos, literatürde karmaşa ve kargaşalık olarak kullanılmasına rağmen, kaotik sistemler karmaşıklık veya kargaşa olan sistemler değildirler. Karmaşık olan sistemler hiçbir durumda davranışları kontrol altına alınamayan sistemlerdir, çünkü başlangıç koşullarına bağlı değildirler. Oysaki kaotik sistemler analiz edilebilen ve kontroledilebilen sistemlerdir. Bir sistemin kaotik olup olmadığını anlamaya yarayan birçok yöntem bulunmaktadır (Özkaynak

ve Öksüztepe, 2010). Doğrusal olmayan sistemlerde kaos analizi yapmak için en çok kullanılan yöntemler; güç spektrumu, Poincare haritalama, faz uzayının incelenmesi, Lyapunov üstelleri, olarak sıralanabilir.

### 2.3.1 Güç Spektrumu

Dinamik sistemler, sürekli veya kesikli değişkenlere ait  $F(t)$  zaman dizileri ile ifade edilirler. Herhangi bir  $F(t)$  fonksiyonu periyodik bileşenlerin üst üste gelmesi ile oluşur. Bu bileşenlerin oransal büyüklüklerinin belirlenmesi spektral analiz olarak adlandırılır (Corana, vd. 2004).  $F(t)$ 'nin yapısına göre farklı iki yolla gösterim yapılır.  $F(t)$  periyodik ise, spektrum frekansları, temel frekansların tam katları olan hareketlerin doğrusal bileşimi olarak ifade edilir. Bu bileşim Fourier dizisini oluşturur.  $F(t)$  periyodik değil ise, sürekli frekanslı hareketlerin bir bileşimi ile ifade edilir. Böyle bir spektrum ise Fourier dönüşümünü verir. Bu gösterim kaotik dinamik davranış için kullanışlıdır (Pamuk, 2013).  $F(t)$ 'nin Fourier dizi gösterimi (Eşitlik (2.4-2.6));

$$F(t) = f(t + nT), \quad \frac{1}{T} = \omega_0/2\pi \quad (2.4)$$

$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{j\omega_0 t n} \quad (2.5)$$

$$F(t) = F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(\omega) e^{j\omega t} d\omega \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{j\omega_0 t n} \quad (2.6)$$

şeklinde verilir. Bileşenin genliği  $a_n$  ile gösterilir. Bileşenin kaotik olduğunu gösteren en önemli ölçüt, bu bileşene ait güç spektrumunun geniş bant yapısına sahip olmasıdır (Pamuk, 2013). Bir dinamik sistemde karşılaşılabilecek davranış türlerinden  $T$  periyodu davranış içingüç spektrumu  $(1/T)$  temel frekans ve bunun uyumlarında  $(2/T)$ ,  $(3/T)$ ,..., genlik olarak gittikçe zayıflayan piklerden oluşur. Yarı periyodik bir davranış için ise  $(1/T_1)$ ,  $(1/T_2)$ ,... gibi farklı iki veya daha fazla temel frekans ve bunların  $(2/T_1)$ ,  $(2/T_2)$ ,  $(3/T_1)$ ,  $(3/T_2)$ ,..., uyumlarında genlik olarak gittikçe zayıflayan piklerden oluşur. Kaotik hareket için güç spektrumu ise geniş bir bant için yükseklik ve genişlikleri rastgele olan piklerden oluşur.

### 2.3.2 Poincare Haritalamaları

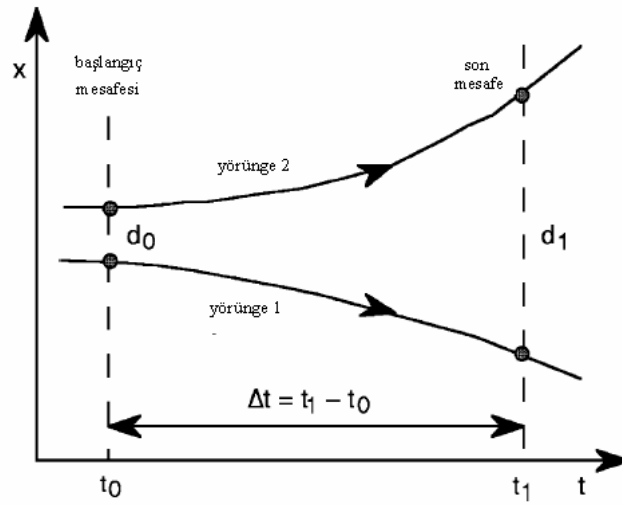
Birçok durumda ayrık zamanlı bir sistemi analiz etmek, sürekli zamanlı bir sistemi analiz etmekten daha kolaydır. Poincare isimli bilim adamı bu işi başarmak için bir yöntem geliştirmiştir. Aslında bu yöntem,  $n$ . dereceden sürekli bir dinamik sistemi ( $n-1$ ). dereceden ayrık zamanlı bir dinamik sisteme dönüştürme işlemidir (Özer ve Zorlu, 2012). Faz uzayında Poincare yüzeyi diye bilinen bir yüzey seçilir. Bu yüzey üzerinde yörüngenin geçtiği noktalar işaretlenerek bir harita elde edilir. Poincare yüzeyi seçilirken belirli bir kural yoktur. Tamamen kişinin tecrübesine göre yörüngenin geçtiği bir yüzey seçilir. Faz uzayı izlenirken belirli aralıklarla örnek alınarak Poincare haritası elde edilir. Örnekleme süresi ise sistemi süren büyüklüğün periyodudur. Karmaşık sistemleri daha basit hale getirmek ve kararlılık analizi yapmak için elverişlidir (Baker ve Gollub, 1996). Periyodik bir davranış Poincare haritalama yöntemi ile incelenirse, sabit bir nokta elde edilir. Çünkü sistemin periyodu ile aynı zaman dilimlerinde örnekler alınırsa, hep aynı nokta alınacağından tek bir nokta görülür. Sistemin periyodu ise kapalı bir çevrimdir. Fakat sistem kaotik ise, kapalı olmayan, gelişmiş güzel kapalı bir fraktal şekil oluşur.

### 2.3.3 Lyapunov Üstelleri

Sistemin kaotik karakterini belirlemenin bir yolu da Lyapunov Üstelleri yöntemidir. Dinamik sistemin faz uzayındaki iki komşu başlangıç noktalarının ortalama üstellerinin ıraksama veya yakınsamasını ölçmektedir. Pozitif bir Lyapunov üsteli iki komşu yörüngenin ortalama üstel olarak ıraksadığını ölçerken negatif bir Lyapunov üsteli iki komşu yörüngenin ortalama üstel olarak yakınsadığını ölçmektedir. Pozitif Lyapunov üsteli aynı zamanda sistemin kaotik olduğunun bir göstergesidir. Doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin kararlılığının incelenmesinde değişmez üstellerin kullanılabileceğini ilk olarak 1889 yılında Stockholm Üniversitesinde profesör olan Rus matematikçi Sonya 3Kovalevskaya (1850–1891) göstermiştir. Kovalevskaya'nın çalışması daha sonra 1892 yılında diğer bir Rus matematikçi olan Alexandr Mikhailovich Lyapunov (1857–1918) tarafından geliştirilmiştir. Lyapunov çalışmasında sadece Lyapunov üstelleri ile bir dinamik sistemin zamanın bir fonksiyonu olarak yörüngelerinin uzaklaşmasının değişimi ile ilgili düşüncelerinin temellerini açıklamıştır. Lyapunov üstellerini kullanarak analiz yapma fikrinin çıkış noktası kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına olan bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Kaotik bir sistem

birbirine çok yakın komşu iki başlangıç noktasından başlatıldığında yörüngelerin gittikçe birbirinden uzaklaşması veya yaklaşması ile kaos analizi yapılabilir. Lyapunov üstelleri komşu yörüngeler arasındaki bu mesafeyi ölçen matematiksel bir yöntemdir (Strogatz 1994). Sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı sistemler için Lyapunov üstelleri hesaplanabilmektedir. Bunun yanı sıra deney veya benzetim sonuçlarından elde edilen zaman serilerinden de Lyapunov üstelleri hesaplanması mümkündür (Wolf vd., 1985).

Yörüngeler grafiksel olarak Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Yörüngelerin zaman periyodu  $\Delta t = t_1 - t_0$  ve bu zaman periyodu boyunca aralarındaki farkın artışı ise  $d_1$  ile tanımlanmıştır.



**Şekil 2.4 : Yörüngelerin Değişimi.**

Lyapunov üstellerinin önemli bir diğer karakteristiği de analiz edilecek sistemin denklemleri açık şekilde bilinmese veya denklemlerin çözümleri yapılamazsa bile analiz işlemini gerçekleştirebilmesidir. Sistemden elde edilen zaman serisi kaos içermesi durumunda bu veriler faz uzayında yeniden kurularak matematiksel modellerine ve çözümlerine ihtiyaç duymadan doğrudan Lyapunov üstelleri hesaplanabilir. Bu üsteller kullanılarak sistemin kararlılığı incelenebilir.

### 2.3.4 Faz Uzayının İncelenmesi

Dinamik sistemler teorisine göre, bir sistemin zamansal evrimi faz uzayındaki yörüngeleri ile temsil edilebilir (Koçak,1996). Faz uzayının koordinatları, sistemin evrimini tam olarak gösterebilmek için gerekli olan durum değişkenlerinden meydana gelir. Ölçülmüş verilerden oluşan sistemin evrimini izleyebilmek için faz uzayının yeniden kurulması gerekmektedir.

### 2.3.4.1 Faz Uzayının Yeniden Kurulması

$x(n) = x(t_0 + n\tau s)$  ile ifade edilen skaler ölçüm üzerindeki bilgiden sistemin faz uzayını yeniden kurulumunda, zaman gecikmeli koordinatlar yöntemi, kullanılabilir. Zaman gecikmeli koordinatlar yöntemi, dinamik bir sisteme ait skaler veriden çok boyutlu faz uzayına geçiş için kullanılan tek sistematik ve literatürde en çok kullanılan yöntemdir (Koçak, 1996). Yönteme göre, eğer zaman boyunca bir sistemde yalnızca tek bir değişken izleniyorsa, orijinal verinin bir veya daha fazla zaman gecikmeli kopyaları kullanılarak, bu değişkenden sistemin mevcut dinamiklerini hesaplamak mümkündür (Abarbanel, vd., 1993). Eğer bir zaman serisi  $d$  boyutlu ( $d$  bir tamsayı) bir çekicinin elemanı ise çekicinin topolojik özellikleri  $m$  boyutlu faz uzayı vektörleri tarafından ( $m \geq 2d + 1$ ) şekillendirilen topolojik özelliklere eşdeğerdir. Veriye ait çekici, Takens teoremi ile verinin zaman gecikmeli kopyaları kullanılarak  $m$  boyutlu faz uzayında oluşturulur (Eşitlik (2.7)).

$$y^i = (x(i\Delta t), x(i\Delta t + T), x(i\Delta t + 2T), \dots, x(i\Delta t + (m-1)T)) \quad (2.7)$$

Faz uzayında oluşan bu  $d$ -boyutlu şekle “çekici” adı ve verilir.  $T$  zaman gecikmesi,  $m$  gömülü boyuttur. Farklı  $T$  ve  $m$  seçimleri farklı çekicileri oluştururlar.

### 3. KAOTİK SİSTEMLERİN KARAKTERİZE EDİLMESİ

#### 3.1 Amaç

Kaotik hareket için zaman serisinin düzensiz bir salınım göstermesi, otokorelasyon fonksiyonunun eksponensiyel olarak azalması, güç spektrumunun küçük frekanslarda geniş bantlı gürültü yapısına sahip olması, Poincare kesit düzleminin bir bölümünün tamamen ve düzensiz bir şekilde dolması, Lyapunov karakteristik üstellerinin en az bir tanesinin pozitif olması, kaotik bir kümenin boyutunun fraktal olması vb. kriterlerini sıralamak mümkündür (Koçak, 1996). Sıralanan bu kriterlerden, serinin düzensiz salınım göstermesi grafik yorumlarında kişisel farklılıklar görülebileceği için kesin bir yargı elde etmek mümkün değildir. Otokorelasyon fonksiyonu ise, verilerin normal dağılıma uymaması durumunda güvenilir sonuçlar vermeyebilir (Koçak, 1996). Güç spektrumundaki geniş bantlı gürültü ise kaotik sistemlere ek olarak, stokastik süreçlerde de görülebileceği için, sistemin karakterine karar vermek için güvenilir bir yöntem olarak kabul edilmemektedir. Sonuç olarak bahsi geçen kriterlerden sistemin karakteri hakkında en etkin ve güvenilir yargıya varmamızı sağlayacak olan kriterler, fraktal boyut kümeleri ve Lyapunov üstelleridir.

#### 3.2 Lyapunov Üstelleri

Kaotik sistemlerin periyodik olmayan dinamikler göstermesinin sebebi, faz uzayı eğrilerinin her birinin neredeyse aynı başlangıç şartlarında farklı üstel artış oranlarına sahip olmalarıdır. Bu duruma başlangıç koşullarına hassas duyarlılık denir. Lyapunov üsteli  $\lambda$ , başlangıç şartlarına olan duyarlılığın bir ölçüsünü verir ve faz uzayı içindeki komşu eğrilerin yerel ayrılma derecelerinin ortalaması olarak tanımlanır (Eckmann ve Ruelle, 1985). Eğer  $\lambda$  negatif ise farklı başlangıç şartları aynı çıkış değerlerini vermeye meyillidir ve dolayısıyla gelişme kaotik değildir. Eğer  $\lambda$  pozitif ise farklı başlangıç değerleri farklı çıkış değerleri verir yani hareket kaotiktir.

### 3.2.1 Ayrık Zamanlı Sistemlerden Lyapunov Üstellerinin Hesaplanması

Ayrık zamanlı sistemlerde Lyapunov üstelleri genel olarak yörünge türevinden elde edilebilir. Eğer sistem bir boyutlu ise sadece bir Lyapunov üsteli içermektedir. Aynı mantıkla yöntem n boyutlu bir sistem n adet Lyapunov üsteline sahip olacaktır. Tekrarlı (iteratif) yapıya sahip bir sistem Eşitlik (3.1) şeklinde ifade edilirse;

$$x_{n+1} = g(x_n) \quad (3.1)$$

burada  $g(x_n)$  haritası mevcut  $x_n$  değerinden sonra gelen  $x_{n+1}$  değerini kestirmek için kullanılır. Bu yüzden ayrık zaman serisi n düzenli aralıklarıyla etiketlenen  $\{x_n\}$  değerlerini üretmektedir. Bir boyutlu  $x_{n+1} = g(x_n)$  haritası için  $\lambda$  Lyapunov üsteli  $x_0$  başlangıç koşulu için  $\lambda(x_0)$  gösterilmektedir. Ölçülen ortalama hatanın her tekrardaki artış hızı veya eşdeğer olarak  $x_0$  yakın tekrarlarının süresince bilginin ortalama kaybıdır. Eğer g haritası açık şekilde biliniyorsa Lyapunov üstelleri kolaylıkla hesaplanabilir. İki komşu nokta  $x_0$  ve  $(x_0 + \Delta x_0)$  seçilir. Bir adım sonra ayrıklaşma Eşitlik (3.2) ve Eşitlik (3.3)'de ifade edildiği şekilde olacaktır.

$$\Delta x_1 = g(x_0 + \Delta x_0) - g(x_0) \quad (3.2)$$

$$\left(\frac{\Delta x_1}{\Delta x_0}\right) = \left(\frac{[g(x_0 + \Delta x_0) - g(x_0)]}{\Delta x_0}\right) \quad (3.3)$$

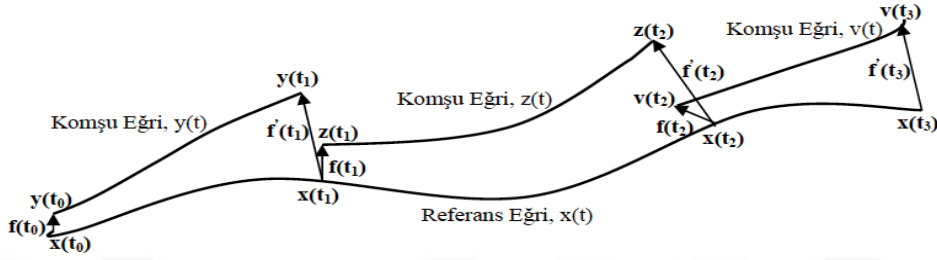
Eşitlik (3.2)'de kapalı parantezler arasında verilen ifade hesaplamada N yörünge parçası boyunca ortalama olarak alınan yörüngelerin seçilmesinin başarısıdır. Bu ifade Eşitlik (3.3) ile karşılaştırıldığından hatanın indirgeniği görülmektedir (Urbach, 2000).

### 3.2.2 Lyapunov Üstellerinin Doğrudan Veriden Hesaplanması

Lyapunov üstellerinin önemli bir diğer karakteristiği de analiz edilecek sistemin denklemleri açık şekilde bilinmese veya denklemlerin çözümleri yapılamazsa bile analiz işlemini gerçekleştirebilmesidir. Sistemden elde edilen zaman serisi kaos içermesi durumunda bu veriler faz uzayında yeniden kurularak matematiksel modellerine ve çözümlerine ihtiyaç duymadan doğrudan Lyapunov üstelleri hesaplanabilir. Direkt metotlar, veriye uygun bir model olmaksızın, faz uzayında oluşturulan çekicilere ait eğrilerin ıraksama/yakınsama durumlarının direkt olarak hesaplanmasına dayanır. Bir zaman serisinden direkt olarak



Lyapunov üstellerinin hesaplanmasına yönelik ilk algoritmalar Wolf vd. (1985), Sano ve Sawada (1985) tarafından sunulmuştur. Bu metotlar ilk olarak, yukarıda açıklanan zaman gecikmeli koordinatlar metodunu kullanarak zaman serisinin faz uzayındaki çekici oluştururlar. Wolf vd. (1985) algoritmasına göre, faz uzayında oluşturulan çekici üzerinden en büyük Lyapunov üsteli hesaplanabilir.



**Şekil 3.1 : Lyapunov Üstellerinin Hesaplanması.**

Şekil 3.1’de  $x(t_0)$  referans noktası ve  $y(t_0)$  en yakın komşu nokta seçilerek, bu noktalar arasındaki ayrılma mesafesi  $f(t_0)$  bu iki nokta arasındaki Öklid farkı ile bulunur (Eşitlik (3.4)).

$$f(t_0) = \|x(t_0) - y(t_0)\| \quad (3.4)$$

Bu noktaların ait oldukları eğrilerin ( $x$  ve  $y$  eğrileri)  $t_1$  zamanı sonrasındaki değerleri kullanılarak da  $f'(t_1)$  farkı yine aynı şekilde hesaplanır. Referans eğrinin  $t_1$  noktasında  $x(t_1)$ , ilk seçilen eğri ( $y$  eğrisi) ile yaklaşık olarak aynı yöne sahip yeni bir eğri ( $z$  eğrisi) seçilir ki  $z(t_1)$  noktası  $x(t_1)$  noktasına en yakın olandır ve aralarındaki öklit farkı  $f(t_1)$  bulunur. Bir  $t_2$  zamanı için yine bu eğrilere ( $x$  ve  $z$ ) ait noktalar arasındaki fark da  $f'(t_2)$  olarak bulunur. Bu arada elde edilen Öklid farklarının oranı  $f'(t_1)/f(t_0)$  veya  $f'(t_2)/f(t_1)$  her bir nokta çifti arasındaki genişlemeyi verir. Elde edilen grafiğin logaritması (Eşitlik (3.5)) eğrinin bir noktadan itibaren üstel genişlemesini verir (Yılmaz ve Güler, 2006).

$$\log\left(\frac{f'(t_i + 1)}{f(t_i)}\right) / (t_i + 1 - t_i) \quad (3.5)$$

Yukarıda açıklanan işlem  $N$  defa tekrar edilir ve en büyük Lyapunov üsteli Eşitlik (3.6)’da gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{i=1}^N \log \frac{f'(t_i)}{f(t_{i-1})} \quad (3.6)$$

Bu algoritma gürültü bozulması olmayan geniş bilgi kümeleriyle iyi çalışır fakat kısa ve/veyagürültülü bilgi kümelerinin bulunduğu durumlarda başarılı olamayabilir (Wagner ve Persson, 1998). Bu sınırlamaların üstesinden gelebilmek için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalarından en yaygın kullanılanı Roseinstein algoritmasıdır. Rosenstein vd.'nin (1993) algoritmaları en büyük Lyapunov üstelinin bulunmasına yöneliktir ve küçük, gürültülü veri kümeleri için kolayca uygulanabilir. Yine ilk olarak zaman serisi şeklindeki (Şekil 3.1) veri faz uzayında yeniden oluşturulur ve Lyapunov üsteli Eşitlik (3.7)'deki gibi hesaplanır.

$$\lambda_{1(i)} = \frac{1}{i\Delta t} \frac{1}{M-i} \sum_{j=1}^{M-i} \ln \frac{d_j(i)}{d_j(0)} \quad (3.7)$$

Eşitlikte,  $d_j(i)$ ,  $i$  ayırık zaman adımlarında en yakın komşuların  $j$ . çifti arasındaki fark,  $\Delta t$  zaman serisinin örnekleme periyodu,  $i\Delta t$ 'de saniyedir.  $M$ , faz uzayında oluşturulan noktaların sayısıdır.  $d_j(i) \approx C_j e^{\lambda_1(i) \Delta t}$  olarak bulunur, burada  $C_j$  başlangıçtaki ayrılma mesafesidir. Her iki tarafın logaritması alınır,  $\ln d_j(i) \approx \ln C_j + \lambda_1(i) \Delta t$  ile  $j=1,2,\dots,M$  için eğimleri  $\lambda$  ile orantılı olan, yaklaşık olarak paralel eğriler kümesi elde edilir. En büyük Lyapunov üsteli de eğriye en küçük kareler metodu uygulanarak şöyle hesaplanır (Eşitlik (3.8));

$$y(i) = \frac{1}{\Delta t} \langle \ln d_j(i) \rangle \quad (3.8)$$

Burada  $\langle \ln d_j(i) \rangle$  ifadesi,  $j$ 'nin tüm değerlerinin ortalamasını gösterir (Rosenstein vd. 1993).

### 3.3 Boyut Algoritmaları

Bir uzayın ya da nesnenin boyutu uzay ve nesne üzerindeki herhangi bir noktayı belirlemek için gereken minimum koordinat sayısı olarak tanımlanır. Toplam boyut sayısı objenin geometrik yapısı hakkında bize bilgi verir (Banchoff, 1996). Bir doğru üzerindeki bir noktayı tanımlamak için bir koordinat gerektiğinden doğrunun bir boyutu vardır. Düzlem, silindir ya

da küre yüzeyinin iki boyutu vardır, çünkü bu yüzeyler üzerindeki herhangi bir noktayı tanımlamak için iki koordinata ihtiyaç vardır (örneğin küre üzerindeki bir noktayı tanımlamak için hem enleme, hem de boylama ihtiyaç vardır). Yine aynı şekilde küre, silindire ya da küpün içindeki bir noktayı tanımlamak için üç koordinat gerektiğinden bu boşluk üç boyutludur

### 3.3.1 Fraktal Boyut

Fraktal geometri, bilimsel literatürde Mandelbrot (1997), tarafından ortaya konan bir terimdir. Mandelbrot, doğal objelerin yapısal bütünlüğünü incelemiştir. Mandelbrot, tamsayı ile ifade edilen boyutların kaotik yapılara uygun olmadığını göstermiştir. Doğrusal sistem çekicileri tamsayı boyutlarla ifade edilebilirken, kaotik sistem çekicileri fraktal (kesirli) boyutlara sahiptir. Bir geometrik obje,  $m$ 'nin objedeki her bir noktanın pozisyonunu en iyi şekilde belirlemeye yetecek kadar büyük olduğu bir Öklid uzayında ( $R^m$ ), tamamiyle bir noktalar kümesi tarafından oluşturulmuş olabilir.  $R^m$  içindeki her bir küme  $[0,m]$  aralığındaki bir tamsayı değerine sahip topolojik bir  $d$  boyutuna sahiptir.  $R^m$ 'nin tamamı bir küme ise  $d=m$ 'dir. Öklit geometride noktalar  $d=0$ , eğriler  $d=1$ , alanlar  $d=2$ , üç boyutlu cisimler  $d=3$  vb. boyutuna sahiptirler (Akay, 2000). Bir fraktal boyut  $D$ , tamsayı olmayan değerlere izin veren bir boyut ölçümüdür (Mandelbrot, 1997). Kaotik yapının faz uzayında bir göstergesi olan garip çekicilerin kaotik derecesini bunlara ait fraktal boyutlar verir.

Dinamik bir sistemin sahip olduğu çekici temsil eden ayrıntılı boyut hesapları vardır. Bunların tamamı boyut spektrumu  $D_q$  olarak adlandırılabilir. Hentschel ve Procaccia (1983) tarafından tanımlanan boyut spektrumu Eşitlik (3.9) ile ifade edilmiştir.

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{r \rightarrow 0} \left( \frac{\log \sum_{j=1}^{N(r)} p_j^q}{\log r} \right), \quad q = 0,1,2, \dots \quad (3.9)$$

$q$  değeri arttıkça yüksek dereceli ilintilerin hesaba katıldığı fraktal boyut değerleri elde edilir. Eşitlik (3.9)'da  $N(r)$ , kümeyi örtmesi gereken  $r$  büyüklüğündeki ( $r$  kenarlı hiperküpler)  $m$  boyutlu hücrelerin sayısıdır ve  $p_j$  (Eşitlik (3.10)) küme içinde bulunan bir noktanın  $j$  hiperkünde olma olasılığıdır.  $H$ , küme içindeki noktaların toplam sayısıdır ve  $H_j$ ,  $j$  hiperküpündeki kümenin noktalarının sayısıdır (Eşitlik 3.10).

$$p_j = \frac{H_j}{H}, \quad (3.10)$$

Verilen bir küme için boyutlar genellikle  $D_0 \geq D_1 \geq D_2 \geq \dots \geq D_q$  şeklinde sıralanır. Eğer küme homojen bir çekici ise bütün boyutlar ( $D_q$ ) eşittir.  $D_0$  kutu-sayma (box-counting) boyutu,  $D_1$  bilgi boyutu ve  $D_2$  korelasyon (ilinti) boyutu olarak isimlendirilir. Bir kümenin boyutunu hesaplamak için iki farklı metot kullanılır. Birincisi kutu-sayma (box-counting) metodudur. Buna kutu-sayma boyutu (box-counting dimension) da denilir (Mandelbrot, 1997). Kutu-sayma boyutu Hausdorff-Besicovitch boyutun basitleştirilmiş bir halidir (Eckmann ve Ruelle 1985). Ancak kutu-sayma boyutu yalnızca düşük boyutlu kümeler için hesaplanabilir (Camastra ve Vinciarelli, 2002). Bu metotta, faz uzayındaki eğriyi oluşturan noktalar kümesi,  $r$  boyutlu  $N(r)$  tane küçük hücre ile kaplanmıştır (iki boyut için kareler, üç boyutta için küplerle). Boyut hesabı yapılırken kümenin bir parçasını kapsayan yani çok ya da az sayıda noktasını içeren her kutu hesaba katılır ve Eşitlik (3.11)'de verildiği gibi tespit edilir. Boyut spektrumu  $D_q$ 'nun hesaplanmasındaki zorluk kümenin çok küçük boyutlu hücrelerle kaplanmasında ortaya çıkar ve bu büyük bir bilgisayar belleği ve zaman gerektirir.  $D$  boyutu,  $\log(N(r))$ 'nin  $\log(1/r)$ 'ye karşılık gelen eksenleri arasında çizdirilen eğrinin doğru olan parçasının eğimi olarak hesaplanır.

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(r))}{\log(\frac{1}{r})} \quad (3.11)$$

$D_1$  boyutu ilgi boyutu,  $D_2$  korelasyon (ilinti) boyutu'dur Eşitlik (3.12) ile ifade edilir

$$D_1 = \lim_{q \rightarrow 1} D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_{j=1}^{N(r)} p_j \log p_j}{\log r} \quad (3.12)$$

### 3.3.2 Korelasyon (İlgi) Boyutu

Grassberger boyutu ( $d_g$ ) olarak da bilinen bu boyut literatürde, kaotik sistemlerin karakterize edilmesi için en sık kullanılan boyuttur. Eşitlik (3.13) ile ifade edilir.

$$d_g = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} p_i^2}{\ln \epsilon}$$

(3.13)

Bu boyutun belirlenmesi için Grassberger ve Procaccia (1983) algoritması kullanılır. Bunun için  $N$  uzunluğunda bir zaman serisi için korelasyon integrali hesaplanır.

$$C(\epsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \tag{3.14}$$

Eşitlik (3.14)'de aralarındaki uzaklık  $\epsilon$ 'dan küçük olan nokta çiftleri sayıları belirlenir ve Heaviside adım fonksiyonu ( $q(y)$ ) kullanılarak Eşitlik (3.15)'deki gibi entegre edilir.

$$C(\epsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N q(\epsilon - |X_i - X_j|) \right] \tag{3.15}$$

Heaviside adım fonksiyonu Eşitlik (3.16)'deki gibi parçalı davranış gösterir.

$$\begin{aligned} \theta(y) &= 1 & y > 0 \\ \theta(y) &= 0 & y \leq 0 \end{aligned} \tag{3.16}$$

### 3.3.3 Diğer Boyut Türleri

Boyutlar sistemlerin uzaysal dağılımı ile karakteristik özellikleri arasındaki bağı simgeler. Bu nedenle kaotik sistemlerin karakteristik nicelikleri ile boyutları arasında bir bağ kurulması çok doğaldır (Kaplan ve Glass, 1992). Yörüngelerin faz uzayında birbirlerinden hızla ayrılması ile yörünge noktalarının uzaydaki dağılımı arasındaki ilişki Kaplan-Yorke boyutu

ile tasvir edilir. Lyapunov üstelleri yörüngelerin uzaydaki hızlı yön değişikliklerinden kaynaklanan hacimdeki deformasyonun bir ölçüsü olduğundan, sıralı haldeki spektrumlar ( $\lambda_i > \lambda_{i+1}$ ) için ilk D elemanın toplamının sıfıra eşit olması halinde ilk hacim değişmeden kalır. Ortada sıfırdan farklı bir hacim olacağından bu hacmin uzayda ilerleyebilmesini sağlayacak yörüngeler D boyutlu olmalıdır (Çoban, 2007).

$\sum_{i=1}^D \lambda_i \geq 0$  'ı sağlayan en büyük D sayısı elde edilecek şekilde Eşitlik (3.17) geçerli olur.

$$\lambda_i \geq \lambda_{i+1}, \quad \lambda_{D+1} < 0 \quad \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_D}{|\lambda_{D+1}|} < 1 \quad (3.17)$$

Çekicinin içinde bulunabileceği minimum boyut boyut sayısı ise D +1 olmaktadır, çünkü ancak bu takdirde hacim korunumsuz olur. Pozitif üstelin varlığı durumunda  $1 < D < D_{KY} < D+1$  olan Kaplan-Yorke boyutu Eşitlik (3.18)'deki gibi verilir (Medio,1993).

$$D_{KY} = D + \frac{1}{|\lambda_{D+1}|} \sum_{i=1}^D \lambda_i \quad (3.18)$$

### 3.4 Faz Uzayının İncelenmesi

Kaotik davranışın en temel özelliği, başlangıç koşullarına hassas duyarlılıktır. Doğrusalsistemler, başlangıç şartlarındaki küçük değişimlerin sonuçta da küçük değişimlere sebep olduğunu söyler ve bu tip sistemler genellikle duyarsız sistemlerdir. Fakat düzensiz sistemlerde (doğada hemen hemen birçok sistem bu sınıflandırma içersindedir) durum farklıdır. Başlangıç şartlarındaki en ufak değişimler sistemin zaman içersindeki evriminde büyük ve çok farklı değişimlere sebep olabilir. Bu tip sistemler duyarlı sistemlerdir. Söylenildiği gibi bu birçok sistemin tipik özelliğidir. Düzensiz dinamik sistem davranışının örneği olan ilk çalışma, 1963 yılında matematikçi Edward Lorenz'in hava olaylarıyla ilgili olarak termal konveksiyonun matematiksel modelidir. Faz uzayında çizilen sistemin hareketinin yer-hız yörüngelerinin (çekiciler) düzensiz davranışlarının (kaotik) sistemin başlangıç koşullarına olan duyarlı bağımlılığından kaynaklandığının anlaşılması kaos kuramının başlangıç tarihi olarak kabul edilmektedir.

### 3.5 Faz Uzayının Yeniden Kurulması

Bir zaman serisinde determinizm olgusu, seride bulunan verilerin birbirleri ile sıkı ilişki halinde olmalarını gerektirir. Çünkü; bu seride bulunan tüm elemanlar aynı deterministik kural tarafından üretilmiştir ve bu üretilen noktalar varsayım olarak fonksiyonlarla ifade edilebilen bir vektör uzayının öğeleridir. Eğer elde belirli zaman aralıkları ile ölçülmüş tek bir zaman serisi var ise bu serideki bazı noktalar diğer değişkenlerdeki değişime yönelik izler (kanıtlar) taşınmalıdır. Faz uzayının yeniden kurulması süreci bu kanıtların elde edilmesini amaçlamaktadır (Hilborn, 2000).

Faz uzayının yeniden kurulması süreci, kaotik zaman serileri analizinin temelini oluşturur. Amaç doğrusal olmayan süreçleri içermesi muhtemel bir zaman serisini incelemek olduğundan, faz uzayı ile bu zaman serisi arasında ne şekilde bir ilişki olduğunun belirlenmesi temel problemdir. Evrensel nicelikler çekicilerin kaotik olmadığını belirlemektedir. Ancak gerçek çekici ile bu zaman serisi arasındaki ilişki bu niceliklerin sağlanması açısından önemlidir. Ayrıca deneysel durum dolayısıyla bu uzayı yaratacak sistemin dinamik denklemleri, yani faz uzayının özellikleri bilinmemektedir. Bu durumu somut bir bakış açısıyla aktarmak için Strogatz (1994) ve Kostelich (1997), kimyada garip çekicilerin görüldüğü ilk olay olarak kayda geçen Belousov-Zhabotinsky (BZ) kimyasal reaksiyonları üzerinde yapılan araştırmayı aktarmışlardır. Araştırma kapsamında BZ reaksiyonlarını incelemek için sürekli olarak karıştırılan bir tanka sistemin dengeden uzak hareket etmesini sağlayacak miktarda kimyasal madde aktarılır. Burada aktarılma hızı sistem parametresidir ve parametrenin belirli değerleri için sistemi yöneten en az 20 diferansiyel denklemin ürettiği zaman serileri incelenir. Bu 20 denklem tankın içindeki madde konsantrasyonlarının, ard arda gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ile, zamanla ne şekilde değişeceğini belirlemektedir. Araştırma sonucunda sık aralıklarla ölçülen Bromide iyon konsantrasyonlarının zaman serisinin, sistemin tüm kaotik yapısını açıklayabildiği ortaya konulmuştur. Kaosun matematiksel arka planını açıklanırken,  $n$ . mertebeden tek değişkenli bir diferansiyel denklemin, birinci mertebeden  $n$  adet denklemden oluşan bir sisteme indirgenebileceği bilinmektedir. Benzer bir mantık ile elde bulunan tek bir zaman serisi (yani tek değişken), eğer yeterince uzun ve ölçümler hassas ise, sistemdeki diğer değişkenler ile etkileşim halinde bulunacağından tüm dinamik yapıyı bünyesinde barındırır (Strogatz, 1994).

Deterministik bir sürecin var olması durumunda, zaman serisindeki herhangi bir değeri diğer değerlere bağlayacak bir  $x_{n+1} = f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots)$  fonksiyonu mevcuttur. Eğer ölçümler çok sık yapılmış ise ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), bu değerler  $f$  fonksiyonunun diferansiyellerini elde etmekte kullanılabilir (Sprott, 2003).

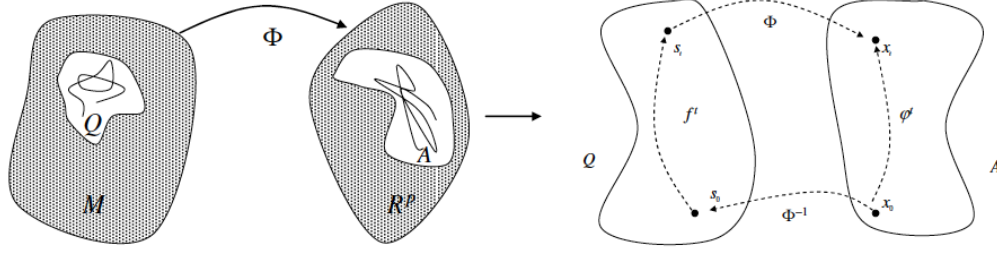
Bu durumda araştırılması gereken, gerçek seri (1)  $(x_{t_0}, x_{t_1}, x_{t_2}, \dots, x_{t_n})$  iken (2)  $x_{n+1} = f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots)$  şeklindeki elemanların bu seri içinden ne şekilde elde edileceğidir. Burada (2) şartını sağlayan veriler bir şekilde (1) serisinin içinde gömülü halde bulunmaktadır. İşte bu gömülü yapının seri içerisinde tespit edilip, bunun yardımıyla yeterli bir faz uzayının elde edilmesi sürecine gömme, ortaya çıkan faz uzayına ise gömme uzayı adı verilir (Çoban, 2007).

### 3.6 Gömme Uzayı

Bir  $f$  dinamiği  $Q$  çekici üzerinde  $s_t = f^t(s_0)$  şeklindeki yörünge noktalarını  $Q \subset M$  üretmekte olsun ( $s_0 \in M$ ). Bu durumda ihtiyaç duyulan şey, tek bir zaman serisi ölçümünden sistemin tüm değişmez niceliklerinin elde edilebilmesini sağlayacak bir  $A \subset R^p$  çekiciyi oluşturmaktır. Oluşturulacak bu, yapay çekici, asıl sistemin tüm önemli geometrik özelliklerine (denge noktaları, boyutları, üstellervs.) sahip olmalıdır. Burada  $A$  üzerindeki yörünge noktalarının uzay ve zaman ilişkileri gerçek çekicinin özelliklerinden fazlasına sahip olmamalıdır. Burada  $A = \Phi(Q)$  ve  $x_u \in A \subset R^p$ ,  $u \geq 0$  'dır. Dönüşümden dolayı  $Q$ 'daki bir yörünge hareketi ile  $A$ 'daki değişim arasında Eşitlik (3.19) mevcut olduğu belirtilmektedir (Urbach, 2000).

$$x_t = \Phi^t[x_0] \equiv \Phi(f^t(\Phi^{-1}[x_0])) \quad (3.19)$$



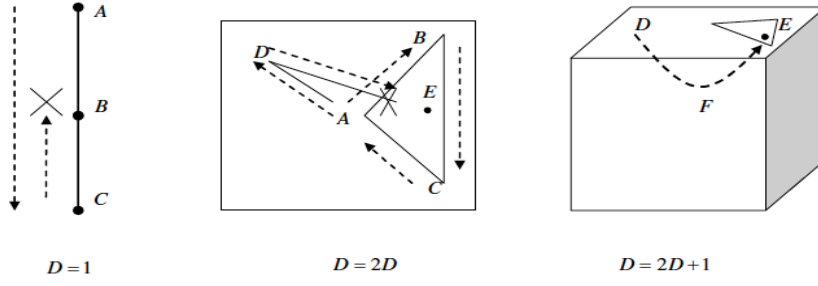


Şekil 3.2 : Çekici Dönüşümü.

Şekil 3.2’de  $\Phi$  dönüşümü gerçek çekici  $Q$ ’yu, tüm geometrik özelliklerinin korunacağı bir  $A$  çekiciye dönüştürmesi görülmektedir (Urbach, 2000).

### 3.6.1 Gömme Teoremi

Whitney’in 1936’da kanıtladığı gömme teoremine göre, keyfi bir  $D$  boyutlu eğrisel uzay,  $2D+1$  boyutlu kartezyen uzaya ( $\mathbb{R}^{2D+1}$ ) kendi ile kesişmeden dönüştürülebilir. Bu noktada; uzayın kendisi ile kesişmemesi önem taşır. Eğer  $D$  boyutlu bir geometrik cisim ele alınırsa, cismin tekrar  $D$  boyutlu bir uzayda tasvir edilmesi durumunda kesişim kümesi yine  $D$  boyutludur. Eğer  $D+1$  boyut içerisinde tasvir edilirse, kesişim kümesi boyutu  $D-1$  olan bir alt uzayda varlığını sürdürür. Eğer  $D+2$  boyut seçilir ise, kesişimler boyutu  $D-2$  olan bir alt uzayda noktalar (sıfır boyutlu) seklindedir. Ancak boyut  $2D+1$  olarak seçildiğinde, belirlenen tersinir dönüşüm yardımıyla kesişme olmaması garantilenir (Sprott, 2003). Şekil 3.3’de Gömme Teoreminin geometrik manası görülebilmektedir. Eğer çizgi  $D=1$  olan bir düzlemde ise, çizgi üzerinde  $A \rightarrow C$ ’ye gidildiğinde tekrar  $A$  noktasına  $B$  ile kesişmeden varılamaz, böyle bir serbestlik yoktur. Eğer çizgi  $D^* = 2D$  olan bir alanda tasvir edilirse,  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$  şeklinde  $B$  ile kesişmeden hareket edebileceği bir serbestlik vardır. Ancak bu seferde  $A \rightarrow B \rightarrow C$  uzayda iki boyutlu bir kapalı alan yaratmıştır ve önceden belirlenen  $A \rightarrow D \rightarrow E$  hiçbir şekilde mümkün olmaz. Fakat  $D^* = 2D + 1$  seklinde bir hacim seçildiğine, tek boyutlu bir çizginin uzayda kapalı bir hacim yaratması mümkün olmayacağından, her zaman bir  $D \rightarrow F \rightarrow E$  vardır. Bu noktada problem, ilk boyutun gömme uzayının hangi boyutunda ( $D^*$ ) kapalı ve sınırlı bir hacim yaratamayacağıdır.



**Şekil 3.3 : Gömme Teoremi.**

Sonuç olarak kesişmeme ilkesi, diğer bir deyişle tersinir bir F olabilmesi için D ancak  $D^* = 2D + 1$  içine gömülmelidir (Takens, 1981).

1981 yılında Floris Takens, bilinmeyen gerçek faz uzayının boyutunun n olması durumunda, bu uzayın tüm özelliklerinin elde edilebilmesi için gömme uzayı boyutunun en az  $d_{gömme}(m) > 2n + 1$  olması gerektiğini kanıtlamıştır. Buna göre eldeki zaman serisi ile gerçek sistemin faz uzayı arasında birebir ilişki kurulabilmektedir. Eğer n boyutlu faz uzayı için  $F: M \rightarrow M$  ve  $h: M \rightarrow R$  doğada gözlenen zaman serilerini üretiyor ise, gerçek sistemdeki akış  $s_t = f^t(s_0)$ ,  $s_t \in M$  için genel bir özellik olarak  $\Phi_{f,h}(s): M \rightarrow R^m$  gibi tanımlanır (Urbach, 2000).

$$\Phi_{f,h}(s) = (h(s), h(f^\tau(s)), h(f^{2\tau}(s)), \dots, h(f^{(m-1)\tau}(s)))^T, \tau \in Z - \{0\} \quad (3.20)$$

Eğer  $f^t(s)$  tarafından tanımlanan bir Q çekici var ise, o halde Q'yu açıklayan ve  $\Phi^t(s)$  ile tanımlanan bir A çekici vardır. Bu halde A,  $R^m$  'de Q için bir gömmedir. Bu teoremden vektör fonksiyonu  $\Phi_{f,h}$ 'a gecikmeli koordinat haritası da denir, çünkü fonksiyonun elemanları zaman serisi ölçümünün gecikmeli yapısı ile ifade edilebildiği belirtilmiştir (Eşitlik (3.21)).

$$\begin{aligned} s_t &= [x_t, x_{t+\tau}, x_{t+2\tau}, \dots, x_{t+(m-1)\tau}]^T = \Phi_{f,h}(s) \\ &= (h(s), h(f^\tau(s)), h(f^{2\tau}(s)), \dots, h(f^{(m-1)\tau}(s)))^T \end{aligned} \quad (3.21)$$

### 3.7 Gömme Uzayının Parametreleri

#### 3.7.1 Gömme Boyutunun Belirlenmesi

Eldeki zaman serisiyle sürekli bir sistemin arasındaki bağlantı, zaman serisinin kendisinden

elde edilen doğru gecikme parametreleri ile detaylı bir süreç sonunda elde edilir. Uygulamada sürekli bir zaman serisi elde edilemeyeceğinden, zaman serisinde iki ardışık ölçüm arasında geçen süre  $t_i=t_0\tau_{örn}$  ile ilişkilidir. Bu eşitlikte  $\tau_{örn}$ , örnekleme zamanını ifade etmektedir.

Eğer  $t_0=0$  varsayılırsa,  $t_i=i\tau_{örn}$  olarak yazılabilir. Eğer  $k\in\mathbb{Z}^+$  belirli bir gecikme aralığı ( $\tau$ );  $\tau = v\tau_s$ , olduğu varsayılırsa  $t_i+k\tau = (i + kv)\tau_s$  şeklinde ifade edilebilmektedir. Faz uzayının yeniden kurulumu sürecinde amaç, vektörleri oluşturan doğru  $\tau$  ve doğrugömme boyutunu ( $m$ ) ile iki boyutlu gecikmeli koordinatlar metodu ile yeniden kurulumu tamamlamaktır (Urbach,2000).

Gömme uzayında çekici yörüngesini tasvir edecek vektörler zaman gecikmeli koordinatlar metodu süreci ile üretildikten sonra, bu vektörler üzerinden korelasyon boyutu hesaplanabilir.

$$C^m(\varepsilon) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \Theta(\varepsilon - \|s_i - s_j\|) \quad (3.22)$$

Eşitlik (3.22)'te gömme değerinde ( $m$ )'leri denemek suretiyle, farklı gömme boyutları için grafik çizildiğinde  $m>2d$  olacak şekilde grafik doyuma ulaşır. Bu doyum noktasına karşılık gelen  $m$  değeri uygun gömme boyutu olarak seçilebilir. Verinin faz uzayında yeniden oluşturulmasında amaç, yeteri kadar büyük bir öklit uzayı ( $\mathbb{R}^m$ ) sağlayarak, sisteme ait çekicininin yapısını herhangi bir belirsizlik olmadan görebilmektir. Böylece  $m$  boyutunda birbirine çok yakın olan iki nokta,  $m$ 'nin daha büyük değerlerine sahip bir uzay içinde görünür hale gelir (Abarbanel vd., 1993). Eğer çekici bir boyutlu ise ve iki boyutlu uzayda çizdirilmişse, çekici kendi üzerine katlanır yani ayırım noktalarında kendini kesen bir boyutlu çizgidir (Brown vd, 1991). Bu ayırım noktalarında bir belirsizlik vardır çünkü noktaların komşu olduğu diğer noktaların hangileri olduğu belirlenemez. Bu belirsizlik, çekicinin üç boyutlu uzay içinde çizdirilmesiyle tamamen çözülür. Bu durumda kesişim noktaları görünür hale gelir. Eğer dört boyutlu uzayda çizdirilirse daha da iyi olacaktır. Bütün belirsizliklerin çözüldüğü  $\mathbb{R}^m$  uzayı, çekicinin gömülü boyutunu verir. Eğer verinin gerektirdiğinden çok daha büyük boyutlarda çalışılırsa, veriden istenilen özelliklerin çıkartılması için yapılan hesaplamaların sayısı artar ve gereksiz zaman harcanır. Gömme boyutunun belirlenmesi için literatürde bir çok yöntem bulunmakla birlikte, yanlış en yakın komşular yöntemi en çok

kullanılan metottur. Yanlış en yakın komşular metodu (YEK), Kennel vd. (1992) tarafından sunulan ve sıkça kullanılan bir metottur (Eşitlik (3.23)).

$$a(i, m) = \frac{\|y_i(m+1) - y_{n(i,m)}(m+1)\|}{\|y_i(m) - y_{n(i,m)}(m)\|}, j = 1, 2, 3 \dots N - mT \quad (3.23)$$

Algoritmanın genel içeriğinde, m-boyutlu bir uzayda, seçilen  $\vec{e}_i$  noktasına en yakın  $\vec{e}_j$  komşu noktası aranır. Bu noktalar arasındaki,  $\|\vec{e}_i - \vec{e}_j\|$ , her iki nokta için tekrarlanarak Eşitlik (3.24)'deki R mesafesi hesaplanır.

$$R = \frac{|e_{i+1} - e_{j+1}|}{\|\vec{e}_i - \vec{e}_j\|} \quad (3.24)$$

### 3.7.2 Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi

Ardışık koordinatların bağımsızlığını sağlayacak yeterli bir T değerinin bulunması temel amaçtır. Eğer çok küçük T değeri seçilirse, ardışık gömme yörüngesi koordinatları, birbirlerine çok yakın olur. Bu durumda koordinatların birbirlerinden ayrılması zorlaşır. Tersine eğer T değeri büyük seçilirse, koordinatlar birbirlerinden istatistiksel manada tam bağımsız olurlar. Gömme uzayında noktalar arasındaki bağlantı zayıflayacağından, bir sürekli fonksiyonun izinin bulunması zorlaşır. Ardışık koordinatların, bulunması istenen gömme yörüngesi için verebileceği tüm bilginin alınması için birtakım yaklaşımlardan yararlanılması gerekmektedir. İki nokta arasındaki ilişkiyi irdeleyen bir yaklaşım olarak, nokta çiftleri arasındaki bağılılığı ölçen otokorelasyon (AC) fonksiyonu kullanılabilir (Abarbanel, vd, 1993). Otokorelasyon (AC) fonksiyonu Eşitlik (3.25)'de belirtildiği şekilde hesaplanabilmektedir.

$$AC(\tau) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i+\tau) - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2} \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i) \quad (3.25)$$

Eğer sistem stokastik veya kaotik ise, otokorelasyon fonksiyonunun zamanla üstel şekilde azalması beklenir. Elde edilen bir AC grafiğinde, AC değerinin ilk kez sıfır değerini aldığı

noktanın T değerinin hesaplanması için uygun bir yaklaşım olabileceği belirtilmiştir. Ancak doğrusal bağımlılığın sistem dinamiklerinde varolabilecek doğrusal olmayan bağımlılığı ne düzeyde açıklayabileceği şüphelidir (Abarbanel vd., 1993; Baker ve Gollub, 1996). Zaman gecikmesine yönelik farklı bir yaklaşım da, ortak bilgi fonksiyonlarının (OBF) incelenmesidir. Fraser (1986), birbirlerine komşu olan veri noktalarının,  $x(t_j)$ ,  $x(t_j+T)$ , istatistiksel olarak bağlı olup olmadıklarının bir ölçüsü olarak ortak bilgi fonksiyonu yaklaşımı önermişlerdir. OBF, otokorelasyon ilişkisinin doğrusal olmayan bir açılımı olarak düşünülebilir (Abarbanel, 1993).

$$OB(T) = \sum_t P(x(n), x(n+T)) \log\left(\frac{P(x(n), x(n+T))}{(P(x(n)), P(x(n+T)))}\right) \quad (3.26)$$

Eğer  $P(x(n))$  ve  $P(x(n+T))$  ardışık koordinatların iki ayrı olasılık dağılımı ise, ve  $P(x(n), x(n+T))$  olasılık dağılımı iken, gecikme değerine bağlı Ortak bilgi fonksiyonu ( $OB(T)$ ) hesaplanabilir (Eşitlik (3.26)).



#### 4. ZAMAN SERİLERİNDEN SALINIMIN GİDERİLMESİ

Kronolojik sırayla elde edilen verilere sahip değişkenlere zaman serisi adı verilmektedir. Zaman içinde sürekli olarak kaydedilebilen verilere sahip serilere sürekli zaman serileri, sadece belli aralıklarda elde edilebilen verilere sahip serilere de kesikli zaman serileri adı verilmektedir. Elektrik sinyalleri, voltaj, ses titreşimleri hidrolojik ölçümler gibi mühendislik alanlarına ait seriler sürekli zaman serileri iken; faiz oranı, satış hacmi, üretim miktarı gibi iktisadi seriler kesikli zaman serileridir. Ölçülmüş verilerin tamamına yakını gürültü içermektedir. Gürültü bileşeni birçok sebeple oluşabilmektedir. Ölçüm hataları, veri girişinde oluşabilecek hatalar bu sebeplerden sayılabilir. Zaman serisi analizi yöntemlerinin çoğunun gürültüye hassas oldukları bilindiği için; Hidrolojik veriler üzerinde yapılan analizlerde de gürültü giderimine gerek duyulmaktadır. Nonliner zaman serisi analizi çerçevesinde geliştirilen bir çok yöntemde, serinin gürültü içermediği varsayımı ile hareket edildiği için, Hidrolojik serilerin doğal bir parçası olan gürültü belirlenip, kullanılan yöntem üzerindeki etkisi gözlemlenmelidir.

##### 4.1 Fourier Analizi

Eğer verinin kaynağı doğrusal bir sistem ise deneysel verinin frekans spektrumu belirgin spektral tepelere sahiptir ve istenen bilgi arka plandaki istenmeyen gürültüden kolaylıkla ayrılabilir. Bunun için bilgi taşıyan parça ile gürültü arasındaki farklara bakılmalıdır ve eğer sinyal ile gürültü frekans spektrumunda farklı bantlarda ise bu Fourier dönüşümü ile tespit edilebilir. Fourier dönüşümü ile işaretlerin spektrumları analiz edilebilmekte ve frekans domeninde sistemlerin ve özelliklerinin betimlenmesi sağlanabilmektedir. Fourier dönüşüm çifti (Fourier Dönüşümü ( $X(\omega)$ ) ve Ters Fourier Dönüşümü ( $x(t)$ ), Eşitlik (4.1) ile ifade edilebilir.

$$X(\omega) = F(x(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.1)$$

$$x(t) = F^{-1}(X(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

Fourier dönüşümü denkleminde  $x(t)$  işareti, tüm zaman aralığında kompleks çarpan ile çarpılıp toplanmaktadır. Sonuç olarak dönüşüm,  $X(\omega)$  Fourier katsayılarını vermektedir. Kısa zamanlı Fourier dönüşümünün (KZFD) ise, dar pencerelerle yüksek frekans bileşenlerinin (geniş bant frekans analizi) ve geniş pencerelerle de alçak frekans bileşenlerinin (dar bant analizi) analizlerini ayrı ayrı gerçekleştirebilmektedir. Ancak KZFD'de sabit pencereleme fonksiyonu kullandığından, bu analizlerin aynı anda yapılması mümkün değildir. Bu problemleri gidermek için 1970'li yılların sonlarına doğru Jeofizik mühendisi Jean Morlet; eş zamanlı olarak, farklı frekans bantlarının analizinin yapılmasını sağlayacak farklı bir pencereleme fonksiyonu fikrini ortaya koydu. Zaman ve frekans boyutunda yoğun bir şekilde desteklenen bu pencereleme fonksiyonları; Gaussian prototipinin genişleyip (yayılp) sıkıştırılmasıyla üretilmekteydi. Morlet; dar ve salınımlı olmalarından dolayı, bu pencereleme fonksiyonlarının bazlarına sabit şeklin dalgacığı adını verdi. 1980 yılında da kuantum mekaniği fizikçisi Grossman, Morlet'in dönüşümü formülleştirmesine yardımcı oldu ve ters dönüşümü elde etti. 1985'te Fransız matematikçi Yves Meyer; Morlet ve Grosman'ın çalışmaları arasında benzerlikler olduğunu ortaya koydu ve ortogonal dalgacık baz fonksiyonlarını kurdu (Meyer,1993). Sonra Ingrid Daubechies, dalgacık biçimlerini geliştirdi ve Stephane Mallat'la birlikte sürekli işaret analizinden ayrık işaret analizine geçişi sağladı. 1989 yılında Mallat, Meyer ile birlikte ayrık dalgacık dönüşümü - ADD (discrete wavelet transform – DWT) için çoklu çözünürlük analizi - ÇÇA (multiresolution analysis – MRA) geliştirmişti. 1992 yılında Albert Cohen, Jean Feauveau ve Daubechies biortogonal dalgacıkları kurarken; J. Coifman, Meyer ve Victor Wickerhauser ÇÇA'nın doğal bir uzantısı olan dalgacık paketlerini (wavelet packets) geliştirdiler (Polikar, 1999).

## 4.2 Dalgacık Analizi

Dalgacık dönüşümü bir ana fonksiyonun (dalgacık) ötelenme ve yayılması ile oluşturulan baz fonksiyonlarına, işaretin iz dönüşümünün alınması ile bulunur Böylelikle, sinyalin yüksek ve düşük frekanslı bileşenleri, zaman bilgisi ile birlikte elde edilebilir (Ayaz,1997)..



Dalgacık dönüşümü ise Matematiksel olarak Eşitlik (4.2) ile ifade edilir;

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4.2)$$

veya,

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.3)$$

(Eşitlik (4.3)) olmak üzere,

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{a,b}(t) dt \quad (4.4)$$

denklemleriyle (Eşitlik (4.4)) verilir. Bu denklemlerde  $a > 0$ ,  $b \in \mathbb{R}$  olmak üzere  $a$ , ölçekleme parametresini;  $b$  dönüşüm parametresini;  $x(t)$ , işareti;  $\psi$ , dalgacık fonksiyonunu (ana dalgacığı);  $W(a, b)$  da işaretin sürekli dalgacık dönüşümünü belirtir. Ters dalgacık dönüşümü de Eşitlik (4.5)'deki

$$x(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W(a, b) \Psi_{a,b}(t) da db \quad (4.5)$$

ifade ile verilmektedir. Bu denklemde  $C_{\Psi}$ , bir dalgacık sabiti olup seçilen dalgacık türüne bağlıdır ve Eşitlik (4.6)'de ifade edilen

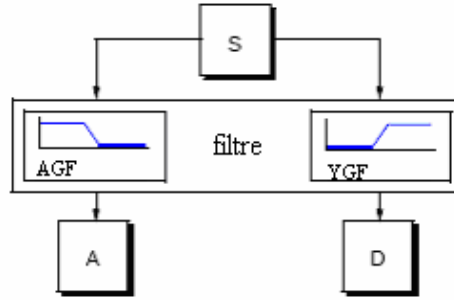
$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4.6)$$

“uygunluk şartını” sağlamalıdır (Jaideva vd., 2011). Dalgacık ifadesi ilk olarak 1909 yılında Alfred Haar tarafından ortaya atılmıştır. Zaman içerisinde Jean Marlet ile Y. Meyer ve

arkadaşları metodu geliştirmişler ve 1988 yılında Stephane Mallat önemli katkılar sağlamıştır. Daha sonra Ingrid Daubechies, Ronald Coifman gibi araştırmacılar yöntemi geliştirerek bugünkü şekline getirmişlerdir. Ayrık zamanlı işaretlere uygulanan Ayrık Dalgacık dönüşümünde öteleme ve ölçekler ikinin kuvvetleri olarak alınır. Bu işleme ikili (dyadic) dalgacık dönüşümü denir. Mallat (1989), ikili dalgacık dönüşümü ile işaretlerin kademeli olarak yüksek ve düşük frekanslara ayrılmasını önermiştir. Yüksek frekans kısmından detay-D (detail), düşük frekans kısmından ise temel işaret yaklaşım-A elde edilir (Ayaz,1997).

#### 4.2.1 Ayrık Dalgacık Dönüşümü

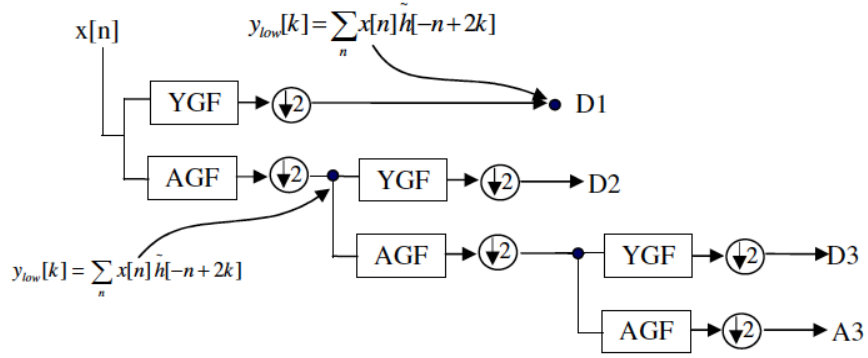
Mallat tarafından gerçekleştirilen bir filtreleme algoritmasıdır. Şekil 4.1' de bir işarete filtre uygulanışı ve elde edilen değerler verilmiştir. En temel filtre devresinde S sinyaline uygulanan bir filtre ile sinyal içerisindeki alçak ve yüksek frekanslar ayrılmıştır. Düşük frekansları geçiren filtre Alçak Geçiren Filtre (AGF) ve yüksek frekansları geçiren filtre de Yüksek Geçiren Filtre (YGF) olarak adlandırılır.



Şekil 4.1 : Ayrık Dalgacık Dönüşümü.

Filtre sonucunda oluşan iki ayrı sinyalden A ile gösterilene yaklaşım (Approximation) ve D ile gösterilene de Detay (Detail) ismi verilir. Yaklaşım işaretleri, orijinal işareti temsil eder ve işaretin tanımını verir. Detaylar ise işaretin karakteristiğini yada ayrıntısını içerir (Misiti vd., 2004). Örnek olarak insan sesini ele alırsak; insan sesinden yüksek frekanslar kaldırılırsa konuşmanın içeriği anlaşılabilir. Ancak düşük frekanslar kaldırılırsa içeriği anlaşılmayan, anlam verilemeyen sesler duyulur. Dalgacık dönüşümünde yaklaşımlar işaretin orijinalini temsil eder ve yüksek ölçek ile elde edilir. Detaylar ise düşük ölçekteki bilgilerdir ve işaretin yüksek frekanslı bileşenleridir. İşaretlere alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreler uygulayarak ve ortaya çıkan verileri 2'nin kuvvetleri formunda azaltarak bu sinyalin ADD yapılabilir. Bu işlem çıkan sonuçlara da uygulanırsa çoklu çözünürlük analizi işarete uygulanmış olur (Bae

vd., 2005). Şekil 4.2 ' de  $X(n)$  işaretine uygulanan bu prosedür görülmekte ve burada YGF ve AGF sırasıyla yüksek geçiren ve alçak geçiren filtreleri belirtmektedir. Aşağı doğru ok ile gösterim ise ikinin üstelleri ile azaltılma (downsampling) işlemidir. Her bir ayrıştırma seviyesinde ortaya çıkandetaaylar ve yaklaşımlar gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : İşaret Ayrıştırma İşlemi.

#### 4.2.2 Uygun Seviyenin Seçimi

Dalgacık Analizi, zaman serisi analizi için var olan analiz yöntemlerinin en güçlüleri arasında yer almaktadır. Yöntemin, hem zaman hem de frekans domeninde uygulanan seri hakkında geniş bilgi sağlama özelliği sebebiyle, Hidrolojik serilerde de geniş şekilde kullanımı mevcuttur. Dalgacık analizi uygulanırken; ana dalgacık seçimi, seviye seçimi gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Bunların seçimi için herhangi bir yöntem bulunmazken, daha önceki yapılmış çalışmalar seçimlerde fikir sahibi olmamızı sağlamaktadır (Sang vd., 2011).

##### 4.2.2.1 Entropi Kavramı

Entropi (bilgi içeriği), ölçütünün tanımı; anlamına, türüne, değerine veya diğer herhangi bir subjektif özelliğine bakılmaksızın, iletişim yaratan sembol, sinyal ya da sayılar dizisinin istatistiksel yapısını analiz eden Bilgi (enformasyon) kuramına dayanmaktadır. Burada bilgi içeriği terimi, iletişim yaratabilecek sinyal üretme yeteneği olarak tanımlanmaktadır ve bu çerçevede problem; herhangi bir bilgi kaybına veya tekrarına yol açmadan, yeterli miktarda sinyal göndererek, iletişimin doğru olarak yapılmasıdır. Bilgi kuramının temel prensipleri, iletişim hatlarından sinyal gönderilmesi işlevini stokastik bir süreç olarak ele alan Shannon tarafından geliştirilmiştir (Shannon ve Weaver, 1949).

Bilgi kuramına göre; Shannon Entropi'si (H) ; Eşitlik (4.7)'daki gibi hesaplanır.

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2(p(x_i)) \quad (4.7)$$

Burada  $p(x_i)$ , n boyundaki x değişkeninin, rastgele karakterli olasılık yoğunluk dağılımını ifade etmektedir. Logaritma'da 2 tabanının kullanılmasının sebebi ise, enformasyon teorisinin “bit” ölçütünü kullanmasıdır. Entropi (H) aynı zamanda bilginin de bir ölçütüdür. Düşük değerli entropilere sahip işaretler düzensizlik az olduğu için daha fazla bilgi taşımaktadır.

#### 4.2.2.2 Dalgacık Entropisinin Hesaplanması

Dalgacık entropisi hesaplamak için; ADD sonucunda elde edilen parçaların enerjilerinin oranlarına bakılmaktadır. Bu amaçla, ADD sonucunda elde edilen katsayıların enerjilerini (E), hem zaman (i) hem de frekans (j) skalasında, vektörel olarak hesaplanarak, olasılık dağılımı Eşitlik (4.8);

$$P_{ij} = \frac{E_{ij}}{E_i} \quad (4.8)$$

ve Dalgacık Entropi'si de Eşitlik (4.9)'de

$$W = - \sum_{j=1}^N P_{ij} \times \log_2 P_{ij} \quad (4.9)$$

şeklinde hesaplanır (Natwong vd., 2006).

## 5. SİSTEMİN MODELLENMESİ VE ÖNGÖRÜLEBİLİRLİĞİ

### 5.1 Sistemlerin Modellenmesi

Deneysel modellemeler ise deterministik veya stokastik olarak sınıflandırılabilirler ve deneyler, ölçülmüş veri üzerine uygulanırlar. Birçok durum için fiziksel modelin kurulabilme olasılığı yoktur ve bu durumlarda deneysel modelleme daha iyi bir yaklaşım olur. Geleneksel olarak kullanılan deneysel modeller, doğrusal istatistiki teknikleri kullanır, ancak doğadaki hiçbir gelişme doğrusal değildir. Bu bağlamda; Hidrolojik süreçler de doğrusal olmayan davranış gösterir. Bu nedenle elde edilecek denklem sisteminin doğrusal olmayan özellik göstermesi beklenir. Ölçülmüş verilerin kullanılmasına dair literatürde bir çok yöntem ve uygulama mevcuttur. Ölçülen verilerin, zaman skalası kullanılarak kaydedilmesi ile oluşan zaman serileri üzerinde geliştirilen doğrusal olmayan, kaotik, yöntemler hakkında çalışmanın bundan önceki bölümlerinde detaylı bilgiler verilmişti. Bu bölümde ise, zaman serilerinden, sistemin tanımlanması ve öngörülebilirliği üzerinde durulacaktır. Akım modelleri Hidrolojik çalışmalarda çok önemli bir yere sahip olmakla birlikte günümüzde, üzerinde çalışmaların devam ettiği alanlardan biridir. Gelecekteki belli bir tarihte görülecek akımın tahmini, taşkın uyarılarının yapılması, taşkın kontrolü maksatlı haznelerin işletilmesi, akarsuyun su potansiyelinin belirlenmesi, kurak dönemlerde hidroelektrik üretiminin, şehir suyu ve sulama suyunun dağıtımı ve akarsularda ulaşımın planlanması açısından önem taşır (Bayazıt, 1998). Eldeki verilerin yardımı ile nehir akımı tahmininin yapılması Su kaynakları projelendirme çalışmaları açısından önem taşımaktadır. Su kaynaklarının geliştirilmesi, planlanması ve yönetiminde Hidrolojik verilerin toplanması ve analizi büyük önem taşır. Mevcut veriler genellikle sürecin toplamını tam olarak yansıtmadığından, daha güvenilir kararlar alabilmek için sürecin modellenmesi gerekmektedir. Modeller, planlama ve tasarım için veri üretmek ya da süreçlerin gelecekteki değerlerini tahmin etmek için kullanılabilir (Toluk, 2006). Gelecekteki akım miktarlarının belirlenmesi ile ilgili olarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Chang vd. (2004), bulanık mantık ve yapay sinir ağlarını bir arada kullanarak akımların

yeniden yapılandırılması üzerine çalışmışlardır ve bu modellemenin karmaşık sistemlerde iyi bir performans sergilediğini söylemişlerdir. Paningrahi ve Mujumdar (2000), rezervuar işletme modeli için bulanık mantık kural tabanını kullanmışlardır. Frank vd. (2001), akım serilerinin tahmini için yapay sinir ağları yöntemini önermişlerdir. Akımların akıllı sistemlerle tahminine yönelik çok sayıda çalışmalar mevcuttur (Sudheer vd., 2003). Ölçülmüş verilerin kullanım alanları sadece uygulamalarla kısıtlı değildir. Bu veriler kullanılarak ölçülen sistemin tanımlanması da mümkündür. Fiziksel yasalar diferansiyel ya da cebirsel eşitlikler yardımı ile tanımlanmaktadır. Model belirlemede, sistemle ilgili, fiziksel yasalara dayalı öncül bilgilerden ve sisteme etkiyen büyüklüklerle (giriş büyüklüğü ya da giriş verisi) sistemin bu büyüklüklere olan tepkilerinden (çıkış büyüklüğü ya da çıkış verisi) yararlanılmaktadır. Bu şekilde model, sadece giriş ve çıkış büyüklükleri arasındaki ilişki ile değil, aynı zamanda model yapısının da belirlenmesi ile ifade edilmektedir (Hesse vd. 2000; Roeck vd. , 2000; Shane ve Ratneshwar, 2005). Diğer yandan, sistemle ilgili herhangi bir öncül bilginin olmaması ya da sistemin çok fazla karmaşık bir yapıya sahip olması durumlarında, sistemin modelini belirlemede tanımlama metodlarından yararlanılmaktadır. Bu durumda model giriş ve çıkış büyüklüklerinden yararlanılarak elde edilmektedir. Bu teknik; sistem derecesi, giriş ve çıkış büyüklüklerinin seçimi ile ilgili olarak bazı öncül varsayımlar yapılarak uygulanabilmektedir (Gevers vd., 2005). Bu amaçla yaygın olarak kullanılan parametrik modeller ARX (Autoregressive with eXogenous Input; ekstra girişli otoregresif model), NLARX (Nonlinear Autoregressive with eXogenous Input; ekstra girişli doğrusal olmayan otoregresif model), ARMAX (Autoregressive Moving average with eXogenous input; ekstra girişli ortalama hareketli otoregresif model), OE (Output Error; hata çıkışlı model) ve BJ (BoxJenkins) modellerdir (Erdoğan ve Gülal, 2009)

### 5.1.1 Genel Matematik Modeller

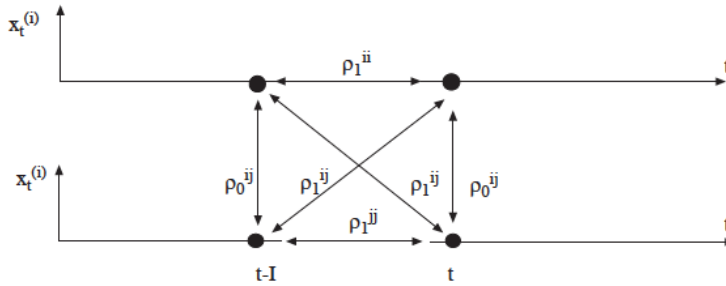
Kararlı yapıdaki  $z_t^{(i)}$ ,  $i=1, \dots, n$  serisini göz önüne alalım.  $z_t^{(i)}$  serisinin normal dağıldığını ya da normal dağılıma uygun hale getirildiğini kabul edelim.  $z_t^{(i)}$  serisinin AR(1) modeli (bir ötelemeli çok değişkenli otoregresif model) matris formunda Eşitlik (5.1)'de gösterilmektedir.

$$Z_t = A_1 Z_{t-1} + B \varepsilon_t \quad (5.1)$$

Eşitlikte;  $Z_t$ ;  $z_t^{(i)}$  serisinin elemanlarından oluşan  $(n \times 1)$  boyutunda bir vektör,  $A_1$  ve  $B$   $(n \times n)$  boyutlarında matris parametreler ve  $\varepsilon_t$  ise  $(n \times 1)$  boyutunda bağımsız, normal dağılıma uyan, ortalaması sıfır ve varyansı bir olan rasgele değişkenlerden oluşan bir vektördür.  $\varepsilon_t$  vektörünün zaman ve uzay bağımlılığının olmadığı kabul edilir Eşitlik (5.1) daha açık olarak Eşitlik (5.2)'deki şekilde yazılabilir. Eşitlik (5.1) ve Eşitlik (5.2) ifadelerindeki  $Z_t$ 'nin bağımlılık yapısı, uzayda sıfır ve bir ötelemelerdeki çapraz korelasyona ve zamanda birinci ötelemeki serisel korelasyona işaret eder.

$$\begin{bmatrix} z_t^1 \\ z_t^2 \\ \vdots \\ z_t^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^{11} a^{12} \dots \dots a^{1n} \\ a^{21} a^{22} \dots \dots a^{2n} \\ \vdots \\ a^{n1} a^{n1} \dots \dots a^{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{t-1}^{(1)} \\ z_{t-1}^{(2)} \\ \vdots \\ z_{t-1}^{(n)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b^{11} b^{12} \dots \dots b^{1n} \\ b^{21} b^{22} \dots \dots b^{2n} \\ \vdots \\ b^{n1} b^{n1} \dots \dots b^{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_t^{(1)} \\ \varepsilon_t^{(2)} \\ \vdots \\ \varepsilon_t^{(n)} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Bu tipteki bağımlılık yapısı Şekil 5.1'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekildeki yatay oklar, birinci ötelemdeki otokorelasyon katsayıları olan  $\rho_1^{ii}$  ve  $\rho_1^{ij}$  değerlerini, dikey oklar ise sıfır ötelemdeki çapraz korelasyon katsayıları  $\rho_0^{ij}$  değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 5.1 : AR(1)'e ait Korelasyon Yapısının Şematik Gösterimi.

Bu korelasyon yapısının sabit olduğu kabul edilirse katsayıları  $((t, t+1), (t+1, t+2) \dots)$  için aynı olur. Benzer şekilde AR(2) çok değişkenli iki ötelemeli otoregressif model Eşitlik (5.3)'te olduğu gibi ifade edilebilir.

$$Z_t = A_1 Z_{t-1} + A_2 Z_{t-2} + B \varepsilon_t \quad (5.3)$$

Yukarıdaki ifadede t anındaki Z vektör değerleri, t-1 ve t-2 anlarındaki Z vektör değerlerine ve  $\varepsilon_t$  rastgele vektörüne bağlıdır. Model parametreleri ( $n \times n$ ) boyutundaki A1 , A2 ve B matrislerinin elemanlarıdır.

Hidrolojik sistemler ve ilgili süreçlerin doğrusal olmayan yapıya sahip oldukları, uzun süredir bilinmektedir (Izzard 1966; Amorocho 1967; Amorocho ve Brandstetter 1971). Ancak, kısıtlı veri ve hesaplama gücü eksikliği ile erken hidrolojik araştırmaların bir çoğu (1960-1980), doğrusal stokastik yaklaşımlarla çözülmüştür. (Klemes, 1978; Salas ve Smith 1981; Harms ve Campbell 1967). Hernekadar; doğrusal stokastik yaklaşım ile Hidrolojik sistemlerin modellenmesi devam etse de; bilgisayarların gelişimi ile matematiksel hesapların kolaylaşması ile günümüzde doğrusal olmayan yaklaşımların kullanımını arttırmıştır. Hidroloji alanında en sık kullanılan doğrusal olmayan yaklaşımlar; doğrusal olmayan stokastik yöntemler, doğrusal olmayan regresyon (Kavvas 2003), yapay sinir ağları (Govindaraju 2000), veri tabanlı mekanik modeller ve deterministik kaos teorisini (Sivakumar vd., 2001) içerir. Sıralanan bu yöntemler arasında; Kaos teorisi; felsefesi gereğince, karmaşık ve rastgele görünümlü davranışlarda bile başlangıç şartlarına olan hassasiyeti vurguladığı için, en basit doğrusal olmayan bir sistemin bile bir sonucu olabilir (Lorenz, 1963). Kaotik Sistemlerin nonlinear davranış gösterdiği bilinen bir gerçektir. Bu sebeple; kaotik sistemleri tanımlamak için nonlinear analiz metotları kullanılmaktadır. Regresyon analizi, bir değişkenin bir veya daha fazla değişkenle arasındaki ilişkinin matematik bir fonksiyonla ifade edilmesidir. Matematik fonksiyonun tipine göre doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri olarak ikiye ayrılırlar (Orhunbilge, 2002). Doğrusal modeller normal dağılımlı, minimum varyanslı tahmin verirken, doğrusal olmayan regresyon modelleri genelde bunu sadece örnek boyutu çok büyük olduğunda yapabilmektedir. Sonuç çıkartmak, doğrusal modellerden daha zordur. Ayrıca normal dağılım teorisi, doğrusal olmayan regresyon modellerine tam olarak uygulanamamaktadır. Bunun yerine asimptotik ve büyük çaplı örnekler teorisine dayanan yöntemler kullanılmaktadır (Kutner vd, 2004). Doğrusal olmayan regresyon modelleri de aynı doğrusal modeller gibi basit formda gösterilebilirler (Eşitlik (5.4)).



$$Y_i = f(X_i, \gamma) + \varepsilon_i \quad (5.4)$$

Doğrusal olmayan regresyon modellerinde, regresyon parametre sayısı modeldeki açıklayıcı değişken sayısı ile doğrudan ilişkili değildir. Eşitlik (5.4)'deki  $\gamma$  bilinmeyen parametrelerin  $(p \times 1)$  vektörü,  $\varepsilon$ ,  $E(e) = 0$  ve  $\text{Var}(e) = \sigma^2$  olacak şekilde korelasyonsuz hata terimidir.  $f(X_i, \gamma)$  ise doğrusal olmayan regresyon modeli için beklenti fonksiyonu olarak adlandırılır (Ratkowsky, 1983). Doğrusal olmayan regresyon modellerinin parametre tahminleri için önerilen birçok yöntem vardır. Bunlardan bilinen bazıları en küçük kareler, en çok olabilirlik (maximum likelihood) ve Gauss-Newton yöntemleridir (Kutner vd, 2004).

### 5.1.1.1 ARX Modelleri

Eşit zaman aralıklı olarak ölçülen giriş büyüklüğü ya da sinyali  $u(t)$  ile çıkış büyüklüğü ya da sinyali  $y(t)$ ,  $t=1,2,\dots,N$  arasındaki doğrusal ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir (Eşitlik (5.5)).

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t) \quad (5.5)$$

Burada,  $q$  geciktirme işlemcisi (shift operator),  $G(q)$  sistemin deterministik kısmının transfer fonksiyonu ve  $v(t)$  ise sistemin filtrelenmiş beyaz gürültü olarak ifade edilen bozucu etkilerini tanımlar.

$$v(t) = H(q)e(t) \quad (5.6)$$

Eşitlik (5.6)'daki  $e(t)$ ,  $\lambda$  varyanslı beyaz gürültü ve  $H(q)$  sistemin stokastik kısmının transfer fonksiyonudur. Eşitlik (5.5) ve (5.6) düzenlenerek Eşitlik (5.7) elde edilir ve bu eşitlik sistemin zaman bölgesindeki tanımını verir.

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (5.7)$$

Bu eşitliğin transfer fonksiyonları,  $nk$  girişin çıkışa göre gecikme zamanı olmak üzere, çoğunlukla tercih edilen ARX model için Eşitlik (5.8)'de verilmiştir.

$$G(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)}; \quad H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (5.8)$$

$A(q)$  ve  $G(q)$ ,  $q^{-1}$  geciktirme işlemcisine bağlı olarak tanımlanan ARX polinomlarıdır (Eşitlik (5.9)).

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (5.9)$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{nb1}q^{-nb+1} & b_{nb2} & b_{nbnu}q^{-nb+1} \end{bmatrix}$$

Burada,  $B(q)$ ,  $(nb) \times (nu)$  boyutlu bir matris,  $na$  ve  $nb$  polinom fonksiyonların dereceleri ve  $nu$  giriş büyüklüğünün sayısıdır. Genel olarak, SISO (Single Input Single Output; tekli giriş tekli çıkış) ARX modeller (Eşitlik (5.10)) ile ifade edilir (Ljung, 1999).

$$A(q).y(t) = b(q).u(t - nk) + e(t) \quad (5.10)$$

ARX modelin  $a$  ve  $b$  parametreleri en küçük kareler metodu ile çözülür (Ljung, 1999).

## 5.2 Sistemin Öngörülebilirliği

Sistem tanımlamada genel olarak izlenecek yol; sistemden girdi ve çıktı verilerinin alınması, bu veriler kullanılarak amaca yönelik modeller ortaya konulması ile başlamaktadır. Model parametrelerinin belirlenmesi aşamasında verinin özelliklerinin incelenmesinden elde edilecek bilgilere dayanarak genel modellerden uygun olabilecekler seçilir ve uygun model seçildikten sonra bu modelin derecesi belirlenir. Sistem tanımlamada en önemli adım ise parametre tahminidir. Belirlenen modelin katsayıları en etkin istatistiksel yöntemlerle tahmin edilmeye çalışılır. Uygunluğun belirlenmesi için ise, derecesi ve parametreleri belirlenmiş modelin gerçekten uygun olup olmadığının analizi yapılır. Bu analiz için, belirlenen model ile öngörü yapılarak öngörünün başarı performansı incelemeye alınır. Performans düşük ise seçilen model tekrar kontrol edilir.

### 5.2.1 ARX Modeli ile Öngörü

ARX modelleri, çeşitli amaçlar (kontrol, simülasyon, davranış analiz, izleme, vb) için

kullanılabilir. Bir parametrik modelde kestirimi yapılacak parameter sayısına o modelin mertebesini göstermektedir. Parametre kestirimi için toplanan verilerdeki giriş verisinin mertebesi, söz konusu veri takımı ile maksimum kaç parametrenin kestirilebileceğini belirler. Yani bir giriş verisinin mertebesi, elde edilebilecek modellerin mertebelerine bir üst sınır getirmektedir (Söderström ve Stoica, 1989). Sistemin öngörülmesi uygulamalarında; kurulacak ARX modelin mertebesinin belirlenmesi sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple; uygulamalarda, birçok mertebe için öngörü yapmak ve uygun mertebe seçimi için de öngörü hataları kontrol etmek gerekmektedir. Modellemelerde hata beyaz gürültü olarak düşünülürse; doğrusal durumda, k adım sonrası için öngörü ile çıkış tahmini yapılarak elde edilen ölçülmüş veri ile kontrolü sağlanarak, hata oranı belirlenir. Model parametreleri, farklı senaryolarda, yani farklı yerel modellerde farklı değerler almaktadır. Ancak bir sistemi temsil eden tek bir ortalama ARX model elde edebilmek için sözkonusu sistemin sahip olduğu tüm durumlar için ayrı ayrı elde edilen değerlerin ortalamasının alınması yöntemi tercih edilmiştir.

### 5.2.2 Lokal Öngörü Modeli

Bazı basit deterministik dinamik sistemlerin bile önceden kestirilmesi zor anlamında rastgele davranışlar ortaya koyduğu bilinmektedir (Koçak,1996). Dinamik sistemler teorisine göre, bir sistemin zamansal evrimi faz uzayındaki yörüngeleri ile temsil edilebilir. Faz uzayının koordinatları, sistemin evrimini tam olarak gösterebilmek için gerekli olan durum değişkenlerinden meydana gelir (Koçak ve Şen, 1997). Doğru kurulmuş bir Faz Uzayı, sistemin içeriğindeki dinamiklerin uygun gömme boyutunda (m), daha rahat görülebilmesine olanak vermektedir. m- boyutlu uzayda Eşitlik (5.11) şeklinde oluşan yörüngelerle ifade edilir.

$$Y_{j+T} = f_T(Y_j) \quad (5.11)$$

$Y_j$  ve  $Y_{j+T}$ , m boyutlu sistemde, j o anki durumu, j+T ise gelecekteki (T zaman sonra) durumu ifade etmektedir. Amaç,  $Y_j$  cinsinden  $(Y_{j+T})$ 'yi ifade edebilecek uygun  $f_T$  fonksiyonunu bulmaktır. Lokal öngörü Yöntemi, m-boyutlu uzayda  $f_T$  fonksiyonunu alt uzaylara (komşulara) bölerek, yeni oluşturulan  $f_T$  domeninden yaklaşık bir  $F_T$  fonksiyonu elde etmektir. Tek değişkenli bir zaman serisi düşünülecek olursa, uygun erteleme zamanı ve gömme boyutu belirlenerek bir faz uzayı kolaylıkla kurulabilir. Bu faz uzayında oluşan

yörüngeler sayesinde sistemin içerdiği dinamik hareket rahatça gözlenebilir. Zaman serisinin her bir bileşeni olan  $X_t$ 'nin  $p$  zaman sonra ( $X_{t+p}$ ) hareketinin, oluşan yörüngede gözlenebilmesi için  $F$  fonksiyonu, Eşitlik (5.12)'deki gibi ifade edilebilir.

$$X_{t+p} \cong F(X_t) \quad (5.12)$$

$X_t$  'nin zamanla değişimi, yörünge üzerindeki komşu noktalar ( $X_T, h, 1, 2, \dots, n$ ) ile hareketi ile ifade edilebilir.  $X_{tp}$ ,  $d$  dereceli bir polinom ile ifade edilecek olursa (Eşitlik (5.13)),

$$X_{t+p} \cong f_0 + \sum_{k_1=0}^{m-1} f_{1k_1} X_{t-k_1\tau} + \sum_{k_2=k_1}^{m-1} f_{2k_1k_2} X_{t-k_1\tau} X_{t-k_2\tau} + \sum_{\substack{k_d=k \\ d-1 \\ \vdots \\ k_2=k_1 \\ k_1=0}}^{m-1} f_{dk_1k_2\dots k_d} X_{t-k_1\tau} \dots X_{t-k_d\tau} \quad (5.13)$$

$$x \cong Af \quad (5.14)$$

Eşitlik (5.14)'te ifade edilen  $x$ ;

$$x = (x_{T_1+p}, x_{T_2+p}, \dots, x_{T_{n+p}}) \quad (5.15)$$

Eşitlik (5.15)'deki gibi tanımlanabilir ve Eşitlik (5.16)'da gösterildiği şekilde  $f$  cinsinden ifade edilebilir.

$$f = (f_0, f_{10}, f_{11}, \dots, f_{1(m-1)}, f_{200}, \dots, f_{10d(m-1)(m-1)\dots(m_1)}) \quad (5.16)$$

$A$  matrisi (Eşitlik (5.17)) oluşturularak polinomum çözümü matrisler ile bulunabilir.

$$A = n \times (m + d)!/m! d! \quad (5.17)$$

$$A = \begin{bmatrix} X_{\tau_1} X_{\tau_1} \dots X_{\tau_1} \dots X_{\tau_1} \dots X_{\tau_1}^2 \dots X_{1-(m-1)\tau}^d \\ X_{\tau_2} X_{\tau_2} \dots X_{\tau_2} \dots X_{\tau_2} \dots X_{\tau_2}^2 \dots X_{2-(m-1)\tau}^d \\ \vdots \\ X_{\tau_m} X_{\tau_m} \dots X_{\tau_m} \dots X_{\tau_m} \dots X_{\tau_m}^2 \dots X_{1-(m-1)\tau}^d \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Eşitlik (5.18)'de belirtilen matris çözümü için Eşitlik (5.19) şartını sağlanmalıdır.

$$n \geq \frac{(m + d)!}{m! d!} \quad (5.19)$$

Porporato ve Ridolfi (1996), çalışmalarında belirttiği üzere, polinom 1. derece olsa bile öngörü yöntemi doğrusal olmayan karakter taşır, çünkü; bulunan her x(t) noktası yörünge üzerinde farklı bir komşuyu ifade etmektedir. Bu durumda, polinom matrisi sürekli değişmek zorundadır (Kocak, 1996). Liu vd. (1997) yılında yaptıkları çalışmada, Birleşik Devletler 'in 28 akım gözlem istasyonunun günlük akım verilerini kullanarak, seriden oluşturulacak faz uzayının analizi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Gözlenmiş akım serilerinin yanı sıra, 13 tane de aynı uzunlukta istatistik özellikleri bilinen seri türetilmiştir. Seri türetmek için Otoresif modeli kullanılmış ve serilerin bir kısmına gürültü eklemesi yaparak stokastik karakterli davranış gösterdiğini kabul edilmiştir. Lokal öngörü yöntemi ile kaotik öngörü denemişlerdir. Serilerin öngörülebilirliğinin de havzaların fiziksel özelliği ile değil, serilerin ölçüm sıklığı (günlük/aylık/yıllık vb) ile ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, ellerindeki hem gözlenmiş hem türetilmiş veri ile, günlük nehir akımlarının geniş bir aralıkta, deterministik karakter ile gürültülü stokastik karakter arasında değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Stokastik karakterli olarak nitelendirilen, gürültülü serinin öngörü başarımını düşürdüğü ve gürültüsü giderilmiş serinin ise deterministik karakter göstererek öngöründe daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

### 5.3 Değerlendirme İstatistikleri

Sistem mertebesinin belirlenmesi ve öngörü performansını değerlendirilmesi için literatürde kullanılan temel istatistik kriterlerden 4 tanesi tercih edilmiştir. Seçilen kriterler Karese Ortalama Hatanın Karekökü (RMSE), Normalize Edilmiş Karese Ortalama Hatanın Karekökü (NRMSE), Korelasyon Katsayısı ( $R^2$ ) ve Son Öngörü Hatası (FPE) olarak belirlenmiştir. Karese ortalama hatanın karekökü (RMSE) istatistiği, kalıntı teriminin varyansı hesaplanarak bulunur. RMSE her zaman pozitif değere sahiptir. En iyi durumda alacağı değer 0'dır. Hesaplanan değer, pozitif yönde 0'dan farklılaşması model performansının düşük olduğunun göstergesidir (Dawson vd. , 2007). Öngörü modeli için kurulan RMSE hatası, ölçülen değer değeri  $X_{gözlem}$  ve tahmin edilen değeri  $X_{tahmin}$  arasındaki farkın ortalamasının karekökü alınarak hesaplanır (Eşitlik (5.20)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{i,gözlem} - X_{i,tahmin})^2}{n}} \quad (5.20)$$

Normalize edilmiş karese ortalama hatanın karekökü (NRMSE) istatistiği ise; RMSE istatistiğinin boyutsuz hali olarak kabul edilir ve Eşitlik (5.21)'deki eşitlik ile hesaplanır.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{gözlem,max} - X_{gözlem,min}} \quad (5.21)$$

Korelasyon Katsayısı ( $R^2$ ); boyutsuz bir gösterge olup; gözlenmiş ve tahmin edilen veriler arasındaki doğrusal ilişkiye dayalıdır (Eşitlik (5.22)). -1 ve 1 aralığında değerler alan bu gösterge, en iyi tahmin modelinde 1 değerine eşit olur.

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (X_{gözlem} - X_{tahmin})(\hat{X}_{gözlem} - \hat{X}_{tahmin})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_{gözlem} - X_{tahmin})^2 (\hat{X}_{gözlem} - \hat{X}_{tahmin})^2}} \quad (5.22)$$

Çalışmada kullanılan modellerin performansını değerlendirmek için seçilen kriterlerden sonuncusu; Son Öngörü Hatası'dır. Son öngörü hatası temel ilke olarak kurulan model için uygun model mertebesinin (m), belirlenmesini sağlamaktadır. Uygulamada, herbir model

mertebesi için ( $n$ ), hata varyansını ( $\sigma_m^2$ ) hesaplayarak, en uygun model mertebesinin bulunmasını sağlar (Eşitlik (5.23)).

$$FPE(m) = \sigma_{z,m}^2 \frac{n - m}{n + m} \quad (5.23)$$







## 6. HAVZALARIN KAOTİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Doğal sistemlerin bir parçası olarak düşünülmesi gereken Su havzaları, birçok amaç ve maksat için kullanılmaktadır. Bu maksatlardan; içme su temini, sulama ve enerji üretimi günümüzde en büyük hedef olarak görülen sürdürülebilir kalkınma açısından çok önemli faktörlerdir. Bu maksatların etkin olarak yerine getirilebilmesi için, havzaların güvenilir analiz edilmesi gerekmektedir. Türkiye, 26 adet ana su toplama havzasından oluşmuştur. Bu havzaların yerleri Şekil 6.1'de Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne (DSİ) ait, Türkiye Akarsu Havzaları'nın gösterildiği haritada görülmektedir. Su ve toprak kaynaklarının geliştirilmesi görevini üstlenmiş olan DSİ ülke çapında 26 adet bölgede örgütlenmiştir. Bu çalışmada, Türkiye Karadeniz sahilinde yer alan DSİ tarafından işletilen, 4 havza (Şekil 6.1) üzerindeki 22 istasyona ait akım verileri inceleme altına alınmıştır (Havza 13, Havza 14, Havza 22, Havza 23). Kullanılan veri 30 yıl ve üzerinde tutulmuş olan uzun kayıtlı istasyonlara ait olmakla birlikte, incelenen veri kümelerinde eksik veri bulunmamaktadır.

