

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAOTİK ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ İLE RADON GAZI (^{222}Rn), DEPREM ve
METEOROLOJİK PARAMETRELER ARASINDAKİ İLİŞKİNİN
MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Miraç KAMIŞLIOĞLU

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Nükleer Fizik

Danışman: Prof. Dr. Fatih KÜLAHCI

AĞUSTOS-2016

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAOTİK ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ İLE RADON GAZI (^{222}Rn), DEPREM ve
METEOROLOJİK PARAMETRELER ARASINDAKİ İLİŞKİNİN
MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Miraç KAMIŞLIOĞLU

(111114203)

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Nükleer Fizik

Danışman: Prof. Dr. Fatih KÜLAHCI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31.08.2016

AĞUSTOS-2016

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAOTİK ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ İLE RADON GAZI (^{222}Rn), DEPREM ve
METEOROLOJİK PARAMETRELER ARASINDAKİ İLİŞKİNİN MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Miraç KAMIŞLIOĞLU

(111114203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.08.2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 30.09.2016

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fatih KÜLAHÇI (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sefa KAZANÇ (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Fatih ÖZKAYNAK (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. F. Ahmet ÇELİK (B.E.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Ezman KARABULUT (B.E.Ü)

AĞUSTOS-2016

ÖNSÖZ

Bu çalışmada radyoaktif bir gaz olan Radon gazının (^{222}Rn) karakteristiği doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Topraktan alınan radon gazı (^{222}Rn) ölçümleri için bir zaman serisi oluşturularak kaos analiz yöntemleri ile hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için nitel analiz yöntemlerinden yörüngenin izlenmesi ve nicel analiz yöntemlerinden Lyapunov Üsteli, Vekil Veri Analizi, Hurst Üsteli, Güç Spektrumu Analizi, Korelasyon Boyutu, Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu, Geçici En Yakın Komşular metodu gibi kaos analiz metodları kullanılmıştır. Aynı zamanda ölçüm alınan bölgelere ait verilerin kestirim işlemi yapılarak, dağılım grafikleri çizilmiş ve ^{222}Rn verilerinin doğrusal olmayan davranış sergilediği gösterilmiştir.

Bu çalışmamın tüm aşamalarında engin bilgi ve tecrübesiyle yoluma ışık tutan, tüm varlığıyla desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Fatih KÜLAHCI'ya teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde Fırat Üniversitesi ve Yeditepe Üniversitesinden ismini sayamayacağım kadar çok değerli öğretim elemanı ile fikir alışverişinde bulunma fırsatım oldu. Kendilerine verdikleri desteklerden dolayı çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında, her zaman ekip olarak çalışabilmenin güzelliğini hissettiğim arkadaşlarım Öğr. Gör. Sevim KARAMAN, Arş. Gör. Seçil NİKSARLIOĞLU'na ve Arş. Gör. Mücahit YILMAZ'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çıktığım bu yolda beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme her zaman yanımda ve destek oldukları için çok teşekkür ederim. Aynı zamanda çalışmalarım daha hızlı yol almama sebep olan, sevgili ablam Arş. Gör. Bircan KAMIŞLIOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılması için desteklerini esirgemeyen **Türkiye Cumhuriyeti Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığına**, teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) tarafından **2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı** olarak desteklenmiştir.

Miraç KAMIŞLIOĞLU

ELAZIĞ-2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	XIII
SEMBOLLERİN LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL KAVRAMLAR	5
2.1. Radyasyon	5
2.2. Radyoaktivite	5
2.2.1. Sudaki Radyoaktivite	6
2.2.2. Topraktaki Radyoaktivite.....	7
2.3. Radon gazının (^{222}Rn) Genel Özellikleri.....	8
2.4. Sulardaki Radon	11
2.5. Topraktaki Radon.....	12
2.6. Radon ve Deprem Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	12
2.7. Topraktaki Radonun ölçülmesi (ALFAGUARD)	15
3. TEORİK ÇALIŞMALAR	16
3.1. Zaman Serisi Analizi.....	16
3.2. Gürültülü Verilerin Filtrelmesi.....	16
3.3. Çevresel Parametrelerin Temel İstatistik Analizi ve Durağansızlık	17
3.4. Kaos Teorisi	19
3.5. Dinamik Sistem Davranışı ve Kaos Arasındaki İlişki.....	21
3.6. Kaotik Zaman Serisi Analizi	25

3.6.1.	Faz Uzayının Yeniden Yapılandırılması	28
3.6.2.	Gömülü Boyutun Belirlenmesi	29
3.6.3.	τ (Zaman Gecikmesinin)'nin Seçimi	30
3.6.4.	Çekerin (Attractor) Boyutunun Belirlenmesi.....	31
3.7.	Lyapunov Üsteli	31
3.8.	Vekil Veri Analizi	37
3.9.	Hurst Üsteli	38
3.10.	Güç Spektrumu Analizi.....	40
3.11.	Fraktal Boyut.....	41
3.12.	Korelasyon Boyutu	47
3.13.	Geçici En Yakın Komşuluk Metodu	51
3.14.	Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu.....	53
3.15.	Doğrusal Olmayan Tahmin Metodu	55
4.	ÇALIŞMA BÖLGESİ	58
5.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	62
5.1.	Kaos Metodolojilerinin Uygulanması	62
5.1.1.	Zaman Serileri Analizi	62
5.1.2.	Zaman Serisi Analizi Yapılan Verileri için Filtre Kullanılması	63
5.1.3.	Çevresel Parametrelerin ^{222}Rn ile Olan Değişimi ve Temel İstatistiksel....	65
	Analiz Sonuçları.....	65
5.2.	^{222}Rn Verilerinin Kaotik Zaman Serisi Analiz Yöntemleriyle İncelenmesi	68
5.2.1.	Lyapunov Üsteli	68
5.2.2.	Hurst Üsteli	70
5.2.3.	Güç Spektrumu Analizi.....	71
5.2.4.	Korelasyon Boyutu	73
5.2.5.	Geçici En Yakın Komşuluk Metodu	74
5.2.6.	Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu.....	75
5.2.7.	Doğrusal Olmayan Tahmin Sonuçlarının Karşılaştırılması	77
5.2.8.	^{222}Rn Verilerinin Gözlem ve Tahmin Değerlerinin Saçılma Grafikleri.....	78

Sayfa No

KAYNAKLAR	81
EKLER.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	189



ÖZET

Doğrusal olmayan zaman serilerinin analizi son yıllarda bilimin birçok alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Araştırmalarda verilerin doğrusal olmama durumunu gösterebilmek için kaos analiz yöntemlerinden yararlanılır. Bu yöntemlerden bazıları, Lyapunov Üstelleri (Lyapunov Exponent), Vekil Veri Analizi (Surrogate Data Analysis), Hurst Üsteli (Hurst Exponent), Güç Spektrumu (Power Spectrum), Korelasyon Boyutu (Correlation Dimension), Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu (Mutual Information) ve Geçici En Yakın Komşular metodudur (False Nearest Neighborhood). Araştırmada, Doğu Anadolu Fay Zonundaki Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin bölgelerine ait ^{222}Rn verisi kullanıldı. Verilerin gerçek değerleri ve kestirilen değerleri arasında istatistiksel olarak uyumlu sonuçlar elde edildi. İstatistiksel analizlerle sonuçların doğruluğu teyit edildi. Çalışmada, topraktan alınan ^{222}Rn konsantrasyonlarının değişiminin doğrusal olmayan davranışlarının açıklanması için yeni bir bakış açısı elde edildi.

Anahtar Kelimeler: Kaos; Zaman Serisi; Radon gazı; Doğrusal Olmayan Tahmin Metodu; Lyapunov Üsteli; Deprem Kestirimi; Hurst Üsteli.

SUMMARY

Modelling of the Relationship of Radon Gas (^{222}Rn), Earthquake and Meteorological Parameters with Chaotic Time Series Analysis

Non-linear time series analysis has been used widely in many areas of science in recent years. Chaos analysis methods are utilized to show the nonlinearity state of the data in the study. Some of these methods are Lyapunov Exponent, Surrogate Data Analysis, Hurst Exponent, Power Spectrum, Correlation Dimension, Mutual Information and False Nearest Neighborhood. In the study ^{222}Rn data belonging to Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye and Mersin were used on East Anatolian Fault Zone. Statistically consistent results between real values and the predicted value of the data were obtained. The accuracy of the results was confirmed with statistical analyses. In this study, a new perspective for explaining the non-linear behavior of ^{222}Rn concentration from soil was obtained.

Keywords: Chaos, Time Series; Radon Gas; Non-linear Estimation Method; Lyapunov Exponent; Earthquake Prediction; Hurst Exponent.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Radyoaktif ^{238}U çekirdeğinin bozunma serisi	9
Şekil 2.2. Radon gazının farklı toprak tiplerine göre geçirgenliği.....	11
Şekil 3.1. Üç boyutlu faz uzayında bir $s(t)$ yörüngesi	26
Şekil 3.2. Kaotik zaman serisinin işlem adımlarını gösteren akış şeması	27
Şekil 3.3. Sonsuz küçük bir alanın n iterasyon sonucunda uzayda aldığı görüntü ..	33
Şekil 3.4. Faz uzayında yörüngeleri tarafından sınırlanan hacminin gösterimi.....	33
Şekil 3.5. Wolf algoritmasından yakın yörüngelerin seçimi.....	33
Şekil 3.6. Fraktal yapılar a)Koch b)Sierpinski c)Hilbert eğrisi d)Julia Seti	43
Şekil 3.7. Çeker üzerinde homojen dağılım, fraktal yapıdaki çeker	44
Şekil 4.1. Araştırma istasyonları	60
Şekil 5.1. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Kozan 2008)	62
Şekil 5.2. ^{222}Rn konsantrasyonunun 10.dereceden FIR (2008 Mersin)	64
Şekil 5.3. Kozan Bölgesinin meteorolojik parametrelerle değişim grafiği	66
Şekil 5.4. ^{222}Rn 'nin En Büyük Lyapunov Üsteli grafiği (Kozan 2008)	69
Şekil 5.5. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Kozan 2008).....	70
Şekil 5.6. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Kozan 2008).....	72
Şekil 5.7. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Kozan 2008).....	73
Şekil 5.8. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Kozan 2008)	75
Şekil 5.9. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Kozan 2008).....	76
Şekil 5.10. ^{222}Rn 'nin ($d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$) tahmin grafiği (Kozan 2008).....	77
Şekil 5.11. ^{222}Rn 'nin ($d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$) saçılma grafiği (Kozan 2008)	79
Ek 1 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Kozan 2009).....	99
Ek 1 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Kozan 2010).....	99
Ek 1 Şekil 3. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Mersin 2008).....	100
Ek 1 Şekil 4. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Mersin 2009).....	100
Ek 1 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Mersin 2010).....	101
Ek 1 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Nurdağı 2008).....	101
Ek 1 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Nurdağı 2009).....	102
Ek 1 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Nurdağı 2010).....	102

Ek 1 Şekil 9.	²²² Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Osmaniye 2008).....	103
Ek 1 Şekil 10.	²²² Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Osmaniye 2009)...	103
Ek 1 Şekil 11.	²²² Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Osmaniye 2010)...	104
Ek 1 Şekil 12.	²²² Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Yakupınar 2008) ..	104
Ek 1 Şekil 13.	²²² Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Yakupınar 2009) ..	105
Ek 1 Şekil 14.	²²² Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (Yakupınar 2010) ..	105
Ek 2 Şekil 1.	²²² Rn konsantrasyonunun 10.dereceden FIR (2008 Osmaniye)	107
Ek 2 Şekil 2.	²²² Rn konsantrasyonunun 10.dereceden FIR (2009 Osmaniye)	107
Ek 2 Şekil 3.	²²² Rn konsantrasyonunun 10.dereceden FIR (2010 Osmaniye)	108
Ek 2 Şekil 4.	²²² Rn konsantrasyonunun 10.dereceden FIR (2008 Yakupınar)	108
Ek 2 Şekil 5.	²²² Rn konsantrasyonunun 10.dereceden FIR (2009 Yakupınar)	109
Ek 2 Şekil 6.	²²² Rn konsantrasyonunun 10.dereceden FIR (2010 Yakupınar)	109
Ek 3 Şekil 1.	Mersin Bölgesinin meteorolojik parametrelerle değişim grafiği	111
Ek 3 Şekil 2.	Nurdağı Bölgesinin meteorolojik parametrelerle değişim grafiği ...	112
Ek 3 Şekil.3.	Osmaniye Bölgesinin meteorolojik parametrelerle değişim grafiği	113
Ek 3 Şekil 4.	Yakupınar Bölgesinin meteorolojik parametrelerle değişim grafiği	114
Ek 4 Şekil 1.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Kozan 2009)	116
Ek 4 Şekil 2.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Kozan 2010)	116
Ek 4 Şekil 3.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Mersin 2008)	117
Ek 4 Şekil 4.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Mersin 2009)	117
Ek 4 Şekil 5.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Mersin 2010).....	118
Ek 4 Şekil 6.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Nurdağı 2008)	118
Ek 4 Şekil 7.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Nurdağı 2009)	119
Ek 4 Şekil 8.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Nurdağı 2010)	119
Ek 4 Şekil 9.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Osmaniye 2008)	120
Ek 4 Şekil 10.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Osmaniye 2009)	120
Ek 4 Şekil 11.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Osmaniye 2010)	121
Ek 4 Şekil 12.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Yakupınar 2008).....	121
Ek 4 Şekil 13.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Yakupınar 2009).....	122
Ek 4 Şekil 14.	²²² Rn'nin En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (Yakupınar 2010).....	122
Ek 5 Şekil 1.	²²² Rn'nin Hurst üsteli grafiği (Kozan 2009).....	124
Ek 5 Şekil 2.	²²² Rn'nin Hurst üsteli grafiği (Kozan 2010).....	124

Ek 5 Şekil 3. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Mersin 2008).....	125
Ek 5 Şekil 4. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Mersin 2009).....	125
Ek 5 Şekil 5. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Mersin 2010).....	126
Ek 5 Şekil 6. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Nurdağı 2008).....	126
Ek 5 Şekil 7. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Nurdağı 2009).....	127
Ek 5 Şekil 8. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Nurdağı 2010).....	127
Ek 5 Şekil 9. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Osmaniye 2008).....	128
Ek 5 Şekil 10. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Osmaniye 2009).....	128
Ek 5 Şekil 11. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Osmaniye 2010).....	129
Ek 5 Şekil 12. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Yakapınar 2008).....	129
Ek 5 Şekil 13. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Yakapınar 2009).....	130
Ek 5 Şekil 14. ^{222}Rn 'nin Hurst üsteli grafiği (Yakapınar 2010).....	130
Ek 6 Şekil 1. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Kozan 2009).....	132
Ek 6 Şekil 2. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Kozan 2010).....	132
Ek 6 Şekil 3. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Mersin 2008).....	133
Ek 6 Şekil 4. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Mersin 2009).....	133
Ek 6 Şekil 5. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Mersin 2010).....	134
Ek 6 Şekil 6. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Nurdağı 2008).....	134
Ek 6 Şekil 7. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Nurdağı 2009).....	135
Ek 6 Şekil 8. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Nurdağı 2010).....	135
Ek 6 Şekil 9. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Osmaniye 2008).....	136
Ek 6 Şekil 10. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Osmaniye 2009).....	136
Ek 6 Şekil 11. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Osmaniye 2010).....	137
Ek 6 Şekil 12. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Yakapınar 2008).....	137
Ek 6 Şekil 13. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Yakapınar 2009).....	138
Ek 6 Şekil 14. ^{222}Rn 'nin Güç Spektrumu grafiği (Yakapınar 2010).....	138
Ek 7 Şekil 1. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Kozan 2009).....	140
Ek 7 Şekil 2. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Kozan 2010).....	140
Ek 7 Şekil 3. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Mersin 2008).....	141
Ek 7 Şekil 4. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Mersin 2009).....	141
Ek 7 Şekil 5. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Mersin 2010).....	142
Ek 7 Şekil 6. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Nurdağı 2008).....	142

Ek 7 Şekil 7. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Nurdağı 2009).....	143
Ek 7 Şekil 8. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Nurdağı 2010).....	143
Ek 7 Şekil 9. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Osmaniye 2008).....	144
Ek 7 Şekil 10. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Osmaniye 2009).....	144
Ek 7 Şekil 11. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Osmaniye 2010).....	145
Ek 7 Şekil 12. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Yakapınar 2008)	145
Ek 7 Şekil 13. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Yakapınar 2009)	146
Ek 7 Şekil 14. ^{222}Rn 'nin Korelasyon boyutu grafiği (Yakapınar 2010)	146
Ek 8 Şekil 1. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği(Kozan 2009)	148
Ek 8 Şekil 2. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Kozan 2010)	148
Ek 8 Şekil 3. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Mersin 2008)	149
Ek 8 Şekil 4. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Mersin 2009)	149
Ek 8 Şekil 5. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Mersin 2010).....	150
Ek 8 Şekil 6. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Nurdağı 2008).....	150
Ek 8 Şekil 7. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Nurdağı 2009).....	151
Ek 8 Şekil 8. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Nurdağı 2010).....	151
Ek 8 Şekil 9. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Osmaniye 2008)	152
Ek 8 Şekil 10. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Osmaniye 2009)	152
Ek 8 Şekil 11. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Osmaniye 2010)	153
Ek 8 Şekil 12. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Yakapınar 2008).....	153
Ek 8 Şekil 13. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Yakapınar 2009).....	154
Ek 8 Şekil 14. ^{222}Rn 'nin Geçici en yakın komşuluk grafiği (Yakapınar 2010).....	154
Ek 9 Şekil 1. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği(Kozan 2009).....	156
Ek 9 Şekil 2. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Kozan 2010).....	156
Ek 9 Şekil 3. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Mersin 2008).....	157
Ek 9 Şekil 4. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Mersin 2009).....	157
Ek 9 Şekil 5. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Mersin 2010)	158
Ek 9 Şekil 6. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Nurdağı 2008).....	158
Ek 9 Şekil 7. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Nurdağı 2009).....	159
Ek 9 Şekil 8. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Nurdağı 2010).....	159
Ek 9 Şekil 9. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Osmaniye 2008).....	160
Ek 9 Şekil 10. ^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Osmaniye 2009).....	160

Ek 9 Şekil 11.	^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Osmaniye 2010).....	161
Ek 9 Şekil 12.	^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Yakupınar 2008)	161
Ek 9 Şekil 13.	^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Yakupınar 2009)	162
Ek 9 Şekil 14.	^{222}Rn 'nin Karşılıklı bilgi fonksiyonu grafiği (Yakupınar 2010)	162
Ek 10 Şekil 1.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Kozan 2009).....	164
Ek 10 Şekil 2.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Kozan 2010).....	164
Ek 10 Şekil 3.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Mersin 2008).....	165
Ek 10 Şekil 4.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Mersin 2009).....	165
Ek 10 Şekil 5.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Mersin 2010)	166
Ek 10 Şekil 6.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Nurdağı 2008)	166
Ek 10 Şekil 7.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Nurdağı 2009)	167
Ek 10 Şekil 8.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Nurdağı 2010)	167
Ek 10 Şekil 9.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Osmaniye 2008) .	168
Ek 10 Şekil 10.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Osmaniye 2009)	168
Ek 10 Şekil 11.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Osmaniye 2010)	169
Ek 10 Şekil 12.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Yakupınar 2008)	169
Ek 10 Şekil 13.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Yakupınar 2009)	170
Ek 10 Şekil 14.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) tahmin grafiği (Yakupınar 2010)	170
Ek 11 Şekil 1.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Kozan 2009).....	172
Ek 11 Şekil 2.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Kozan 2010).....	172
Ek 11 Şekil 3.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Mersin 2008).....	173
Ek 11 Şekil 4.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Mersin 2009).....	173
Ek 11 Şekil 5.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Mersin 2010)	174
Ek 11 Şekil 6.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Nurdağı 2008) ...	174
Ek 11 Şekil 7.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Nurdağı 2009) ...	175
Ek 11 Şekil 8.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Nurdağı 2010) ...	175
Ek 11 Şekil 9.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Osmaniye 2008)	176
Ek 11 Şekil 10.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Osmaniye 2009)	176
Ek 11 Şekil 11.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Osmaniye 2010)	177
Ek 11 Şekil 12.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Yakupınar 2008)	177
Ek 11 Şekil 13.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Yakupınar 2009)	178
Ek 11 Şekil 14.	^{222}Rn 'nin ($d=2, m=5, r=1, v=2$) saçılma grafiği (Yakupınar 2010)	178

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Çalışma istasyonları hakkında genel bilgi	59
Tablo 5.1. Çalışma istasyonlarına ait En Büyük Lyapunov Üstel değerleri	69
Tablo 5.2. Çalışma istasyonlarına ait Hurst Üstel değerleri.....	71
Tablo 5.3. Çalışma istasyonlarına ait Karşılıklı Bilgi Fonksiyonunun değerleri.....	76
Tablo 5.4. Çalışma istasyonlarına ait R^2 değerleri.....	79
Ek 12 Tablo 12.1. Kozan Bölgesi istatistiksel veri analizi	180
Ek 12 Tablo 12.2. Mersin Bölgesi istatistiksel veri analizi.....	180
Ek 12 Tablo 12.3. Nurdağı Bölgesi istatistiksel veri analizi	181
Ek 12 Tablo 12.4. Osmaniye Bölgesi istatistiksel veri analizi	181
Ek 12 Tablo 12.5. Yakapınar Bölgesi istatistiksel veri analizi	182
Ek 12 Tablo 12.6. Kozan Bölgesi Normallik testi.....	183
Ek 12 Tablo 12.7. Mersin Bölgesi Normallik testi	183
Ek 12 Tablo 12.8. Nurdağı Bölgesi Normallik testi.....	184
Ek 12 Tablo 12.9. Osmaniye Bölgesi Normallik testi.....	184
Ek 12 Tablo 12.10. Yakapınar Bölgesi Normallik testi	185
Ek 12 Tablo 12.11. Kozan Bölgesi için Korelasyon analizi	186
Ek 12 Tablo 12.12. Mersin Bölgesi için Korelasyon analizi.....	186
Ek 12 Tablo 12.13. Nurdağı Bölgesi için Korelasyon analizi.....	187
Ek 12 Tablo 12.14. Osmaniye Bölgesi için Korelasyon analizi.....	187
Ek 12 Tablo 12.15. Yakapınar Bölgesi için Korelasyon analizi	188

SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ

x_n, x_i	: Zaman serisinin elamanları
$y_n, \bar{y}_i$	: Faz uzayında yeniden oluşturulmuş vektör
$\tau_s, \Delta t$	: İşaret örnekleme zamanı
R^m	: m boyutlu Öklid uzayı
τ	: Zaman gecikmesi
m	: Gömme boyutu (faz uzayının boyutu)
d	: Çekerin boyutu
$\ \cdot\cdot\ $	: Öklid farkı
p	: İstatistiksel anlamlılık düzeyi
H_0, H_1	: Hipotez
FIR	: Sonlu dürtü yanıtı filtre (Finite Impulse Response)
EBLÜ	: En Büyük Lyapunov Üsteli
VVA	: Vekil Veri Analizi (Surrogate Data Analysis)
λ	: Lyapunov Üsteli
ε	: Lyapunov ayrılma katsayısı
$L(t)$	: Lyapunov ayrılması
δ_x	: Faz uzayında eğri üzerinde birbirine en yakın iki nokta arasındaki fark
H	: Hurst Üsteli

Θ	: Heaviside adım fonksiyonu (Heaviside Step Function)
$S(N)$	: Standart sapma
$R(N)$	: Verilerin kümülatif değişim aralığı
$S(f)$	: Güç Spektrumu
C	: Oransal sabit
N	: Küme içindeki noktaların toplam sayısı
N_i	: i hiper küpündeki kümenin noktalarının sayısı
r	: Faz uzayındaki eğriyi oluşturan noktalar kümesine ait hücrelerin büyüklüğü
N_r	: Boyut hesabı için r büyüklüğündeki m boyutlu hücrelerin sayısı
$d_j(i)$	: i ayrık zaman adımlarında en yakın komşuların j . çifti arasındaki fark
D_q	: Fraktal Boyut çizgisi ($q = 0,1,2,\dots$ için)
D_0	: Kapasite Boyutu
D_1	: Bilgi Boyutu
D_2	: Korelasyon Boyutu
$C(r)$	: Korelasyon integrali
ω	: Theiler parametresi
GEK	: Geçici En Yakın Komşuluk
$I(T)$	: Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu
$P(x(i))$	: Bir ölçümünde $x(i)$ 'nin görülme olasılığı

$P(x(i + \tau))$: Bir ölçümünde $x(i + \tau)$ 'nin görülme olasılığı

X_{cj}, X_{ij} : Faz uzayında tahmin edilecek noktalar çifti

V : Simpleks seçim hacmi

d : Simpleks faz potresindeki noktaların merkez noktasına uzaklığı

$\bar{d}$: Simpleks seçimi merkez noktadaki bütün değişken vektörlerin toplamı

Φ : Simpleks seçim kriteri



1. GİRİŞ

Doğada bulunan dinamik yapıların davranışlarının izlenmesi ve bu yapıların karakteristiklerinin ortaya çıkarılması bilimin ilerlemesine büyük katkıda bulunmuştur. Doğadaki birçok açıklanamaz olay, dinamik bir sistemin davranışının izlenmesiyle sistemin değişkenlerinin verdiği tepkiler sonucu açıklanabilmiştir (Turcotte, 1992; Das, 2009; Baman, 2014). Günümüzde düzensiz dinamik yapıya sahip birçok sistem bulunmaktadır. Doğada başlangıç şartlarına hassas bağıllığı kendi iç dinamiğinde barındıran oldukça önemli sistem bulunmaktadır. Örneğin, elektrik devrelerinde, kimyasal reaksiyonlarda, akışkanların davranışlarındaki türbülanslarda, fizikte, matematikte, lazer sistemlerinde, meteorolojik olaylarda, ekonomik modellerde sistemin gelecekteki yapısı, doğrusal olan yöntemlerle açıklanamayacak kadar kompleks olan bir davranışa sahip oldukları gösterilmiştir (Baker, 1990; Williams, 1997).

Doğrusal yöntemlerle açıklanması zor matematiksel eşitliklerin kurulamadığı dinamik sistemler için, doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak dinamik sisteme ait bilgilerin alınması gerekmektedir. Bu kapsamda doğrusal olmayan yöntemler literatürde kaos analiz yöntemleri olarak bilinmektedir (Kennel, 1992; Hilborn, 1994; Strogatz, 1994; Alligood, 1997; Barnet, 1998; Sprott, 2003). Kaos, kararsız, karmaşık ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerde görülmektedir (Kennel, 1992; Hilborn, 1994; Strogatz, 1994; Alligood, 1997; Barnet, 1998; Sprott, 2003; Özkaynak, 2007; Yürüklü, 2013). Kaos metodolojileri; matematik, fizik, kimya, biyoloji, tıp, mühendislik, sosyoloji, ekonomi başta olmak üzere çeşitli bilim dallarında yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Strogatz, 1994). Kaotik zaman serileri analizi yöntemleri de doğrusal olmayan dinamik sistemlerin yapılarının incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Sprott, 2003; Montagne vd., 2004; Tiwari vd., 2004; Yılmaz, 2006; Lakshmi vd., 2009; Jinkui vd., 2009). Kaos analiz yöntemlerinde son yıllarda görülen hızlı gelişmeler, karmaşık dinamik sistemlerin (depremler, fay hatları, kalp ve beyin fonksiyonları ile ilgili çeşitli çalışmalar gibi) bir derece açıklanması ve anlaşılması için önemli fırsatlar sunmaktadır (Papadopoulos ve Vassilis, 1992; Cox ve Wang, 1993; Das, 2009).

Dinamik sistemlerde kaos; kararsız, karmaşık ve doğrusal olmayan durumlarda ortaya çıkmaktadır. Karmaşık sistemler, çok sayıda bağımsız değişkenin birbiri ile etkileştiği, çok

sayıda serbestlik derecesine sahip olan ve farklı davranışlar gösterebilen incelenmesi zor sistemlerdir (Strogatz, 1994; Sprott, 2003). Böyle bir sisteme örnek olarak; hava direncinin hızın küpüyle değiştiği bir sarkaç deneyinde, dışarıdan periyodik bir kuvvetin etkisiyle sürtünme katsayısının belli bir değerden sonra kaotik davranış göstermesi durumunu verebiliriz (Strogatz, 1994). Ayrıca, deprem mekanizması da birden fazla değişken tarafından etkilendiği için bu tür yapılar için de dinamik bir sistem olarak varlığını sürdürdüğü yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Barman, 2014). Faz uzayı; belirli başlangıç koşullarından başlayarak, sistemin dinamik yapısına göre hareket ettiği uzaydır (Sprott, 2003). Dinamik bir sisteme ait olan faz uzayında çizilen çekerin (attractors) davranışlarının düzensiz olması, sistemin başlangıç koşullarına hassas bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumun tespiti, kaos kuramının başlangıç tarihi olarak kabul edilmektedir (Baker, 1990). Dinamik bir sistemde kaosun varlığını göstermek için, belirli parametrelerin varlığına ihtiyaç duyulmakla birlikte, sistemin dinamik yapısının da bilinmesi gerekmektedir (Strogatz, 1994; Sprott, 2003).

Dinamik bir sistemin belirli bir andaki davranışını bir nokta olarak, belirli bir süredeki davranışını da faz uzayında bir yörünge olarak gözleyebiliriz, çeker (faz uzayında oluşan *d*-boyutlu şekil) olarak adlandırılan yörünge, anlamlandırılarak sistem davranışının kaotik özelliklere sahip olup olmadığına bakılarak sistem modellenmeye çalışılır (Strogatz, 1994; Sprott, 2003). Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri de sistemin faz uzayını yeniden kurmak için gereken gömülü (embedding) boyut değişkenlerinin doğru olarak hesaplanması ve seçilmesidir (Fraser, 1986). Burada gömülü boyut, faz uzayının boyutudur. Sistemlerin faz uzaylarındaki çekerleri, dinamik sistemlerin özelliklerini anlamak için kullanırız. Sistemin çekerlerinin incelenmesiyle sistem hakkında yeni bilgiler elde edilir ve sistemin davranışındaki değişiklikler kolaylıkla analiz edilebilir. Çünkü faz uzayı, koordinatları sistem değişkenlerinin birbirine göre konumlandırılmış grafiklerden oluşmaktadır, yani bir dinamik sistemin mümkün olan bütün durumlarının bulunduğu ortamdır. Sistem değişkenlerinin birbirine göre çizilen grafiğinde izlenen yörünge, bize sistemin herhangi bir andaki durumu hakkında bilgi verir (Sprott, 2003).

Kaos metodları ile ²²²Rn gazının yeryüzüne çıkışı özerk bir sistem olarak düşünülebilir. Bu kuram kullanılarak, gaz çıkışının incelenmesinde nicel ve nitel analiz yöntemleri uygulanabilir. Bu analiz yöntemleri ile jeolojik sistemden, deney veya gözlem sonucu sistemin dinamik davranışını gösteren sinyaller elde edilir. Elde edilen bu veriler zaman

serisi şeklinde kayıt edilerek zaman içindeki değişimleri incelenir. Dinamik sistemin faz uzayı yeniden yapılandırılarak, sistemin davranışının zamanla değişimini gösteren çekerler çizilir. Yeniden oluşturulan bu çekerler üzerinden dinamik özellikler belirlenir, doğrusal olmayan metotlar kullanılarak dinamik sistem davranışının analizi yapılabilir.

Depremi matematiksel yapısı doğrusal değildir. Bu nedenle, doğrusal işlemlerle depremi açıklamak yararlı sonuçlar vermez. Kaos, deterministik bir sistemin hiç beklenmedik bir şekilde davranması olarak tanımlanır. Bundan dolayı yapılan bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan zaman dizilerinin analizi yapılırken, verilerin doğrusal olmama durumunu belirleyen yöntemler kullanılmıştır. Kaotik zaman serileri analizi yöntemlerini uygulamak için kullanılan en yaygın araçlar; Lyapunov Üstelleri (Lyapunov Exponent), Vekil Veri Analizi (Surrogate Data Analysis), Hurst Üsteli (Hurst Exponent), Güç Spektrumu (Power Spectrum), Korelasyon Boyutu (Correlation Dimension), Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu (Mutual Information) ve Geçici En Yakın Komşular Metodu (False Nearest Neighborhood) olarak sayabiliriz. Çalışmada kullanılan analizler için; Geçici En Yakın Komşular Metodu ile bir boyutlu zaman serisinden minimum gömme boyutu seçildi. Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu metodu ile ilk lokal minimumuna karşı gelen τ değeri elde edildi. Korelasyon Boyutu ile sistemin karmaşıklığı hakkında, Lyapunov Üsteli ile de sistemin başlangıç şartlarına duyarlılığı hakkında önemli bilgiler elde edildi. Hurst Üsteli, zaman serisinin sınıflandırılması için gerekli olan istatistiksel bir ölçüm tekniği olarak kullanıldı. Güç Spektrumu ise elde edilen sinyalin kaotik ya da kaotik olmayan davranışının belirlenmesi için nitel bir yöntem olarak kullanıldı.