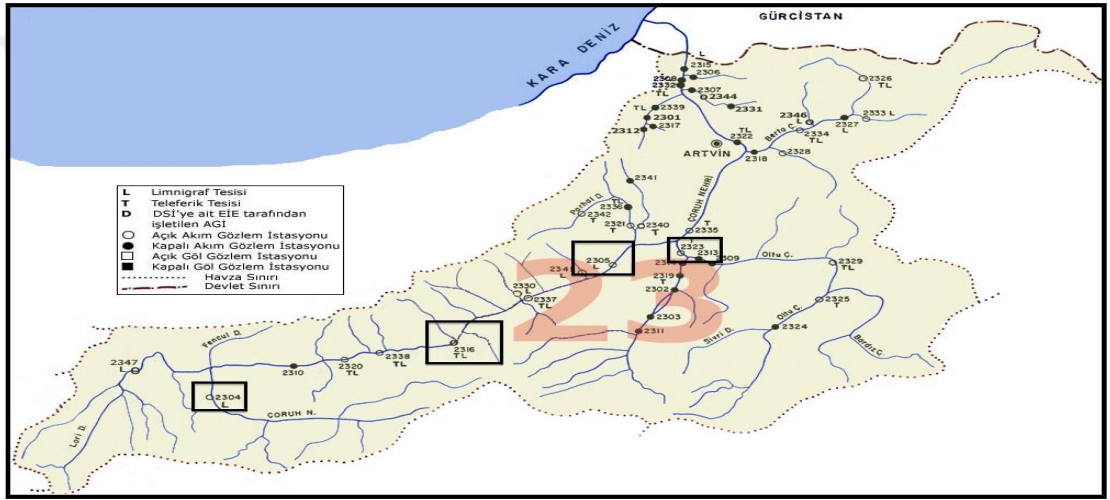


Şekil 6.1 : Türkiye Akarsu Havzaları (DSİ,2005).

Doğal verilerin ölçüm sonuçlarının gürültü içerdiği bilinmekte olduğu için, Dalgacık Analizi ile elde edilen, yaklaşım (A) bileşeni de kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak, gürültü karakterli yüksek frekans bileşeninin uygulanan kaotik analiz yöntemlerindeki etkisi incelenmiştir.

## 6.1 Çoruh Havzası

Devlet Su İşleri (DSİ) 23 numaralı havza olan, Çoruh Havzasında yer alan, 4 istasyona ait günlük periyot ile kayıt altına alınmış akım verileri kullanılmıştır. Çoruh Nehri, dünyanın en hızlı akan nehirlerinden biri ve en derin nehridir. Artvin ilinin en büyük akarsuyudur



Şekil 6.2 : Çoruh Havzası Akım Gözlem İstasyonları

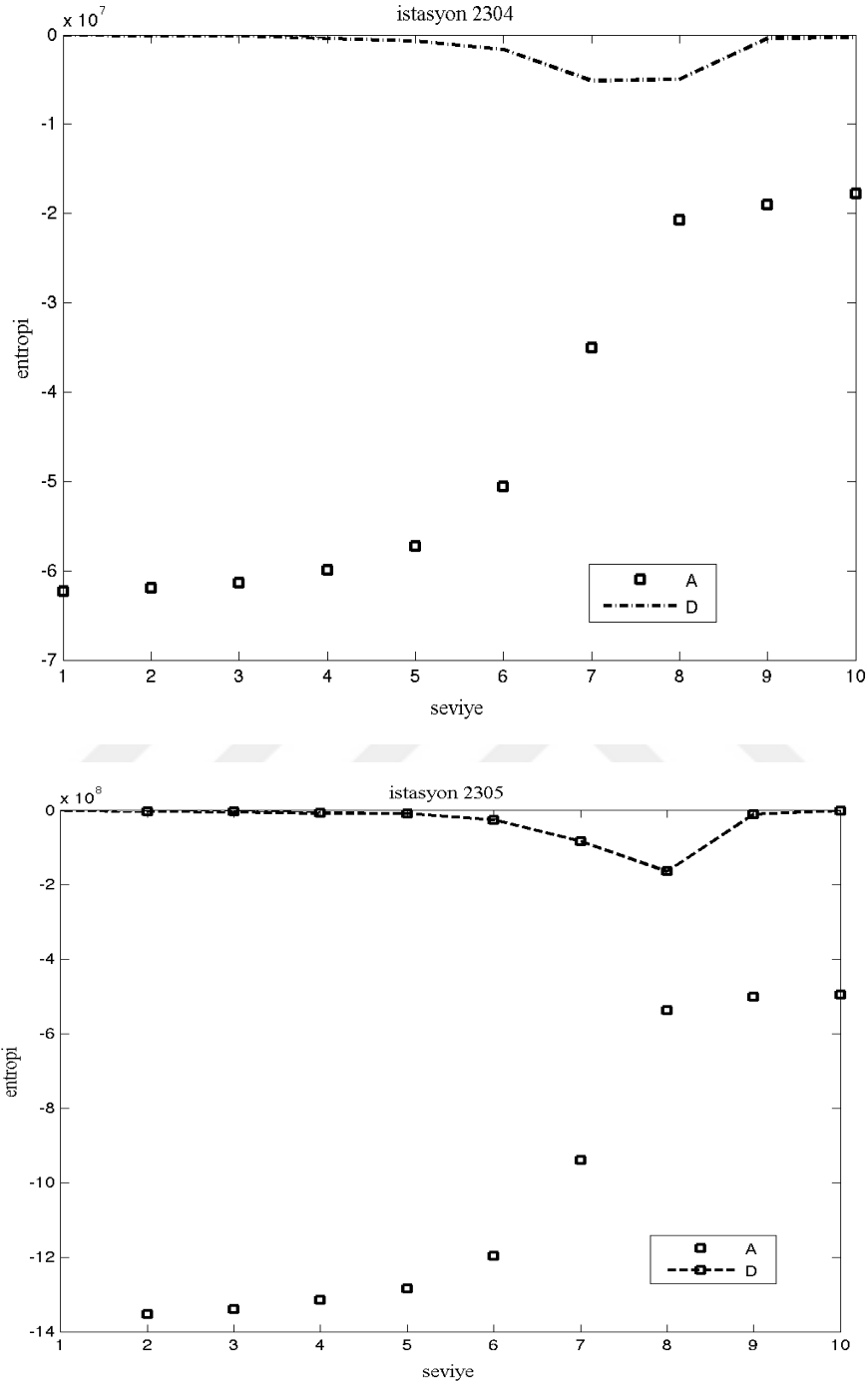
Çizelge 6.1 : Çoruh Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Özellikler.

Kullanılan İstasyon Numarası	Veri Uzunluğu (Gün)	Gözlem Yılları	Ortalama Debi Değeri (m <sup>3</sup> /s)	En Yüksek Debi Değeri (m <sup>3</sup> /s)	En Düşük Debi Değeri (m <sup>3</sup> /s)	Standart Sapma
2304	12000	1976-2008	16.16	185	1.96	19.63
2305	12000	1976-2008	69.15	644	9.70	77.00
2316	12000	1976-2008	39.55	427	3.94	48.17
2323	12000	1976-2008	34.45	476	3.00	41.80

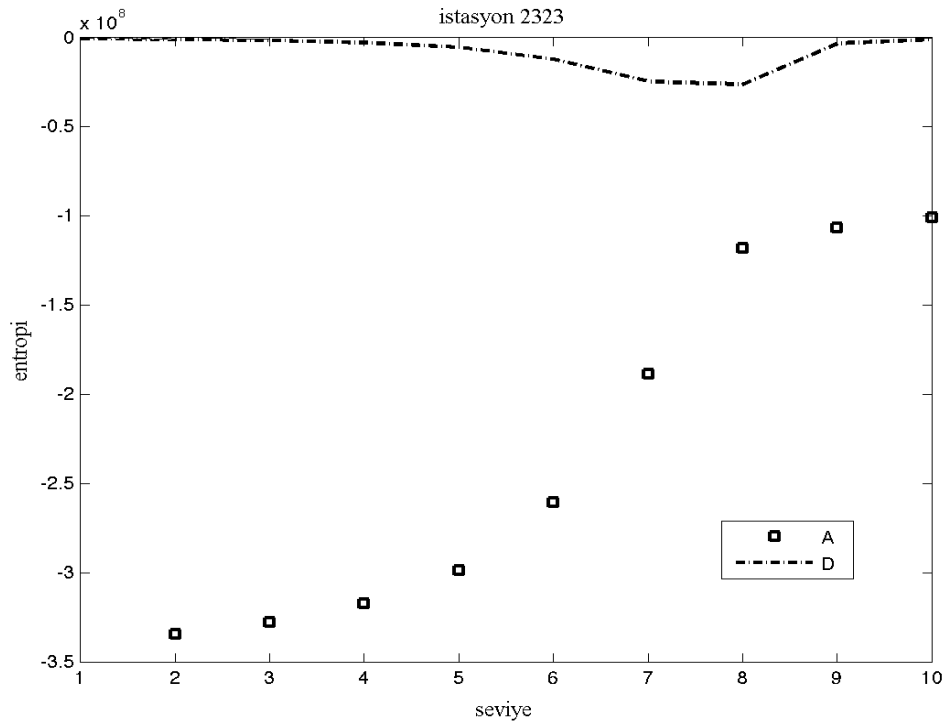
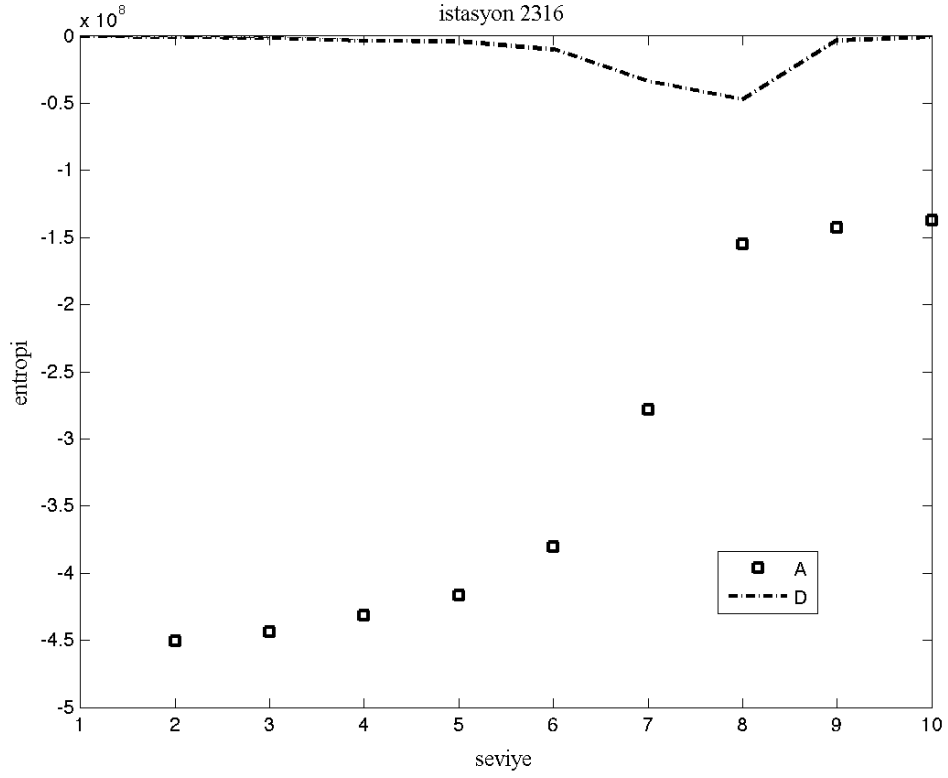
### 6.1.1 Dalgacık Analizi Uygulaması

Doğal serilerin gürültü içerdikleri, daha önceki bölümlerde de vurgulanmıştı. Verinin kaynağı

kaotikse, bilgi de arka plandaki sinyal de geniş bantlıdır ve Fourier analizi bu ayırımı yapmak için yeterli değildir (Yılmaz ve Güler, 2006).

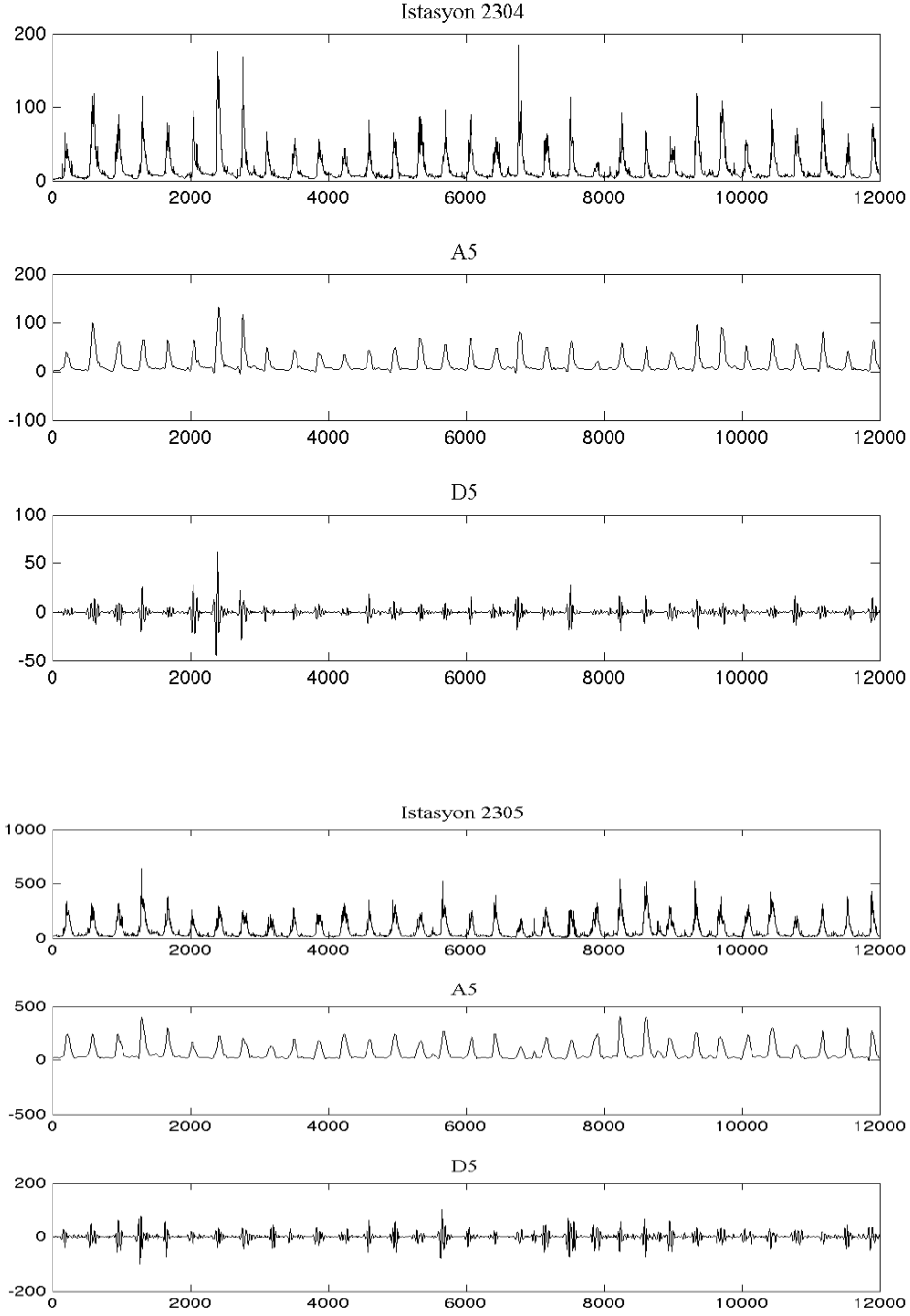


Şekil 6.3 : Çoruh Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri.

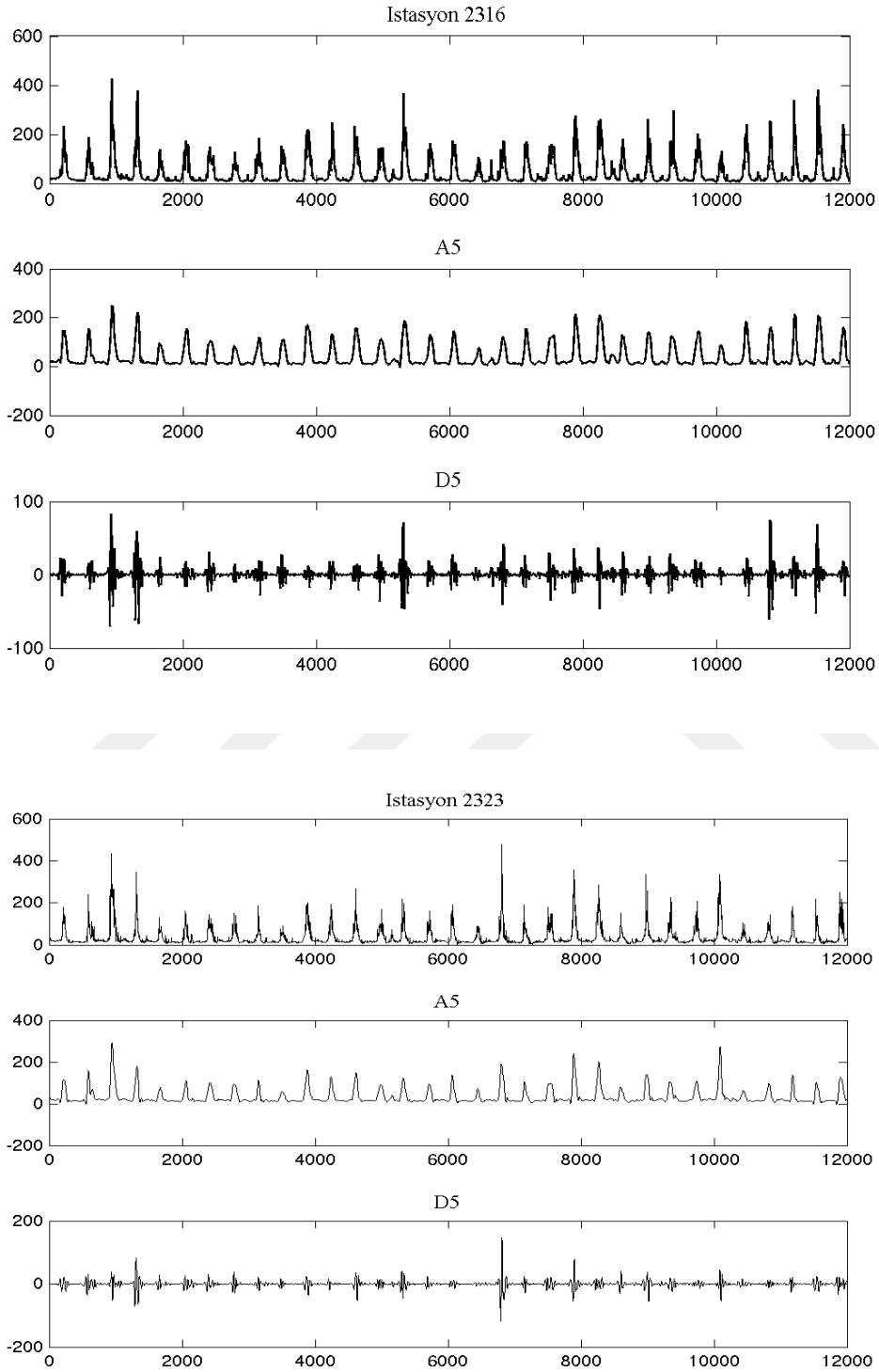


Şekil 6.3 (devam) : Çoruh Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri.

Bu çalışmada diğer çalışmalara ek olarak Dalgacık analizinde seviye belirlemek için Entropi kavramı kullanılmıştır. Dalgacık analizi neticesinde hesaplanan entropiler, D parçasının 0'dan farklı entropiye sahip olduğu seviye olarak belirlenmiştir.



**Şekil 6.4 :** Çoruh Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları.



**Şekil 6.4 (devam) : Çoruh Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları.**

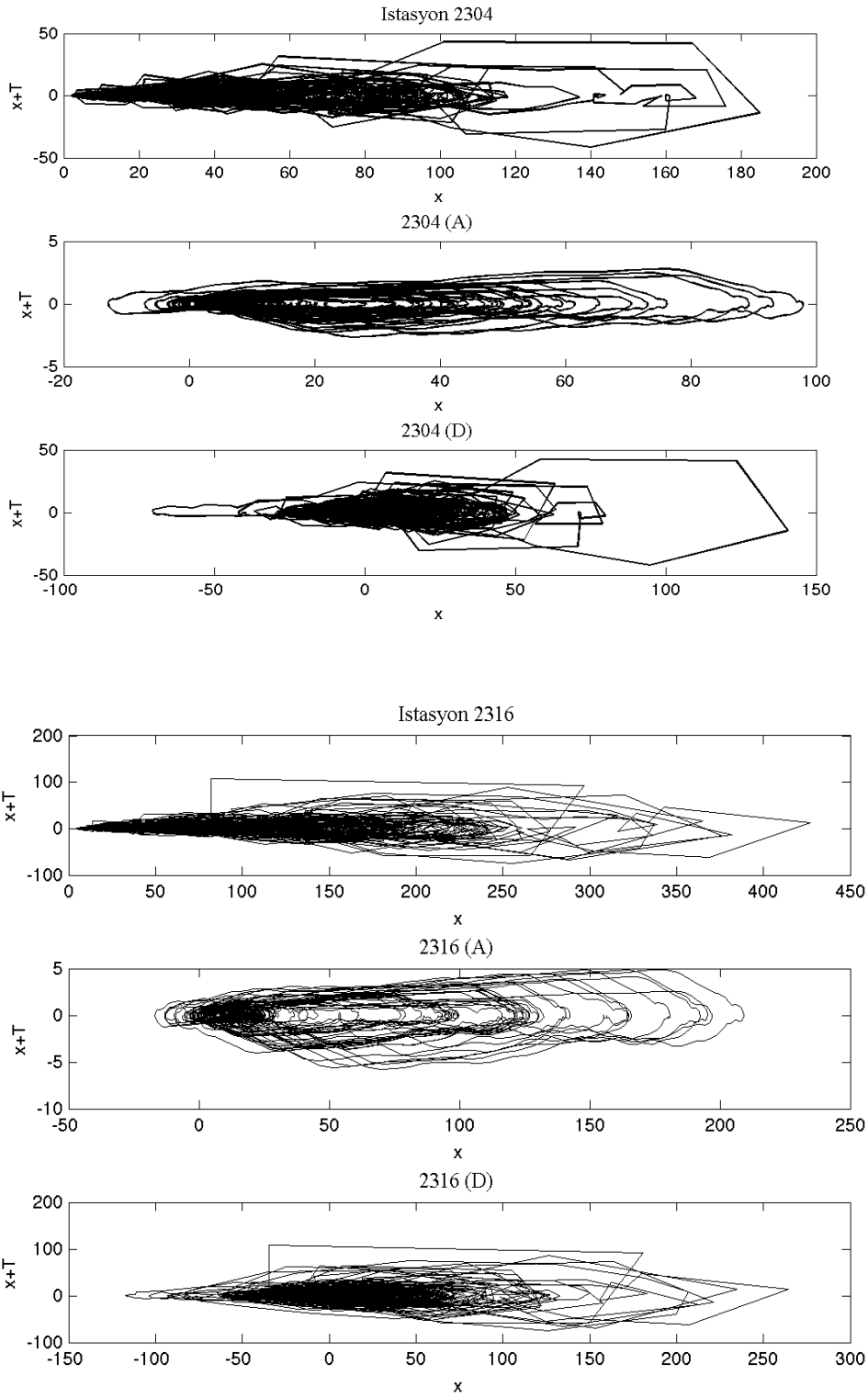
## 6.1.2 Faz Uzayının Yeniden Kurulması

### 6.1.2.1 Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi

Dinamik sistemler teorisine göre, bir sistemin zamansal evrimi faz uzayındaki yörüngeleri ile temsil edilebilir (Koçak,1996). Faz uzayının koordinatları, sistemin evrimini tam olarak gösterebilmek için gerekli olan durum değişkenlerinden meydana gelir. Bu nedenle, gözlenmiş serilerin karakterleri incelenirken, ilk olarak faz uzayının yeniden kurulması gerekmektedir. Faz uzayı yeniden kurulurken, zaman gecikmeli koordinatlar yöntemi kullanılmıştır. Zaman gecikmesi  $T$ , ortak bilgi fonksiyonun (OBF)  $I(t)$ 'nin (Eşitlik (3.26)) ilk minimum olduğu yer olarak seçilirse uygun olarak seçilmiş olur. Çünkü bu durumda ölçümler bir dereceye kadar bağımsız fakat istatistiksel olarak bağımsız değildir (Fraser vd. 1986). OBF, otokorelasyon ilişkisinin doğrusal olmayan bir açılımı olarak düşünülebilir (Abarbanel, 1993), hidrolojik serilerin doğrusal olmayan davranış gösterdiği göz önünde bulundurularak bu çalışmada zaman gecikmesi belirlenirken OBF kullanılacaktır. Kullanılan veriye ait, gecikme zamanı Hegger vd. (1999) tarafından hazırlanan TISEAN 3.0.1 (Time Series Analysis) paket programından elde edilmiştir. Zaman gecikmesi ve gömme boyutunu belirlemek için kullanılan, ortak bilgi fonksiyonun'dan elde edilen zaman gecikmeleri ( $T$ ) çıktıları, Çizelge 6.2'de her bir istasyona ait orijinal seri, yaklaşım (A) ve detay (D) bileşeni için gösterilmektedir. Çalışmada, hem gözlenmiş seri hem de uygun görülen seviyedeki Yaklaşım Parçası (A) için ayrı ayrı, zaman gecikmeli koordinatlar yöntemi kullanılarak faz uzayları kurulmuştur.

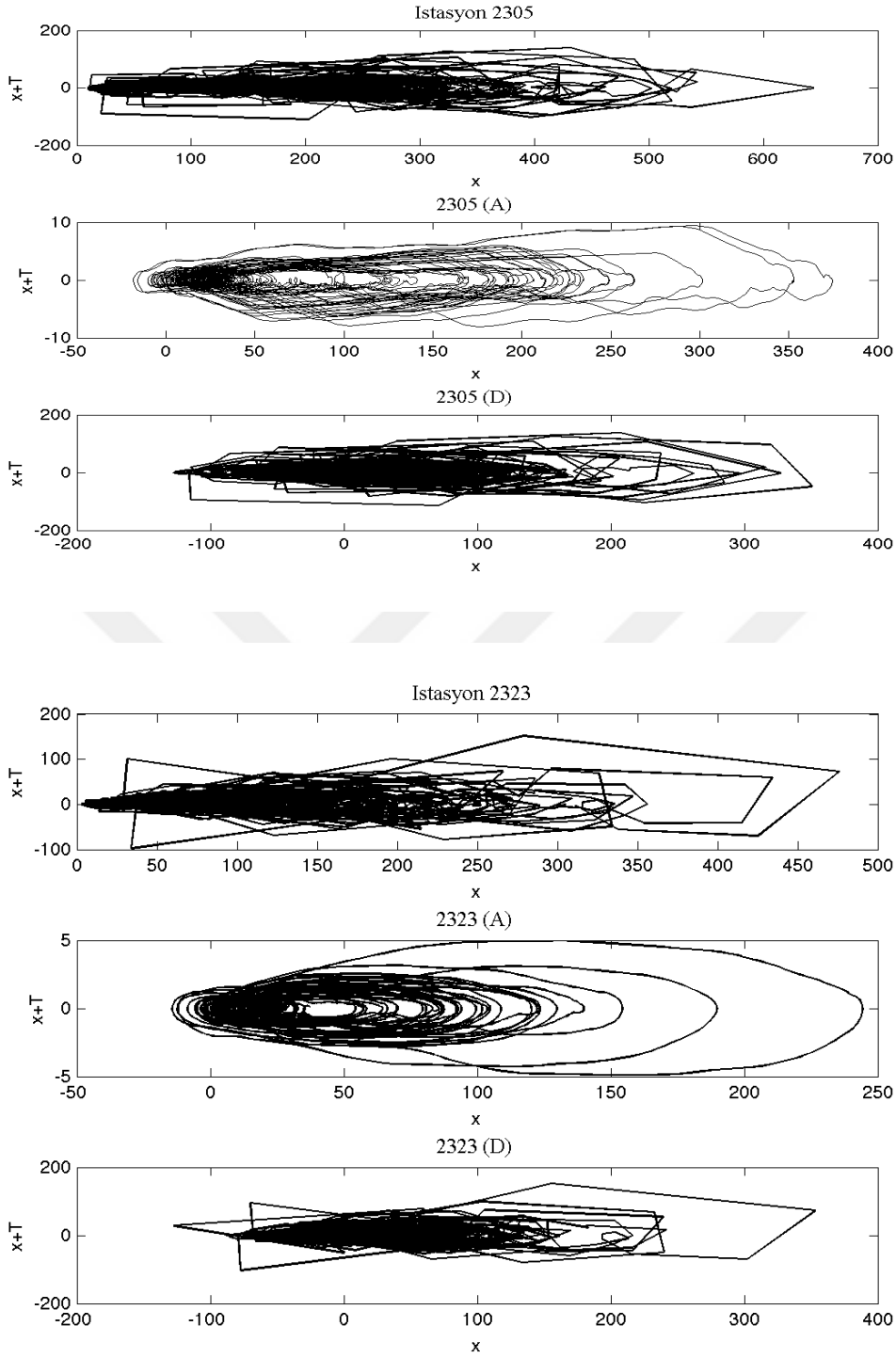
**Çizelge 6.2 : Çoruh Havzası İstasyonları Zaman Gecikmesi**

Kullanılan İstasyon Numarası	Zaman Gecikmesi (T)
2304	65 gün
2304 (A)	66 gün
2304 (D)	27 gün
2305	66 gün
2305 (A)	76 gün
2305 (D)	25 gün
2316	67 gün
2316 (A)	88 gün
2316 (D)	28 gün
2323	57 gün
2323 (A)	71 gün
2323 (D)	34 gün



**Şekil 6.5 :** Çoruh HavzasıSeri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına Ait Çekerler.





**Şekil 6.5 (devam):** Çoruh Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına Ait Çekerler.

### 6.1.2.2 Gömme Boyutun Belirlenmesi

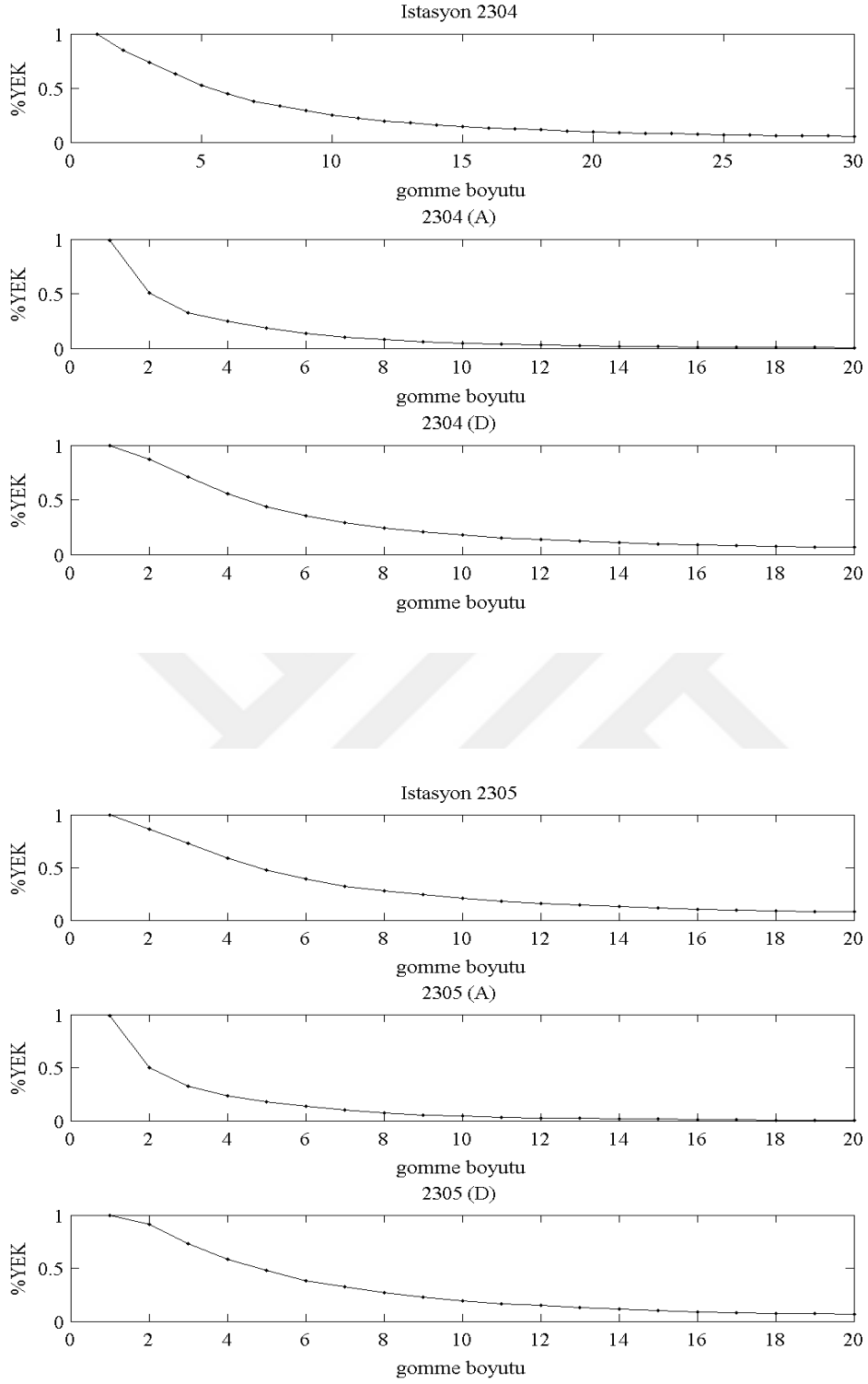
Takens (1981) teoremine göre, sistemin gecikmeli kopyaları faz uzayında uygun boyutta

gömülürse, davranışını belirleyen yörüngeler daha net gözlenebilir. Gömme boyutunun belirlenmesi için, literatürde en sık rastlanan yöntem, yanlış en yakın komşular yöntemidir (YEK). Verilen seri üzerinde seçilen iki noktadan,  $R_i$  mesafesinin (Eşitlik (3.24)) belirli eşik değerden büyük olduğu noktaların sıfıra ulaştığı nokta, uygun gömme boyutu olarak belirlenir. İstasyonlardan elde edilen YEK yüzdelerine karşılık gelen gömme boyutu grafikleri, Orijinal Seri, A ve D parçaları için Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Yöntemin öngörüsünde YEK değerinin belirli bir boyutta 0 değerini alması beklenirken, doğal olaylara dayanan gözlenmiş verilerin analizinde deterministik bileşenin yanında stokastik bileşen ve/veya gürültü bileşeninin de bulunduğu için yapılan uygulamalarda bu değer 0'a ulaşmadığı gözlenmiştir. Bu sebepten, aynı konuda daha önce yapılmış çalışmalarda referans alınarak, serinin orijinalinde YEK yüzdesinin belirli bir değer altına düşmeyip sabitlendiği noktaya karşılık gelen gömme boyutu seçilebilir (Ding., vd. 1993). Seri, A ve D parçalarına ait gömme boyutu değerleri Çizelge 6.3'te gösterilmektedir.

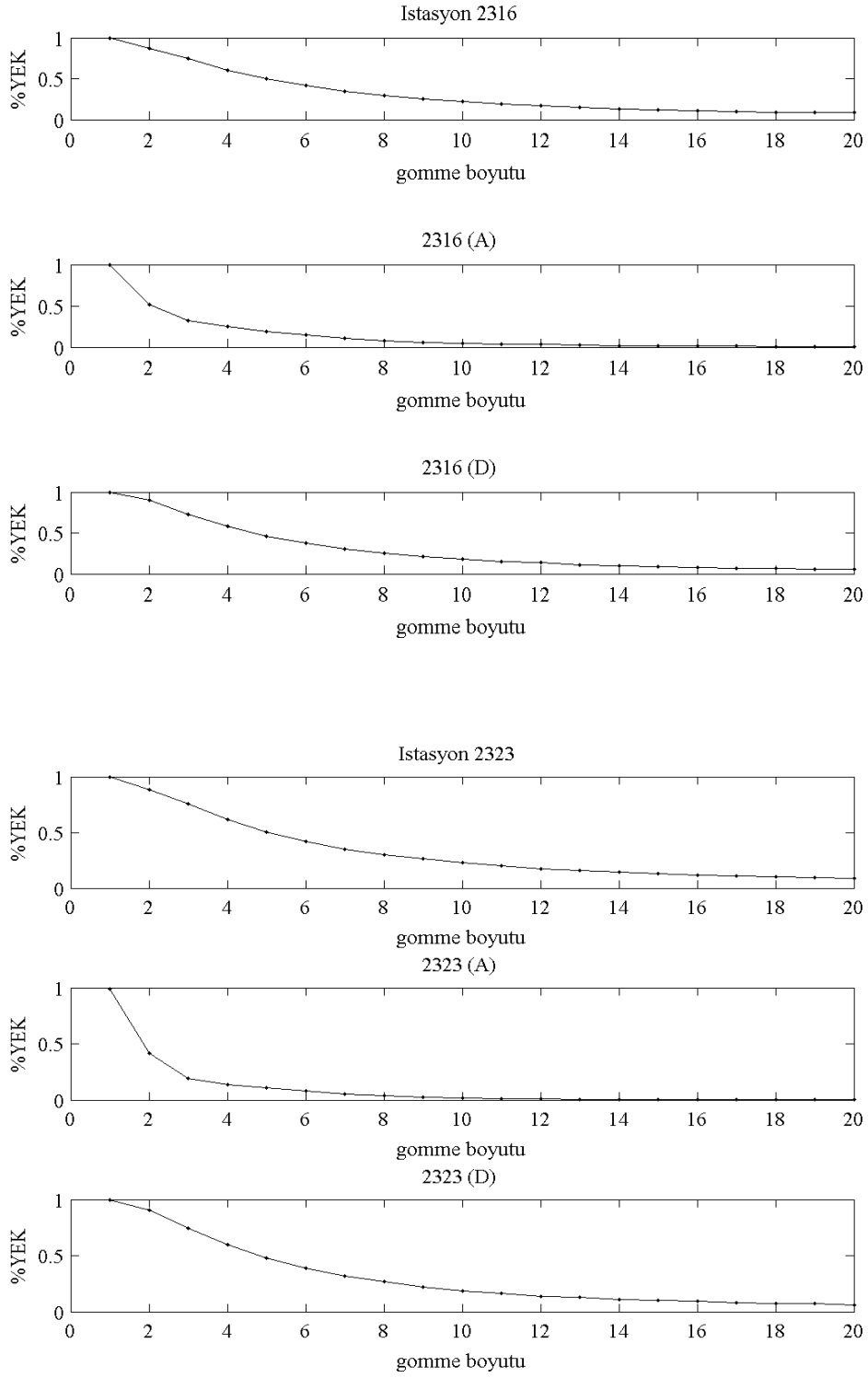
**Çizelge 6.3 : Çoruh Havzası İstasyonları Gömme Boyutları**

Kullanılan İstasyon Numarası	Gömme Boyutu (m)
2304	13
2304 (A)	13
2304 (D)	13
2305	12
2305 (A)	12
2305 (D)	12
2316	11
2316 (A)	11
2316 (D)	11
2323	10
2323 (A)	10
2323 (D)	12

Şekil 6.6'dan da gözlenebileceği üzere; A parçasının YEK yüzdesi değerinin belirli bir boyutta sıfıra ulaştığı gözlenebilmektedir. Yöntemin gürültü hassasiyeti göz önünde bulundurulacak olursa; bu yöntem aynı zamanda, dalgacık analizi seviyesinin uygun seçildiği ve seriden gürültü birleşenin doğru şekilde ayrıldığı da bir göstergesi olarak ele alınabilir.



Şekil 6.6 : Çoruh Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Neticelerine Ait YEK Grafikleri.



**Şekil 6.6 (devam) :** Çoruh Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Neticelerine Ait YEK Grafikleri.

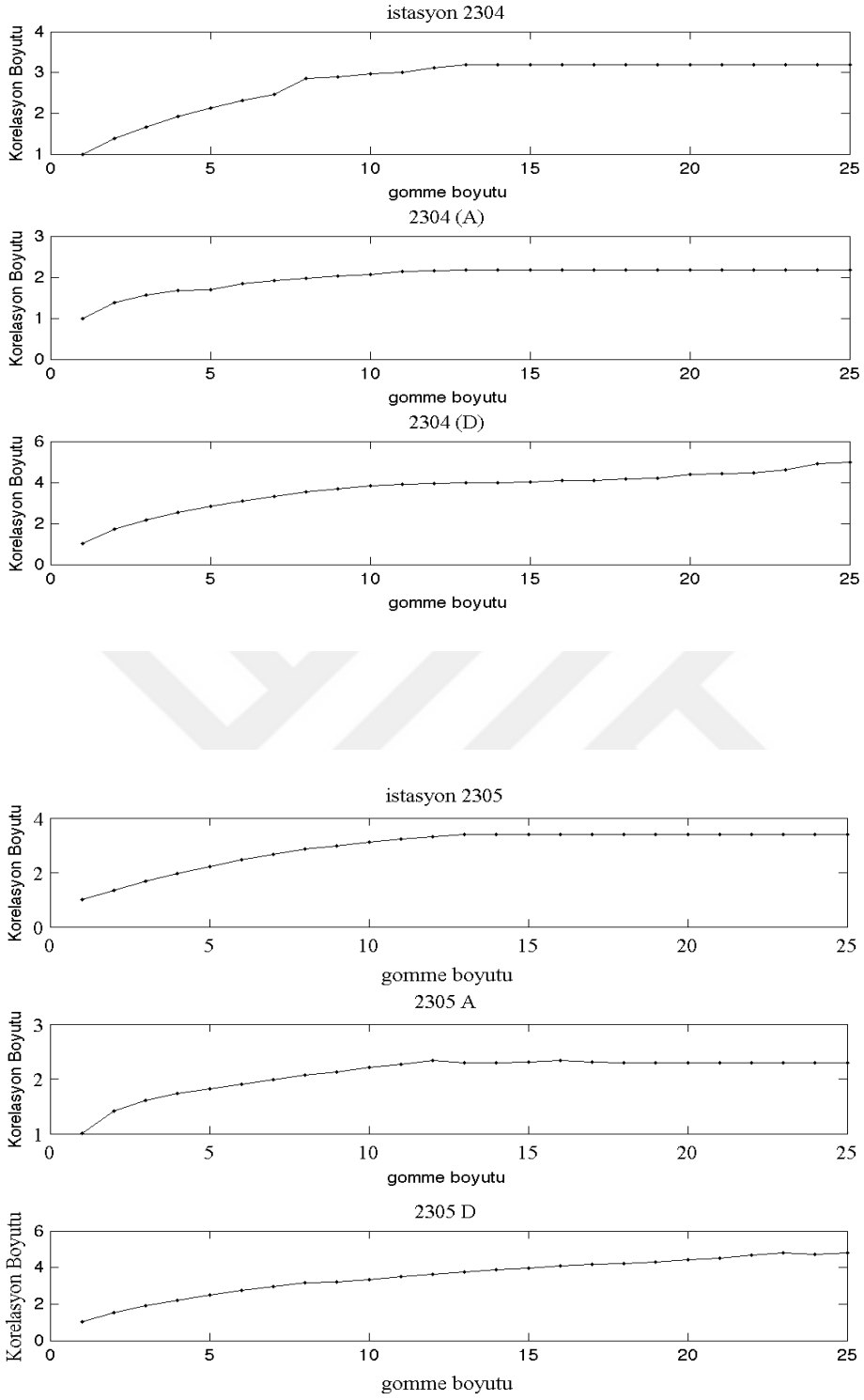
### 6.1.2.3 Çeker Boyutunun Belirlenmesi

Sistemin oluşturulan faz uzayında yörüngelerin oluşturduğu çekerin boyutunu belirlemek için, korelasyon boyutları yönteminin kullanılacağı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Korelasyon boyutları hesaplanırken TISEAN 3.0.1 (Hegger vd.,1999) programı kullanılmıştır. Bu program literatürde zaman serisi üzerindeki özellikle kaotik analizinde kullanımına en sık rastlanan programdır. Programdan elde edilen çıktılara ait grafikler; Ek A'da görülebilmektedir. Korelasyon boyutu yönteminden elde edilen sonuçlardan da görüleceği üzere, (EK A) davranış çift logaritmik eksenin belirli bir noktasında doyuma ulaşmaktadır. Doğrusal hareket gösteren bu bölgenin eğimi ise, faz uzayında oluşacak çekerin topolojik boyutunu vermektedir (Koçak ve Şen, 1997). Elde edilen bu sistem (çekici) boyutu eğer fraktal ise bu serinin kaotik davranış gösterdiğinin bir kanıtıdır. Eğer bu eğimler, belirli gömme boyutlarına karşı çizilirse, fraktal boyutta tekrar bir doyum gözlenir, bu durum belirli gömme boyutundan sonra, çekerin boyutunun değişmediğinin bir göstergesidir. Doyum noktasına ulaşılan boyut, çekerin rahat gözlenebilmesi için uygun gömme boyutudur. Bunun aksine, seri kaotik bir davranış göstermiyorsa bu doyum noktası gözlenemez ve boyut bir doyum noktasına erişmeden sürekli artar.

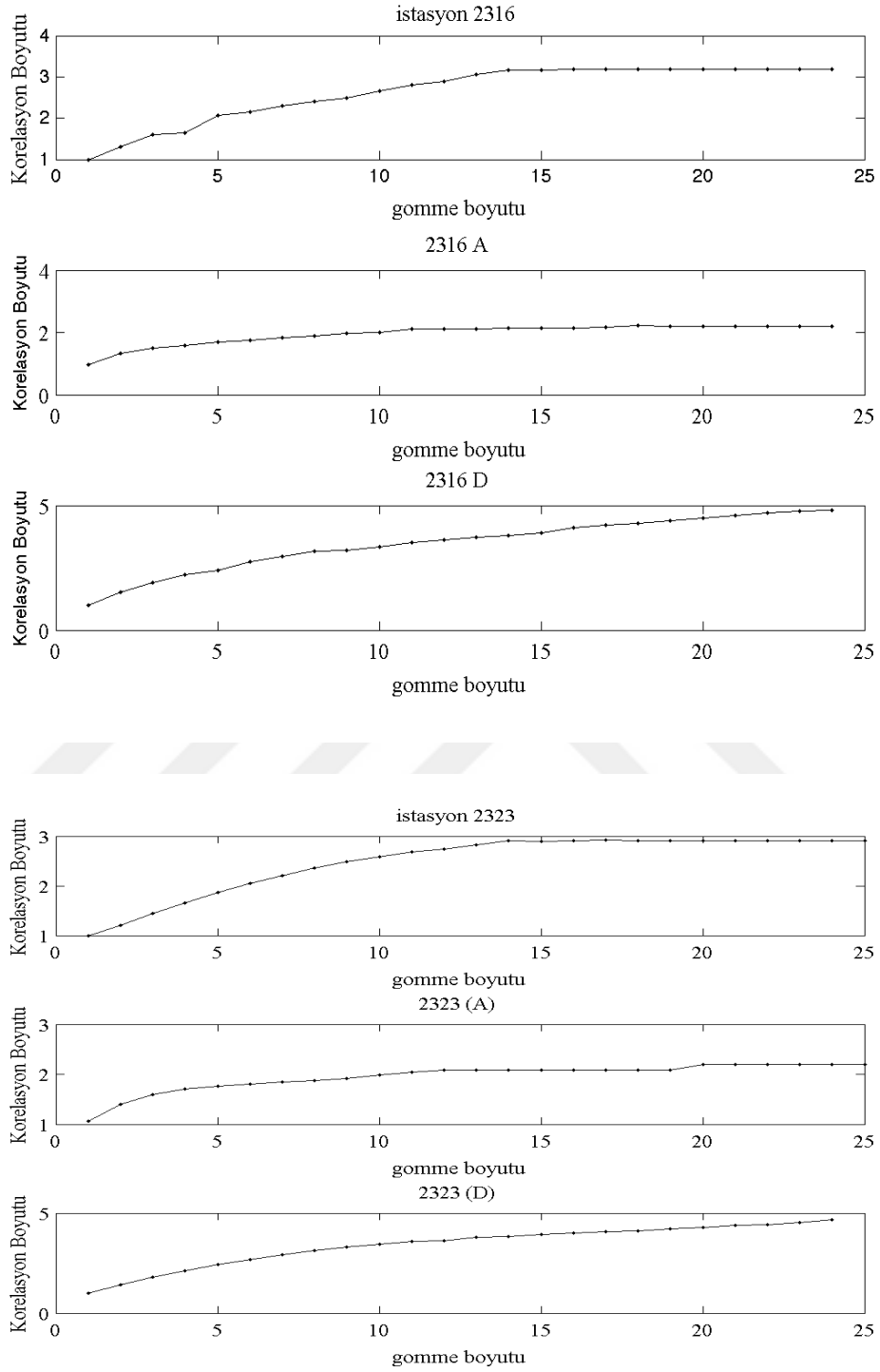
**Çizelge 6.4 : Çoruh Havzası İstasyonları Çeker Boyutları**

Kullanılan İstasyon Numarası	Çeker Boyutu	Gömme Boyutu
2304	2.97	13
2304 (A)	2.07	13
2304 (D)	-	-
2305	3.41	13
2305 (A)	2.26	12
2305 (D)	-	-
2316	3.06	14
2316 (A)	2.11	11
2316 (D)	-	-
2323	2.91	14
2323 (A)	2.04	12
2323 (D)	-	-

Çizelge 6.4 de açıkça görüleceği üzere, gürültü bileşenin seri içinde varoluşu, çeker boyutunun artışına sebep olmaktadır. İstasyonlara ait boyut grafikleri Şekil 6.7'de görülebilmektedir.



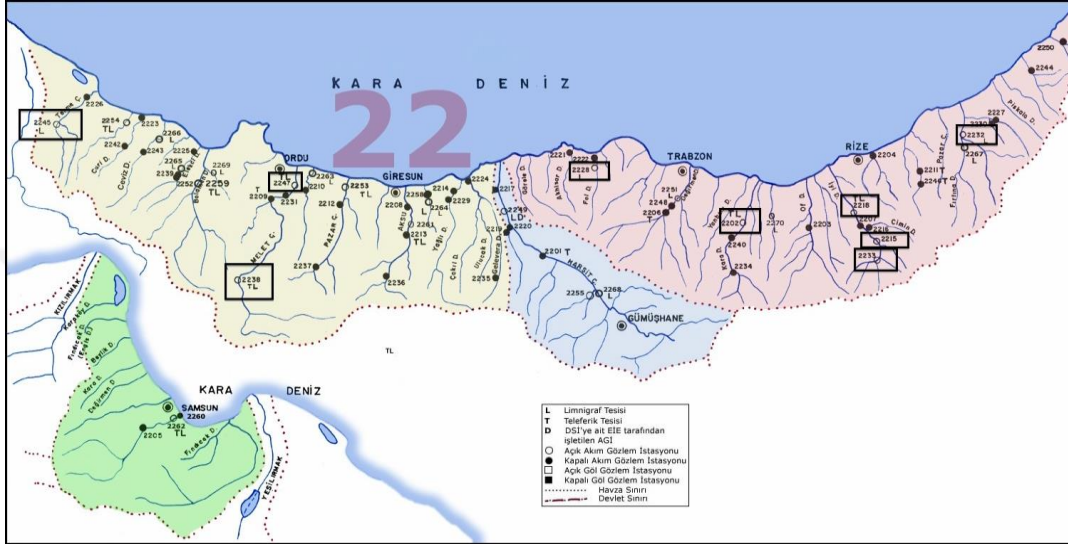
Şekil 6.7 : Çoruh Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutları.



**Şekil 6.7 (devam) :** Çoruh Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonuçlarına ait Korelasyon Boyutları.

## 6.2 Doğu Karadeniz Havzası

Doğu Karadeniz Havzası; batıda Ordu il sınırı, doğuda Gürcistan sınırı, güneyde de Doğu Karadeniz dağ silsilesi ve kuzeyde Karadeniz’le sınırlanan Türkiye’nin kuzeydoğu bölgesini oluşturur. Doğu Karadeniz Havzası, Türkiye’deki 26 su havzasından biridir. Havza; Melet Çayı, Pazar Çayı, Harşit Çayı, Karadere Fırtına Deresi gibi birbirine paralel olarak uzanan akarsuların alt havzalarından oluşur.



Şekil 6.8 : Doğu Karadeniz Havzası Akım Gözlem İstasyonları.

Doğu Karadeniz Havzasında yer alan, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü’ne ait 8 istasyona ait günlük akım verileri kullanılmıştır (Şekil 6.8). İstasyon verilerine ait istatistik özellikler Çizelge 6.5’de gösterilemektedir.

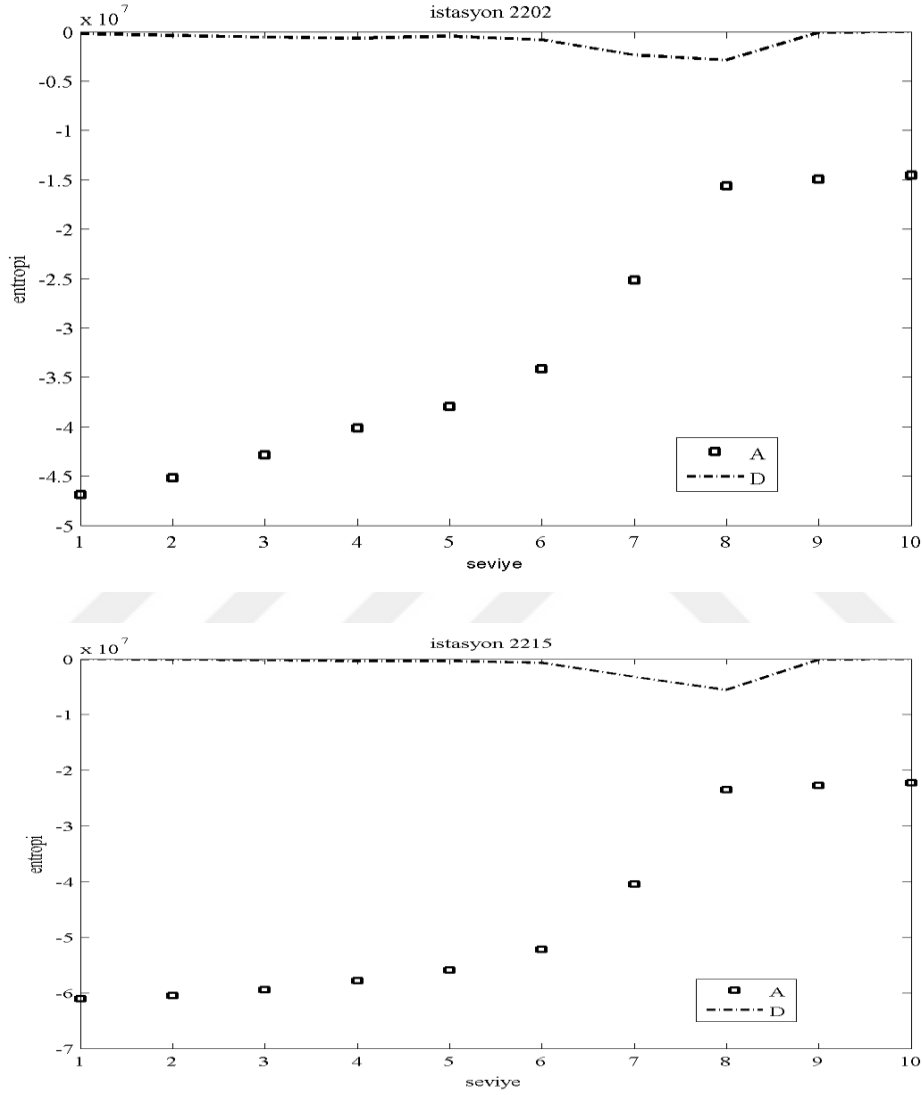
Çizelge 6.5 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Özellikler

Kullanılan İstasyon Numarası	Veri Uzunluğu (Gün)	Gözlem Yılları	Ortalama Debi (m <sup>3</sup> /s)	En Yüksek Debi (m <sup>3</sup> /s)	En Düşük Debi (m <sup>3</sup> /s)	Standart Sapma
2202	22000	1942-2002	11.13	185	0.89	12.47
2215	22000	1942-2002	13.36	95.59	2.08	13.48
2218	22000	1942-2002	28.28	254	4.10	22.58
2228	22000	1942-2002	3.91	90	5.30	22.81
2232	22000	1942-2002	29.01	216	0.87	7.62
2233	22200	1942-2002	6.55	51	0.81	4.56
2245	22000	1942-2002	7.34	258	0.89	12.53
2247	22000	1942-2002	29.37	373	1.75	37.94

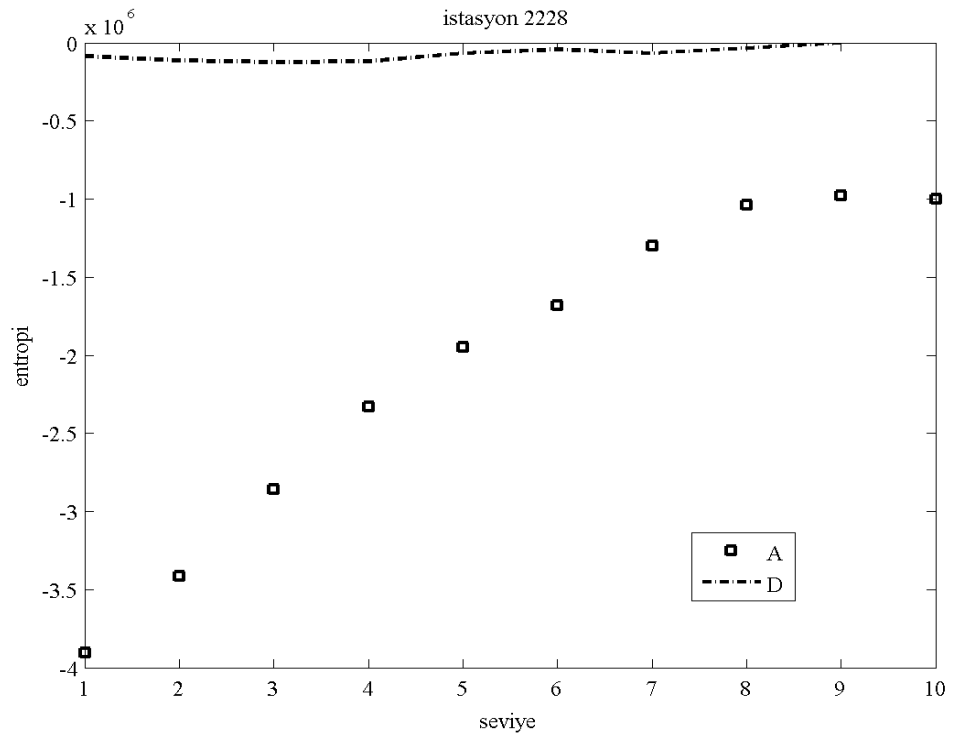
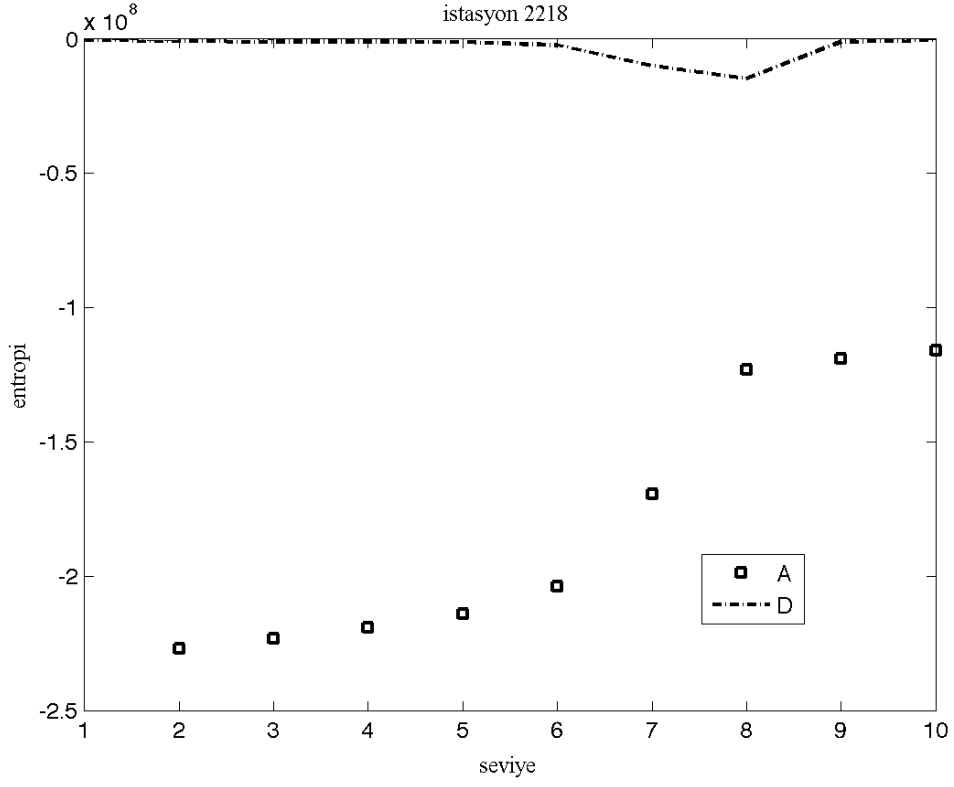


## 6.2.1 Dalgacık Analizi

Dalgacık Analizinin üstel ayrıştırma (downsampling) yaptığı daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu üstel ayrıştırmayı en uygun yapmak için,  $2^n$ , n'in serinin uzunluğuna uygun seçilmesi gerekmektedir. Analiz sonucunda yapılacak ayrıştırma işlemi için 10 seviye seçilmiştir.

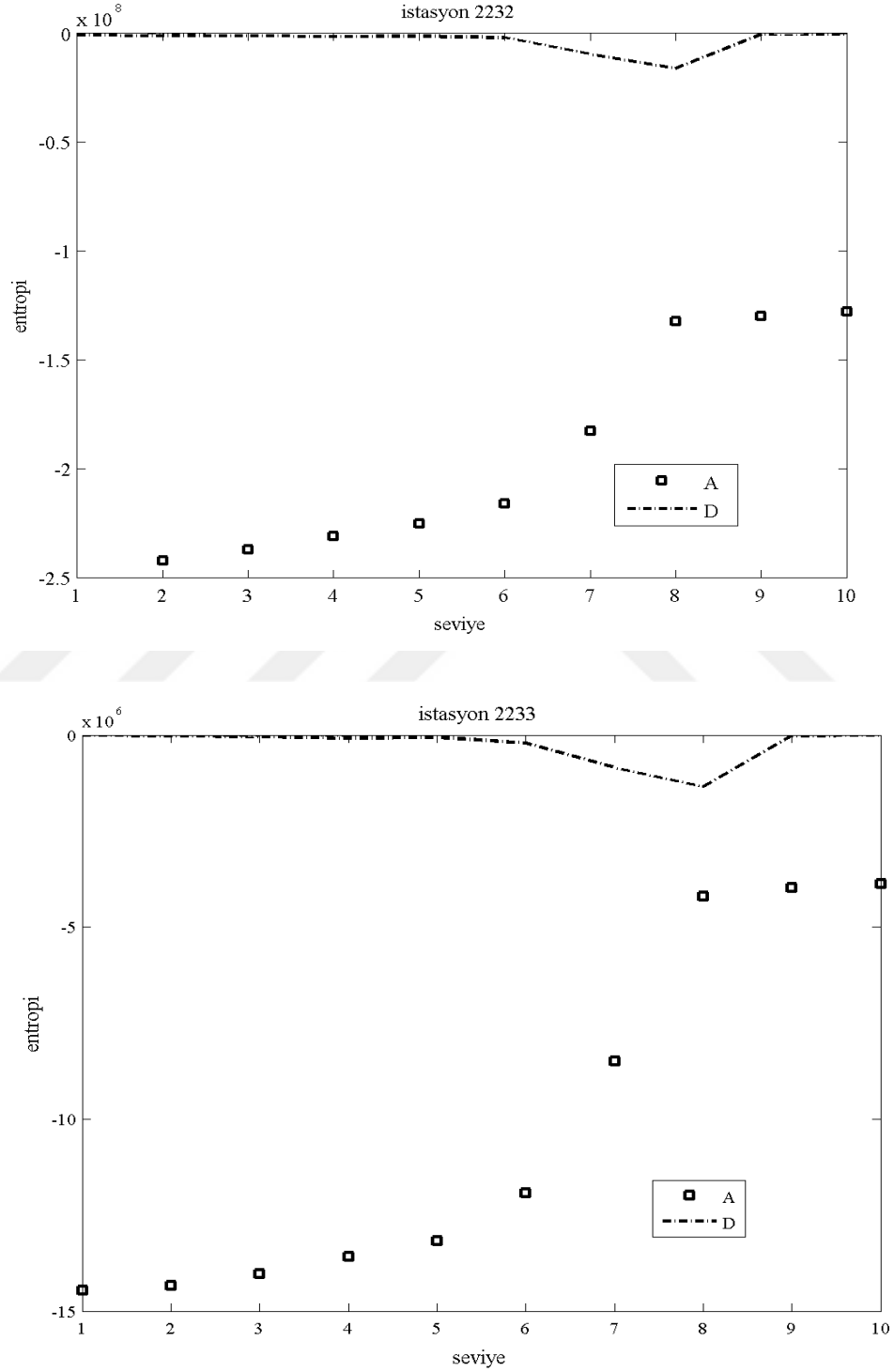


**Şekil 6.9a** : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri  
(İstasyon: 2202, 2215, 2218, 2228).

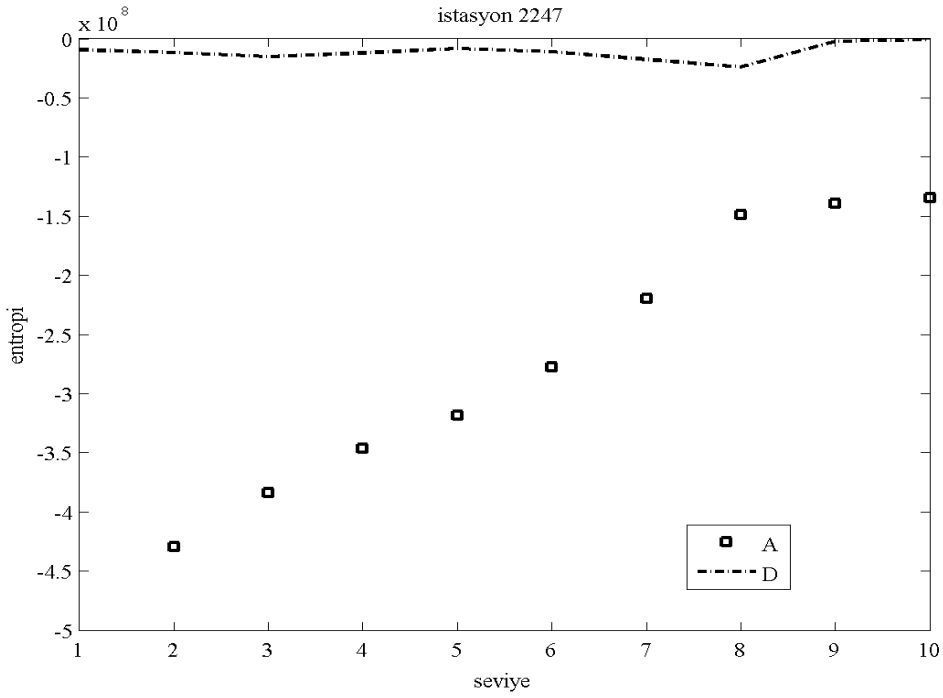
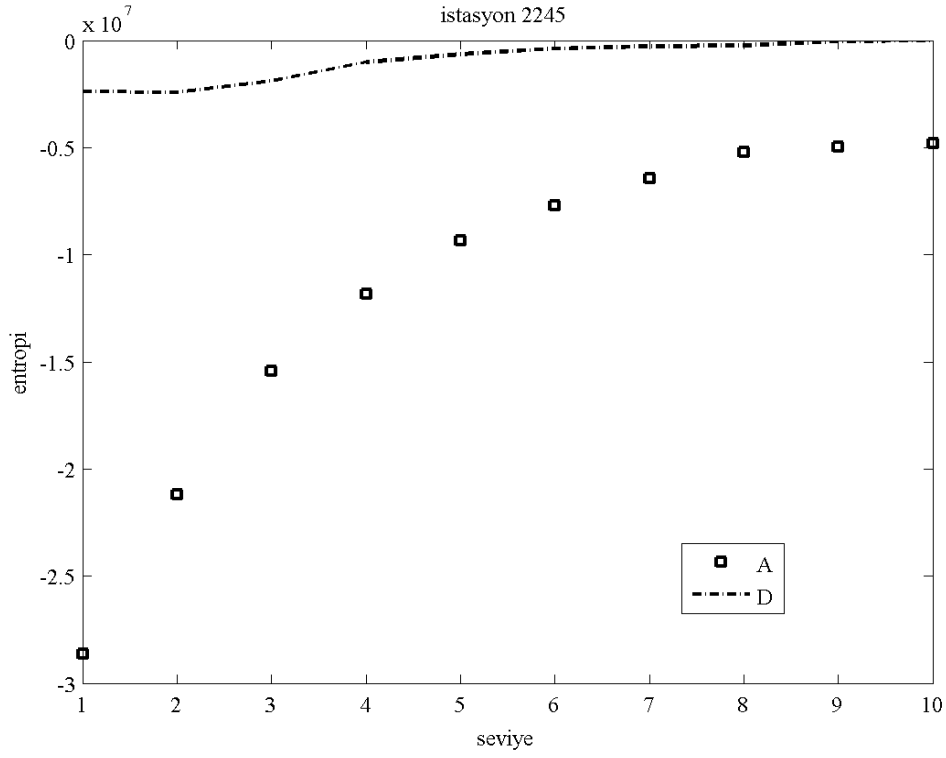


**Şekil 6.9a (devam) :** Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri (İstasyon: 2202, 2215, 2218, 2228).

Şekillerde gözlenmiş seri, yaklaşım parçası (A) ve detay (D) parçaları her bir seviye için ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 6.9'da gözlenebilmektedir. Dalgacık analizi neticesinde hesaplanan entropiler, D parçasının Entropisinin 0'dan farklı olduğu nokta olarak seçilmiştir.

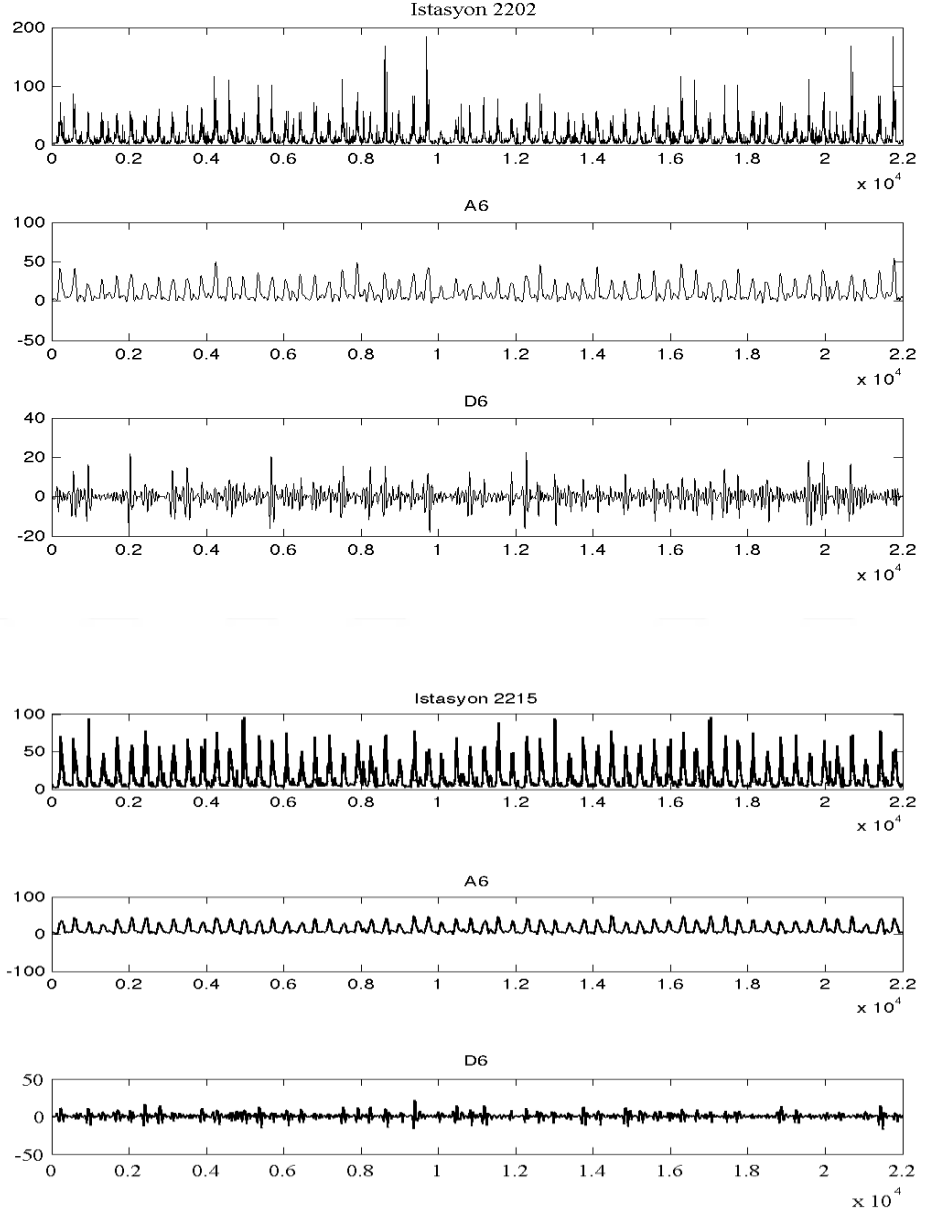


**Şekil 6.9b** : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri  
(İstasyon: 2232, 2233, 2245, 2247).

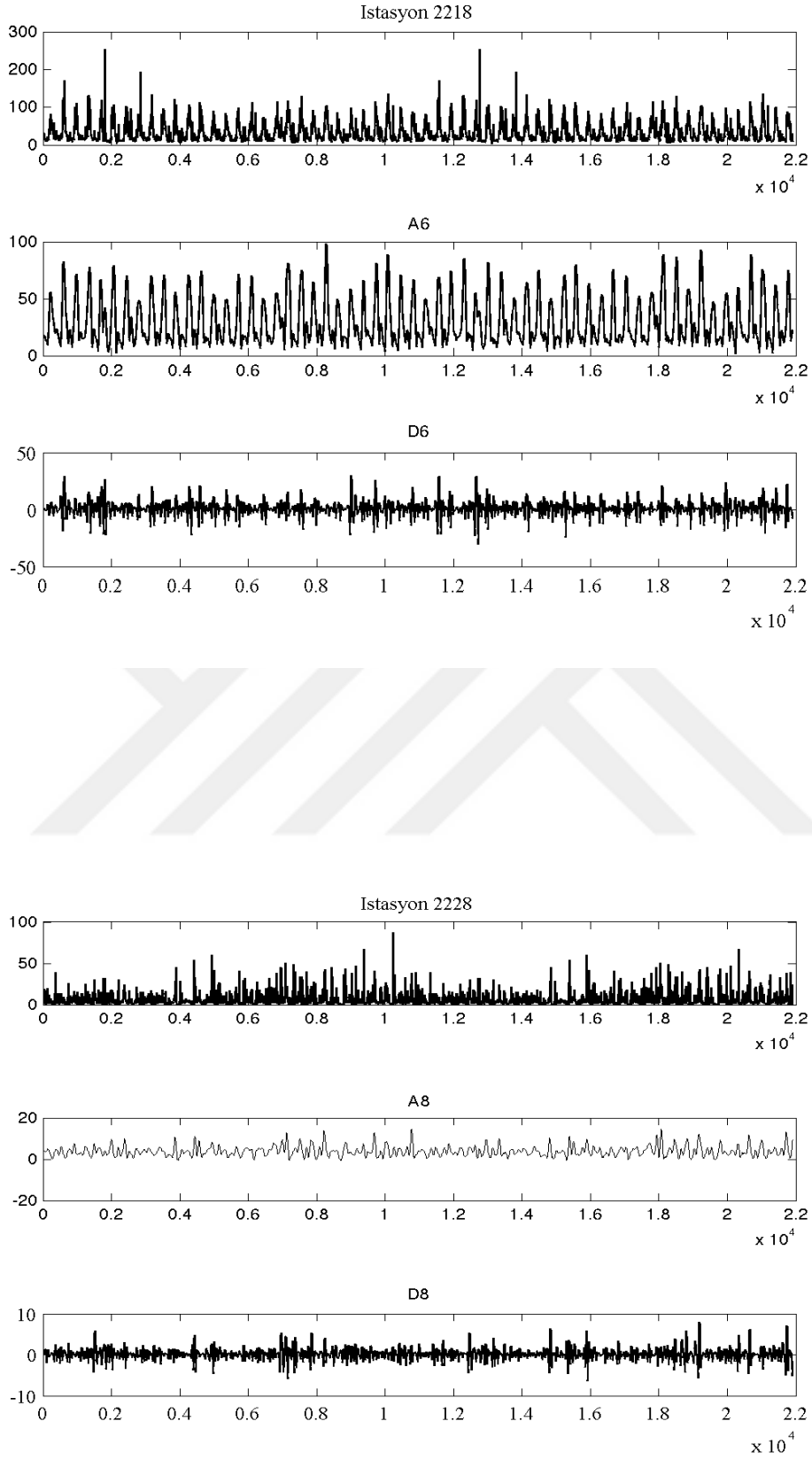


**Şekil 6.9b (devam)** : Uygulamada Kullanılan Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri (İstasyon: 2232, 2233, 2245, 2247).

Entropi grafiklerine göre, istasyonlar için bilgi kaybı olmadan, ayrıştırma işleminin yapılabileceği uygun seviyeler seçilmiştir. Seçilen seviyelerde yapılan Dalgacık Analizi neticeleri Şekil 6.10a ve Şekil 6.10b 'de gözlenmektedir.

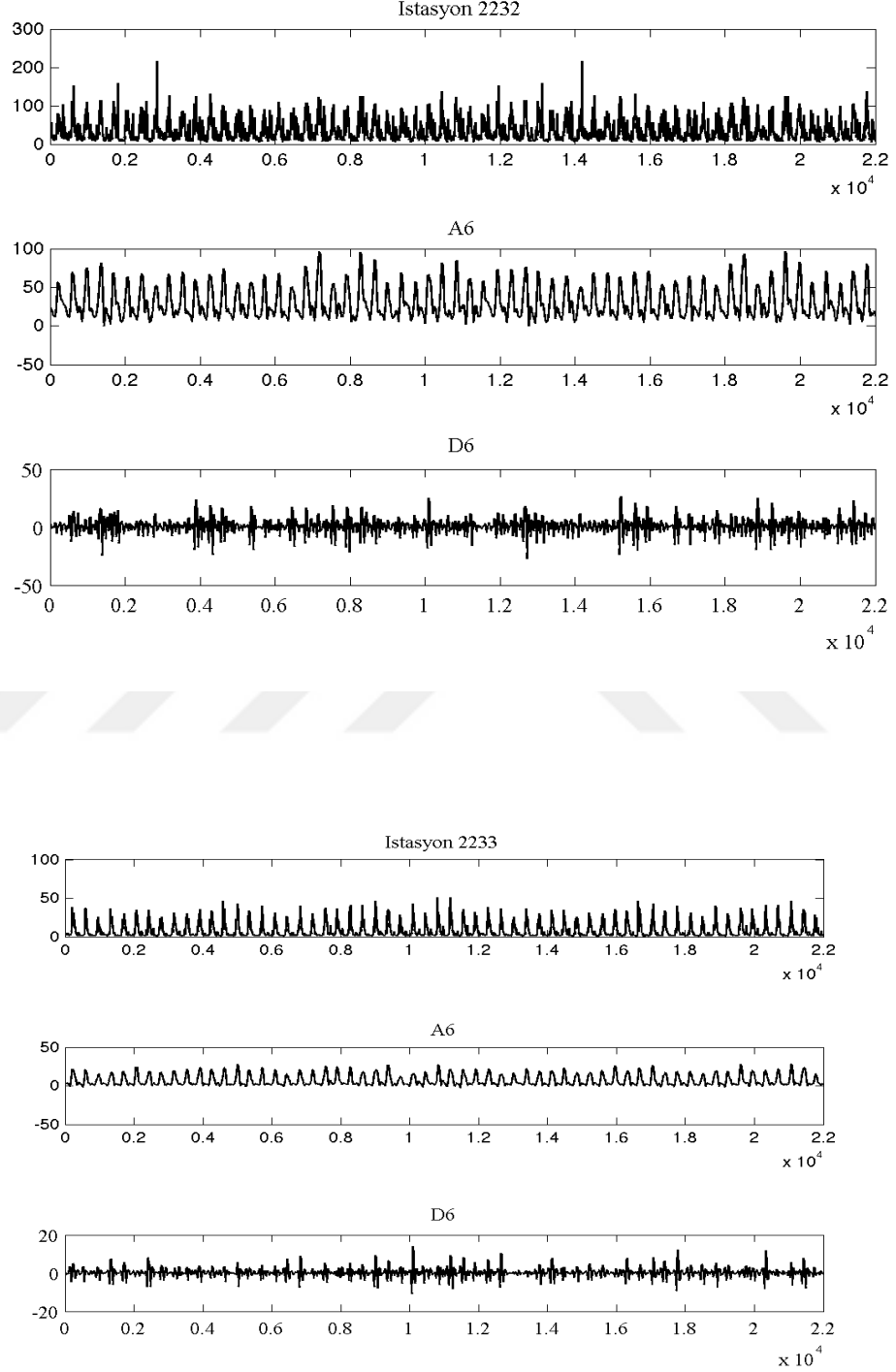


Şekil 6.10a : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü (İstasyon 2202,2215,2218,2228).



**Şekil 6.10a (devam):** Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü (İstasyon 2202,2215,2218,2228).

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, kullanılacak diğer kaotik analiz yöntemleri neticesinde, A parçasının kaotik karakteri ne kadar temsil ettiği tekrar inceleme altına alınacaktır.



**Şekil 6.10b** : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü (İstasyon 2232,2233,2245,2247).

## 6.2.2 Faz Uzayının Yeniden Kurulması

### 6.2.2.1 Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi

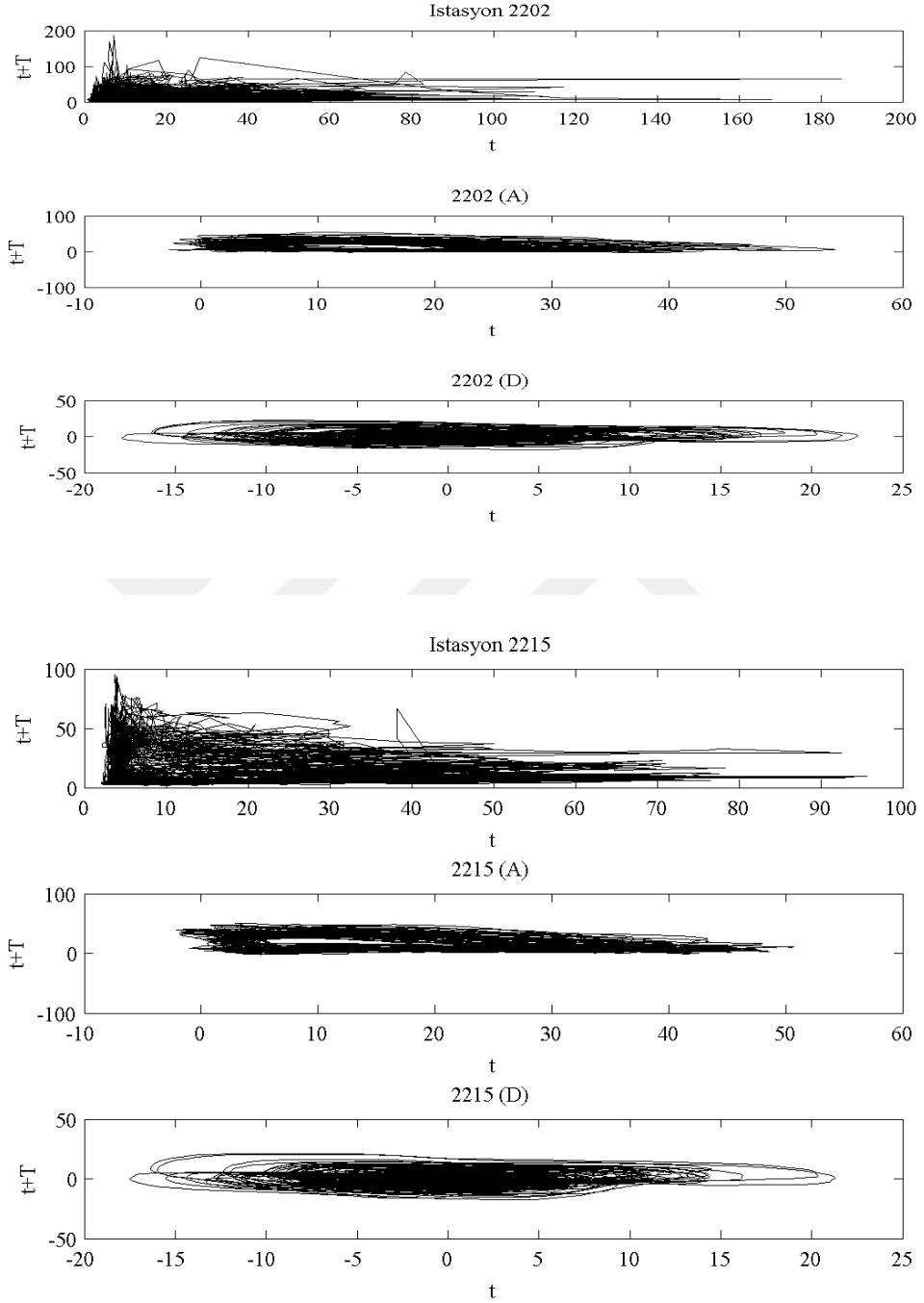
TISEAN 3.0.1 paket programından elde edilmiş olan,  $OB(T)$  (Eşitlik (3.26)) elde edilen zaman gecikmeleri (T) çıktıları, Çizelge 6.6'da her bir istasyona ait orijinal seri, yaklaşım (A) ve detay (D) bileşeni için için gösterilmektedir. Çizelge 6.6 ile oluşan zaman kopyalarının oluşturduğu çekerin 2 boyutlu uzaydaki ( $x(t)$ ,  $x(t+T)$ ) gösterimi, gözlenmiş seri, Yaklaşım Bileşeni (A) için Şekil 6.11'de gözlenebilmektedir. Oluşan çekelerin 3 boyutlu gösterimi ( $x(t)$ ,  $x(t+T)$ ,  $x(t+2T)$ ) Ek D'de gösterilmektedir.

**Çizelge 6.6 :** Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Zaman Gecikmeleri

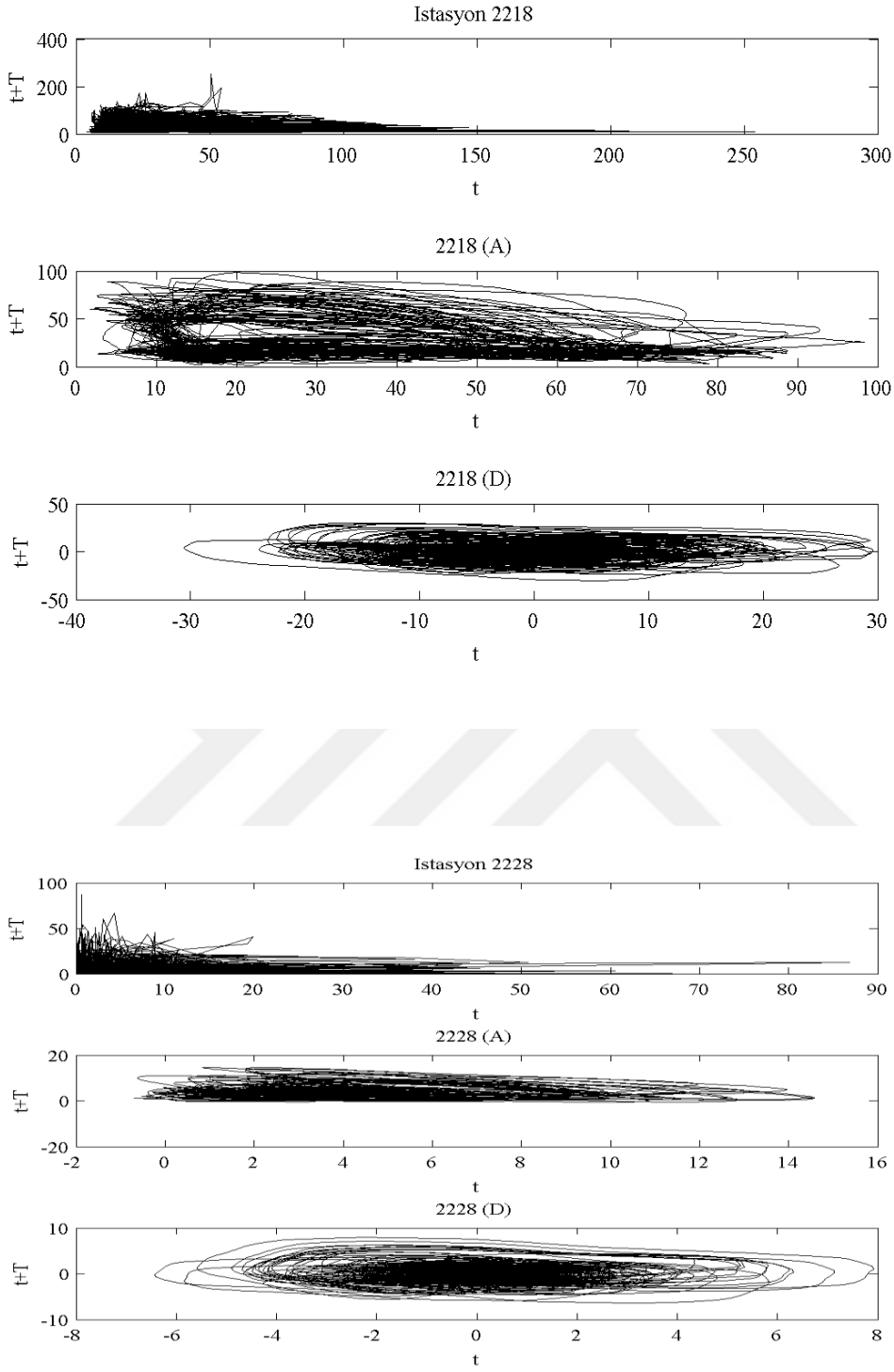
Kullanılan İstasyon Numarası	Zaman Gecikmesi (T)
2202	50 gün
2202 (A)	64 gün
2202 (D)	24 gün
2215	74 gün
2215(A)	78 gün
2215 (D)	25 gün
2218	72 gün
2218 (A)	79 gün
2218 (D)	26 gün
2228	30 gün
2228 (A)	62 gün
2228 (D)	22 gün
2232	64 gün
2232 (A)	66 gün
2232 (D)	25 gün
2233	75 gün
2233 (A)	78 gün
2233 (D)	26 gün
2245	15 gün
2245 (A)	71 gün
2245 (D)	12 gün
2247	40 gün
2247 (A)	62 gün
2247 (D)	23 gün



Zaman gecikmeleri (T), göz önünde bulundurularak elde edilen çekerlerin, orijinal seriye kıyasla, yaklaşım parçasında daha yumuşak ve belirgin davranış sergilediği gözlemlenmektedir.