Bu çalışmada kullanılan, yöntemlerden elde edilen sonuçlara göre; Doğu Anadolu Fay Zonu'nun yakınında yer alan Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin istasyonlarına ait olan ^{222}Rn verilerinin kaotik özellikler sergiledikleri gösterildi. Daha sonra, ^{222}Rn ölçümlerinin gömülü parametrelerini hesaplayarak bu verilere ait olan çekerler bulundu. Ayrıca, bu çekerlerin en yakın komşuluklar metodu kullanılarak yeniden yapılandırılan faz uzayı ile ^{222}Rn seviyelerinin düzensiz davranışları incelendi. Çekerlere ait olan fraktal boyutlar, korelasyon fonksiyonu ile hesaplandı. Bunun sonucunda, topraktaki ^{222}Rn davranışının güçlü kaotik özellikte olduğu görüldü. Bu yöntemlerin uygulanması için TISEAN ve MATLAB® yazılımı kullanıldı. Verilerin temel istatistiksel analizleri (frekans, yüzde, aritmetik ortalama, standart sapma, korelasyon analizi ve Kolmogorov-Smirnov testleri) yapıldı (Hegger vd., 1999; SPSS Inc., 2007; The MathWorks, Inc., 2007; Golden Software, 2009).

Bu çalışmada, kaotik davranış gösteren toprak radon gazı konsantrasyonlarına ait Nurdağı istasyonu için 70.176 adet, Kozan istasyonu için 81.696 adet, Yakapınar istasyonu için 84.672 adet, Osmaniye istasyonu için 70.176 adet ve Mersin istasyonu için 85.248 adet veri kullanılarak sistemin dinamik davranışının doğrusal bir yapıda olmadığı gösterildi. Daha sonra, kaotik zaman serilerinin kestirim (prediction) alışmaları yapıldı. Yapılan kestirim çalışmaları uygun istatistiksel yöntemler kullanarak değerlendirildi ve elde edilen grafikler yorumlandı.



2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1. Radyasyon

Enerji yayınımlı ya da aktarımı olan radyasyon, kararsız atom çekirdeklerinin kararlı hâle geçmesi için kaynağın özelliğine bağlı olarak parçacık veya dalga tipi olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Parçacık tipi radyasyon, belirli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden mikroskobik parçacıkların oluşturduğu radyasyonları, dalga tipi radyasyonlar ise belirli bir enerjiye sahip fakat kütsüz radyasyonları ifade eder (Bonotto vd., 2009).

Hangi tip olursa olsun (parçacık, dalga) radyasyon; yayıldığı ortama enerji aktararak çeşitli etkileşimlere yol açmaktadır. Etkileştiği maddede yüklü parçacıklar oluşturabilen radyasyon türü iyonize edici radyasyon, iyonlaşabilen atomlardan veya moleküllerden elektron koparabilmek için yeterli enerji taşıyan kuantumlara sahip olmayan bir radyasyon ise iyonize edici olmayan radyasyon olarak tanımlanır (El-Ghossain, vd, 2012; Değerlier, 2007). Alfa parçacıkları (α), beta parçacıkları (β), gama ışınları (γ), X-ışınları ve nötronlar (n) iyonlaştırıcı radyasyon çeşitlerindendir. Radyo dalgaları, mikro dalgalar, kızılötesi dalgalar ve görünür ışık ise iyonlaştırıcı olmayan radyasyon çeşitlerindendir (Taşkın, 2006).

2.2. Radyoaktivite

Bir atom çekirdeğinin kendiliğinden veya yapay yollarla tanecikler (α , β) veya elektromanyetik ışınlar (γ) yayarak parçalanması olayına radyoaktivite denir (Krane, 2001). Doğada var olan kararsız elementler, kararlı yapıya geçerken sahip oldukları fazla enerjilerini açığa çıkarma olayı doğal radyoaktivite olarak bilinir (Taşkın, 2006). Doğada kararlı şekilde var olan elementler hızlandırıcılar ya da nükleer işlemler sonucu kararsız hâle getirilmesiyle kararsız atom çekirdekleri elde edilir ve bu çekirdeklerin bozunmasıyla oluşan radyoaktiviteye de yapay radyoaktivite denir (Koby, 2009).

2.2.1. Sudaki Radyoaktivite

Sularda radyoaktivite; doğal radyoaktif izleyiciler, radyoaktif yağışlar, nükleer ve radyolojik tesisler olmak üzere başlıca kaynaklardan meydana gelmektedir. Nükleer tehlikenin en büyüğü radyoaktif izotopların suya geçmesidir (Özden, 1990). Radyasyon kazalarında önemli bir mesele radyoaktif izotopların toprağın derinlerine sızma özelliğidir. Bu yoldan radyasyon yeraltı sularına, oradan nehirlerle taşınır. Suya karışan radyasyon, doğrudan bitkilere geçerek, radyasyonun bir anlamda devamına sebep olmaktadır. Bu nedenle radyasyon kazalarında öncelikle çevre sularında tespitin yapılması önemlidir (Daşdağ, 1990). Doğal radyasyondan ve insan faaliyetleri gibi etkilerle açığa çıkan yapay radyasyonun tespit edilmesi; çevresel ortamlara transferi çalışmaları için gereklidir (Akyıl vd., 2009). Çevresel olarak suların radyoaktif kirliliğinin belirlenmesinde ilk olarak yapılacak en basit işlem toplam alfa ve beta radyoaktif ölçümleridir (Özger, 2005).

Sulardaki radyoaktivitenin birçok kaynağından bahsedilebilir. Bunlardan bazıları;

- Geçmiş yıllarda gerçekleşen nükleer silah denemeleri nedeniyle atmosfer ve stratosfere yerleşen ^{90}Sr , ^{137}Cs gibi radyoaktif fisyon ürünleri ile kirlenmiş olan bulutların, radyoaktif serpinti halinde zamanla yeryüzüne yayılarak, çevrede ve yüzey sularında birikmesi,
- Doğal olarak bulunabilen radyoaktif maddeler (toryum ve uranyum bozunum ürünleri) özellikle ^{226}Ra ve ^{228}Ra ,
- Doğal radyoaktif maddelerin suya karışmasına neden olan insan kaynaklı faaliyetler (madencilik, mineral tuzlarının işlenme süreçleri ve fosfatlı gübre üretimi),
- Nükleer enerji üretimi sırasında ortama verilebilecek radyoçekirdekler,
- Kontrolsüz bir şekilde üretilen, tüketilen ve atılan radyoçekirdekler (tıbbi veya endüstriyel) dir.

Ayrıca, yeraltı suyundaki radyoaktivite, içinden geçtikleri veya temas ettikleri radyoaktif maddelerden veya minerallerden ileri gelmektedir. Sularda radyoaktif ^{40}K dışında en fazla Uranyum ailesi elemanlarından ^{238}U , ^{226}Ra ve ^{222}Rn gibi radyoaktif elementler bulunmaktadır (Güler, 1997; Taşkın, 2006).

2.2.2. Topraktaki Radyoaktivite

Dünyanın jeolojik yapısına bakıldığında, belirli kalınlıktaki toprak tabakasından sonra kaya tabakalarının oluştuğu görülmektedir. Bahsedilen bu tabakalarının karasal radyoaktivite kaynaklı olduğu öngörülmektedir. Bu radyoaktivitenin çoğunun gama radyasyonlarından oluştuğu ve büyük bir kısmının 0-25 cm derinlikteki yüzey tabakasından kaynaklandığı bilinmektedir. Bazı bölgelerde çok geniş alanlara yayılmış olan granit kayaları önemli miktarlarda toryum içermektedir. Yapılan çalışmalara göre, granit kayaların bulunduğu bölgelerden alınan ölçümlerde gama radyasyon miktarının yüksek olduğu belirlenmiştir (Değerlier, 2007).

Toprakta bulunan ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K gibi doğal radyoçekirdekler toprağın radyoaktif bir özellik göstermesini sağlamaktadır. Doğal radyoçekirdekler nispeten volkanik, fosfat, granit ve tuz kayalarında yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar. Bunlar, uygun çevresel şartlar altında zamanla parçalanarak küçük parçalar halinde akarsu ve yağmurların sonucu uzak bölgelere taşınır ve bunun yanında toprağa karışırlar. Böylece toprağın doğal radyoaktivitesi artar (Keskin, 1998; Külahcı, 2000). Toprakta mevcut olan radyoaktivite biyokimyasal işlemlerle değişir. Topraktaki organik materyallerin ayrışması, toprağın alttaki tabakalarından oksidiyonlarla başlar. Toprağın alttaki tabakalarında bulunan ^{238}U zamanla azalır. Toprakta meydana gelen bu hareketlilik, demir oksitlerin ve başka elementlerin oluşmasıyla devam eder. Topraktaki değişimler kayalarda var olan radyoçekirdek konsantrasyonlarını ve dolayısıyla dış radyasyon seviyelerini de azaltır. Toprakta bulunan doğal radyoçekirdekler, toprağın alt tabakalarındaki oranlarına göre ortam veya çevre doğal radyasyonun seviyesini değiştirir ve aynı oranda da insanların doğal radyasyona maruz kalmasına sebep olurlar (Zorer, 2008).

Toprak kirlenmesinin bir diğer kaynağını çevreye salınan yapay radyoçekirdekler oluşturmaktadır. Bu radyoçekirdeklerden ^{90}Sr ; kalsiyumun değişimine benzer davranış göstermektedir. ^{90}Sr , atmosferden toprağa geçerek çözünebilir bir yapıya ulaşır. Ayrıca, toprak tarafından soğurularak, bitkiler tarafından alınabilir duruma gelmektedir. ^{137}Cs 'nin, kimyasal özellikleri açısından potasyuma benzer yapıda olup, çoğu toprak türünde, bulunduğu yerde sabitlenerek nispeten az alınmayı ister hâldedir. Bundan dolayı, ^{137}Cs bitkiler tarafından topraktan alınması oldukça kısıtlıdır (Zorer, 2008; Peterson vd., 2007).

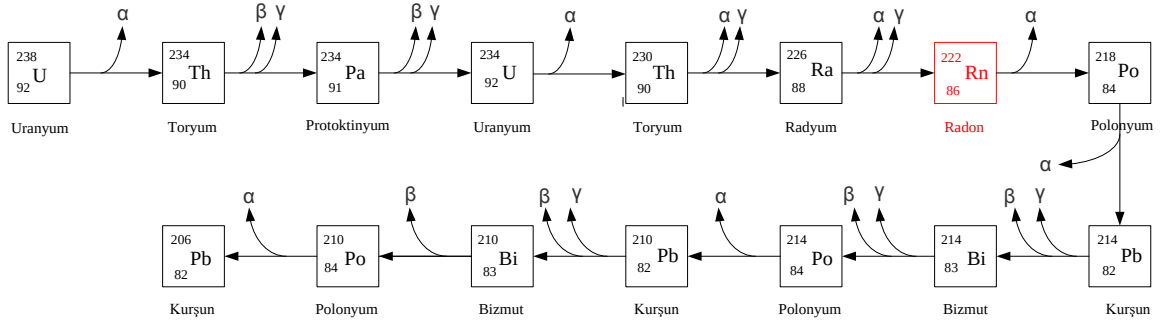
2.3. Radon Gazının Genel Özellikleri

Radon; toprağın her yerinde yayılabilen ve her katmanında bulunabilen radyoaktif bir soygazdır. Ayrıca radon hareketli radyoaktif bir gazdır, normal şartlar altında kimyasal olarak durağan radyoaktif bir elementtir. Havadan yedi buçuk kez, hidrojenden ise 100 kez daha ağırdır (Durrani, 1997; Cuculeanu, 2001).

Radon gazının ^{200}Rn 'den ^{226}Rn 'ya kadar değişen bilinen 27 izotopu vardır. Bu izotopların yarı ömürleri ^{222}Rn (3.82 gün), ^{210}Rn (2.5 saat) ve ^{211}Rn (14.7 saat) hariç bir saatten daha azdır (Cothorn ve Smith, 1987). ^{222}Rn radyoaktif olarak bozunduğunda kısa yarı ömürlü ^{222}Rn ürünleri olarak bilinen dört radyoaktif izotopu (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) vardır. Bu radyoaktif izotoplar ise 27 dakikadan daha az yarı ömre sahiptirler (Evans, 1968). Bu bozunum ürünlerinin ^{222}Rn 'dan farkları gaz halinde bulunmamalarıdır. Bu radyoaktif izotoplar havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak radyoaktif aerosoller oluşturmaktadırlar (Jaki, 1958; Durrani, 1997; Davutoğlu, 2008). Radonun izotopu, ortalama yarı ömürleri ve bozunmadan kalan miktarları açısından önemlidir. ^{219}Rn en kısa yarı ömre sahip ve neredeyse eser miktarda üretilen izotopudur. ^{222}Rn çok kısa yarı ömre sahip olduğundan dolayı, kaynağından görece çok kısa mesafelere göç edebilir (Durrani, 1997).

^{222}Rn , ^{238}U bozunma serisinin bir bölümü olarak ^{226}Ra , uranyum kaya sisteminde üretilir. ^{222}Rn konsantrasyonu yer altı suyundan difüzyon ile ya da CO_2 , CH_4 ve N_2 gazları yardımı ile jeolojik bölgeye doğru taşınır. Radon konsantrasyon seviyeleri, jeolojik ve jeofiziksel şartlardan güçlü bir şekilde etkilenir. Aynı zamanda ^{222}Rn bir soygaz olması nedeniyle, kimyasal süreçlerden daha çok yağış ve barometrik basınç gibi atmosferik olaylardan etkilenir (Ghosh vd., 2007).

Kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda meydana gelen radon, bir soygaz olması ve bütün izotoplarının radyoaktif olması sebebiyle eşsiz doğal bir elementtir. ^{226}Ra 'nın radyoaktif bozunumunu takip eden radon, sürekli olarak üretilen radyoaktif bir gazdır (Durrani, 1997). Radonun radyoaktif bozunum şeması Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Radonun asıl kaynağının uranyum olması nedeniyle ^{222}Rn , coğrafik bölgenin jeolojik yapısıyla yakından ilişkili olup, konsantrasyonu yer kabuğu üzerinde bölgeden bölgeye değişiklikler göstermektedir. Genellikle yeryüzünde radyum ile birlikte bulunan ^{222}Rn 'nin kısa yarı ömürlü olması, radyum ile göçünü sınırlamaktadır (Jaki ve Hess, 1958).



Şekil 2.1. Radyoaktif ^{238}U çekirdeğinin bozunma serisi (y=yıl, g=gün, d=dakika) (Kulalı, 2009).

Kayalarda radon miktarının fazlalığı uranyum ve toryumun varlığını göstermektedir (Jaki ve Hess, 1958). ^{238}U , kil tarafından absorbe edilir ve bu nedenle kil ve şist diğer sediment ve kayalardan daha fazla ^{238}U ve ^{226}Ra taşır. ^{238}U ve ^{232}Th çatlaklarda ve bazı geçirimli yapılarda, metamorfik süreçler ve hidrotermal çözünmeler gibi jeolojik işlemler ile taşınabilir ve yer değiştirebilir (Durrani, 1997).

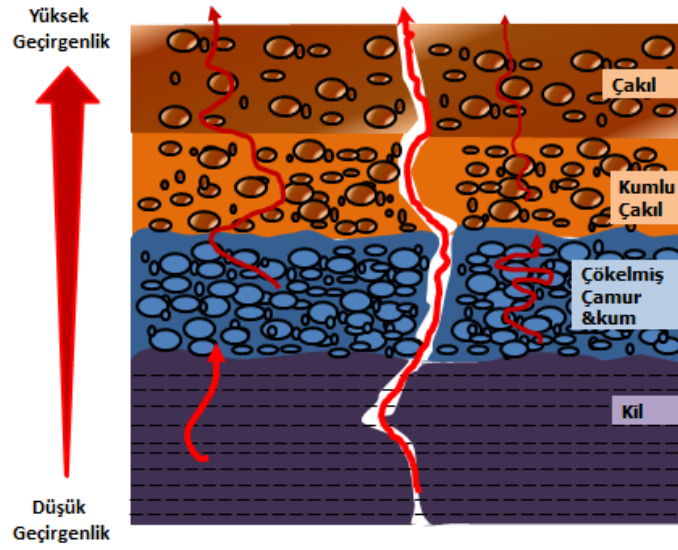
Yer altı suları kayalarla doğrudan ve uzun süre temasta olduklarından ^{222}Rn konsantrasyonu bakımından daha zengindir (Jaki ve Hess, 1958). İçerisinde ^{222}Rn nispeten kolay çözünebildiğinden dolayı konsantrasyonu yüksektir (Durrani, 1997; Köklü, 2006). Yer altı suyu, anormal derecede yüksek ^{222}Rn konsantrasyonu içerdiğinden faylarla ilişkili olduğu uzun zamandır bilinmektedir. Toprak ve sudaki ^{222}Rn araştırmalarının deprem kestiriminde başarılı olduğu görülmektedir. ^{222}Rn seviyelerinin meteorolojik ve hidrolojik verilerle ilişkisinin yanı sıra sismik aktivite ile de korelasyon halinde olduğu bilinmektedir. ^{222}Rn konsantrasyonlarındaki ani değişimler deprem habercisi olarak kullanılmıştır (Jaki ve Hess, 1958; King, 1986).

^{238}U , kaya ve toprak katmanlarında düşük konsantrasyonlarda dağılmıştır. ^{222}Rn , ^{238}U bozunma serisinin bir parçası olarak ^{226}Ra tarafından üretilmektedir. Radonun kısa ömründen dolayı normal şartlarda difüzyon ile toprakta taşınımı birkaç metreyle sınırlıdır (Cothorn ve Smith, 1987). Kayalara uygulanan streten dolayı radonun sızdığı düşünülmektedir. Üst kabuktaki jeokimyasal ve jeofiziksel süreçlerin bir habercisi olarak ^{222}Rn potansiyel bir işlevsellik kazanmaktadır. Aktif volkan bölgelerinde mekanik bir haberci olarak jeodinamik süreçlerde kendini gösterir. ^{222}Rn sismik aktivite için bir uyarıcı olarak ele alınmıştır. Diğer taraftan atmosferik basınç, kayalarda ^{222}Rn gazının yayılımını etkileyerek radon ölçümlerini etkilemiştir. Jeolojik çevrede, yer altı suyundaki ^{222}Rn konsantrasyonu genelde ana radyoçekirdeklerin (^{238}U ve ^{226}Ra) çevresindeki kayaların izotopik zenginliğine bağlıdır (Plastino vd., 2010; Ramola vd., 2011). Bundan dolayı

metamorfik kayalar komşu kayalardaki uranyum konsantrasyonu ile doğru orantılı değişim gösterir. ^{222}Rn konsantrasyonu farklı bölgelerde farklı kaya tiplerinde ve benzer jeolojik gruplar içinde önemli ölçüde değişiklik gösterebilir (Kumar vd., 2013). Birçok durumda, yer altı suyundaki ^{222}Rn gazı; sismik/volkanik aktiviteye, hidro-jeolojik şartlar ve meteorolojik koşullara bağlıdır (Durrani, 1997; Kumar vd., 2013). Jeolojik ve hidrolojik incelemeler sonucu, ^{222}Rn 'nin bu şekildeki davranışı jeofiziksel açıdan avantajlı bir kullanıma sahiptir (Çelebi, 1995; Durrani, 1997; Kumar vd., 2013).

Yerkabuğundaki, sıvı maddelerin taşınımı, difüzyon, sıvı ve gaz fazları arasındaki oran ve radyoaktif bozunum gibi fiziksel süreçler ^{222}Rn gazının taşınım davranışlarını etkiler. ^{222}Rn gazı, su ile etkileşime girerek kaya ve topraktan göç yolu ile yeraltısuyuna karışır ve yeraltısuyunda kolayca çözünbilme özelliğine sahiptir (Kamra vd., 2013).

^{222}Rn konsantrasyonunun çevresel değişkenlerle nasıl değiştiğine bakarsak bazı önemli çıkarımlar şöyle yapılabilir: ^{222}Rn toprakta bulunan ^{226}Ra bozunumu sonucu açığa çıktığı için, atmosfer basıncının düşmesi toprak gözeneklerini dolduran havanın basıncının da düşmesine neden olur. Bu durumda, ^{222}Rn gazının göçü artar. Yağışlı havalarda yüzeydeki toprağın neminin artması toprağın gözeneklerinin kapanmasına sebep olur. Bu yüzden, ^{222}Rn gazının yukarıya doğru difüzyon yolu ile geçişi güçleşir ve toprağın yüzeyindeki yoğunluğunun azalmasına neden olur. Çevresel parametrelerden biri olan toprağın sıcaklığının yükselmesi toprağın kurummasına ve gözeneklerin çoğalmasına neden olduğu için, ^{222}Rn gazının topraktan kaçması kolaylaşmaktadır. ^{222}Rn gazı konsantrasyonu mevsimsel değişimi deniz seviyesinden yüksekliğe göre farklılıklar göstermektedir. Dağlık bölgelerde, sıcaklık ve rüzgâr değişimine bağlı olarak konsantrasyonda dalgalanmalar gözlenmektedir (Holford, 1993; Durrani, 1997). Farklı toprak tiplerine göre ^{222}Rn 'nin geçirgenliği Şekil 2.2'de gösterilmiştir (USGS, 2011).



Şekil 2.2. Radon gazının farklı toprak tiplerine göre geçirgenliği (USGS)

^{222}Rn gazı, kayalar ve topraklar arasından atmosfere yayılmaktadır. Atmosferde yaklaşık 0.0037 kBq/m^3 ^{222}Rn konsantrasyonu bulunmaktadır. ^{222}Rn , ya doğrudan gaz olarak ya da yer altı sularında çözünerek yüzeye ulaşmaktadır (Durrani, 1997).

Hidrotermal gazların yanı sıra toprak altında bulunan ^{222}Rn gazının da yeryüzüne çıkışındaki dalgalanmalar muhtemel sismik bir olay için jeokimyasal izleyiciler arasında olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir (Virk ve Singh, 1993; Ramola vd., 2011; Barman, 2014). Radonun topraktaki geçirgenliği için çeşitli meteorolojik parametrelerin de oldukça önemli bir rol oynadığı bilinmektedir (Barman, 2014). Radon göçünün dinamik yapısını ve bu hareketliliğin tektonik aktivitelerle olan ilişkilerini anlamak için son üçyüzyıl boyunca çeşitli bilimadamları tarafından bu konu çalışılmıştır (Fleischer, 1981; Ghosh, 2009; Kumar, 2013). Ayrıca çeşitli matematiksel modeller de kurulmuştur (Fleischer, 1981; Ghosh, 2009; Külahcı, 2009; Kumar, 2012; Barman, 2014). Ancak radon göçünün doğrudan bir sismik olayı tetiklemesi ya da bir işaretçi olarak görülmesinin matematiksel bir ifadesinin kurulması oldukça zor bir iştir. Doğrusal olmayan metodlar, yapılan bu çalışmaları kolaylaştırmıştır (Das, 2009; Barnet, 2014).

2.4. Sulardaki Radon

^{222}Rn gazı, topraktan moleküler difüzyon yoluyla ya da konveksiyon yöntemi ile sızarak, yerden havaya doğru yavaşça hareket ederek atmosfere ulaşır. Fakat bir bölümü

toprak yüzeyinin altında kalıp suda çözünür ve yeraltı sularına karışır (Durrani, 1997; Davutoğlu, 2008).

^{222}Rn konsantrasyonunun suda eriyebilme özelliğinden dolayı ağız yoluyla alınan suyla ve uçuculuğu sebebiyle de havaya direkt karışıp solunum yoluyla vücuda girerek bütün hücrelere yayılır. ^{222}Rn bir soygaz olduğundan dolayı, hücrelerdeki diğer maddelerle etkileşime girmez. Ancak yaydığı alfa ışınimlarıyla vücudun belirli bölgelerini etkileyebilir (Davutoğlu, 2008).

2.5. Topraktaki Radon

Granit ve volkanik topraklar, tortul şistler önemli radon kaynaklarını oluştururlar. Topraktaki radyumun bozunması sonucu radon yer yüzeyinde açığa çıkar. Atmosfer basıncının düşmesi, topraktaki basıncın da düşmesine neden olur. Bundan dolayı, radonun göç hareketleri artar. Aynı zamanda yağışlı havalarda toprak nemlendiğinden dolayı gözenekler kapanır. Böylece, ^{222}Rn 'nin bulunduğu konumdan yükseklerle doğru hareket etmesi güçleşir. Buda toprak yüzeyindeki ^{222}Rn konsantrasyonunun giderek düşmesine sebep olur. Diğer taraftan toprağın sıcaklığının artması toprağın kurumasına ve porların çoğalmasına sebep olur. Bu sayede ^{222}Rn 'nin topraktan kaçmasını kolaylaştırmaktadır. ^{222}Rn konsantrasyonunun mevsimsel değişimi ise deniz seviyesinden olan yüksekliğe göre, dağlık bölgelerde, sıcaklık ve rüzgâr değişimine göre farklılık göstermektedir. Dolayısıyla topraktan radon yayılımının, toprağın geçirgenliği, toprağın durumu (kuruluk, suyla tıkanmış olma, donma vb.), meteorolojik koşullar (toprak ve havanın sıcaklığına, hava basıncına, rüzgârın hızına ve yönüne) ve ölçümün yapıldığı bölgenin yükseltisi gibi parametrelere göre değişiklik gösterdiği söylenebilir. Ayrıca, ^{222}Rn konsantrasyonunun değişimi coğrafik bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak çevreye yayılım gösterdiği için; ana kaynağı olan radyum, toprak ve kayalarda çok fazla miktarda bulunur (Cothorn ve Smith, 1987; Durrani, 1997).

2.6. Radon ve Deprem Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Deprem kestirimi yapmak çok zor bir iş olmasına rağmen, yapılan son çalışmalar çeşitli jeofiziksel ve jeokimyasal değişkenlerin deprem ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir

(Freund, 2009). Fayların oluşmasında yer kabuğundaki sıkışma ve genişleme kuvvetleri en önemli rolü oynamaktadır. Bu tür kuvvetler kırıklar boyunca kaya kütlelerini hareket ettirmekte, kaya kütlelerinin hareket ettirilemediği durumlarda ise yoğun bir enerji birikmesine neden olmaktadır. Yerin derinliklerinde biriken enerjinin boşalması sırasında yer sarsıntıları yani depremler oluşmaktadır. Kısaca deprem, yer içerisinde fay düzlemi olarak tanımlanan kırıklar üzerinde biriken enerjinin aniden boşalması sonucunda oluşan hareketlerdir (Şaroğlu, 1987).

Karmaşık bir yapıya sahip olan depremler yeryüzünde bir takım değişimler meydana getirmektedir. Bu değişimler arasında; sismik dalga hızında, yeraltı su hareketlerinde, jeomanyetik etkilerde, sıcaklık artışında ve yeryüzüne çıkan radon gazı çıkışında meydana gelen değişimler sayılabilir (Rikitake, 1976; Fleischer ve Mogro-Campero, 1978; King, 1986). Yapılan çalışmalarda gözlenen bu etkilerin depremin yerini ve büyüklüğünü tahmin etme çalışmalarında kullanılabileceği gösterilmiştir (Kolbaşı, 1997; Seidel vd., 1998; Virk ve Singh, 2001; Zmazek vd., 2000; Zmazek vd., 2002; Zmazek vd., 2003; Negarestani vd., 2002; Negarestani vd., 2003; Külahcı ve Şen, 2014; Külahcı ve Çiçek, 2015).

Yeraltı sularındaki kimyasal değişimler ve radon miktarındaki değişimlerin incelenmesi deprem kestirimi çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmaların çoğunda özellikle radon konsantrasyonunun depremlerden önce anormal derecede değiştiği dikkat çekicidir. Bundan dolayı, toprak ve sudaki radonun değişimi sismik olaylar için bir uyarıcı sinyal olarak görülmektedir (King, 1980). King (1978)'e göre yer küre içindeki toprak gazı konsantrasyonu, depremlerden sonra yer kabuğunda oluşan baskıdan dolayı artış göstermektedir. Bu değişim radon anomalilerine neden olduğu için özellikle deprem kestirimi çalışmalarında kullanılmaktadır. Deprem kestirim çalışmaları yapan çoğu bilim adamı özellikle topraktaki radon gazı değişimleriyle sismik aktiviteleri beraber incelemişlerdir (King, 1978; Freidmann, 1988; Seidel, 1998; Saç ve Camgöz, 2000; Erees, 2001; Virk ve Singh, 2001; Zmazek, 2002; Zmazek, 2003; Külahcı, 2009; Saç ve Camgöz, 2013; Woith, 2015; Kamışlıoğlu ve Külahcı, 2016). Radon gazı seviyesinde meydana gelen değişimlerin, deprem kestirimi çalışmalarında kullanılabilmesi için radon konsantrasyonunun bölgenin jeolojik yapısına bağlılığı da incelenmelidir. Fay hatlarının bulunduğu bölgelerdeki yeraltı suları ve toprak gazındaki radon aktivitesi değişimleri incelenerek sismik hareketler ile radon konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre; radon aktivitesi deprem kestiriminde kullanılabilecek en önemli jeolojik unsurlardan biridir

(Teng, 1980; Virk ve Singh, 1993; Crockett, 2006; Erees, 2007; Crockett, 2010; Woith, 2015).

Topraktaki ^{222}Rn göçü, onun kısa yarı ömründen dolayı birkaç metre ile sınırlıdır (Durrani, 1997). ^{222}Rn gazı taşınım işlemleri için, taşınım mekanizmalarının rüzgâr, basınç değişimi, topraktaki sıcaklık farklılığı gibi nedenlerle olduğuyla ilgili çalışmalar da yapılmıştır (King vd., 1993; Planinić vd., 2004; Külahcı vd., 2009; Chyi, 2010; Woith, 2015). Jeoloji literatüründe ^{222}Rn göçü, deprem ile birliktedir (Wakita, 1991; Wakita, 1998). Yapılan bu çalışmalar, topraktaki ^{222}Rn gazının doğrusal bir davranış sergilemediğini göstermektedir. Topraktaki ^{222}Rn gazının davranışının doğrusal olmadığı ve deprem kestirim çalışmalarında kullanıldığı diğer çalışmalar ile de gösterilmiştir (Cuculeanu, 1996; Albarello, 2003; Planinić 2004; Das, 2009; Külahcı, 2009; Lane-Smith, ve Sims 2013; Niksarlıoğlu ve Külahcı, 2013; Kamışlıoğlu ve Külahcı, 2016).

Bir bölgedeki ^{222}Rn varlığı, o bölgenin tektonik hareketler gösterebileceğinin bir sonucu olduğundan topraktaki ve yeraltı sularındaki sürekli ^{222}Rn ölçümü bir deprem habercisi özelliği taşımaktadır (Wakita, 1998; Planinić, 2004). Bir deprem durumunda radonun hareketliliğinin arttığı görülmüştür (Ulomov ve Mavashev, 1967; Friedmann, 1978; Fleischer ve Magro-Compero, 1978; Fleischer ve Magro-Compero, 1985; Virk ve Singh, 1993; Igarashi vd., 1995; King vd., 1995). Radon ve sismik aktivite arasındaki korelasyonun incelendiği ilk çalışmalardan biri, Taşkent havzasında 1966 yılında meydana gelen deprem ve mineral sulardaki radon değişimi üzerinedir (Wattananikorn vd., 1998; Woith, 2015).

Bir bölgede radonun varlığı, büyük ölçüde jeolojik yapıya bağlı olarak farklılık göstermektedir. Toprak ve yeraltı sularında sürekli olarak radon ölçümünün yapılması, bir deprem habercisi niteliği taşıyan radon gazı konsantrasyonunun değişiminin yorumlanması için oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Topraktaki radon gazının konsantrasyonundaki değişimin deprem oluşumundan birkaç hafta ya da birkaç ay önce olduğu bazı çalışmalarda kaydedilmiştir (Igarashi vd., 1995; King, 1993; Planinić, 2001; Külahcı ve Şen, 2014; Külahcı ve Çiçek, 2015).

Deprem oluşumunda meydana gelen bir takım çevresel parametre değişimleriyle beraber, bilim adamları deprem ile radon ve deprem ile çevresel parametreler arasındaki ilişkileri anlamaya çalışmışlardır. Deprem; radon anomalileri, atmosferik basınç, yağış ve toprak sıcaklığı gibi meteorolojik faktörlerle beraber birçok çalışmada incelenmiştir (Friedmann ve Hernegger, 1978; Külahcı vd., 2009; Ghosh vd., 2009). Deprem dinamiği

gereği oldukça kompleks ve matematiksel denklemlerle ifade edilemeyen bir süreç olduğundan dolayı deprem sırasında meydana gelen değişimlerden yola çıkılarak depremin yapısı hakkında bilgi edinilmek istenmiştir. Klasik olarak, dinamik sistemler doğrusal ve/veya doğrusal olmayan metotlar kullanılarak incelenir. Kararlı doğrusal sistemler için kullanılan doğrusal metotlar, doğrusal olmayan analizlerde genellikle başarısız fakat yol gösterici olmuştur. Dinamik bir sistemi tanımlayan fark denklemlerindeki doğrusal olmayan bir değişkenden dolayı, önceden bilinmeyen dinamikler meydana gelebilir. Kaos teorisi veya doğrusal olmayan analiz metotları bu tür dinamik sistemleri incelemek için kullanılmaktadır (Yılmaz, 2006; Külahcı ve Şen, 2013).