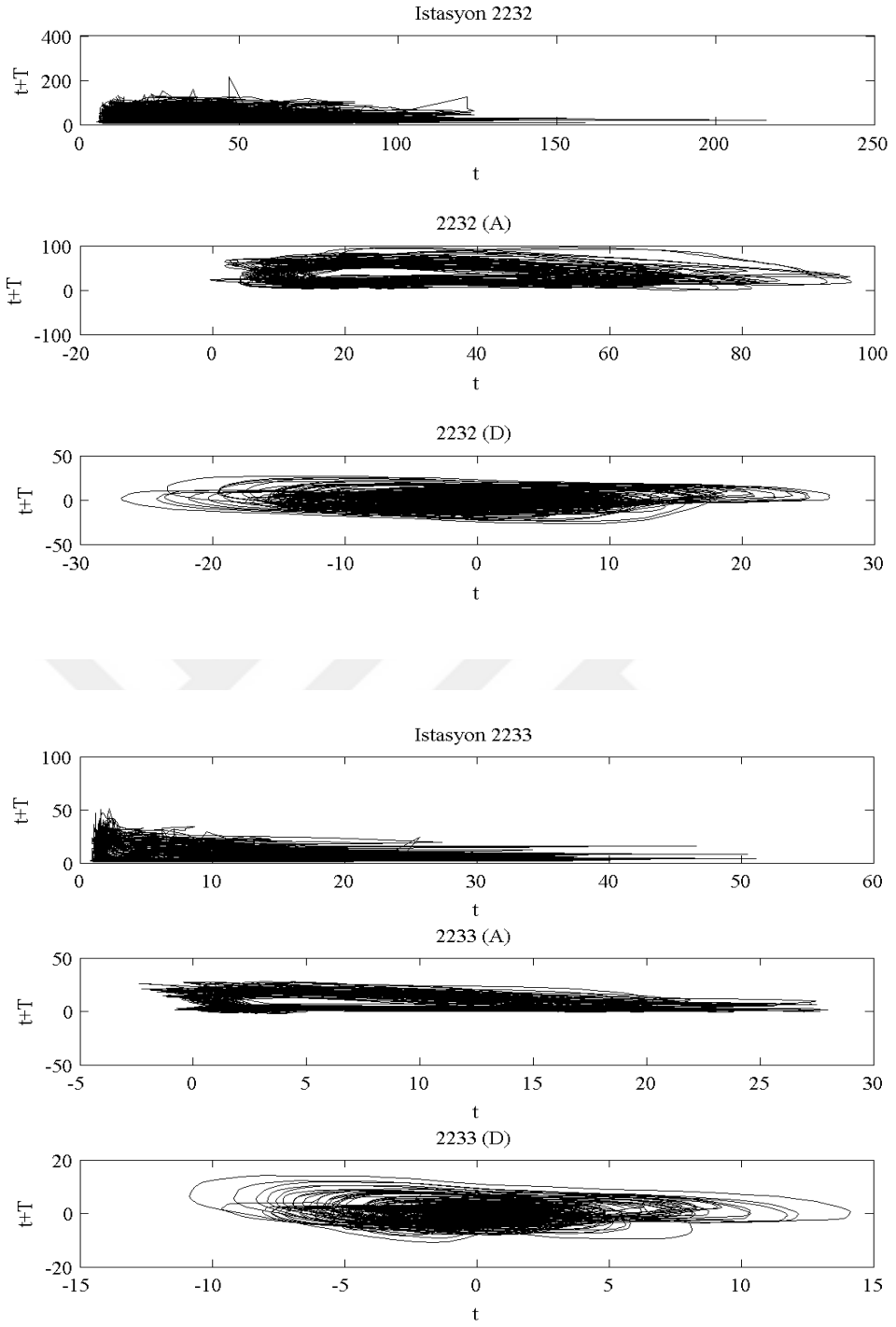


**Şekil 6.11a** : Doğu Karadeniz Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna Ait Çekerler (İstasyon 2202,2215,2218,2228).

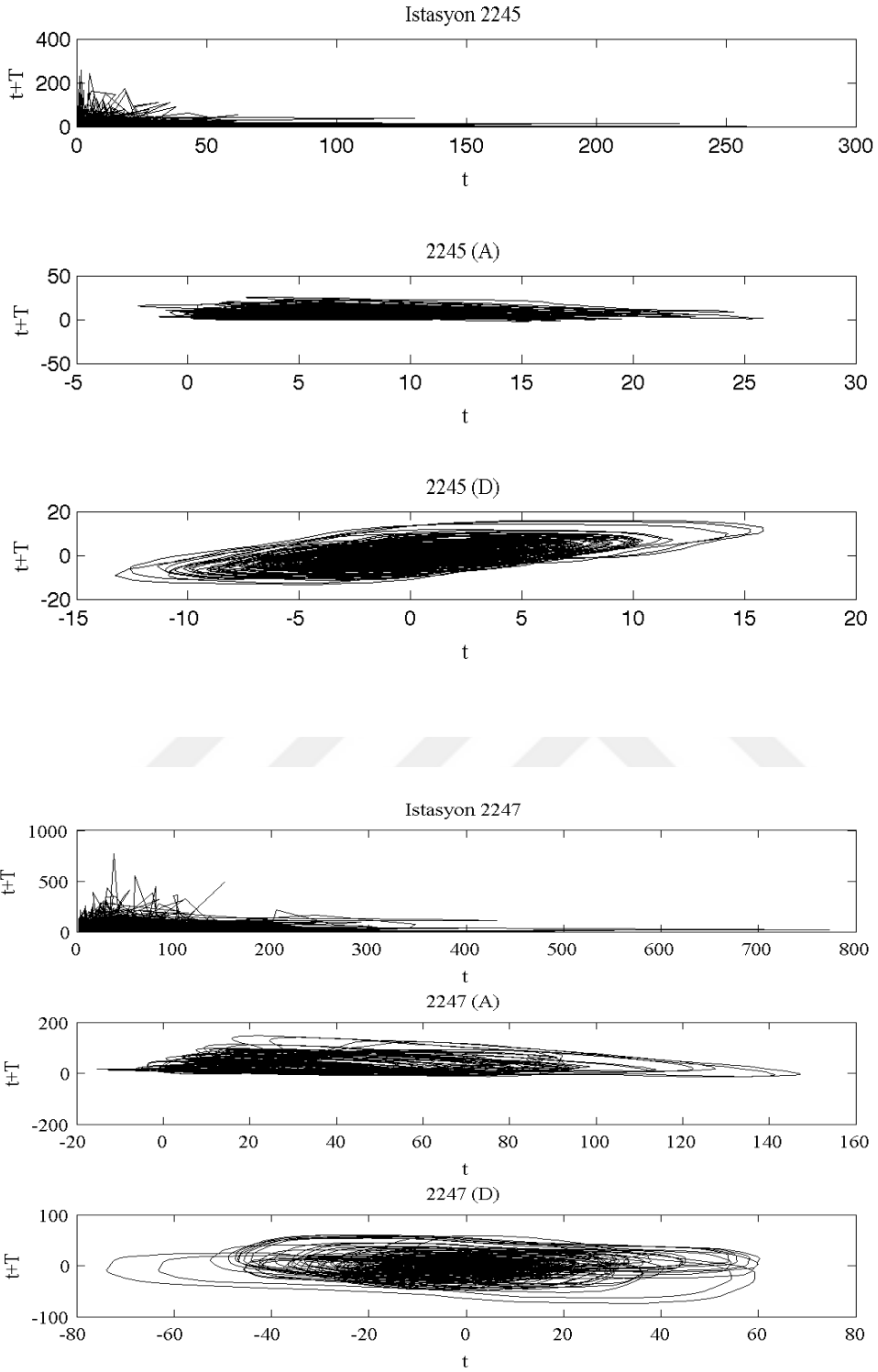


**Şekil 6.11a :** Doğu KaradenizSeri ve Dalgacık Analizi Sonucuna Ait Çekerler İstasyon( 2202,2215,2218,2228).

Detay (D) bileşeni ise, faz uzayında tanımlı rastgele davranışa benzer bir hareket göstermektedir. Faz uzayında oluşan bu çekerler, dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçanın kaotik davranışını daha belirgin ortaya koyduğunun bir göstergesidir.



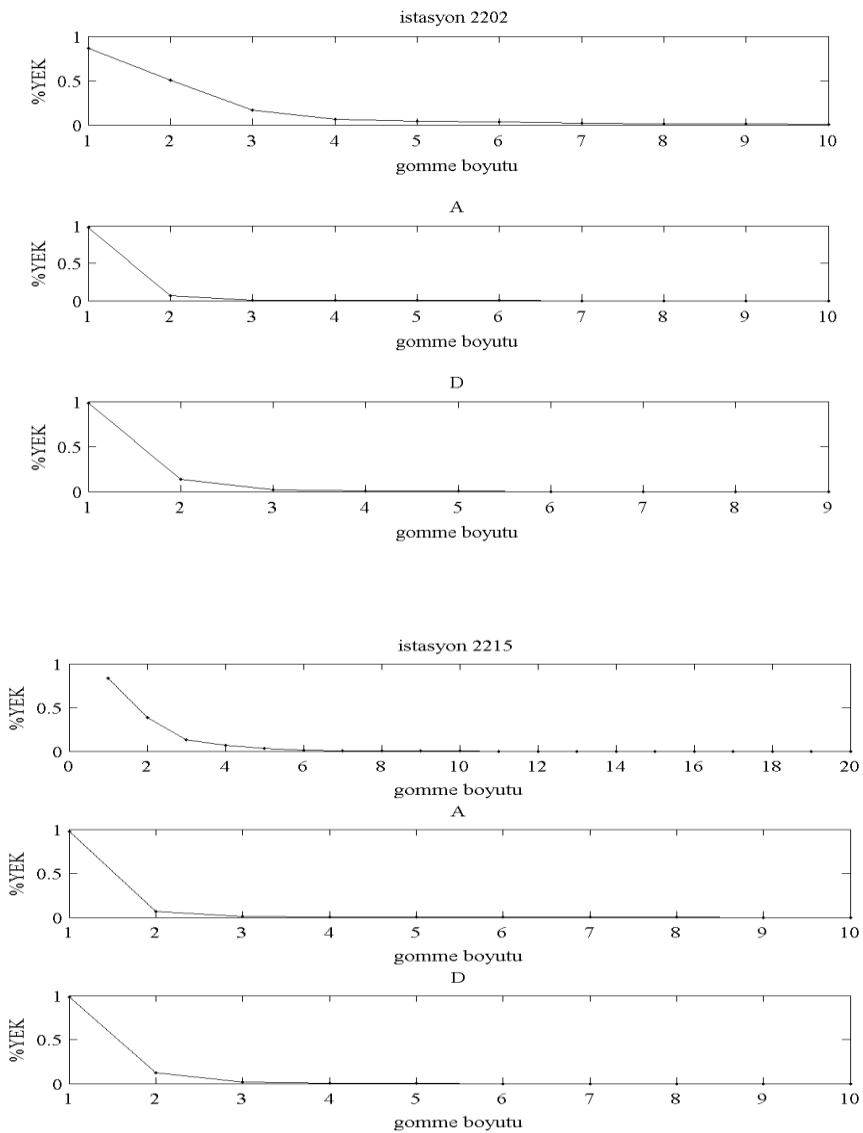
**Şekil 6.11b :** Doğu KaradenizSeri ve Dalgacık Analizi Sonucuna Ait Çekerler (İstasyon 2232, 2233, 2245,2247).



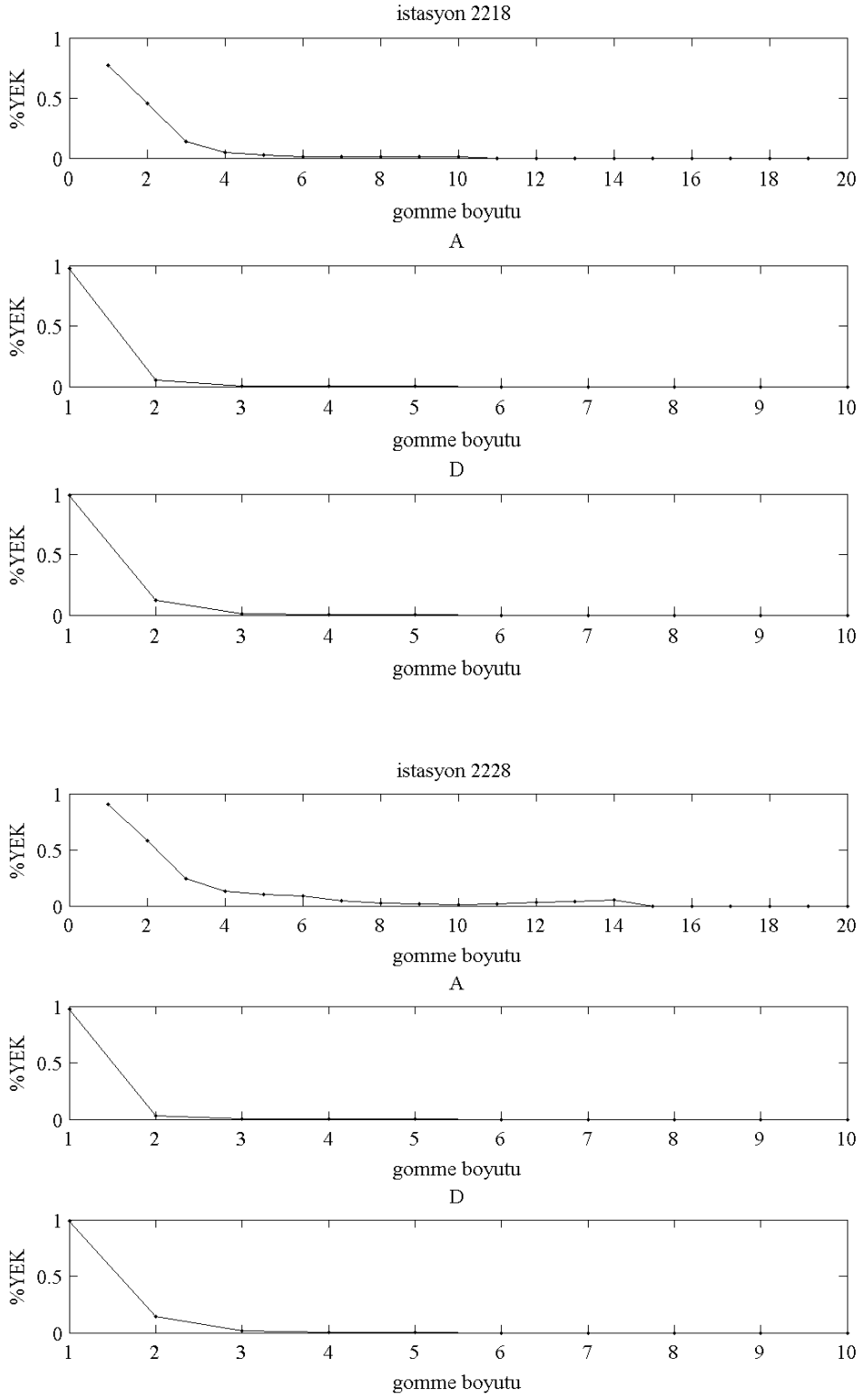
**Şekil 6.11b :** Doğu Karadeniz Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna Ait Çekerler (İstasyon 2232, 2233, 2245,2247).

### 6.2.2.2 Gömme Boyutunun Belirlenmesi

Gömme boyutunun belirlenmesi için, literatürde en sık rastlanan yöntem, yanlış En yakın komşular yöntemidir (YEK). Verilen seri üzerinde seçilen iki noktadan,  $R_i$  mesafesinin (Eşitlik (3.24)) belirli eşik değerden büyük olduğu noktaların sıfıra ulaştığı nokta, uygun gömme boyutu olarak belirlenir. İstasyonlardan elde edilen YEK yüzdelere karşılık gelen gömme boyutu grafikleri, orijinal seri, A ve D parçaları için Şekil 6.12'de gösterilmektedir.

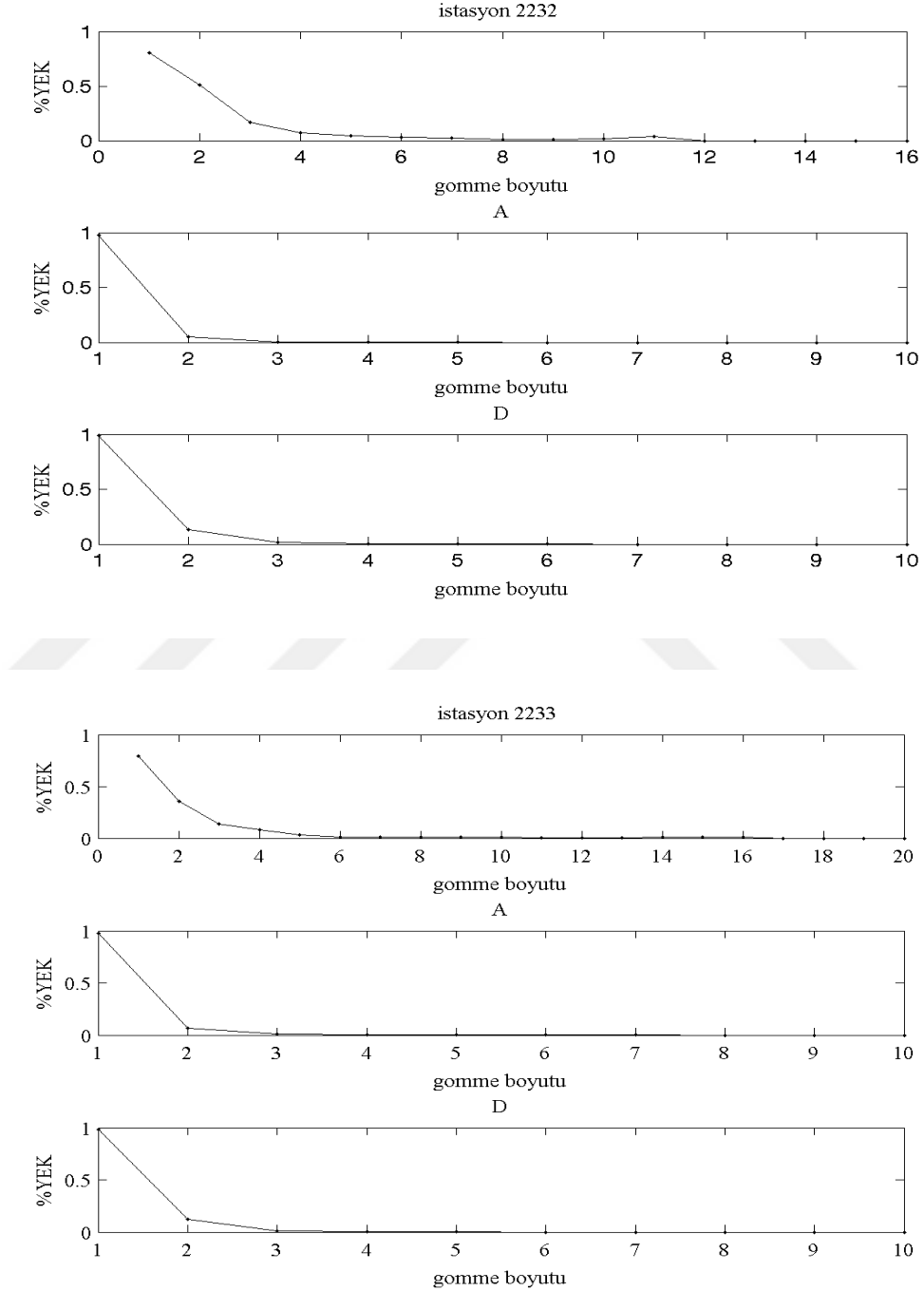


Şekil 6.12a : Seri ve Dalgacık Analizine Ait YEK Grefikleri (İstasyon 2202,2215, 2218, 2228).

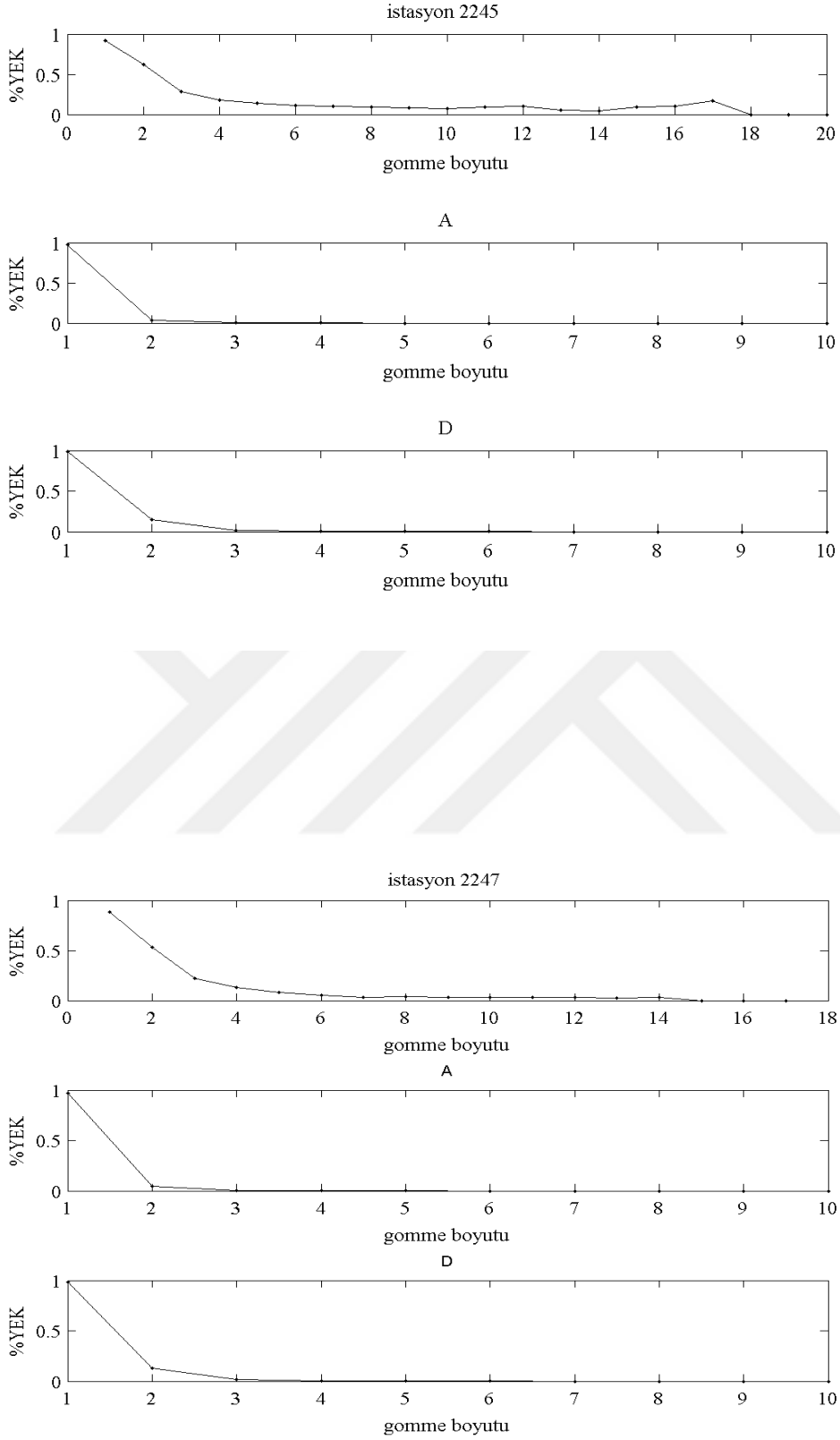


**Şekil 6.12a (devam) : Seri ve Dalgacık Analizine Ait YEK Grafikleri (İstasyon 2202,2215, 2218, 2228)**

TISEAN 3.0.1 (Hegger vd.,1999) programı kullanılmıştır. Bu program literatürde zaman serisi üzerindeki özellikle kaotik analizinde kullanımına en sık rastlanan programdır. Programdan elde edilen çıktılara ait grafikler; Ek A'da görülebilmektedir.



**Şekil 6.12b** : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna Ait YEK Grafikleri  
İstasyon (2232, 2233, 2245, 2247).



**Şekil 6.12b (devam) : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna Ait YEK Grafikleri İstasyon (2232, 2233, 2245, 2247).**



Çizelge 6.7 'de açıkça görüleceği üzere, gürültü bileşenin seri içinde varoluşu, gömme çeker boyutunun artışına sebep olmaktadır.

**Çizelge 6.7 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Gömme Boyutları**

Kullanılan İstasyon Numarası	Gömme Boyutu (m)
2202	4
2202 (A)	3
2202 (D)	3
2215	6
2215(A)	3
2215 (D)	3
2218	6
2218 (A)	3
2218 (D)	3
2228	6
2228 (A)	3
2228 (D)	3
2232	6
2232 (A)	3
2232 (D)	3
2233	6
2233 (A)	2
2233 (D)	3
2245	6
2245 (A)	3
2245 (D)	3
2247	6
2247 (A)	3
2247 (D)	3

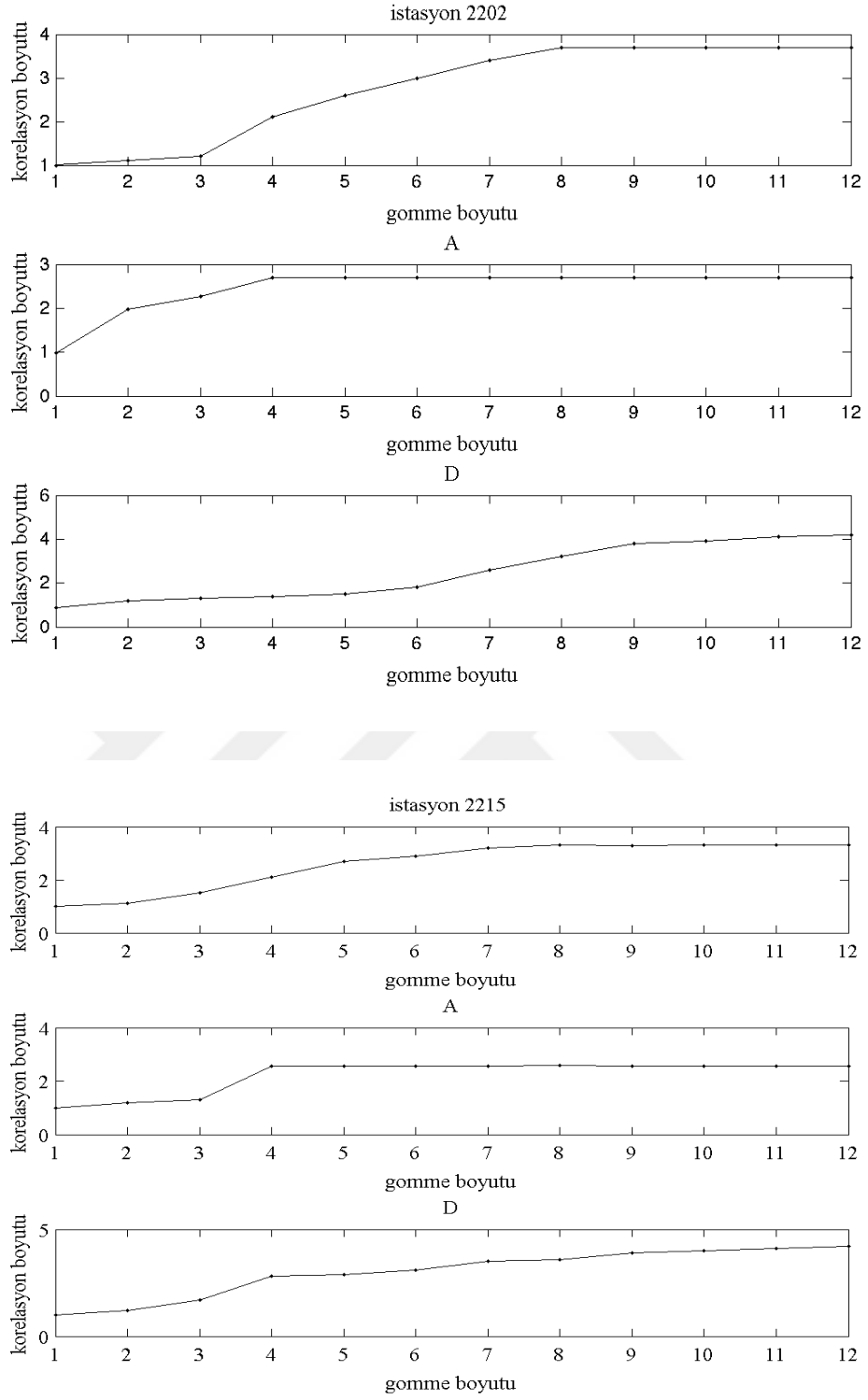
### 6.2.2.3 Çeker Boyutunun Belirlenmesi

Elde edilen çeker boyutu eğer fraktal ise bu serinin kaotik davranış gösterdiğinin bir kanıtıdır. Eğer bu eğimler, belirli gömme boyutlarına karşı çizilirse, fraktal boyutta tekrar bir doyum gözlenir, bu durum belirli gömme boyutundan sonra, çekerin boyutunun değişmediğinin bir göstergesidir (Eşitlik (3.13)). Doyum noktasına ulaşılan boyut, çekerin rahat gözlenebilmesi için uygun gömme boyutudur. Bunun aksine, seri kaotik bir davranış göstermiyorsa bu doyum noktası gözlenemez ve boyut bir doyum noktasına erişmeden sürekli artar.

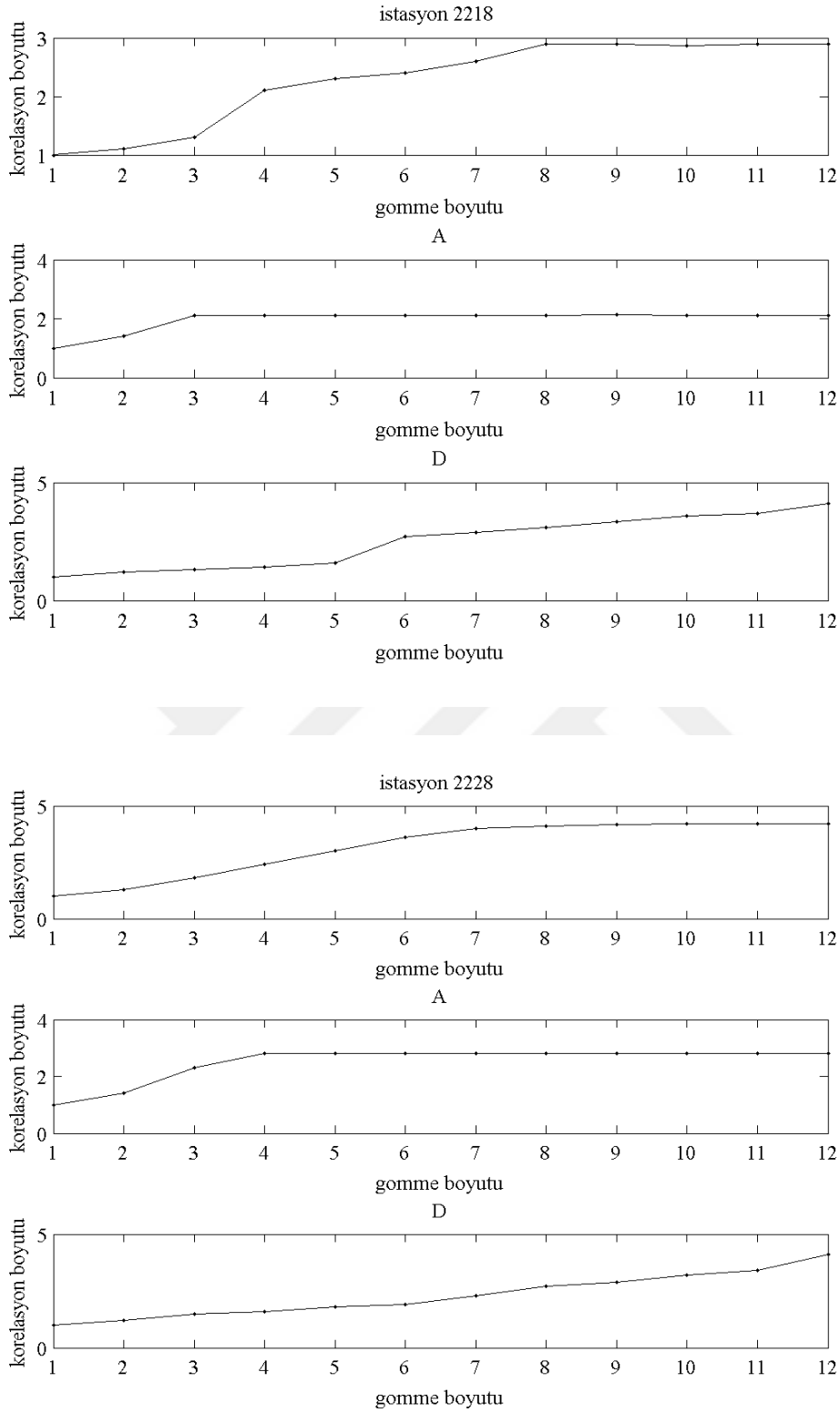
**Çizelge 6.8 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Çeker Boyutları**

Kullanılan İstasyon Numarası	Çeker Boyutu	Gömme Boyutu (m)
2202	3.70	8
2202 (A)	2.7	4
2202 (D)	-	-
2215	3..33	7
2215(A)	2.56	4
2215 (D)	-	-
2218	2.90	8
2218 (A)	2.10	3
2218 (D)	-	-
2228	4.18	7
2228 (A)	2.81	4
2228 (D)	-	-
2232	3.90	8
2232 (A)	2.81	4
2232 (D)	-	-
2233	3.30	7
2233 (A)	2.30	3
2233 (D)	-	-
2245	2.90	8
2245 (A)	2.17	3
2245 (D)	-	-
2247	3.25	7
2247 (A)	2.76	4
2247 (D)	-	-

Çizelge 6.8 'de açıkça görüleceği üzere, gürültü bileşenin seri içinde varoluşu, gömme çeker boyutunun artışına sebep olmaktadır. Gürültüden ayrılmış parçanın oluşturduğu çeker, gözlenmiş seriye göre çok daha küçük boyuttadır. Gürültü ayırımında Dalgacık Analizi Kullanılmış, ve seviyenin belirlenmesi için entropi kriteri baz alınmıştır. Entropi Bilginin bir ölçütüdür. Serinin orijinal halinin taşıdığı bilgi içeriği ayrılan A parçasında korunmuştur. Gürültü olduğu düşünülerek ayrılmış kısmın (D), serinin gerçek karakterini gizlediği sonucuna varılmıştır. Korelasyon boyutu hesabından elde edilen gömme boyutuna karşı çizilen grafikler Şekil 6.13'de gösterilmektedir.

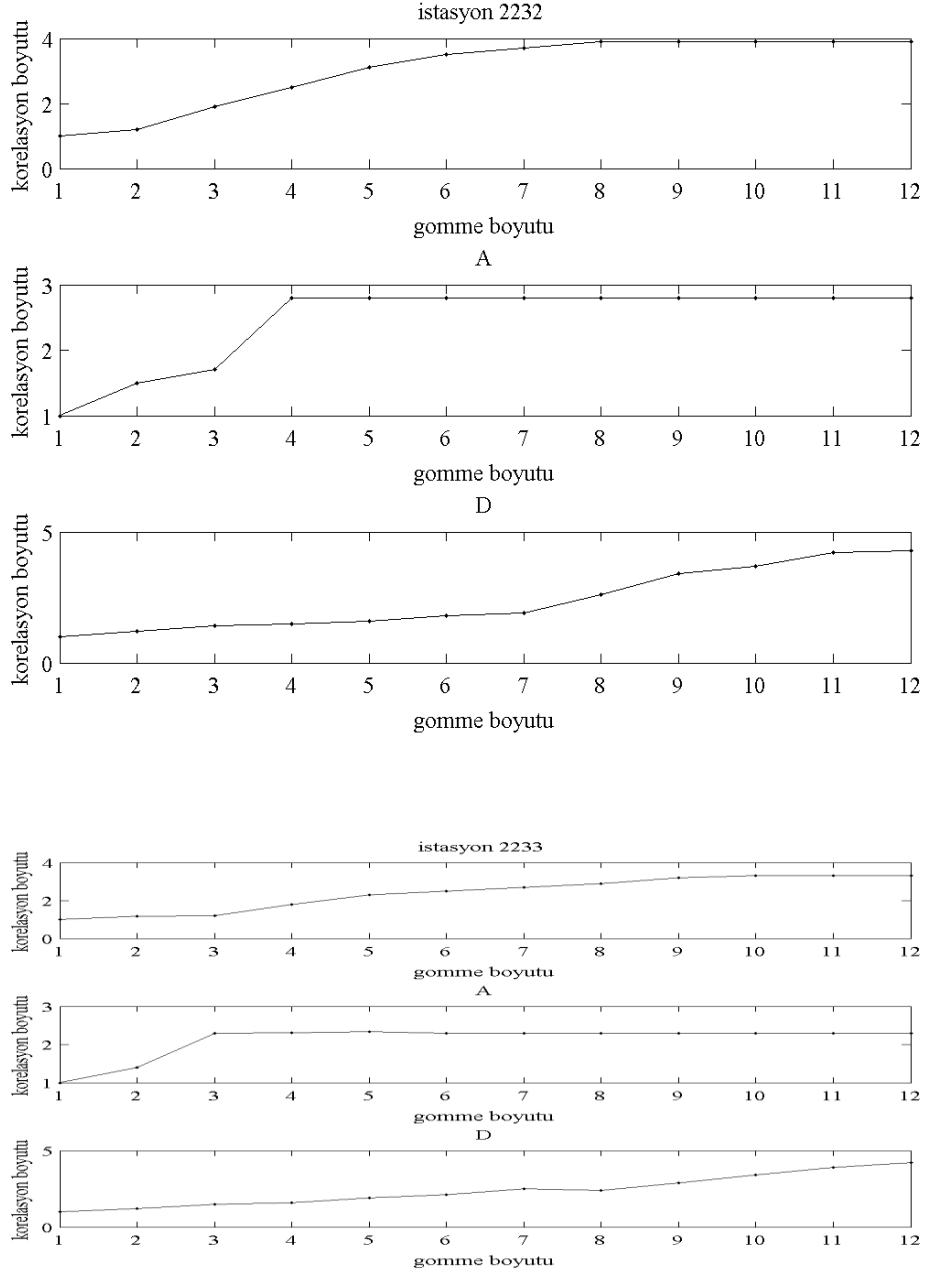


**Şekil 6.13a :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çeker Boyutu Grafikleri İstasyon (2202, 2215, 2218, 2228).

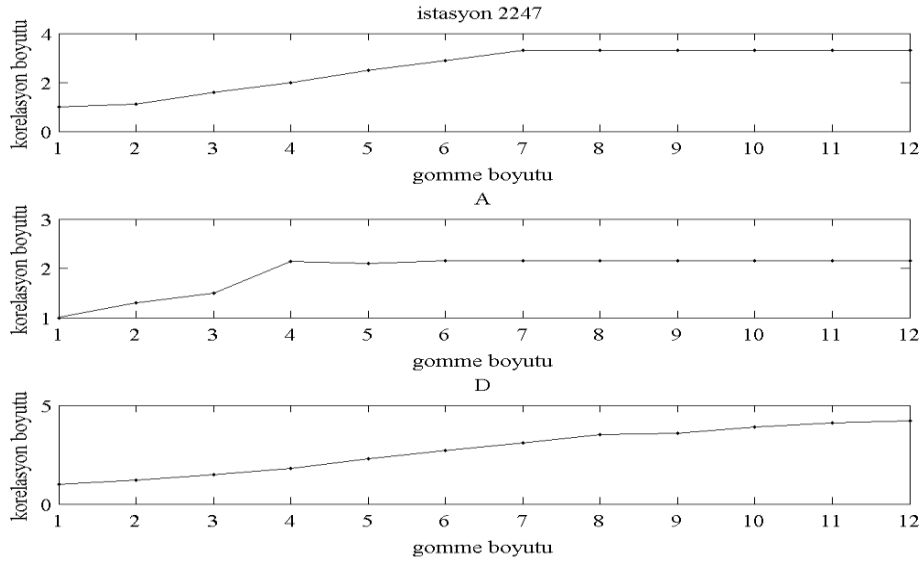
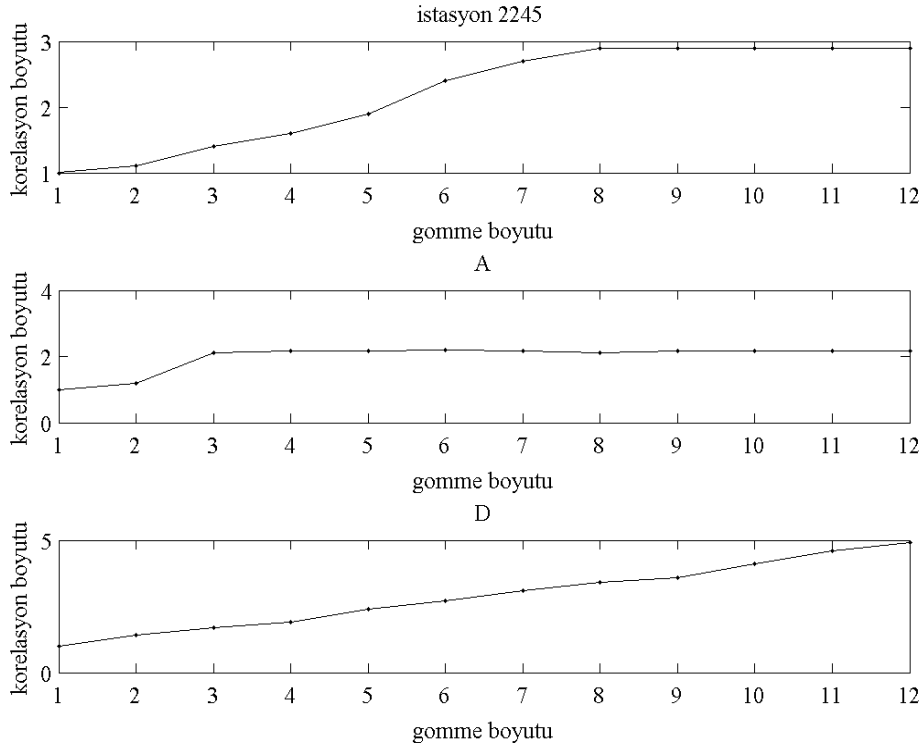


**Şekil 6.13 a (devam) :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çeker Boyutu Grafikleri İstasyon (2202, 2215, 2218, 2228).

TISEAN 3.0.1 (Hegger vd.,1999) programı kullanılmıştır. Bu program literatürde zaman serisi üzerindeki özellikle kaotik analizinde kullanımına en sık rastlanan programdır. Programdan elde edilen çıktılara ait grafikler; Ek A'da görülebilmektedir.



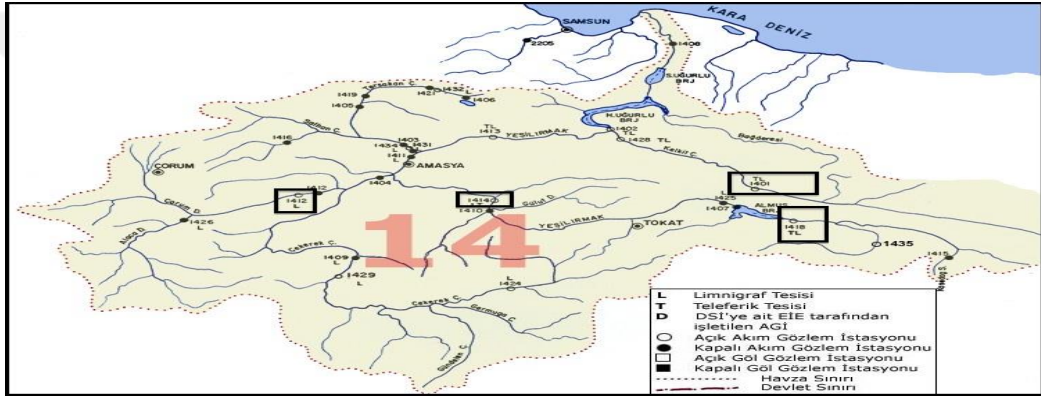
**Şekil 6.13b** : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çeker Boyutu Grafikleri İstasyon (2232,2233,2245,2247)



**Şekil 6.13b (devam) : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çeker Boyutu Grafikleri İstasyon (2232,2233,2245,2247)**

### 6.3 Yeşil Irmak Havzası

Yeşilirmak Sivas'ın kuzeyinde Köseadağ eteklerinden doğan ve Çarşamba'dan Karadeniz'e dökülür. Antik adı İrsi'dir 519 km uzunluğundaki Yeşilirmak Tokat-Amasya ve Samsun illerinden geçerken çeşitli akarsularla birleşir. Nehir başlıca 3 kolun birleşmesinden meydana gelir. Kelkit Çayı nehrin en büyük koludur. Nehrin kolları ile beraber taşıdığı alüvyonlar Çarşamba Ovasını oluşturmuştur. Üzerinde Almus, Ataköy, Hasan Uğurlu ve Suat Uğurlu Barajlarının kurulduğu Yeşilirmak düzensiz bir rejime sahiptir.. DSİ 14. Numaralı havza olan, Doğu Karadeniz Havzasında yer alan, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait 4 istasyona ait günlük akım verileri kullanılmıştır (Şekil 6.14).



Şekil 6.14 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonları.

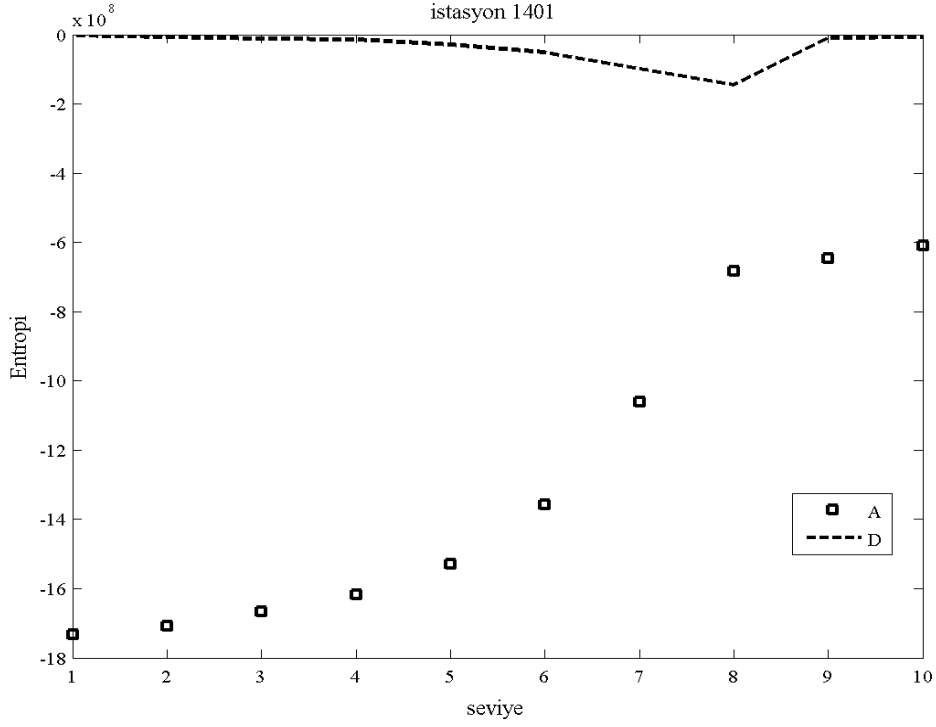
İstasyon verilerine ait istatistik özellikler Çizelge 6.9'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.9 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Veriler

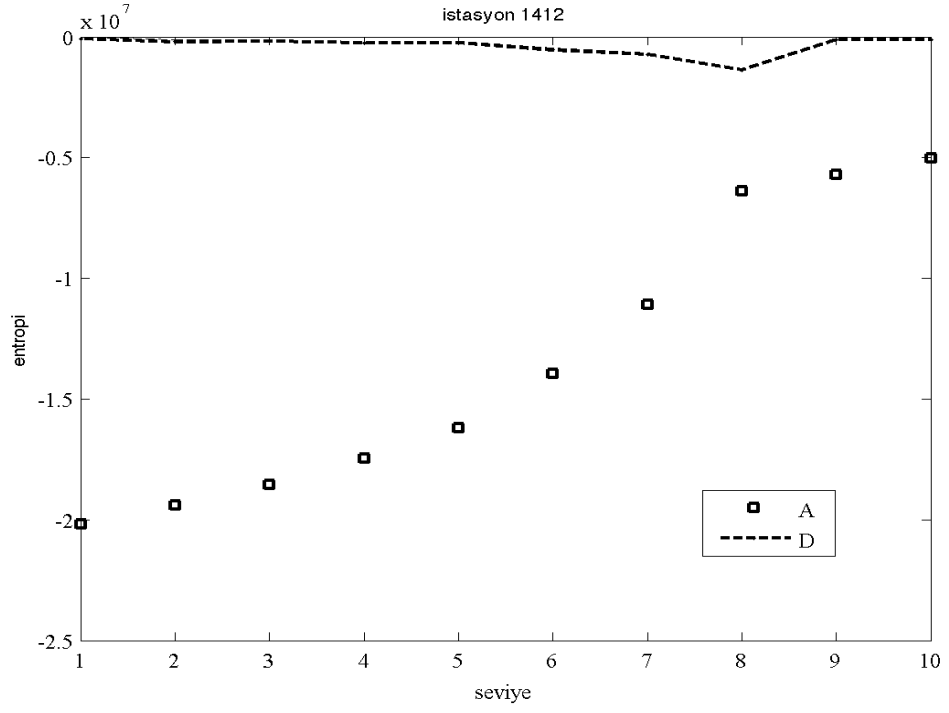
Kullanılan İstasyon Numarası	Veri Uzunluğu (Gün)	Gözlem Yılları	Ortalama Debi Değeri (m <sup>3</sup> /s)	En Yüksek Debi Değeri (m <sup>3</sup> /s)	En Düşük Debi Değeri (m <sup>3</sup> /s)	Standart Sapma
1401	9500	1974-2000	69.95	981	2.89	78.94
1412	9500	1974-2000	6.98	125	0.77	9.181
1414	9500	1974-2000	4.30	75	0.81	5.90
1418	9500	1974-2000	18.75	140	1.02	23.66

### 6.3.1 Dalgacık Analizi

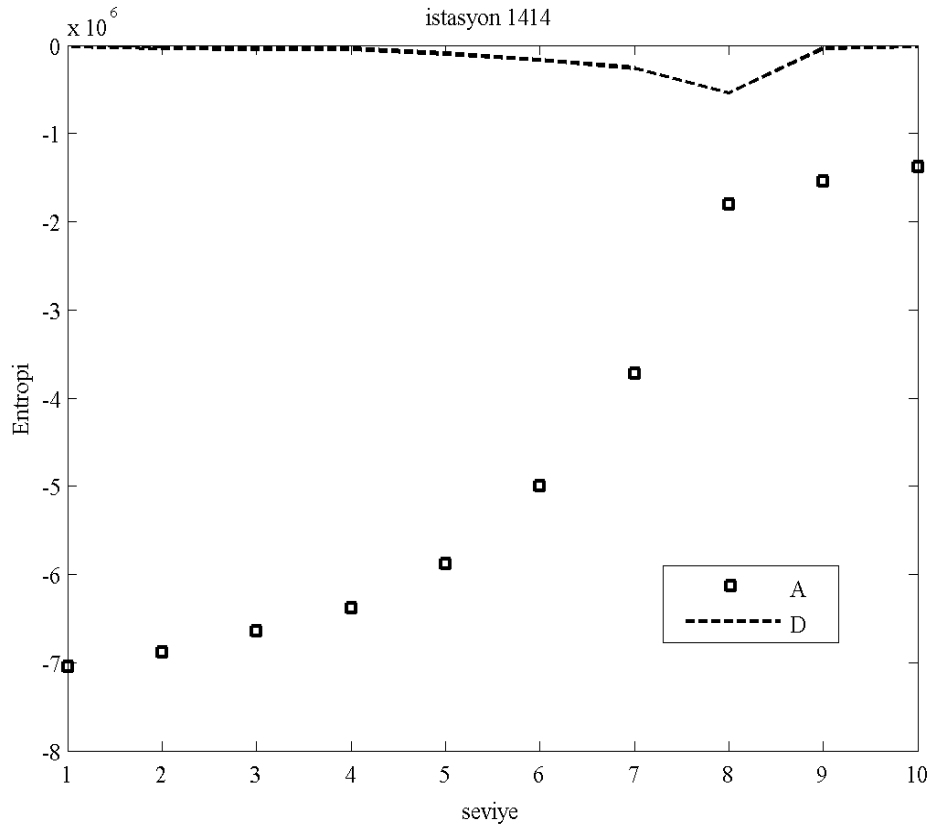
Analizin yapılacağı uygun seviyenin belirlenmesi için en önemli parametre serinin uzunluğudur. Dalgacık Analizinin üstel ayrıştırma (downsampling) yaptığı daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Analiz sonucunda yapılacak ayrıştırma işlemi için 10 seviye seçilmiştir. Şekillerde gözlenmiş seri, yaklaşım parçası (A) ve detay (D) parçaları her bir seviye için ayrı ayrı gösterilmiştir.

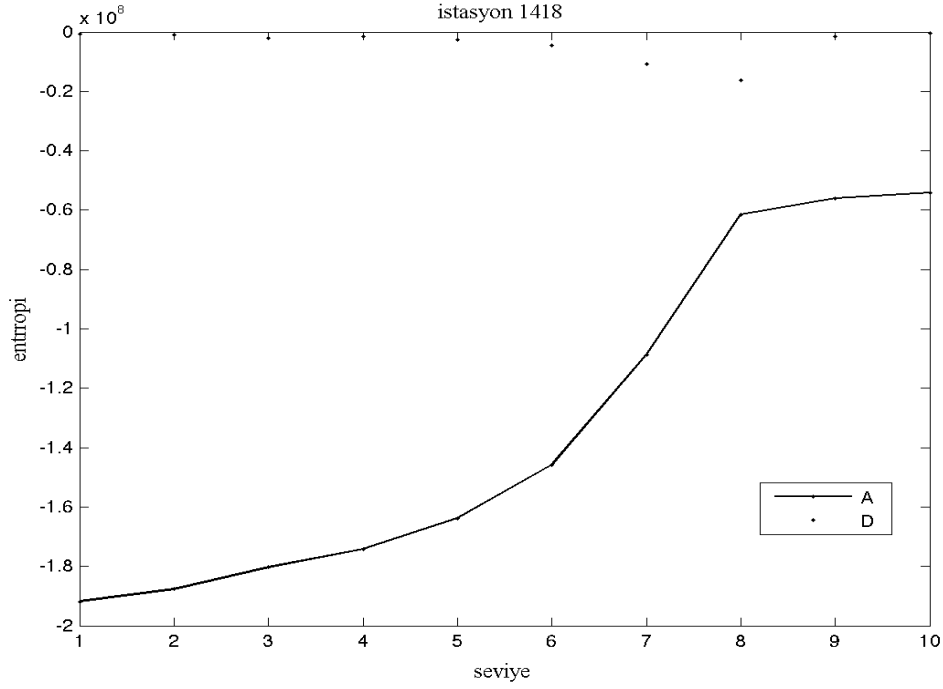






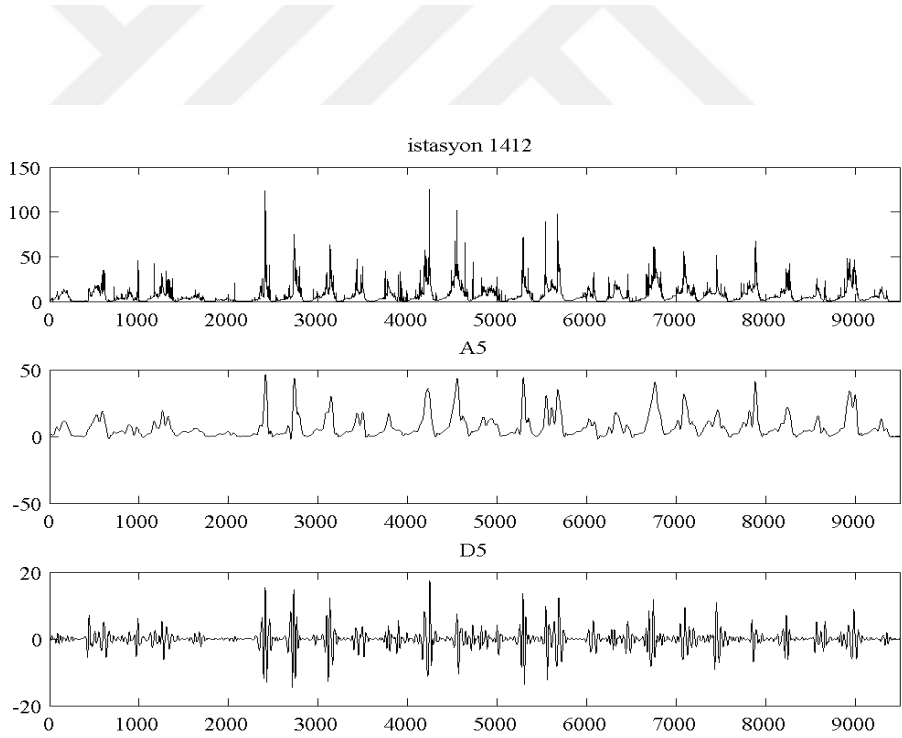
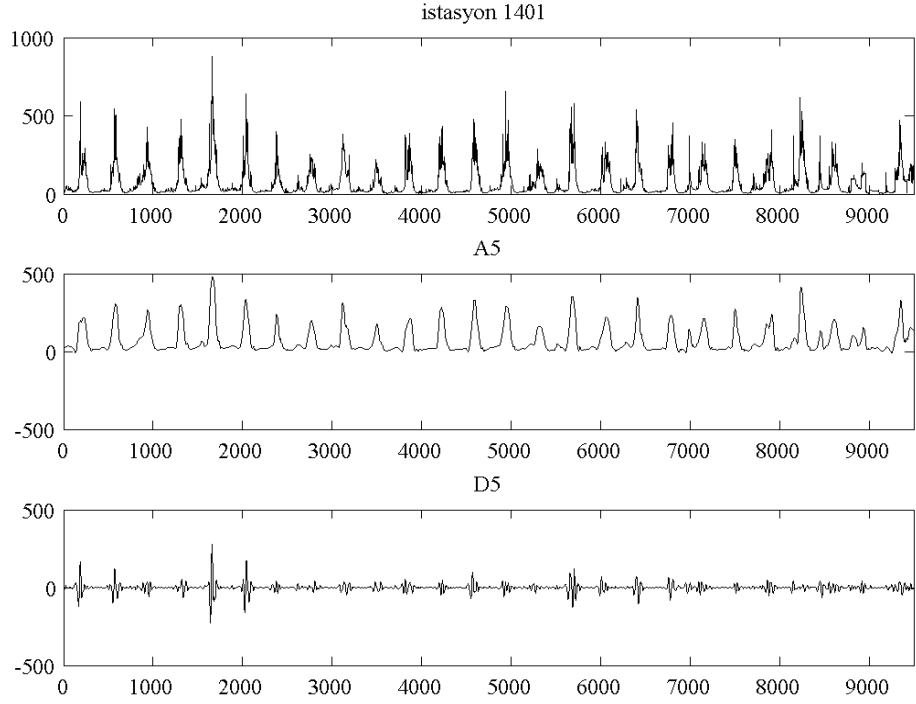
Şekil 6.15 : Yeşilırmak Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri.



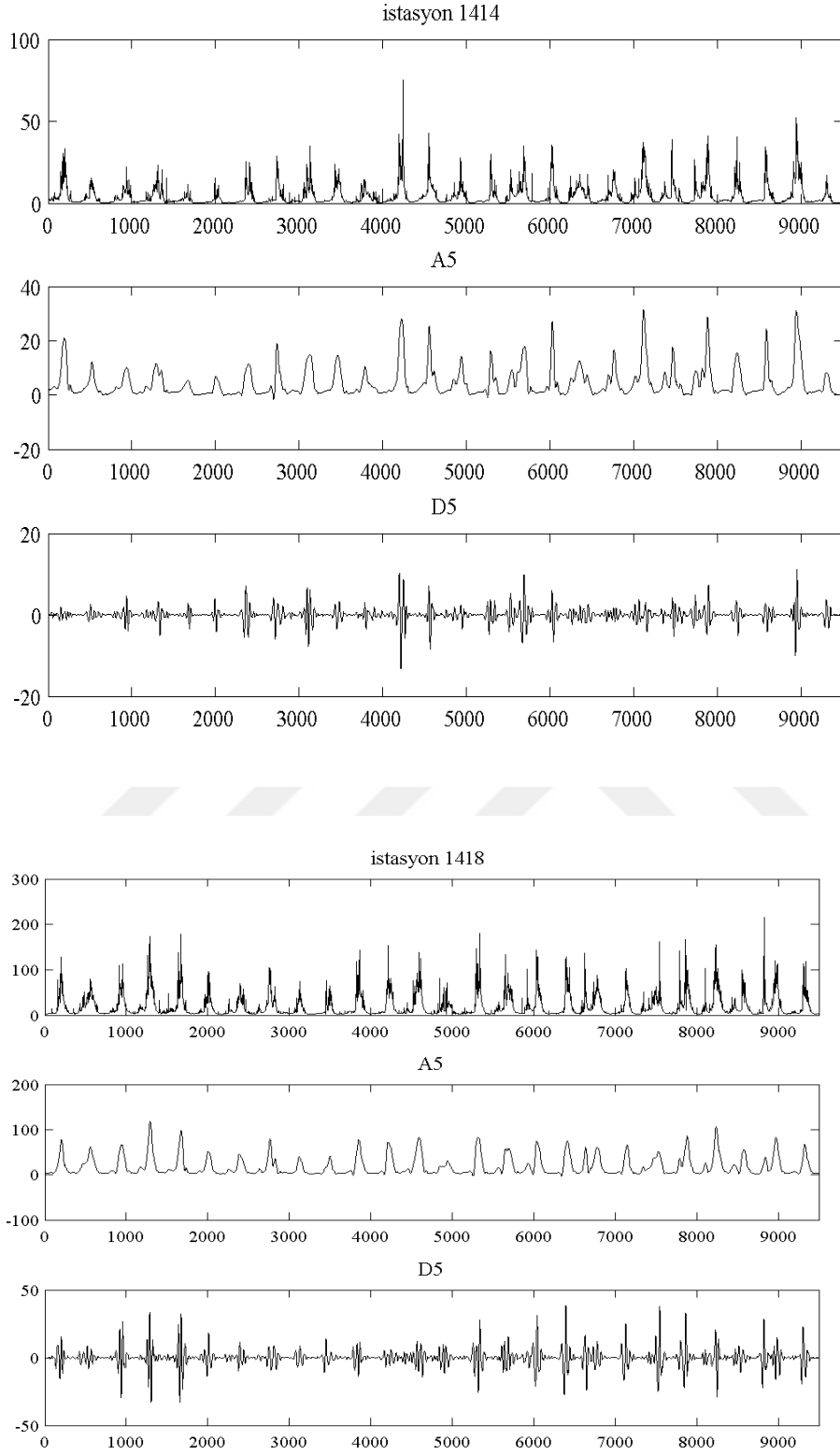


**Şekil 6.15 (devam) :** Yeşilirmak Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri.

Şekil 6.15’de istasyonlara ait entropi grafikleri gözlenebilmektedir. Dalgacık analizi neticesinde hesaplanan entropiler, D parçasının entropisinin 0’dan farklı olduğu nokta olarak seçilmiştir. Entropi grafiklerine göre, istasyonlar için bilgi kaybı olmadan, ayırıştırma işleminin yapılabileceği en uygun seviye 5 olarak seçilmiştir. Ayırıştırma sonucunda elde edilen parçalar Şekil 6.16’de gösterilmiştir.



**Şekil 6.16 :** Yeşilirmak Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü.



**Şekil 6.16 (devam) :** Yeşilirmak Havzası İstasyonları Dalgacık Dönüşümü.

## 6.3.2 Faz Uzayının Yeniden Kurulması

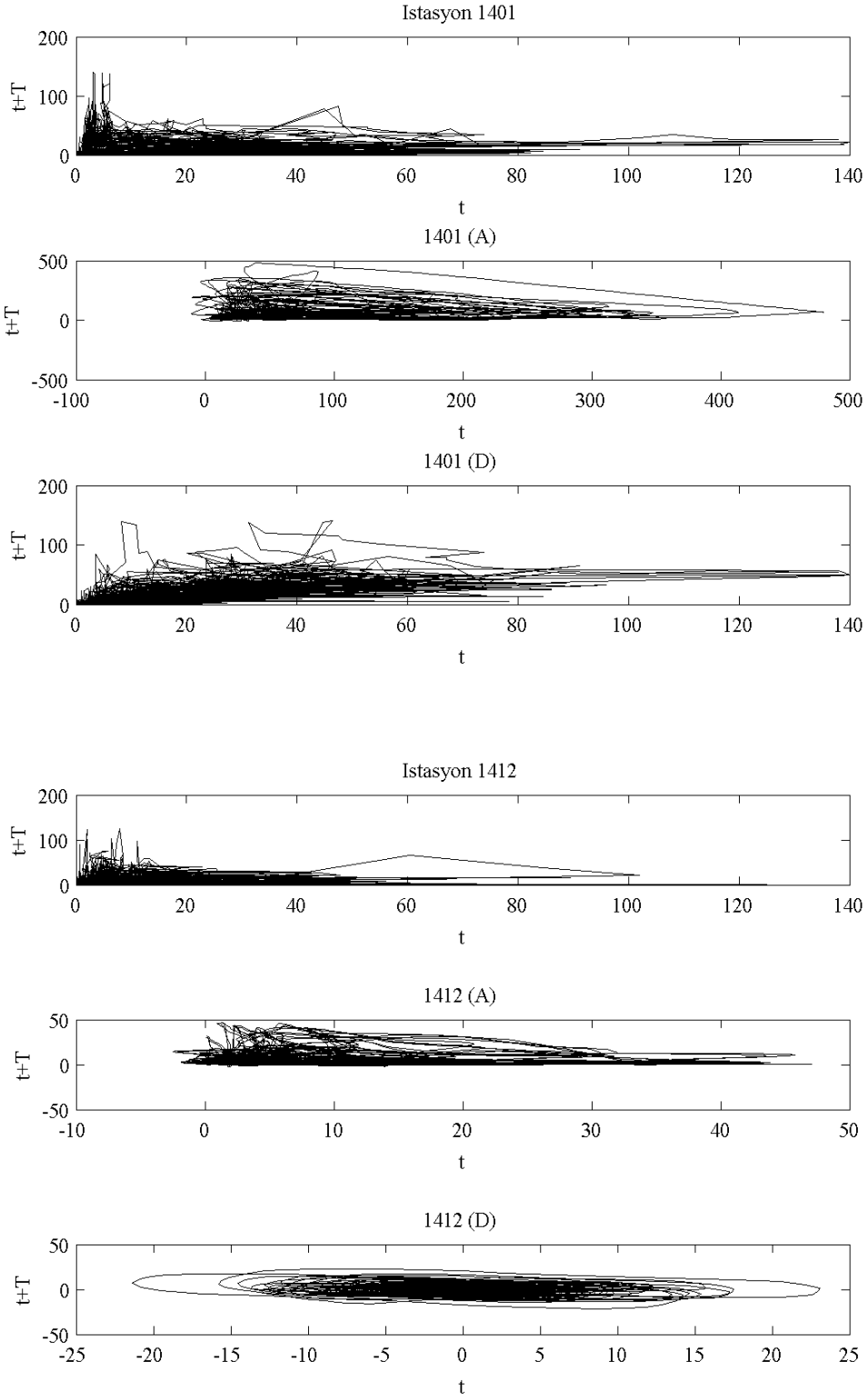
### 6.3.2.1 Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi

TISEAN 3.0.1 (Hegger vd., 1999) paket programından elde edilmiş olan, ortak bilgi fonksiyonundan elde edilen zaman gecikmeleri (T) çıktıları, Çizelge 6.10'da her bir istasyona ait orijinal seri, yaklaşım (A) ve detay (D) bileşeni için gösterilmektedir.

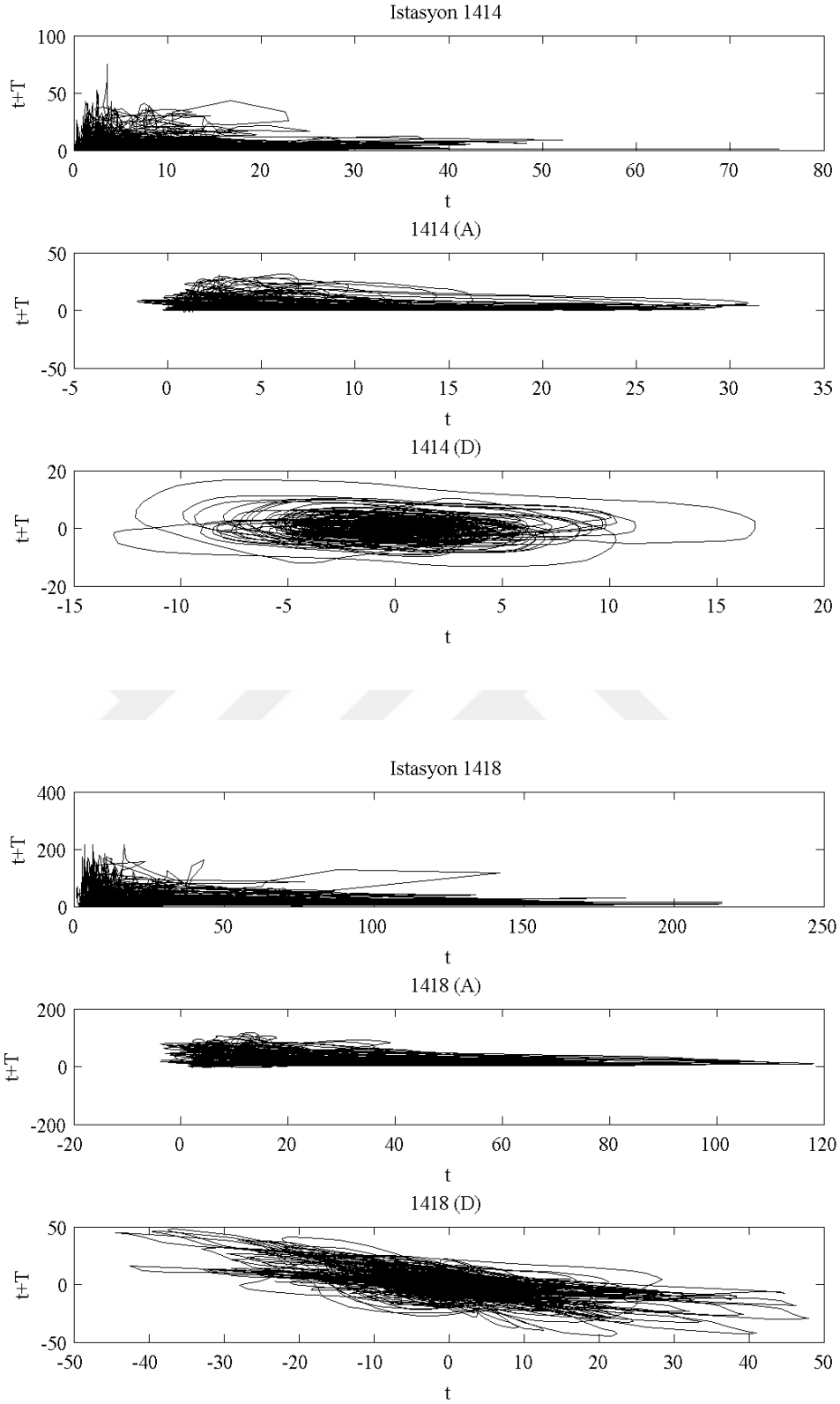
**Çizelge 6.10 :** Yeşil Irmak Havzası İstasyonlarına Ait Zaman Gecikmeleri

Kullanılan İstasyon Numarası	Zaman Gecikmesi (T)
1401	59 gün
1401 (A)	64 gün
1401 (D)	12 gün
1412	95 gün
1412 (A)	102 gün
1412 (D)	12 gün
1414	74 gün
1414 (A)	82 gün
1414 (D)	12 gün
1418	75 gün
1418 (A)	79 gün
1418 (D)	12 gün

Çizelge (6.10) ile oluşan zaman kopyalarının oluşturduğu çekerin 2 boyutlu uzaydaki  $(x(t), x(t+T))$  gösterimi, gözlenmiş seri, yaklaşım bileşeni (A) Şekil 6.17'de gözlenebilmektedir. Faz uzayında oluşan çekerlerin 3 boyutlu gösterimi ise,  $(x(t), x(t+T), x(t+2T))$  ise, Ek D'de gözlenebilmektedir. Zaman gecikmeleri (T), göz önünde bulundurularak elde edilen çekerlerin, orijinal seriye kıyasla, yaklaşım parçasında daha yumuşak ve belirgin davranış sergilediği gözlenebilmektedir. Detay (D) bileşeni ise, faz uzayında tanımlı rastgele davranışa benzer bir hareket göstermektedir. Faz uzayında oluşan bu çekerler, dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçasının kaotik davranışını daha belirgin ortaya koyduğunun bir göstergesidir.



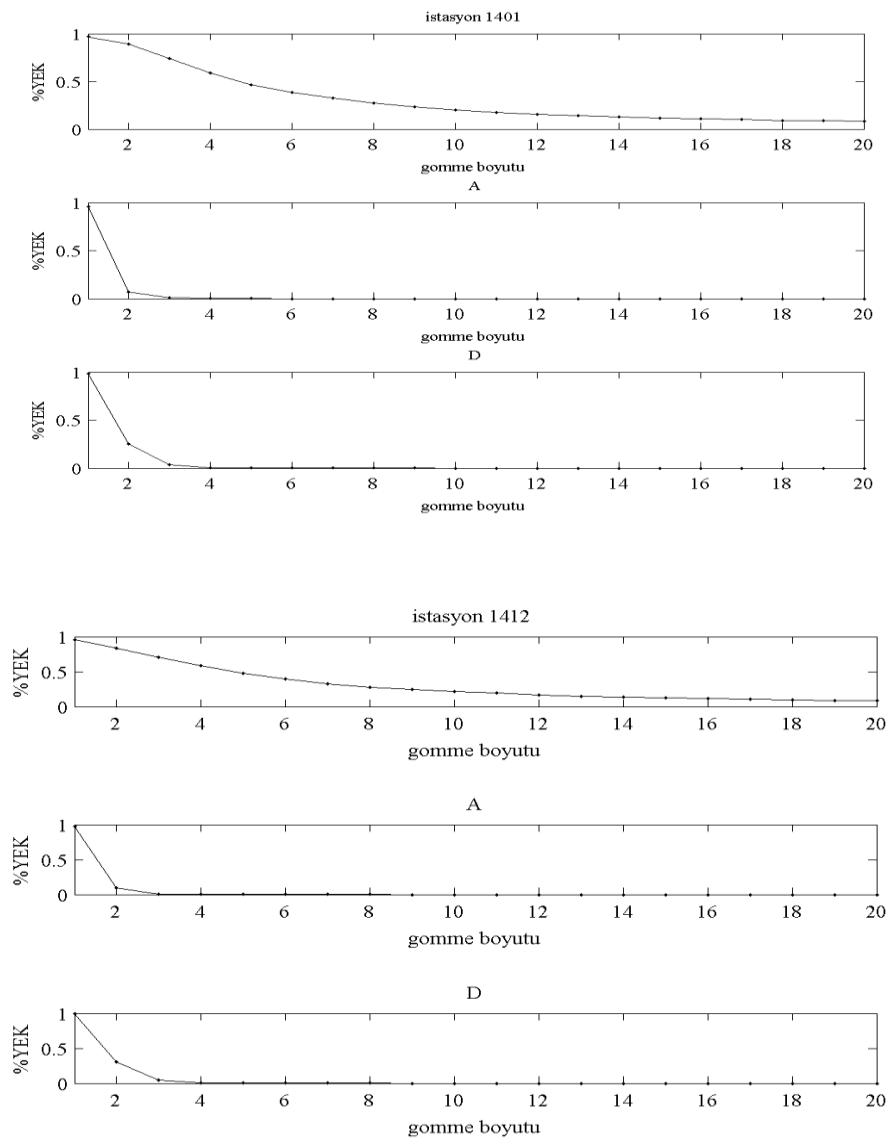
**Şekil 6.17 :** Yeşil Irmak Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çekerler.



**Şekil 6.17(devam) :** Yeşil Irmak Havzası Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çekerler.

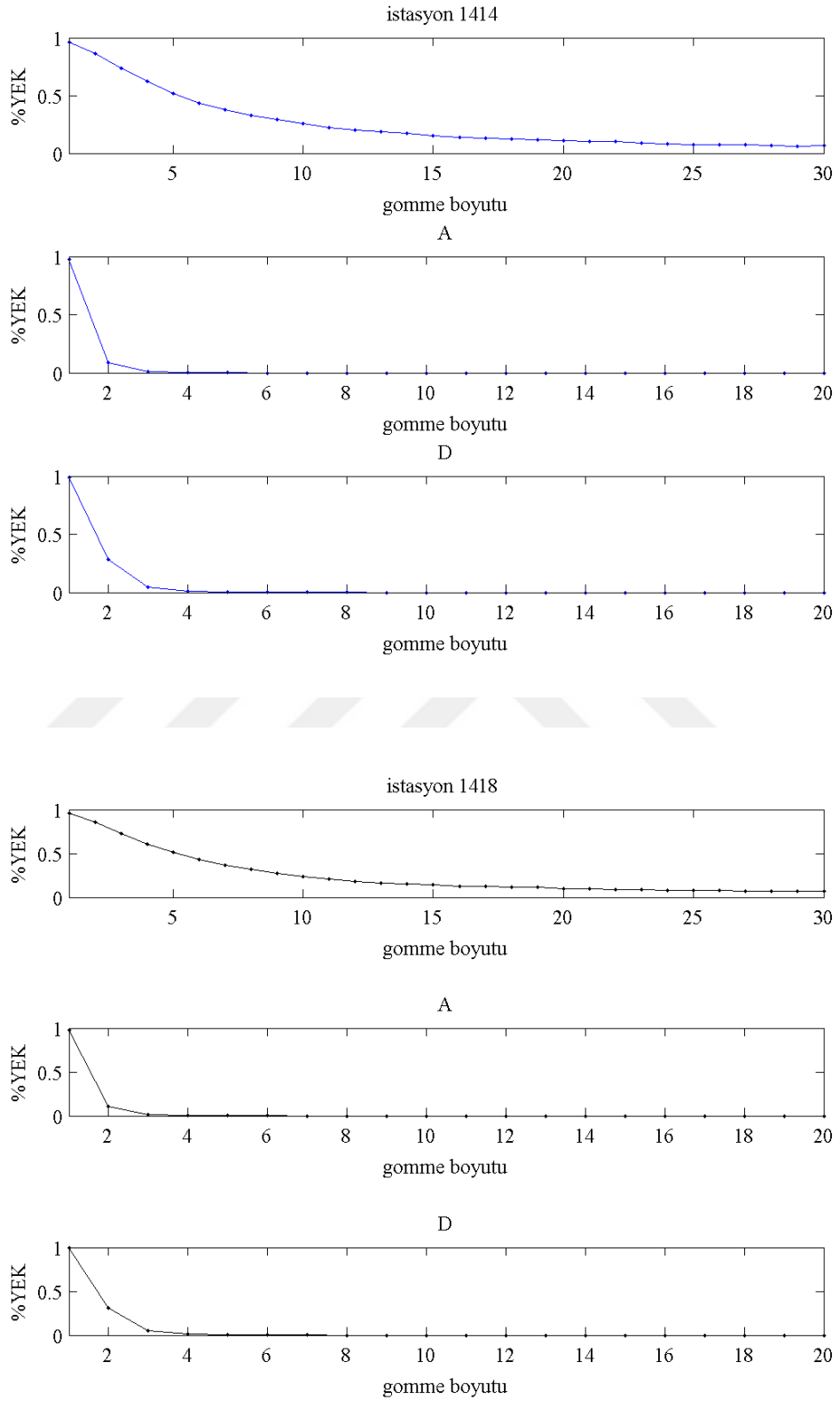
### 6.3.2.2 Gömme Boyutunun Belirlenmesi

Gömme boyutunun belirlenmesi için, literatürde en sık rastlanan yöntem, yanlış en yakın komşular yöntemidir (YEK). Verilen seri üzerinde seçilen iki noktadan,  $R_i$  mesafesinin (Eşitlik (3.24)) belirli eşik değerden büyük olduğu noktaların sıfıra ulaştığı nokta, uygun gömme boyutu olarak belirlenir. İstasyonlardan elde edilen YEK yüzdelerine karşılık gelen gömme boyutu grafikleri, orijinal seri, A ve D parçaları için Şekil 6.18’de gösterilmektedir.



Şekil 6.18 : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait YEK Grafikleri.





Şekil 6.18 (devam) : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait YEK Grafikleri.

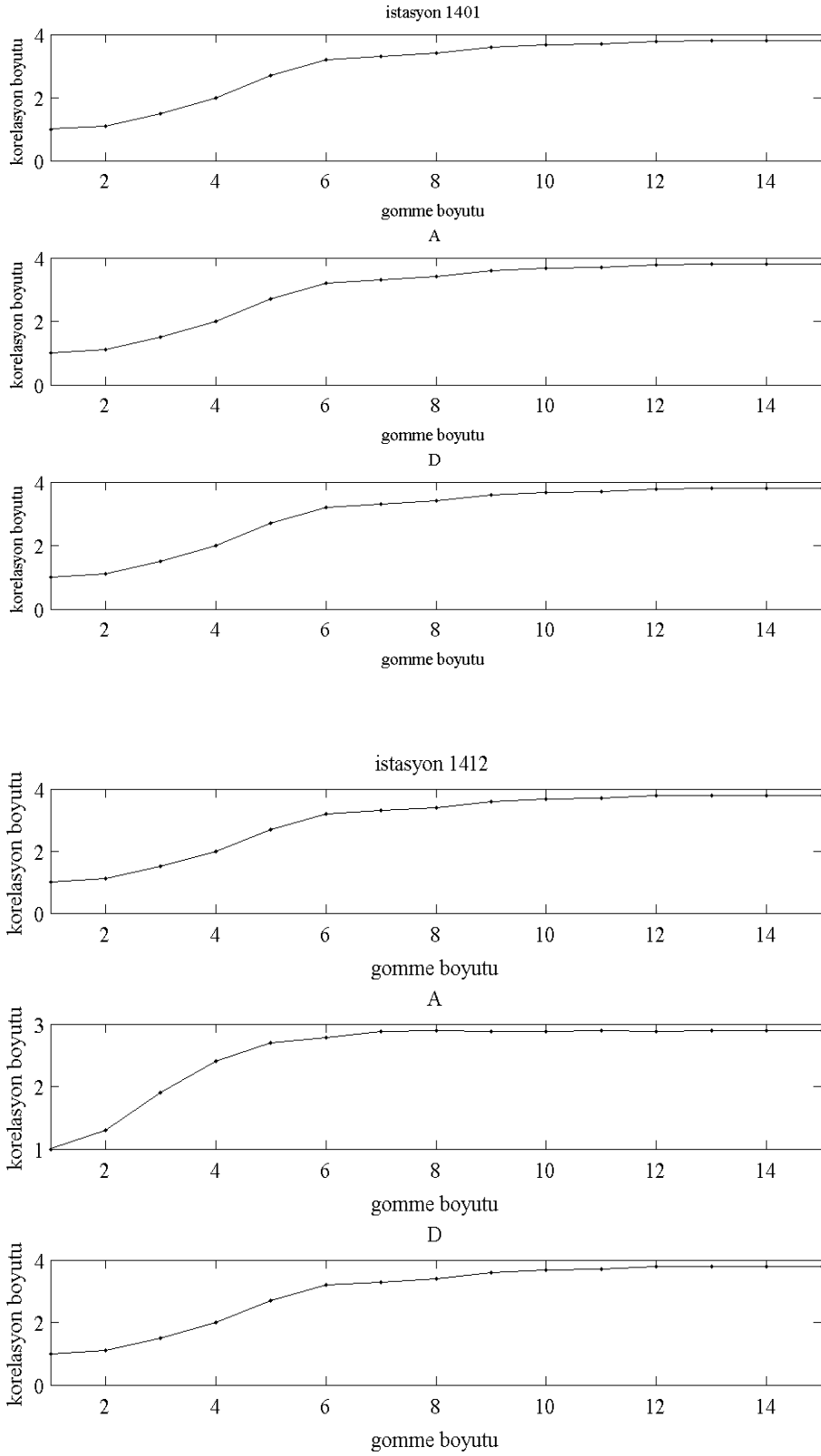
Çizelge 6.11’de açıkça görüleceği üzere, gürültü bileşenin seri içinde varoluşu, gömme çeker boyutunun artışına sebep olmaktadır.

**Çizelge 6.11 : Yeşil Irmak İstasyonlarına Ait Gömme Boyutları**

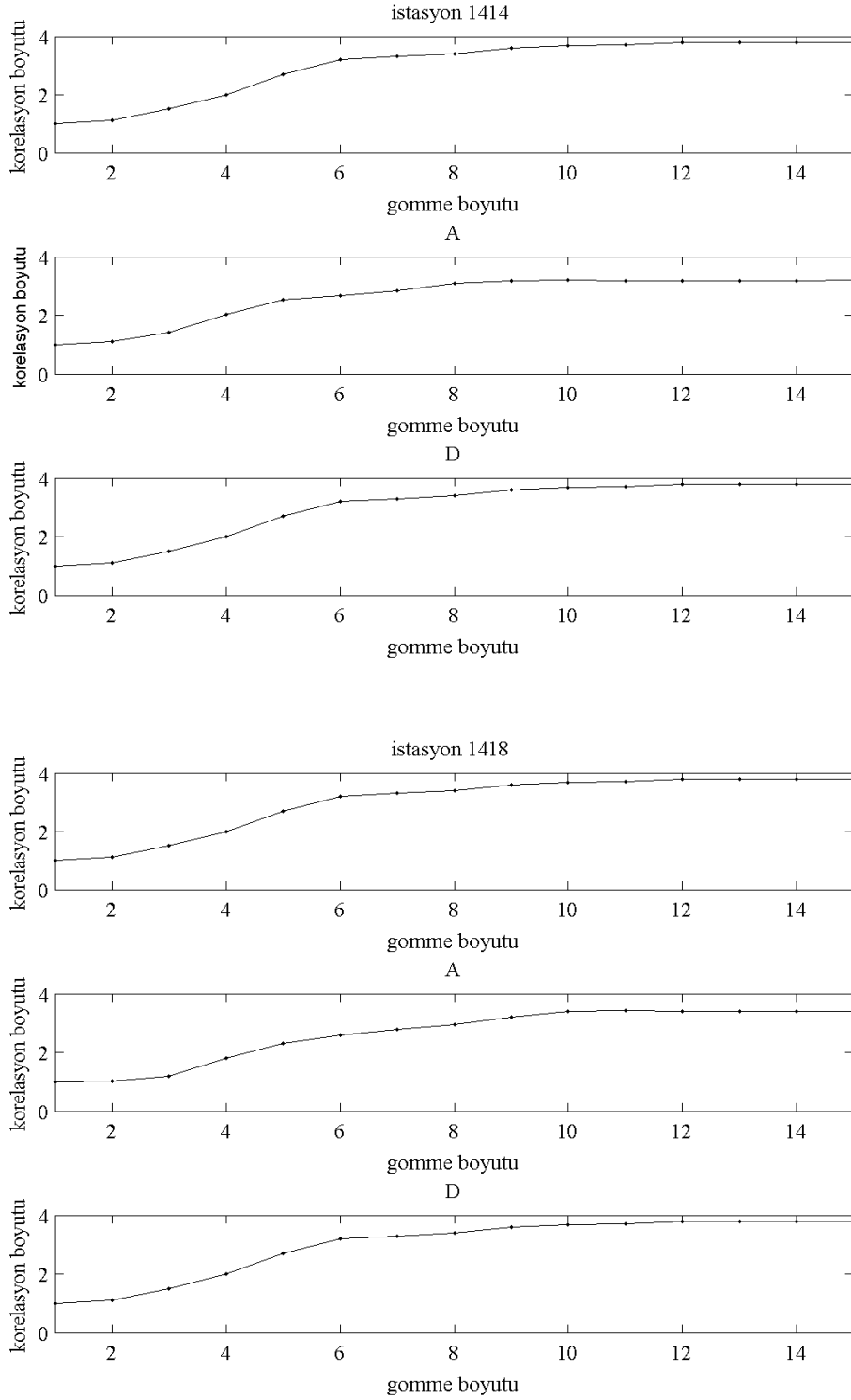
Kullanılan İstasyon Numarası	Gömme Boyutu (m)
1401	12
1401 (A)	3
1401 (D)	4
1412	12
1412 (A)	3
1412 (D)	4
1414	15
1414 (A)	3
1414 (D)	4
1418	15
1418 (A)	3
1418 (D)	4

### 6.3.3 Çeker Boyutunun Belirlenmesi

Elde edilen bu sistem (çeker) boyutu eğer fraktal ise bu serinin kaotik davranış gösterdiğinin bir kanıtıdır. Eğer bu eğimler, belirli gömme boyutlarına karşı çizilirse, fraktal boyutta tekrar bir doyum gözlenir, bu durum belirli gömme boyutundan sonra, çekerin boyutunun değişmediğinin bir göstergesidir. Doyum noktasına ulaşılan boyut, çekerin rahat gözlenebilmesi için uygun gömme boyutudur. Bunun aksine, seri kaotik bir davranış göstermiyorsa bu doyum noktası gözlenemez ve boyut bir doyum noktasına erişmeden sürekli artar. Çizelge 6.12 ‘de açıkça görüleceği üzere, gürültü bileşenin seri içinde varoluşu, çeker boyutunun artışına sebep olmaktadır. Gürültüden ayrılmış parçanın oluşturduğu çeker, gözlenmiş seriye göre çok daha küçük boyuttadır. Gürültü olduğu düşünülerek ayrılmış kısmın (D), serinin gerçek deterministik karakterini gizlediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.19 : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Gömme Boyutları.



**Şekil 6.19 (devam) :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Gömme Boyutları.

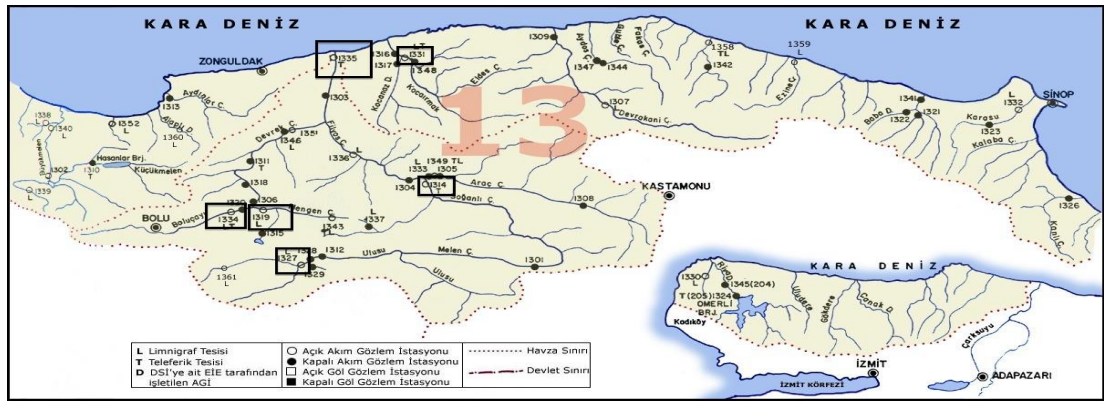
Korelasyon Boyutu hesabından elde edilen gömme boyutuna karşı çizilen grafikler Şekil 6.19’da gösterilmektedir.