2.7. Topraktaki Radon Gazının Ölçülmesi (ALFAGUARD)

Bu çalışmada kullanılan ^{222}Rn verileri T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından bu çalışmada kullanılmak üzere tarafımıza hibe edilmiştir. AFAD'a elindeki verilerin ileri istatistiksel hesaplamalarla işlenebileceği bir proje önerilmiş ve bu talep AFAD tarafından resmi olarak kabul edilmiştir. Bu protokol çerçevesinde bu çalışma nihayetlenmiştir. AFAD'ın ^{222}Rn verilerini alma yöntemi aşağıda özetlenmiştir: ^{222}Rn gazı konsantrasyonu kendi katı ürün çekirdekleri (kız çekirdekleri) plastik iz dedektörleri tarafından kaydedilebilen alfa parçacıkları yayınlarlar. ^{222}Rn konsantrasyonunun ölçüm yöntemleriyle alakalı birçok deneysel yöntem mevcuttur. Bunların hemen hemen büyük çoğunluğu alfa parçacıklarının ölçümü ile elde edilmektedir. Radon ve ürünlerinin aktiviteleri belirlenirken yaydıkları alfa radyasyonunun dedekte edilmesi gerekir (Bourai, 2013). Bu çalışmada, topraktaki radon gazının sürekli ölçümü için geliştirilen Kanada Alpha Nuclear firması tarafından üretilen, Alphameter 611 modeli cihaz verilerinin ölçülmesi için kullanılmıştır. Çelik tüp içerisinde bulunan cihazın (Alphameter 611/ Alpha Nuclear Inc. Canada) alt ucundaki boşluğun tepesinde ışık, nem ve kirden koruyucu bir alüminyum filme sarılmış tabakanın arkasında 400 mm^2 ölçüm alanına sahip bir silikon detektör bulunmaktadır. Bu detektör aynı zamanda $1,5\text{ MeV}$ 'den büyük enerjilere karşı oldukça hassas bir yapıya sahiptir. Toprakta, uranyum kaynaklı olan ^{222}Rn gazının bozunmasıyla açığa çıkan alfa parçacıkları dedektör tarafından kısmen tespit edilerek, 15 dakikalık aralıklarla, tarih ve saat ölçümleriyle birlikte cihazın hafızasına kayıt edilmektedir. ^{222}Rn verileri yazılımlar yardımıyla ve GSM modem vasıtasıyla kayıt merkezine ve oradan bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Külahcı vd., 2009; Tarakçı, 2014).

3. TEORİK ÇALIŞMALAR

3.1. Zaman Serisi Analizi

Bir sistemin dinamik özellikleri hakkında bilgi edinebilmek için, sisteme ait olan çeşitli şekillerde oluşturulabilecek tek boyutlu bir zaman serisi incelenmelidir. Bir sistemden elde edilen tek boyutlu zaman serisinden sisteme ait birçok bilgi elde edilebilir. Düzensiz bir sisteme ait olan durum değişkenlerinden, belirli zaman aralıklarıyla elde edilen ölçümlerden, sistemin karakteristiği belirlenebilir (Baker, 1990; Rasband, 1990).

Bir boyutlu zaman dizisi şeklinde kaydedilmiş olan sinyaller, dinamik sistemin nasıl davrandığı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Sistemin zamana göre cevabını bilmek, sistemin dinamiğini tanımlayan bağımsız değişkenler tarafından yeniden oluşturulan faz uzayındaki çekerin yörüngeleri tarafından temsil edilir (Baker, 1990; Çehreli, 1994; May, 1976).

3.2. Gürültülü Verilerin Filtrelenmesi

Doğrusal olmayan dinamik bir sistemden elde edilen zaman serisi, sistemin faz uzayının yeniden yapılandırılması için kullanılabilir ancak bununla birlikte eğer doğrusal olmayan dinamik sistemden elde edilen zaman serisi doğrusal bir filtreden geçirilirse de sistemin faz uzayı yeniden yapılandırılabilir (Broomhead, 1996). Gürültü, iletilmek istenen sinyalin iletim kanalında karşılaştığı engellerle ya da diğer etkiler sonucunda sinyalin bozulması, işaretin zayıflayarak karşı tarafa istenilenin dışında gelmesi durumudur. Gürültünün kaotik davranış gösteren bir tür fiziksel sistem tarafından üretildiği çok açık bir şekilde bilinmektedir. İşaret üzerinde istenmeyen bu bileşenlerin etkisini yok etmek için süzgeç (filtre) olarak adlandırılan yapılar kullanılmaktadır. Süzgeçleme, işaretin istenilen frekanstaki değerlerini kuvvetlendirmek, istenmeyen frekanstaki değerlerini zayıflatmak işlemidir. Sonlu dürtü yanıtı filtre, FIR (Finite Impulse Response) süzgeçler; sayısal süzgeç tasarımı basit ve etkili bir yapıda olması, tekrarsız (yinelemesiz) uygulamalarda sürekli sabit sonuçlar vermesi, doğrusal fazda sonuçlar elde etmenin kolay olması,

çoklu/hızlı ve adaptif süzgeç tasarımı için etkili bir şekilde kullanılması, kolay anlaşılır tasarımlar elde etmek için genlik yanıtlarının özel olarak eşleştirilebilir olması, bazı yazılım ve donanımların özel olarak sadece FIR süzgeçler ile desteklenmesi, niceleme etkisinin düşük hassasiyette olması gibi avantajları sayesinde sıklıkla tercih edilmektedirler (Badii vd., 1988; Broomhead, 1996; Kamışlıoğlu, 2014).

FIR, süzgeç bankasında girişe uygulanan işaret farklı hızlardaki alt bantlara ayrılır. Farklı frekanslardaki (hızlardaki) bu işaretlere, işaret işleme teknikleri uygulandıktan sonra çıkış işareti elde edilir. FIR sayısal süzgeç tasarımı için pencere fonksiyonlarının kullanımı da iyi bilinen, oldukça kolay ve sayısal işaretlerin işlenmesi için oldukça elverişli bir yöntemdir. Kaiser pencereli FIR filtreleri, ayarlanabilir parametrelerinden dolayı kullanıcı açısından esneklik sağlayan bir yöntemdir (Broomhead, 1992, 1996, Başkurt, 2011; Namvaran, 2015).

FIR süzgeçlerinin, zaman serisini oluşturan işaretlerin boyut ve kaotik özelliklerini değiştirmedeği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Broomhead, 1992; Abarbanel, 1993). Bu tez çalışmasına destek olarak, ²²²Rn sinyallerinin, gürültülerinin giderilmesi için keskin kesim frekansı 100 Hz olan 10. derece yüksek frekanslardaki sinyalleri geçiren FIR süzgeç kullanılarak filtrelenmiştir.

3.3. Çevresel Parametrelerin Temel İstatistiksel Analizi ve Durağansızlığın Belirlenmesi

Yer kabuğunda volkanik süreçlerden hemen sonra oluşan birincil kayaların parçalanıp dağılmalarından toprak ana materyali olarak bilinen kayalar meydana gelmektedir. Kayalardan toprağın oluşumu bir dizi fiziksel ve kimyasal olayların sonucu gerçekleşir. Kayalar, suyun ve rüzgârın etkisiyle mekanik olarak parçalanabilirler. Toprak oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi de sıcaklıktır. Kayalar minerallerden oluşur ve her mineralin genleşme katsayısı farklıdır. Genleşme katsayısı yüksek olan mineral, sıcaklığın etkisi ile hacmini daha fazla genişleteceğinden ve diğerleri üzerine basınç yapacağından çatlamalara sebep olur. Ayrıca, kayaların boşluklarını dolduran suyun hacmi donma sırasında artacağından kayalarda çatlama ve parçalanmalara sebep olur. Rüzgârlar ve akarsular da geçtikleri yerlerdeki kayaları aşındırırlar. Beraberlerinde taşıdıkları taş, kum ve çakılları birbirlerine ve bulundukları zemine sürterek parçalanmalarını kolaylaştırırlar. Toprak oluşumu esnasında meydana gelen yükseltgenme-indirgenme, çözünme, ayrışma,

hidroliz, hidrat halinde suyu bağlama gibi kimyasal olaylarla da kayalar dağılıp parçalanabilirler (Zorer, 2008). Bu yüzden kaya tabakalarından yukarı doğru açığa çıkan ^{222}Rn gazı konsantrasyonunun değişimi bu yollardan geçerken; gözeneklilik, geçirgenlik, sıcaklık, basınç ve nem gibi bir takım çevresel parametrelerin değişimine bağlı olarak değişim gösterebilir (King, 1978; King 1980; Virk ve Singh, 1993; Planinić, 2004).

Bu çalışmada ^{222}Rn konsantrasyonunun (kBq/m^3) değişiminin yanında bu değişimin kaydedildiği zamanlarda meydana gelen deprem şiddeti (M_w) dışında, çevresel parametreler olarak da toprak sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), buhar basıncı (hPa), ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarının ($^{\circ}\text{C}$) birbirine göre değişimleri kullanılmıştır. Karmaşık yapıda olan deneysel verilerle ilgili olarak (veriler zamanla değişirken) dinamik sistemin kontrol parametrelerinin sabit ya da durağan kalıp kalmadığı oldukça önemli bir sorudur. Durağan olma durumu bir simülasyon işleminde neredeyse garantili bir durumdur ancak gerçek bir deneysel veri için bu durum bir simülasyon işlemindeki gibi değildir. Bu yüzden dinamik sistemde sürüklenme (drift) parametrelerinin var olup-olmadığı oldukça önemlidir. Birkaç basit test tekniği ile verilerdeki güçlü sürüklenmelerin var olup-olmadığı belirlenebilir. Böylece eşit zaman aralıklarıyla kaydedilen seride, istatistiksel özelliklerin (ortalama, standart sapma, basıklık ve çarpıklık) karşılaştırılmasıyla her veri seti için bu durum belirlenebilir (Reiss, 2001). Verilerin temel istatistiksel analizleri, SPSS 16.0 programı ile yapılmıştır.

İstatistiksel analize başlarken, verinin doğrusal bir yapıya sahip olup olmadığını kontrol etmek için, Kolmogorov-Smirnov testleri yapılmıştır. Çevresel parametrelerin birbirleriyle ve ^{222}Rn ile değişiminin gücüne bakmak için de korelasyon analizi testleri yapılmıştır. Kolmogorov-Smirnov, frekans dağılımları hakkında bilgi veren bir testtir. İki değişkenin birbirlerinden bağımsız olması aralarında bir ilişki bulunmadığı anlamına gelir ve bu test değişkenlerin bağımsızlığını ölçmede yaygın olarak kullanılır (Martinelli, 2015). Varyans, serideki değerlerin ne ölçüde farklı değerler aldığını gösteren bir analizdir. Bir dağılımın ortalaması sabit olmak üzere, varyansı küçüldükçe eğri daralarak yükselir. Bu durumda dağılımın dikliği arttığından normal dağılımdan uzaklaşmış olur. Deprem ve meteorolojik parametrelerin veri sayısının eksikliğinden dolayı ^{222}Rn gazı konsantrasyonu için, kaotik zaman serisi analiz metodolojileri uygulanmıştır.

Korelasyon analizi, veri setlerinin birbiri ile olan ilişkilerin derecelerini göstermek için kullanılan bir testtir. Bu çalışmada, deprem şiddeti (M_w), ^{222}Rn konsantrasyonu (kBq/m^3)

ve çevresel parametreler [toprak sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), buhar basıncı (hPa), ıslak ve kuru termometre sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$)] arasındaki korelasyonun gücüne bakılarak bu değişkenler arasındaki ilişkiler hakkında yorumlar yapılmış ve Bölüm 5'te sunulmuştur.

Yapılan bu testlerden elde edilen sonuçlara göre, eğer zaman serisi doğrusal bir eğilim (trend) gösteriyorsa, parametrik testler kullanılır. Eğer veri doğrusal değilse; ki kaotik davranış görüleceği buradan anlaşılır; o zaman rassallık testleri kullanılır. Bu yüzden parametrik olmayan testler kullanılır. Bu seriler frekans ortamındaki serilerdir. Bu serideki sinyaller, frekans bileşenlerine sahiptir. Bu yüzden güç spektrumuna bakılarak sinyalin, spektrum yoğunluğuna göre kaotikliğin derecesi anlaşılır. Güç spektrumunda, uzun ve geniş piklere sahip ise, dar bantlı kaos eğer güç spektrumunda pikler uzun ve geniş ancak belli belirsiz ise geniş bantlı kaos gösterdiği söylenir (Hegger,1999; Sprott, 2003). Bölüm 3.10'da güç spektrumunun matematiksel ve fiziksel yapısından bahsedilerek, Bölüm 5.5.3'te de bu analiz sonuçları verilmiştir. Sonuç olarak, temel istatistiksel analizler yapılarak istatistiksel açıdan da zaman serilerinin kaotik özellik gösterdiği literatürdeki diğer çalışmalara benzer bir şekilde olduğu ispatlanmıştır (Reiss, 2001; Das, 2009; Kamışlıoğlu ve Külahcı, 2015).

3.4. Kaos Teorisi

Kaos; karmaşık ve düzensiz görünümlü, başlangıç şartlarına hassas derecede bağlı, deterministik, doğrusal olmayan ve dinamik sistemlerde ortaya çıkan bir olgudur (Williams, 1997; Ablameyko, 2003, Smirnov, 2005). Başlangıç şartlarına hassas bağıllık, kaosun en önemli göstergelerinden biridir ve kelebek etkisi olarak da bilinir. Bunun anlamı sistemin başlangıç şartlarında, ihmâl edilebilecek kadar küçük bir değişikliğin bile belirli bir süre sonra sonunda ihmâl edilemeyecek kadar büyük değişikliklere yol açabileceğidir. Dolayısıyla bahsedilen determinizm ancak belirli bir süre boyunca geçerlidir. Bilimsel anlamda determinizm, bir sistemin matematiksel bir ifade ya da kural ile veya bir tablo yardımıyla gelecek değerlerinin tam olarak elde edilebilmesi olduğuna göre, bu kavram kaotik sistemlerde neden belirli bir süreyle sınırlıdır sorusunun sorulmasına sebep olmuştur. Bu sorunun cevabı, sistemin herhangi bir değişkeninin (başlangıç şartının) sonsuz çözünürlükte ya da hatasız ölçülemeyeceğiyle alakalıdır. Bir sisteme uygulanacak etki sonucunda sistemde meydana gelebilecek durum değişikliğine deterministik sistem kavramı denir (Strogatz, 1994). Dinamik sistemlerin matematiksel eşitliklerinin bilindiği

durumlarda sistem değişkenlerinin alacağı değerlere göre, kaotik davranış gösterip göstermediği belirlenirken, sistemi ifade edebilecek matematiksel eşitliklerin olmadığı durumlarda ise sistemden elde edilen zaman serileri kullanarak dinamik sistem parametreleri hakkında bilgi elde edilir (Strogatz, 1994). Kaotik davranış aslında sistem değişkenlerine bakılarak onun içyapısı hakkında en fazla bilgiyi yansıtır (Reiss, 2001).

Kaosun meydana gelmesi, belirli değişkenlere bağlı olduğu gibi ilgilenilen sistemin yapısına da bağlıdır. Kaos kararsız, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde görülmektedir (zkaynak, 2007; Yürüklü, 2013).

Literatürde Kaos teorisinin kullanıldığı kaotik zaman serileri analizleri, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin yapılarının incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Belirli aralıklarla ya da sürekli ölçümler ile elde edilen zaman dizileri üzerinde, kısa süreli tahmin veya kaotik ltleri ile sistem dinamiğinin farklı koşullardaki değişimleri arasındaki ilişkinin tespit edilmesi için kullanılmıştır. Kısa süreli tahminleme, borsadaki hisse senedi değişiminden, sismik verilerle tahminlemeye, elektrik fiyatlarına kadar pek çok alanda da kullanılmıştır (Sprott, 2003; Montagne vd., 2004; Tiwari vd., 2004; Yılmaz, 2006; Lakshmi vd., 2009; Jinkui vd., 2009).

Kaos analizi yapılırken, literatürde en sık kullanılan nitel yöntemlerden Yörüngenin İzlenmesi Metodu, Güç Spektrumu Analizi nicel yöntemler arasında da istatistiksel tabanlı yaklaşımlardan, Hurst üsteli kullanıldı. Doğrusalsızlığın tespit edilmesi içinde En Büyük Lyapunov stellerinin hesaplanması, Vekil Veri Analizi, Korelasyon Boyutunun doyuma ulaşması, Karşılıklı Bilgi Fonksiyonunun minimum değerde olması, Geçici En Yakın Komşulukların kurulması yöntemleri kullanılmıştır.

Doğrusal sistemlerde, sisteme ait bir değişkenin değerindeki değişim, sistemin cevabındaki değişimle orantılıdır. Doğrusal olmayan sistemlerde ise, sistem cevabındaki değişim ile sisteme ait parametrelerin ayrı ayrı değişimlerinin verdiği yanıt farklıysa, bu durumda sistem doğrusal değildir. Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi oldukça zordur. Kaotik sistemlerin tamamı doğrusal olmayan sistemlere örnektir (Sprott, 2003; zer, 2005).

Kaotik sistemlerin matematiksel ifadesi; sürekli sistemler için diferansiyel ve kesikli sistemler için fark denklemleriyle bulunur. Denklemlerin bilinmediği durumlarda ise deneysel verilerle bulunur. İlk durumda sistemin bir veya birden fazla değişkeni olabilir. Bu değişkenlerden herhangi biri ya da birkaçının ürettiği zaman serisine ait başlangıç koşulları biliniyorsa, sistemin gerçek çıkışından çok farklı sonuçlar gösterinceye kadar

ihmâl edilebilir bir hata payıyla ölçülen başlangıç koşulları belli bir süre boyunca kestirilebilir. Ancak genellikle doğadaki doğrusal olmayan dinamik sistemlerin denklemlerini tam olarak bilemeyiz. Bu durumda elimizde sistem dinamiklerini temsil eden bir değişkene ait (sıcaklık, basınç, deprem büyüklüğü ve radon anomalileri vs.) belirli gözlem aralıklarında kaydettiğimiz değerler olur (Fırat, 2006). Zaman serisinin analizini yaparak sistemin kaotik olup olmadığı hakkında analiz sonuçlarını değerlendirebiliriz. Bunun için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden 5. Bölüm’de detaylı bir şekilde bahsedildi.

Kaotik dinamiğin incelenmesinde kullanılabilecek yöntemler arasında; sistemin faz uzayının kurulması, Korelasyon Boyutunun hesabı, En Büyük Lyapunov üstellerinin hesaplanması gibi yöntemler sayılabilir. Korelasyon Boyutunu ve Lyapunov üstelini doğru olarak hesaplayabilmek çok sayıda veri ve çok hassas ölçümler gerektirdiği için kaotik analizde oldukça önemli bir yere sahiptir. Diğer kaotik analiz yöntemleri arasında, Güç Spektrumunun hesaplanması, Hurst Üstelinin hesaplanması, Karşılıklı Bilgi Fonksiyonundan minimum gömme boyutunun hesaplanması ve Geçici En Yakın Komşuluk Metodlarının da varlığından bahsedebiliriz. Dinamik sistemlerin faz uzaylarındaki yörüngeleri periyodik çekerlerle veya acayip çekerlerle ifade edilmektedir. Korelasyon Boyutu sistemin karmaşıklığı hakkında bilgi verirken, en büyük Lyapunov üsteli ise sistemin kaotik niteliği yani başlangıç koşullarına duyarlılığı hakkında bilgi vermektedir. Dinamik bir sistemdeki kaotik hareketin belirlenmesi için;

- Zaman serisinin düzensiz bir salınım göstermesi,
- Güç spektrumunun küçük frekanslarda geniş bantlı gürültü yapısına sahip olması,
- Lyapunov karakteristik üstellerinin en az bir tanesinin pozitif olması,
- Kaotik bir kümenin boyutunun fraktal olması,

gibi bazı kriterleri sağlayan dinamik sistem parametreleri için, sistemin kaotik özellik gösterdiği söylenebilir (Çoban, 2007).

3.5. Dinamik Sistem Davranışı ile Kaos Arasındaki İlişki

Dinamik sistemlerin çalışılması, zaman içerisinde değişim gösteren dinamik parametrelerin nasıl değiştiğinin incelenmesiyle başlamıştır. Dinamiklik kavramı zamanın evrimini irdeleyen temel bir yaklaşımdır. Dinamiksel süreçlerin analizi bir sistemin zaman içerisindeki davranışı hakkında bilgi vermelidir (Ruelle, 2000). Bu konudaki ilk çalışmaları

Isaac Newton 17. yüzyılda, bir fiziksel sistemin zaman içindeki durumu o sistemin kütle merkezinin konumu ve hızı tarafından belirlenebileceğini söyleyerek yapmıştır. Newton'a göre bir sistemin belirli bir referans noktasına göre başlangıç durumu (konumu ve hızı), sistemin gelecekte sahip olacağı durumun kesin olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Buna deterministik bakış açısı denilmektedir (Strogatz, 1994). Fakat başlangıç durumunda bir determinizm bulunmayabilir, yani başlangıçta var olan durum stokastik (olasılıklı) bir durumu da barındırabilir. Bu durumda sistemin gelecekteki durumu da belirli bir oranda stokastik olacaktır. Her şeyin bir saat hassaslığında çalıştığı bir evrende çok güçlü bir bilgisayar gerekli verileri alarak, bir sistemin evrimini çok düşük bir hata yüzdesi ile gözler önüne serilebilecektir. Asıl önemli nokta bu stokastik payın da deterministik yasalar ile ölçülebilir olduğudur. Başlangıç durumu sonsuz kesinlikte tespit edilemeyeceğinden sonuçlar daima olasılıklı bir sürecin uzantısı olacaktır. Bunun önemi, başlangıç durumuna hassas bağlı sistemlerin var olduğu ve başlangıç durumundaki çok küçük bir ölçüm hatasının, sonuçlar üzerinde çok büyük etkilerde bulunabileceğidir. Newton iki-cisim problemi olarak bilinen ve Dünya'nın Güneş etrafındaki hareketini hesaplayan problemi çözmüştür (Strogatz, 1994).

19. yy'ın sonunda gezegenlerin yörüngeleri konusunda yapılan çalışmalarla uzayda kütleye sahip iki ayrı gezegenin izleyeceği yörüngeler matematiksel hesaplar vasıtasıyla kesin olarak belirlenebileceği gösterilmiştir. Ancak üç gezegen olması durumunda, üç cisim problemi, gezegenlerin izlediği yörüngeler öylesine karmaşık ve beklenmediktir ki, bu sistemi yöneten denklemler çok iyi bilinmesine rağmen sistemin gelecekte alacağı bir konumun tespiti neredeyse imkânsız hale gelmektedir. 19. yüzyılda üç cisim problemini çözen Jules Henri Poincaré, iyi bilinen matematiksel sistemlerin, bilinmeyen ve tahmin edilemez fiziksel sonuçlarının var olabileceğini şöyle ifade etmiştir: “Başlangıç şartlarındaki küçücük bir hata son durumda muhteşem bir hataya neden olacaktır. Böyle bir durumda, olacağı öngörmek mümkün değildir”. Çalışmasında, gezegenlerin konumlarının bulunması yerine, Güneş sisteminin sonsuza kadar kararlı davranıp-davranamayacağını araştırmıştır (Strogatz, 1994).

II. Dünya Savaşı sonunda Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde hava tahminleri üzerine bilgisayar destekli araştırmalarda bulunan E. Lorenz, 1960'ta, havadaki değişimleri en basit şekilde ifade ederek bu konudaki ilk sayısal çalışmayı yapmıştır (Lorenz, 1960). Lorenz çok düşük boyutta (low-dimensional) diferansiyel sistemlerin kararsız yörüngeler izleyebileceğine dikkat çekmiştir.

- i. Sistem mutlaka doğrusal olmayan süreçlerin uzantısıdır, (doğrusal sistemler kaotik süreçleri meydana getirmez)
- ii. Olasılıklı yapılardan çok deterministik süreçler, sistemin gelecekteki durumunu belirler.
- iii. Sistem başlangıç koşullarına hassas bağlıdır.
- iv. Sistemin izlediği yörünge birçok kararsız noktadan geçmektedir, sistemde genel bir düzensizlik mevcuttur.

Kaotik süreçlerde bu sebeplerden dolayı uzun-dönem tahmin mümkün değildir (Ditto ve Munakata, 1995).

Doğası gereği deterministik kaos içeren sistemler klasik matematiksel yöntemlerle anlaşılamamaktadır. Bu yapıların doğasını anlamak için garip çekerler ve fraktal boyutlar gibi analizler sistemin doğasını anlamak için kullanılır. Kaotik sistemlerin ürettiği zaman serileri dışarıdan bakıldığı zaman neredeyse gürültüden ibarettir. Çünkü bu tip serileri üreten gerçek sistemde bilgi hızla yok olmaktadır. Yani, yan yana duran iki verinin istatistiksel davranışı sanki birbiri ile ilişkisizmiş gibi görünür. Oysa sistemi yöneten ve zamandan bağımsız bir faz uzayı tam bir deterministik kural izleyebilmektedir. Ancak sistem kaotik olduğunda bu faz uzayının genel görünümü ve elde edilen zaman serisindeki yansıması karmaşık ve içinden çıkılmaz bir hâl alır. Bu durumda serinin belirli bir parçasının değil tümünün bazı evrensel niceliklere sahip olduğu görülmektedir. Başlangıç durumuna hassas bağlılığın ölçütü olan yörüngelerin üstel olarak ayrılması ve bunun yarattığı geometrik etki olarak fraktal yapı ön plana çıkar.

Bütün bu bilgiler ışığında, kaosu başlangıç şartları ve parametrelerine oldukça bağlı, periyodik olmayan, yakınsamayan ve sınırlı olan, doğrusal olmayan dinamik sistemlerde bulunan, deterministik, rastgele benzeri bir süreç olarak tanımlayabiliriz (Schuster, 1988; Koçak, 1998). Kaosun doğası görünürde rastgele ve tahmin edilemezdir. Ayrıca çoğu kez düzen içinde düzensizlik ya da düzensizlik içinde düzen olarak da tanımlanmaktadır. Matematiksel olarak, basit deterministik dinamik bir sistemin rastgeleliğidir ve kaotik sistem rastgelelik kaynağı olarak düşünülebilir (Strogatz, 1994; Sprott, 2003; Das, 2009).

Deprem davranışları genellikle doğrusal olmayan fiziğin konularıdır. Literatürde bilinen deprem oluşumunu etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar, sismik dalga hızındaki değişimler, jeomanyetik etki, fay kırıkları, yer altı suyu akışı ve radon gazındaki değişimler gibi parametrelere bağlıdır (Rikitake, 1976; Fleischer ve Mogro-Campero, 1978; Fleischer ve Mogro-Campero, 1981; King, 1986; Virk ve Singh, 1993; Barman, 2014). Deprem

öncesi ve sonrası çeşitli çevresel ve fiziksel parametrelerde görülen anomalilerle ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Friedmann vd., 1988; Miklavčič vd., 2008; Külahcı vd., 2009; Kumar, 2013). Deprem kestirim çalışmalarında kullanılan en önemli parametre olarak görülen deprem habercisi toprak radon gazı ölçümleridir (Friedmann 1988; Planinić, 2004; Crockett vd., 2006; Külahcı, 2009; Vizzini, 2012). Literatürde yapılan çeşitli çalışmalara göre, sismik olaylardan önce veya sonra ^{222}Rn konsantrasyonunda değişiklikler gözlenmektedir (Friedmann vd., 1988; Miklavčič vd., 2008; Külahcı vd., 2009; Kumar, 2013). Farklı çalışmalarda aktif volkanlar boyunca deprem mekanizmasını anlamak için ^{222}Rn konsantrasyonunun değişimini anlamak önemlidir (Ulomov ve Mavashev, 1967; Crisanti, 1992; Igarashi ve Saeki, 1995; King, 1986). Yapılan bir çok çalışmada, kaostun determinizm içeren, zamanla değişen, doğrusal olmayan, karmaşık fakat belirli bir düzene göre hareket eden bir yapıya sahip olduğu gösterilmiştir (Tiwari, 2003; Planinić, 2004; Fırat, 2006). Kaotik zaman serileri analizi son zamanlarda doğrusal olmayan dinamik sistemlerin davranışlarının incelenmesinde ve dinamik değişkenler hakkında bilgi edinilmesi için en fazla kullanılan metodlardandır (Tamaz, 2003; Planinić, 2004; Telesca, 2005; Guzmán-Vargas vd., 2009).

Deprem yapısı ve kaos arasındaki ilişkileri açıklayan araştırmalarda deprem verileri bir zaman serisi oluşturacak şekilde alınmış ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri uygulanmıştır (Montagne vd., 2004; Tiwari vd., 2004; Lakshmi vd., 2009; Jinkui vd., 2009; Iliopoulos ve Pavlas, 2010). Gerçekte, sismik hareketler, rastgele davranışlar gösterdiğinden bu bölgelerdeki veriler analiz edildiğinde sistem dinamiğinin rastgelelik değil de, kaotik yapıya sahip olduğu görülmüştür. Diğer taraftan deprem habercisi olarak bilinen ^{222}Rn ile kaos arasındaki ilişkileri inceleyen araştırmalarda ^{222}Rn 'nın doğrusal olmayan bir yapıda olduğu gösterilmiştir (Cuculeanu, 1996; Albarello, 2003; Planinić, 2004; Das, 2009).

Depremler pek çok harici parametreden etkilenmektedir. Yapılan çalışmalar bu etkileşmenin doğrusal olmayan bir şekilde değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle ihmâl edilen pek çok parametreyi hesaba katan ve doğrusal olmayan ilişkiyi açıklayabilen kaos analiz yöntemleri deprem ve radon arasındaki ilişkiyi açıklamak için kullanılabilir (Giannakopoulos vd., 2002).

Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, Kaotik Zaman Serileri Analizi başlığı altında; Lyapunov Üstelleri, Hurst Üsteli, Güç Spektrumu Analizi, Korelasyon Boyutu, Geçici En

Yakın Komşular Metodu, Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu gibi analiz yöntemlerin teori ve uygulamalarından bahsedilmiştir.

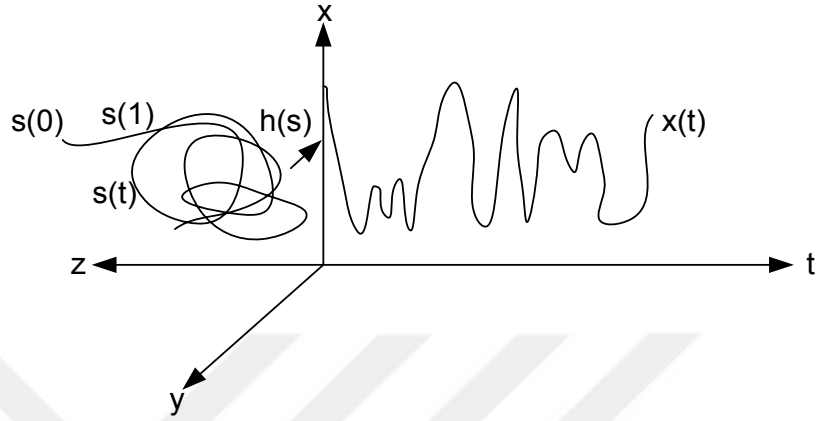
3.6. Kaotik Zaman Serisi Analizi

Kaotik zaman serisi analizi yapılırken, kaotik çekerin sadece nitel özellikleri (faz uzayının yapısı, çeker noktalarının kararlılık durumunun belirlenmesi gibi) sistemin genel davranışı hakkında kesin bilgiler vermez. Bu yüzden, sistemleri tanımlayacak değişmez nitelikteki evrensel oranlar ile nicel analizlerin yapılmasına da ihtiyaç duyulur (Hilborn, 2000). Nicel tanımlayıcılar gürültü davranışını kaotik davranıştan ayırmaya aynı zamanda sistemin dinamiklerini modellemek için kaç tane değişken gerekliliğini belirlememize yardımcı olur. Bu niceliklerin birbirleri ile olan matematiksel ilişkileri kaotik sistemlerin evrensel birtakım özelliklerinin anlaşılmasında yararlı olabileceği çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir (Hilborn, 2000; Yılmaz, 2006).