**Çizelge 6.12 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonları Çeker Boyutları**

Kullanılan İstasyon Numarası	Çeker Boyutu	Gömme Boyutu (m)
1401	3.78	10
1401 (A)	2.68	10
1401 (D)	-	-
1412	3.12	10
1412 (A)	2.92	6
1412 (D)	-	-
1414	3.88	10
1414 (A)	2.67	8
1414 (D)	-	-
1418	3.81	10
1418 (A)	2.93	10
1418 (D)	-	-

#### 6.4 Batı Karadeniz Havzası

Batı Karadeniz Bölgesi'nin en önemli iki ana akarsuyu Filyos ve Bartın havzalarıdır. Bu havzaların içinde akan ırmaklardan Bartın ve Filyos Çayları karmaşık örgüye sahip kollar tarafından beslenmektedir. Yan akarsu ağları, yağış sularını hemen hemen aynı zamanda boşaltabilen bir drenaja sahiptir. DSİ 13 numaralı havza olan, Batı Karadeniz Havzasında yer alan, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait 6 istasyona ait günlük akım verileri kullanılmıştır (Şekil 6.20).



**Şekil 6.20 : Batı Karadeniz Havzası Akım Gözlem İstasyonları.**

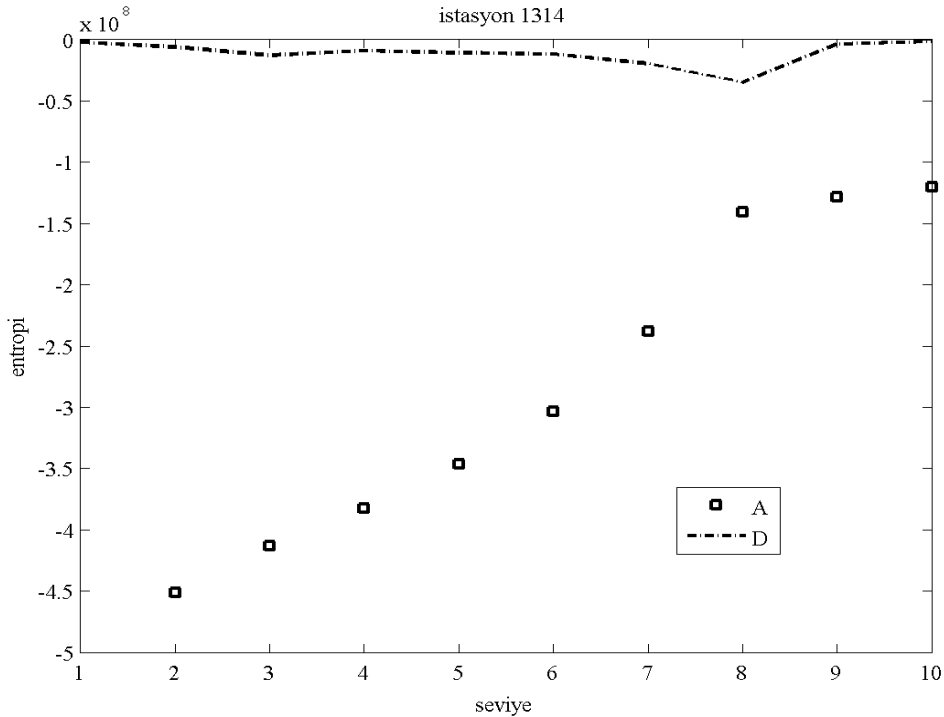
İstasyon verilerine ait istatistik özellikler Çizelge 6.13'de gösterilemektedir.

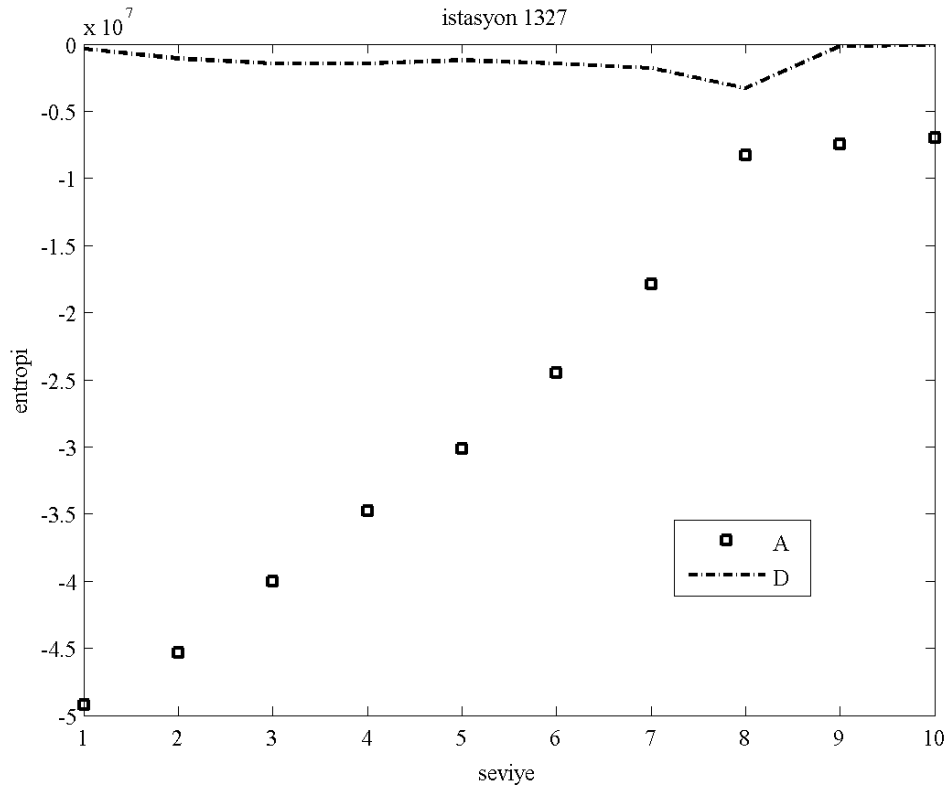
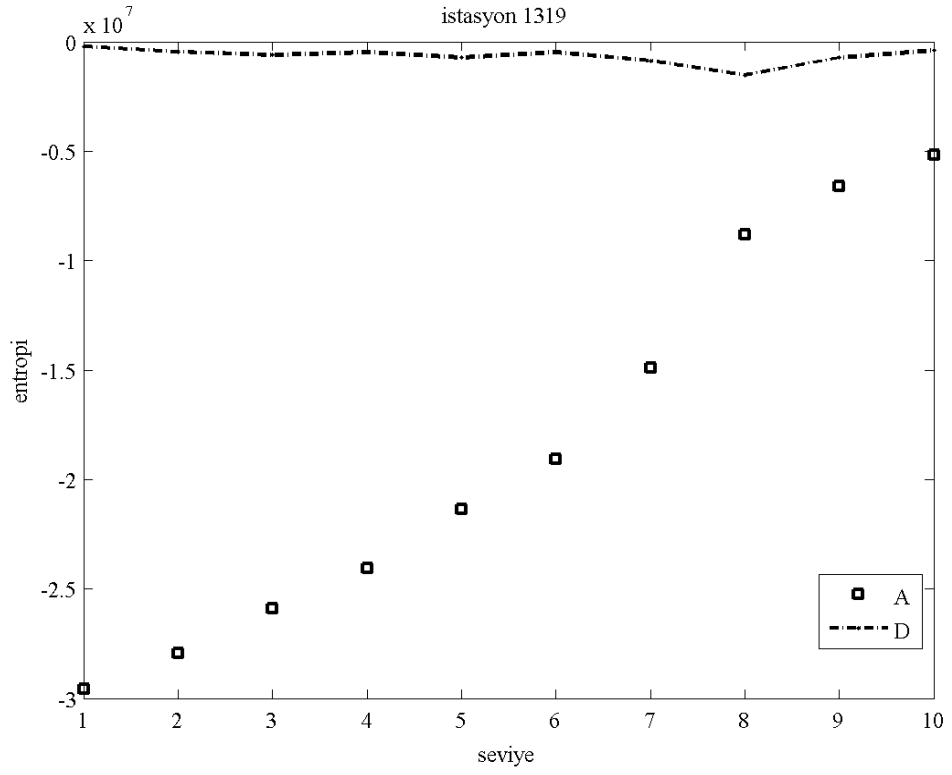
**Çizelge 6.13 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait İstatistik Veriler**

Kullanılan İstasyon Numarası	Veri Uzunluğu (Gün)	Gözlem Yılları	Ortalama Değeri (m <sup>3</sup> /s)	En Yüksek Değeri (m <sup>3</sup> /s)	En Düşük Değeri (m <sup>3</sup> /s)	Standart Sapma
1314	22000	1942-2002	26.43	595	0.92	35.90
1319	22000	1942-2002	6.55	289	0.57	10.50
1327	22000	1942-	8.10	193	1.16	14.30
1331	22000	2002	6.74	214	3.21	13.32
		1942-				
1334	22000	2002	7.91	98.5	0.85	7.70
1335	22000	1942-	1.00	2204	0.10	110.00
		2002				

#### 6.4.1 Dalgacık Analizi

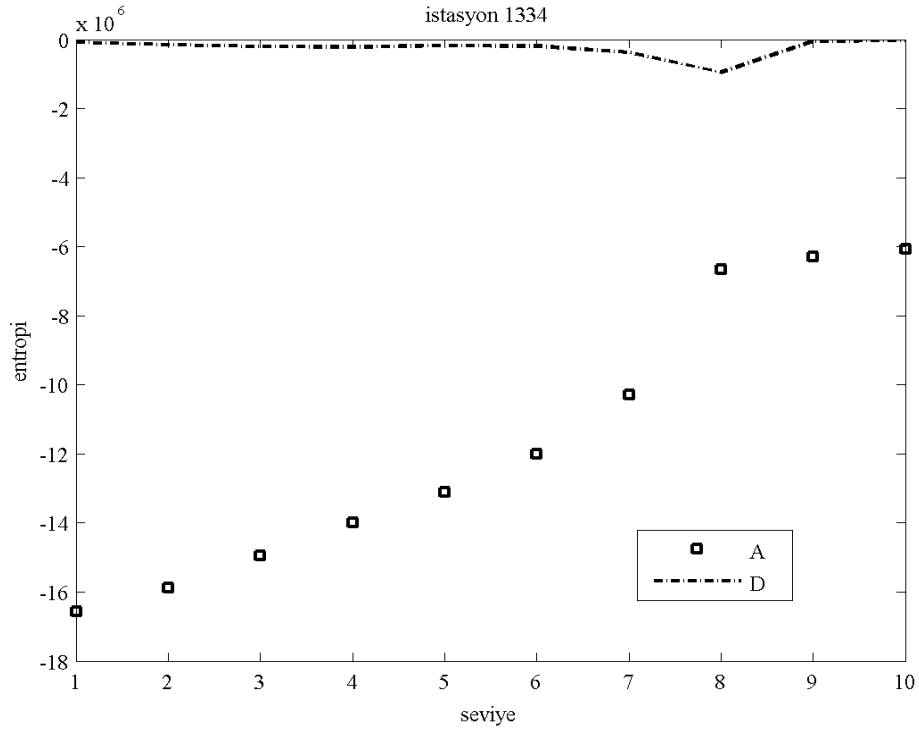
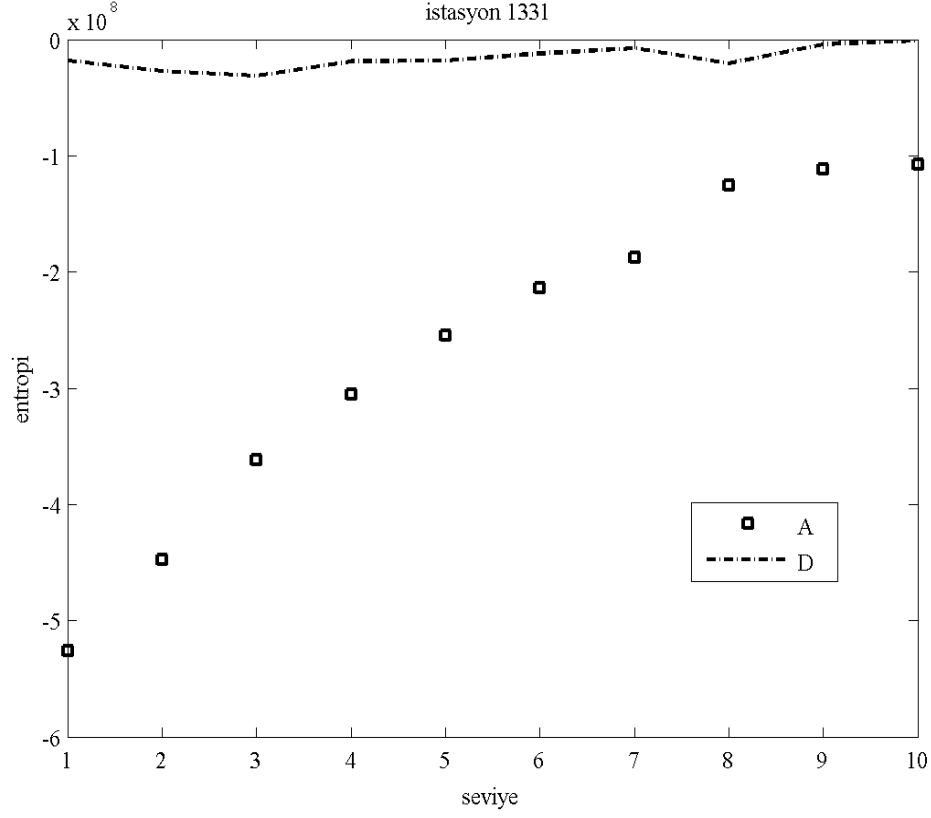
Analizin yapılacağı uygun seviyenin belirlenmesi için en önemli parametre serinin uzunluğudur. Dalgacık Analizinin üstel ayrıştırma (downsampling) yaptığı daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Analiz sonucunda yapılacak ayrıştırma işlemi için 10 seviye seçilmiştir. Şekillerde gözlenmiş seri, yaklaşım parçası (A) ve detay (D) parçaları her bir seviye için ayrı ayrı gösterilmiştir.



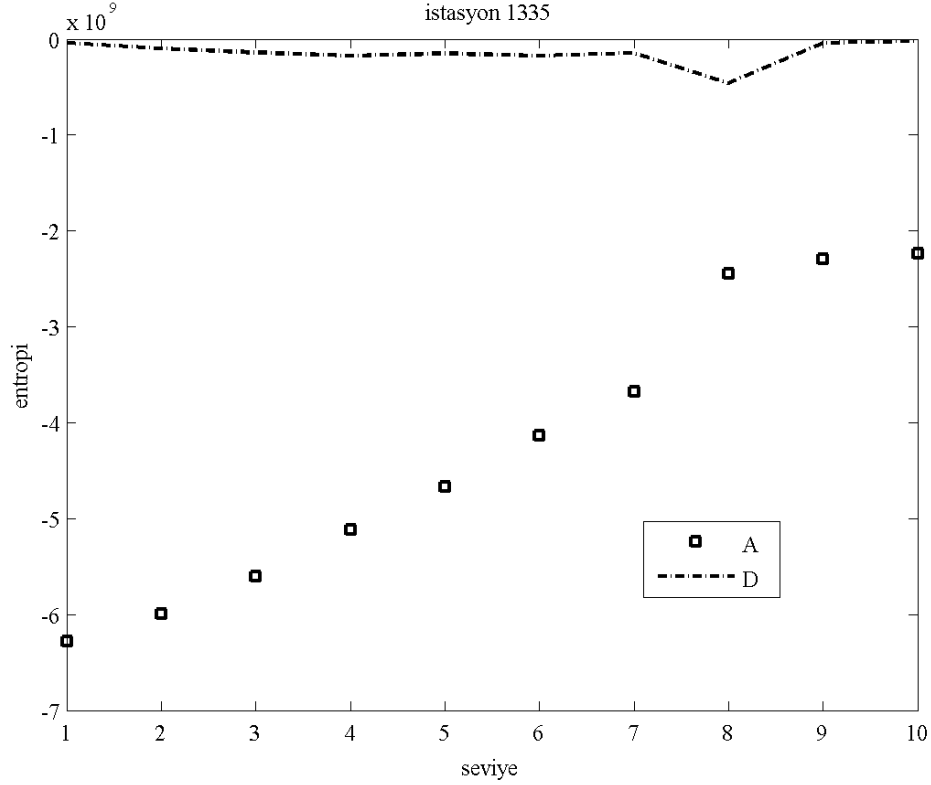


**Şekil 6.21a :** Uygulamada Kullanılan Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri İstasyon (1314, 1319,1327).

Entropinin bilginin bir ölçütü olduğu tekrar göz önünde bulundurulacak olursa, Dalgacık Analizi neticesinde ayrılacak olan D parçasının entropisinin 0'dan farklı olduğu nokta olarak seçilmiştir (Şekil 6.21a, 6.21b).

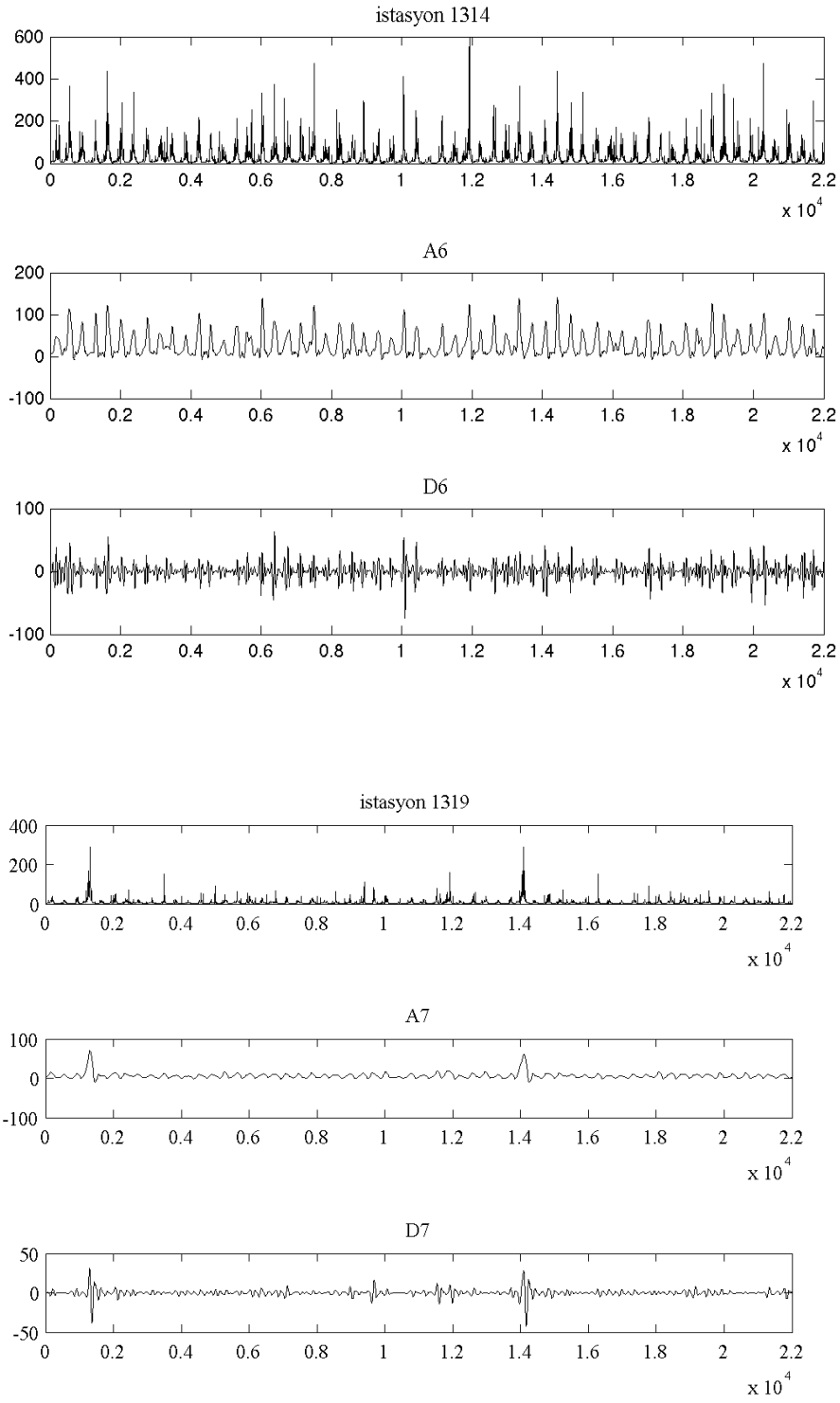




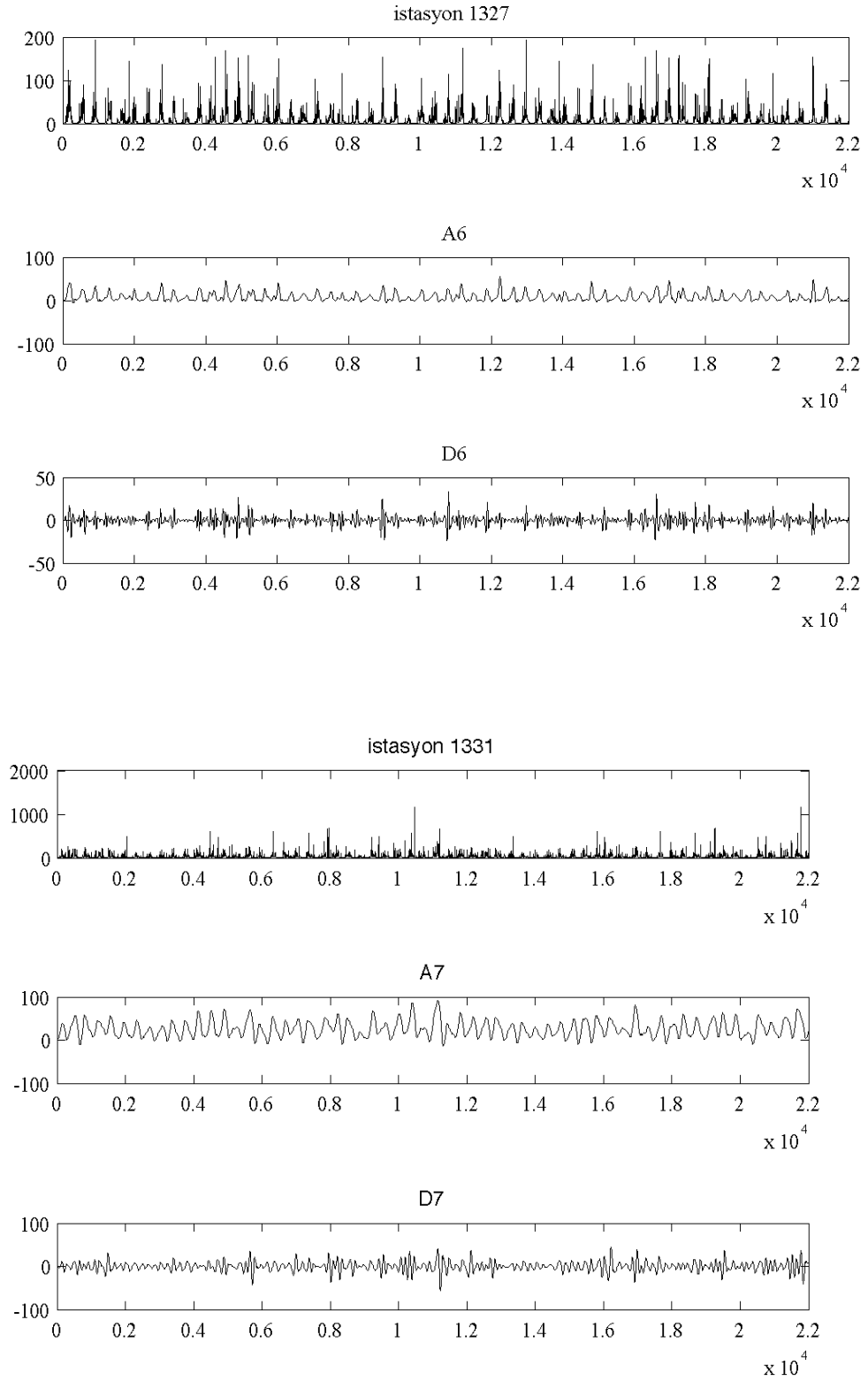


**Şekil 6.21b :** Uygulamada Kullanılan Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Entropi Grafikleri İstasyon (1331,1334,1335).

Dalgacık analizinin üstel ayrıştırma (downsampling) yaptığı daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu üstel ayrıştırmayı en uygun yapmak için,  $2^n$ ,  $n$ 'in serinin uzunluğuna uygun seçilmesi gerekmektedir. Analiz sonucunda yapılacak ayrıştırma işlemi için 10 seviye seçilmiştir. Şekil 6.21'de istasyonlara ait entropi grafikleri gözlenebilmektedir. Dalgacık analizi neticesinde hesaplanan entropiler, D parçasının entropisinin 0'dan farklı olduğu nokta olarak seçilmiştir. Entropi grafiklerine göre, istasyonlar için bilgi kaybı olmadan, ayrıştırma işleminin yapılabileceği en uygun seviyeler seçilmiştir. Ayrıştırma sonucunda elde edilen parçalar Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, kullanılacak diğer kaotik analiz yöntemleri neticesinde, A parçasının kaotik karakteri ne kadar temsil ettiği tekrar inceleme altına alınacaktır.

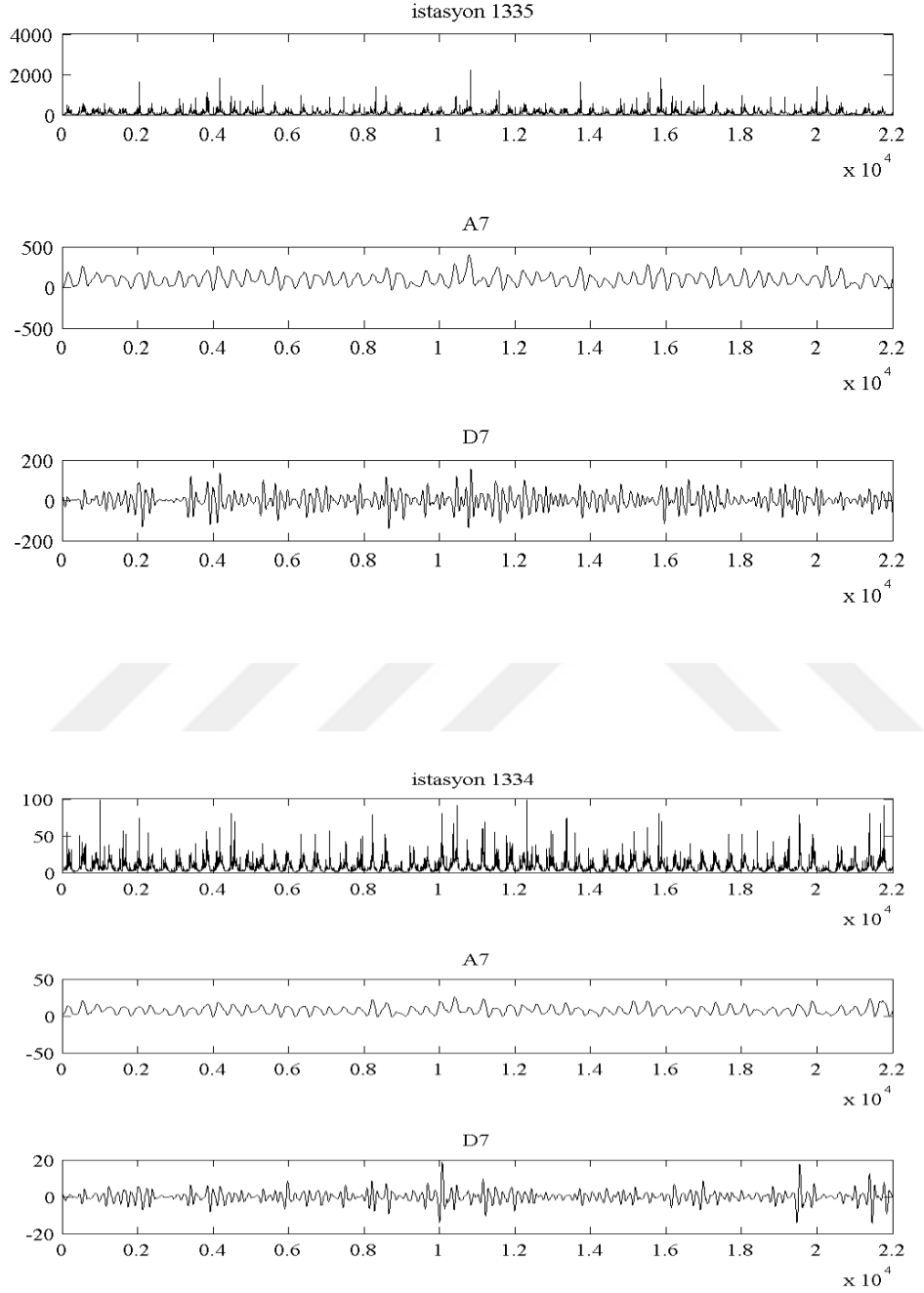


**Şekil 6.22a : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları İstasyon (1314,1319,1327,1331).**



**Şekil 6.22a (devam) :** Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları İstasyon (1314,1319,1327,1331).

Entropi hesaplamaları ile elde edilen uygun seviye ile yapılan Dalgacık Analiz'i ile elde edilen A ve D parçaları, çalışmanın ileri bölümlerinde Kaotik Analiz kapsamında teker teker ele alınacaktır.



**Şekil 6.22b** : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi Sonuçları İstasyon (1334,1335).

## 6.4.2 Faz Uzayının Yeniden Kurulması

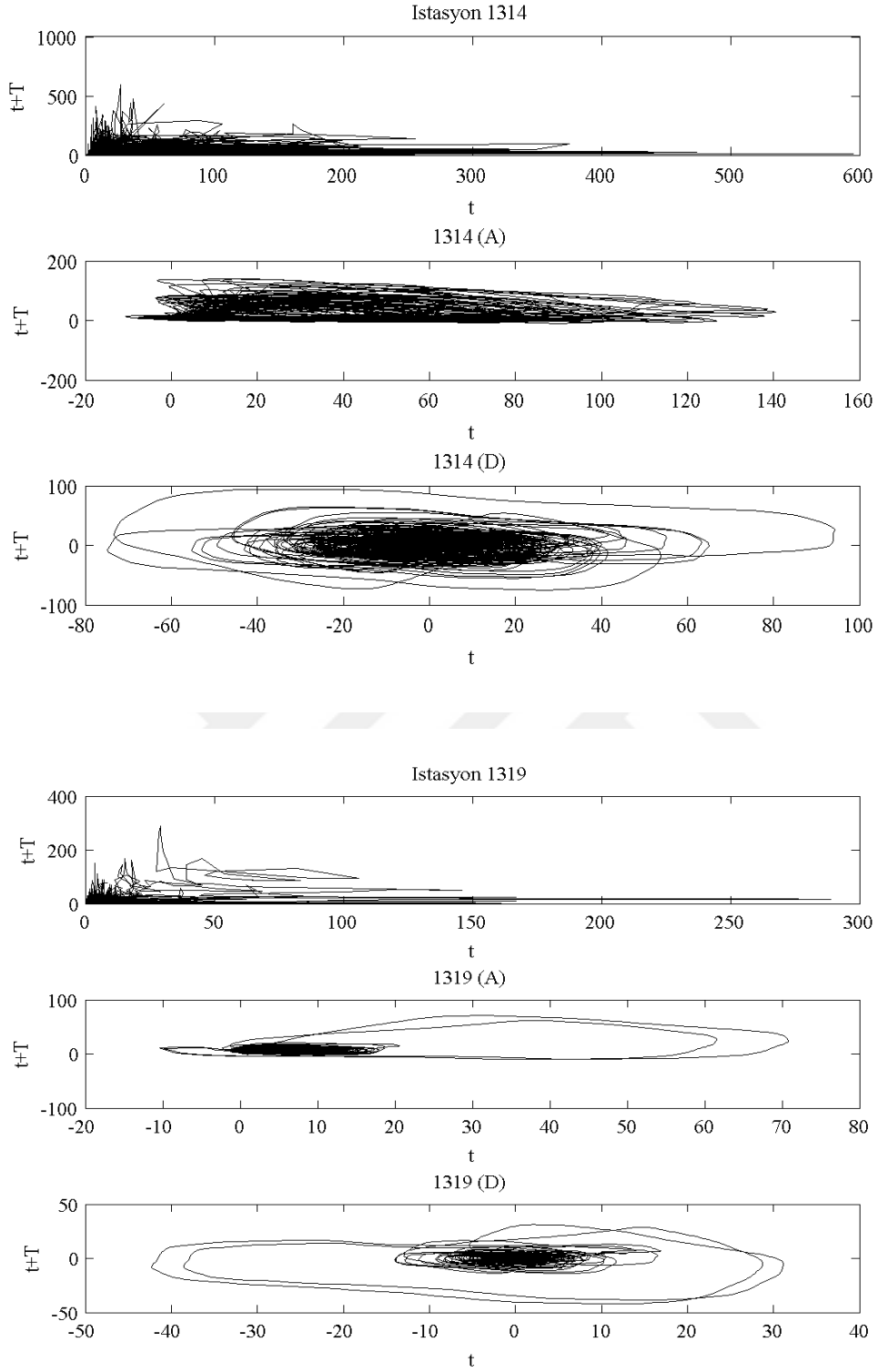
### 6.4.2.1 Zaman Gecikmesinin Belirlenmesi

TISEAN 3.0.1 (Hegger vd., 1999) paket programından elde edilmiş olan, ortak bilgi fonksiyonun'dan elde edilen zaman gecikmeleri (T) çıktıları, Çizelge 6.14'de her bir istasyona ait orijinal seri, yaklaşım (A) ve detay (D) bileşeni için için gösterilmektedir. Çizelge (6.14) ile oluşan zaman kopyalarının oluşturduğu çekerin 2 boyutlu uzaydaki ( $x(t)$ ,  $x(t+T)$ ) gösterimi, gözlenmiş seri, yaklaşım bileşeni (A) için Şekil 6.23'de görülmektedir.

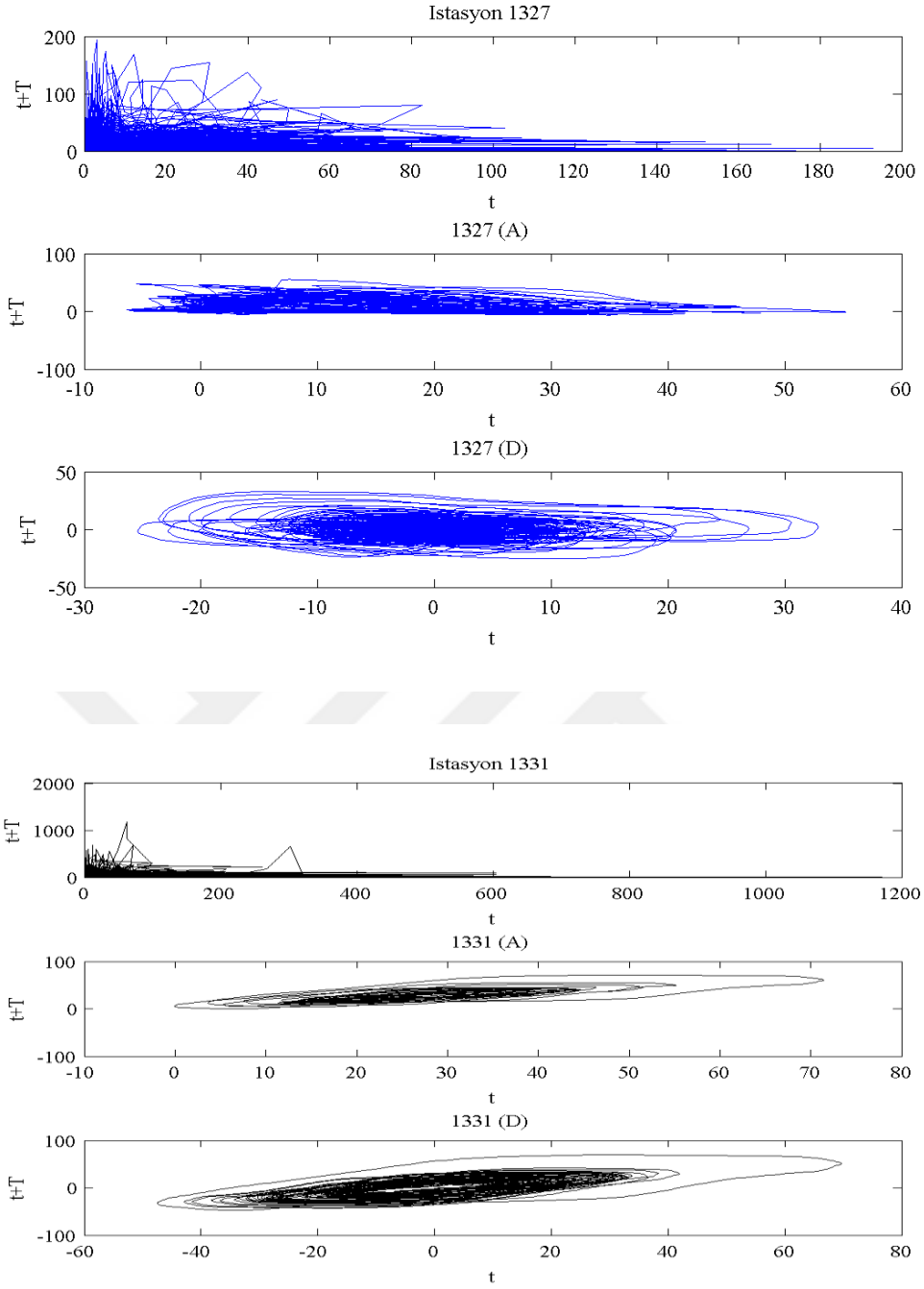
**Çizelge 6.14 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait Zaman Gecikmeleri**

Kullanılan İstasyon Numarası	Zaman Gecikmesi (T)
1314	60 gün
1314 (A)	68 gün
1314 (D)	23 gün
1319	64 gün
1319 (A)	82 gün
1319 (D)	44 gün
1327	59 gün
1327 (A)	72 gün
1327 (D)	24 gün
1331	62 gün
1331 (A)	81 gün
1331 (D)	41 gün
1334	78 gün
1334 (A)	91 gün
1334 (D)	44 gün
1335	62 gün
1335 (A)	88 gün
1335 (D)	42 gün

Detay (D) bileşeni ise, faz uzayında tanımlı rastgele davranışa benzer bir hareket göstermektedir. Faz uzayında oluşan bu çekerler, dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçanın kaotik davranışını daha belirgin ortaya koyduğunun bir göstergesidir. Faz uzayında oluşan çekerin, 3 boyutlu ( $(x)$ ,  $(x+T)$ ,  $(x+2T)$ ) ise Ek D'de gözlenebilmektedir.

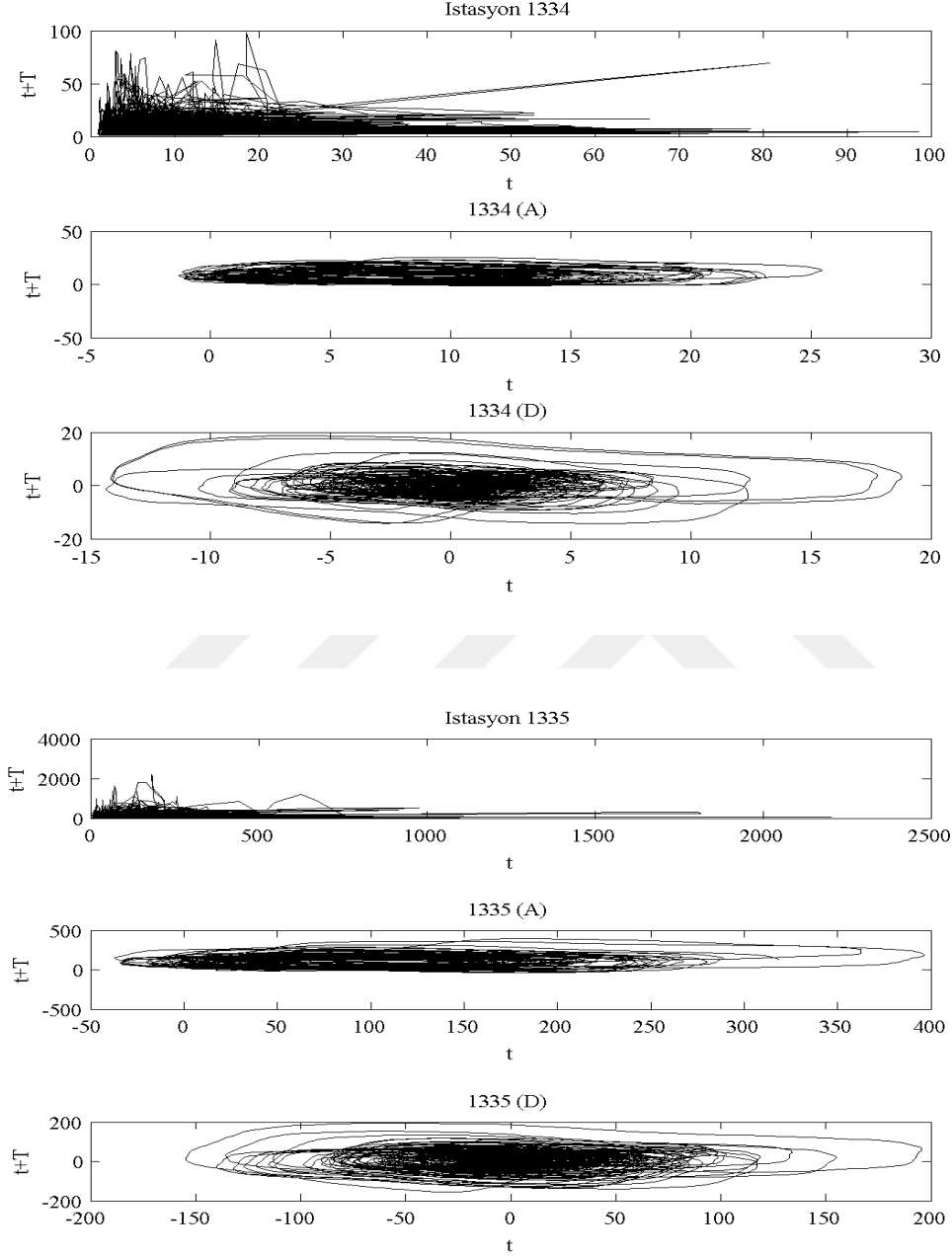


**Şekil 6.23a :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çekerler İstasyon (1314,1319,1327,1331).



**Şekil 6.23a (devam) :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çekerler İstasyon (1314,1319,1327,1331).

Çizelge 6.23’de zaman gecikmeleri (T), göz önünde bulundurularak elde edilen çekerlerin, orijinal seriye kıyasla, yaklaşım parçasında daha yumuşak ve belirgin davranış sergilediği görülmektedir.

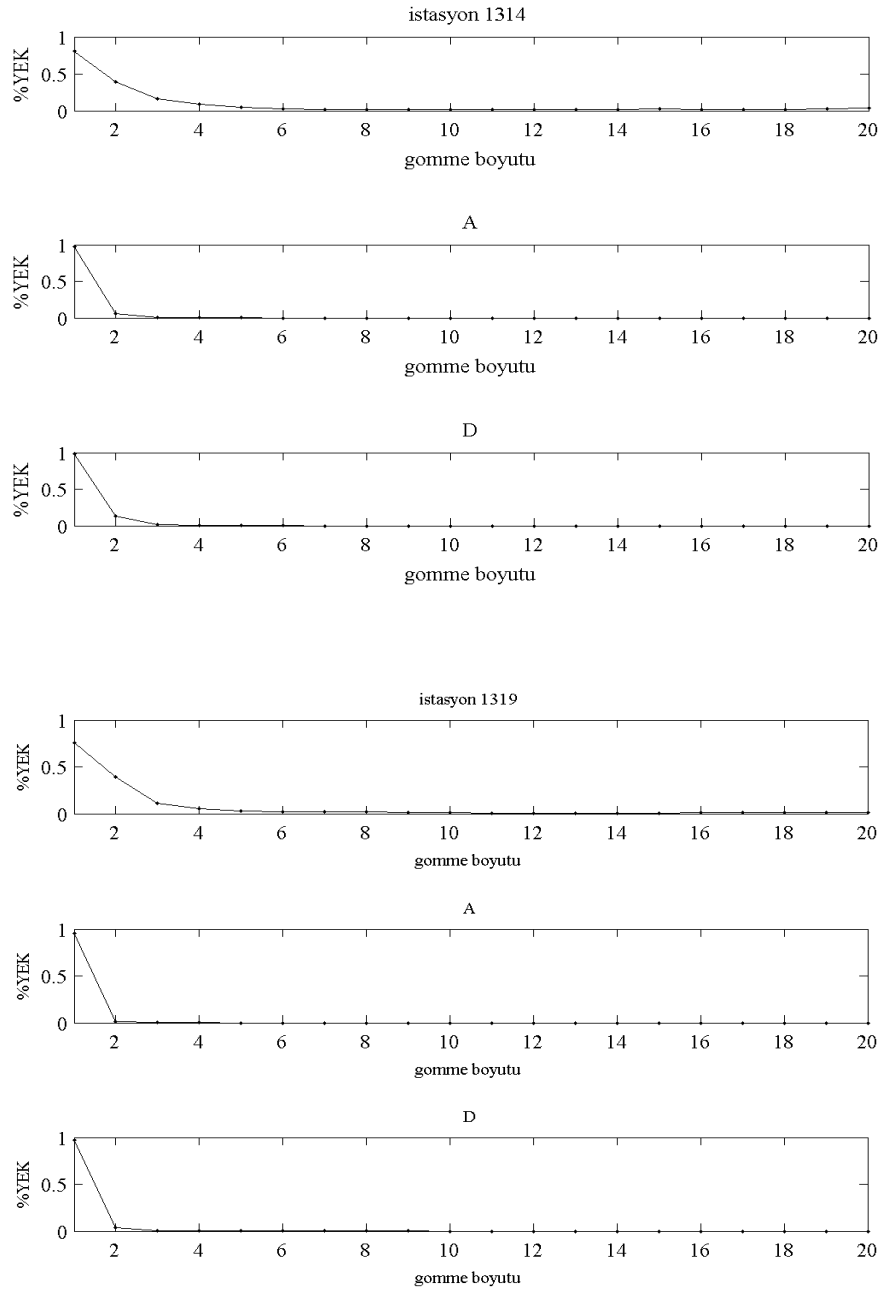


**Şekil 6.23b** : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Çekerler İstasyon (1334,1335).

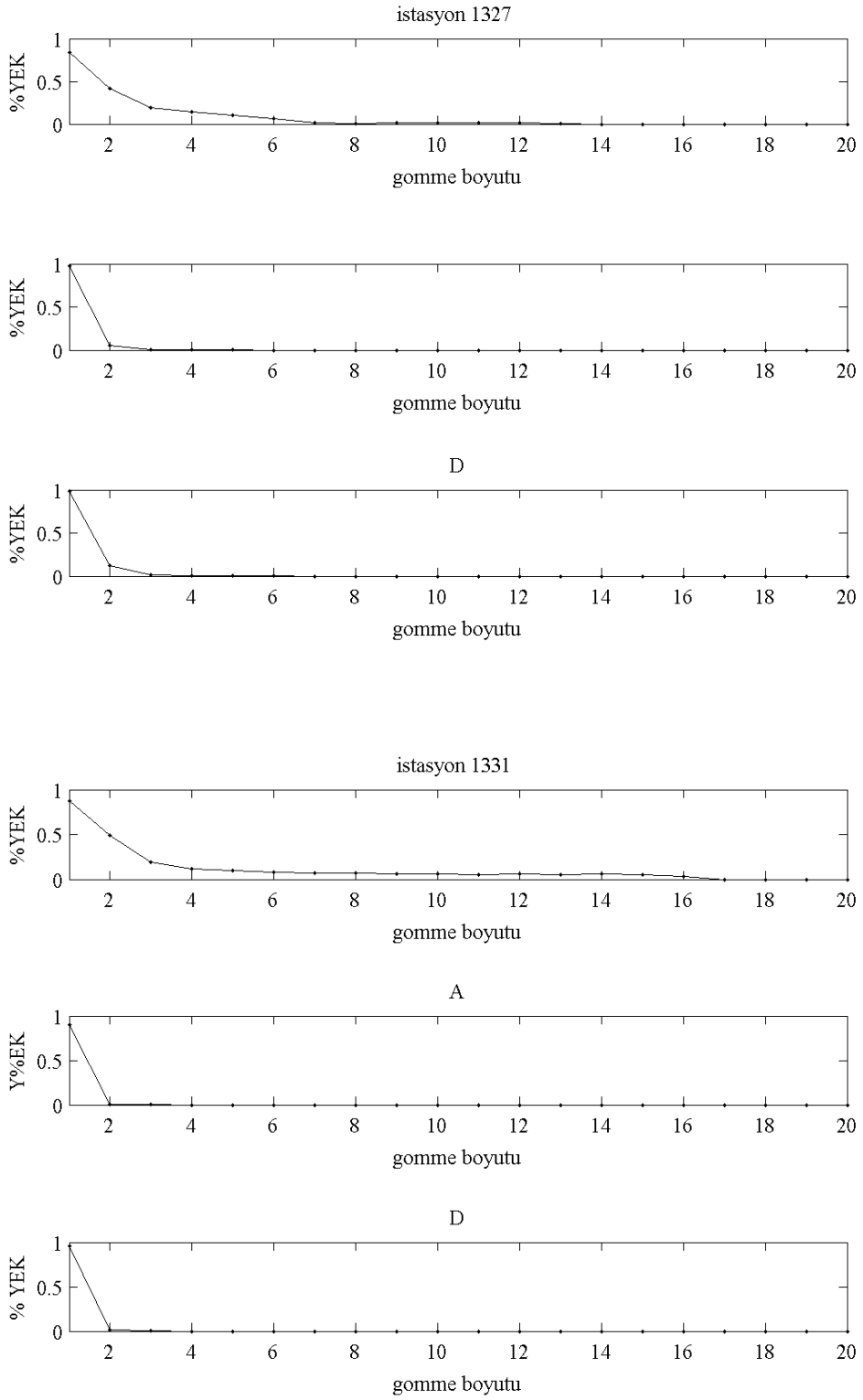


### 6.4.2.2 Gömme Boyutun Belirlenmesi

Gömme boyutunun belirlenmesi için, literatürde en sık rastlanan yöntem, yanl en yakın komşular yöntemidir (YEK). Verilen seri üzerinde seçilen iki noktadan,  $R_i$  mesafesinin (Eşitlik (3.24)) belirli eik değerden büyük olduğu noktaların sıfıra ulaştığı nokta, uygun gömme boyutu olarak belirlenir.

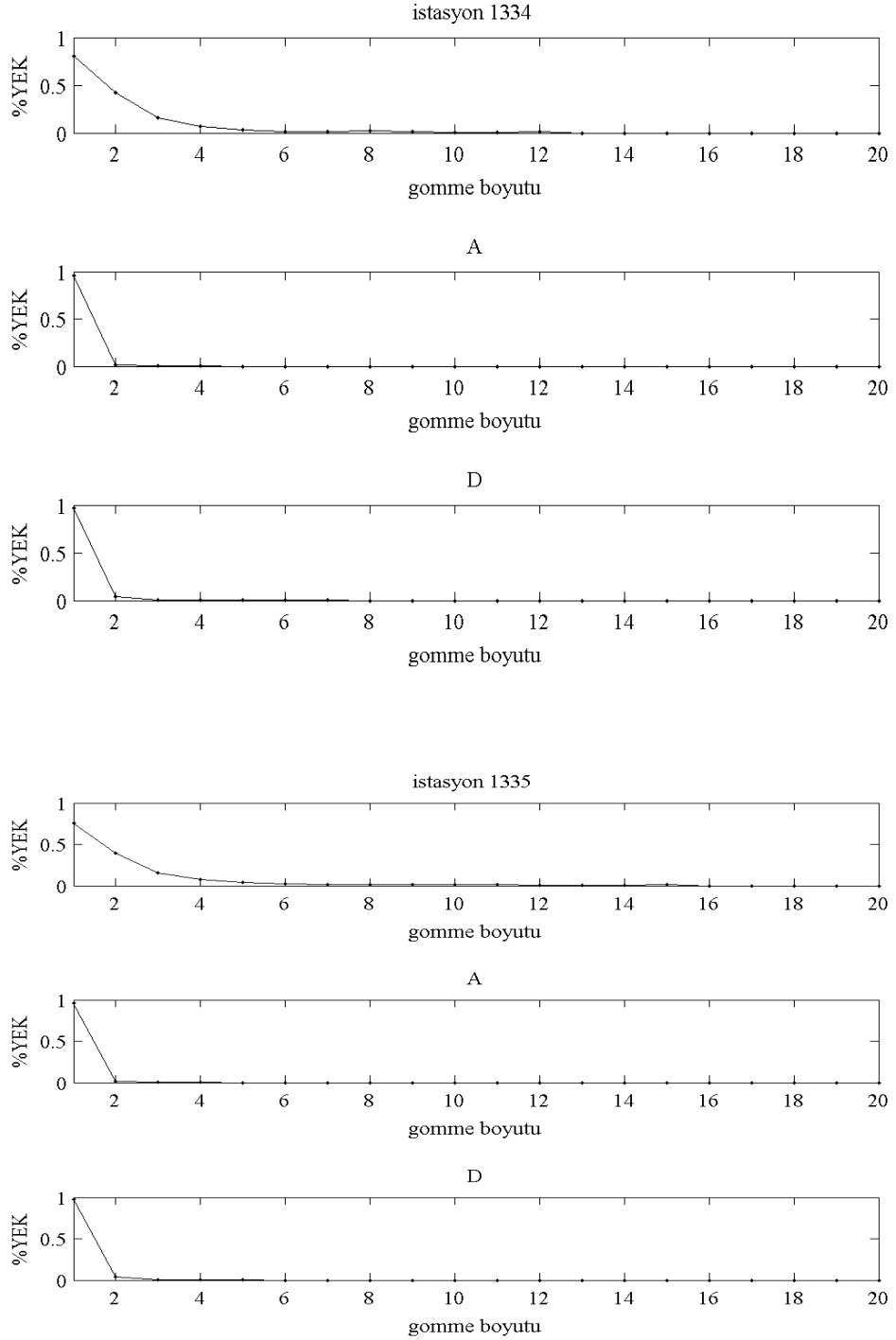


**Şekil 6.24a :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait YEK Grafikleri İstasyon (1314,1319,1327,1331).



**Şekil 6.24a(devam) :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait YEK Grafikleri İstasyon (1314,1319,1327,1331).

İstasyonlardan elde edilen YEK yüzdelere karşılık gelen gömme boyutu grafikleri, orijinal seri, A ve D parçaları için Şekil 6.24'de gösterilmektedir.



Şekil 6.24b : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait YEK Grafikleri İstasyon (1334,1335).

Elde edilen sonuçlardan (Çizelge 6.15) açıkça görüleceği üzere, gürültü bileşenin seri içinde varoluşu, çeker boyutunun artışına sebep olmaktadır.

**Çizelge 6.15 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonlarına Gömme Boyutları**

Kullanılan İstasyon Numarası	Gömme Boyutu (m)
1314	6
1314 (A)	2
1314 (D)	4
1319	7
1319 (A)	2
1319 (D)	3
1327	8
1327 (A)	3
1327 (D)	4
1331	8
1331 (A)	2
1331 (D)	2
1334	7
1334 (A)	2
1334 (D)	3
1335	7
1335 (A)	2
1335 (D)	3

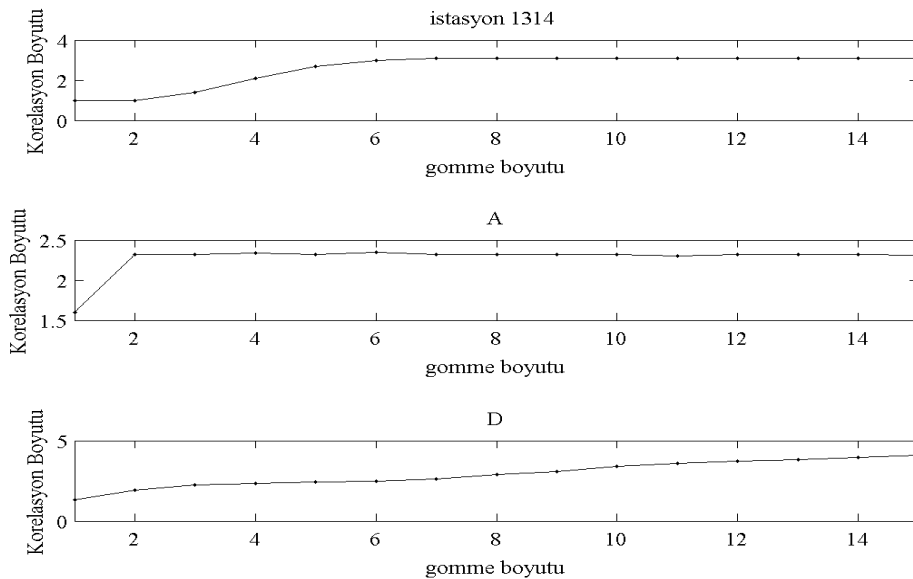
#### 6.4.2.3 Çeker Boyutunun Belirlenmesi

Faz uzayı parametrelerinin belirlenmesi (T,m) ile elde edilen çeker boyutu eğer fraktal ise bu serinin kaotik davranış gösterdiğinin bir kanıtıdır. Eşitlik (3.15) ile elde edilen eğrilerin eğimleri gömme boyutuna karşı çizilirse, bu eğimlerde belirli bir boyutta bir doyum gözlenir, bu durum belirli gömme boyutundan sonra, çekerin boyutunun değişmediğinin bir göstergesidir. Doyum noktasına ulaşılan boyut, çekerin rahat gözlenebilmesi için uygun gömme boyutudur. Bunun aksine, seri kaotik bir davranış göstermiyorsa bu doyum noktası gözlenemez ve boyut bir doyum noktasına erişmeden sürekli artar. Çizelge 6.16 'de açıkça görüleceği üzere, gürültü bileşenin seri içinde varoluşu, gömme çeker boyutunun artışına sebep olmaktadır. Gürültüden ayrılmış parçanın oluşturduğu çeker, gözlenmiş seriye göre çok daha küçük boyuttadır.

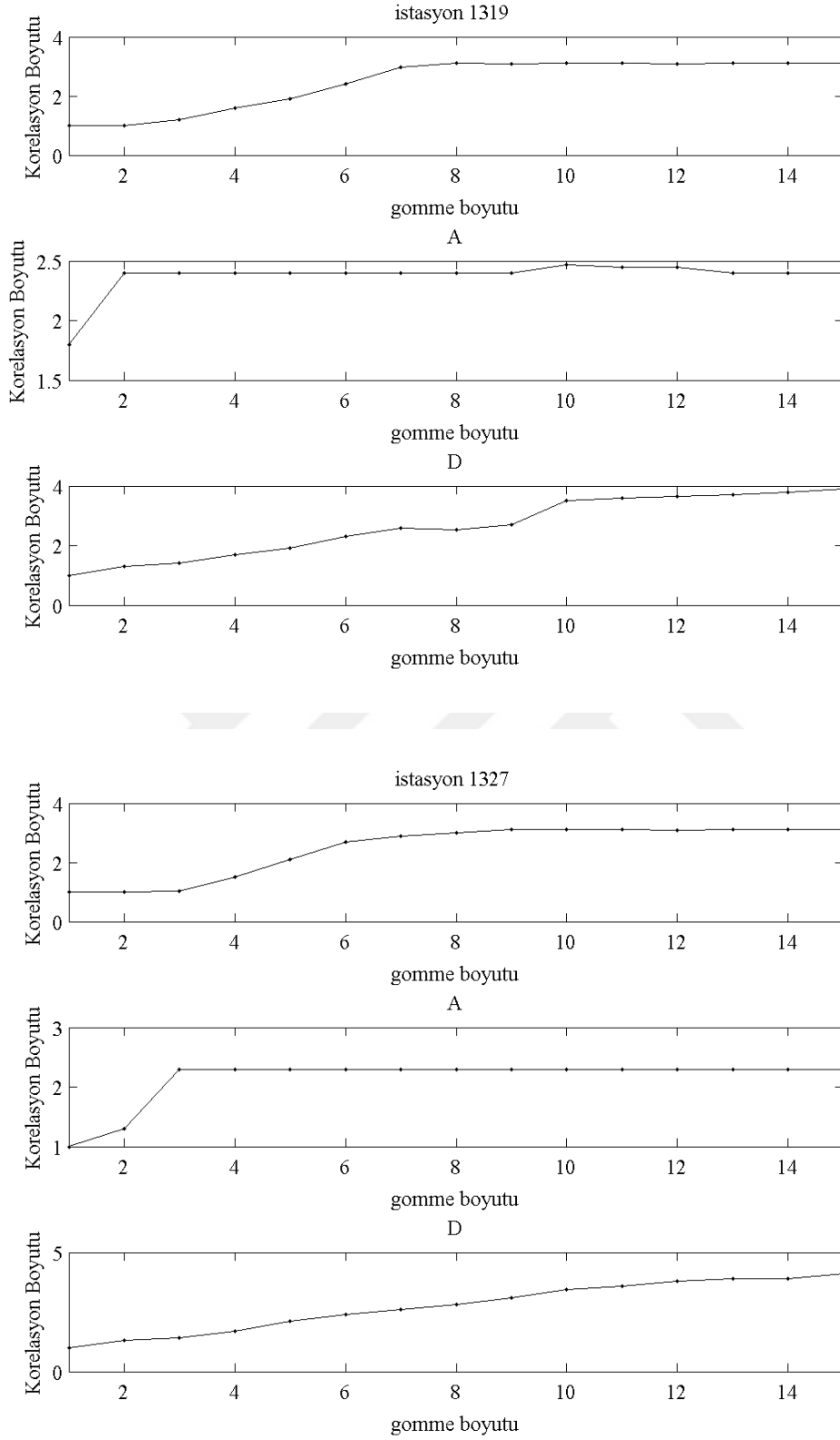
**Çizelge 6.16 : Batı Karadeniz Havzaları Çeker Boyutları**

Kullanılan İstasyon Numarası	Çeker Boyutu	Gömme Boyutu (m)
1314	3.10	6
1314 (A)	2.32	2
1314 (D)	-	-
1319	3.10	7
1319 (A)	2.4	2
1319 (D)	-	-
1327	3.12	8
1327 (A)	2.3	3
1327 (D)	-	-
1331	3.6	7
1331 (A)	2.25	3
1331 (D)	-	-
1334	3.25	3
1334 (A)	2.5	3
1334 (D)	-	-
1335	3.20	7
1335 (A)	2.04	2
1335 (D)	-	-

Korelasyon Boyutu hesabından elde edilen gömme boyutuna karşı çizilen grafikler Şekil 6.25'da gösterilmektedir.

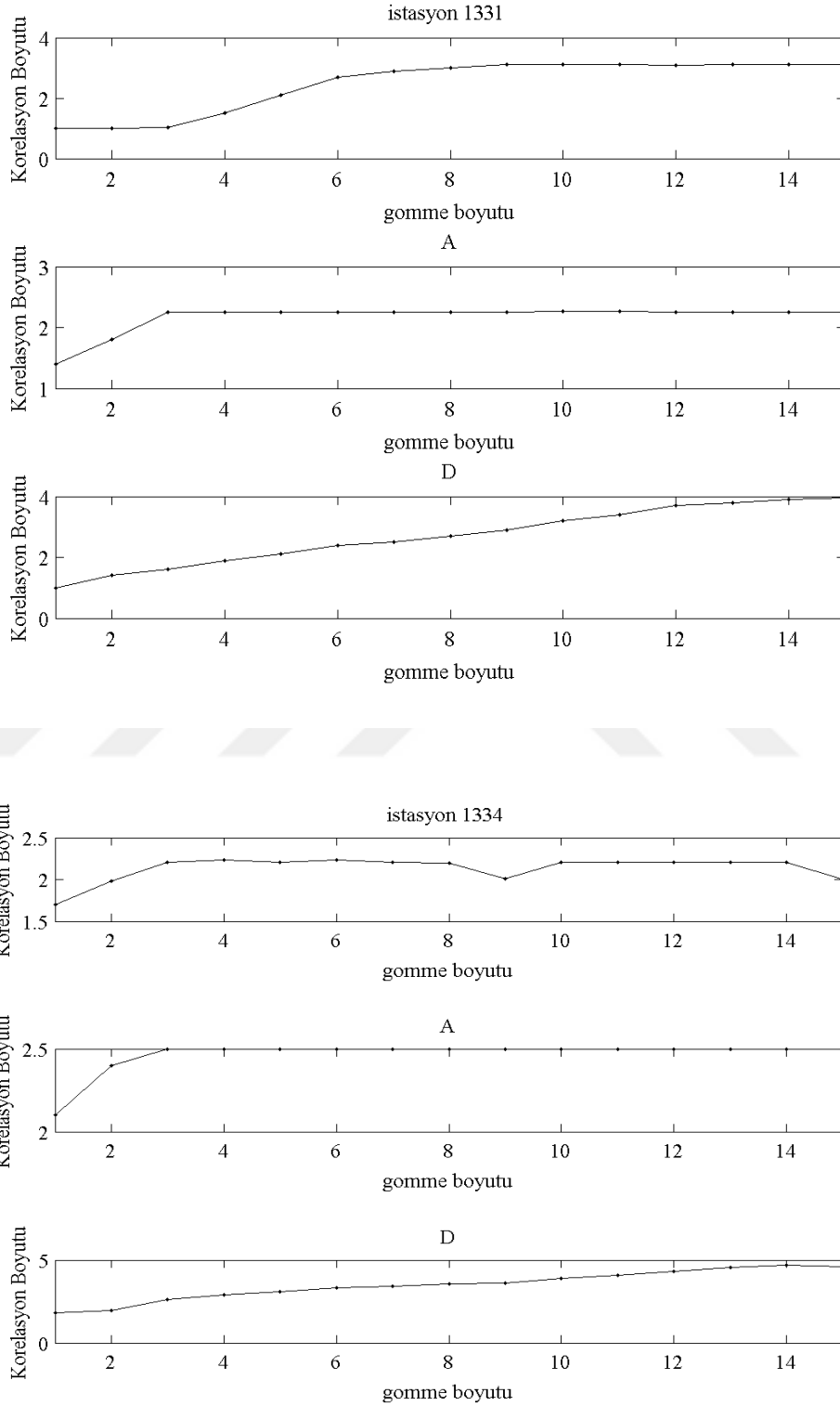


**Şekil 6.25a(devam) : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Gömme Boyutları İstasyon (1314,1319,1327).**

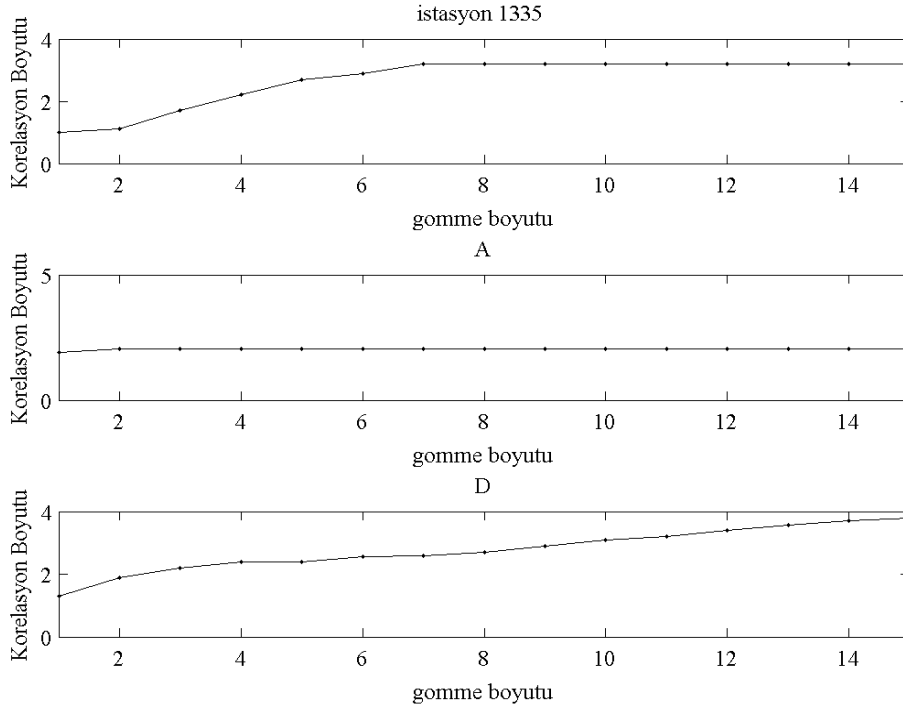


**Şekil 6.25a** : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Gömme Boyutları İstasyon (1314,1319,1327).

Elde edilen grafiklerden gürültü karakterli kabul edilerek ayrılmış kısmın (D), serinin karakterini gizlediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.25b : Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Gömme Boyutları İstasyon (1331,1334,1335).



**Şekil 6.25b(devam) :** Seri ve Dalgacık Analizi Sonucuna ait Gömme Boyutları İstasyon (1331,1334,1335).

## 6.5 Değerlendirme

Çalışmanın bu bölümünde, Türkiye, Karadeniz sahilinde yer alan DSİ'ye ait 4 adet havza üzerindeki akım gözlem istasyonlarına ait, günlük akımlar kullanılarak, verilerin kaotik davranışa sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Sistemin davranışının faz domeninde daha rahat gözleneceği düşünülmüş ve bu sebeple Takens'a ait zaman gecikmeli koordinatlar yöntemi ile faz uzayı yeniden kurulmuştur. Faz uzayının koordinatları, sistemin evrimini tam olarak gösterebilmek için gerekli olan durum değişkenlerinden meydana gelir. Takens teoremine göre, sistemin gecikmeli kopyaları faz uzayında uygun boyutta gömülürse, davranışını belirleyen yörüngeler daha net gözlenebilir (Koçak,1996). Bu bağlamda, çalışmada faz uzayının yeniden kurulumu aşamasında, gerekli olan parametrelerden zaman gecikmesi (T)'nin elde edilmesi için otokorelasyon fonksiyonunun doğrusal olmayan eşdeğeri kabul edilen Ortak Bilgi Fonksiyonu (OBF) ve diğer bir parametre olan gömme boyutunun belirlenmesi için ise Yanlış En Yakın (YEK) komşular yöntemi kullanılmıştır. Bunun yanı sıra; faz uzayında yörüngelerin oluşturduğu çekerin boyutunu belirlemek için çeker boyutları hesaplanmıştır.



Yörüngelerin oluşturduğu çekerlerin boyutları hesaplanırken, korelasyon boyutları yöntemi kullanılmış, yöntem Hegger vd., tarafından 1999 yılında oluşturulan TISEAN 3.0.1 (Time Series Analysis) programı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu program literatürde zaman serisi üzerinde, özellikle kaotik analizde kullanımına en sık rastlanan programdır. Çalışma kapsamında, gürültünün faz uzayı üzerindeki etkisinin de incelenmesi amaçlanmış ve seriler dalgacık analizi ile bileşenlerine ayrılmıştır. Dalgacık analizi, sistemi bileşenlerine ayıran filtreleme sistemidir. Analiz sonucunda, yüksek frekans bileşenine sahip yaklaşım bileşeninin (A), serinin kendisini temsil ettiği kabul edilmiştir. Filtreleme için seviye seçimi Dalgacık Analizinin en önemli noktasıdır. Bu sebeple, çalışmada uygun boyutun seçilmesi amacı ile entropi kriteri kullanılmıştır. Entropi kriteri sayesinde, serinin orijinal halinin taşıdığı bilginin korunarak, içerisindeki alçak frekanslı, gürültü karakterli parçanın ayrılması ve ayrılma sonucunda elde edilen parçanın kaotik analiz kapsamında ne kadar etkili olduğu inceleme altına alınmıştır. Bugüne kadar yapılan literatür taramalarında günlük akım serilerinin Dalgacık Analizi kapsamında entropi kullanımına rastlanmamıştır.

Kaotik analiz uygulama sonuçları, ele alınan havzalardaki gözlem istasyonlarına ait veri kümelerinin hepsinin fraktal korelasyon boyutuna sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu fraktal boyut, serilerin kaotik davranışının bir göstergesidir. Gürültüden ayrılmış parçaların da korelasyon boyutunun fraktal yapı gösterdiği ve serilerin orijinal haline göre daha düşük boyuta sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum, serilerin kaotik davranışları üzerinde gürültü etkisinin bir sonucudur. Boyutun gürültü ile büyümesi, faz uzayında çekerin gözlenmesini zorlaştırmaktadır, sonuç olarak gürültünün, serinin öz karakterinin gizlendiği ortaya çıkmaktadır.

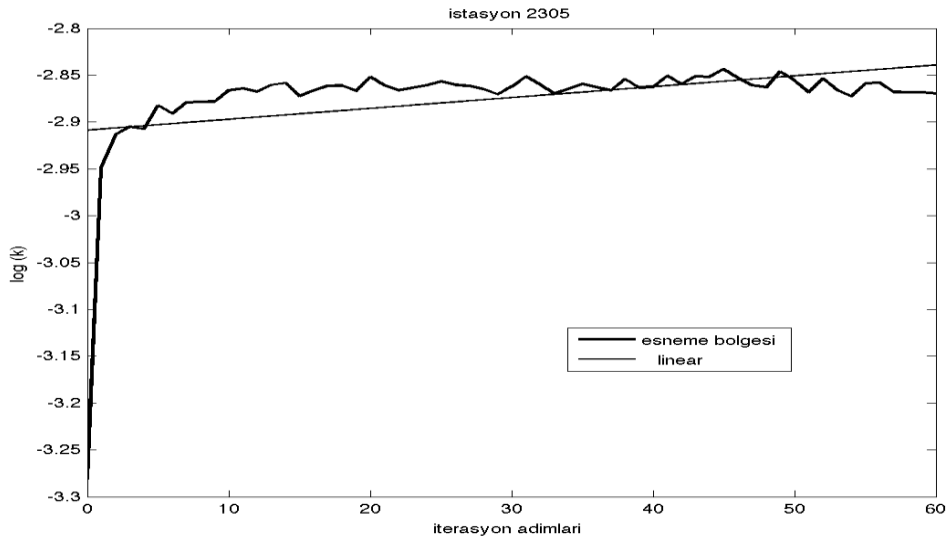
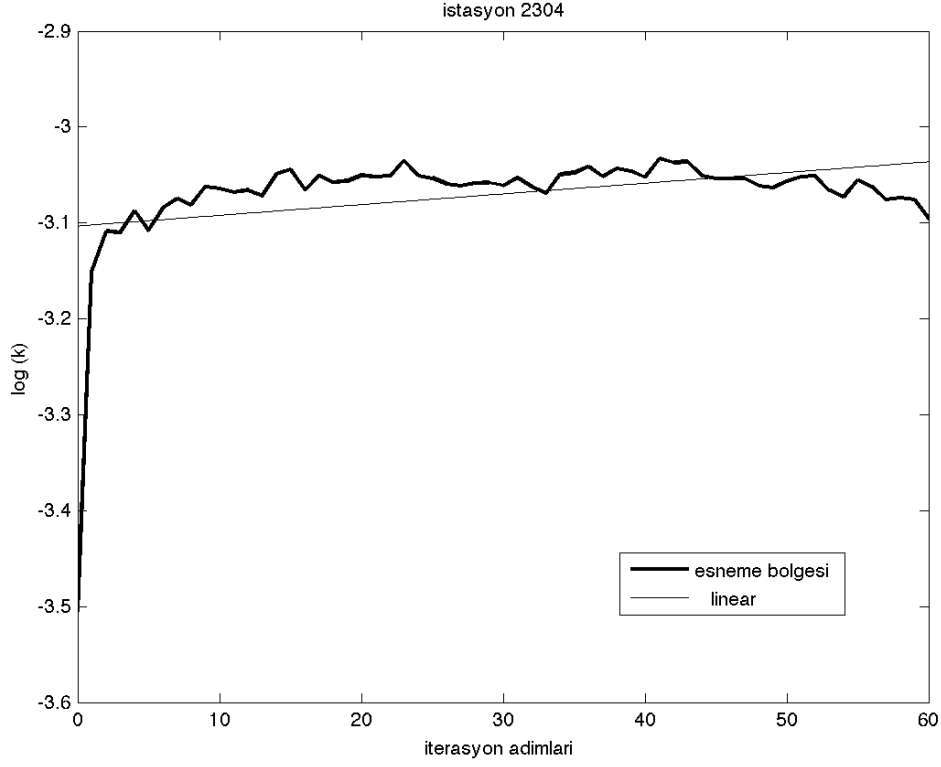


## 7. SİSTEM KARAKTERİNİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR UYGULAMA

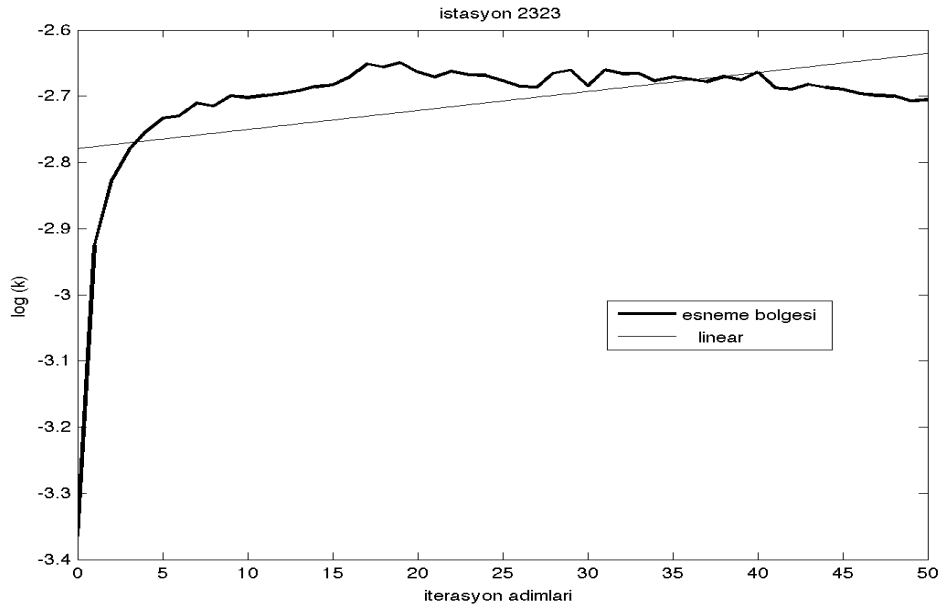
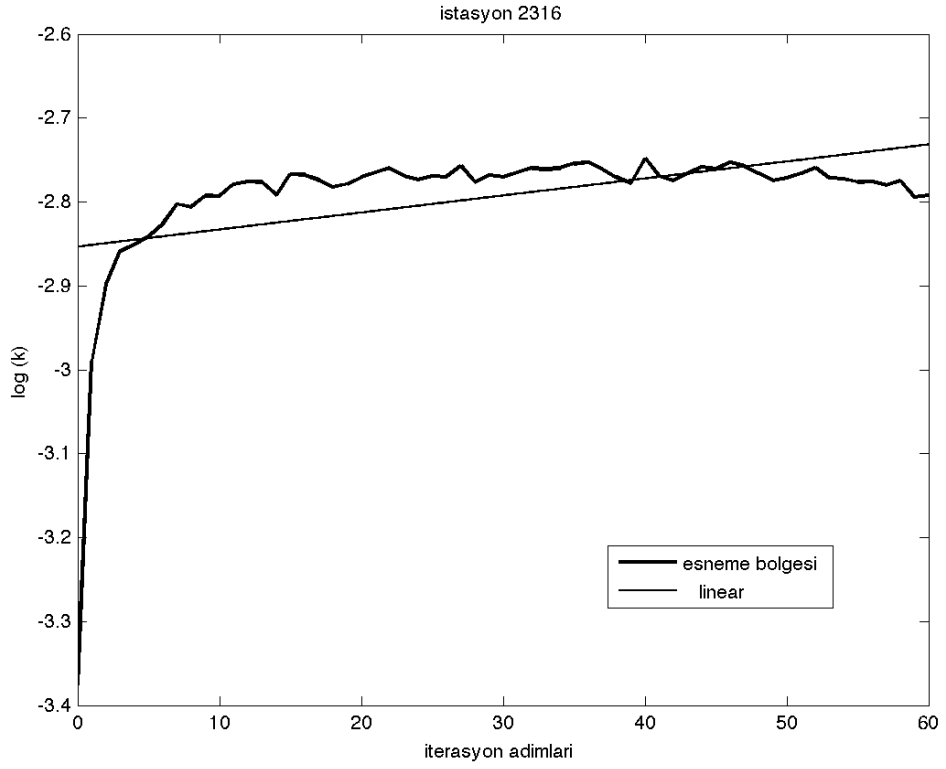
### 7.1 Lyapunov Üstelleri

Kaotik sistemlerin periyodik olmayan dinamikler göstermesinin sebebi, faz uzayı eğrilerinin her birinin neredeyse aynı başlangıç şartlarında farklı üstel artış oranlarına sahip olmalarıdır. Bu duruma başlangıç koşullarına hassas duyarlılık denir. Kaotik bir sistemin temel özelliklerinden biri olan başlangıç koşullarına hassas duyarlılık, sistemin faz uzayındaki yörüngelerin birbirlerinden üstel hızla ayrılmasına yol açmaktadır. Bu durum sistemin geleceğinin tahmin edilebilirliğini sınırlar, uzun dönem tahminler teorik olarak da imkânsızdır. Uzaydaki yörüngelerin birbirlerinden uzaklaşmalarının matematiksel bir ifadesi olarak Lyapunov üsteli adı verilen nicel bir ölçüt kullanılır. Lyapunov üsteli  $\lambda$ , başlangıç şartlarına olan duyarlılığın bir ölçüsünü verir ve faz uzayı içindeki komşu eğrilerin yerel ayrılma derecelerinin ortalaması olarak tanımlanır (Eckmann ve Ruelle, 1985). Eğer  $\lambda$  negatif ise farklı başlangıç şartları aynı çıkış değerlerini vermeye meyillidir ve dolayısıyla gelişme kaotik değildir. Eğer  $\lambda$  pozitif ise farklı başlangıç değerleri farklı çıkış değerleri verir yani hareket kaotiktir. Rosenstein vd. (1993) algoritması en büyük Lyapunov üstelinin bulunmasına yöneliktir ve küçük, gürültülü veri kümeleri için kolayca uygulanabilir. Yine ilk olarak zaman serisi şeklindeki veri faz uzayında yeniden oluşturulur ve Lyapunov üsteli daha önceki bölümlerde belirtilmiş olan Eşitlik 3.8'deki şeklinde hesaplanır. Lyapunov üstelleri hesaplanırken TISEAN 3.0.1 programı kullanılmıştır. Program çıktılarına göre, esneme katsayısı (k) çeşitli sayıda iterasyon adımı seçilerek bulunmuştur. Eğer, bu iterasyon sayısı  $\log(k)$ 'ya karşı grafiklendirilecek olursa; çeşitli sayıdaki iterasyon sonucunda kullanılan serinin belirli adım sonra bir esneme bölgesine sahip olacağı gözlenebilir. En küçük kareler yöntemi ile bu esneme bölgesine uydurulan grafiğe doğrusal eğrinin eğimi ise yörüngeye ait en büyük Lyapunov üstelini elde

etmemizi sağlayacaktır. Çoruh Havzasında yer alan istasyonlara ait günlük akım kullanılarak elde edilen Lyapunov üstelleri grafikleri Şekil 7.1’de gösterilmektedir.



Şekil 7.1 : Havzalara Ait Lyapunov Üstelleri.



**Şekil 7.1 (devam) : Havzalara Ait Lyapunov Üstelleri.**

Diğer istasyon verilerine ait grafikler EK B’de yer almaktadır. Bütün istasyonlar için elde edilen Lyapunov Üstelleri ( $\lambda_1$ ) Çizelge 7.1’de gösterilmektedir.

**Çizelge 7.1:**İstasyonların Lyapunov Üstelleri

Kullanılan İstasyon Numarası	En Büyük Lyapunov Üsteli (Seri) ( $\lambda_1$ )
<b>Çoruh Havzası</b>	
2304	0.020
2305	0.021
2316	0.036
2323	0.020
<b>Doğu Karadeniz Havzası</b>	
2202	0.036
2215	0.041
2218	0.036
2228	0.033
2232	0.036
2233	0.045
2245	0.030
2247	0.033
<b>Yeşil Irmak Havzası</b>	
1401	0.043
1412	0.039
1414	0.068
1418	0.079
<b>Batı Karadeniz Havzası</b>	
1314	0.040
1319	0.039
1327	0.045
1331	0.040
1334	0.040
1335	0.038

## 7.2 Değerlendirme

Karadeniz sahilinde yer alan DSI’ye ait 4 adet havza üzerindeki akım gözlem istasyonlarına ait, günlük akımlar kullanılarak, Bölüm 6’da faz uzayının

incelenmesi yöntemi ile araştırılmıştır. Boyut analizi neticesinde, faz uzayında oluşan çekicilerin fraktal boyuta sahip olduğu sonucuna varılmış, kaotik karaktere sahip olduğu ispatlanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde; sistemlerin karakterlerini incelemek için kullanılan Rosenstein vd. (1993) Lyapunov üstelleri yöntemi, serilere uygulanmıştır. Kaotik sistemlerin periyodik olmayan dinamikler göstermesinin sebebi, faz uzayı eğrilerinin her birinin neredeyse aynı başlangıç şartlarında farklı üstel artış oranlarına sahip olmalarıdır. Bu duruma başlangıç koşullarına hassas duyarlılık denir. Lyapunov üsteli  $\lambda$ , başlangıç şartlarına olan duyarlılığın bir ölçüsünü verir ve faz uzayı içindeki komşu eğrilerin yerel ayrılma derecelerinin ortalaması olarak tanımlanır (Eckmann ve Ruelle, 1985). Eğer  $\lambda$   $\leq$  negatif ise farklı başlangıç şartları aynı çıkış değerlerini vermeye meyillidir ve dolayısıyla gelişme kaotik değildir. Eğer  $\lambda$   $>$  pozitif ise farklı başlangıç değerleri farklı çıkış değerleri verir yani hareket kaotiktir. Çizelge 7.1’de gözleneceği üzere, havzalara ait istasyonların hepsi pozitif değerlerli  $\lambda$  ‘lara sahiptir. Değerlerin düşük değerlerli olmasına rağmen, pozitif değerde olması kaotik hareketin bir göstergesi olarak düşünülmelidir. Her ne kadar, pozitif değer kaotikliğin bir göstergesi olarak ele alınsa da, zaman serilerinden Lyapunov üstellerinin hesaplanması konusunda literatürde tartışılmaya açık bir konudur. Bu yöntem ilerideki çalışmalar için araştırmaya açık bir nokta olarak göze çarpmaktadır.





## 8. HAVZALARIN MODELLENMESİ VE ÖNGÖRÜLEBİLİRLİĞİ

Sistemler denklemlerle ifade edilebiliyorsa deterministik sistem olarak adlandırılır. Kaotik sistemlerin matematiksel modelleri doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Hem sürekli zamanlı diferansiyel denklemlerde hem de ayırık zamanlı fark denklemleri ile ifade edilebilmektedir. Sistemlerin matematiksel modellerinin olması uzun dönemdeki davranışın kestirilemez olması; kaotik sistemleri doğrusal olmayan sistemler altında incelenen birçok modelden farklı kılmaktadır. Kaotik sistem modelleri basit olmasına karşın davranışları çok karmaşık gözükmektedir. Kaotik sistemlerden elde edilen verilere geleneksel birçok istatistik test uygulandığında üretilen zaman dizilerinin analizini geleneksel yöntemlerle yapmak yetersiz kalmaktadır (Yılmaz ve Güler, 2006). Bu nedenle kaotik karaktere sahip olduğu düşünülen doğrusal olmayan zaman dizilerinin analizlerinde kaotik analiz algoritmaları ön plana çıkmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, hem gözlenmiş seri hem de yaklaşım parçası üzerinde lokal öngörü yöntemi uygulanarak, serinin içerdiği gürültünün öngörülebilirlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Lokal öngörü yönteminin başarımını karşılaştırmak için; seriler ve A parçaları için ayrı ayrı ARX modeli kurulmuş ve öngörü de yapılmıştır. Her iki yöntem içinde, kullanılan serilerin %90'lık kısmı öğrenme için kullanılmış, %10'luk kısmı üzerinde de öngörü yapılmıştır. Öngörünün başarımını belirlemek için NRMSE (Normalized Root Mean Square Error), FPE (Final Prediction Error),  $R^2$  (Korelasyon Katsayısı) kriterleri kullanılmıştır.

### 8.1 Lokal Öngörü

#### 8.1.1 Çoruh Havzası

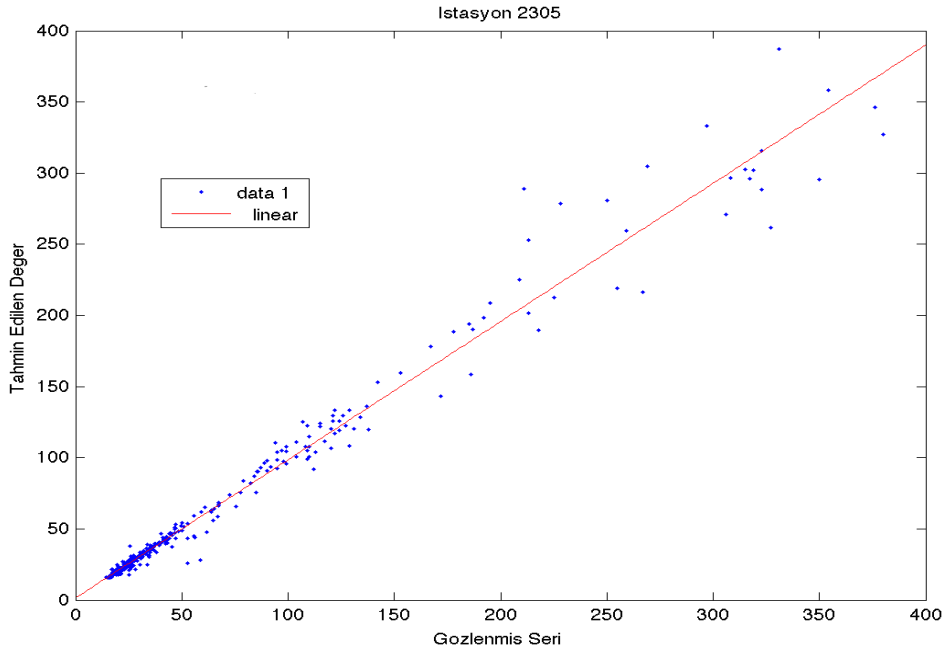
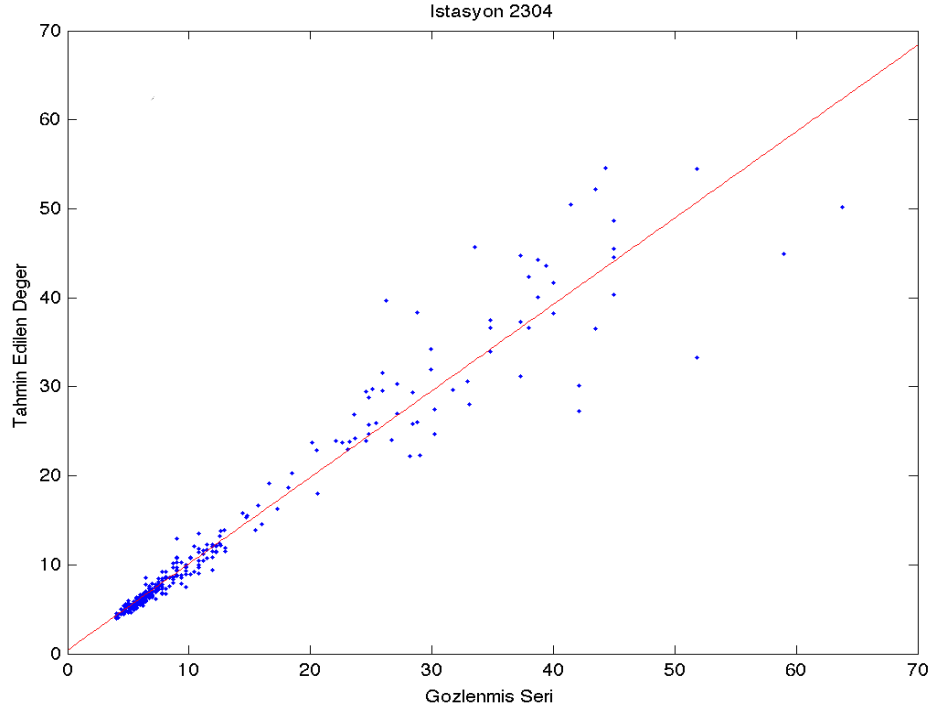
Uygulamada kullanılan veri, Çoruh Havzasında yer alan 4 istasyon, günlük akım verilerinden oluşmaktadır. Veri kümesi üzerinde yapılan incelemede serilerin öğrenme amacı ile kullanılan 32 yıllık bölümü için yeniden faz uzayı kurulmuş ve ve geri kalan 1 yıllık kısım öngörü için ayrılmıştır. Çizelge 8.1'de gerek serinin

orijinal hali gerek dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçası için, çeşitli gömme boyutlarına ait NRMSE (Eşitlik (5.21)) gösterilmektedir. Hatanın en düşük olduğu boyut uygun gömme boyutu olarak seçilmiş ve bu boyut için öngörü yapılmıştır.