Kaotik zaman serilerini doğrusal olmayan bir yapıya sahip oldukları belirtilmiştir. Buna göre kaotik bir veriyi modelleyebilmek için doğrusal olmayan modeller tercih edilmelidir. Doğal olarak meydana gelen olayları (bir ya da birden fazla yönü zamanla değişen dinamik sistemler için), sürekli zamanlı veya ayrık zamanlı olmak üzere ölçüm tekniği açısından ikiye ayırabiliriz. Ayrık zaman aralıklarında alınan ölçümler (ayrık zaman basamaklarında ölçülmüş olup, dinamik sisteme tekrarlayıcı bağıntılar ile modellenmişse), sürekli zamanlı alınan ölçümlerin bir alt örneklem grubundan elde edilebilir. Bu yüzden ayrık zamanlı değişim gösteren dinamikler fark denklemleri ya da tekrarlama yöntemleriyle çözülebilir. Tekrarlama yöntemi, bir işlemin üst üste yinelenmesiyle elde edilen matematiksel bir metoddur. Sürekli zamanlı (zaman sürekli ölçülmüş olup, dinamik sistem diferansiyel eşitlikler ile modellenmişse) değişimlerde ise türev denklemlerinin çözümü kullanılmaktadır. Ancak zaman içinde değişim gösteren bir değişkenden elde edilen zaman serilerinde, ne farksal ne de türevsel denklemler yoktur. Bu durumda, ölçülen sinyale çevresel şartlardan kaynaklanan düzensizlik/gürültü hâkim olur. Bu gürültü bastırılarak kaotik zaman serisi analiz yöntemleri uygulanmalıdır.

Doğrusal olmayan dinamik sistemler ile ilgili, Takens (1981) teoremine göre, bir sistem çok boyutlu olsa bile sadece bir değişkenin ürettiği zaman dizisi kullanılarak sistemin davranışı modellenenebilir. Böyle bir sisteme ait faz uzayının geometrik ve topolojik yapısını gösteren kaotik çeker, tek bir değişkenin zaman dizisinin belli bir zaman gecikmesi ile

örneklenmesi ile oluşturulabilir. Kaotik sistemlerde, sistemin zaman içindeki değişiminin tam olarak belirlenmesi sistem parametrelerinin başlangıç değerlerinin sonsuz hassasiyetle bilinmesi gerekmektedir (Baker, 1990; Williams, 1997; Iokibe ve Fujimoto, 2001; Yang ve Duan, 2003).



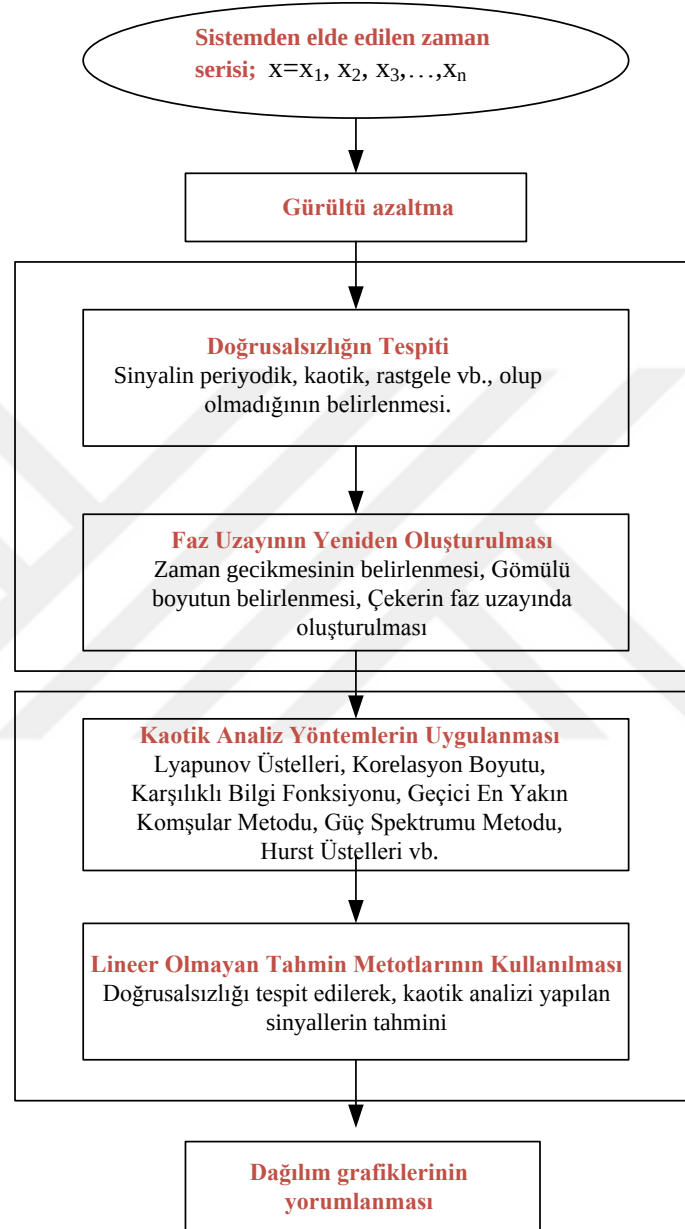
Şekil 3.1. Üç boyutlu faz uzayında bir $s(t)$ yörüngesi h fonksiyonu ile $x(t)$ çıktısını üretmektedir. $x(t)=h(s(t))$ (Urbach, 2000).

Şekil 3.1’de üç boyutlu faz uzayında bir $s(t)$ yörüngesi h fonksiyonu ile $x(t)$ çıktısı $x(t)=h(s(t))$ gösterilmektedir (Urbach, 2000). Bu, kaosu varlığı durumunda, faz uzayının varlığından habersiz bir gözlemci seriyi, rastsal olarak algılayabileceğini göstermektedir.

Dinamik bir sistemden elde edilen böyle sinyaller incelenirken; (a) Sistem dinamikleri tam olarak bilinmelidir, (b) elimizdeki sistemden daha önce elde edilen sinyaller var ise, iki sinyalin birbirleri ile olan ilişkileri incelenebilir, (c) ya da elimizde sadece belirli zaman aralığını kapsayan sinyaller vardır ve bunlara göre analiz yapılabilir. Deterministik kaos içerdiği düşünülen zaman serilerini incelerken;

- i. İncelenen dinamik sistem, geçmişte bilinmeyen şartlarda oluşmuş ve dinamik sistemin başlangıç şartlarının tanımlanmış ise, artık sistemin davranışı değişmez bir yörüngede izlenecektir,
- ii. Dinamik sisteme ait hareket denklemlerinin bilinmediği durumların mevcut olduğu şartlarda Urbach (2000),
- iii. Dinamik sisteme ait gerçek faz uzayı ve yörüngeleri izlenememektedir,
- iv. Dinamik sistemden elde edilen tek bilgi, zaman dizisi ölçümünün kendisidir.

Ayrıca, dinamik sistemler, ait oldukları zaman serilerinin dizi oluşturma üreteçleri olarak da görülebilir. Bu durumda deterministik sistemleri tanıtan denklem takımları, sistem durumunun bir konumundan diğerine geçişini ifade etmektedir. (Sprott, 2003).



Şekil 3.2. Kaotik zaman serisinin işlem adımlarını gösteren akış şeması.

Şekil 3.2’de, doğrusal olmayan zaman dizilerinin analizi için bu çalışmada yapılan işlem adımları bir akış şeması halinde verilmiştir. Doğrusal olmayan analiz yöntemleri uygulanmaya başlanırken sinyalin faz uzayında yeniden kurulması gerekmektedir. Faz uzayında dinamik sisteme ait denklemlerin çözülmesi ile elde edilen bir nokta, kapalı

bir eğri gibi çekerin boyutu ya da Lyapunov üstellerinin sonuçlarına göre sistemin doğrusal olmama durumu hakkında bilgi alınabilir. Bu işlem adımlarından, doğrusal sinyal analizi işlem adımı zorunlu değildir (Yılmaz, 2006). Ancak yapılan doğrusallık testleri, verinin periyodik, rastgele ya da gürültü benzeri bir işaret olup olmadığına karar vermemize yardımcı olur. Buradaki her bir işlem adımı diğerini destekler nitelikte olmakla beraber yapılması zorunlu değildir.

Kaotik zaman serileri analizlerinin yapılması, bir dinamik sisteme ait değişkenlerin hangi parametrelere göre nasıl değiştiğini belirlemek için kullanılır. Sistemin bir sonraki adımında nasıl davrandığını belirlememize yardımcı olduğu için oldukça önemlidir (Reiss, 2001).

3.6.1. Faz Uzayının Yeniden Oluşturulması

Dinamik bir sistem eksenlerde bulunan bağımsız değişkenler kullanılarak referans koordinatlardaki noktaların oluşturdukları yörüngeler ile temsil edilebilirler. Bir değişkenden belirli periyotlarla oluşturulan zaman serileri diğer yörüngelerin koordinatları hakkında oldukça önemli bilgiler içermektedir. Sisteme ait her bir dinamik değişken yörüngeler tarafından temsil edilebilir. Bu uzay faz uzayı olarak adlandırılır. Verilen bir dinamik sistem için faz uzayı tek bağımsız değişkene göre kaydedilen $x(t)$ verileri kullanılarak oluşturulur (Tiwari, 2003; Lakshmi, 2009).

Doğrusal olmayan analize başlarken, ilk olarak düzensiz bir sistemden belirli zaman aralıklarında kayıt edilen deneysel ölçüm verilerinin tek boyutlu zaman serisi ile faz uzaylarını yeniden yapılandırılmalıdır. $x(n) = x(t_0 + n\tau_s)$, ifadesine göre, skaler ölçümlerden edindiğimiz bilgilere göre dinamik sisteme ait faz uzayını yeniden oluşturmak için türev koordinatları ile zaman gecikmeli koordinatlar metodu kullanılır. $x(n)$, doğrusal olmayan dinamik sisteme ait değişen parametreyi göstermektedir (bu çalışmada ^{222}Rn gazı konsantrasyonunun değişimi olarak alınmıştır). Burada t_0 başlangıç zamanı, τ_s ise örnekleme periyodudur. Dinamik sistemden elde edilen zaman serilerine ait ölçülmüş değişkenlerin zamana göre türevi bulunursa buna ait olan durum değişkenleri belirlenebilir. Dinamik sistemden alınan zaman dizileri her biri τ_s aralığında olduğundan; $\bar{x}(n)$, Denklem 3.1'deki gibi hesaplanabilir.

$$\overline{x}(n) = \frac{dx(t)}{dt} \Big|_{t=t_0+n\tau_s} \approx \frac{x(t_0 + (n+1)\tau_s) - x(t_0 + n\tau_s)}{\tau_s} \quad (3.1)$$

Zaman eksenini boyunca dinamik sisteme ait değişken izleniyorsa, gerçek sinyalin bir veya daha çok zaman gecikmeli kopyaları kullanılabilir. Elde edilen bu değişkenlerden incelenmek istenen sistemin mevcut dinamikleri hesaplanabilir (Takens, 1981). d boyutlu bir zaman serisinden (d , tamsayı olmak üzere) bir çekerin elemanı ise çekere ait topolojik özellikler (çekerin boyutu, Lyapunov üstelleri, vs), m boyutlu faz uzayı vektörleri ile ($m \geq 2d + 1$) yeniden yapılandırılan sisteme eşdeğerdir. Burada, d (çekere ait olan boyut) boyutlu uzayda oluşturulan sinyal ile birlikte zaman gecikmeli sinyalinin her ikisini de aynı uzayda görebilmek için gömülü boyut ($m \geq 2d + 1$) şeklinde hesaplanmıştır. Takens (1981) teoremine göre gömülü boyutun ($m \geq 2d + 1$) şeklinde seçilmesi yörüngelerin kesişmesini önleyerek periyodik olmayan bilgi akışını sağlamasından kaynaklanmaktadır. Sinyale ait çeker, Takens teoremi kullanılarak sinyalin zaman gecikmeli eşdeğerleri ile m boyutlu faz uzayı, Denklem 3.2’de verildiği gibi oluşturulur (Takens, 1981; Yılmaz, 2006).

$$\overrightarrow{y}_i = (x(i \Delta t), x(i \Delta t + \tau), x(i \Delta t + 2\tau), \dots, x(i \Delta t + (m-1) \tau)) \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de m gömülü boyut değerini, τ ise gecikme zamanını göstermektedir. Böylelikle düzensiz bir sistemin zamanla değişimi sistemden elde edilen tek bir durum değişkeni ve onun ardışık türevleri ile yeniden yapılandırılan m boyutlu yeni bir faz uzayında temsil edilmiş olur.

3.6.2. Gömülü Boyutun Belirlenmesi

Gömülü boyut, kaydedilen tek boyutlu zaman serisinden çizilecek çekerin doğru bir şekilde görünmesi için kaç boyutlu faz uzayı oluşturmamız gerektiğini öğrenmemize yardımcı olur. Taken (1981), ölçüm değişkenlerinin düzleşmesini (smoothing) sağlayan yeterli gömülü boyut oluşturan zaman-gecikmeli değişkenler olduğunu söylemiştir ve diğer bütün değişkenlerin çiftler halinde olup zaman gecikme sayısının en az $2d_f + 1$ olacağını ifade etmiştir (d_f seçim kriteri olmak üzere). Ayrıca 1936 yılında Whitney, keyfi bir d

boyutlu eğrisel uzay, $2d + 1$ boyutlu kartezyen uzaya R^{2d+1} kendi ile kesişmeden dönüştürülebileceğini göstermiştir. Uzayın kendisi ile kesişmemesi, teklik ilkesini sağlaması yönünden oldukça önemlidir. d boyutlu bir geometrik cisim için, cismin tekrar d boyutlu bir uzayda tanımlanması durumunda kesişim kümesi yine d boyutlu olur. Ancak $d + 1$ boyut içerisinde tanımlayacak olursak, kesişim kümesi $d - 1$ olan bir alt uzayda devam eder. Eğer $d + 2$ boyut seçilirse kesişimler boyutu $d - 2$ olan bir alt uzayda noktalar şeklinde görünür. Bu durumda, boyut $2d + 1$ şeklinde alınırsa, tersinir dönüşüm ile kesişme olmaması kesindir (Whitney, 1936; Sprott, 2003). Taken'nin gömülü boyut teoremi Sauer (1991) tarafından geliştirilmiştir. Sauer'e göre boyutun yalnızca $2d_f$ 'i aşmasının gömülü boyutu bulmak için yeterlidir (Sprott, 2003). Bir çekerin boyutunun belirlenmesi gibi birden çok amaca yönelik kullanılabilmesi için, sonucu olmayan sıfır ölçümlerini aşarsa zaman adımlarının sayısını bulmak için yalnızca d_f 'in aşılmasına ihtiyaç duyulur. d_f biliniyorsa hesaplama yapılabilir. Gömülü boyutu bulmak için kullanılan bu metodlarda, optimum gömülü boyutun bulunmasının yanı sıra verilerden elde edilen Δt ile zaman gecikmesi de bulunabilir (Taken, 1981; Eckmann ve Ruelle, 1985; Sauer, 1991; Sprott, 2003). Ayrıca, sistem için hesaplanacak Lyapunov üstellerinin sayısını da gömülü boyut sayısı (m) belirler. Yani m boyutlu bir sistemin m tane Lyapunov üsteli olur. Bu yüzden gömülü boyutunun doğru seçilmesi sistemin kaotik analizinin yapılması için oldukça önemlidir.

3.6.3. τ (Zaman Gecikmesi)'nin Seçimi

τ (zaman gecikmesi); faz uzayının yeniden oluşturulması için seçilecek herhangi bir zaman aralığını gösterir (Yılmaz, 2006). Faz uzayı yeniden yapılandırılırken τ 'nın doğru seçimi oldukça önemlidir. Zaman serisinden tahmin edilen τ parametresi çok küçük seçilirse $x(t)$ ve $x(t+\tau)$ birbirine çok yaklaşır ve neredeyse birbirine eşit olur. Bu durumda yeniden kurulan faz uzayında çizilmek istenen çeker, faz uzayı diyagonalı üzerinde sıkışacaktır. τ parametresi çok büyük seçildiğinde ise $x(t)$ ve $x(t+\tau)$ koordinatları arasındaki fark çok büyük olacağından çekerin faz uzayı diyagonalı üzerinde rastgele dağılmış olarak görüneceğinden, çekerin yapısı bozulacaktır veya çeker ortadan kalkacaktır. τ gecikme zamanını bulmak için karşılıklı bilgi fonksiyonu metodu kullanılmıştır (Takens, 1985; Sprott, 2003).

3.6.4. Çekerin (Attractor) Boyutunun Bulunması

Çekerin boyutu, çekerin ait olduğu sistemin kaotik olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Çeker boyutunun hesaplanmasındaki amaç çekerin ve dolayısıyla kurulan sistemin sahip olduğu karmaşıklığın sayısal bir değerle ifade edilmesi ve çekerin geometrik dinamik davranışının ölçülmesidir (Koçak, 1996). Kaotik olmayan bir çeker tam sayı bir boyut değerine sahipken, kaotik bir çeker tam sayı olmayan ve fraktal olarak adlandırılan bir boyut değerine sahip olur (Grassberger ve Procaccia, 1983).