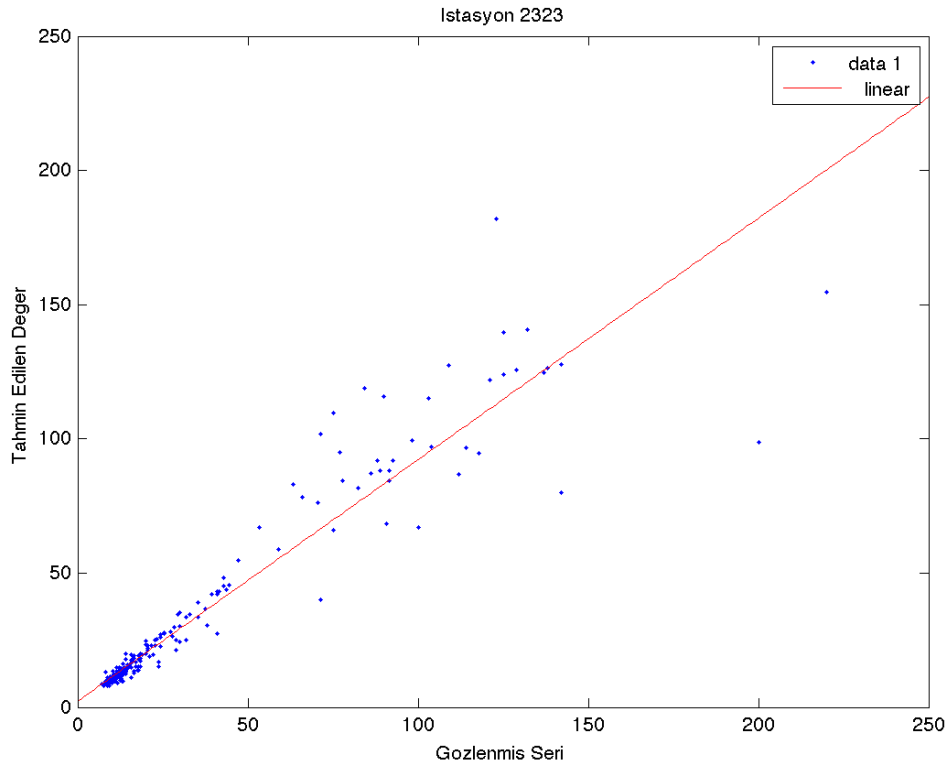
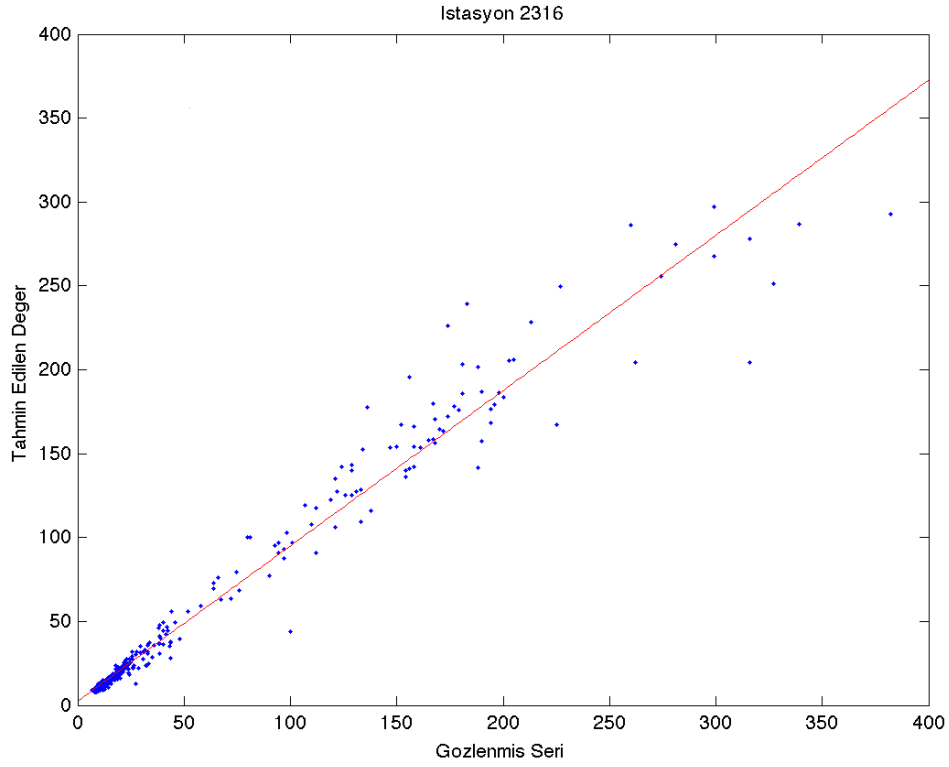
**Çizelge 8.1:** Çoruh Havzası Çeşitli Boyutları için NRMSE

	NRMSE 2304 (Seri)	NRMSE 2304 (A)	NRMSE 2305 (Seri)	NRMSE 2305 (A)	NRMSE 2316 (Seri)	NRMSE 2316 (A)	NRMSE 2323 (Seri)	NRMSE 2323 (A)
Gömme Boyutu								
2	0.020	<b>0.0012</b>	0.013	<b>0.0025</b>	0.030	<b>0.009</b>	0.014	<b>0.0011</b>
3	0.020	0.0017	0.015	0.0030	0.032	0.012	0.015	0.0014
4	<b>0.019</b>	0.0021	0.014	0.0044	0.033	0.015	<b>0.013</b>	0.0015
5	0.022	0.0024	<b>0.013</b>	0.0045	<b>0.031</b>	0.019	0.016	0.0021
6	0.025	0.0031	0.016	0.0070	0.036	0.020	0.017	0.0024
7	0.025	0.0037	0.016	0.0080	0.038	0.026	0.019	0.0029
8	0.026	0.0041	0.019	0.0090	0.044	0.028	0.019	0.0031
9	0.027	0.0048	0.019	0.0090	0.044	0.033	0.020	0.0034
10	0.028	0.0051	0.019	0.0090	0.045	0.037	0.020	0.0037

Çizelge 8.1'den de gözlenebileceği üzere; NRMSE serinin orijinal halinde ve A parçasında genel olarak gömme boyutu ile orantılı olarak yükselişe geçtiği halde, belirli boyutlarda diğerlerine nazaran düşük değerler almaktadır. Bu nispeten düşük RMS'e karşılık gelen gömme boyutu; öngörünün yapılması için seçilen uygun gömme boyutu olarak belirlenmiş ve Çizelge üzerinde de işaretlenmiştir. Bu boyutta yapılan öngörü gösteren grafikler EK C'de verilmiştir. Uygun gömme boyutlarında tahmin serisi, serinin kendisi ile gayet uyumlu hareket göstermiş hatta pik değerlere bile ulaşabilmiştir. Öngörünün performansını değerlendirme için ise, Korelasyon katsayısı kullanılmaktadır ( $R^2$ ). Serinin kendisinin tahmin serisine karşı çizilen grafikleri sonucu elde edilen grafikler Şekil 8.1'de gözlenebilmektedir. Grafiklerden elde edilen sonuçların, serinin orijinal halinin seçilen yöntem olan Lokal Öngörü ile gayet yüksek  $R^2$ 'lere sahip, yüksek ( $R^2 > 0.9$ ) performans göstererek öngörülebildiğinin göstergesidir. Seriden dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçasına ait NRMSE'lerin (Çizelge 8.1), gömme boyutu ile sürekli olarak artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu sebeple, A parçası için uygun gömme boyutu, bütün istasyonlarda 2 olarak seçilerek öngörü yapılmıştır. A parçasına ait öngörü grafikleri Şekil 8.2'de gözlenebilmektedir.

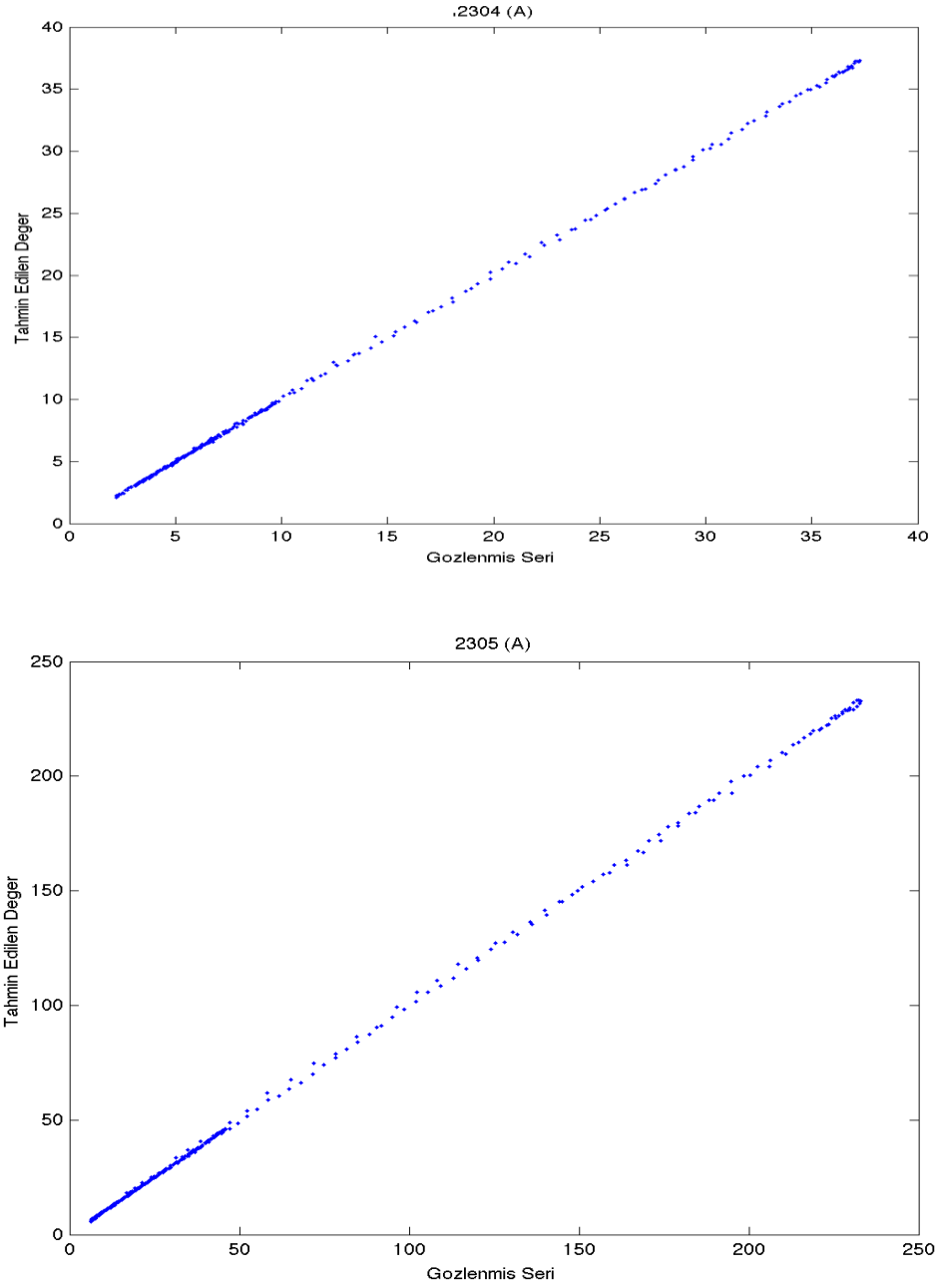


Şekil 8.1 : Çoruh Havzası Öngörü Performansı.

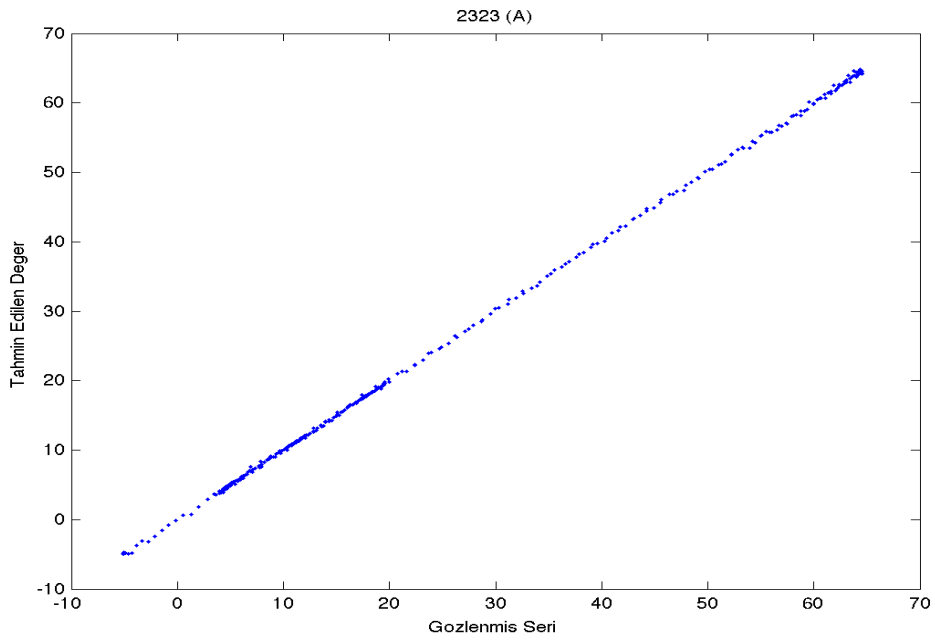
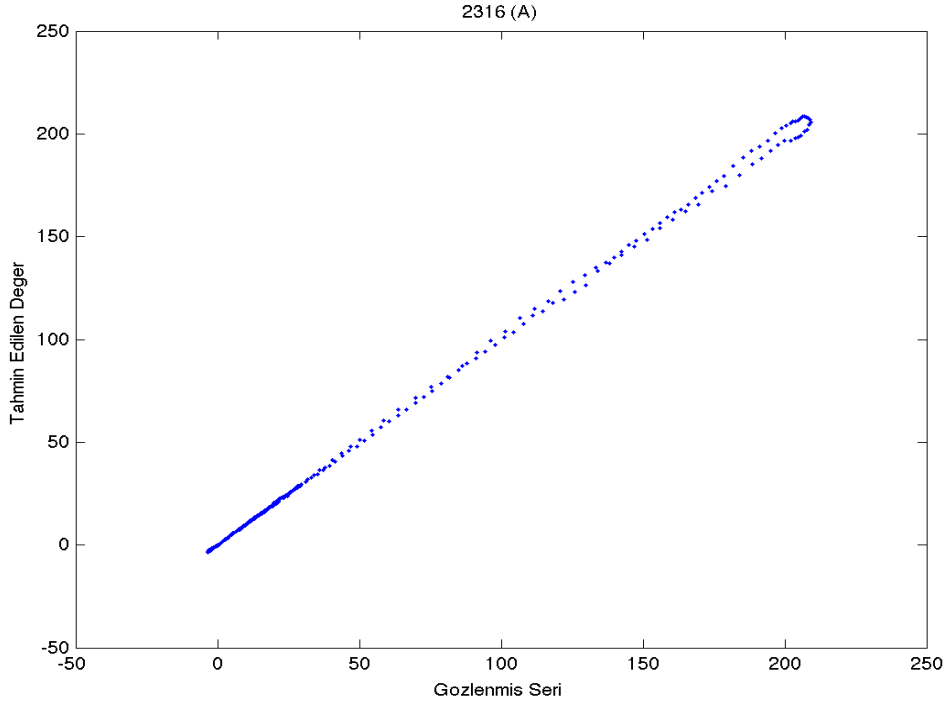


**Şekil 8.1 (devam) : Çoruh Havzası Öngörü Performansı.**

Şekil 8.2'den gözlenebileceği üzere, uygun gömme boyutlarında tahmin serisi, serinin kendisi ile birebir uyumlu hareket göstermiştir. Öngörünün performansını değerlendirmek için hesaplanan Korelasyon Katsayısı ( $R^2$ ); serinin kendisinin tahmin serisine karşı çizilen grafikleri sonucu elde edilmiştir. Grafiklerden elde edilen sonuçların, serinin Dalgacık Analizi sonucunda elde edilen parçanın (A), seçilen yöntem olan Lokal Öngörü için  $R^2 > 0.99$  çıkarak nerdeyse mükemmel yakın başarıyı elde edilmiştir.



**Şekil 8.2 :** Çoruh Havzası A Parçası için Öngörü Performansı.



**Şekil 8.2 (devam) :** Çoruh Havzası A Parçası için Öngörü Performansı.

## 8.2 Doğu Karadeniz Havzası

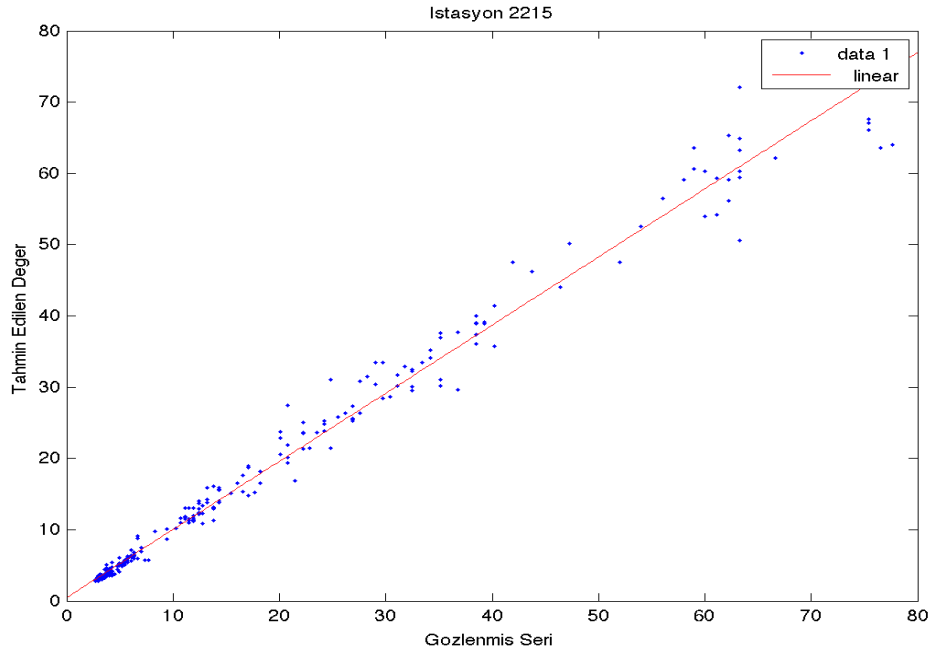
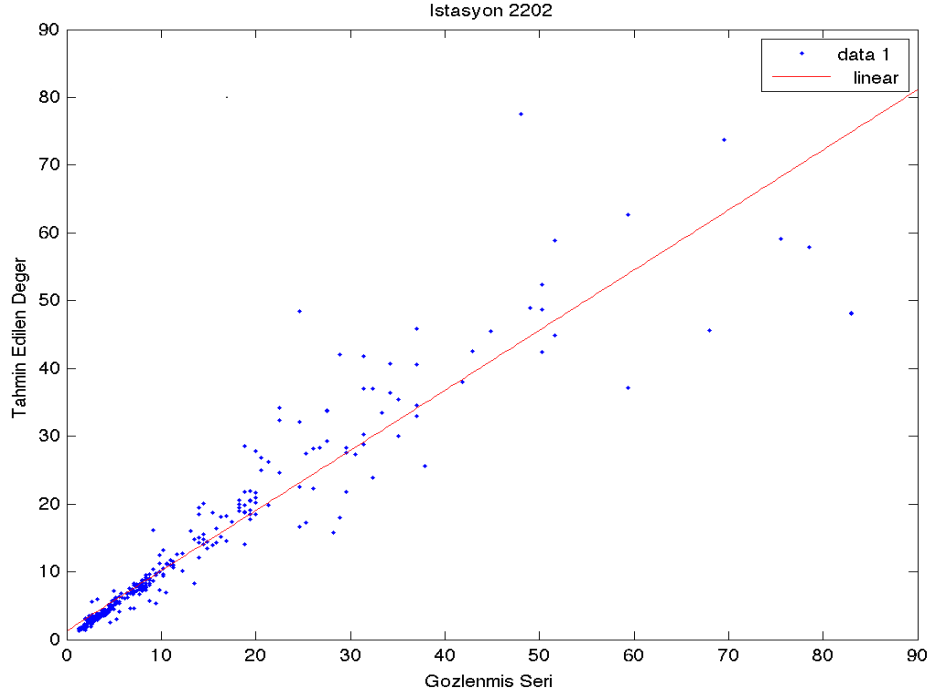
Doğu Karadeniz Havzası'nda yer alan 8 istasyon, 40 yıl ve üzeri, günlük akım verilerinden oluşmaktadır. Veri kümesi üzerinde yapılan incelemede serilerin öğrenme için kullanılan %90'lık bölümü için yeniden faz uzayı kurulmuş ve geri kalan %10'luk kısım öngörü için ayrılmıştır. Çizelge 8.2'de gerek serinin orijinal hali gerek Dalagacık analizi neticesinde elde edilen yaklaşım (A) parçası için, denenmiş olan gömme boyutlarına ait NRMSE (Eşitlik (5.21)) gösterilmektedir. Hatanın en düşük olduğu boyut uygun gömme boyutu olarak seçilmiş ve bu boyut için öngörü yapılmıştır.

**Çizelge 8.2 : Doğu Karadeniz Havzası Çeşitli Gömme Boyutları için NRMSE**

	NRMSE 2202 (Seri)	NRMSE 2202 (A)	NRMSE 2215 (Seri)	NRMSE 2215 (A)	NRMSE 2218 (Seri)	NRMSE 2218 (A)	NRMSE 2228 (Seri)	NRMSE 2228 (A)	NRMSE 2232 (Seri)	NRMSE 2232 (A)
Gömme Boyutu										
2	0.023	<b>0.0011</b>	0.030	<b>0.0013</b>	0.030	<b>0.0021</b>	0.036	<b>0.0006</b>	0.036	<b>0.0021</b>
3	0.025	0.0012	<b>0.022</b>	0.0023	0.029	0.0022	0.036	0.0007	0.036	0.0027
4	0.027	0.0014	0.024	0.0029	<b>0.026</b>	0.0029	0.040	0.0013	<b>0.035</b>	0.0031
5	0.027	0.0016	0.026	0.0034	0.028	0.0031	<b>0.035</b>	0.0020	0.038	0.0034
6	<b>0.025</b>	0.0023	0.026	0.0037	0.029	0.0031	0.037	0.0020	0.038	0.0057
7	0.029	0.0027	0.026	0.0041	0.030	0.0032	0.038	0.0027	0.038	0.0061
8	0.029	0.0033	0.026	0.0059	0.033	0.0034	0.040	0.0027	0.039	0.0070
9	0.029	0.0038	0.027	0.0065	0.033	0.0035	0.040	0.0027	0.040	0.0072
10	0.029	0.0040	0.027	0.0069	0.033	0.0041	0.040	0.0034	0.041	0.0077

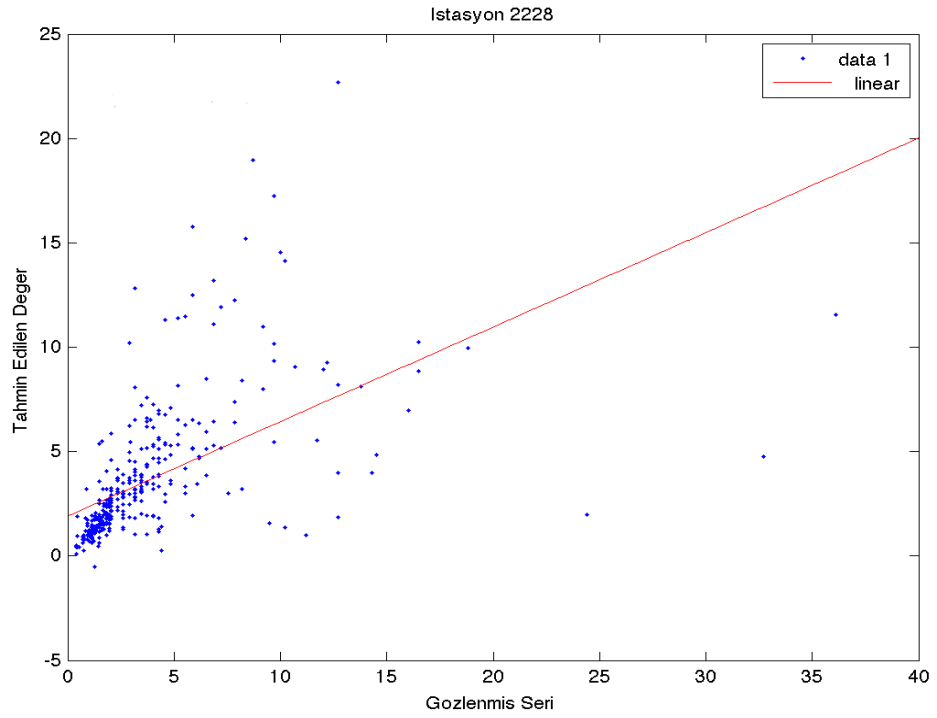
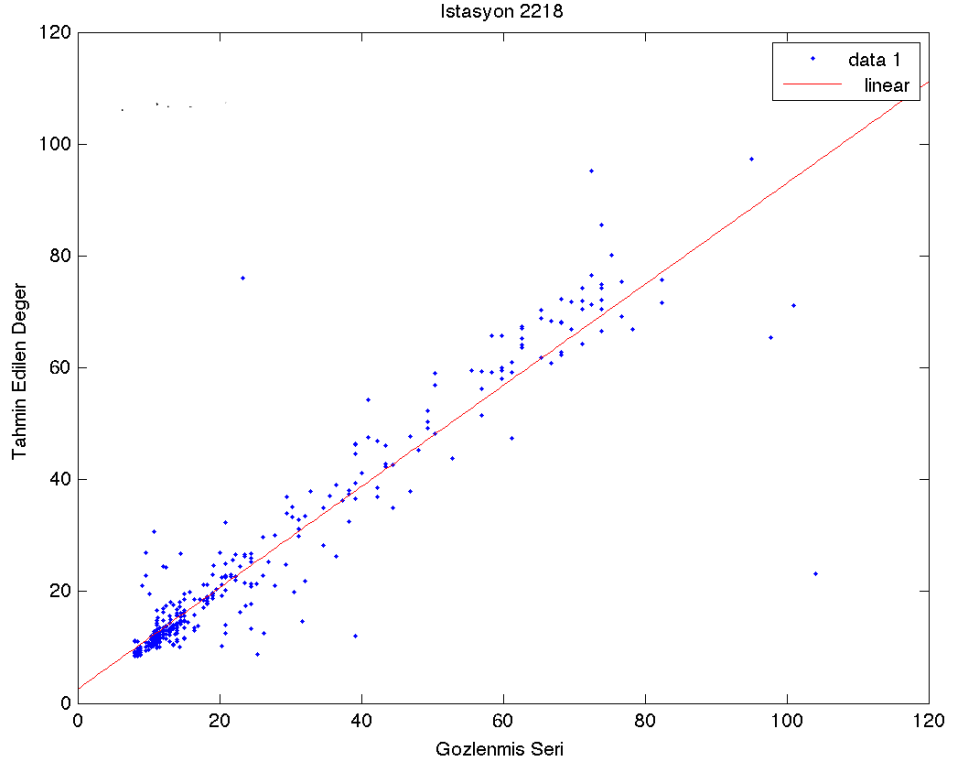
	NRMSE 2232 (Seri)	NRMSE 2232 (A)	NRMSE 2233 (Seri)	NRMSE 2233 (A)	NRMSE 2245 (Seri)	NRMSE 2245 (A)	NRMSE 2247 (Seri)	NRMSE 2247 (A)
Gömme Boyutu								
2	0.036	<b>0.0021</b>	0.025	<b>0.0007</b>	0.035	<b>0.0007</b>	0.056	<b>0.009</b>
3	0.036	0.0027	0.032	0.0012	0.036	0.0011	0.058	0.009
4	<b>0.035</b>	0.0031	0.034	0.0017	0.036	0.0011	0.060	0.012
5	0.038	0.0034	<b>0.031</b>	0.0020	0.039	0.0012	<b>0.054</b>	0.013
6	0.038	0.0057	0.033	0.0020	<b>0.035</b>	0.0013	0.060	0.014
7	0.038	0.0061	0.037	0.0021	0.037	0.0013	0.060	0.014
8	0.039	0.0070	0.040	0.0018	0.037	0.0015	0.061	0.015
9	0.040	0.0072	0.042	0.0020	0.037	0.0015	0.061	0.013
10	0.041	0.0077	0.042	0.0020	0.038	0.0016	0.061	0.015

Çizelge 8.2'den de gözlenebileceği üzere; NRMSE serinin orijinal halinde genel olarak gömme boyutu ile orantılı olarak yükselişe geçtiği halde, belirli boyutlarda düşük incelen diğer istasyonlara ait verilere nazaran düşük değerler almaktadır



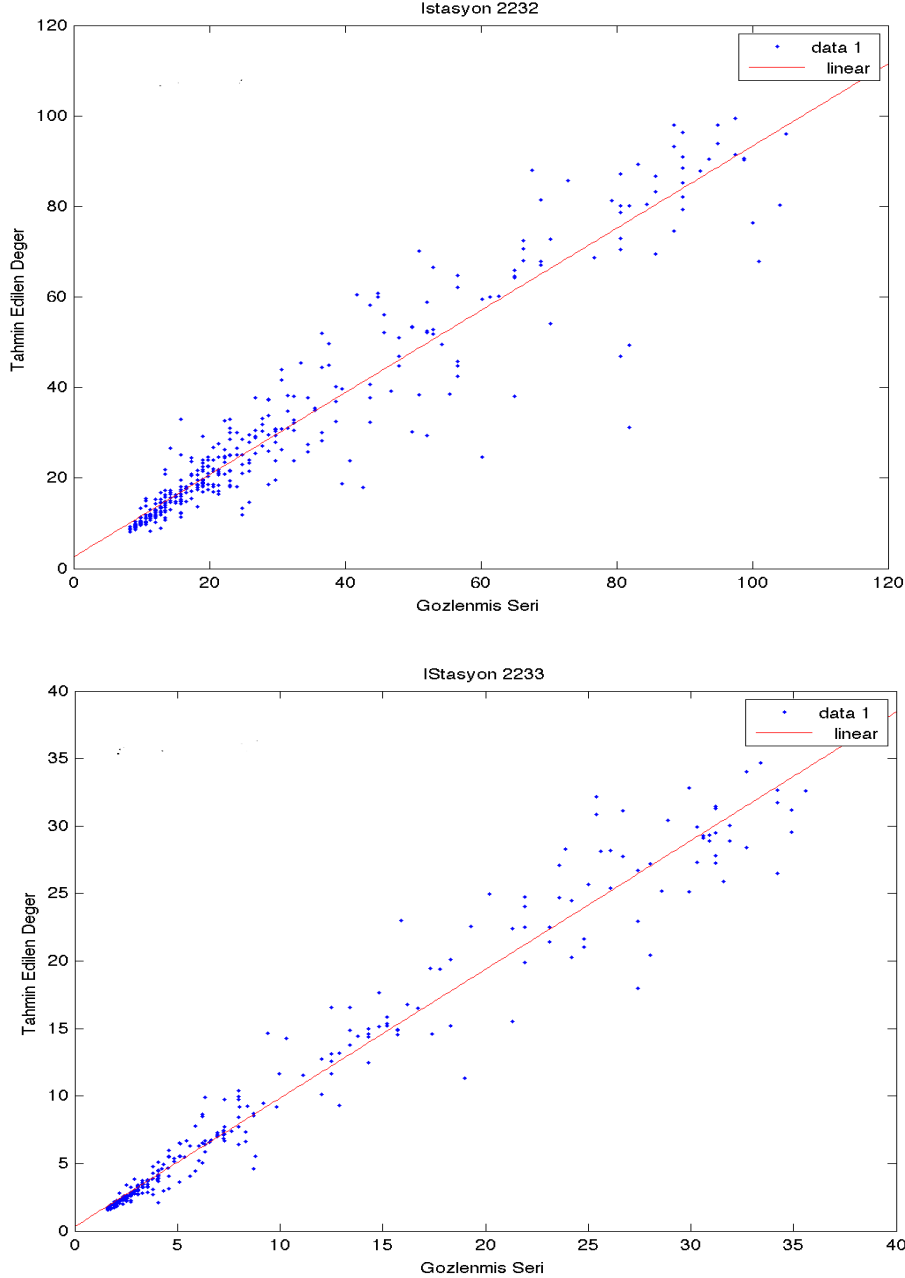
**Şekil 8.3a :** Doğu Karadeniz Havzası Öngörü Performansı İstasyon (2202,2215,2218, 2228).



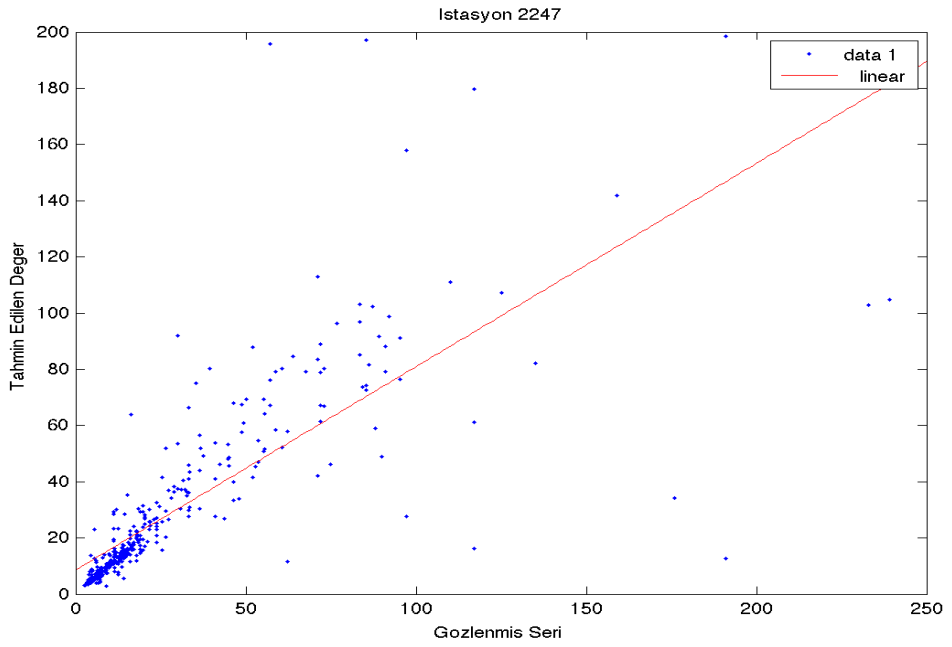
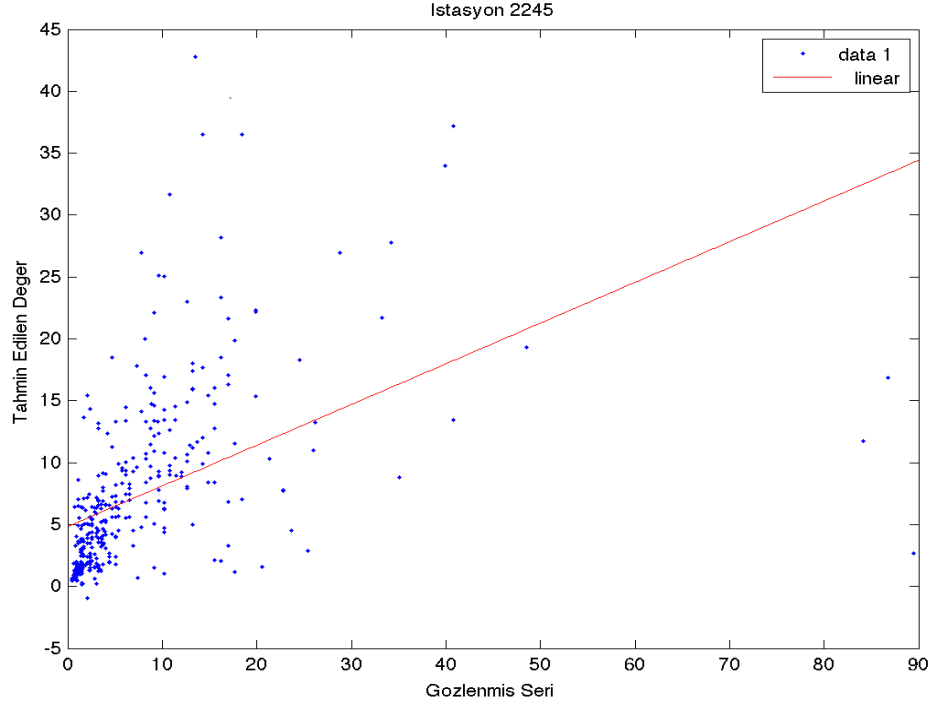


**Şekil 8.3a(devam) :** Doğu Karadeniz Havzası Öngörü Performansı İstasyon (2202,2215,2218, 2228).

Öngörü performansını değerlendirmek için hesaplanan Korelasyon Katsayısı ( $R^2$ ); serinin kendisinin tahmin serisine karşı çizilen grafikleri sonucu elde edilmiştir (Şekil 8.3). Grafiklerden elde edilen sonuçların, istasyonların, seçilen öngörü yöntemine uyumlulukta farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. İstasyon 2215:  $R^2=0.96$  gibi çok başarılı bir değerle öngörü performansı gösterirken 2228 numaralı istasyon,  $R^2=0.45$  ile, başarısız sayılacak bir davranış göstermiştir.

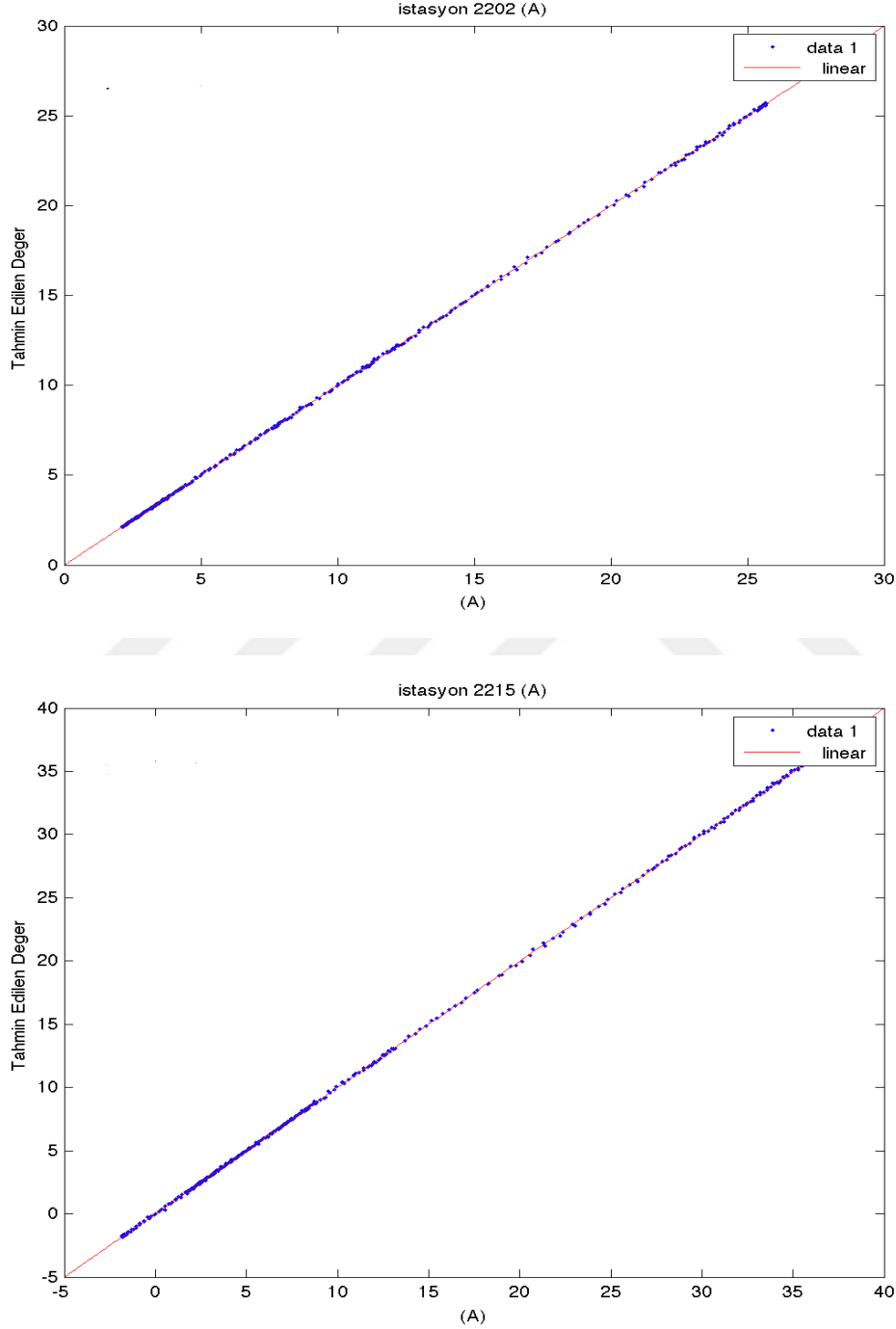


**Şekil 8.3b** : Doğu Karadeniz Havzası Öngörü Performansı İstasyon (2232,2233,2245,2247).



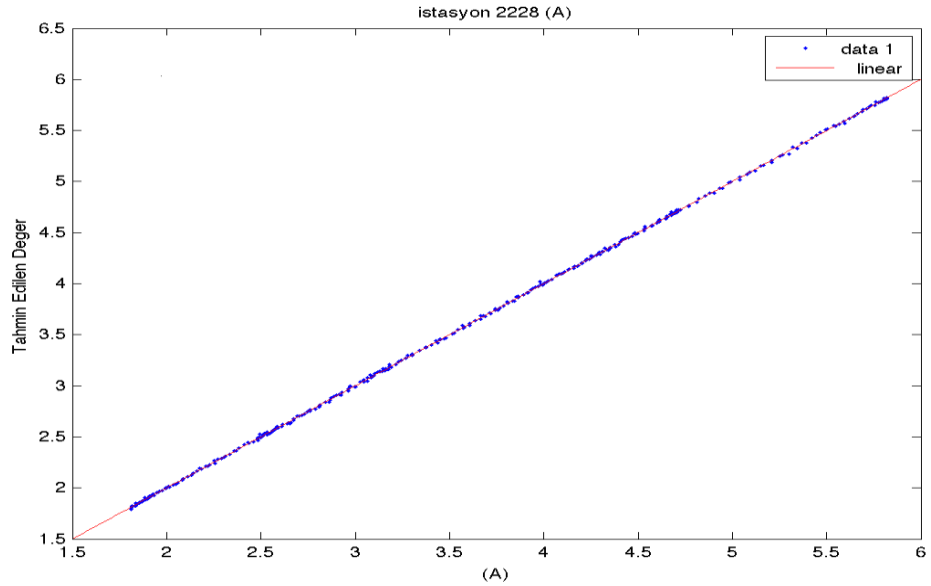
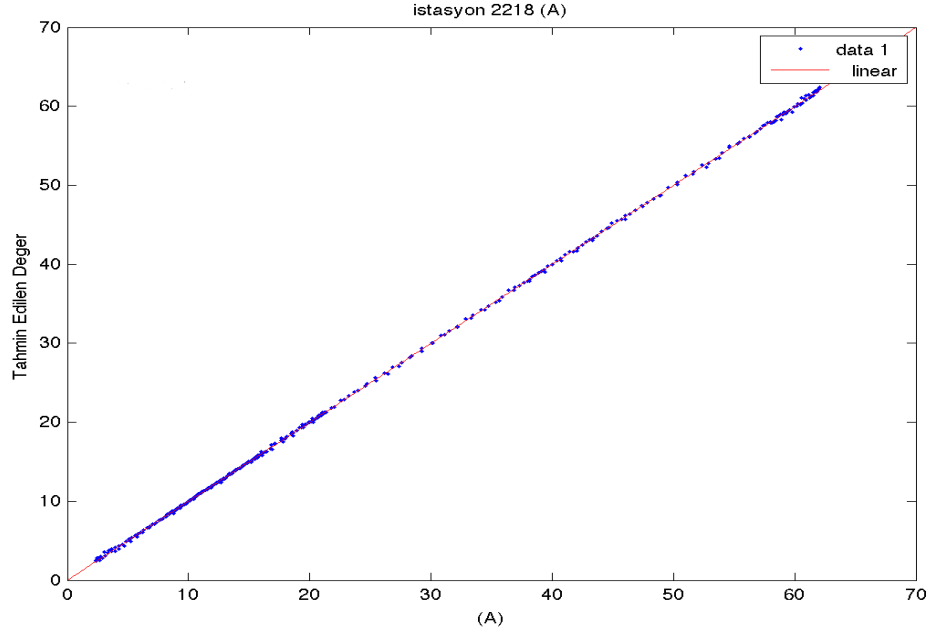
**Şekil 8.3b(devam)** : Doğu Karadeniz Havzası Öngörü Performansı İstasyon (2232,2233,2245,2247).

Öngörü performansını değerlendirmek için hesaplanan Korelasyon Katsayısı ( $R^2$ ); serinin kendisinin tahmin serisine karşı çizilen grafikleri sonucu elde edilmiştir (Şekil 8.3). Grafiklerden elde edilen sonuçların, istasyonların, seçilen öngörü yöntemine uyumlulukta farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.



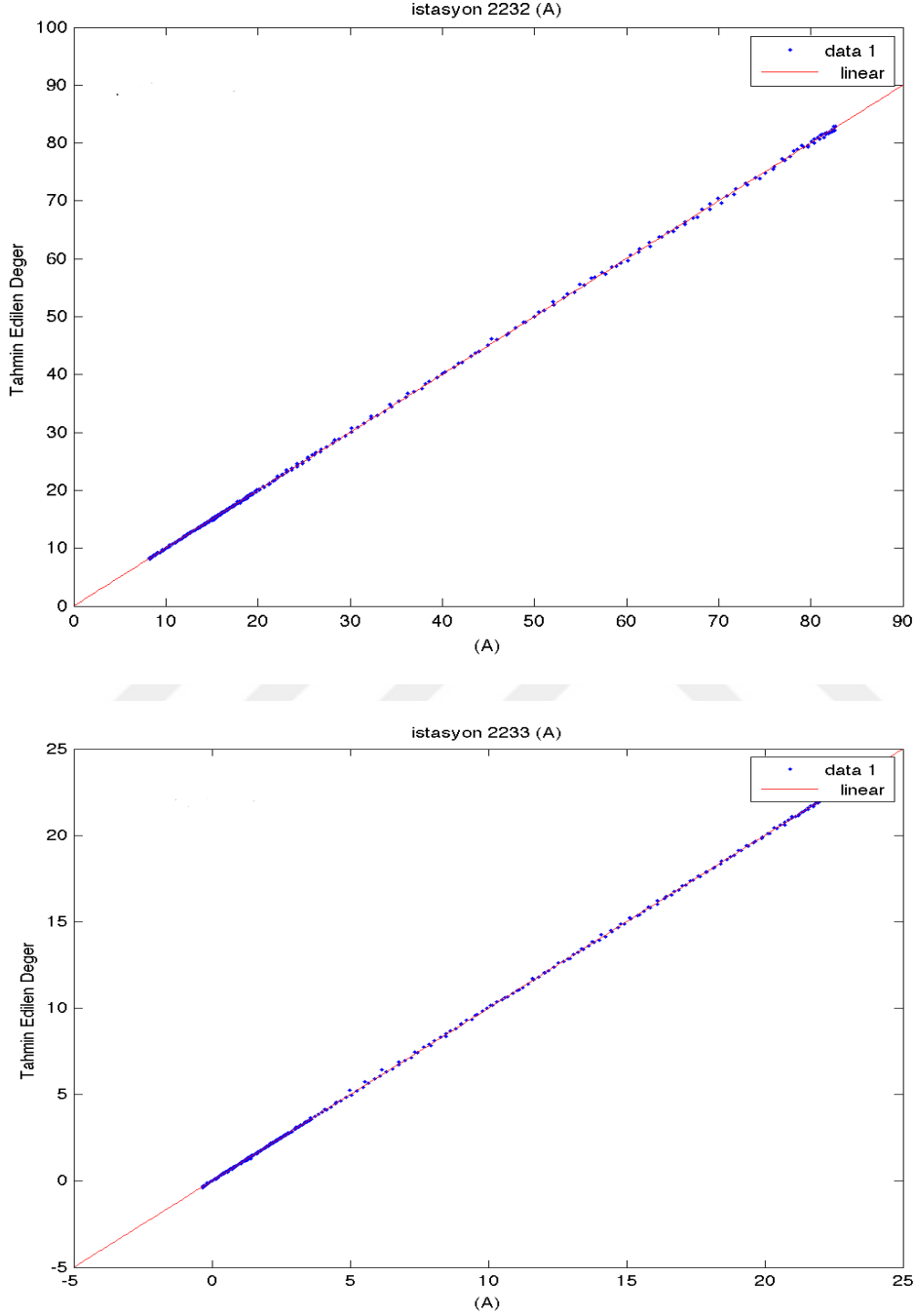
**Şekil 8.4a** : Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı İstasyon (2202,2215,2218,2228)

İstasyon 2215;  $R^2=0.96$  gibi çok başarılı bir değerle öngörü performansı gösterirken 2228 numaralı istasyon,  $R^2=0.45$  ile, başarısız sayılacak bir davranış göstermiştir. 2245 numaralı istasyonun debi gidiş eğrileri gözden geçirildiğinde çok fazla pik değer göze çarpmaktadır.

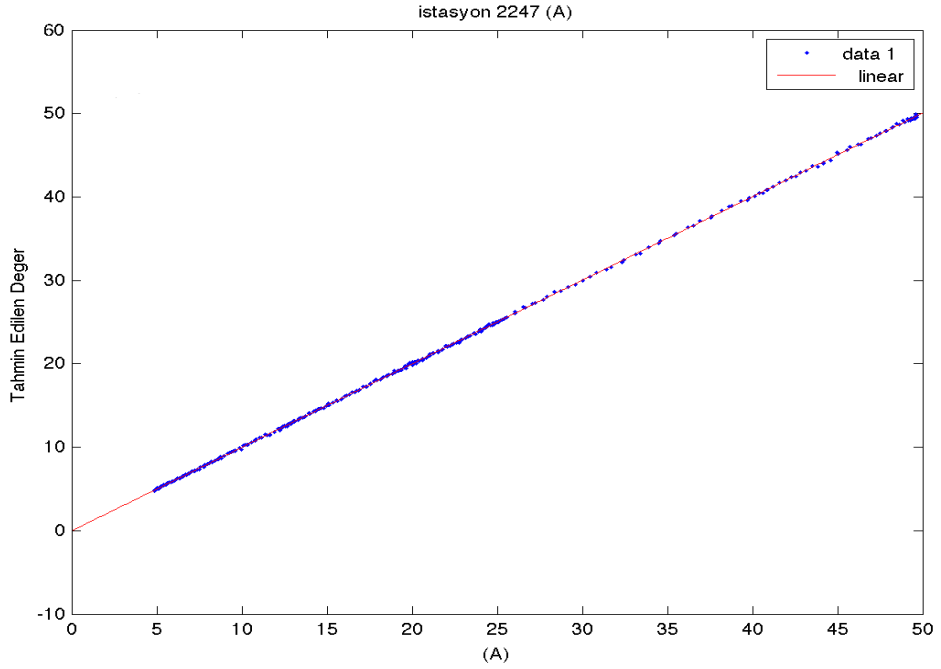
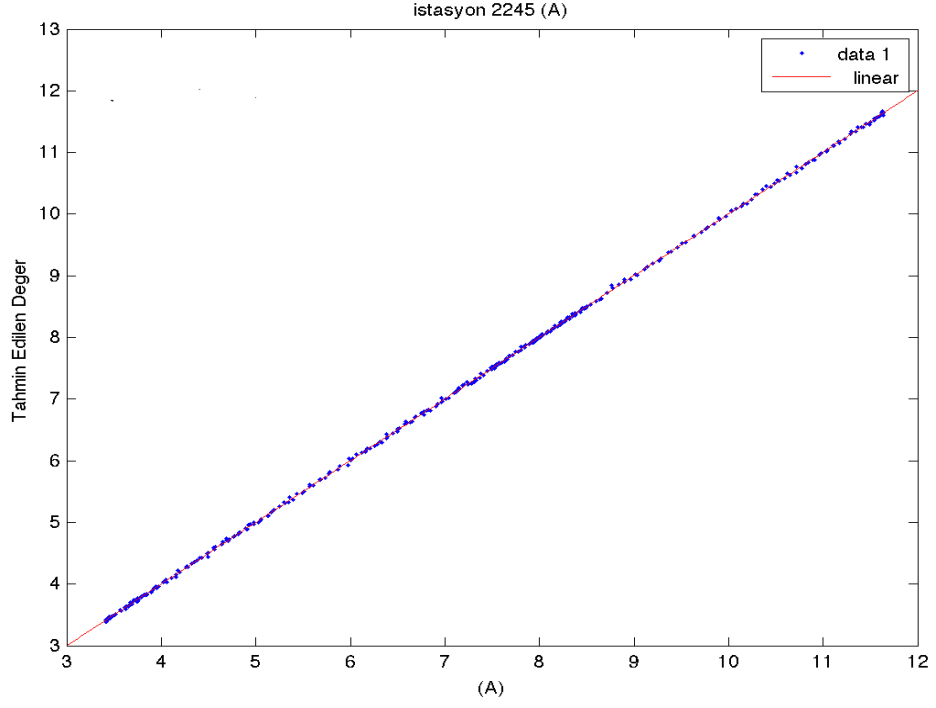


**Şekil 8.4a(devam) : Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı İstasyon (2202,2215,2218,2228).**

Uygulanan yöntemin başarısızlığının sebebinin pik değerler olup olmadığı, istasyona ait verinin Dalgacık Analizi neticesinde elde edilmiş, yaklaşım (A) parçası performansına göre karar verilecektir (Şekil 8.4a, Şekil 8.4b).



**Şekil 8.4b** : Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı İstasyon (2232,2233,2245,2247).



**Şekil 8.4 (devam) :** Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı İstasyon (2232,2233,2245,2247).

Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen A parçası değerlerine uygulanan Lokal Öngörü Yöntemi ile öngörü sonuçları Şekil 8.4'te görülmektedir. Verilerin orijinal halleri üzerinde yapılan uygulamada istasyon 2245'te korelasyon katsayısının, düşük değerde çıktığı gözlenmişti ( $R^2=0.45$ ). Aynı istasyona ait A paçasında bu değer 1 değerini almıştır. Bu durum, serilerin içindeki salınım ve çalkantıların öngörü performansını düşürdüğünün bir neticesi olarak yorumlanabilir. Öngörü performansını arttırmak için, serilere uygulanacak ön işlemlerden, Dalgacık Analizi'nin başarılı performans gösterdiği, daha önce Çoruh Havzası istasyonlarında da gözlenmiştir. Diğer uygulama havza sonuçları da, benzer özellik göstermekte ve seriler, Lokal Öngörü yöntemine uyum göstererek başarılı performans ile öngörülebilmektedir. Dalgacık Analizi sonuçları ise, serilerin orijinal hallerine göre çok daha başarılı performans göstermektedir.

### 8.2.1 Yeşil Irmak Havzası

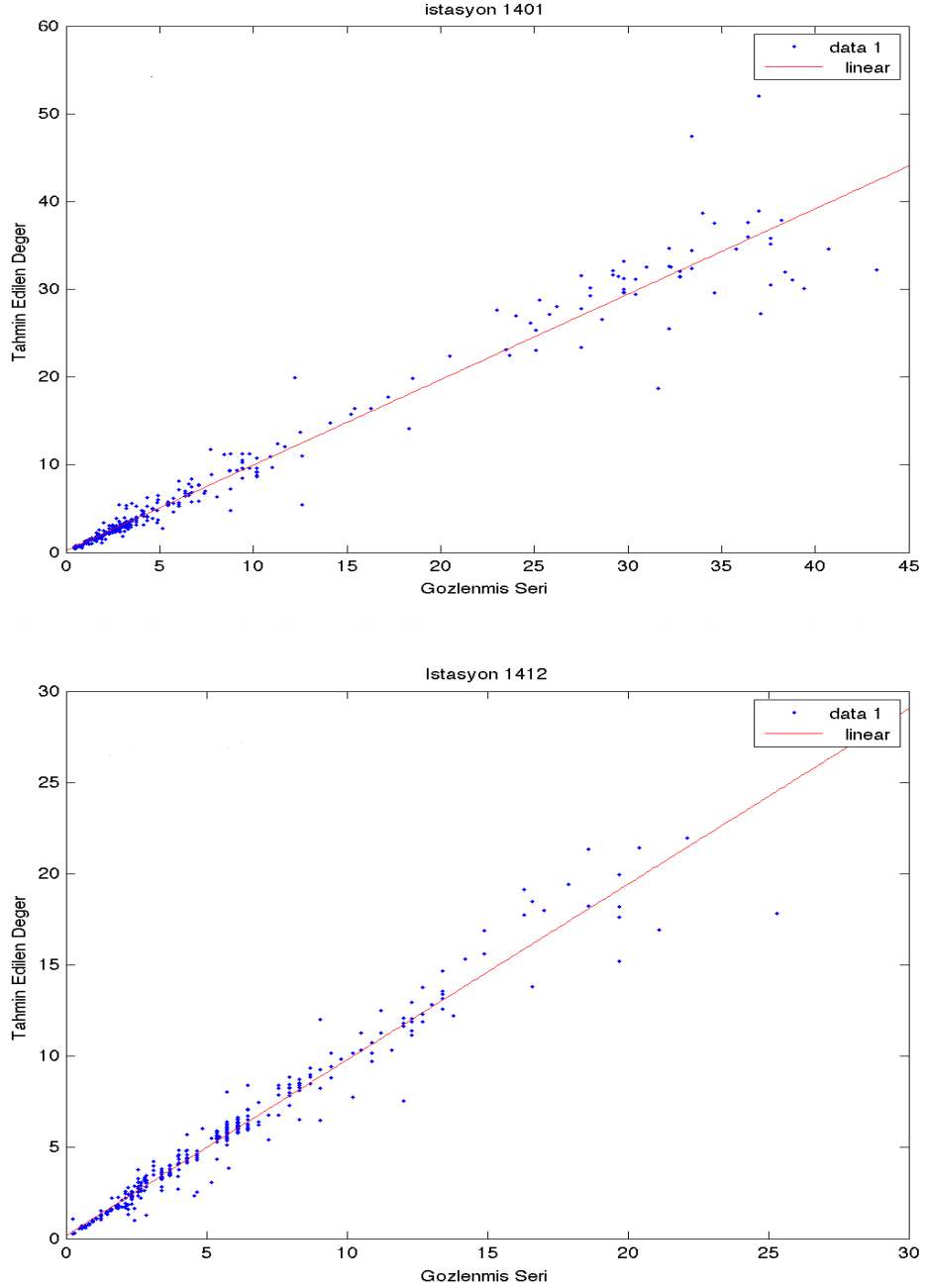
Yeşil Irmak Havzasında yer alan 4 istasyona ait, veri kümesi üzerinde yapılan incelemede serilerin öğrenme için kullanılan %90'lık bölümü için yeniden faz uzayı kurulmuş ve geri kalan %10'luk kısım öngörü için ayrılmıştır. Çizelge 8.3'te gerek serinin orijinal hali gerek Dalgacık analizi neticesinde elde edilen yaklaşım (A) parçası için, denenmiş olan gömme boyutlarına ait NRMSE (Eşitlik (5.21)) gösterilmektedir. Hatanın en düşük olduğu boyut uygun gömme boyutu olarak seçilmiş ve bu boyut için öngörü yapılmıştır.

**Çizelge 8.3:** Yeşil Irmak Havzası İstasyonları Çeşitli Gömme Boyutları için NRMSE

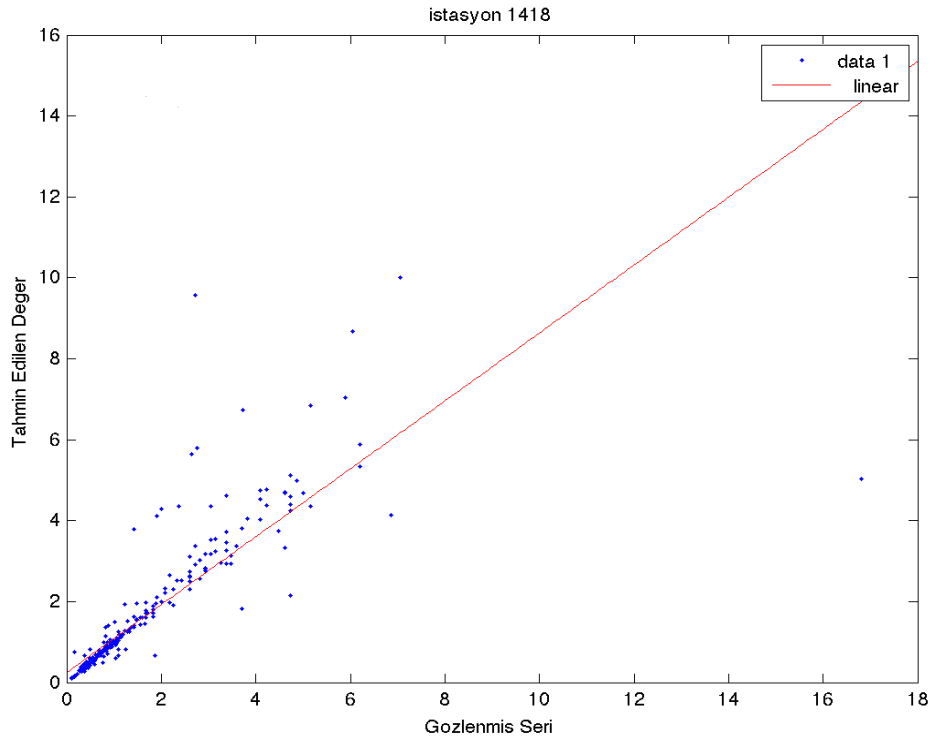
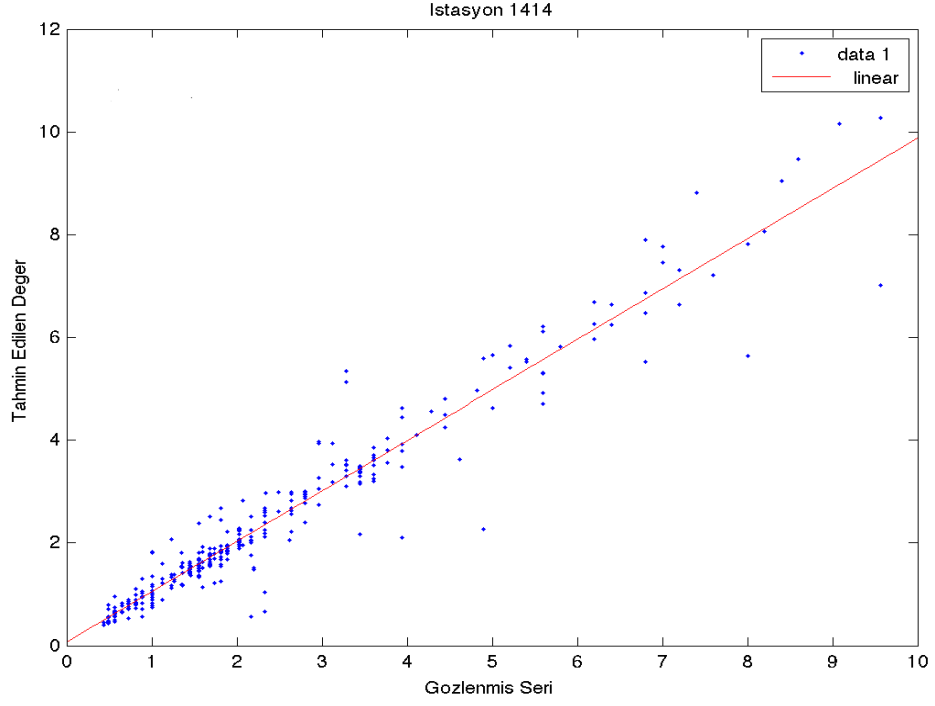
	NRMSE 1401 (Seri)	NRMS E 1401 (A)	NRMSE 1412 (Seri)	NRMS E 1412 (A)	NRMSE 1414 (Seri)	NRMSE 1414 (A)	NRMSE 1418 (Seri)	NRMSE 1418 (A)
Gömme Boyutu								
2	0.0053	<b>0.0005</b>	0.011	<b>0.023</b>	0.007	<b>0.0026</b>	0.066	<b>0.008</b>
3	<b>0.0045</b>	0.0006	0.009	0.030	0.007	0.0026	0.069	0.013
4	0.0049	0.0009	0.010	0.030	<b>0.006</b>	0.0027	<b>0.056</b>	0.013
5	0.0048	0.0010	<b>0.008</b>	0.031	0.007	0.0027	0.061	0.013
6	0.0051	0.0010	0.009	0.032	0.008	0.0027	0.061	0.014
7	0.0052	0.0011	0.009	0.032	0.008	0.0027	0.067	0.015
8	0.0049	0.0012	0.009	0.033	0.008	0.0028	0.068	0.015
9	0.0056	0.0013	0.010	0.033	0.007	0.0028	0.068	0.017
10	0.0052	0.0013	0.012	0.033	0.008	0.0028	0.066	0.017



Çizelge 8.3'ten de gözlenebileceği üzere; NRMSE serinin orijinal halinde genel olarak gömme boyutu ile orantılı olarak yükselişe geçtiği halde, belirli boyutlarda düşük değerlerine nazaran düşük değerler almaktadır. Bu nispeten düşük NRMS'e karşılık gelen gömme boyutu; öngörünün yapılması için seçilen uygun gömme boyutu olarak belirlenmiş ve çizelge üzerinde de işaretlenmiştir. Bu boyutta yapılan öngörüğü gösteren grafikler EK C'de gözlenebilir.



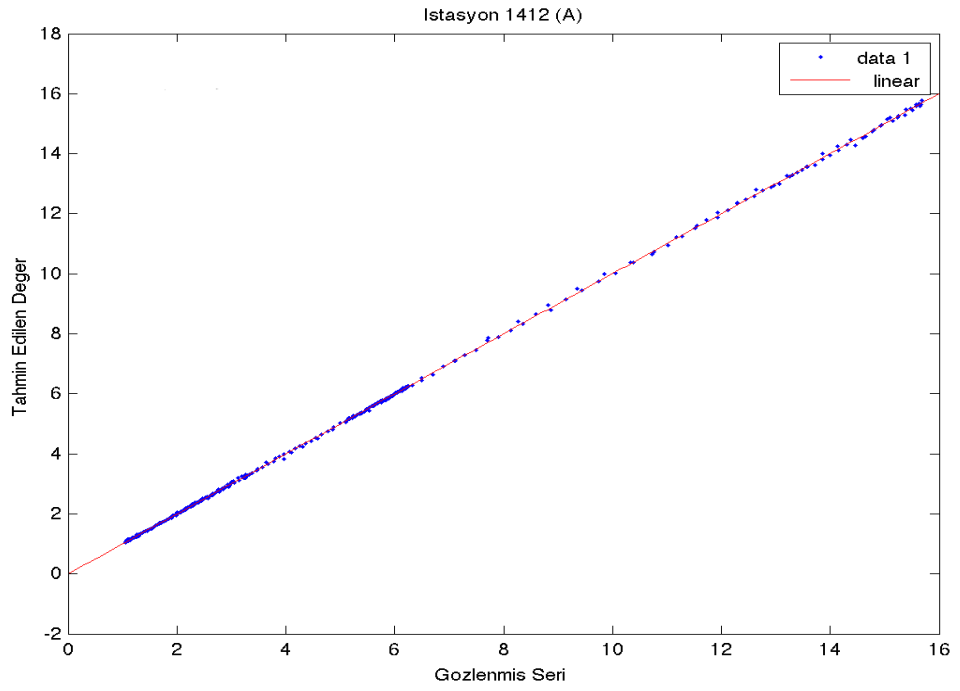
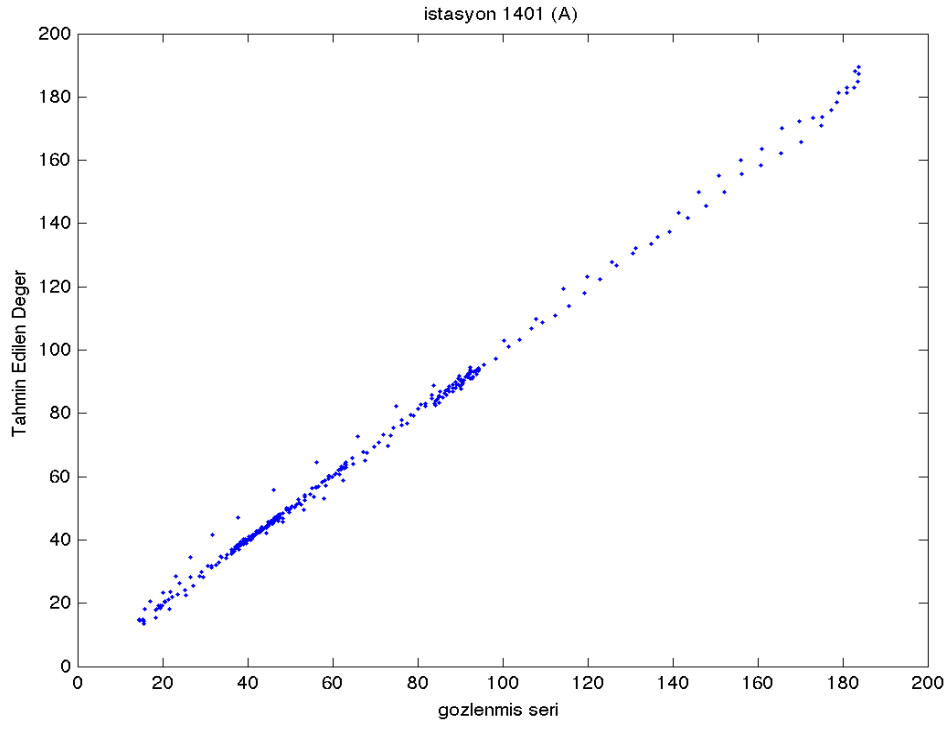
Şekil 8.5 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonları Öngörü Performansı.



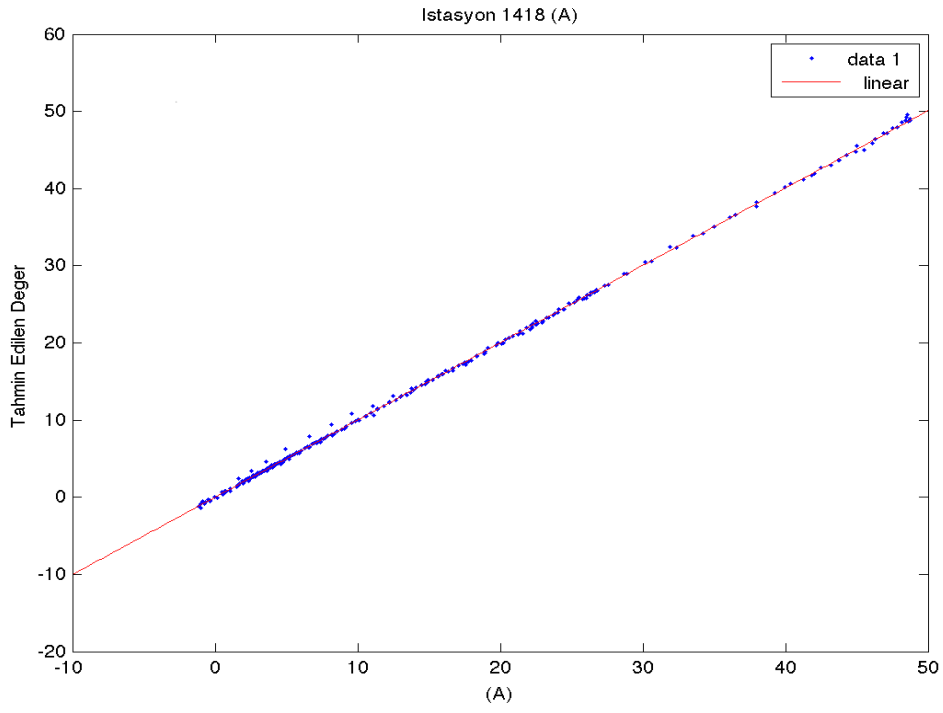
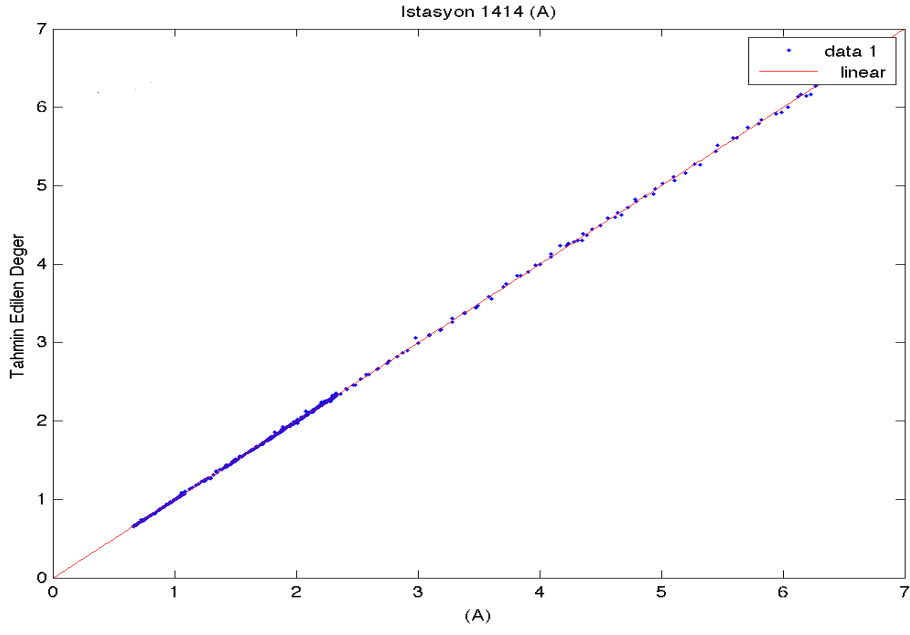
**Şekil 8.5 (devam) :** Yeşil Irmak Havzası Öngörü Performansı.

Seriden Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen A parçasına ait RMS'lerin (Çizelge 8.3), gömme boutu ile sürekli olarak artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu sebeple, A parçası için uygun gömme boyutu, bütün istasyonlarda 2 olarak

seçilerek öngörü yapılmıştır. A parçasına ait öngörü performansı grafikleri Şekil 8.6'da görülebilmektedir.



**Şekil 8.6 :** Yeşil Irmak Havzası A Parçası Öngörü Performansı.



Şekil 8.6(devam) : Yeşil Irmak Havzası A Parçası Öngörü Performansı.

Şekil 8.6'dan gözlenebileceği üzere, uygun gömme boyutlarında tahmin serisi, serinin kendisi ile birebir uyumlu hareket göstermiştir. Öngörünün performansını değerlendirmek için hesaplanan Korelasyon Katsayısı ( $R^2$ ), serinin Dalgacık Analizi sonucunda elde edilen parçanın (A), seçilen yöntem olan Lokal Öngörü için  $R^2 > 0.99$  çıkarak nerdeyse mükemmel yakın başarımla elde edilmiştir.

## 8.2.2 Batı Karadeniz Havzası

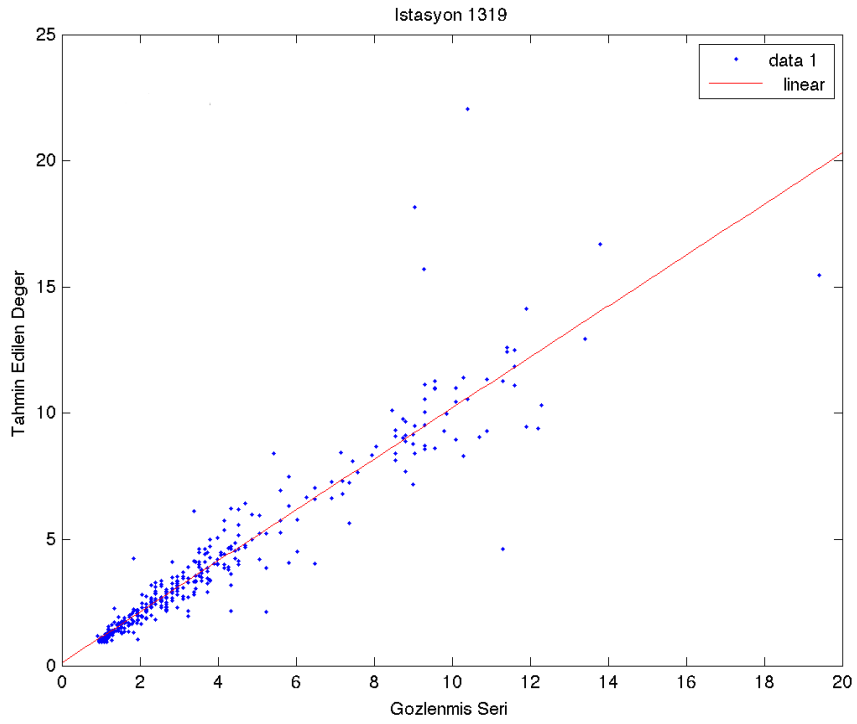
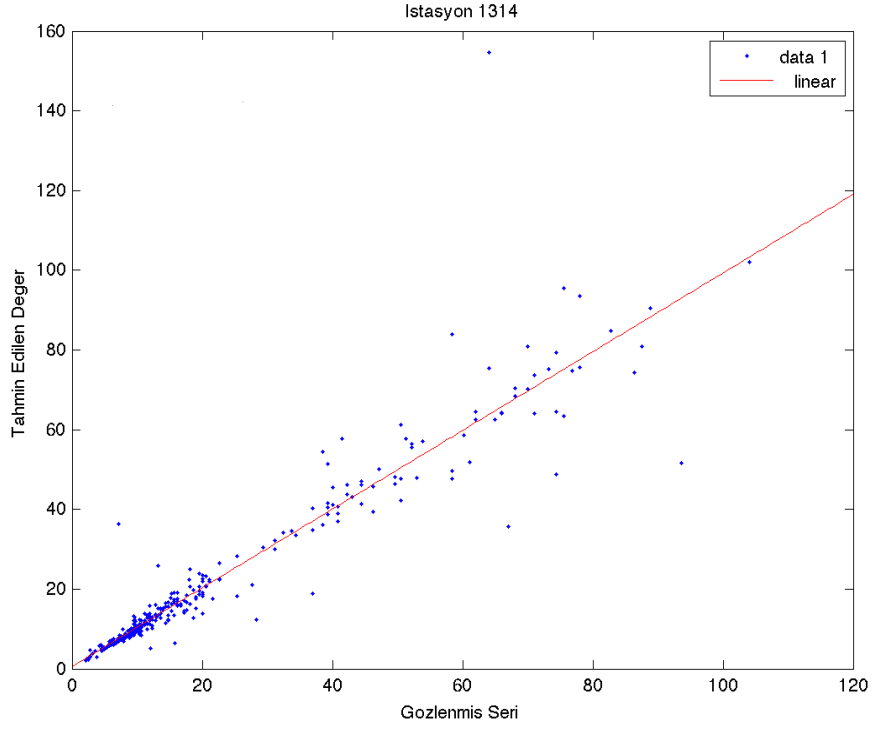
Batı Karadeniz Havzası'nda yer alan 6 istasyona ait, veri kümesi üzerinde yapılan incelemede serilerin öğrenme için kullanılan %90'lık bölümü için yeniden faz uzayı kurulmuş ve geri kalan %10'luk kısım öngörü için ayrılmıştır.

**Çizelge 8.4:** Batı Karadeniz Havzası Çeşitli Gömme Boyutları için NRMSE

Gömm e Boyutu	NRMSE 1314 (Seri)	NRMSE 1314 (A)	NRMSE 1319 (Seri)	NRMSE 1319 (A)	NRMSE 1327 (Seri)	NRMSE 1327 (A)	NRME 1331 (Seri)	NRME 1331 (A)
2	0.010	<b>0.007</b>	<b>0.006</b>	<b>0.01</b>	0.014	<b>0.007</b>	0.183	<b>0.001</b>
3	<b>0.009</b>	0.010	0.028	0.01	<b>0.013</b>	0.009	0.223	0.002
4	0.011	0.011	0.026	0.02	0.018	0.010	<b>0.173</b>	0.003
5	0.011	0.012	0.026	0.02	0.021	0.011	0.202	0.004
6	0.012	0.013	0.026	0.03	0.026	0.012	0.203	0.004
7	0.012	0.013	0.027	0.03	0.016	0.013	0.200	0.004
8	0.012	0.012	0.028	0.04	0.017	0.014	0.204	0.005
9	0.012	0.013	0.029	0.03	0.018	0.016	0.203	0.005
10	0.012	0.013	0.026	0.05	0.019	0.016	0.023	0.005

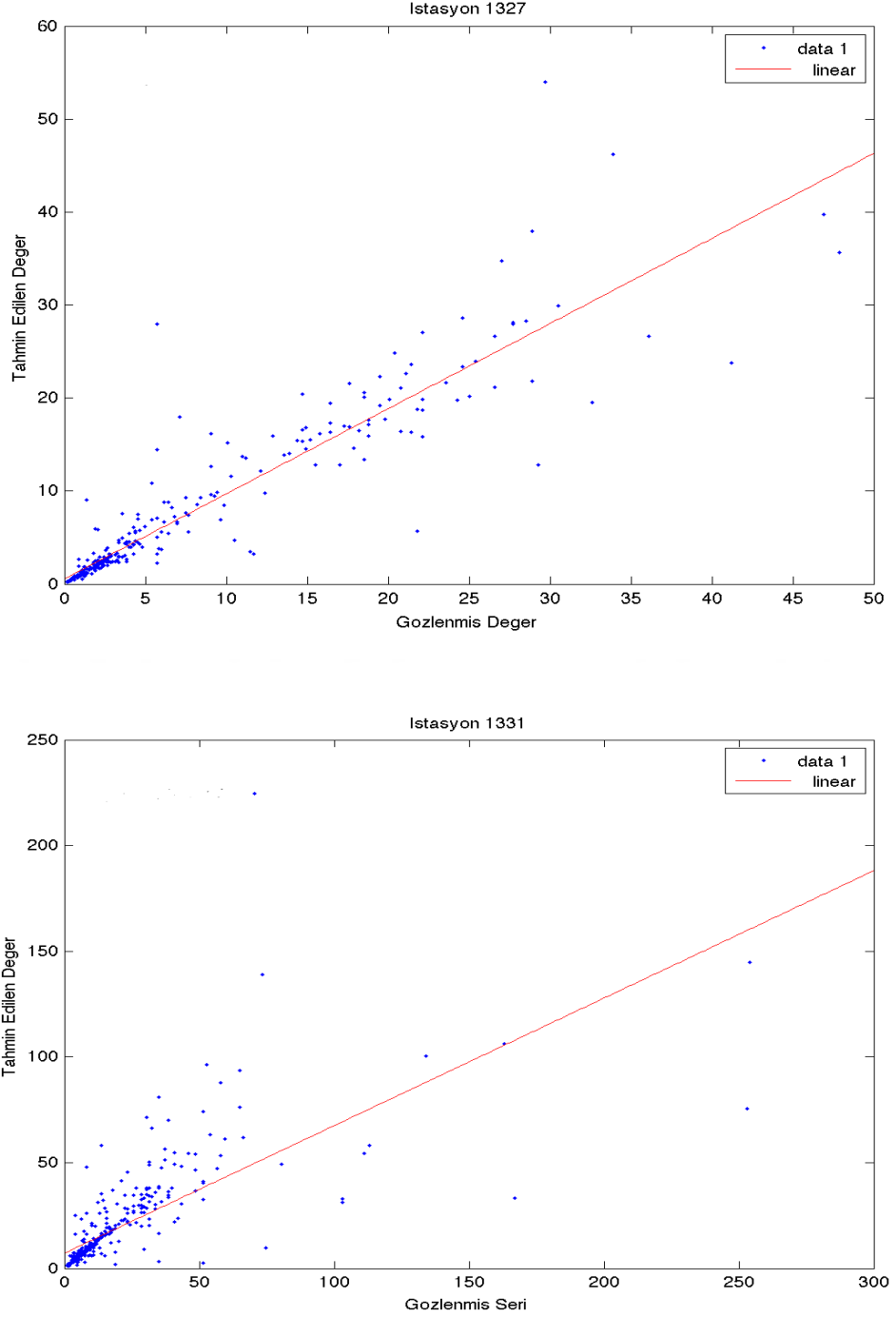
Gömm e Boyutu	NRMSE 1334 (Seri)	NRMSE 1334 (A)	NRMSE 1335 (Seri)	NRM E 1335 (A)
2	<b>0.016</b>	<b>0.007</b>	0.067	<b>0.005</b>
3	0.019	0.007	<b>0.064</b>	0.007
4	0.021	0.008	0.069	0.009
5	0.020	0.009	0.069	0.010
6	0.023	0.009	0.069	0.010
7	0.024	0.009	0.070	0.010
8	0.024	0.009	0.070	0.010
9	0.024	0.009	0.070	0.010
10	0.025	0.010	0.070	0.010

Çizelge 8.4'te gerek serinin orijinal hali gerek Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen yaklaşım (A) parçası için, denenmiş olan gömme boyutlarına ait NRMSE (Eşitlik (5.21)) gösterilmektedir. Hatanın en düşük olduğu boyut uygun gömme boyutu olarak seçilmiş ve bu boyut için öngörü yapılmıştır.



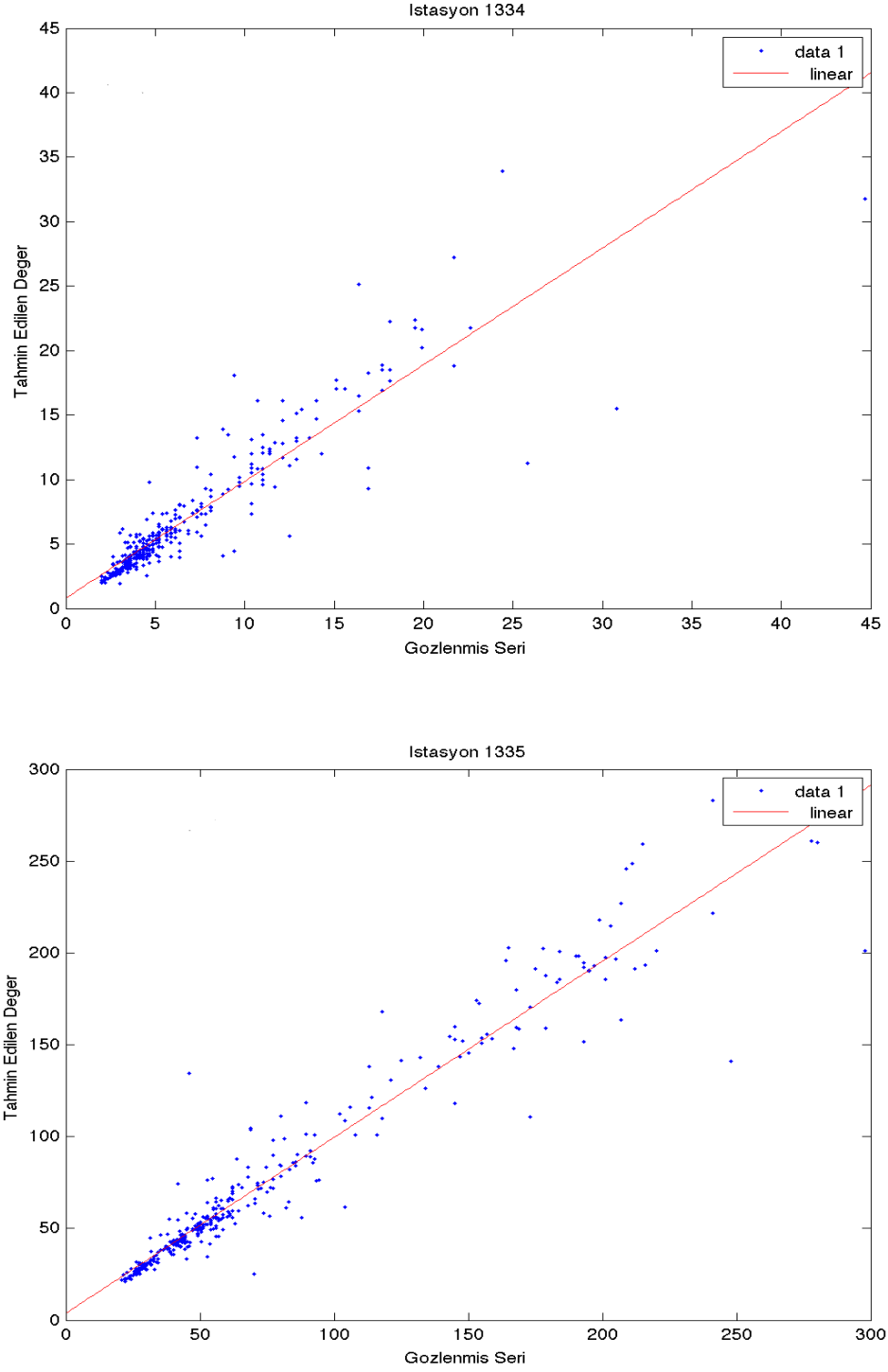
**Şekil 8.7a :** Yeşil Irmak Havzası A Parçası Öngörü Performans İstasyon (1314, 1319, 1327, 1331).

Çizelge 8.4'te gözlenebileceği üzere; NRMSE serinin orijinal halinde genel olarak gömme boyutu ile orantılı olarak yükselişe geçtiği halde, belirli boyutlarda düşük değerlerine nazaran düşük değerler almaktadır.



**Şekil 8.7a (devam) :** Yeşil Irmak Havzası A Parçası Öngörü Performansı İstasyon (1314, 1319, 1327, 1331).

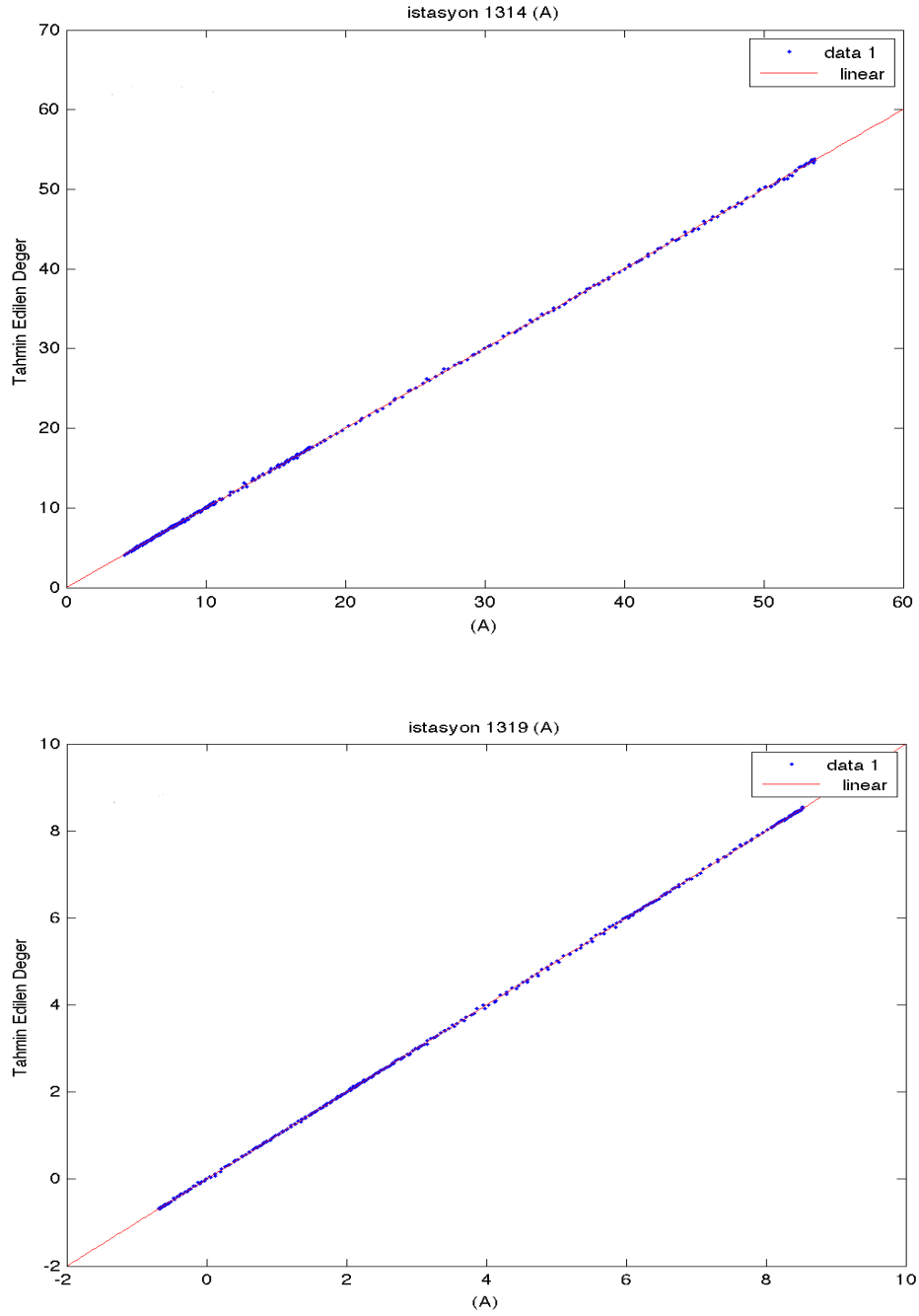
Nispeten düşük NRMSE'ye karşılık gelen gömme boyutu; öngörünün yapılması için seçilen uygun gömme boytu olarak belirlenmiş ve çizelge üzerinde de işaretlenmiştir. Bu boyutta yapılan öngörü gösteren grafikler EK C'de görülmektedir.



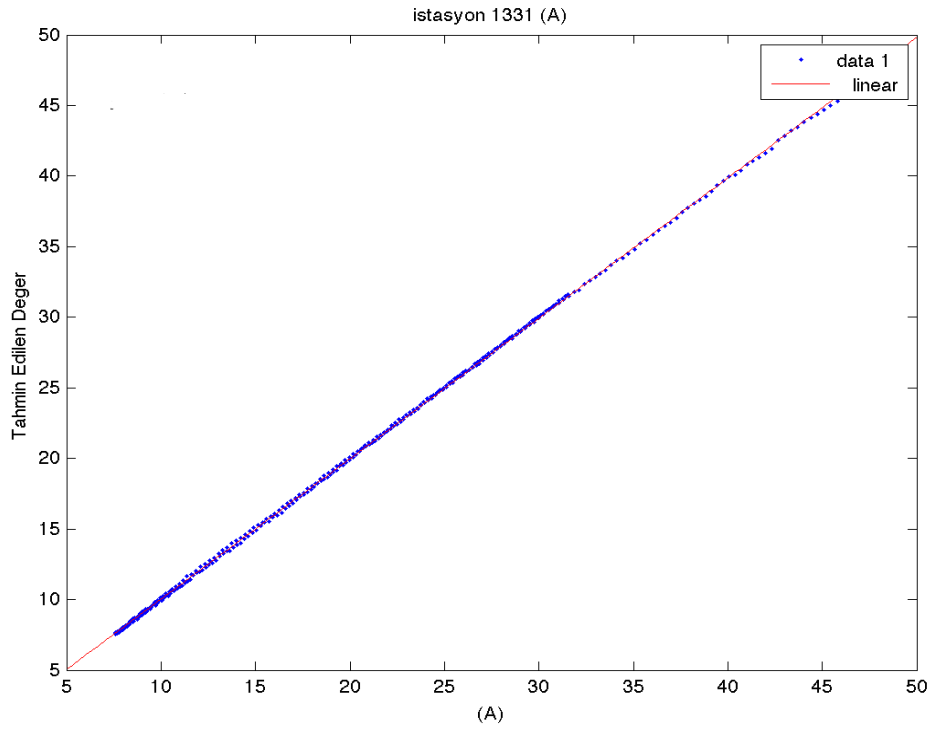
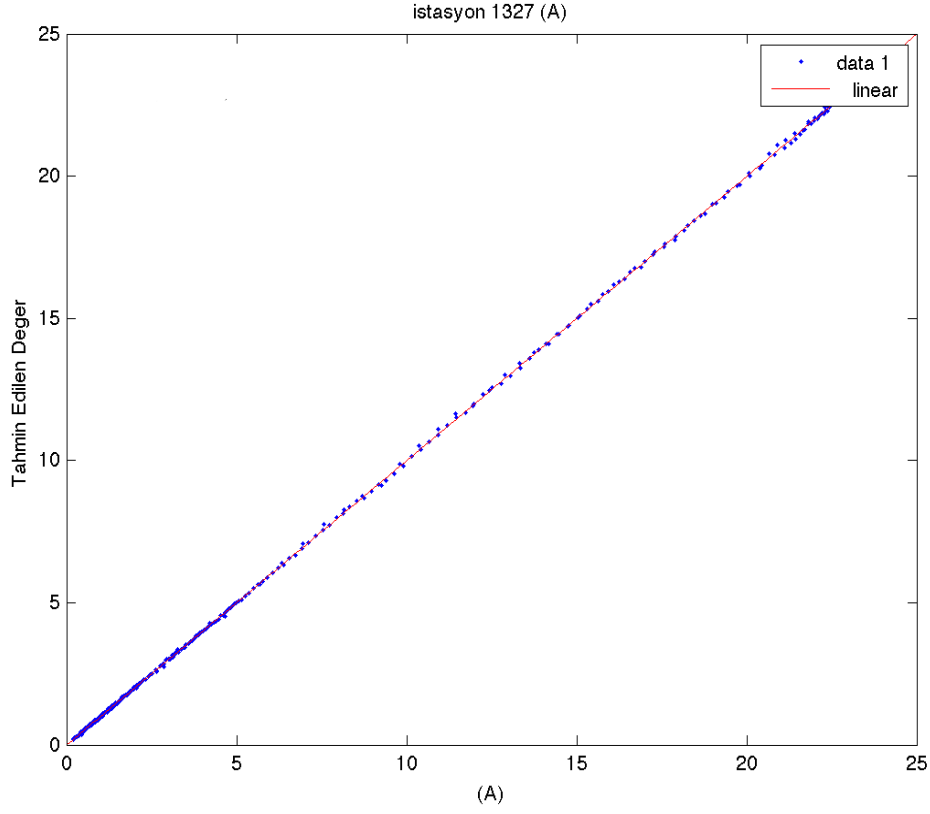
**Şekil 8.7b** : Batı Karadeniz Havzası A Parçası Öngörü Performansı İstasyon (1334,1335).



Seriden ve dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçasına ait NRMSE'lerin (Çizelge 8.4), gömme boutu ile sürekli olarak artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu sebeple, A parçası için uygun gömme boyutu, bütün istasyonlarda 2 olarak seçilerek öngörü yapılmıştır. A parçasına ait öngörü performansı grafikleri Şekil 8.8'de gözlenebilmektedir.

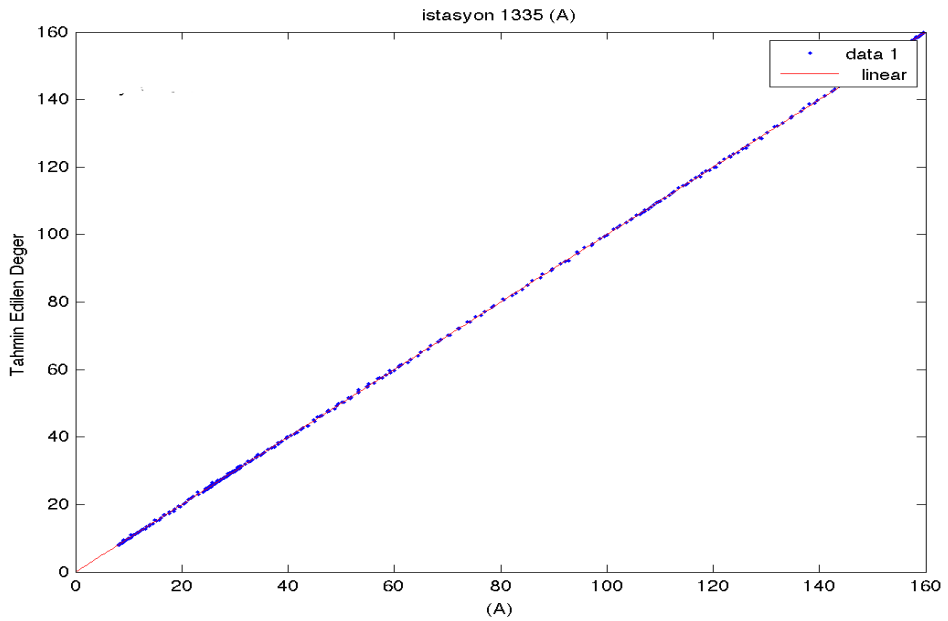
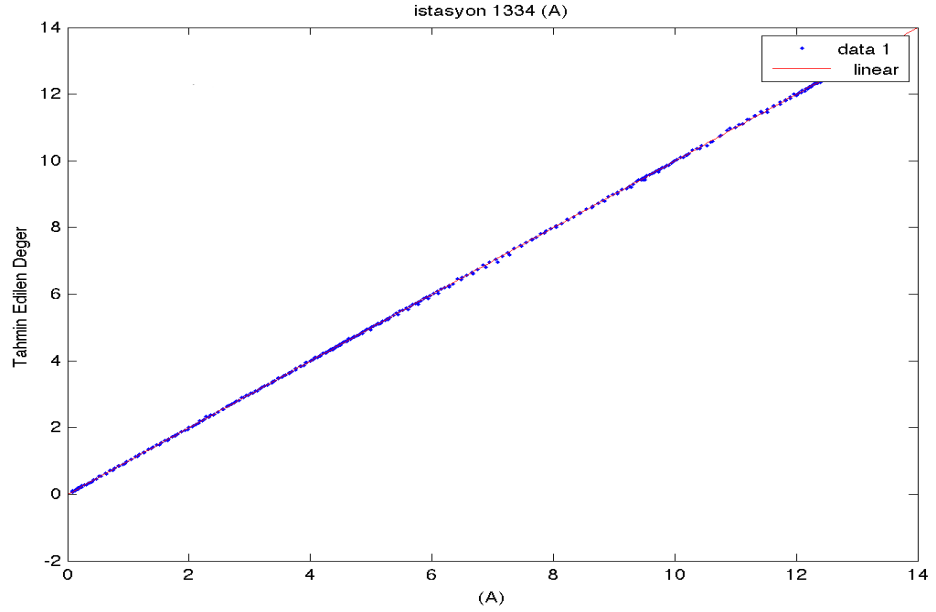


**Şekil 8.8a** : Batı Karadeniz Havzası A Parçası için Öngörü Performansı İstasyon (1314,1319,1327,1331).



**Şekil 8.8 (devam) :** Batı Karadeniz Havzası A Parçası için Öngörü Performansı İstasyon (1314,1319,1327,1331).

Şekil 8.8'den gözlemlenebileceği üzere, uygun gömme boyutlarında tahmin serisi, serinin kendisi ile birebir uyumlu hareket göstermiştir. Öngörünün performansını değerlendirmek için hesaplanan korelasyon katsayısı  $R^2$  (Eşitlik (5.22)), serinin dalgacık analizi sonucunda elde edilen parçanın (A), seçilen yöntem olan lokal öngörü için  $R^2 > 0.9$  değeri ile nerdeyse mükemmel yakın başarı elde edilmiştir.



**Şekil 8.8b** : Batı Karadeniz Havzası A Parçası için Öngörü Performansı İstasyon (1334,1335).

### 8.3 ARX Modeli ve Öngörü

Çalışmanın bu bölümünde; havzalara ait istasyonlardan toplanan veri grupları ile ARX yapısında modeller çıkarılmıştır. Lokal öngörü yöntemi ile yapılan öngörü performansının karşılaştırmak için seçilen model; literatürdeki diğer çalışmalarda da tercih edilen AR modeli ve onungeliştirilmiş türevlerinden ARX modeli olarak tercih edilmiştir. Uygulanan ARX modelinin ARMAX modellerden, sonsuz adım öngörü başarısı oranlarında %20-25 daha iyi sonuç vermesi üzerine, sadece ARX modeller üzerine yoğunlaşmıştır (Ljung, 1999). Model kurulumu sürecinde ilk olarak, gözlenen regresyon modelindeki bilinmeyen parametreler ve bu parametrelerin kovaryans matrisleri en küçük kareler metodu ile tahmin edilmiştir. Çeşitli mertebeler seçilerek,  $R^2$  yardımı ile en uygun model mertebesi seçilmiştir. Artan model mertebeleri (model parametreleri sayısı) için elde edilen öngörü uyumları incelenmiş, model parametre sayısının en uygun değeri, dikkate değer bir uyum artışı sağlayan en yüksek değer olarak alınmıştır

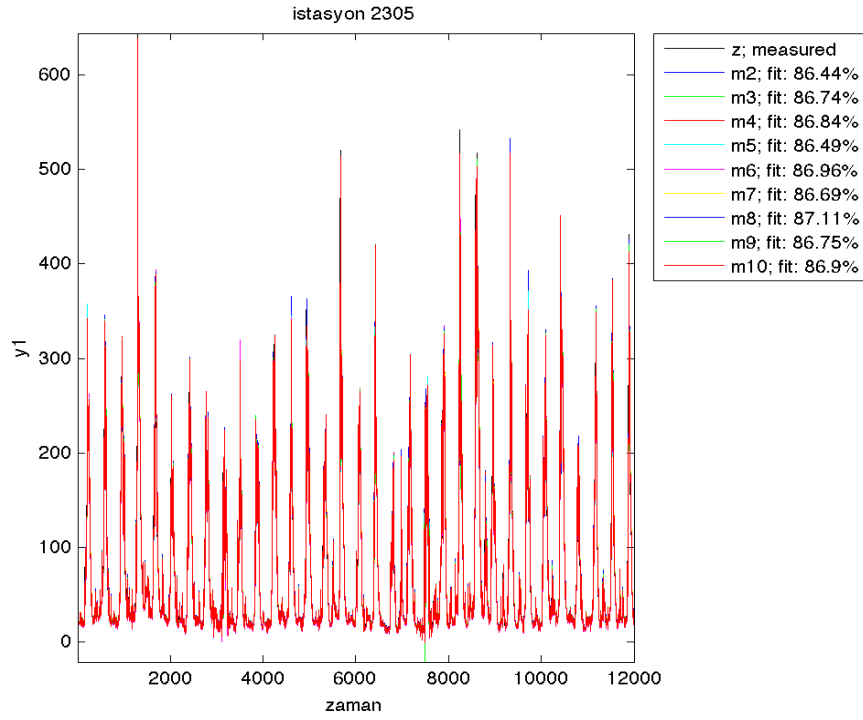
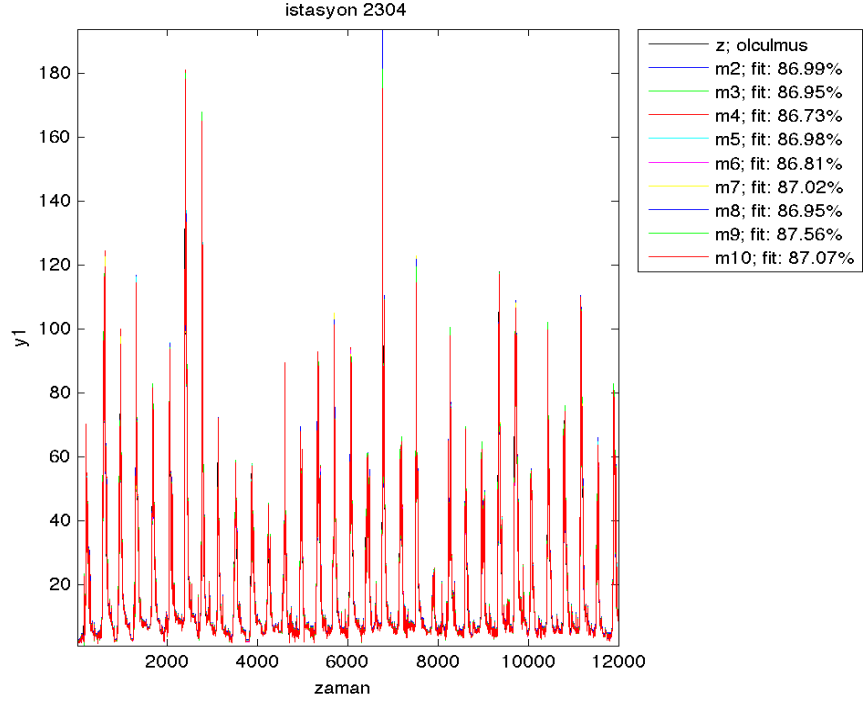
#### 8.3.1 Çoruh Havzası

$A(q)$  ve  $G(q)$ ,  $q^{-1}$  geciktirme işlemcisine bağlı olarak tanımlanan ARX polinomları daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Uygun görülen mertebe ile oluşan polinom katsayıları; her bir istasyon için Çizelge 8.5'te gözlenebilmektedir.

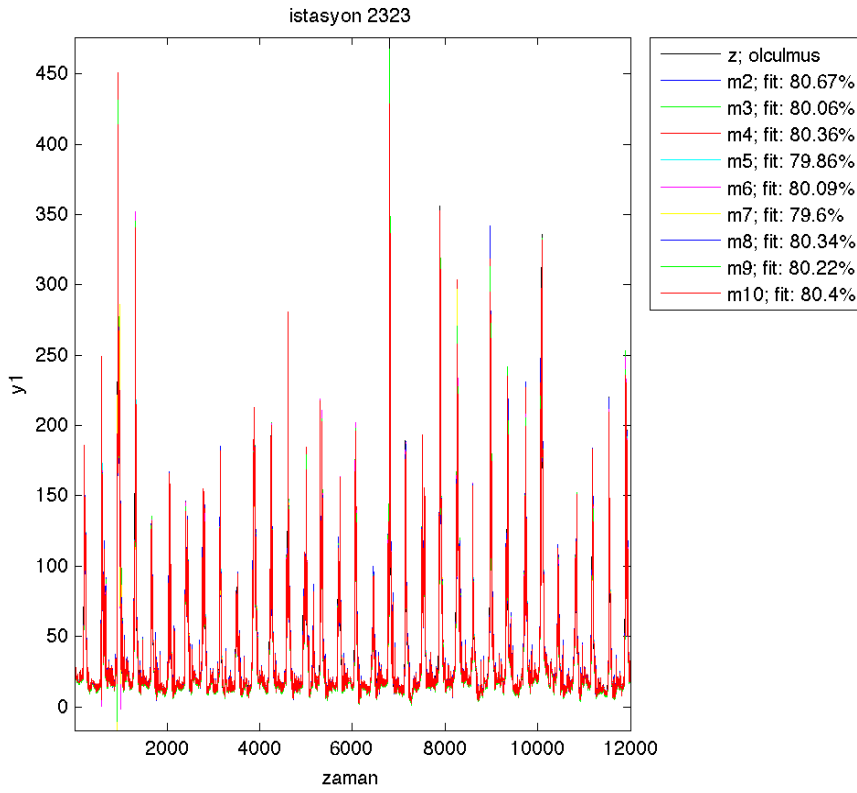
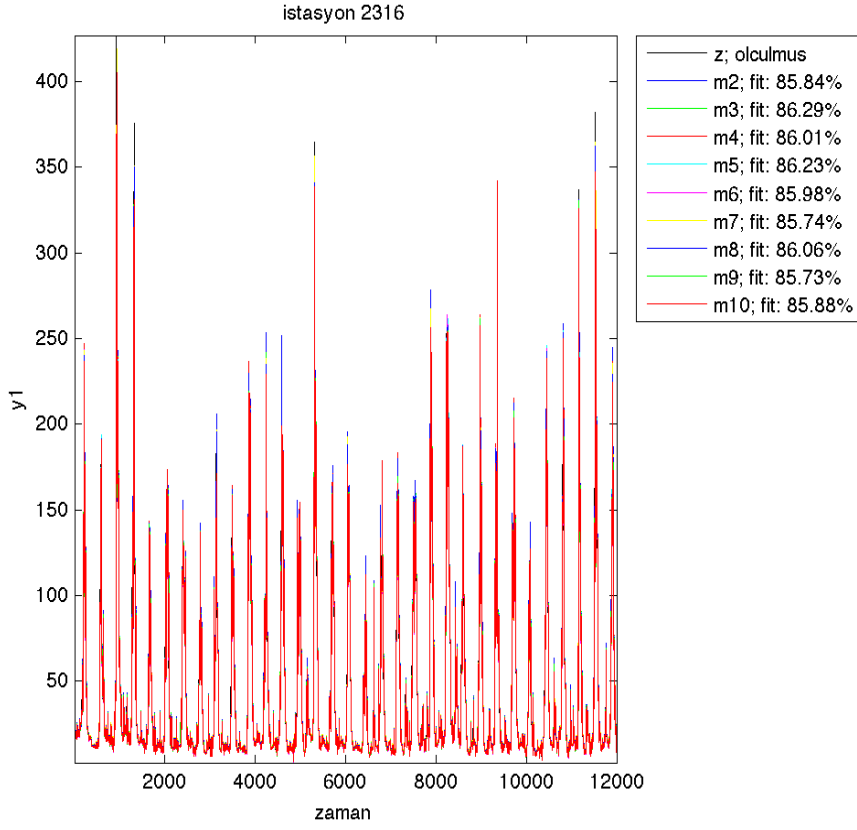
**Çizelge 8.5:** Çoruh Havzası İstasyonlarına Ait ARX Modelleri

İstasyon	Model	$R^2$	FPE
2304	$A(q) = 1 + a_1q^1 + \dots + a_{na}q^{na}$		
2304 (A)	$A(q) = 1 - 1.34q^{-1} + 0.43q^{-2}$	0.86	7.16
2305	$A(q) = 1 - 2.59q^{-1}$	0.99	0.016
2305(A)	$A(q) = 1 - 1.35q^{-1} + 0.52q^{-2} - 0.124q^{-3}$	0.86	115.03
2316	$A(q) = 1 - 2.59q^{-1}$	0.99	0.02
2316(A)	$A(q) = 1 - 1.36q^{-1} + 0.55q^{-2} - 0.193q^{-3}$	0.86	50.13
2323	$A(q) = 1 - 2.59q^{-1}$	0.99	0.096
2323(A)	$A(q) = 1 - 1.27q^{-1} + 0.302q^{-2} + 0.02q^{-3}$	0.80	77.11
	$A(q) = 1 - 2.59q^{-1}$	0.99	0.001

Havzaya ait verilerden ve verilerin dalgacık analizi neticesinde elde edilmiş A parçaları, ayrı ayrı kurulan modelde, ilk olarak uygun model mertebesinin seçilmesi için; (m=1-10) arasında çeşitli model mertebeleri için korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) hesaplanmıştır (Şekil 8.9).

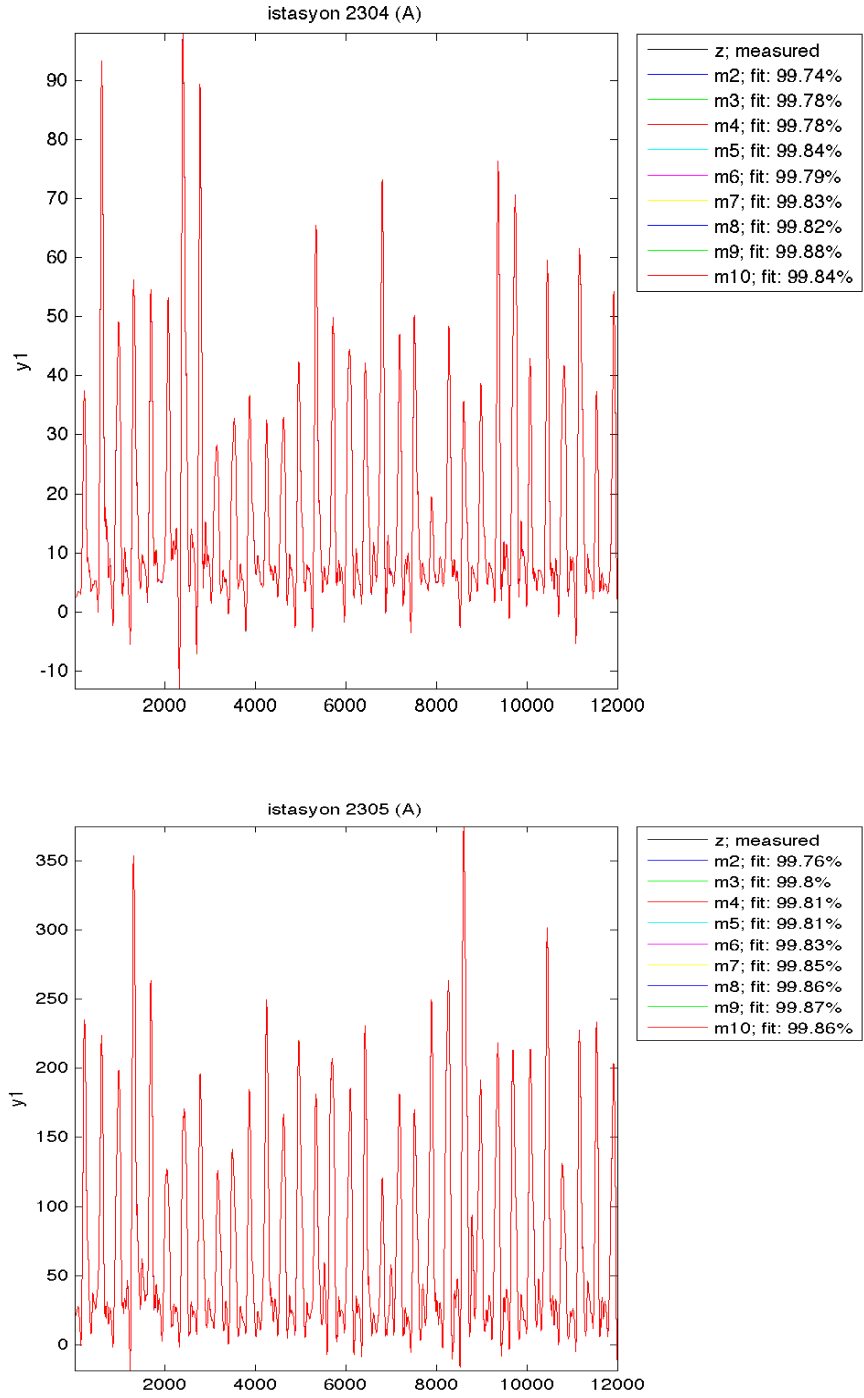


Şekil 8.9 : Çoruh Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.

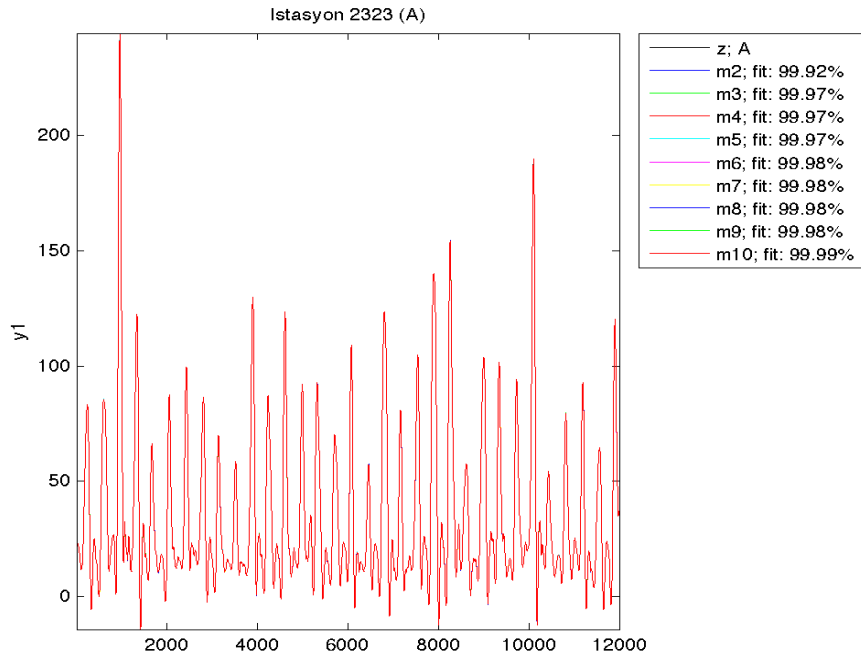
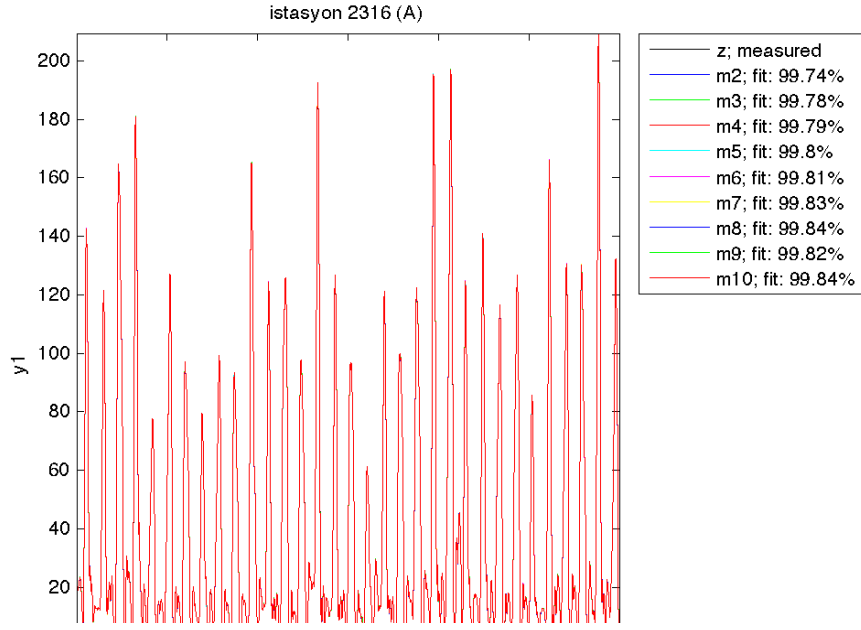


Şekil 8.9 (devam) : Çoruh Havzası ARX Modeli ile Öngörü Performansı.

Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen A parçasına ait ARX modeli ile öngörü sonuçları Şekil 8.10'da gözlenebilmektedir.



Şekil 8.10 : Çoruh Havzası A Parçası Öngörü Performansı.



Şekil 8.10 (Devam) : Çoruh Havzası A Parçası Öngörü Performansı.

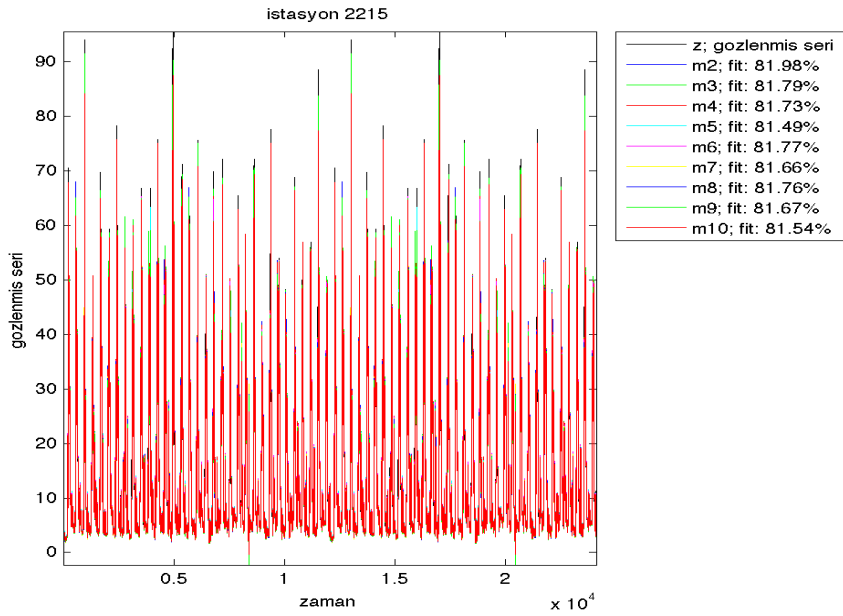
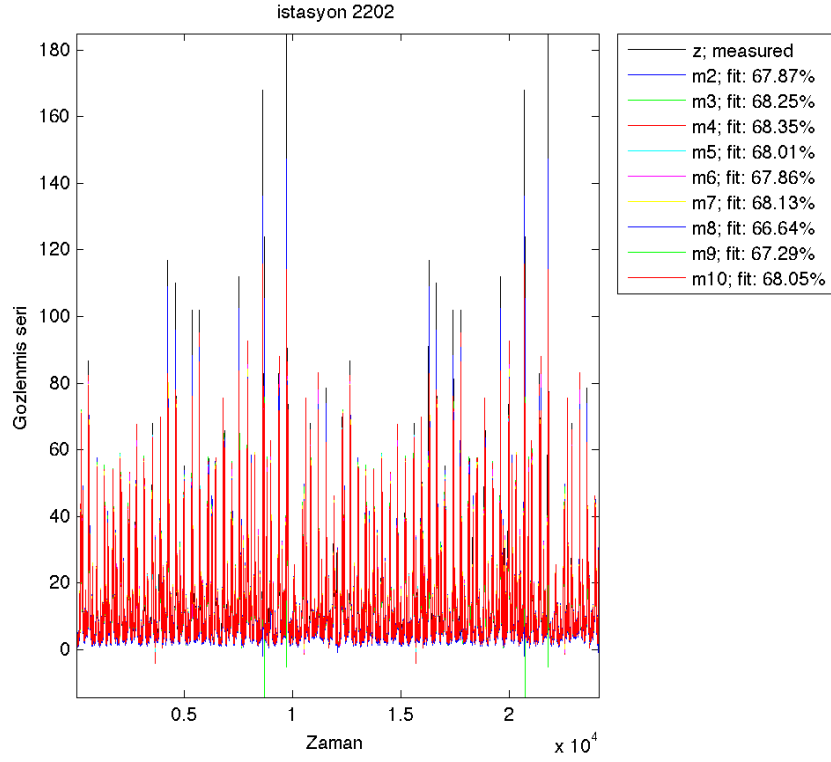


### 8.3.2 Doğu Karadeniz Havzası

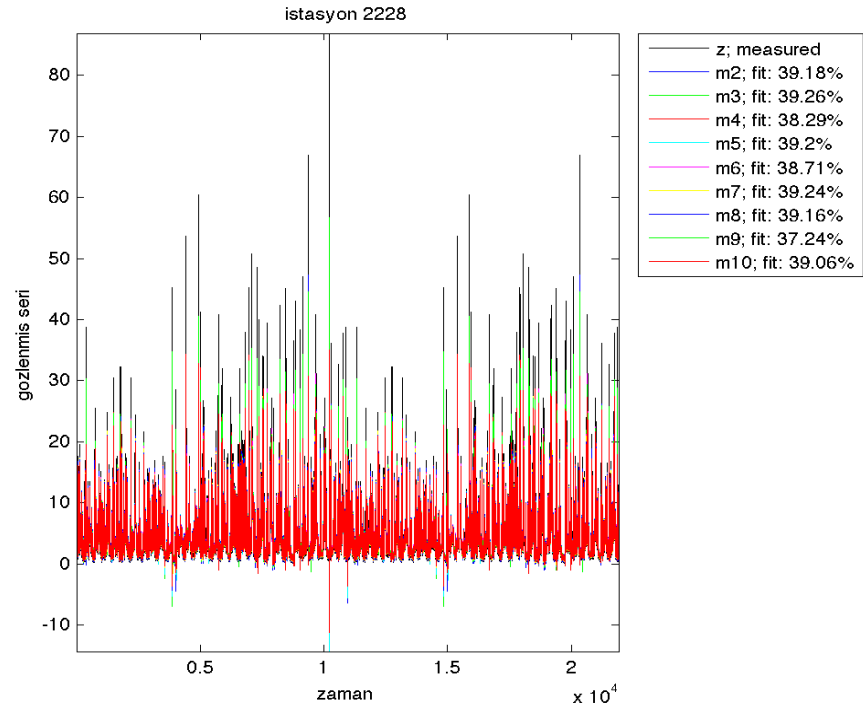
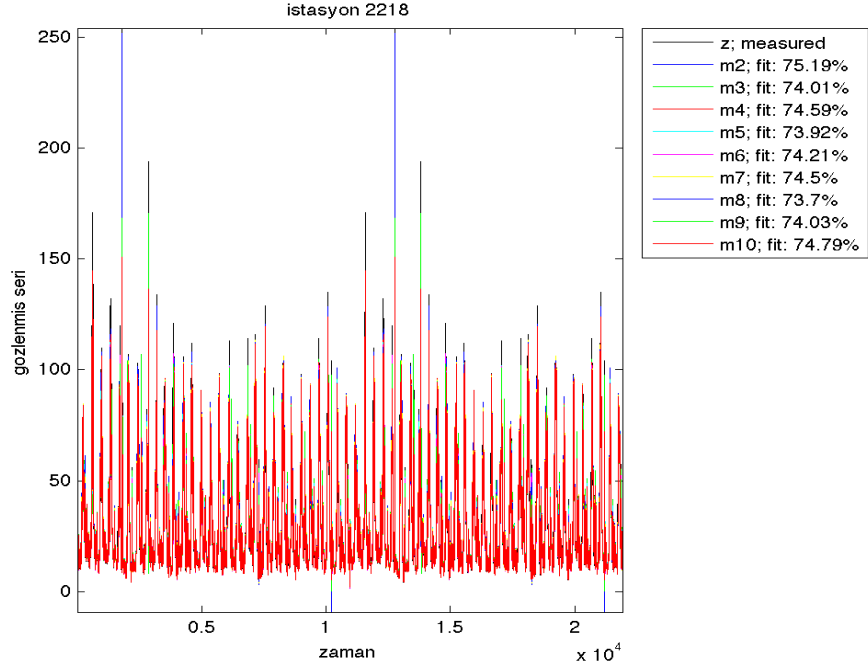
Havzaya ait verilerden ve verilerin dalgacık analizi neticesinde elde edilmiş A parçaları, ayrı ayrı kurulan modelde, ilk olarak uygun model mertebesinin seçilmesi için; (m=1-10) arasında çeşitli model mertebeleri için korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) hesaplanmıştır. (Şekil 8.11). Doğu Karadeniz bölgesinde incelenen istasyonlar, çalışma kapsamında incelenen diğer istasyonlara nazaran daha düşük öngörü başarımı göstermektedir. Bu duruma bölgenin fiziksel ve Hidrolojik özelliklerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Bölge, yıl içi değişken akım değerleri göstermekle birlikte, fiziksel olarak da incelenen diğer bölgelerden farklı doğa yapısına sahiptir. Bölgede incelenen istasyonlar, diğer bölgelerdeki istasyonların aksine, tek bir nehir üzerinde yer almamaktadır. Nehirlerin, denize dik döküldüğü Şekil 6.8'de gözlemlenebilir. Yıl içi taşkınların da bir hayli fazla olduğu bölgede, akım değerleri değişken değerler almaktadır. Yıl içi salınımların öngörü başarımındaki etkisini gözlemek için Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen A parçası da değerlendirmeye alınmıştır.  $A(q)$  ve  $G(q)$ ,  $q^{-1}$  geciktirme işlemcisine bağlı olarak tanımlanan ARX polinomları daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Uygun görülen mertebe ile oluşan polinom katsayıları; her bir istasyon için Çizelge 8.6'da gözlemlenmektedir.

**Çizelge 8.6:** Doğu Karadeniz Havzası İstasyonlarına Ait ARX Modelleri

İstasyon	Model	$R^2$	FPE
	$A(q) = 1 + a_1q^1 + \dots + a_nq^{na}$		
2202	$A(q) = 1 - 1.082q^{-1} + 0.235q^{-2} - 0.048q^{-3} - 0.048q^{-4}$	0.68	18.69
2202 (A)	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$	0.99	0.018
2215	$A(q)A(q) = 1 - 1.16q^{-1} + 0.213q^{-2} - 0.032q^{-3}$	0.81	6.64
2215(A)	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$	0.99	0.02
2218	$A(q) = 1 - 0.96q^{-1} + 0.15q^{-2} - 0.127q^{-3} - 0.05q^{-4}$	0.75	.9
2218(A)	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$	0.99	0.019
2228	$A(q) = 1 - 0.18q^{-1} + 0.042q^{-2} - 0.032q^{-3} - 0.094q^{-4} + 0.006q^{-5}$	0.39	9.14
2228(A)	$- 0.0007q^{-6}$	0.99	0.02
2232	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$	0.69	57.27
2232(A)	$A(q) = 1 - 0.89q^{-1} + 0.08q^{-2} - 0.012q^{-3} - 0.07q^{-4}$	0.99	0.02
2233	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$	0.84	1.87
2233(A)	$A(q) = 1 - 1.26q^{-1} + 0.371q^{-2} - 0.005q^{-3} - 0.043q^{-4}$	0.99	0.018
2245	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$	0.21	114.08
2245(A)	$A(q) = 1 - 0.59q^{-1} + 0.005q^{-2} - 0.062q^{-3}$	0.99	0.017
2247	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$	0.50	45.33
2247(A)	$A(q) = 1 - 0.818q^{-1} + 0.063q^{-2} - 0.068q^{-3}$	0.99	0.02
	$A(q) = 1 - 3.1q^{-1}$		

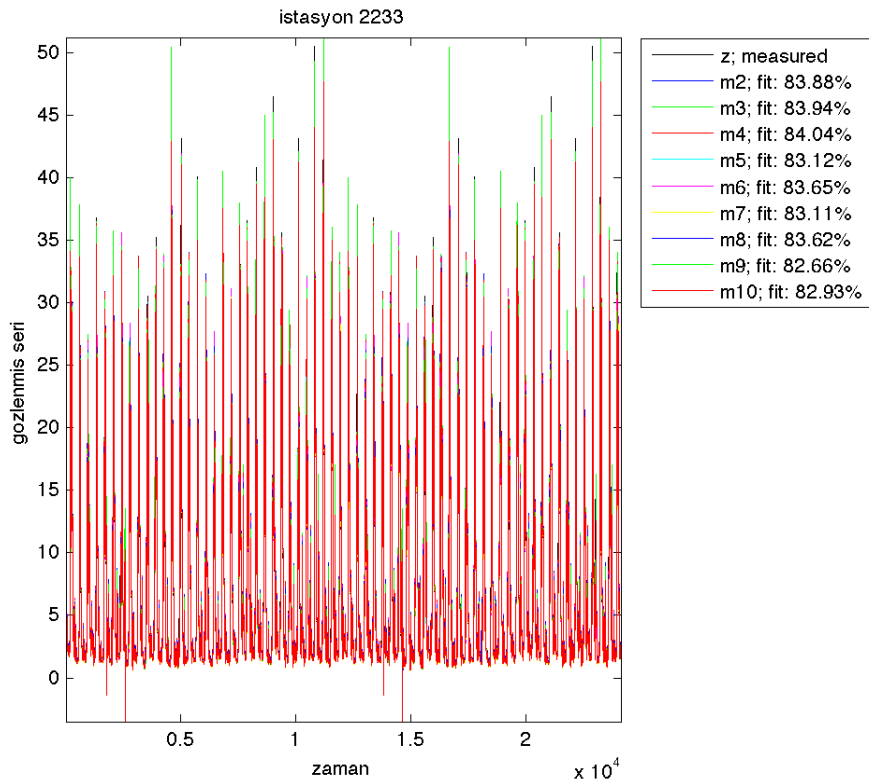
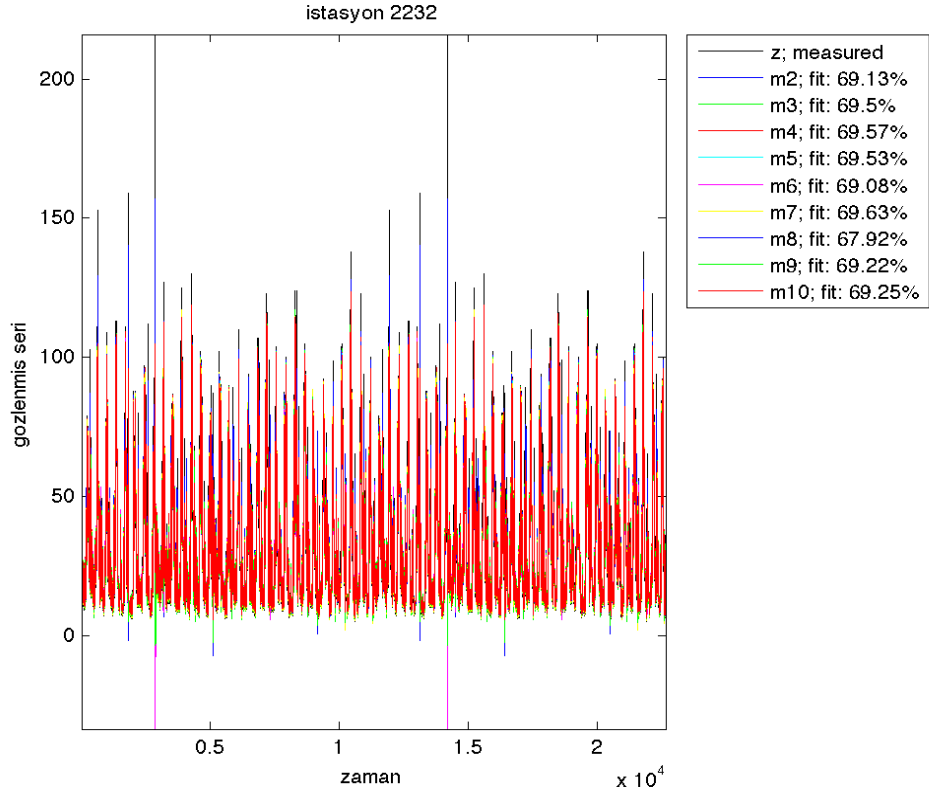


Şekil 8.11a : Doğu Karadeniz Havzası ARX Modeli Öngörü Performansı (İstasyonlar 2202,2215,2218,2228).

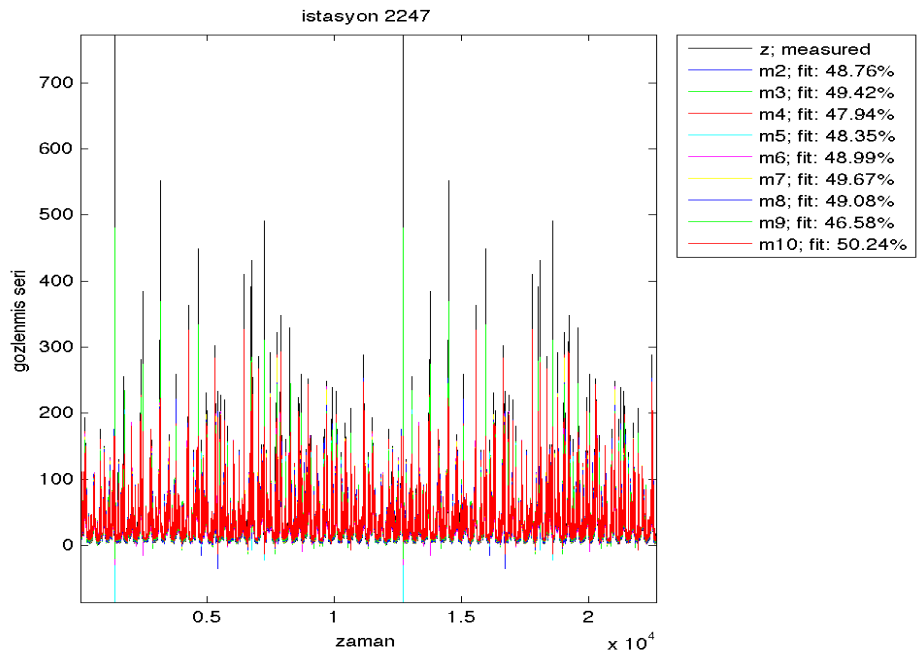
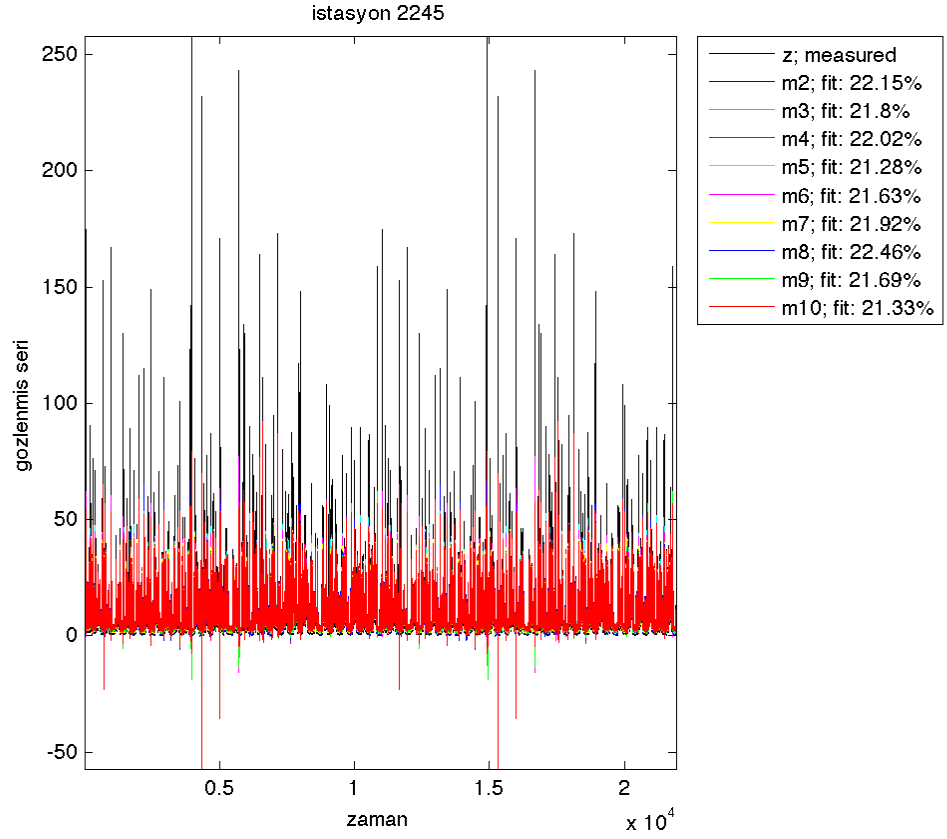


**Şekil 8.11a (devam)** : Doğu Karadeniz Havzası ARX Modeli Öngörü Performansı (İstasyonlar 2202, 2215,2218,2228).

İstasyonlara ait modeller kurulurken, istasyonlardan elde edilen öngörü başarımlarına göre mertbe seçimi yapılmıştır. Mertbe belirlenmesi için literatürde en sık kullanılan değerlendirme kriteri olan Son Öngörü Hatası (FPE) seçilmiştir.

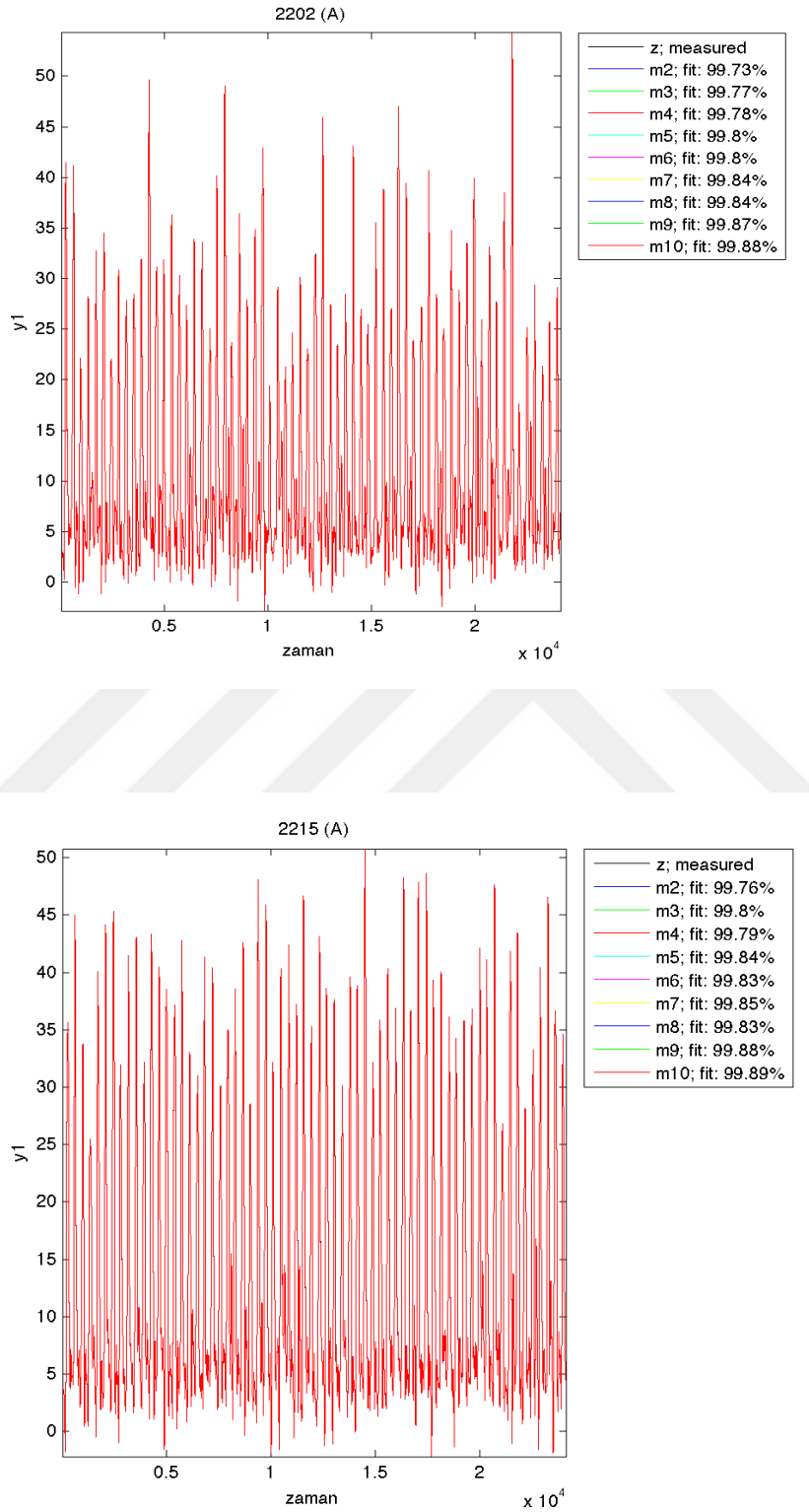


**Şekil 8.11b** : Doğu Karadeniz Havzası ARX Modeli Öngörü Performansı (İstasyonlar 2232,2233,2245,2247).

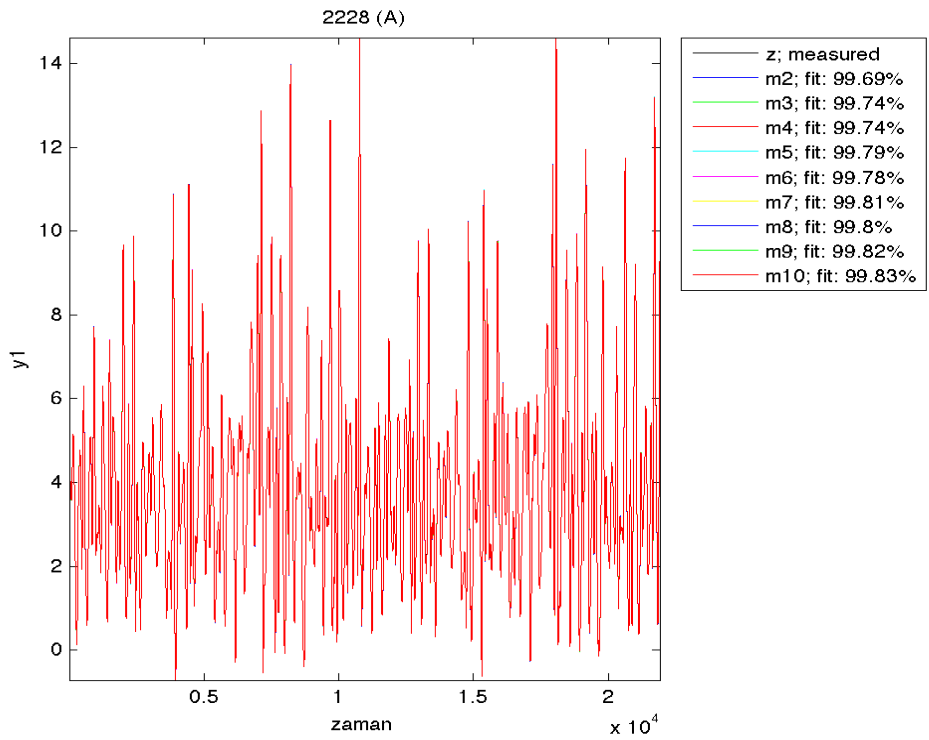
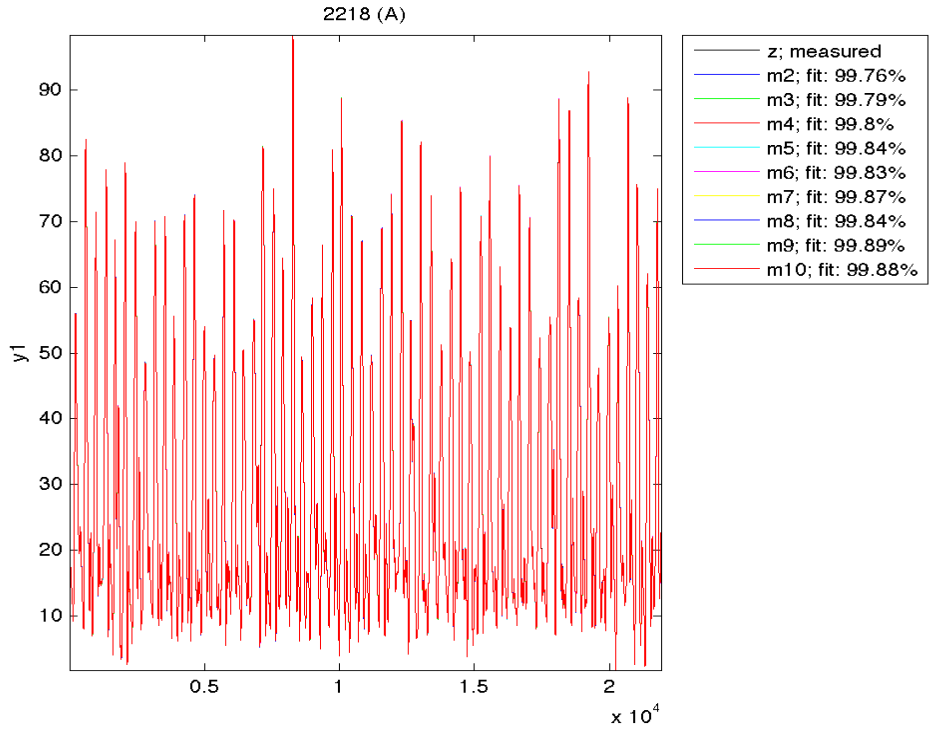


**Şekil 8.11b(devam) :** Doğu Karadeniz Havzası ARX Modeli Öngörü Performansı (İstasyonlar 2232,2233,2245,2247).

Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen A parçasına ait ARX modeli ile öngörü sonuçları Şekil 8.12’de gözlenebilmektedir.

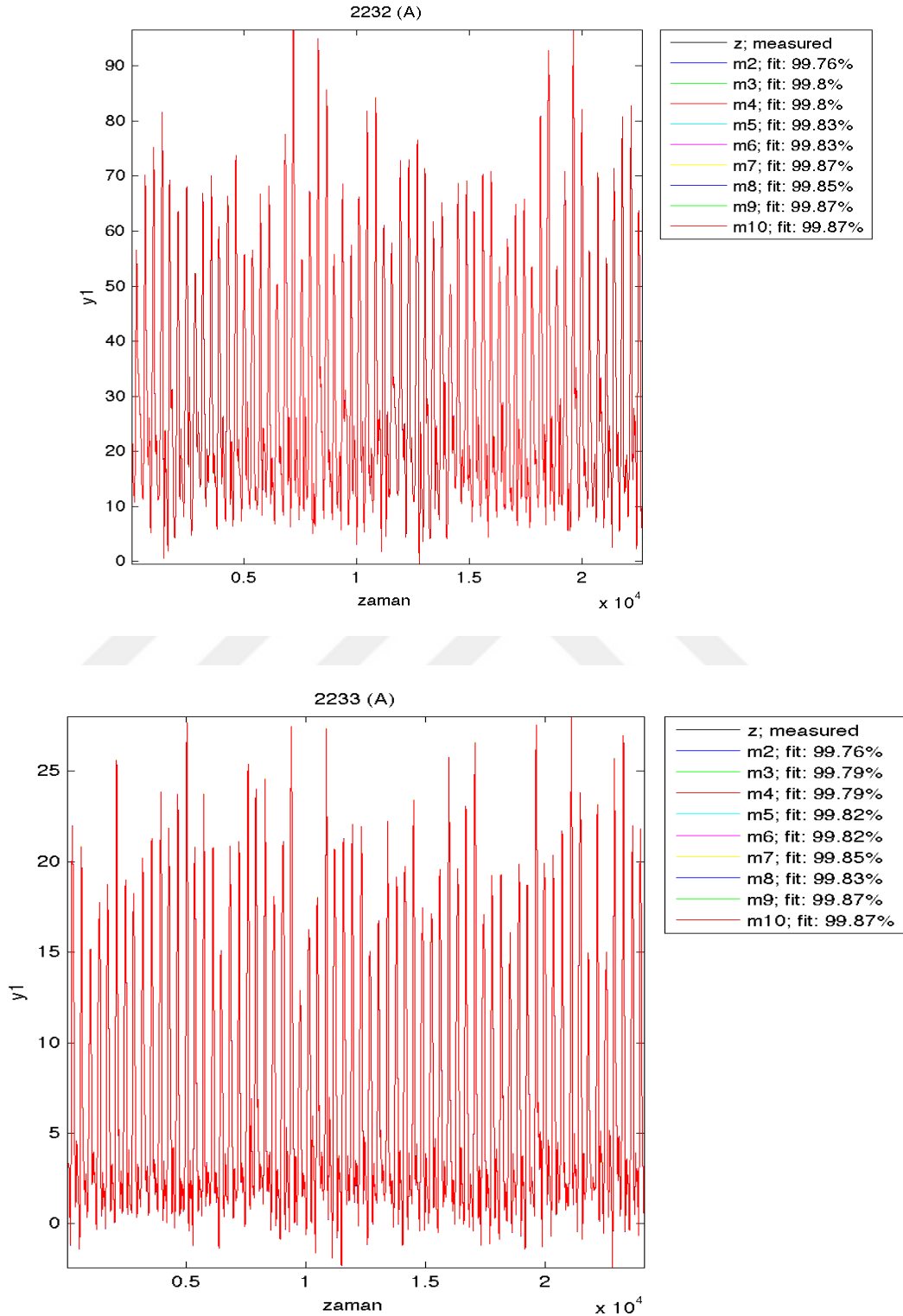


Şekil 8.12a : Doğu Karadeniz Havzası A Parçası ARX Modeli Öngörü Performansı (2202,2215,2218,2228).



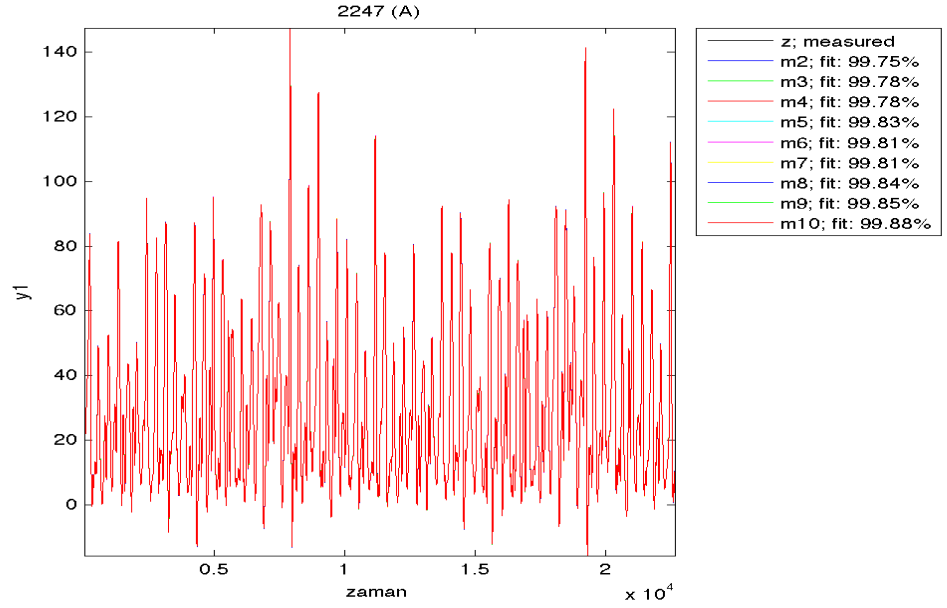
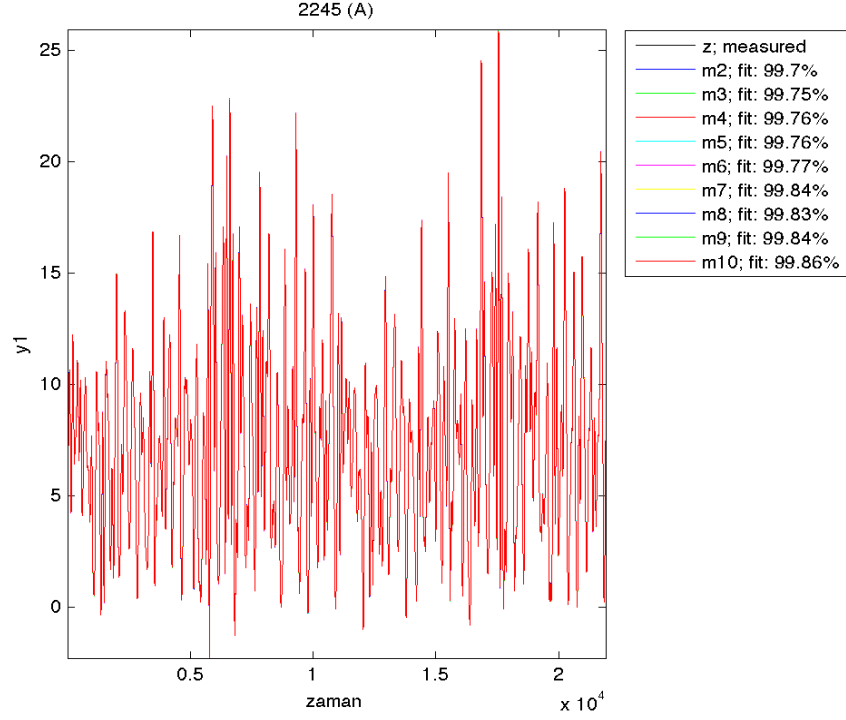
**Şekil 8.12a (devam) :** Doğu Karadeniz Havzası A Parçası ARX Modeli Öngörü Performansı (2202,2215,2218,2228).

A parçası öngörü performansı belirlenirken için literatürde en sık kullanılan değerlendirme kriteri olan Son Öngörü Hatası (FPE) seçilmiştir.



Şekil 8.12b: Doğu Karadeniz Havzası A Parçası ARX Modeli Öngörü Performansı (2232,2233,2245,2247).

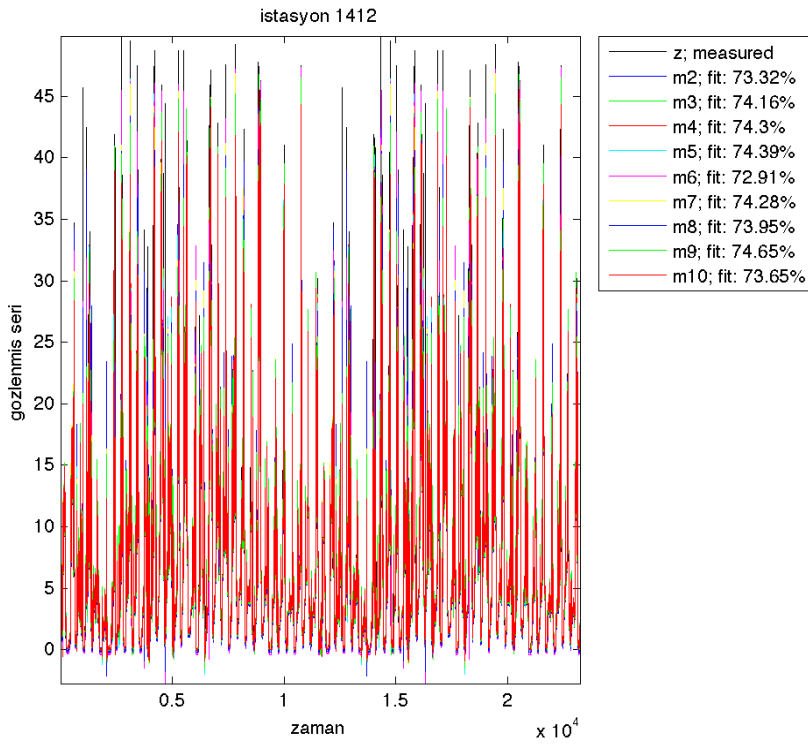
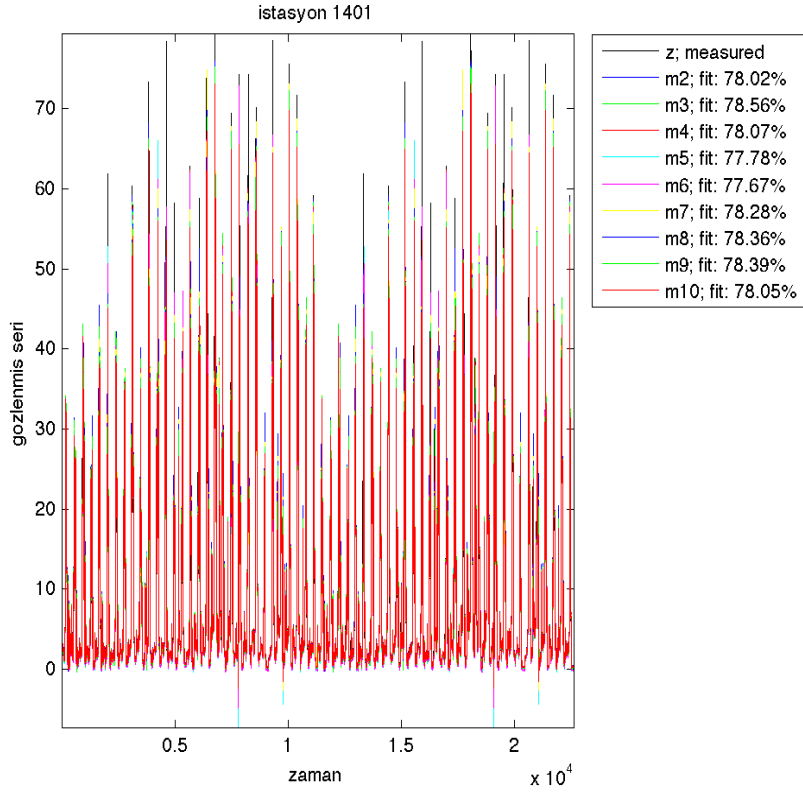




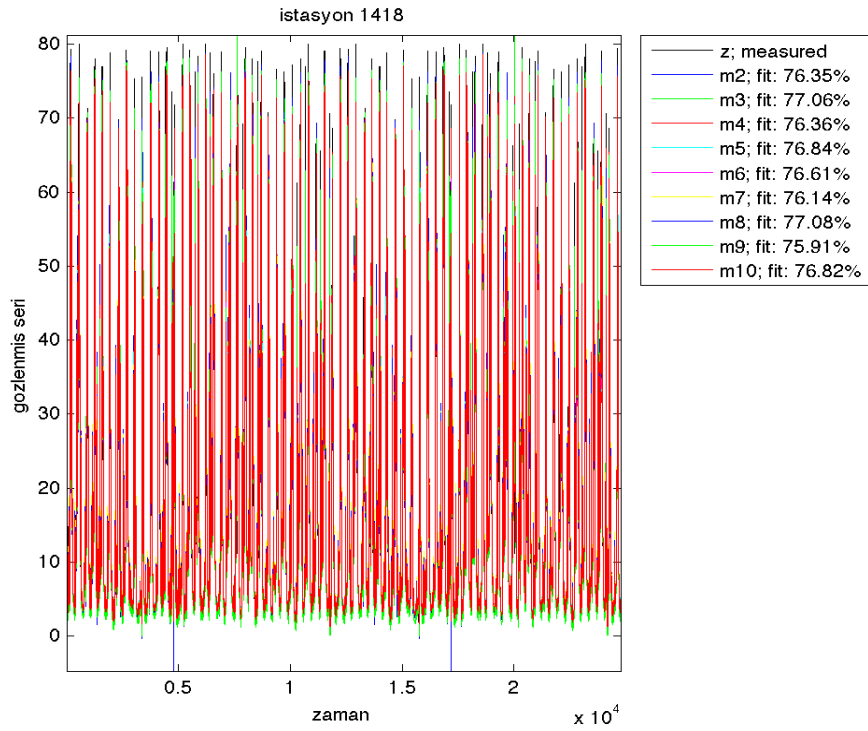
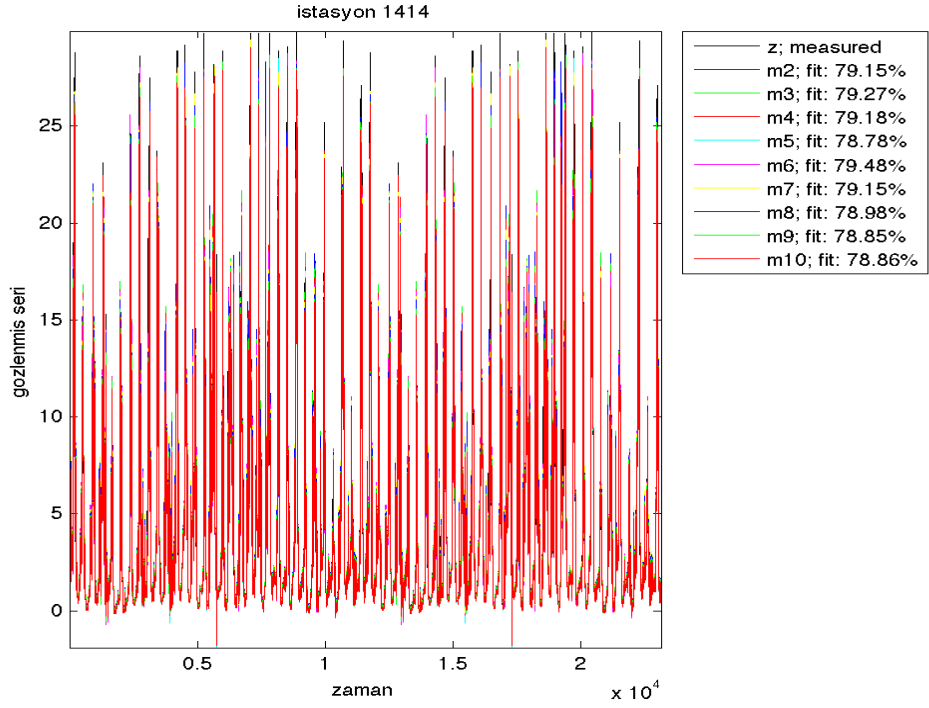
**Şekil 8.12b(devam) :** Doğu Karadeniz Havzası A Parçası ARX Modeli Öngörü Performansı (2232,2233,2245,2247).

### 8.3.3 Yeşil Irmak Havzası

Havzaya ait verilerden ve verilerin dalgacık analizi neticesinde elde edilmiş A parçaları, ayrı ayrı kurulan modelde, ilk olarak uygun model mertebesinin seçilmesi için; m=1-10 arasında çeşitli model mertebeleri için korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) hesaplanmıştır. (Şekil 8.13 ).

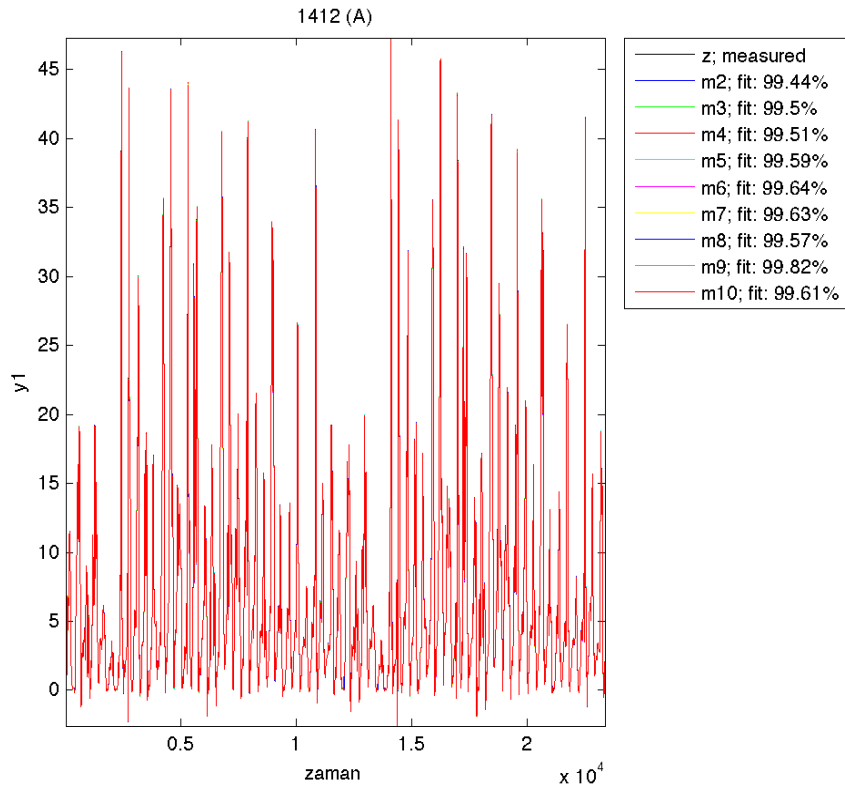
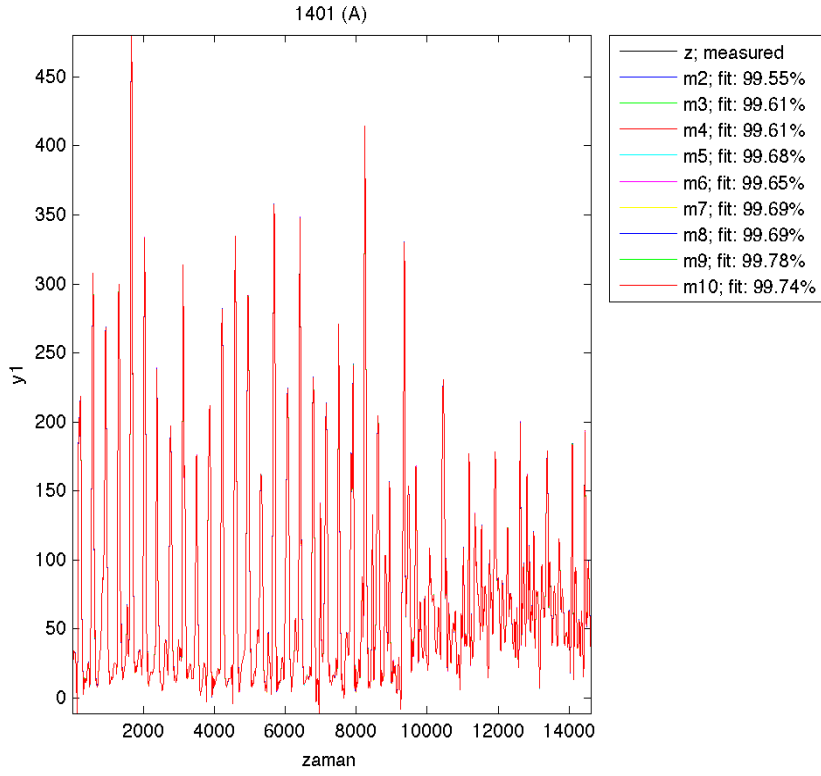


Şekil 8.13: Yeşil Irmak Havzası ARX Modeli Öngörü Performansı.

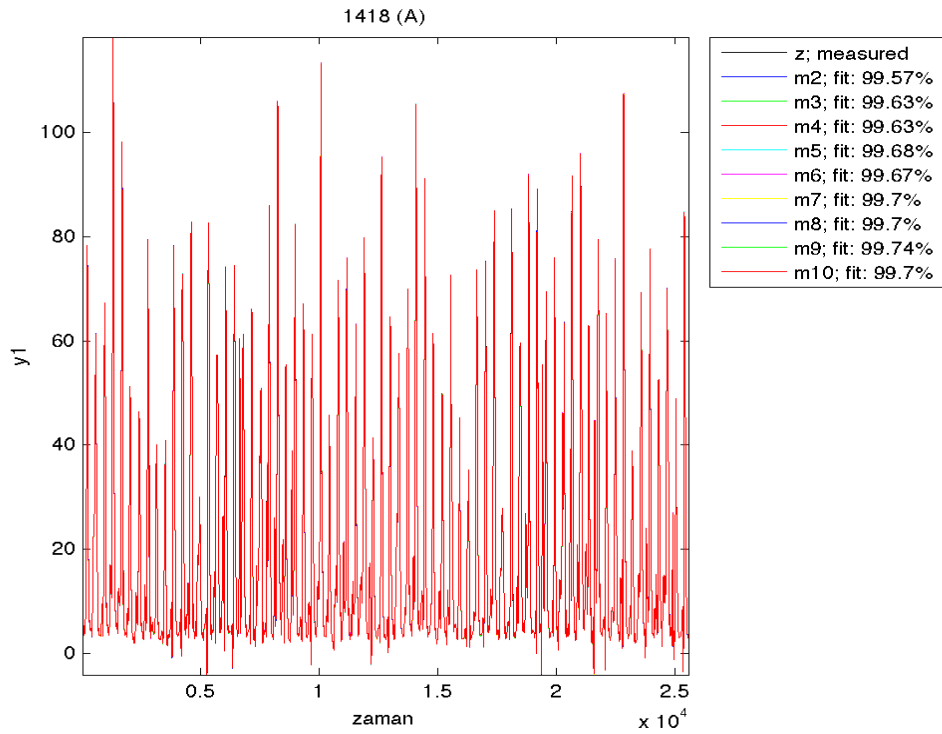
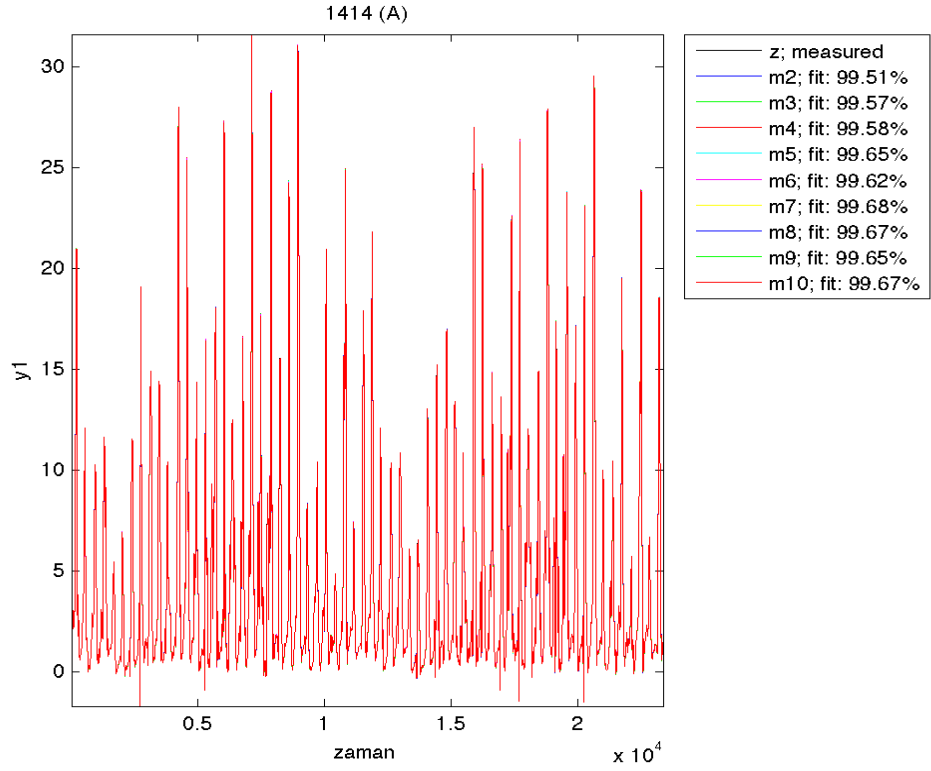


**Şekil 8.13(devam)** : Yeşil Irmak Havzası ARX Modeli Öngörü Performansı.

Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen A parçasına ait ARX modeli ile öngörü sonuçları Şekil 8.14'de gözlenebilmektedir.



Şekil 8.14 : Yeşil Irmak Havzası A Parçası ARX modeli Öngörü Performansı.



**Şekil 8.14 (devam) : Yeşil Irmak Havzası A Parçası ARX modeli Öngörü Performansı**

$A(q)$  ve  $G(q)$ ,  $q^{-1}$  geciktirme işlemcisine bağlı olarak tanımlanan ARX polinomları daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Uygun görülen merteye ile oluşan polinom katsayıları; her bir istasyon için Çizelge 8.7’de gözlenebilmektedir.

**Çizelge 8.7:** Yeşil Irmak Havzası İstasyonları ARX Modelleri

İstasyon	Model	$R^2$	FPE
	$A(q) = 1 + a_1q^1 + \dots + a_naq^{na}$		
1401	$A(q) = 1 - 1.035q^{-1} + 0.173q^{-2} + 0.105q^{-3}$	0.78	7.27
1401 (A)	$A(q) = 1 - 2.57q^{-1}$	0.99	0.081
1412	$A(q) = 1 - 0.97q^{-1} + 0.136q^{-2} + 0.004q^{-3} - 0.094q^{-4}$	0.70	5.06
1412 (A)	$A(q) = 1 - 2.57q^{-1}$	0.99	0.082
1414	$A(q) = 1 - 1.57q^{-1} + 0.309q^{-2} - 0.120q^{-3} - 0.015q^{-4}$	0.78	1.243
1414 (A)	$A(q) = 1 - 2.57q^{-1}$	0.99	0.079
1418	$A(q) = 1 - 1.0q^{-1} - 0.127q^{-2} - 0.0025q^{-3} - 0.085q^{-4}$	0.72	18.65
1418 (A)	$A(q) = 1 - 2.57q^{-1}$	0.99	0.078

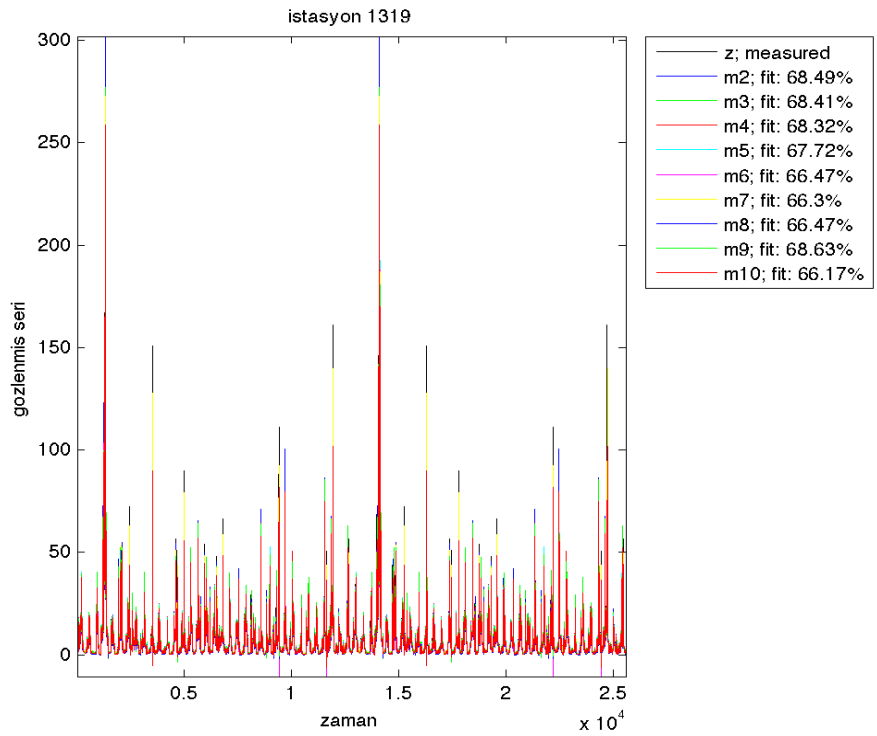
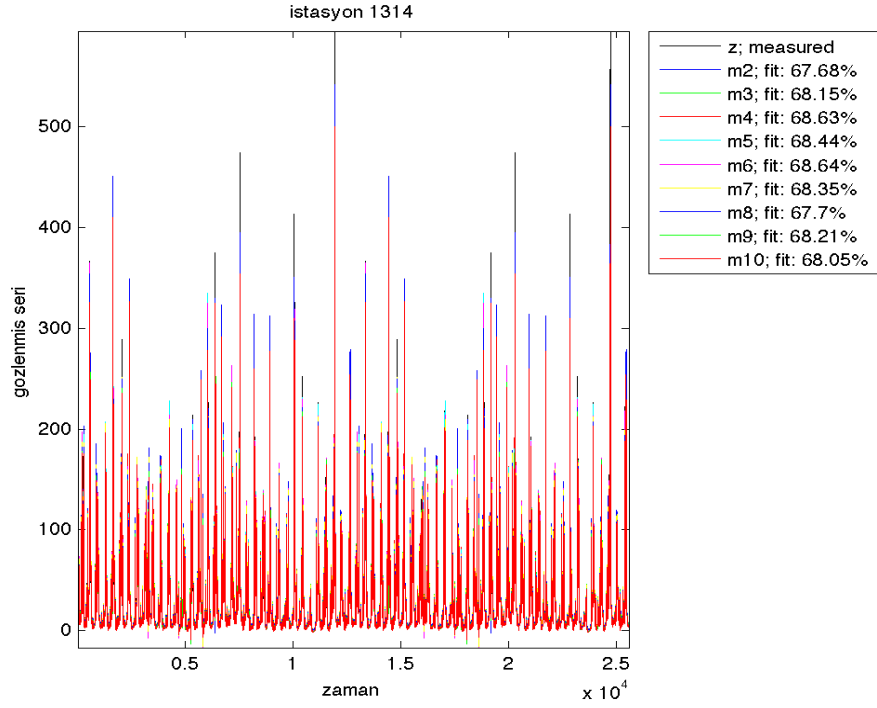
### 8.3.4 Batı Karadeniz Havzası

Havzaya ait verilerden ve verilerin dalgacık analizi neticesinde elde edilmiş A parçaları, ayrı ayrı kurulan modelde, ilk olarak uygun model mertebesinin seçilmesi için;  $m=1-10$  arasında çeşitli model mertebeleri için korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) hesaplanmıştır. (Şekil 8.15). Uygun görülen merteye ile oluşan polinom katsayıları; her bir istasyon için Çizelge 8.8’de gözlenebilmektedir.

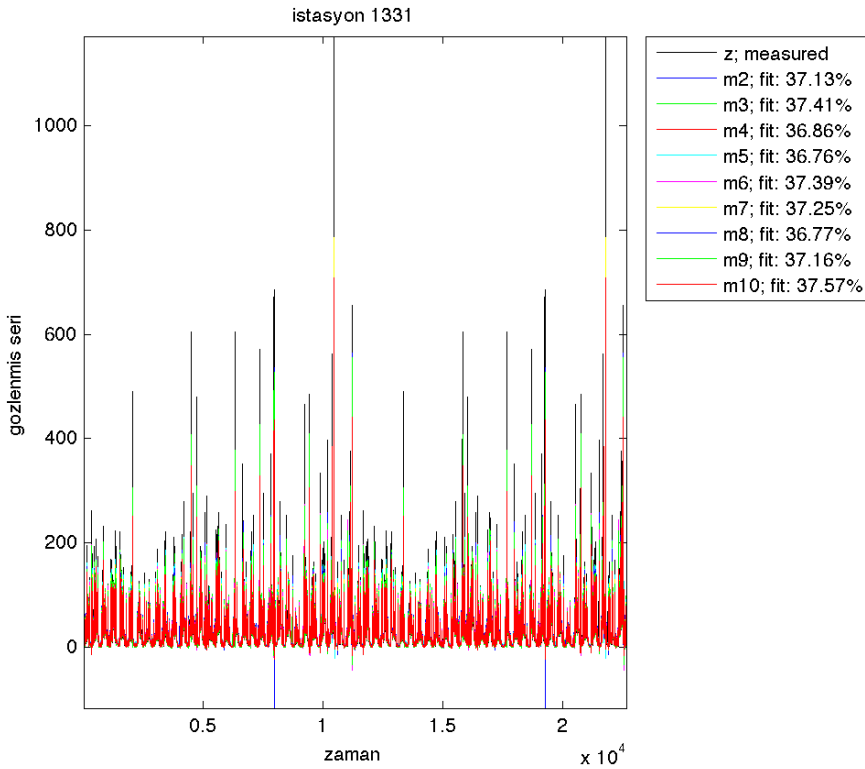
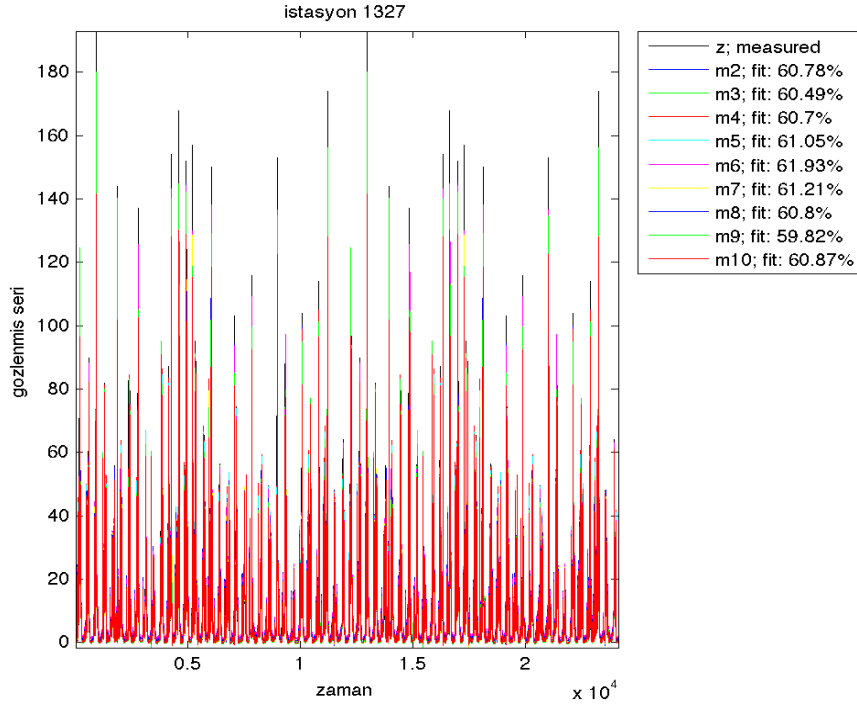
**Çizelge 8.8:** Batı Karadeniz İstasyonlara ait ARX modelleri ve FPE

İstasyon	Model	$R^2$	FPE
	$A(q) = 1 + a_1q^1 + \dots + a_naq^{na}$		
1314	$A(q) = 1 - 1.21q^{-1} + 0.48q^{-2} - 0.191q^{-3} - 0.02q^{-4}$	0.68	54.08
1314 (A)	$A(q) = 1 - 2.61q^{-1}$	0.99	0.028
1319	$A(q) = 1 - 1.01q^{-1} + 0.136q^{-2} - 0.006q^{-3}$	0.68	15.73
1319 (A)	$A(q) = 1 - 2.61q^{-1}$	0.99	0.029
1327	$A(q) = 1 - 1.09q^{-1} - 0.327q^{-2} - 0.006q^{-3}$	0.61	35.88
1327 (A)	$A(q) = 1 - 2.61q^{-1}$	0.99	0.029
1331	$A(q) = 1 - 0.8q^{-1} + 0.98q^{-2} - 0.03q^{-3}$	0.37	81.3
1331 (A)	$A(q) = 1 - 2.61q^{-1}$	0.99	0.03
1334	$A(q) = 1 - 0.98q^{-1} + 0.181q^{-2} - 0.064q^{-3}$	0.63	9.38
1334(A)	$A(q) = 1 - 2.61q^{-1}$	0.99	0.027
1335	$A(q) = 1 - 1.19q^{-1} + 0.43q^{-2} - 0.15q^{-3} - 0.005q^{-4} - 0.0002q^{-5}$	0.65	1.89
1335(A)	$A(q) = 1 - 2.61q^{-1}$	0.99	0.03

İstasyonlara ait modeller kurulurken, istasyonlardan elde edilen öngörü başarımlarına göre merteye seçimi yapılmıştır.



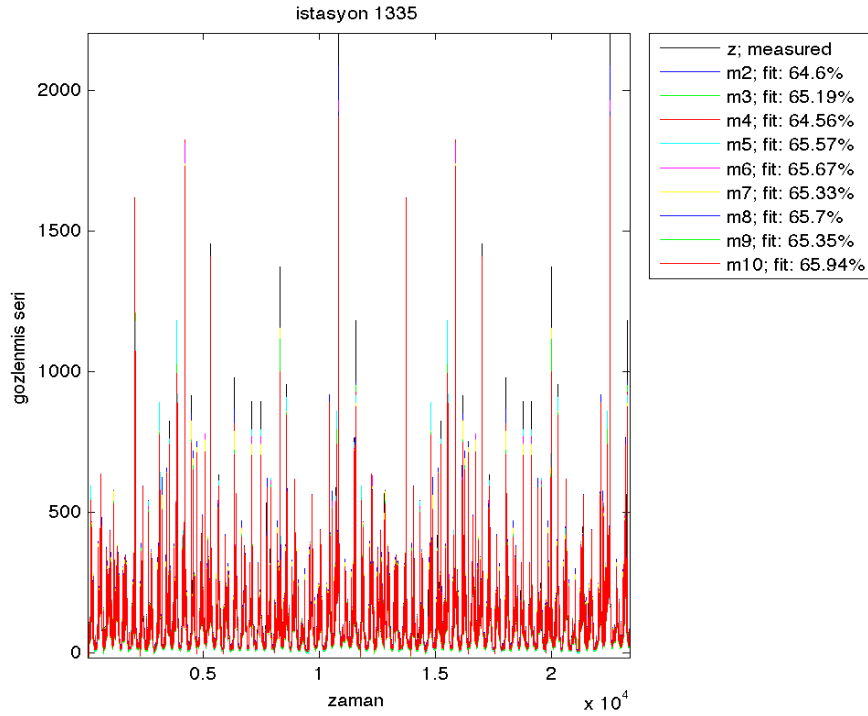
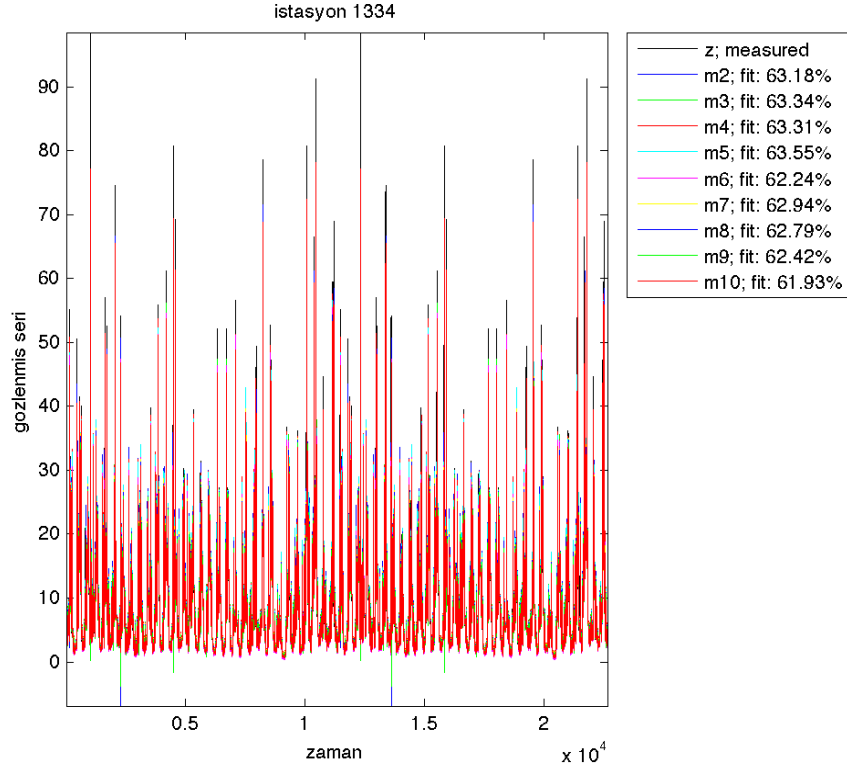
**Şekil 8.15a** :Batı Karadeniz Havzası İstasyonları ARX Modeli ile Öngörü Performansı İstasyon ( 1314, 1319, 1327,1331).



**Şekil 8.15a (devam) :** Batı Karadeniz Havzası İstasyonları ARX Modeli ile Öngörü Performansı İstasyon ( 1314, 1319, 1327,1331).

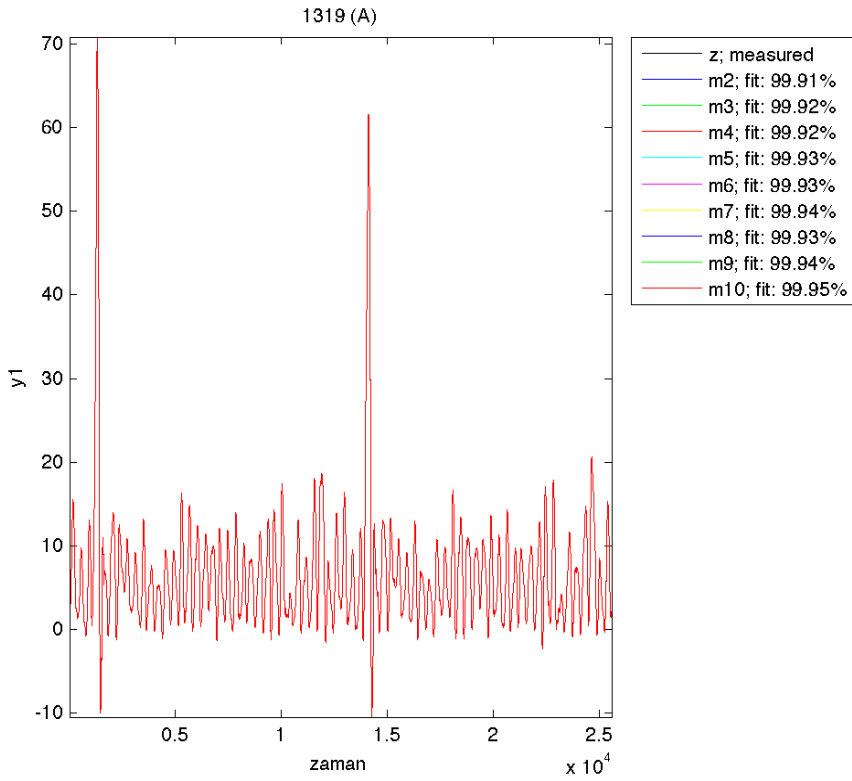
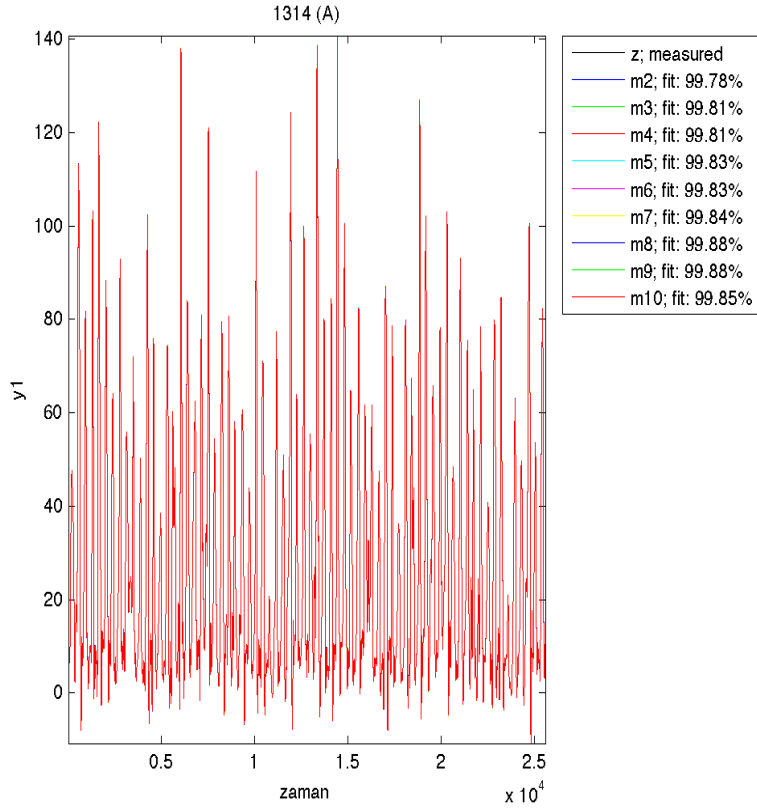
Mertebe belirlenmesi için literatürde en sık kullanılan değerlendirme kriteri olan Son Öngörü Hatası (FPE) seçilmiştir.



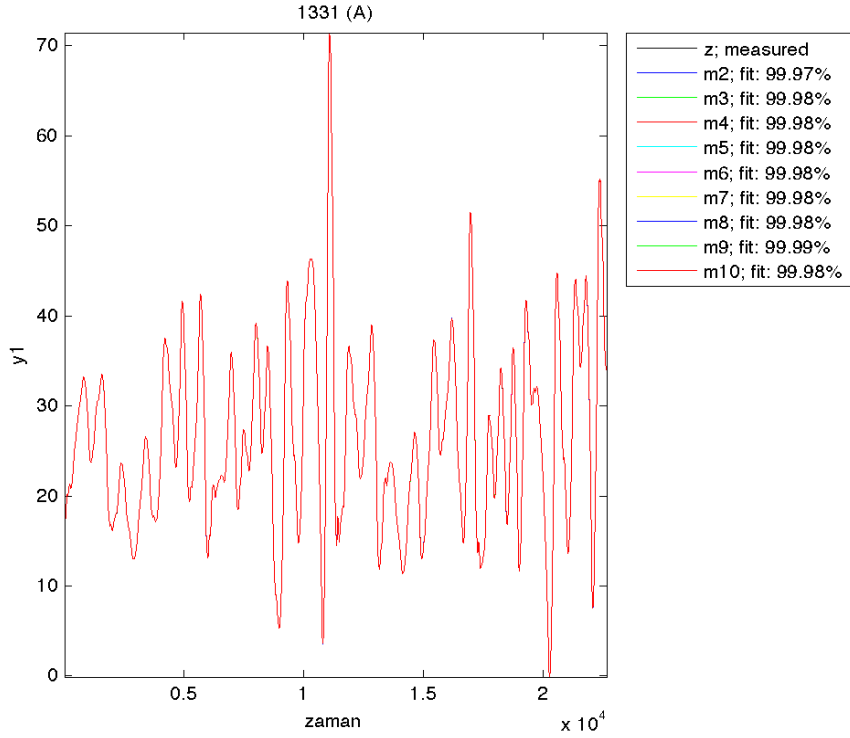
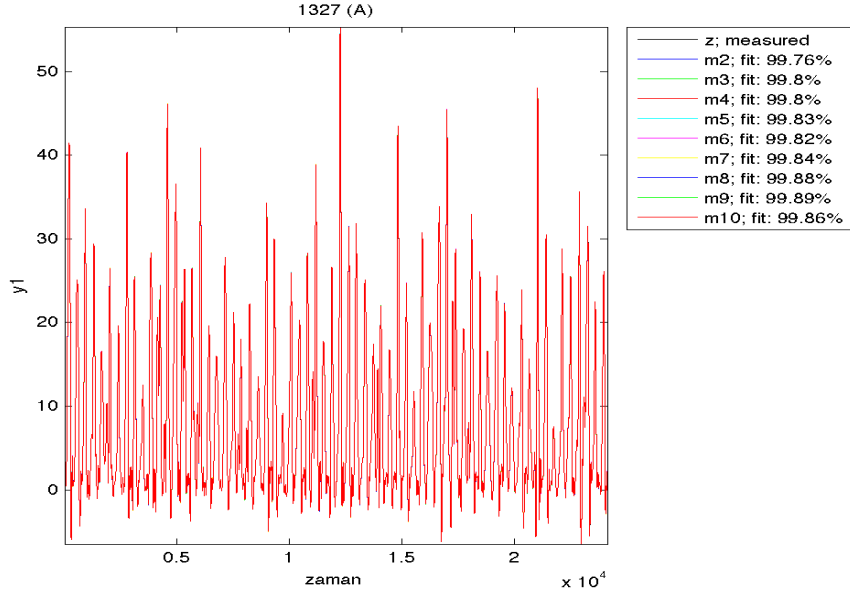


**Şekil 8.15b** : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları ARX Modeli ile Öngörü Performansı (İstasyon 1334, 1335).

Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen A parçasına ait ARX modeli ile öngörü sonuçları Şekil 8.16'da gözlenebilmektedir.

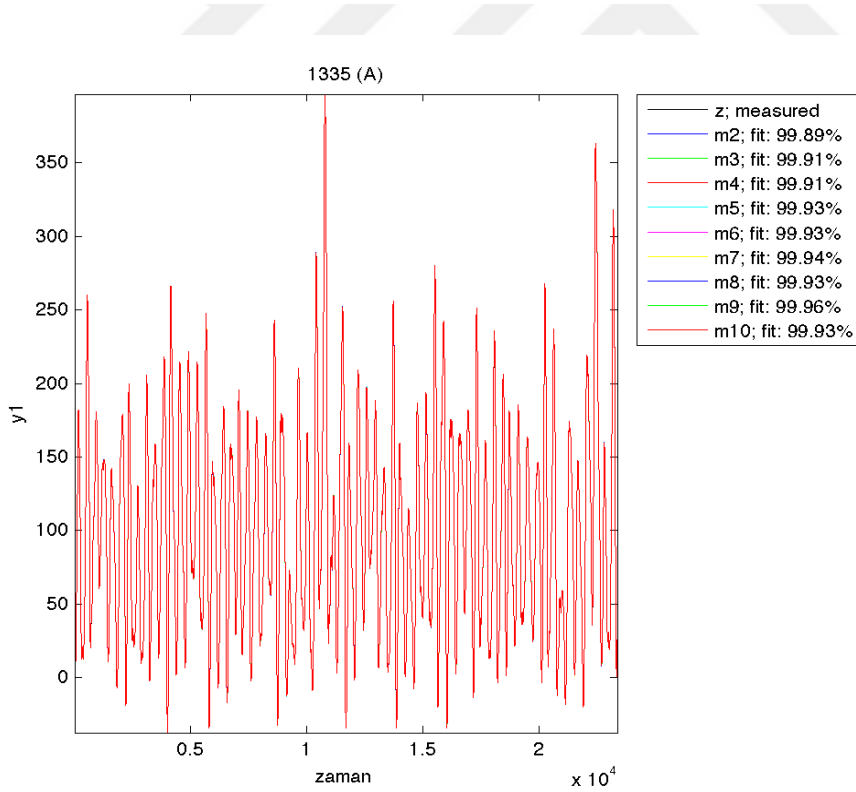
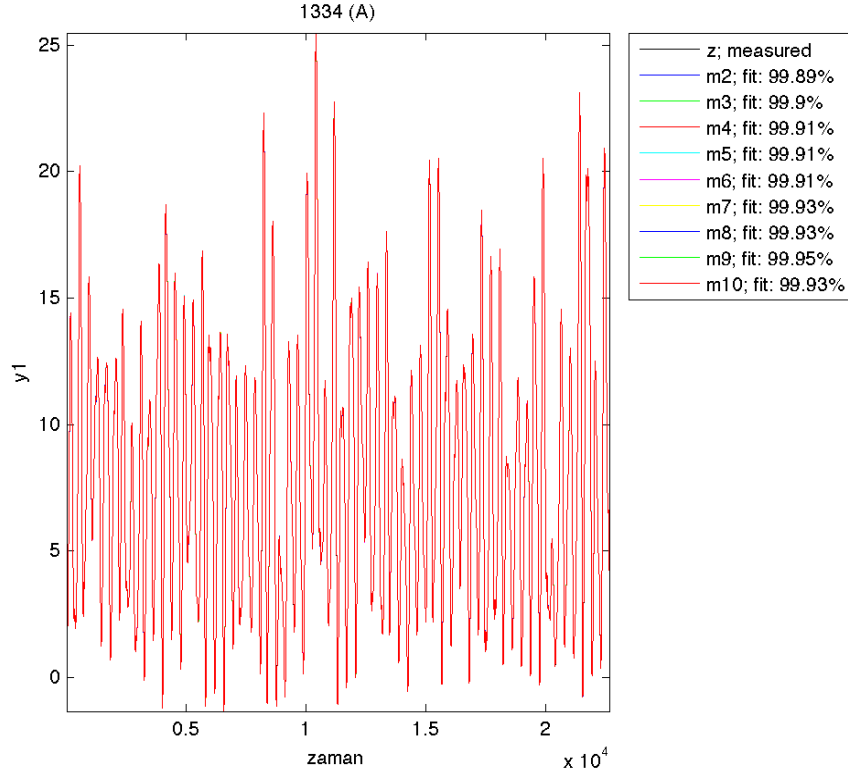


**Şekil 8.16a** : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı İstasyon (1314, 1319,1327,1331).



**Şekil 8.16 a(Devam):** Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı İstasyon (1314, 1319,1327,1331)

$A(q)$  ve  $G(q)$ ,  $q^{-1}$  geciktirme işlemcisine bağlı olarak tanımlanan ARX polinomları daha önceki bölümlerde belirtilmişti.



**Şekil 8.16b** : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Dalgacık Analizi A Parçası ARX Modeli ile Öngörü Performansı İstasyon (1334,1335).

## 8.4 Değerlendirme

Çalışmanın bu bölümünde Türkiye, Karadeniz sahilinde yer alan 4 havza üzerinde, sistem modellemesi ve öngörü yapılmıştır. Havza istasyonlarına ait veriler öngörülürken, lokal öngörü yöntemi ve ARX modelleri kullanılmıştır. Uygulama günlük peryotta kayıt altına alınmış akım verilerine uygulanmıştır. Seriler, herbir istasyon için en düşük 30 yıllık verilere sahip, uzun kayıtlardır. Uzun kayıda sahip olunmasından dolayı, seçilen hata kriterlerinin literatürde başarılı sayılacak aralıkta olması nedeniyle, sonuçların anlamlı olduğu değerlendirilmiştir. Bölümün ilk kısmında, daha önceki bölümlerde ispatlanmış olan kaotik karakter göz önünde bulundurularak, kaotik dinamikler temeline dayanan Lokal Öngörü yöntemi uygulanmıştır. Yöntem ilk olarak serilerin orijinal hallerine daha sonra da Dalgacık Analizi neticesinde elde edilen yaklaşım (A) parçasına uygulanmıştır.

Uygulama sonuçları, daha önceki bölümlerde, literatürde geçmiş uygulamalarda kullanımları göz önünde bulundurularak seçilen, değerlendirme kriterleri ile performans ölçümüne tabii tutulmuştur. Lokal öngörü yöntemi uygulamasında, seriler önceki yıllar ve son 1 yıl olmak üzere iki parçaya bölünmüştür. Ayrılan 1 yıl üzerinde tek adımlı öngörü yapmak için, önceki yıllar eğitim sonr 1 yıl ise performans testi için kullanılmıştır. Öngörü için kullanılacak olan bölüm için faz uzayının yeniden kurulumu aşamasında uygun gömme boyutunu seçmek için RMSE kriteri daha önce yapılan çalışmalarda (Sivakumar, 2000) sıkça kullanıldığı için tercih edilmiştir. Yöntem birçok istasyona uygulandığı için, karşılaştırma sağlanabilmesi açısından, RMSE kriterinin normalize edilmiş hali olan NRMSE kriteri kullanılmıştır. ARX modelinin mertebesi belirlenirken ise, mertebe belirlenmesinde literatürde en çok kullanılan kriter olan FPE kriterinin uygulanması uygun görülmüştür.

$R^2$  kriteri -1 ve 1 aralığında değişkenlik gösteren boyutsuz bir kriterdir. 1 değerini alması, öngörünün tam performans ile birebir yapıldığının göstergesidir. Çizelge 8.9'da serinin orijinal halleri için, hem lokal öngörü hem de ARX modeli kurularak yapılan öngörü için elde edilen  $R^2$  değerleri birarada görülebilmektedir. Çizelge 8.9'da gözlenebileceği üzere, havzalara ait istasyonlar bazında yapılan uygulamalarda öngörü performansı değişiklik göstermektedir. Çoruh Havzası ve Batı Karadeniz Havzası ve Yeşil Irmak istasyonları için öngörü performansı, başarılı değerler almasına rağmen ( $R^2 > 0.9$ ), aynı başarı Doğu Karadeniz Havzası

istasyonlarında yakalanamamıştır. Dalgacık analizi neticesinde; bütün istasyonlarda benzer performans gözlendiği halde, serilerin original hallerinde bu tarz farklılıklar olması, lokal öngörü yöntemi'nin gürültü ve salınım hassasiyetini birkez daha doğrulamıştır. Doğu Karadeniz Havzası'nda diğer havzalardan farklı olarak, nehirler denize direk dökülmektedir. Bunun yanı sıra havza, Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgesinde yer almaktadır. Bu durum, akımların yüksek değerler almasını ve yıl içi taşkınların sık olmasına sebep olmaktadır. Lokal öngörü yöntemi, öngörü performansında özellikle pik değerleri yakalamada zorluk çekmektedir (Khatibi vd., 2012).

**Çizelge 8.9:** İstasyonlara ait Lokal Öngörü ve ARX modelleri R<sup>2</sup> Değerleri

İstasyon	Lokal Öngörü Modeli R <sup>2</sup>	ARX Modeli R <sup>2</sup>
2304	0.97	0.86
2305	0.97	0.86
2316	0.93	0.86
2323	0.90	0.80
2202	0.89	0.68
2215	0.96	0.81
2218	0.90	0.75
2228	0.45	0.39
2232	0.91	0.69
2233	0.95	0.84
2245	0.33	0.21
2247	0.72	0.50
1401	0.97	0.78
1412	0.96	0.70
1414	0.84	0.78
1418	0.96	0.72
1314	0.99	0.68
1319	1	0.68
1327	0.92	0.61
1331	0.60	0.37
1334	0.90	0.63
1335	0.96	0.65

Lokal öngörü yöntemi ile yapılan öngörüü karşılaştırmak açısından, serilerin içerdiği doğrusal olmayan dinamiklere dayanan bir yöntem olan ARX yöntemi kullanılmıştır. Yöntemden elde edilen sonuçlar, lokal öngörü yöntemi kadar başarılı olamamıştır (Çizelge 8.9). Bu durum; lokal öngörü yöntemi'nin serinin

dinamik yapısını daha iyi algıladığının düşünülmesine sebep olmuştur. ARX modelleri de aynı lokal öngörü yöntemi gibi, serinin orijinal halinde değişik performans göstermesine rağmen, dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçası üzerinde yapılan öngörüler, Lokal Öngörü Yönteminde olduğu gibi, başarılı ( $R^2 > 0.99$ ) ve tutarlı performans göstermiştir. Sonuç olarak, öngörü yöntemlerinin serinin içinde yer alan gürültüye olan duyarlılığı, gerek kaotik dinamiklere gerek doğrusal olmayan dinamiklere dayanan yöntemlerde de gözlenmiştir. Bu sebeple, seriler öngörülürken, gürültünün azaltımı tavsiye edilmektedir. Bu noktada; ayrılan parçanın beyaz gürültü olmaması durumunda, kalan kısmın seriyi ne kadar temsil ettiği sorusu gündeme gelmektedir. Bu duruma çözüm olarak bu çalışmada, serilerin taşıdığı bilginin bir ölçütü olan entropi kriteri kullanılmıştır.

Havzalara ait modeller kurulurken; çeşitli mertebelerde yapılan denemeler sonucunda, öngörü performansı göz önünde bulundurularak seçilen uygun mertebedeki ARX modelleri kullanılmıştır. Elde edilen modellerde, havzalara ait istasyonların model mertebeleri aynı çıkarken, dalgacık analizi neticesinde elde edilen parçaların havza bazında aynı model mertebesi ve katsayılarına sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, aynı havza içerisinde yer alan istasyonların, bilgi korunarak uygulanan uygun bir gürültü azaltımı sonucunda benzer dinamik gösterdiğinin kanıtıdır. Bu bölümde uygulanan ARX model belirlemenin önemli bir sonucu olarak, uygun koşullar altında yapılan gürültü ve salınım giderilmesi neticesinde, havza üzerindeki istasyonların aynı dinamik yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Verilerin kayıt altına alınışı ve elde edilmesi hususunda gerek araştırmacıların gerekse bölgede yatırım yapacak yatırımcıların ülkemizde ve dünya genelinde karşılaştığı sıkıntılar göz önünde bulundurulursa, havzaya ait istasyonların, gürültü ve salınımların etkisinden arındırıldak sonra; tek bir model ile belirlenebilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Bu durum, havza üzerindeki tek bir istasyondan elde edilen veriler ile havzanın diğer bölgeleri hakkında da bilgi sahibi olmamızı sağlayacaktır. Elde edilen sonucun gerek bilimsel araştırmalarının gelişimi gerekse kalkınmanın sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından çok değerli olduğu düşünülmektedir.





## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, kaos teorisinin temel matematiksel açıklamalarından, Türkiye Karadeniz sahilinde yer alan 4 havza üzerindeki, akım gözlem istasyonlarına ait günlük akım serilerinin analizinin uygulanmasına kadar bir çok konuyu kapsamaktadır. Çalışma literatürdeki çoğu benzerine göre, faz uzayının kurulumu esnasında, dalgacık analizi uygulamasını da içererek, serilerin içerdiği gürültünün giderimini de incelemektedir. Doğal serilerin içerdiği gürültünün frekansının belirli olmaması nedeniyle dalgacık analizi uygulanırken, uygun seviyede gürültü giderimi yapılması için, bilgi (enformasyon) kriteri kullanılmış ve seviye dalgacık entropisi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrılan parçalar, yaklaşım (A) ve detay (D) üzerinde her bir istasyon için kaotik analiz, öngörü ve sistem modelinin belirlenmesi uygulamaları yapılmış ve serilerin original halleri ile karşılaştırılarak; gürültünün bu tip uygulamalarda sistem üzerindeki etkisi inceleme altına alınmıştır. Çalışmada kullanılan, DSI'ye ait akım gözlem istasyonlarının hepsi uzun kayıtlara (30 yıl ve üzeri) sahip olduğu için, elde edilen sonuçların anlamlı olduğu düşünülmektedir.

Uygulamanın ilk bölümünde, Karadeniz sahilinde yer alan DSI'ye ait 4 adet havza üzerindeki akım gözlem istasyonlarına ait, günlük akımlar kullanılarak verilerin kaotik davranışa sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Sistemin davranışının faz domeninde daha rahat gözleneceği düşünülmüş ve bu sebeple Takens'a ait zaman gecikmeli koordinatlar yöntemi ile faz uzayı yeniden kurulmuştur. Faz uzayının koordinatları, sistemin evrimini tam olarak gösterebilmek için gerekli olan durum değişkenlerinden meydana gelir (Koçak ve Şen,1997). Takens teoremine göre, sistemin gecikmeli kopyaları faz uzayında uygun boyutta gömülürse, davranışını belirleyen yörüngeler daha net gözlenebilir. Bu çalışmada faz uzayının yeniden kurulumu aşamasında, gerekli olan parametrelerden zaman gecikmesi (T)'nin elde edilmesi için otokorelasyon fonksiyonunun doğrusal olmayan eşdeğeri kabul

edilen ortak bilgi fonksiyonu, ve diğ er bir parametre olan gömme boyutunun belirlenmesi için ise yanlış en yakın komşular yöntemi kullanılmıştır. Bunun yanı sıra; faz uzayında yörüngelerin oluşturduğu çekerin boyutunu belirlemek için korelasyon boyutları hesaplanırken Hegger vd., tarafından 1999 yılında oluşturulan TISEAN3.0.1 (Time Series Analysis), programı kullanılmıştır. Bu program literatürde zaman serisi üzerindeki özellikle kaotik analizinde kullanımına en sık rastlanan programdır. Uygulama sonuçları, serilerin hepsinin fraktal korelasyon boyutuna sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu fraktal boyut, serilerin kaotik karakterlere sahip olduğunun bir göstergesidir. Bunun yanı sıra, istenmeyen gürültüden ayrılmış parçalarında faz uzayında oluşturdukları çekerlerin kaotik davranış gösterdiği ispatlanmıştır. Elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, gürültüden ayrılmış parçanın korelasyon boyutunun fraktal yapı göstermesinin yanında, serinin orijinal haline göre daha düşük boyutta olduğu gözlenmiştir. Bu durum, serilerin kaotik davranışları üzerinde gürültü etkisinin bir sonucudur. Boyutun gürültü ile büyümesi, faz uzayında çekerin gözlenmesini zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak serinin öz karakterinin gizlendiği ortaya çıkmaktadır.

Uygulamanın ikinci bölümünde; sistemlerin karakterlerini incelemek için kullanılan Lyapunov üstelleri yöntemi, uygulama kapsamında incelenen havzalar üzerinde uygulanmıştır. Pozitif Lyapunov üstelinin kaotik karakterin bir göstergesi olduğu düşünülürse, istasyonların tamamında pozitif sonuçlar elde edilmiştir. Fakat; sonuçlar çok düşük değerlerde elde edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen Rosenstein vd. (1993) yöntemi literatürde, zaman serilerinden Lyapunov üstellerinin hesaplanmasında en sık kullanılan yöntemdir. Bu sebeple; sonuçlar her ne kadar küçük değerlere sahip olsa da, literatürdeki örnekler göz önünde bulundurularak, (örn. Khatibi vd., 2012) pozitif değerlere sahip olmaları nedeniyle inceleme altına alınan havzaların kaotik karakterinin bir diğ er göstergesi olarak kabul edilmiştir.

Uygulamanın üçüncü kısmında Türkiye Karadeniz Sahilinde yer alan 4 havza üzerinde, sistem modellemesi ve öngörü uygulaması yapılmıştır. Havzalara ait istasyonlara ait veriler öngörülürken, lokal öngörü yöntemi ve ARX modelleri kullanılmıştır. Uygulama, havzalardaki istasyonlara ait günlük akım serilerine uygulanmıştır. Seriler, herbir istasyon için en düşük 30 yıllık verilere sahip, uzun kayıtlardır. Havzaların karakterlerinin belirlenmesi için elde edilen veri

uzunluğunun yeterli olduğu düşünülmektedir. Çalışmanın bu bölümünün ilk kısmında, daha önceki bölümlerde ispatlanmış olan kaotik karakter göz önünde bulundurularak, kaotik dinamikler temeline dayanan lokal öngörü yöntemi ile öngörü yapılmıştır. Yöntem ilk olarak serilerin orijinal hallerine daha sonra da dalgacık analizi neticesinde elde edilen yaklaşım (A) parçasına uygulanmıştır. Uygulama sonuçları, bütün havzalar için; dalgacık analizi neticesinde elde edilen parçanın neredeyse gerçeğe en uygun ( $R^2 > 0.99$ ) öngörü performansına sahip olduğunu göstermiştir. Havzalara ait istasyonlar bazında yapılan uygulamalarda ise; öngörü performansı değişiklik göstermektedir. Çoruh Havzası ve Batı Karadeniz Havzası ve Yeşil Irmak istasyonları için öngörü performansı, başarılı değerler almasına rağmen ( $R^2 > 0.9$ ), aynı başarı Doğu Karadeniz Havzası istasyonlarında yakalanamamıştır. Dalgacık analizi neticesinde; bütün istasyonlarda benzer performans gözlemlendiği halde, serilerin orijinal hallerinde bu tarz farklılıklar olması, lokal öngörü yöntemi'nin gürültü ve salınım hassasiyetini birkez daha doğrulamıştır. Doğu Karadeniz Havzası'nda diğer havzalardan farklı olarak, nehirler denize direkt dökülmektedir. Bunun yanı sıra havza, Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgesinde yer almaktadır. Bu durum, akımların yüksek değerler almasını ve yıl içi taşkınların sık olmasına sebep olmaktadır. Lokal öngörü yöntemi, öngörü performansında özellikle pik değerleri yakalamada zorluk çekmektedir (Khatibi vd. 2012). Lokal öngörü yöntemi ile yapılan öngörüleri karşılaştırmak amacı ile, serilerin içerdiği doğrusal olmayan dinamiklere dayanan bir yöntem olan ARX modeli uygulanmıştır. Yöntemden elde edilen sonuçlar, Lokal öngörü yöntemi kadar başarılı olamamıştır (Çizelge 8.9). Bu durum; lokal öngörü yöntemi'nin serinin dinamik yapısını daha iyi algıladığının düşünülmesine sebep olmuştur. ARX modelleri de aynı lokal öngörü yöntemi gibi, serinin orijinal halinde değişik performans göstermesine rağmen, dalgacık analizi neticesinde elde edilen A parçası üzerinde yapılan öngörüler, lokal öngörü yönteminde olduğu gibi, başarılı ( $R^2 > 0.99$ ) ve tutarlı performans göstermiştir. Sonuç olarak, öngörü yöntemlerinin serinin içinde yer alan gürültüye olan duyarlılığı, gerek kaotik dinamiklere gerek doğrusal olmayan dinamiklere dayanan yöntemlerde de gözlenmiştir. Bu sebeple, seriler öngörülürken, gürültü azaltımı tavsiye edilmektedir. Bu noktada; ayrılan parçanın beyaz gürültü olmaması durumunda, kalan kısmın seriyi ne kadar temsil ettiği sorusu gündeme gelmektedir. Bu duruma çözüm olarak bu çalışmada, serilerin taşıdığı bilginin bir ölçütü olan entropi kriteri

kullanılmıştır. Gerek model belirlemede gerekse öngörüde, serinin içinde ihtiva edilmesi şart olan kriter bilgidir. Bu sebeple, serilerin taşıdığı bilgiyi korumak için; dalgacık analizinde seviye belirlenirken dalgacık entropisi kavramı kullanılmıştır. Havzalara ait modeller kurulurken; çeşitli mertebelerde yapılan denemeler sonucunda, öngörü performansı göz önünde bulundurularak seçilen uygun mertebedeki ARX modelleri kullanılmıştır. Elde edilen modellerde havzalara ait istasyonların model mertebeleri aynı çıkarken, dalgacık analizi neticesinde elde edilen parçaların havza bazında aynı model mertebesi ve katsayılarına sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, aynı havza içerisinde yer alan istasyonların, bilgi korunarak uygulanan uygun bir gürültü azaltımı sonucunda benzer dinamik gösterdiğinin kanıtıdır. Türkiye ve dünyada akım serileri ölçümlerinin yetersiz olduğu bilinen bir gerçektir. Yaşanan sıkıntılar bir çok araştırmacı tarafından özenle vurgulanmaktadır. Bu sebeple serilerin ileriye ve/veya geriye dönük tahminleri git gide önem kazanmaktadır. Çalışmadan elde edilen başarılı sonuçlar, kullanılan yöntemlerin, gerek ileriye gerek geriye yönelik akım tahminleri için başarılı sonuçlar sağlamanın yanı sıra, eksik istasyonların verilerinin tamamlanması konusunda da uygulanabilirliğinin bir göstergesidir. Doğal sistemler, kontrol altına alınabilen sistemler değildir. Bu sebeple, sistemlerin doğru analiz edilerek, karakterlerin en etkin şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Sistemlerin karakterlerinin doğru belirlenerek modellenmesi ve öngörülmesi, iklim değişimi ve küresel ısınmanın etkisi ile git gide daha da önem kazanmaktadır. Su canlıların en temel ihtiyacıdır. Bu sebeple, bu ihtiyaca yönelik hizmet veren Su havzalarının doğru analizi ve yönetimi çok önemlidir. İçme suyu, sulama, enerji gibi birçok maksada hizmet veren Su havzalarının doğru analizinin yapılması için, her geçen gün ilerleme katdeden bilim ve teknolojinin sunduğu imkanlar değerlendirmeye alınmalıdır. Günümüzde, gelişimi halen devam eden kaotik analiz ile Su havzalarının karakterlerinin belirlenmesi ve davranışlarının modellenmesi Hidroloji alanında çalışan araştırmacıların ilgisini çekmiş ve her geçen gün çekmeye devam etmektedir. Çalışmada kullanılan ve içme suyu kullanımı, sulama ve özellikle enerji ihtiyacının karşılanması gibi birçok maksada hizmet verebilmek için analizi önemli olan günlük akım serileri üzerinde uygulanan Kaotik Analiz, başarılı sonuçlar elde etmemizi sağlamıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde, kaotik analizin diğer veri kümeleri üzerinde de uygulanması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abarbanel, H.D.I., Brown, R., Sidorowich, J.J., Tsimring, L.S.** (1993). The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems, *Reviews of Modern Physics*, 65-4, 1331-1392.
- Aihara, K.** (2002). Chaos in Neural Systems, The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, 2nd edition), 208-212, *The MIT Press*, Cambridge, USA
- Akay, M.,** (2000). Nonlinear Biomedical Signal Processing, *Dynamic Analysis and Modelling*, Volume II, IEEE Pres.
- Al-Awadhi, S., Jolliffe, I.** (1998). Time Series Modelling of Surface Pressure Data. *International Journal of Climatology*, 18, 443-455.
- Amorocho, J.** (1967), The nonlinear prediction problems in the study of the runoff cycle, *Water Resources Research* , 3(3), 861-880
- Amorocho, J., Brandstetter, A.**(1971), Determination of nonlinear functional response functions in rainfall-runoff processes, *Water Resources Research* , 7(5), 1087-1101.
- Araghinejad, S., Azmi, M., Kholghi, M.** (2011). Application of artificial Neural network ensembles in probabilistic hydrological forecasting, *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 94-104.
- Ayaz, E.** (1997). *Dalgacıklar ve Elektrik Mühendisliği'ndeki Uygulamaları*, (Y. Lisans Tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Bae, H., Kim, Y.T., Lee, S.H., Kim, S., Lee M.H.** (2005). Fault Diagnostic of Induction Motors for Equipment Reliability and Health Maintenance based upon Fourier and Wavelet Analysis, *Art Life Robotics*, 9, 112–116.
- Baker, G., Gollub, F.** (1998). Chaotic dynamics an introduction, *Cambridge Press*, 39-47, England.**Barmish, B., R.** (1984). Invariance of the strict Hurwitz property for polynomials with perturbed coefficients, *Automatic Control*, IEEE Transactions
- Banchoff, T.**(1996) Beyond the Third Dimension: Geometry, Computer Graphics, and Higher Dimensions, *Second Edition*, Freeman.
- Bayazıt, M.** (1998). Hidrolojik Modeller, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaa, s.228, İstanbul

- Brown, R., Bryant, P., Abarbanel, H.D.I.** (1991). Computing the Lyapunov Spectrum of A Dynamical System from an Observed Time Series, *Phys. Rev. A*, 43, No 6, 2787-2806.
- Camastra, F., Vinciarelli, A.** (2002). Estimating the Intrinsic Dimension of Data with a Fractal-Based Method, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24, No 10.
- Chang, L. C., Chang F. J., Chiang., Y. M.** (2004). A two-step-ahead recurrent neural network for stream flow forecasting. *Hydrological Processes*, 18, 81-92
- Corana, A., Bortolan, G., Casaleggio, A.** (2004). Most probable dimension value and most interval methods for automatic estimation of dimension from time series, *Chaos Solitons and Fractals*, 20, 779-790.
- Çoban G.,** (2007). Zaman Serilerinden Faz Uzayının Kurulması ve Kaos Tespiti: Döviz Kurları Üzerinde Bir Uygulama, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Deka, P.C., Haque, L., Banhatti, A.G.** (2012). Discrete wavelet-Ann approach in time series flow forecasting-a case study of Brahmaputra river., *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 5(4), 673-685.
- Dhanya, C.T., Kumar, D.N.** (2011). Multivariate nonlinear ensemble prediction of daily chaotic rainfall with climate inputs., *Journal of Hydrology*, 403, 292-306.
- Dawson C. W., Abrahart R. C., See L. M.** (2007), HydroTest: A webbased toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts, *Environ. Modell. Software*, 22(7)
- Ding, M., Grebogi, C., Ott, E., Sauer, T. ve Yorke, J.A.** (1993), Estimating Correlation Dimension from Chaotic Time Series: When Does Plateau Onset Occur, *Physica D*, 69, 404-424.
- Eckmann, J.P., Ruelle, D.** (1985) Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors, *Reviews of Modern Physics*, 57, No 3, 617-656.
- Elshorbagy, A., Simonovic, S.P., Panu, U.S.** (2002)., Estimation of missing streamflow data using principles of chaos theory. , *J. Hydrol.* 255, 123-133
- Erdoğan H., Gülal E.** (2009), Mühendislik Yapılarının Davranışlarının Çoklu Giriş- Tekli Çıkış Modellerle Tanımlanması, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı 1115, Mayıs 2009, Ankara
- Feigenbaum, M. Ji.** (1978)., Quantitative Universality for a Class of Non-Linear Transformations. *J. Stat. Phys.* 19: 25-52
- Frank, R. J., Davey, N., Hunt, S. P.** (2001). Time series prediction and neural networks. *Journal of Intelligent and Robotic Systems.*, 31, 91-103
- Fraser, A.M.** (1986). Using mutual information to estimate metric entropy", In: Mayer-Kress, G. (Ed.), *Dimensions and Entropies in Chaotic Systems.*, Springer, Berlin, 82-91

- Frison, T., Abarbanel, H., Earle, M., Schultz, J., Sheerer, W.** (1999). Chaos and predictability in ocean water level measurements. *Journal Nonlinear forecasting of stream flows using a chaotic approach and artificial neural networks.*, *Geophysical Research Oceans*, 104, 7935-7951.
- Grassberger, P. ve Procaccia, I.**, (1983). Measuring the Strangeness of Strange Attractors, *Physica D*, 9, 189-208.
- Gevers, M., Miskovic, L., Bonvin, D., Karimi, A.** (2005). Identification Of a TwoInput System: Variance Analysis, In: 16th IFAC World Congress, Prague, Tchequie, 48, CDRom paper 02720.
- Govindaraju, R.S.** (2000), Artificial neural networks in hydrology II: Hydrological applications, *Journal of Hydrologic Engineering* ,5, 124-137.
- Harms, A.A., Campbell, T. H.** (1967), An extension to the Thomas-Fiering model for the sequential generation of streamflow, *Water Resources Research*, 3(3), 653–661.
- Hegger, R., Kantz, H., Schreiber, T.** (1999). Practical implementation of nonlinear time series methods: the TISEAN package, *Chaos*, 9, 413–435.
- Hentschel, H.G.E., Procaccia, I.** (1983). The Infinite Number of Generalized Dimensions of Fractals and Strange Attractors, *Physica D*, 8, 435-444.
- Hesse, C., Heunecke, O., Speth, M., Stelzer, I.** (2000). Belastungsversuche a Einem Schalentragwerk aus Ziegelsteinen , XII. Internationaler Kurs für Ingeniervermessung München, pp. 34
- Hilborn, R. C.** (2000). *Chaos and Nonlinear Dynamics An Introduction for Scientists and Engineers*, Oxford University Press, New York.
- Izzard, C.F.** (1966), A mathematical model for nonlinear hydrologic systems *Journal of Geophysical Research* , 71(20), 4811-4824.
- Jaideva, C. Goswami, Andrew K. Chan** (2011). *Fundamentals of Wavelets*, John Wiley & Sons, Inc.
- Jayawardena, A.W., Lai, F.** (1994). Analysis and prediction of chaos in rainfall and streamflow time series., *J. Hydrol.*, 153, 23–52.
- Kaplan, D. T., Glass, L.** (1992). Direct Test for Determinism in a Time Series *Physical Review Letters*, 68, p.4.
- Kavvas, M.L.** (2003), Nonlinear hydrologic processes: conservation equations for determining their means and probability distributions, *Journal of Hydrologic Engineering* , 8(2), 44-53.
- Kennel M.B, Brown., R., Abarbanel H.D.I.**, (1992), Determining embedding Dimension for phase space reconstruction using a geometric method. *Phys Rev A* , 45, 3403–11.
- Khatibi, R., Bellie Sivakumar B., Mohammad A., Kisi. O., Koçak K., Zadeh D.** (2012), Investigating Chaotic Behaviour on River Stage and Discharge Time Series, *Journal of Hydrology*, 414–415, 108–117
- Khokhlov, V., Glushkov, A., Loboda, N., Serbov, N. and Zhurbenko, K.** (2008). Signatures of low-dimensional chaos in hourly water level

- measurements at coastal site of Mariupol, *Ukraine. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22, 777-787.
- Klemes, V.** (1978), Physically based stochastic hydrologic analysis, *Advances in Hydrosciences* , 11, 285-352.
- Koçak, K.** (1996). Kaotik Davranış Kriteri Olarak Fraktal Boyut Değişimi ve Dinamik Sistemlere Uygulanması,(Doktora Tezi), İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü,Meteoroloji Müh.,Anabilimdalı.
- Koçak K., Şen Z.** (1997). Use of Correlation Dimension Function in Dynamical Systems,*Proceedings of The 12th IEEE, International Symposium on Intelligent Control*, İstanbul, Turkey.
- Kostelich., E.R.,** (1997), Introductory Differential Equations From Linearity to Chaos, *Mathematics*, 645
- Krasovskaia, I., Gottsechalk L., Kundzewicz Z. W.,**(1999) Dimensionality of Scandinavian river flow regimes, *Hydrol. Sci. J.*, 44 (5), 705–723.
- Kuo-Lin, H.,** (2011). Hydrologic forecasting using artificial neural networks: A Bayesian sequential Monte Carlo approach., *Journal of Hydroinformatics*, 13(1), 25-35.
- Kutner M.H.,Neter J., Nachtsheim C.J., Wasserman W.,** (2004), *Applied Linear Statistical Models* , McGraw Hill.
- Lambrakis N, Andreou AS, Polydoropoulos P, Georgopoulos E, Bountis T.** (2000) Nonlinear analysis and forecasting of a brackish karstic spring. *Water Resour Res*, 36(4), 875–84.
- Li T. Y., Yorke J. A.,**(1975) , Period three implies chaos, *Amer. Math. Monthly*.
- Liaw, C., Islam, M.N., Phoon, K.K., Liong, S.** (2001). Comment on “Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems” by G.B Pasternack. *Adv., Water Resources.*,24, 575–580.
- Lisi, F., Villi, V.,**(2001). Chaotic forecasting of discharge time series: a case study. *J.Am. Water Resour. Assoc.*, 37 (2), 271–279
- Liu, Q., Islam, S., Rodriguez-Iturbe, I., Lee, Y.** (1997), Phase-space analysis of daily streamflow: characterization and prediction, *Adv. Water Resour.* 21, 463–475.
- Ljung, L.** (1999). *System Identification: Theory For The User*. Second Edition, PrenticeHall; Upper Saddle River, New Jersey, USA
- Lorenz, E.N.** (1963), Deterministic nonperiodic flow, *Journal of the Atmospheric Sciences* ,20, 130-141.
- Mallat, S,G.** (1989). A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. II, NO. 7, 674-693.
- Mandelbrot, B. B.**(1997). *Fractals: Form, chance, and dimension*, W.H. Freeman, San Francisco.
- Marques,C.A.F.** (2006). Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series., *Physics and Chemistry of the Earth, A/B/C*, 31(18), 1172-1179.



- May, R.M.** (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261, 459–467.
- Medio, A.** (1993)., *Chaotic Dynamics: Theory and Applications to Economics*, Cambridge University Press, Great Britain.
- Meyer, Y.** (1993)., *Wavelets: Algorithms and Applications*. Philadelphia: SIAM., USA
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J.** (2004). User Guide Wavelet Toolbox For Use with MATLAB.
- Natwong, B., Sooraksa P., Pintavirooj C., Bunluechokchai S., Ussawawongaraya W.** (2006). Wavelet Entropy Analysis of the High Resolution ECG, *ICIEA*, doi. 0-7803-9514-X/06/\$20.00.
- Orhunbilge, N.** (2002), Uygulamalı Regresyon ve Korelasyon Analizi, İ.Ü., İşletme Fakültesi, İstanbul.
- Özer, S., Zorlu, H.** (2012). Doğrusal olmayan par sistemler kullanılarak kaotik zaman serisi kestirimi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27, 323-331.
- Özkaynak, F., Öksüztepe E.** (2010). Kaotik zaman serilerinin analizi, *Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu*, Dicle Üniversitesi, 1447-1459., Diyarbakır.
- Pamuk N.** (2013). Dinamik Sistemlerde Kaotik Zaman Dizilerinin Tespiti, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, Cilt 15 (1) ,77-91.
- Paningrahi, D. P., Mujumdar, P. P.** (2000). Reservoir operation modelling with Fuzzy Logic, *Water Resources Managment*, Cilt 14, 89-109
- Pasternack, G.B.** (1999)., Does the river run wild? Assessing chaos in hydrologic systems., *Adv. Water Resour.*, 23 (3), 253–260.
- Pekárová, P, Onderka, M., Pekár, J., Rončák, P. and Miklánek, P.** (2009). Prediction of water quality in the Danube River under extreme hydrological and temperature conditions., *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 57(1), 3-15.
- Polikar, R.** (1999), The Story of Wavelets, Pyphysics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering, *World Scientific and Eng. Society Press*, pp.192-197, USA
- Porporato, A., Ridolfi, L.** (1997). Nonlinear analysis of river flow time sequences. *Water Resour. Res*, 33 (6), 1353–1367.
- Ratkowsky D.A.**, (1983), *Nonlinear Regression Modeling* , Marcel Dekker NewYork.
- Roeck, G., Peeter s, B., Maeck, J** (2000). Dynamic Monitoring of CivilEngineering Structures, Computational Methods For Shell and patial Structures , IASSIACM, Athens, Greece.
- Rosenstein, M.T., Collins, J.J. ve De Luca C. J.** (1993). A Practical Method for Calculating Largest Lyapunov Exponents from Small Data Sets, *Physica D*, Cilt 65, 117.
- Salas, J.D., Smith R. A.**, (1981). Physical basis of stochastic models of annual flows, *Water Resources Research* , 17(2), 428-430.
- Sang Y. F., Wanf D., Wu J.,C., Zhu Q. P., Wang L.** (2011). Wavelet-Based Analysis on the Complexity of Hydrologic Series Data under Multi-Temporal Scales, *Entropy*, 13, 195-210; doi:10.3390/e130101,
- Sano, M., Sawada, Y.**(1985). Measurement of the Lyapunov Spectrum from A

- Chaotic Time Series ,*Phys. Rev. Lett.*, 55, 1082-1085.
- Schrieber, T.** (1993)., Extremely Simple Nonlinear Noise Reduction, *Phys. Rev.E* 47(4), 2401-2404
- Shane, C., Ratneshwar, J.** (2005). Structural Damage Detection Using ARARX Models , Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University.
- Shannon, C.E. ,Weaver, W.**(1949). The Mathematical Theory of Communication, *Urbana*, The University of Illinois Press.
- Sivakumar, B.** 2000. Chaos theory in hydrology: important issues and interpretations. *J. Hydrol.*, 227 (1–4), 1–20.
- Sivakumar, B. , Brentsson R., Olsson J., Jinno K.,** (2001). Evidence in Rainfall, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*
- Sivakumar, B., Jayawardena, A.W.,Fernando, T.M.G.H.** (2002) River flow forecasting: use of phase-space reconstruction and artificial neural networks, approaches. , *J. Hydrol.*,265 (1–4), 225–245.
- Sivakumar, B., Jayawardena, A.W., Li, W.K.** (2007). Hydrologic complexity and classification: a simple data reconstruction approach. *Hydrol. Process.*, 21 (20), 2713–2728.
- Sivakumar, B., Singh, V.P.,** (2011). Hydrologic system complexity and nonlinear dynamic concepts for a catchment classification framework, *Hydrol.Earth Syst. Sci. Discuss.*, Cilt 8, 4427–4458.
- Söderström, T., Stoica P.** (1989). System Identification, Prentice Hall, University Press, Cambridge, Great Britain,
- Sprott, J. C.** (2003). Analysis of Chaotic Time Series, *Cambridge University Press*, USA.
- Strogatz, S.H.** (1994). Nonlinear Dynamics and Chaos, With Applications to Physics, Biology and Engineering, *Perseus Books Publishing*, USA.
- Sudheer, K. P., Nayak, P. C., Ramasastri, K. S.** (2003). Improving peak flow estimates in artificial neural network river flow models, *Hydrological Processes*, 677-686
- Takens, F.** (1981). Detecting strange attractors in turbulence, in: D.A. Rand, L.S. Young (Eds.), *Lectures Notes in Mathematics*, Cilt 898, Springer-Verlag, New York, pp. 366–38.
- Toluk ,T** (2006). Akarsu Akımlarının Yapay Sinir Ağı Metotları Kullanılarak Modellenmesi, (Yüksek Lisans Tezi)Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Tongal, H., Demirel, M.C. and Booij, M.J.** (2013a). Seasonality of low flows and dominant processes in the Rhine River. , *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(2), 489-503.
- Tongal H.,** (2013b), Nonlinear forecasting of stream flows using a chaotic approach and artificial neural networks , *Earth Sci. Res. SJ.*, 17, 119 - 126
- Urbach, R.M.A.** (2000). Footprints of Chaos in the Markets: Analyzing Non-Linear Time Series in Financial Markets and Other Real Systems, *Prentice Hall*, Great Britain.

- Vafakhah, M.**, (2012). Application of artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system models to short-term streamflow forecasting. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(4), 402-414.
- Wagner, C.D. ve Persson, P.B.** (1998). Chaos in the Cardiovascular System: An Update, *Cardiovascular Research*, Cilt 40, No 2, 257-264.
- Whitney, H.**, (1936), Differentiable manifolds.,*Ann. Math.* 37, 645-680
- Wilcox BP, Seyfried MS, Blackburn WH, Matison TH.** (1990), Chaotic characteristics of snowmelt runoff: a preliminary study. In: Symposium on Watershed Management. Durango, CO: American Society of Civil Engineering
- Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L. ve Vastano, J.A.** (1985). Determining Lyapunov Exponents from a Time Series, *Physica D*, Cilt 16, No 3, 285-317.
- Wu, C.L. ve Chau, K.W.**, (2010). Data-driven models for monthly streamflow time series prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 1350-1367.
- Yılmaz D. ve Güler N.** , (2006). Kaotik Zaman Serisinin Analizi Üzerine Bir Araştırma, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* , Cilt 21, No 4, 759-779.



## **EKLER**

**EK A:** İstasyonlara Korelasyon İntegralleri Grafikleri TISEAN 3.01 Program Çıktıları

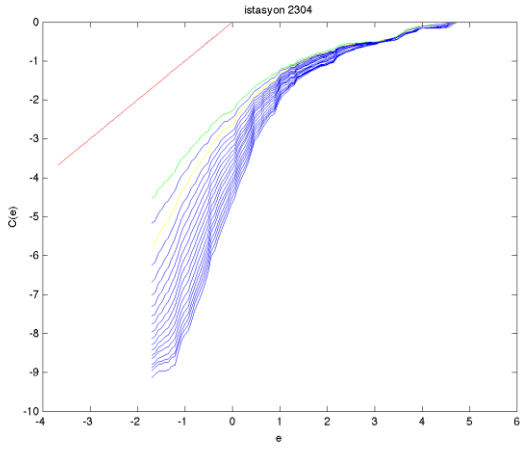
**EK B:** İstasyonlara Ait Lyapunov Üstelleri Grafikleri

**EK C :** İstasyonlara Ait ARX model ve Lokal Öngörü Grafikleri

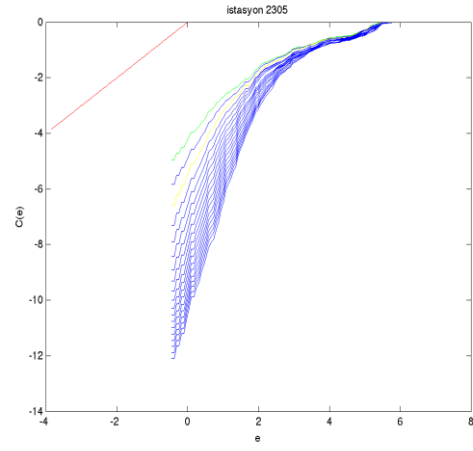
**EK D:** İstasyonlara Ait 3 Boyutlu Çeker Grafikleri



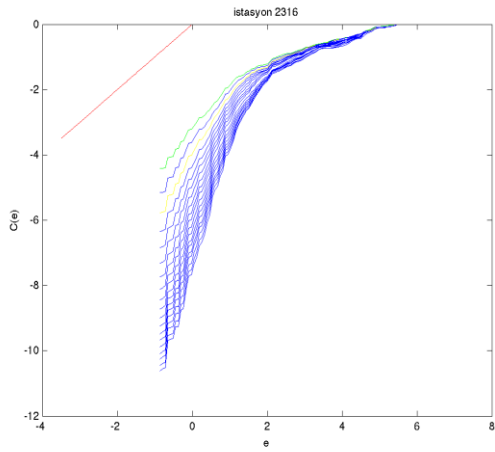
**EK A: İstasyonlara Korelasyon İntegralleri Grafikleri TISEAN 3.01  
Program Çıktıları**



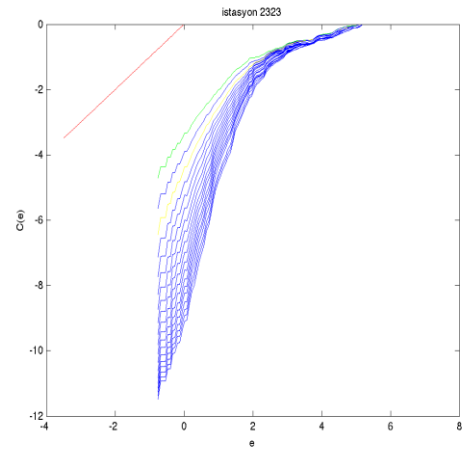
(a)



(b)

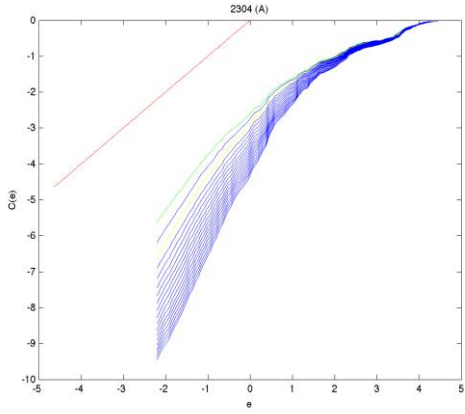


(c)

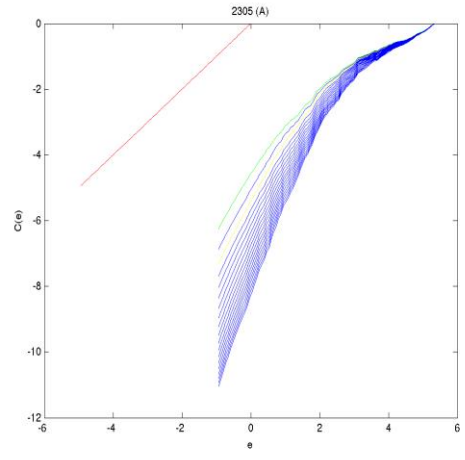


(d)

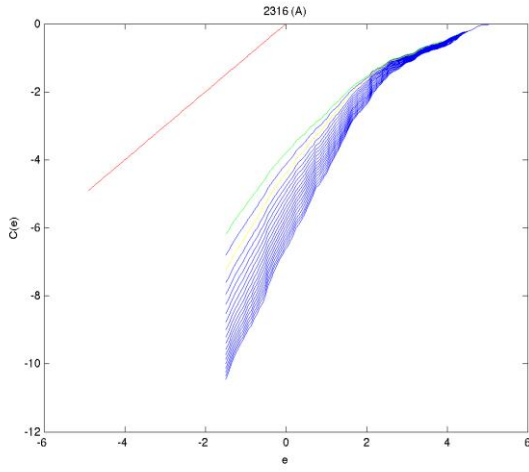
**Şekil A.1 : Çoruh Havzası İstasyonları Korelasyon İntegralleri**



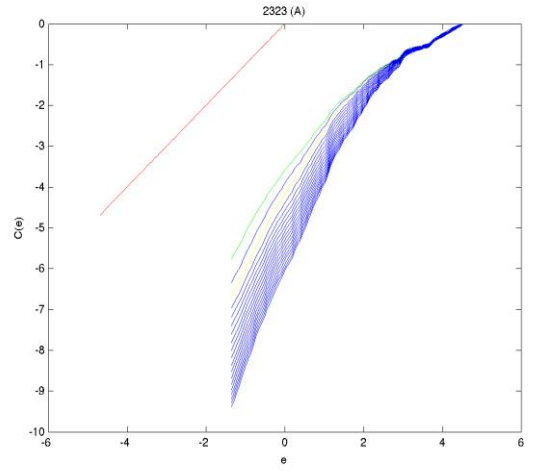
(a)



(b)

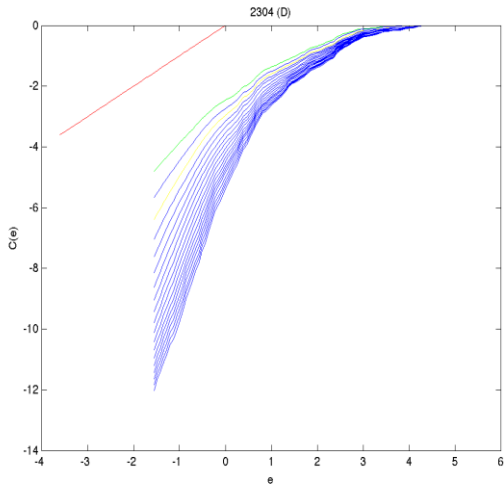


(c)

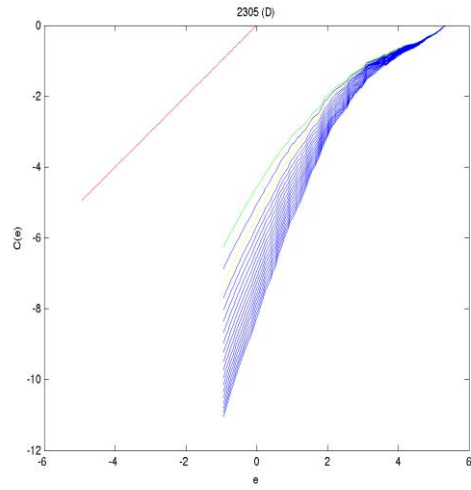


(d)

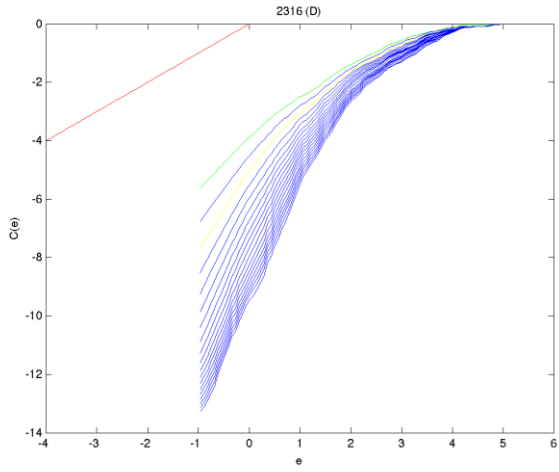
**Şekil A.2 : Çoruh Havzası A Parçası Korelasyon İntegralleri**



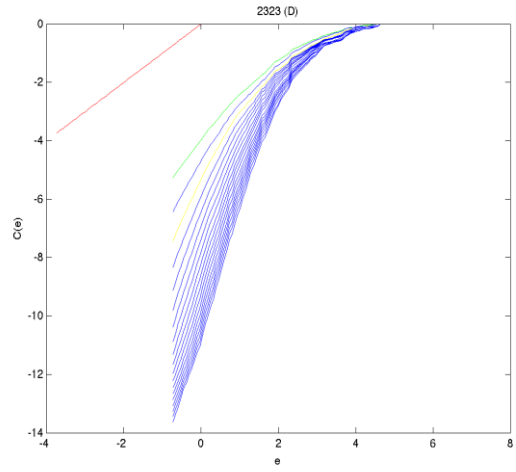
(a)



(b)



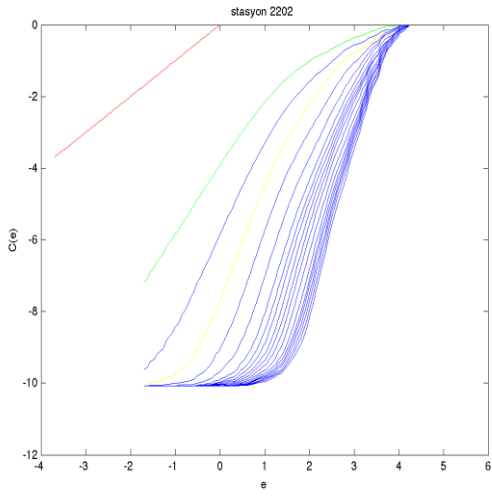
(c)



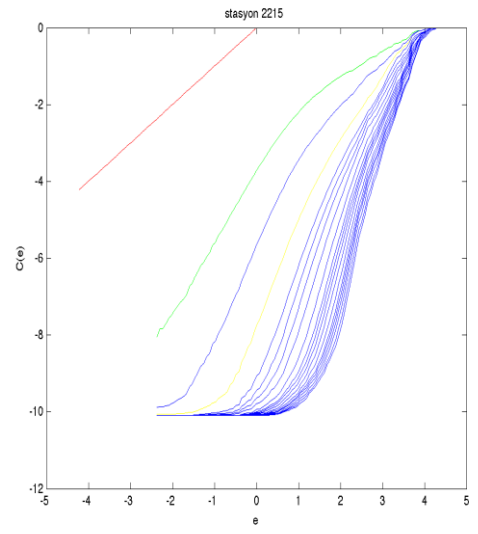
(d)

**Şekil A3: Çoruh Havzası İstasyonları D Parçası Korelasyon İntegralleri**

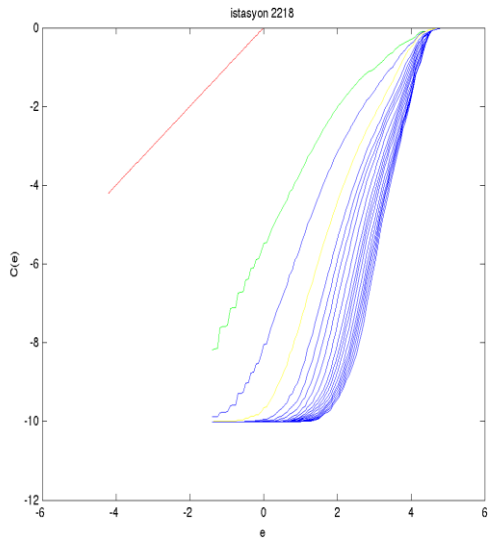




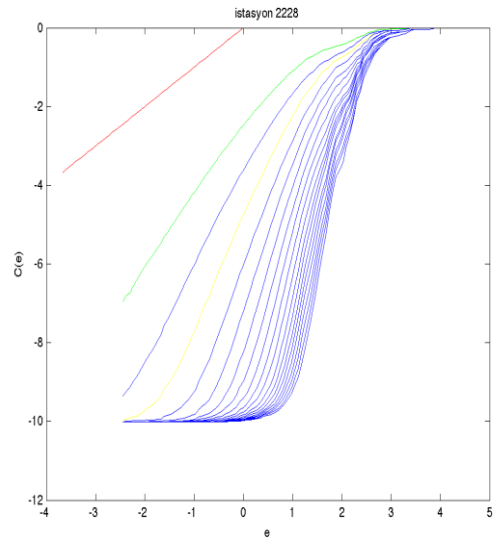
(a)



(b)

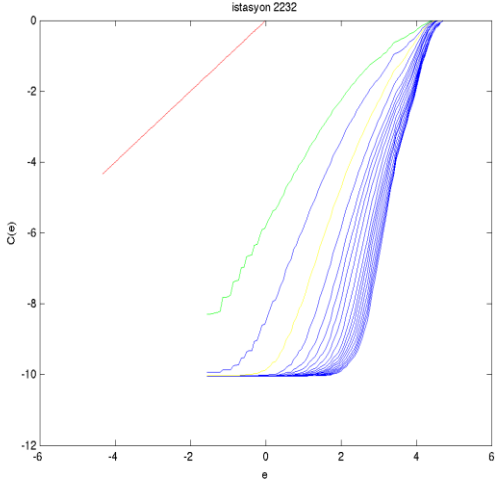


(c)

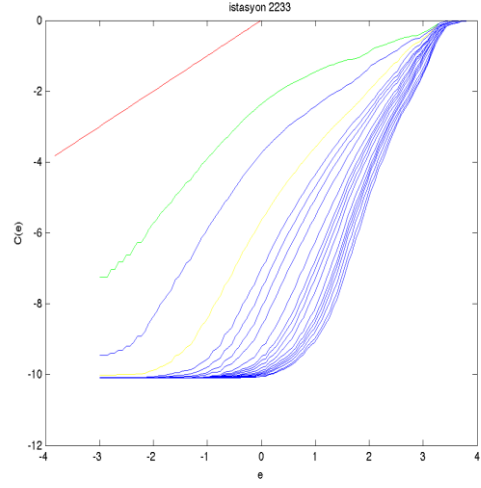


(d)

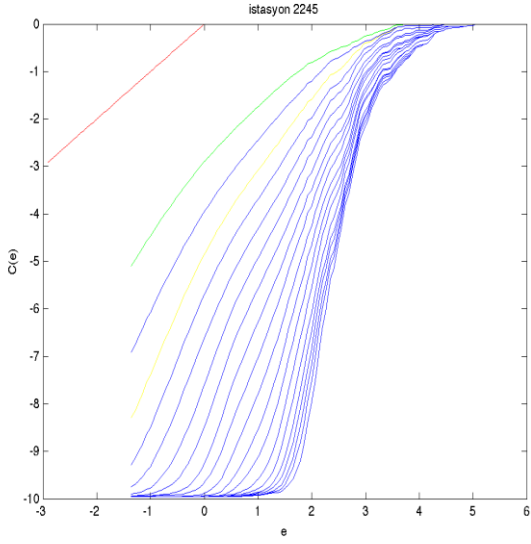
**Şekil A4:** Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Korelasyon İntegralleri



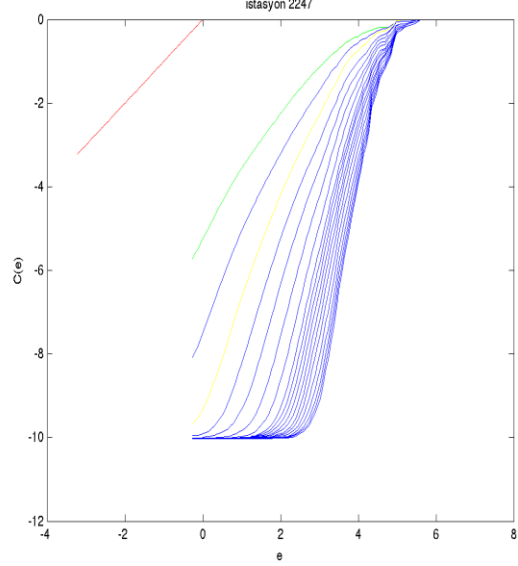
(a)



(b)

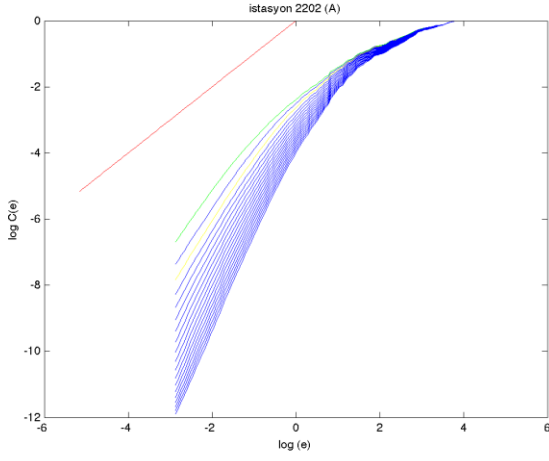


(c)

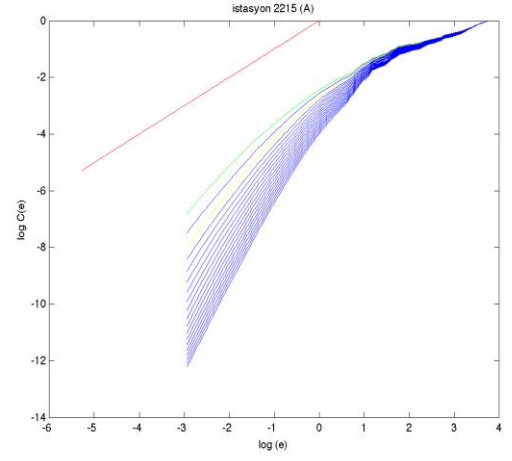


(d)

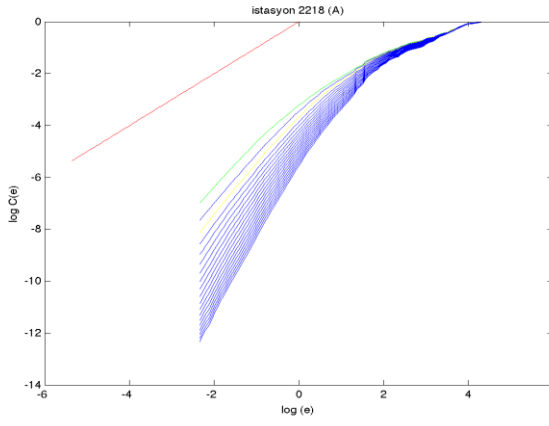
**Şekil A5:** Doğu Karadeniz Havzası Korelasyon İntegralleri



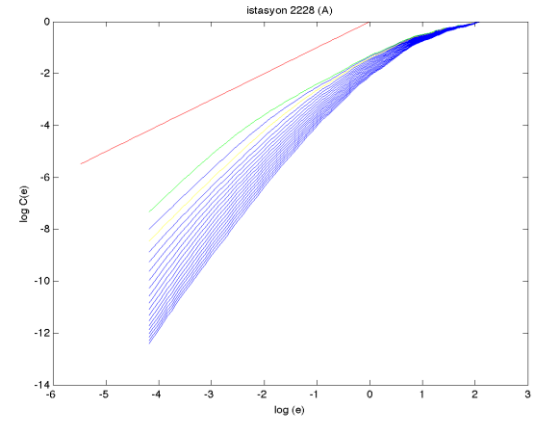
(a)



(b)

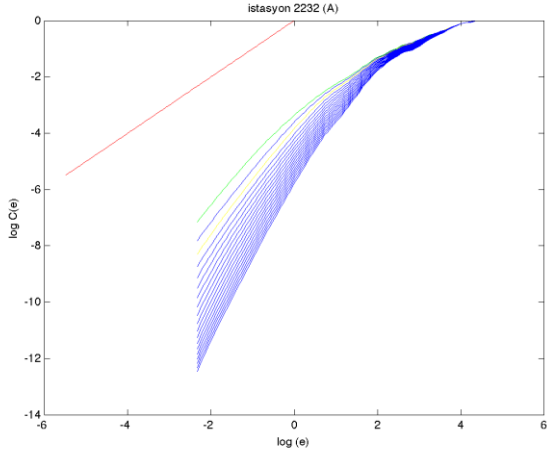


(c)

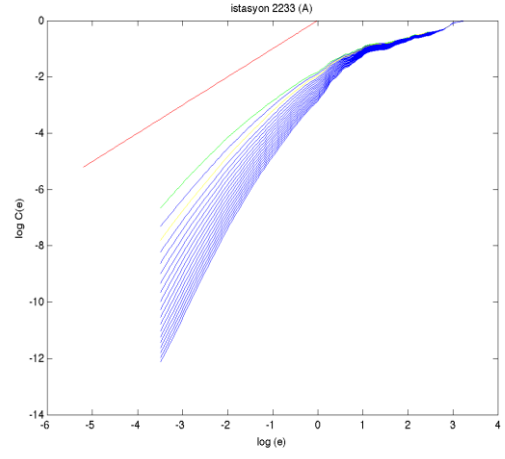


(d)

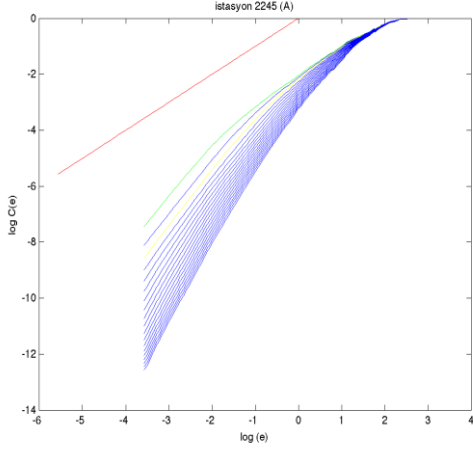
**Şekil A6:** Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Korelasyon İntegralleri



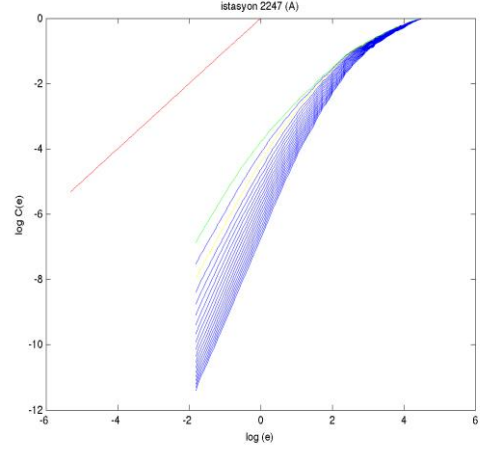
(a)



(b)

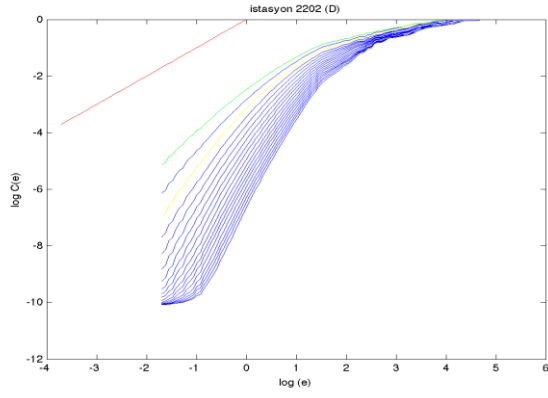


(c)

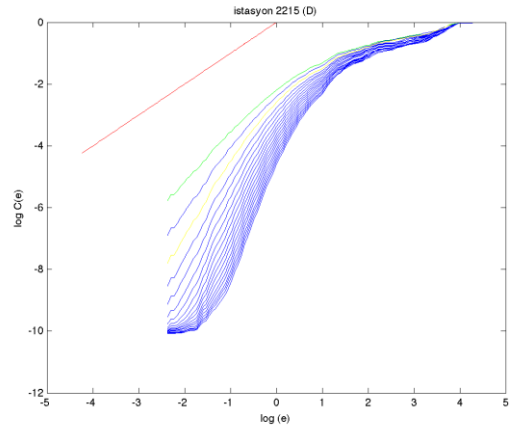


(d)

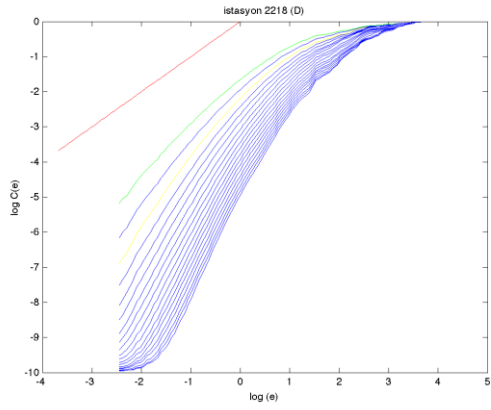
**Şekil A7: Doğu Karadeniz Havzası A Parçası Korelasyon İntegralleri**



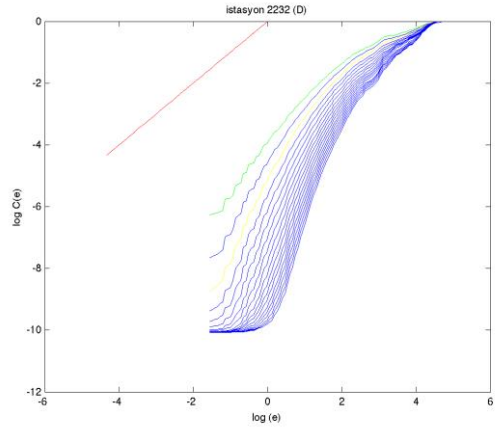
(a)



(b)

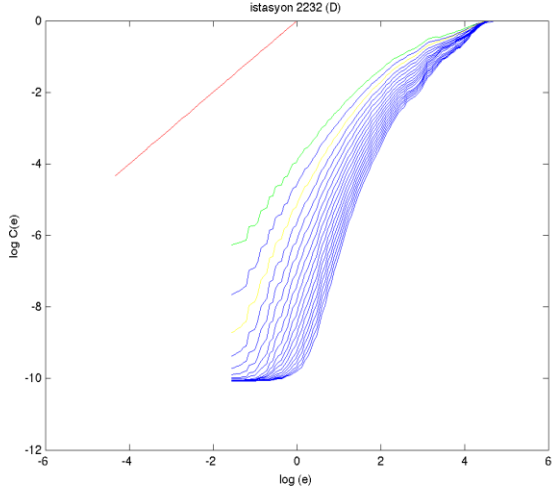


(c)

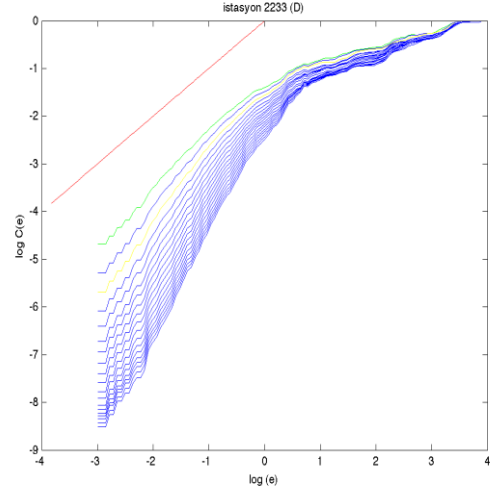


(d)

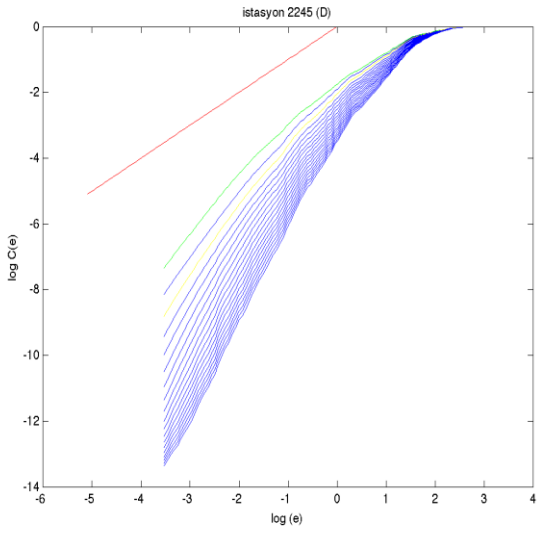
Şekil A8: Doğu Karadeniz Havzası D Parçası Korelasyon İntegralleri



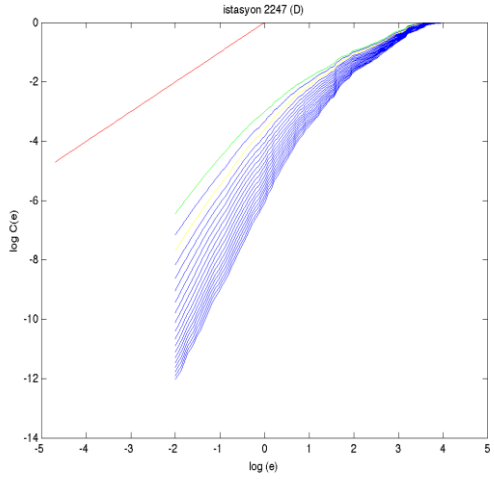
(a)



(b)

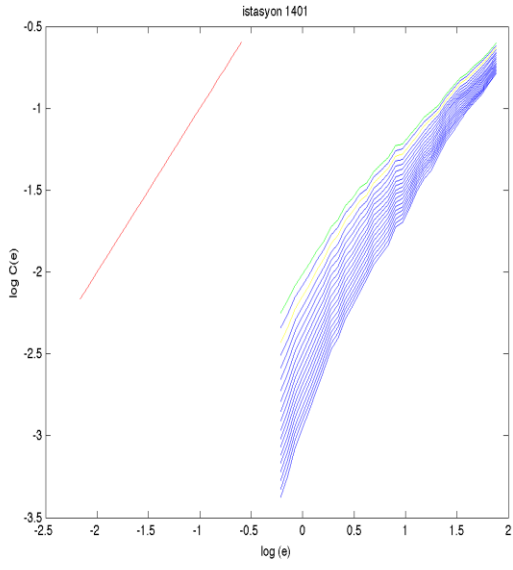


(c)

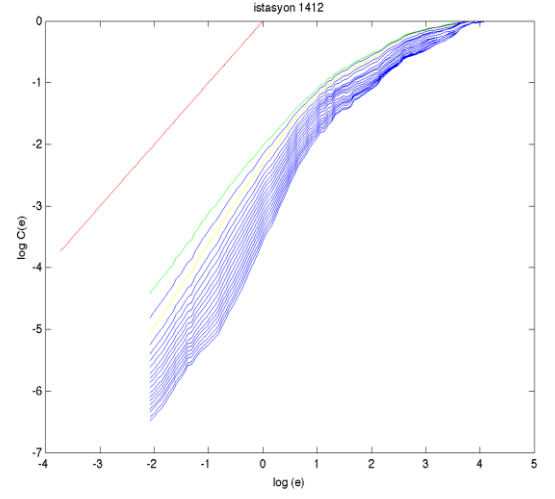


(d)

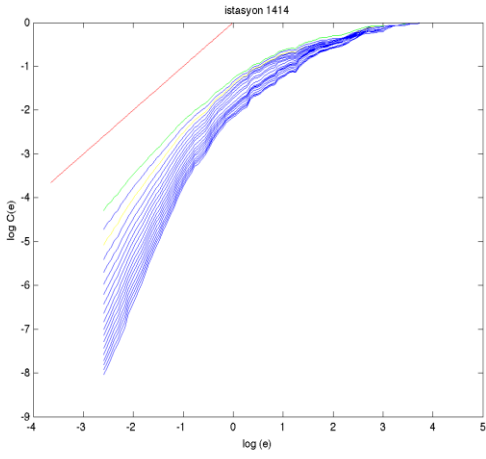
**Şekil A9:** Doğu Karadeniz Havzası D Parçası Korelasyon İntegralleri



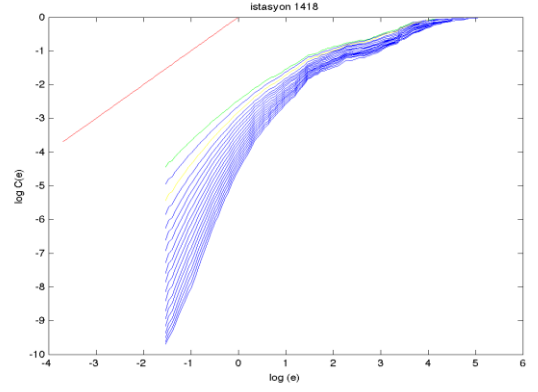
(a)



(b)

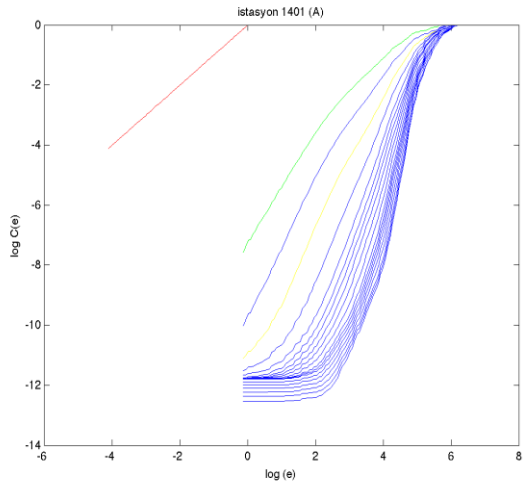


(c)

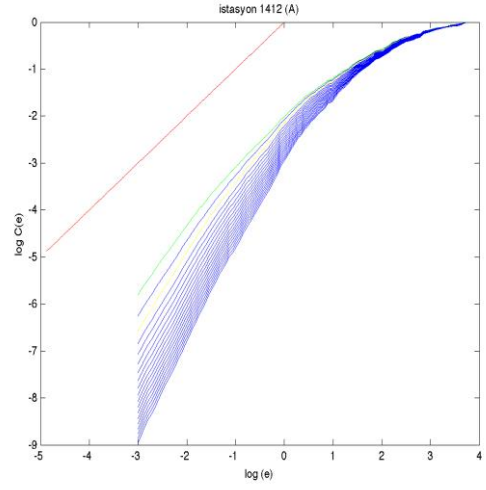


(d)

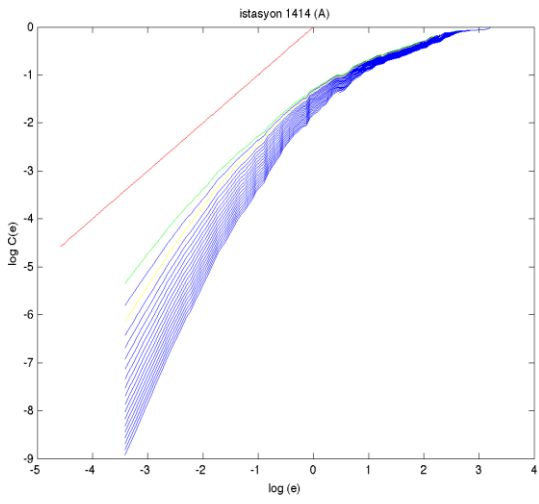
**Şekil A10:** Yeşil Irmak Havzası Havzası Korelasyon İntegralleri



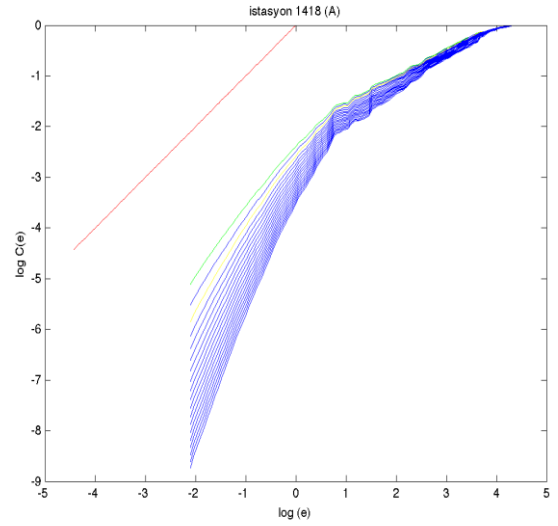
(a)



(b)



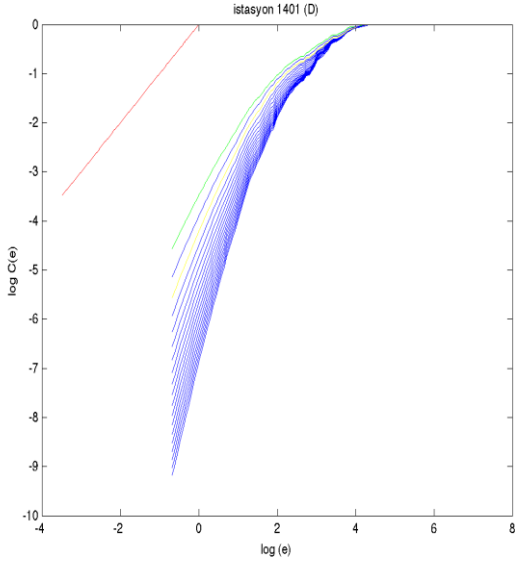
(c)



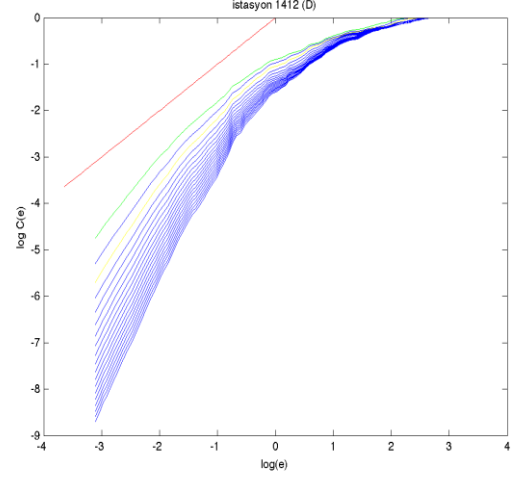
(d)

**Şekil A11:** Yeşil Irmak Havzası Havzası A Parçası Korelasyon İntegralleri

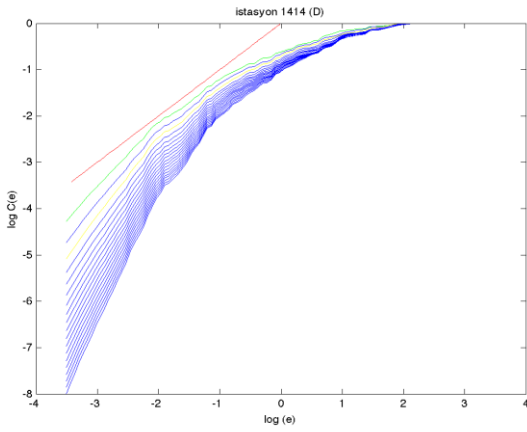




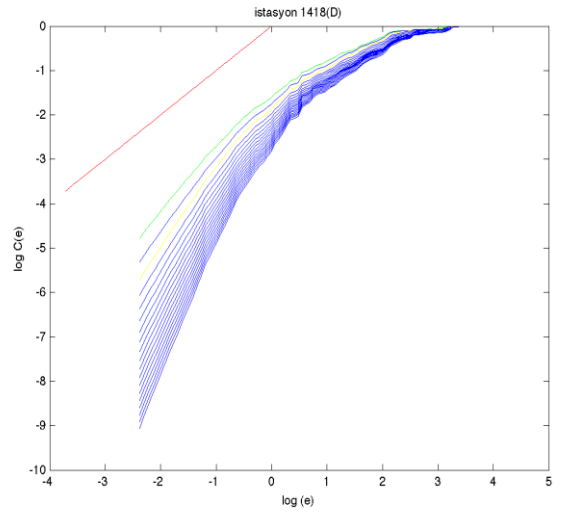
(a)



(b)

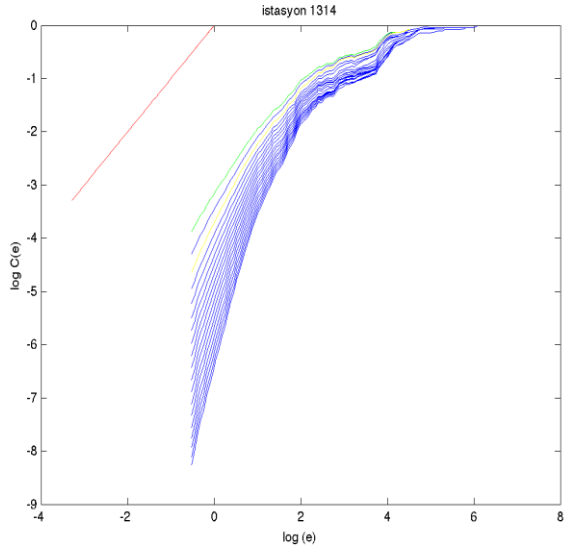


(c)

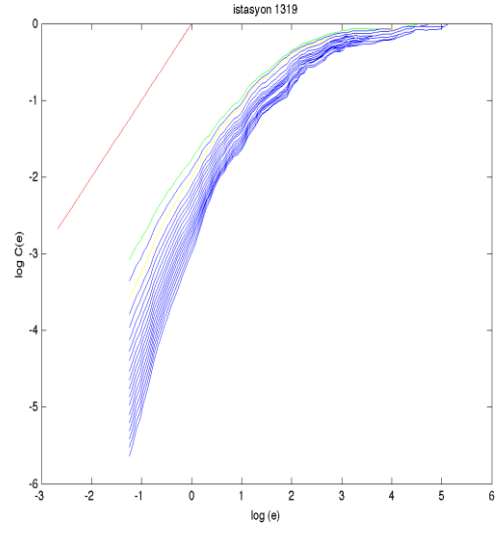


(d)

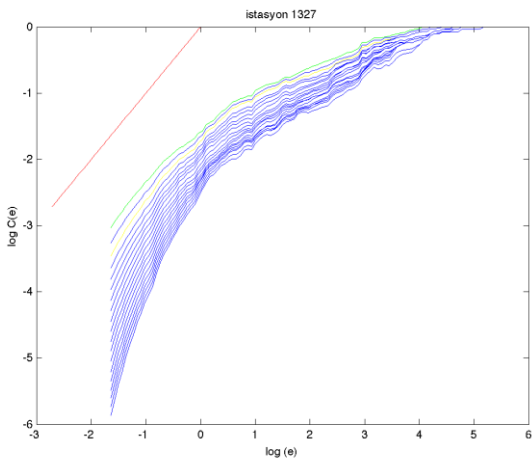
Şekil A12: Yeşil Irmak Havzası D Parçası Korelasyon İntegralleri



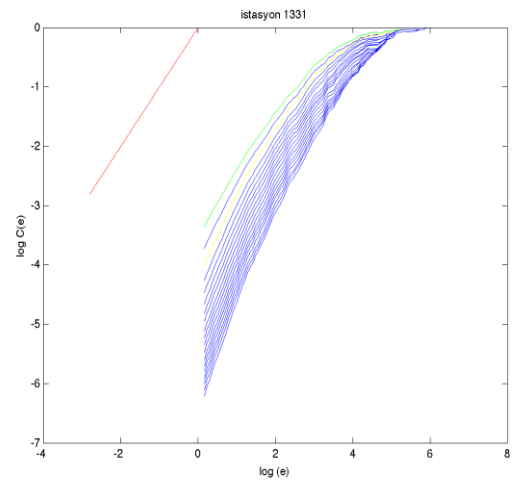
(a)



(b)

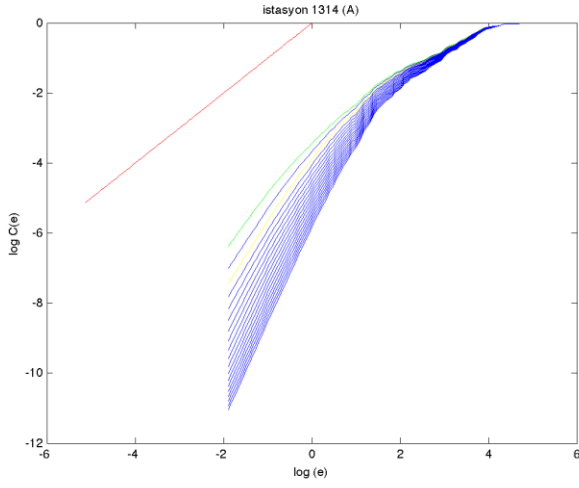


(c)

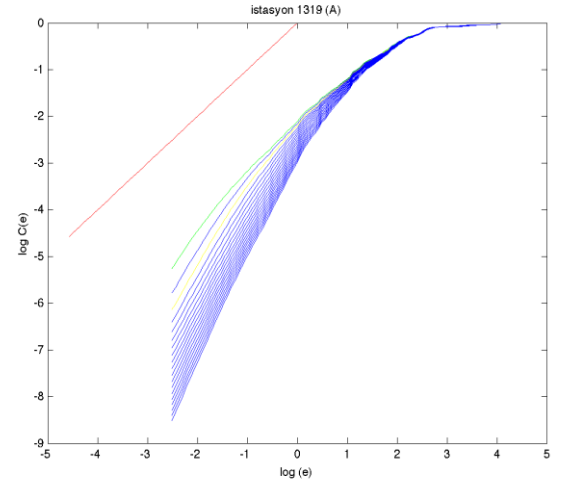


(d)

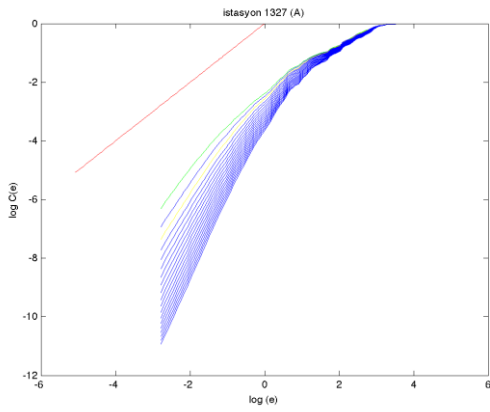
**Şekil A13: Batı Karadeniz Havzası Korelasyon İntegralleri**



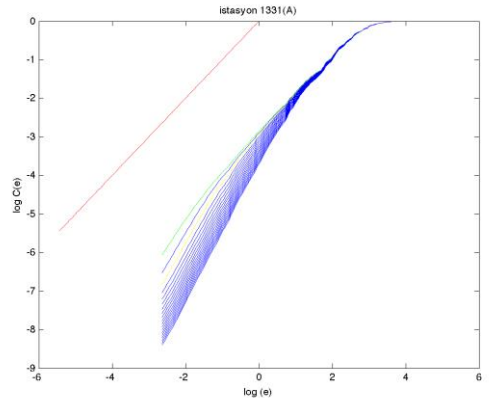
(a)



(b)

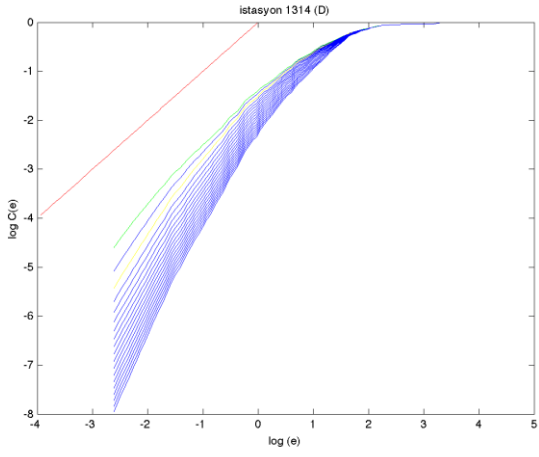


(c)

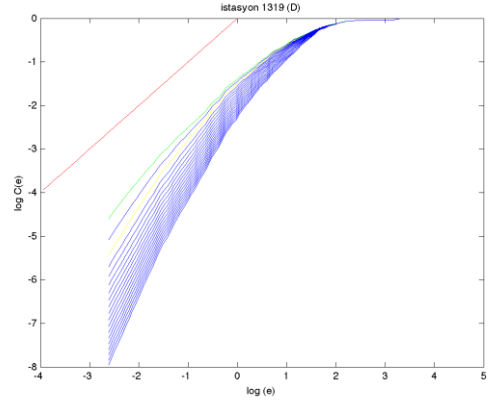


(d)

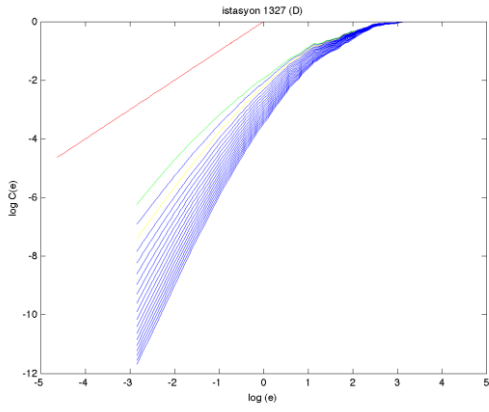
**Şekil A13:** Batı Karadeniz Havzası A Parçası Korelasyon İntegralleri



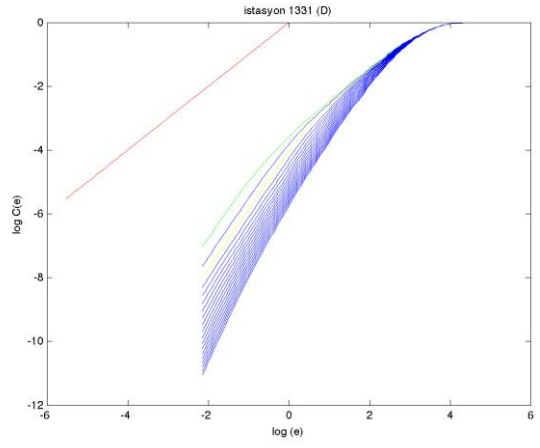
(a)



(b)



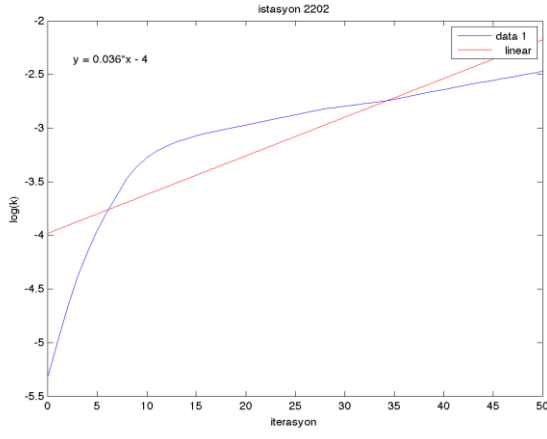
(c)



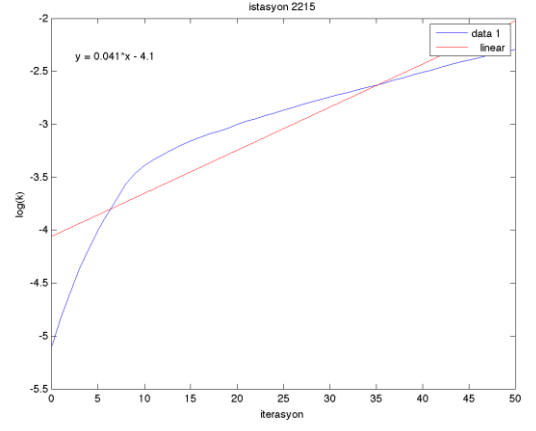
(d)

**Şekil A13:** Batı Karadeniz Havzası D Parçası Korelasyon İntegralleri

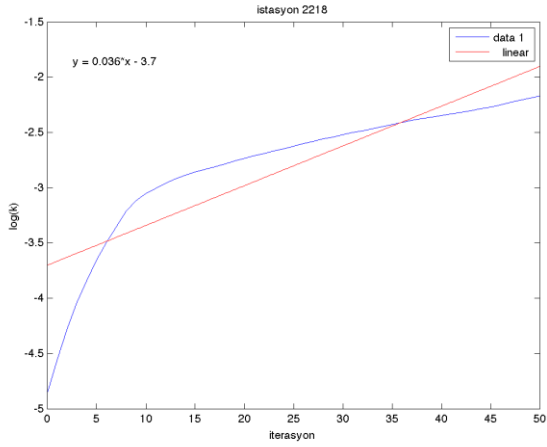
## EK B: İstasyonlara Ait Lyapunov Üstelleri Grafikleri



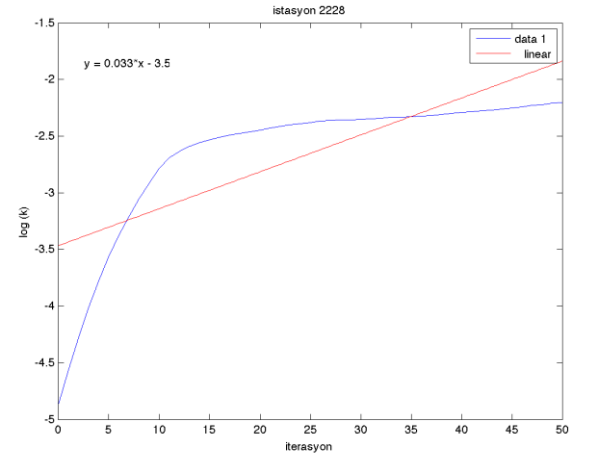
(a)



(b)

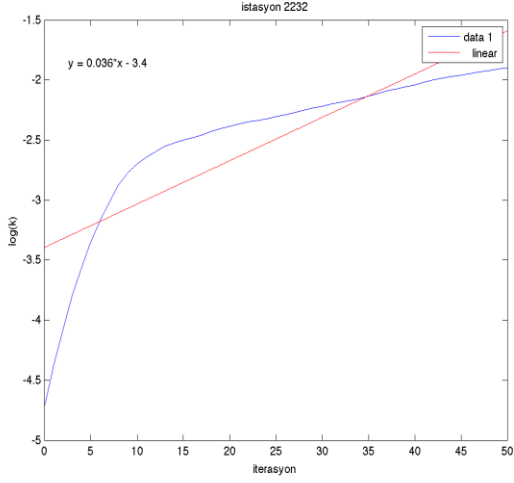


(c)

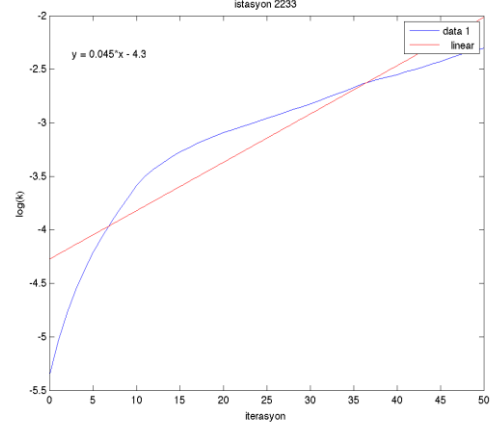


(d)

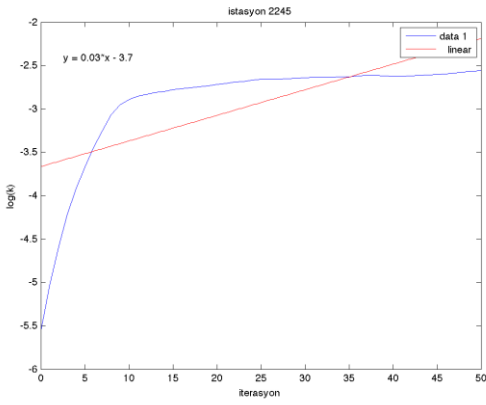
Şekil B1 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Lyapunov Üstelleri



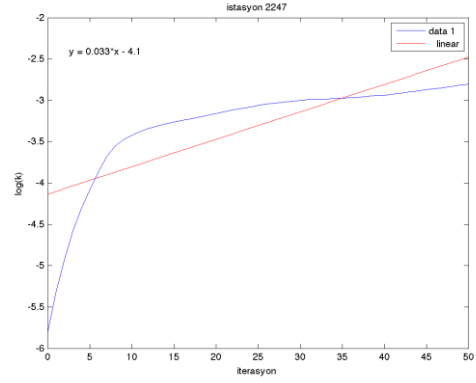
(a)



(b)

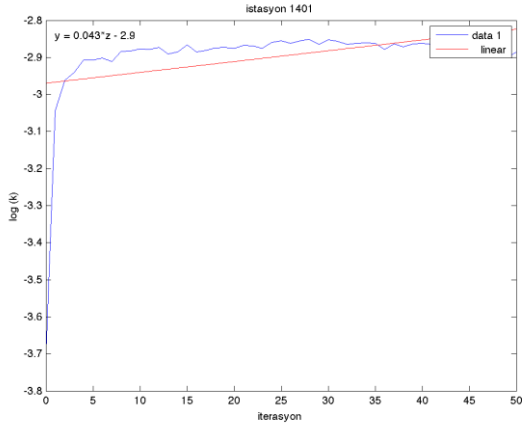


(c)

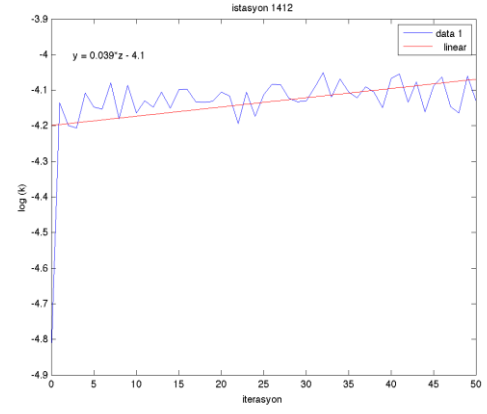


(d)

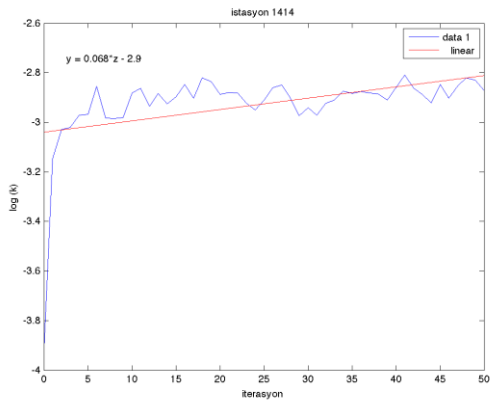
Şekil B2 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Lyapunov Üstelleri



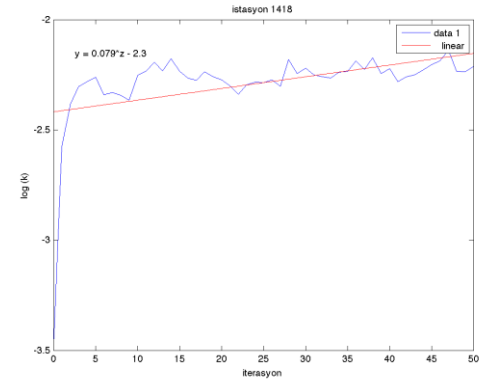
(a)



(b)

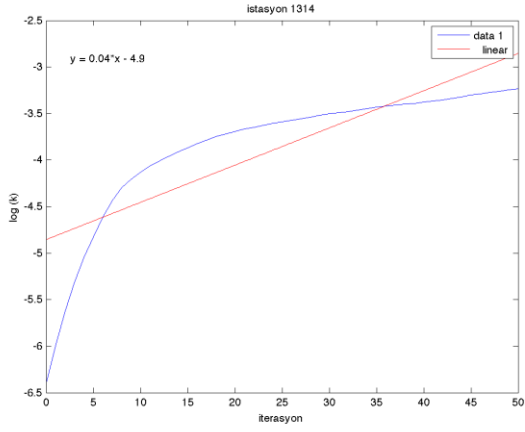


(c)

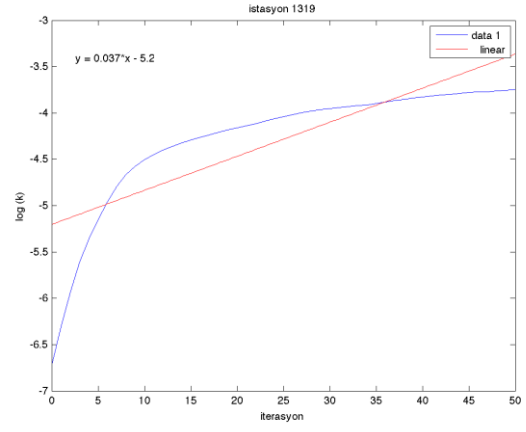


(d)

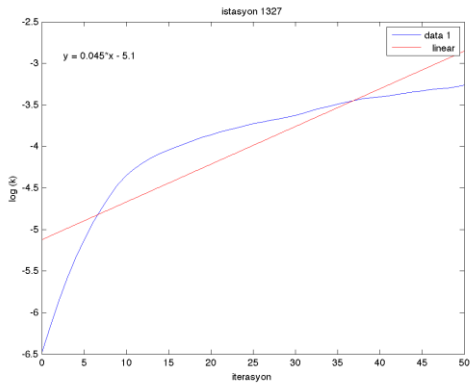
Şekil B3 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonları Lyapunov Üstelleri



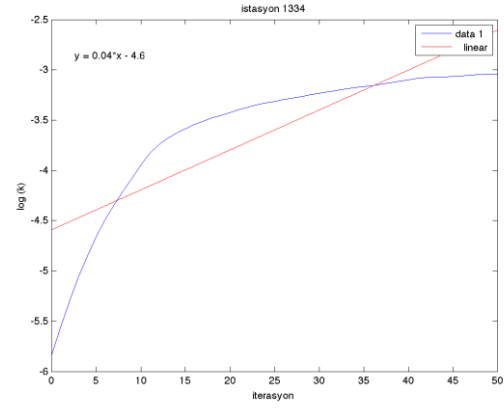
(a)



(b)



(c)

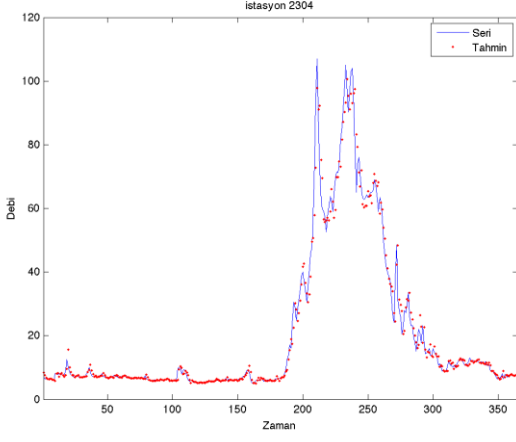


(d)

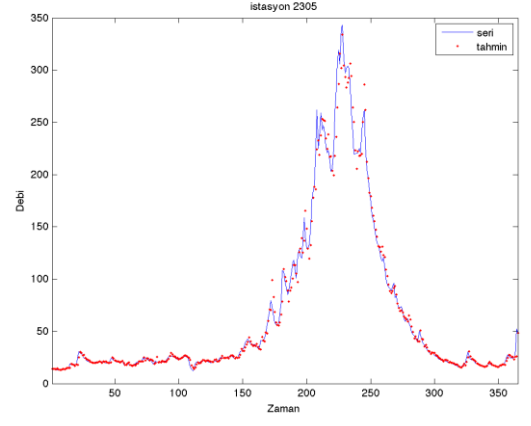
Şekil B4 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Lyapunov Üstelleri



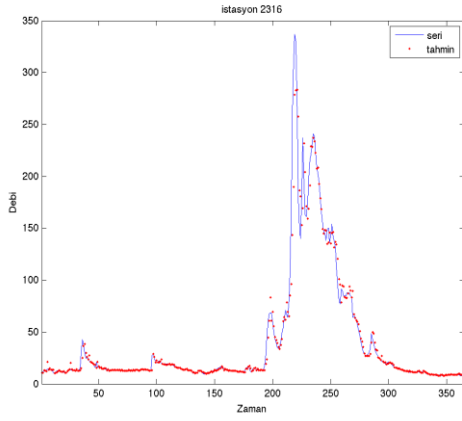
## EK C : İstasyonlara Ait ARX model ve Lokal Öngörü Grafikleri



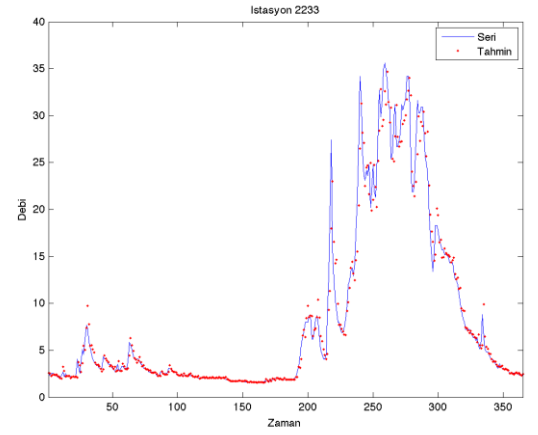
(a)



(b)

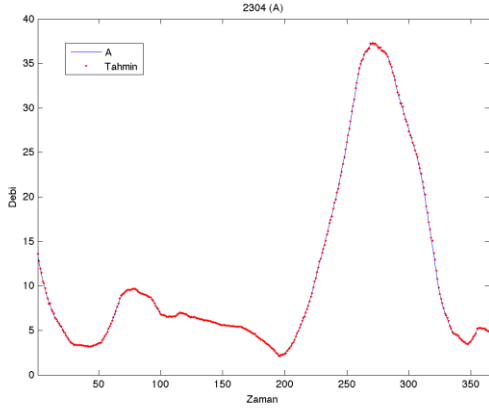


(c)

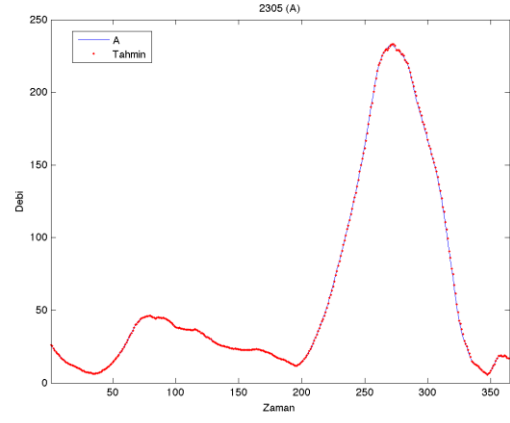


(d)

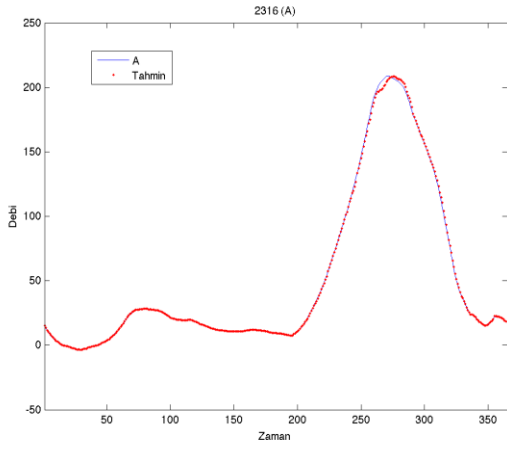
Şekil C1 : Çoruh Havzası İstasyonları Lokal Öngörü



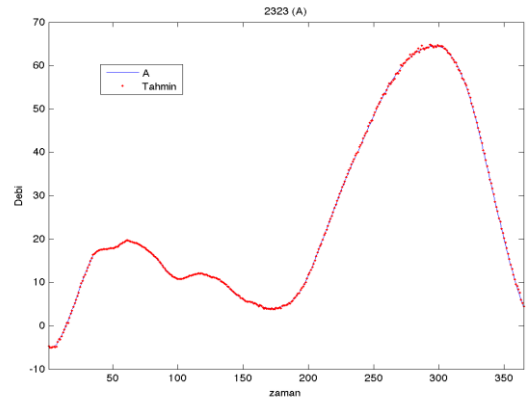
(a)



(b)

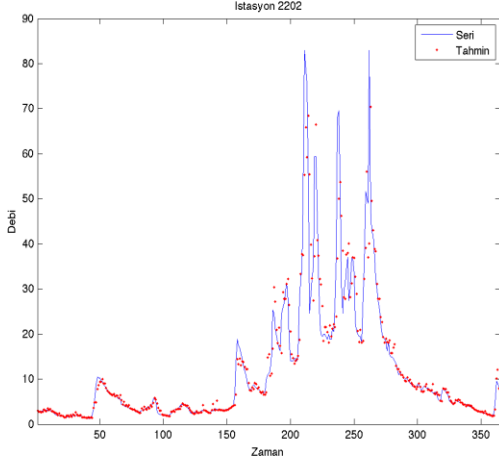


(c)

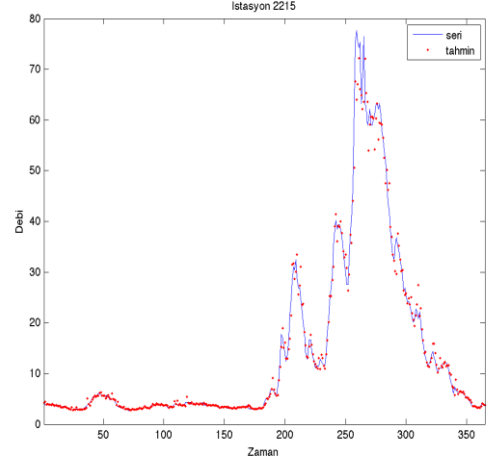


(d)

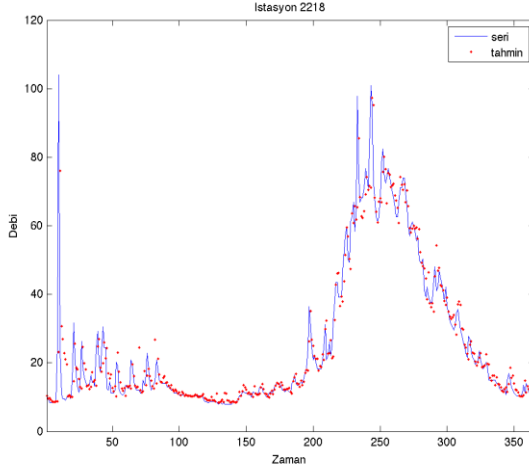
Şekil C2 : Çoruh Havzası İstasyonları A Parçası Lokal Öngörü



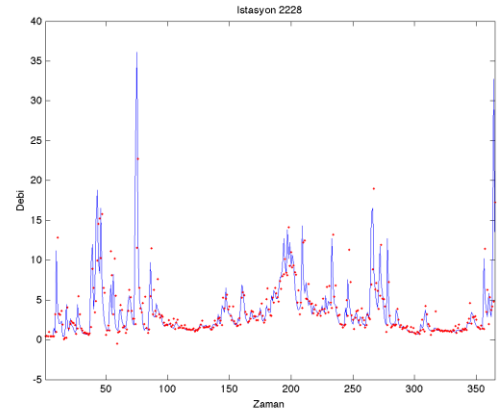
(a)



(b)

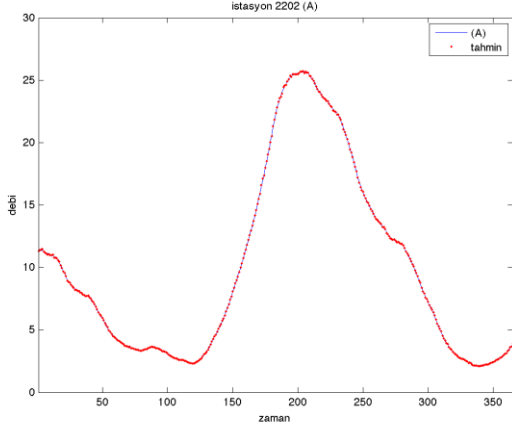


(c)

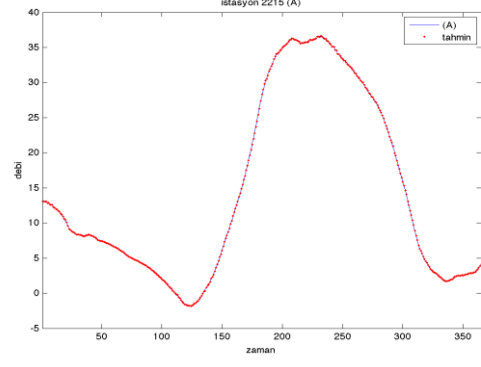


(d)

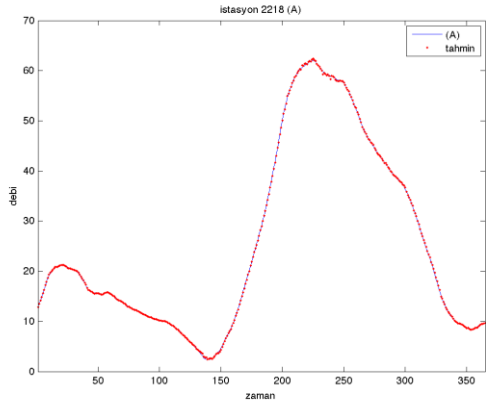
Şekil C3 : Doğu Karadeniz Havzası İstasyonları Lokal Öngörü



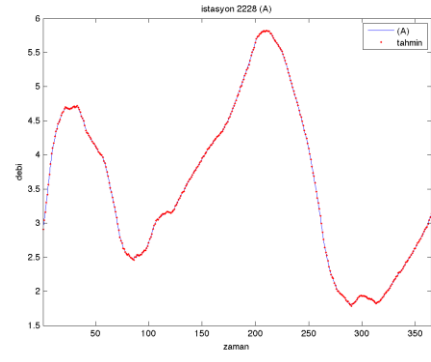
(a)



(b)

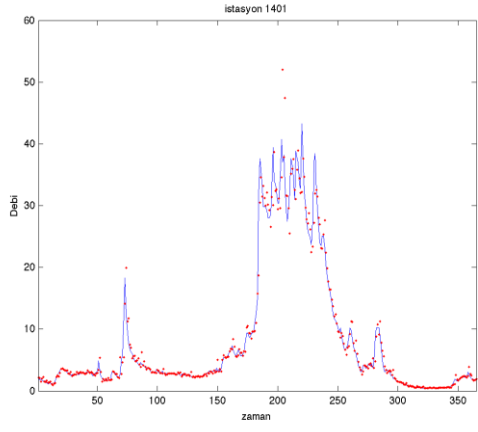


(c)

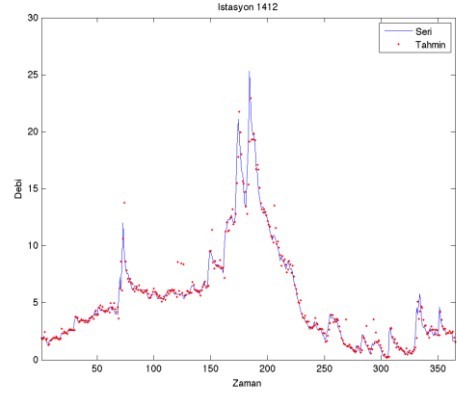


(d)

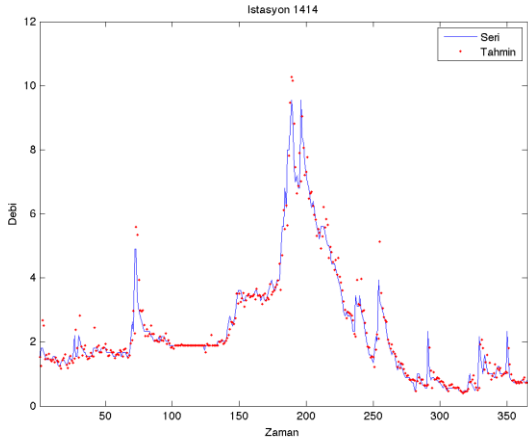
Şekil C4 : Doğu Karadeniz Havzası A Parçası İstasyonları Lokal Öngörü



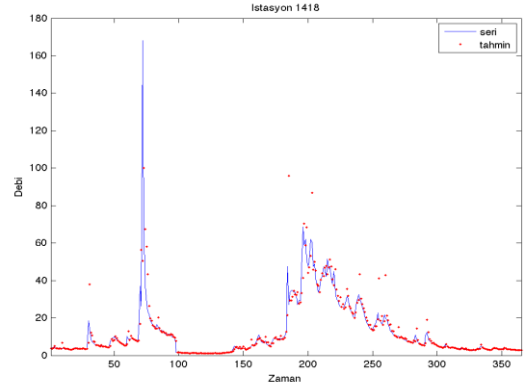
(a)



(b)

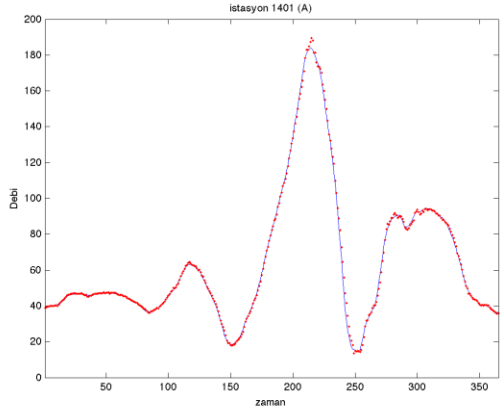


(c)

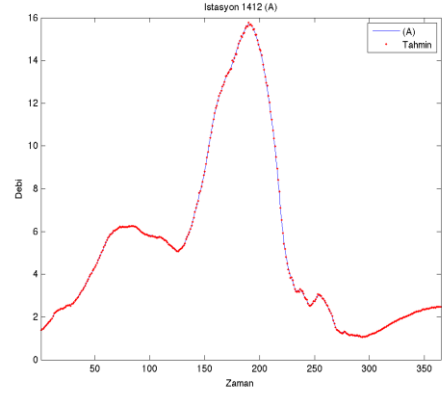


(d)

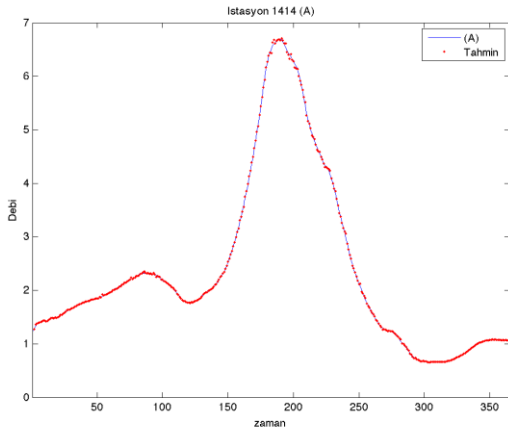
Şekil C5 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonları Lokal Öngörü



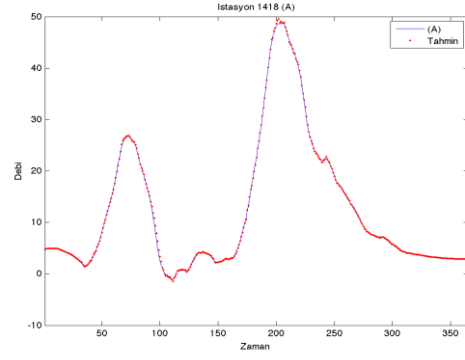
(a)



(b)

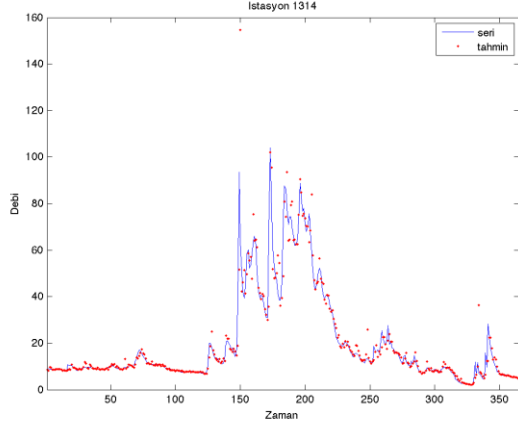


(c)

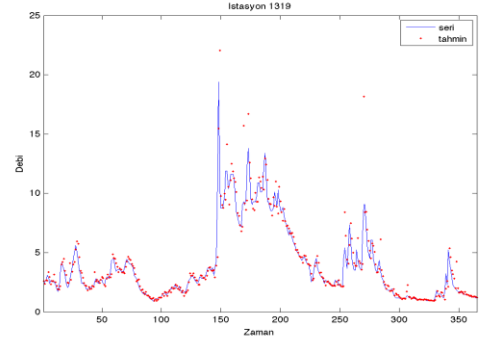


(d)

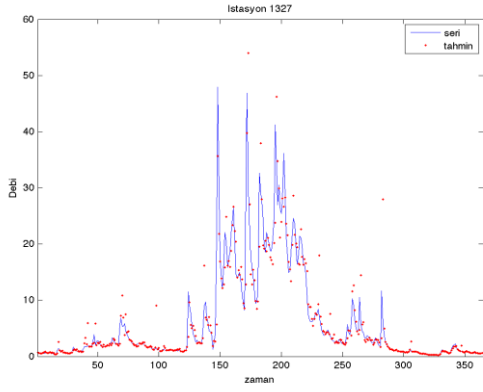
Şekil C6 : Yeşil Irmak Havzası İstasyonları A Parçası Lokal Öngörü



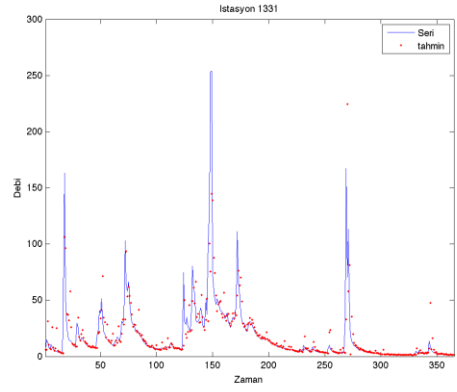
(a)



(b)

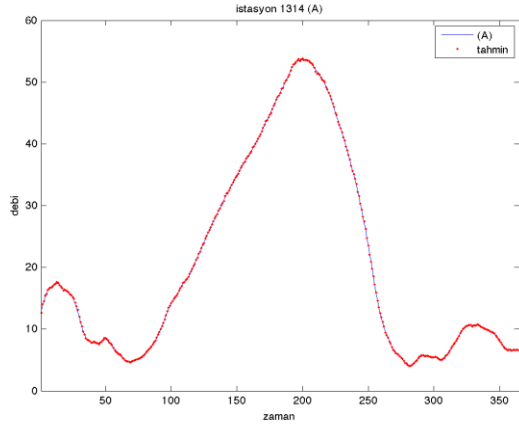


(c)

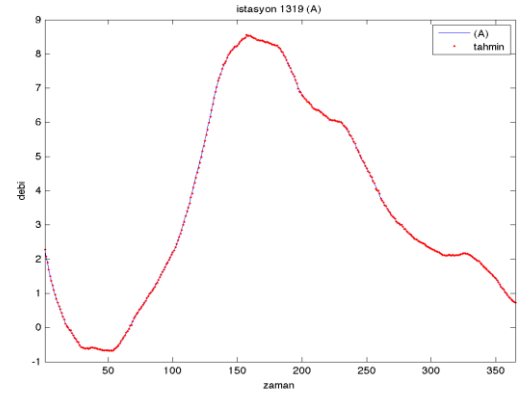


(d)

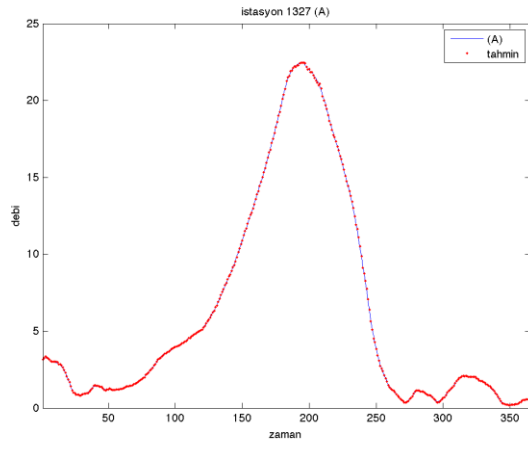
Şekil C7 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları Lokal Öngörü



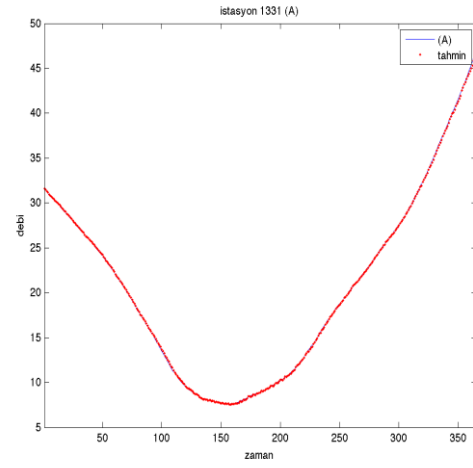
(a)



(b)



(c)

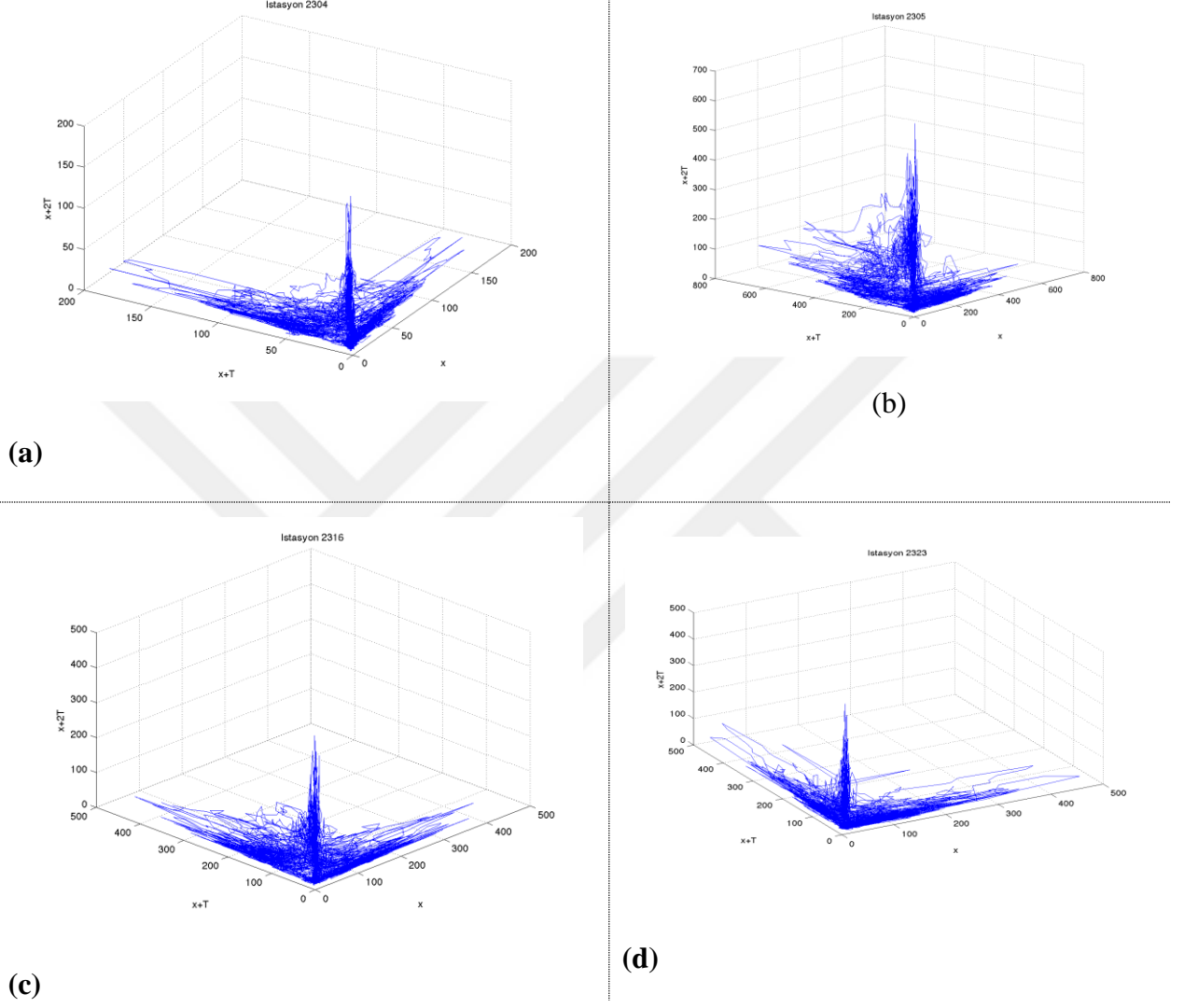


(d)

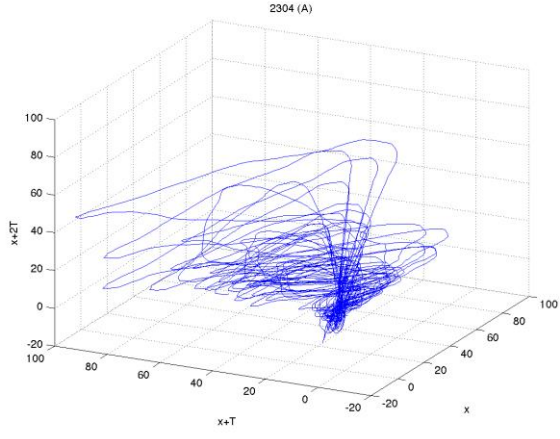
Şekil C8 : Batı Karadeniz Havzası İstasyonları A Parçası Lokal Öngörü



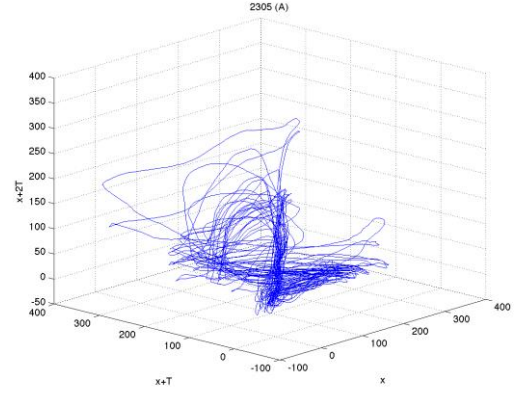
## EK D: İstasyonlara ait 3 Boyutlu Çeker Grafikleri



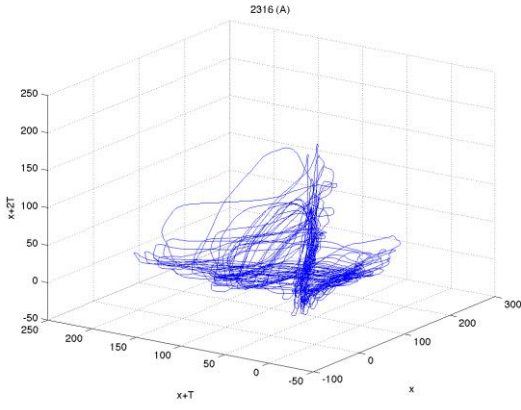
Şekil D1: Çoruh Havzası İstasyonlarına Ait 3 Boyutlu Çekerler



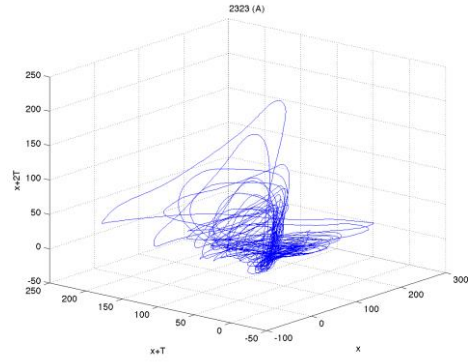
(a)



(b)

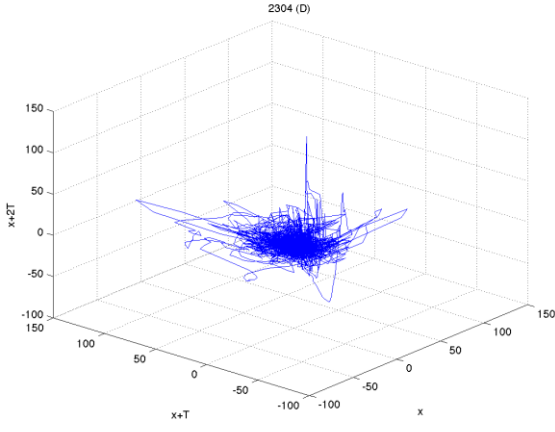


(c)

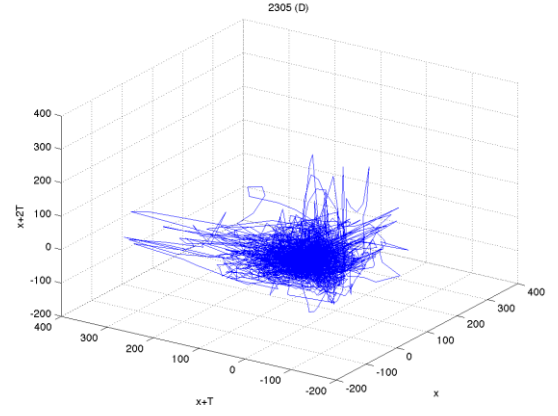


(d)

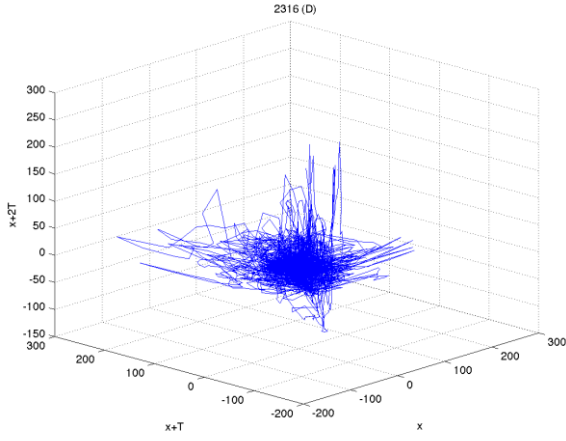
**Şekil D2:** Çoruh Havzası İstasyonları A Parçasına Ait 3 Boyutlu Çekerler



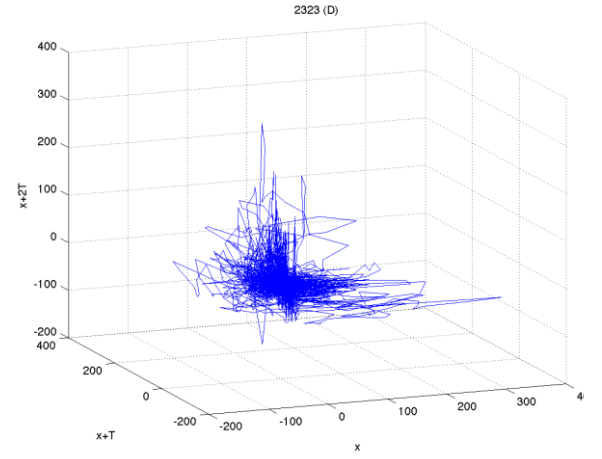
(a)



(b)

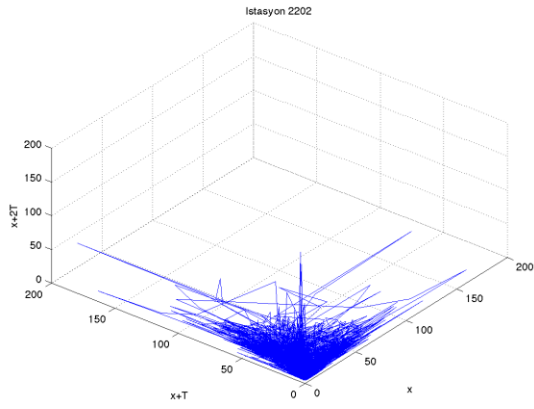


(c)

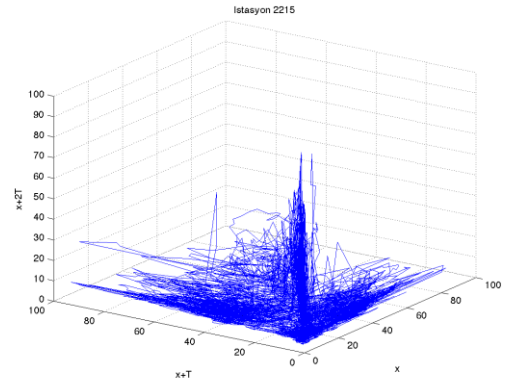


(d)

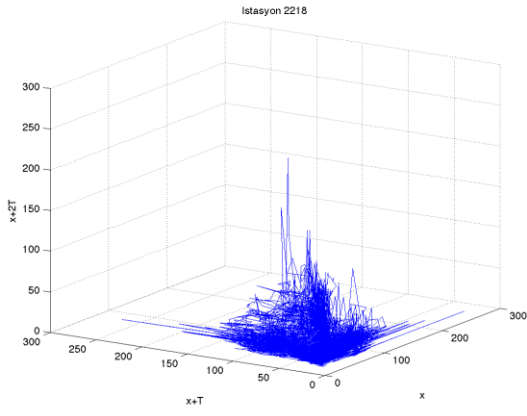
Şekil D3: Çoruh Havzası İstasyonları D Parçasına Ait 3 Boyutlu Çekeler



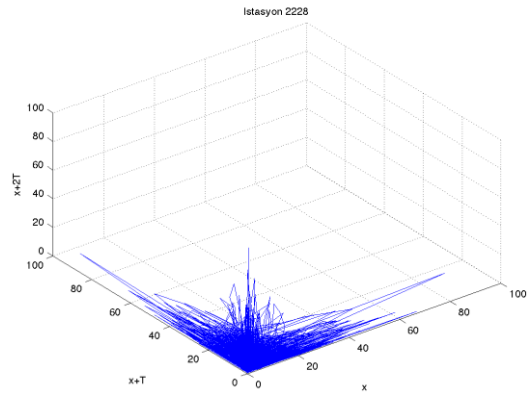
(a)



(b)

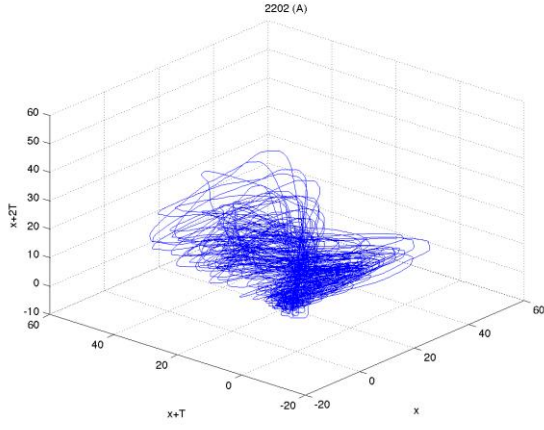


(c)

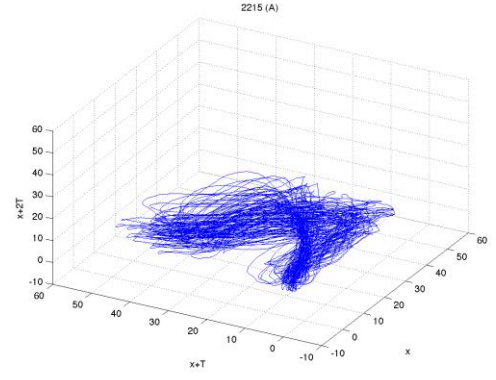


(d)

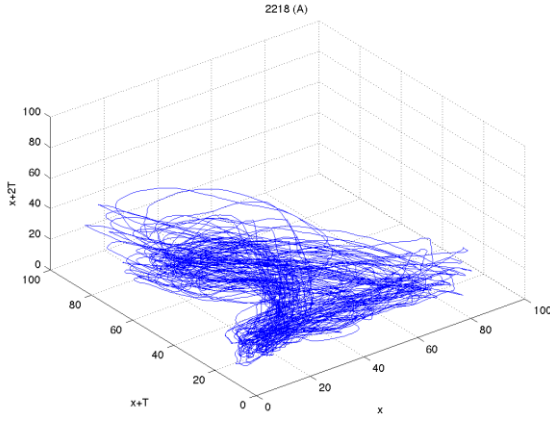
Şekil D4: Doğu Karadeniz Havzası Ait 3 Boyutlu Çekeler



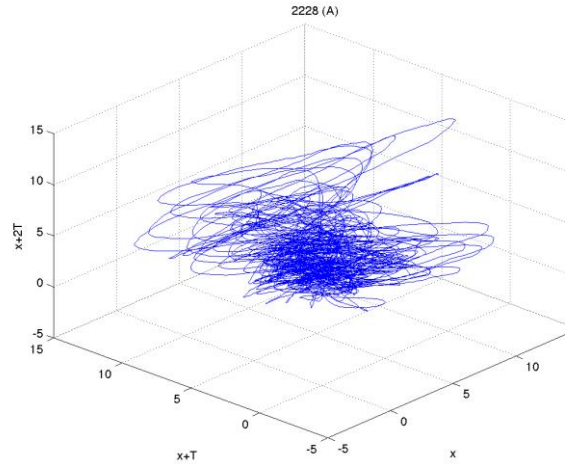
(a)



(b)

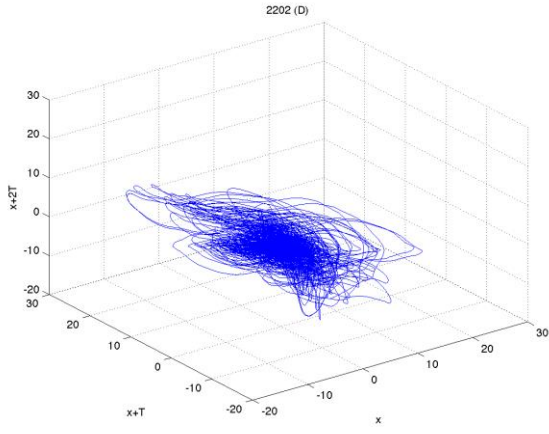


(c)

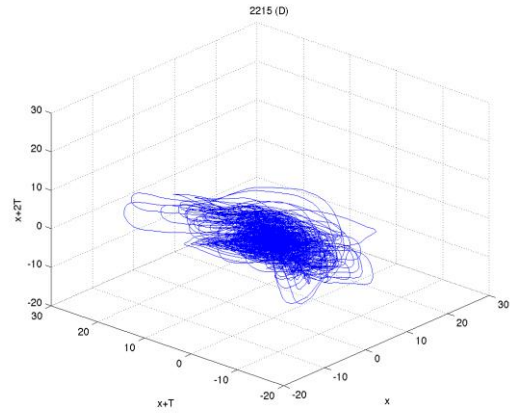


(d)

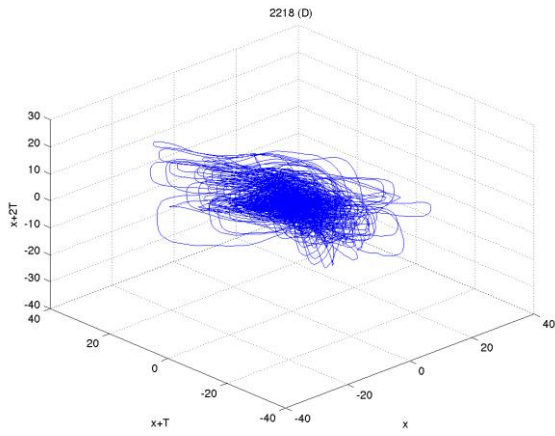
Şekil D5: Doğu Karadeniz Havzası A Parçasına Ait 3 Boyutlu Çekeler



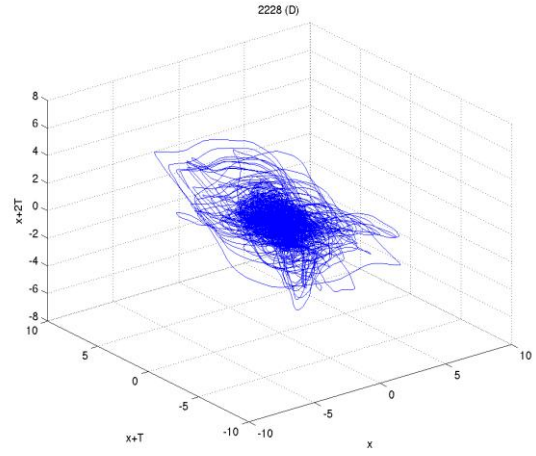
(a)



(b)

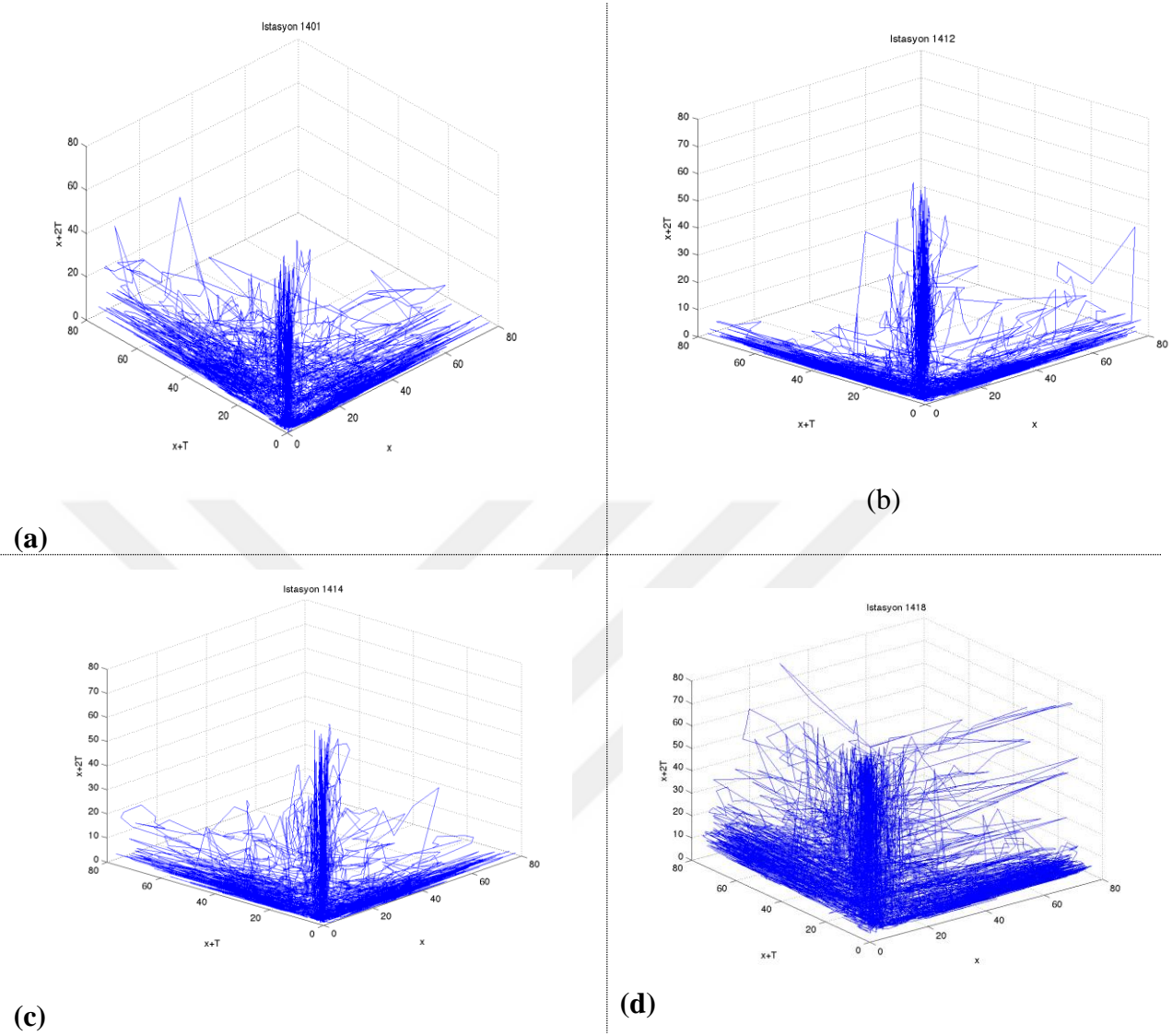


(c)

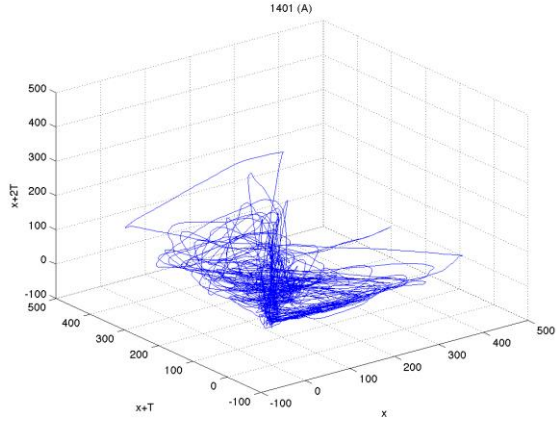


(d)

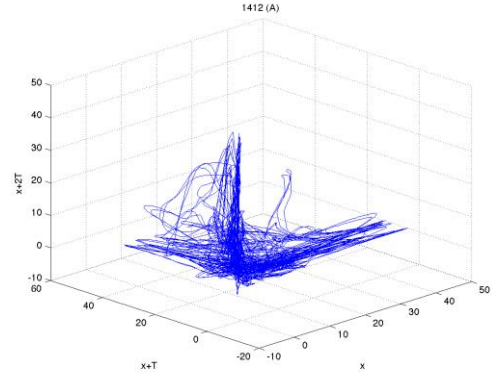
Şekil D5: Doğu Karadeniz Havzası D Parçasına Ait 3 Boyutlu Çekeler



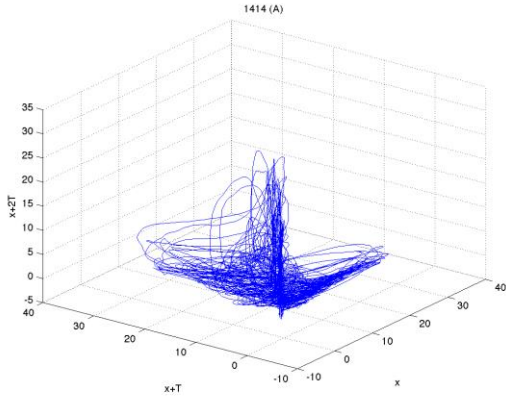
Şekil D6:Yeşil Irmak Havzası Ait 3 Boyutlu Çekeler



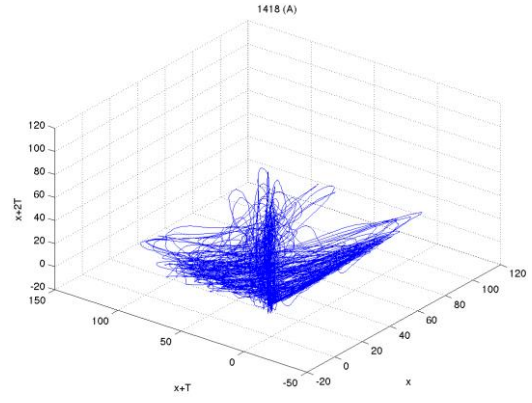
(a)



(b)



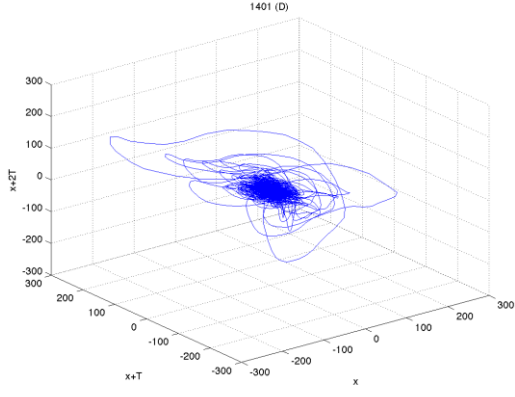
(c)



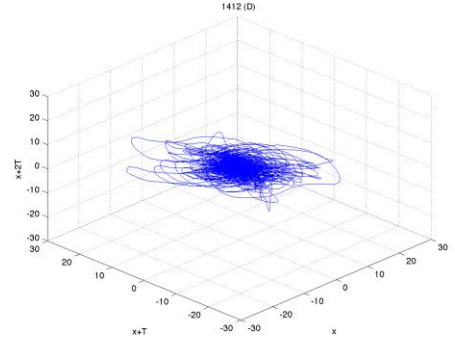
(d)

Şekil D6:Yeşil Irmak Havzası A Parçası Ait 3 Boyutlu Çekeler

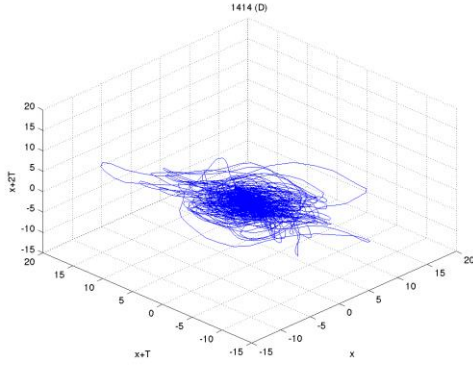




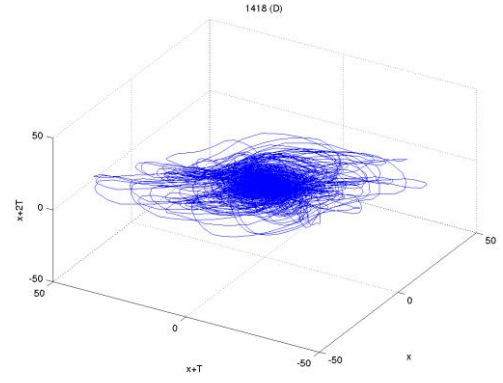
(a)



(b)

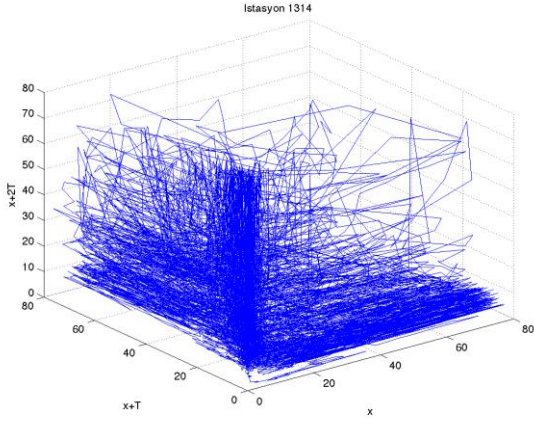


(c)

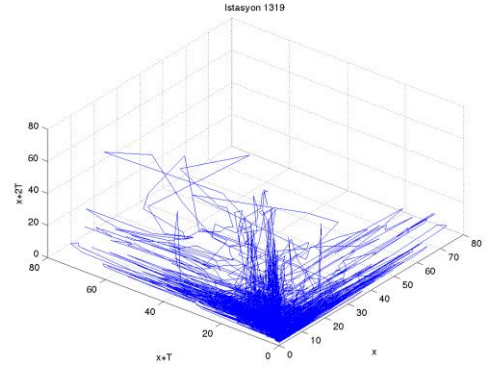


(d)

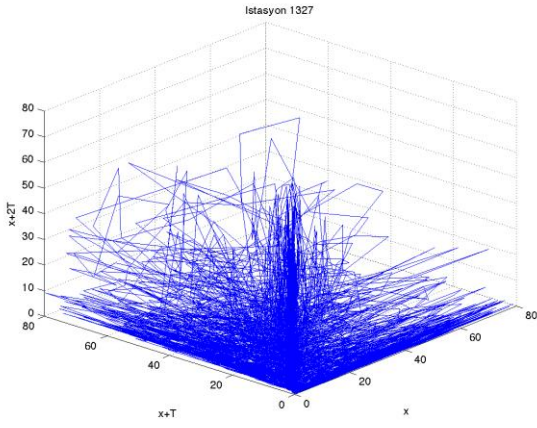
Şekil D6: Yeşil Irmak Havzası D Parçası Ait 3 Boyutlu Çekeler



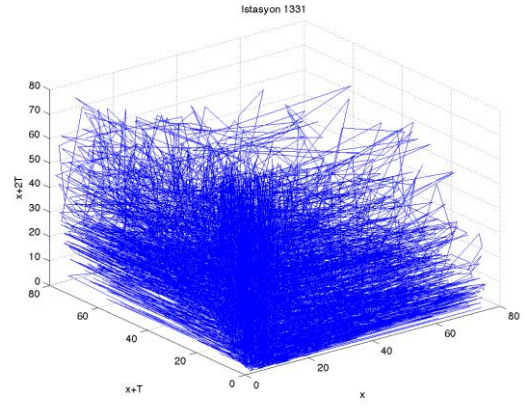
(a)



(b)

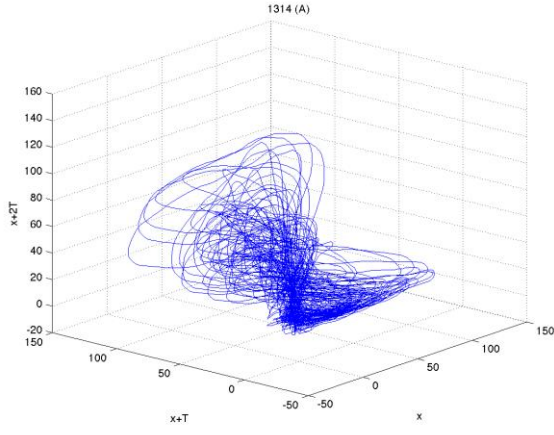


(c)

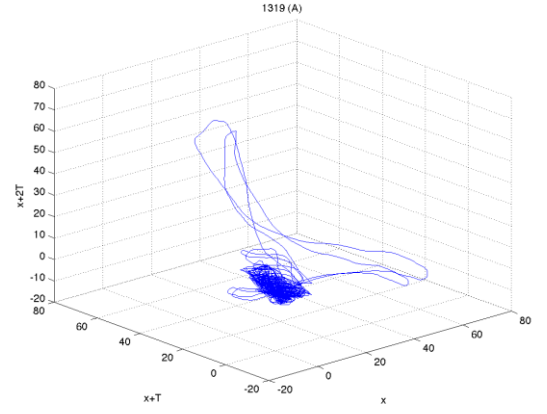


(d)

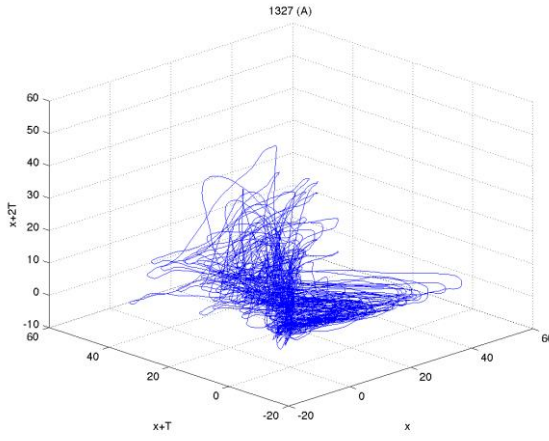
Şekil D7: Batı Karadeniz Havzasına Ait 3 Boyutlu Çekeler



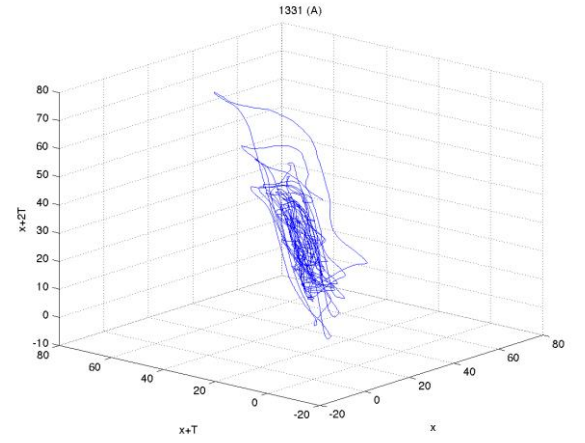
(a)



(b)

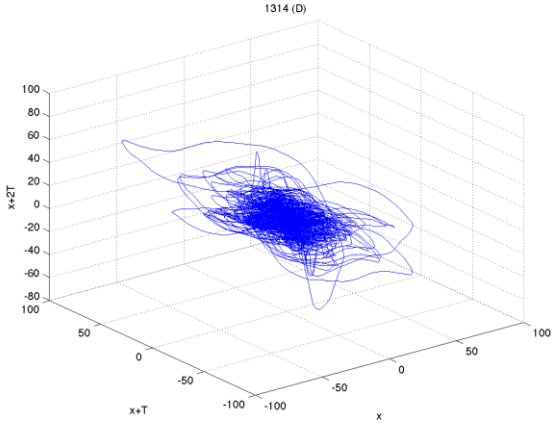


(c)

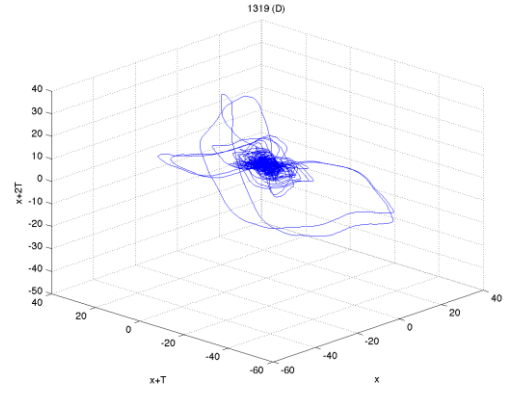


(d)

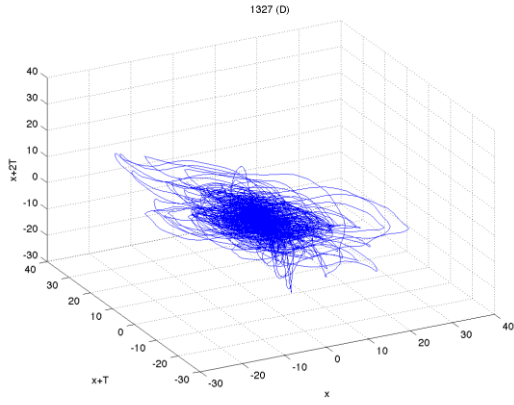
Şekil D8: Batı Karadeniz Havzası A Parçası Ait 3 Boyutlu Çekeler



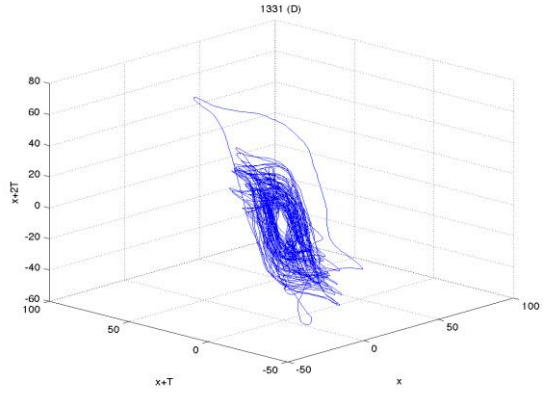
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil D9: Batı Karadeniz Havzası D Parçası Ait 3 Boyutlu Çekeler

# ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Aslıhan Albostan  
**Doğum Tarihi ve Yeri:** 26/07/1982, Ankara  
**E-posta** : aalbostan@gmail.com

## ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005, İ.T.Ü, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği
- **Yükseklisans:** 2008, İ.T.Ü, Enerji Bilim ve Teknoloji, Enerji Bilim ve Teknoloji

## MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

2005-2014: Araştırma Görevlisi, İ.T.Ü Enerji Enstitüsü, İstanbul

## TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Önöz B., Albostan A., Akım Serilerinin Kaotik Analizi Çoruh Havzası Örneği, *VII. Ulusal Hidroloji Kongresi - River*, Eylül, 2013, Isparta, Türkiye.
- Albostan A., Önöz B., 2014, Wavelet Analysis Application on River Discharge Time Series, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, (Basımda)
- Albostan A., Önöz B., “Günlük Akarsu Akımlarının Kaotik Analizinde Dalgacık Yaklaşımının Uygulanması”, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University.*, (Kabul, 13.11.2014)

## DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Barutçu B., Albostan A., (2015), “Trend Detection of Time Series via Wavelet: Case Study on Dicle Catchment”, *Energy Education Science and Technology Part C: Future Energy Sources*, Volume (issues) **7(1)**: 61-72
- Albostan A., Önöz B., (2012), “Entropy-Based Probability Distribution Estimation for Daily Flows”, 10<sup>th</sup> International Congress of Advanced Civil Engineering, 17-19 October, Middle East Technical University

- **Albostan, A.**, Barutcu B., Onoz B. (2011) “A Non-linear Time Series Prediction Method for Missing Daily Flow Rate Data of Middle Firat Catchment”, *Energy Pocedia*, 6, 331-336.
- Barutcu, B., **Albostan A.**, Önöz, B.,(2010) “Data generation with artificial neural networks for Murat River”, *Water Resources Hydraulics& Hydrology WESAS*, 23-25 Şubat, Cambridge University.
- Önöz, B.,**Albostan A.**, “Seasonality Measurements of Flood Flows by Flow Duration Curves”, 2<sup>nd</sup> National Flood Symposium, Istanbul, March 20-24 2010, Istanbul
- *Önöz, B.* , **Albostan A.** “Seasonality Measurement of Low Flows: Middle for Firat Catchment”, 4<sup>th</sup> Atmospheric Science Symposium, March 25-28 2008, Istanbul
- Kabdaşlı, S., Önöz, B., Yeğen, B.,Yılmaz, A.,Babaç, G., Varol, *Ö.E.*,**Albostan, A.:** “Determining Wave Energy Potential of Turkey Coasts – Kumköy Example”, 6<sup>th</sup> National Coastal Engineering Symposium, October 25-28 2007, Izmir.
- Önöz, B.,**Albostan A.**, “Determining Seasonality High Flows for Planning of Hydroelectric Power Stations”, TMMOB 6<sup>th</sup> Energy Symposium, October 22-24 ,2007, Ankara.