Belirli bir süre gözlemlenerek veya deney yapılarak veri toplanan bir sistemin, bu süre içerisindeki davranışlarının kaotik olup olmadığını belirlemek için kapasite, bilgi, korelasyon vb. boyutlar kullanılmaktadır. Bu boyutlardan özellikle Korelasyon Boyutunun değeri, kolay hesaplanabildiğinden dolayı tercih edilmektedir (Grassberger ve Procaccia, 1983).

Saydığımız bu yöntemlerin bazıları sayısal sonuç içermektedir. Ancak diğer analiz yöntemlerinde, bir takım kararlar kişisel yorum farklarına sebep olabileceği için sayısal yöntemlerin kullanılması tercih edilmiştir. Bu nedenle Lyapunov üstelleri, fraktal boyut analizi, karşılıklı bilgi fonksiyonu ve geçici en yakın komşular metodları, çalışmanın sayısal geçerliliği açısından oldukça önemli olduğu için detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.7. Lyapunov Üsteli, λ

Doğrusal olmayan dinamik sistemlere ait diferansiyel denklem takımlarının kararlılık durumlarının belirlenmesinde sabit (değişmez) üstellerin kullanılabileceğini Stockholm Üniversitesindeki Rus matematikçi Sonya Kovalevskaya 1889 yılında göstermiştir. Daha sonra Alexander Mikhailovich Lyapunov tarafından tam olarak 1875-1918 yılları arasında 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 şartlarına olan bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Kaotik bir sistem birbirine çok yakın komşu iki başlangıç noktasından başlatıldığında yörüngelerin gittikçe birbirinden uzaklaşması veya yaklaşması ile kaos

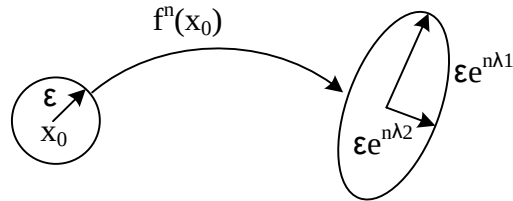
analizi yapılabilir. Lyapunov üstelleri komşu yörüngeler arasındaki bu mesafeyi ölçen matematiksel bir yöntemdir. Lyapunov üstelleri, doğrusal sistemlerde kullanılan özdeğerlere benzetilir (Strogatz, 1994; Alligood, 1997; Özkaynak, 2007). Lyapunov üstellerinin önemli bir diğer karakteristiği de analiz edilecek sistemin denklemleri açık şekilde bilinmezse veya denklemlerin çözümleri yapılmazsa 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 (Wolf, 1985). Ayrıca Lyapunov üstelleri kullanılarak sistemin kararlılığı da incelenebilir.

Lyapunov üstelleri bir çeker üzerindeki çok küçük üstel artış ya da azalışların pertürbasyonu olarak tanımlanabilir. Bir sistemdeki kaotik davranışı tanımlamak için en büyük Lyapunov üstelinin pozitif olduğunun gösterilmesi en basit ancak en güvenilir kaos analiz yöntemini oluşturur. Lyapunov üstelinin hesaplama mantığı temelde, birbirine oldukça yakın iki başlangıç noktası ile başlayan yörüngelerin davranışının çok farklı noktalara gitmesi ile oluşan iki yörünge arasındaki farkın bir derecesidir. Lyapunov üstelinin işareti de sistem dinamikleri hakkında bilgi verir. Dinamik sistem, sahip olduğu derece kadar Lyapunov üstüne sahiptir. Eğer sistemin tüm Lyapunov üstelleri negatif ise, yörüngeler her boyuttan birbirine yaklaşacaklardır. Yani sistem kaotik davranış göstermeyecektir. Fakat üstlerden en az biri pozitif ise yörüngelerde pozitif olan üstün yönünde gittikçe birbirinden uzaklaşacaktır (Sano ve Sawada, 1985; Strogatz, 1994; Sprott, 2003). Üstel değeri pozitif olan bu sistem, kaotik davranış gösterir. Bu durum sistemin başlangıç şartlarına hassas bağımlılık gösterdiğinin de bir sonucudur.

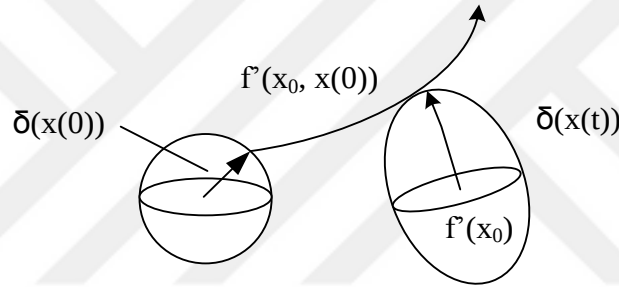
Bir sistemin kaotik olup olmadığını belirleyebilmek ve yorumlayabilmek için daha önce de ifade edildiği gibi sistemin en büyük Lyapunov üsteli değerinin pozitif olması gereklidir. Ancak dinamik sistemin davranışının kaotik olduğunu tek başına anlamamıza yeterli olmayabilir. Bununla beraber, çekerin en az bir pozitif Lyapunov üstelinin bulunması sistemin kaotik olduğunun en büyük göstergesidir (Fırat, 2006). n boyutlu bir sistem için n adet Lyapunov üsteli olmakla birlikte, her biri faz uzayının ana doğrultusundaki üstel ayrılmayı ölçmektedir. Ancak bunlardan en önemlisi en büyük üstelin pozitif bir değer almasıdır, dinamik sistemlerin Lyapunov üstellerinin hesabı farklı çalışmalarda gösterilmiştir (Wolf, 1985; Barnett, 1998).

Eckmann ve Ruelle (1985)'e göre sistemdeki en büyük Lyapunov üsteli λ_1 olmak üzere, başlangıç koşullarına hassas bağımlılığın bir ölçüsünü göstermekle birlikte faz uzayındaki

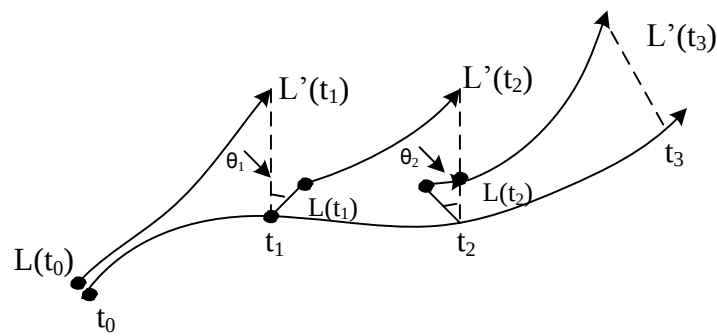
komşu eğrilerin birbirinden ayrılmasının derecelerinin ortalamasını göstermektedir. Deneysel zaman serilerinde sistemi ifade eden fark ya da farksal eşitliklerin bilinmemesi sebebiyle Lyapunov üstelleri, faz uzayı içindeki eğrilerin takibi yoluyla hesaplanır (Abarbanel, 1993; Kantz ve Schreiber, 1997).



Şekil 3.3. Sonsuz küçük bir alanın n iterasyon sonucunda uzayda aldığı görüntü.



Şekil 3.4. Faz uzayında yörüngeleri tarafından sınırlanan hacmin gelecekte aldığı durum (Ubrach, 2000).



Şekil 3.5. Wolf algoritmasında yakın yörüngelerin seçilmesi (Urbach, 2000).

İki yörünge arasında elde edilen zaman serisinin uzay-zaman gösterimi Şekil 3.3 ile gösterildiği gibidir. Şekil 3.5'te sonsuz küçük bir alanın n iterasyon sonucunda uzayda aldığı şeklin iki farklı üsteli birbirine dik olan ana eksenlerdeki ayrılmanın düzeyini

ölçmektedir. Şekil 3.4'te faz uzayında yörüngeleri tarafından sınırlanan hacmin gelecekte aldığı durum gösterilmektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Lyapunov üsteli, birbirine çok yakın iki başlangıç noktasından başlayan hareketin zaman içinde birbirine yakınsamalarını ve ıraksamalarını gösteren üstel bir fonksiyonu temsil eder. Abarbanel (1993) Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5 ile veri sağlanabileceğinden bahsetmiştir.

En büyük Lyapunov üstelinin bulunması için geliştirilen birçok algoritma vardır. Bu çalışmada, en büyük Lyapunov üsteli Sano ve Sawada tarafından geliştirilen algoritma ile hesaplanmıştır (Sano ve Sawada, 1985). Sano ve Sawada'nın algoritması en büyük Lyapunov üstelinin bulunmasına dayanır. Küçük ve gürültüye sahip veri kümeleri için kolayca uygulanabilir. Bu algoritmada ilk olarak zaman serisi şeklinde elde edilen veri, faz uzayında yeniden oluşturulur. Eğer bir çeker üzerindeki tek bir noktanın hareketi kaotik davranış olarak tanımlanırsa, başlangıç şartlarındaki çok küçük bir değişimin aşırı hassas sonuçlar doğurabileceğini ifade etmiştik (Sano ve Sawada, 1985; Ott vd., 1990; Ott vd., 1994; Strogatz, 1994). Başlangıç şartlarında görülen bu durum, kaotik sistemin başlangıç şartlarına hassas bağımlı olduğunun bir göstergesidir. λ üstel değeri, dinamik sistem davranışının nitel ve nicel karakterini ölçerek faz uzayındaki üstel yörüngeler arasındaki bağlantıyı kurar (Wolf, 1985).

Lyapunov üstelinin işareti sistemin dinamiği ile ilgili yorum yapmamıza yardımcı olur. Dinamik bir sistemin davranışını incelerken dikkat edilmesi gereken en önemli husus Lyapunov üstelinin işaretidir. Bir boyutlu bir harita için sistemin sahip olduğu tek Lyapunov üstelinin değeri ile sistem analiz edilmektedir. Üstelin değeri pozitif olduğu durumda kaos (sistemin tahmin edilemez davranış) gözlenirken, sıfır sonucu için marjinal kararlı bir yörünge ve negatif değer için ise periyodik bir yörünge ortaya çıkmaktadır. Üç boyutlu sürekli zamanlı yayımlı bir dinamik sistem için ise üstellerin işaretlerine bakılarak, sistemin sahip olduğu üstellerle sisteme ait çekerler tanımlanabilmektedir (Wolf vd., 1985, Özkaynak, 2007). Lyapunov üsteli, bir sistemin kaotik olmayan durumunu kaotik olan durumdan ayırmak için kullanılan güvenilir bir yöntem olarak bilinir (Eckmann, 1985; Frazier ve Kockelman, 2004). Ayrıca Lyapunov üstelinin değeri, sistem dinamikleri hakkında bilgi verir. Eğer en büyük Lyapunov üstelinin değeri $\lambda_{\max} > 0$ olursa, dinamik sistemden alınan işaretlerin kaotik olduğu söylenebilir. Ancak $\lambda_{\max} \leq 0$ değerini alıyorsa deterministik bir sistem değildir. Bir zaman serisinden elde edilen verilerin Lyapunov üstellerinin hesaplanması için geliştirilen ilk algoritmalar, Wolf vd. (1985) ile Sano ve Sawada (1985)'in çalışmalarıdır. Bu algoritmalar, zaman gecikme koordinatları

yaklaşımı metodunu kullanarak, zaman serisinin faz uzayındaki çekerini üretirler. Wolf (1985) metodu Öklid farklarını kullanarak En Büyük Lyapunov üstelinin hesaplanması algoritmasına dayanır. Daha sonra bu metod, Sano ve Sawada (1985) tarafından kolaylaştırılmıştır. Bu metotta ortalama eksponansiyel genişleme komşu eğrileri arasındaki mesafe ile ölçülür (Sano ve Sawada, 1985; Sato vd., 1987). Sano ve Sawada (1985) algoritmasında Lyapunov üsteli tanımlanırken ilk adım faz uzayını bir akış menziline dönüştürmektir, Lyapunov üstelini tanımlamak için başlangıç şartı Denklem 3.3'deki gibi olmalıdır,

$$\dot{x} = p(x) \quad (3.3)$$

Bu akışın yanı sıra tanımlanan yörünge $x(t)$ şeklinde ve küçük sapmalar $\delta(x)$ ile gösterilmektedir. Birbirine yakın eğri üzerinde yer alan iki nokta (x_1 ve x_2) arasında, ilk başta $\delta x(0)$ kadar çok küçük bir fark vardır. t kadarlık bir zaman gecikmesi sonucunda bu noktalar birbirlerinden uzaklaşırlar ve arasındaki $\delta x(t)$ olur.

Daha sonra matris türevleri, $L_{ij} = \frac{\partial p_i}{\partial x_j}$ akışın doğasını değerlendirmek için Denklem 3.4 ile hesaplanır:

$$\delta \dot{x} = L(x(t))\delta x \quad (3.4)$$

Bundan dolayı dinamik sistemdeki bütün başlangıç yörüngeleri ve başlangıç değerlerinin en büyük Lyapunov üsteli Denklem 3.5 ile hesaplanır (Eckhardt ve Yao, 1993).

$$\lambda_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log \frac{\|\delta x(t)\|}{\|\delta x(0)\|} \quad (3.5)$$

En büyük Lyapunov üsteli hesabı için, ana eksen boyunca uzun dönem tahmin yöntemi için Wolf metodu kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır (Wolf vd., 1985). Ancak, daha sonra Wolf'un metodu Sano ve Sawada (1985) tarafından Lyapunov spektrumunu

hesaplamak için geliştirilmiştir. Bu yaklaşım Denklem 3.5 ile sunuldu. Ayrıca doğrusal operator, A^t ise Denklem 3.6 ile elde edilir,

$$\delta x(t) = A^t \delta x(0) \quad (3.6)$$

Eğer verilen bir zaman serisinden elde edilen ayrık zaman adımlarını Δt , göz önünde bulunduracak olursak; $x_j = x(t_0 + (j-1)\Delta t)$, k -boyutlu bir elips üzerindeki yerdeğiştirme vektörü, y^i şeklinde tanımlanabilir. Tanımlanan yerdeğiştirme vektörünün z^i tarafından verilen zaman adımı $\tau = m\Delta t$, ile hesaplanır. Bu vektörlerin nasıl üretildiğine dair detaylı hesaplamaları Sano ve Sawada (1985) tarafından yapılmıştır. Bu metotta ellipsoid şeklindeki yörüngenin değerlendirilmesi için z^i Denklem 3.7 ile elde edilir;

$$z^i = A_j y^i \quad (3.7)$$

A_j matrisi, A^t haritasının yaklaşık bir görüntüsü olmak üzere, Denklem (3.7) ile elde edilir. Burada, en büyük Lyapunov üsteli, en küçük kareler metodunu kullanılarak hesaplanır. A_j matrisinin bütün elemanlarının gösterilmesi ile z^i ve $A_j y^i$ arasındaki standart sapmaların karelerinin ortalamaları hesaplanarak elde edilir (Sano and Sawada, 1985). En büyük Lyapunov üsteli Denklem 3.8 ile hesaplanır;

$$\lambda_t = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\tau} \sum_{j=1}^n \|A_j e_i^j\| \quad (3.8)$$

Burada n veri noktalarının sayısını gösterir, e ise ortonormal tabanlı vektörler olmak üzere, Gram-Schmidt tarafından önerilen yöntem kullanılarak renormalize edilir (Sano ve Sawada, 1985). Bu algoritmanın temeli de Sano ve Sawada tarafından sunulan yöntemeye dayanır (Sato vd., 1987). Bu metod ile elde edilen eğrinin doğrusal kısmının eğimi en büyük Lyapunov üstelini verir (Sano ve Sawada, 1985).

3.8. Vekil Veri Analizi (VVA)

Doğrusal olmayan dinamik sisteme ait değişkenlerin doğrusal olmayan davranışları izlenirken zaman dizisini incelemek için yeniden oluşturulan faz uzayında çekerin davranışına göre sistemin parametrelerinin aldığı değerlere bakılır. Oluşturulan çeker üzerinde ilinti boyutu ve Lyapunov üstelleri hesabı yapılır. Elde edilen değerlerin doğruluğundan emin olmak için Vekil Veri Analizi (VVA) yöntemi kullanılır. VVA metodu, fiziksel bir sistemin doğrusal olmama durumunu tespit etmek için öncelikli kullanılan yöntemlerdendir (Theiler, 1992; Sprott, 2003).

VVA metodu, bir kaotik sistemde düşük boyutlu dinamik mekanizmaların doğrusal olmayan özelliğinin belirlenmesinde gerekli şartlardan biridir. Basit bir kaotik sistem için, rastgele olmayan bir zaman serisinin üretilmesi oldukça önemlidir. Bu zaman dizilerindeki doğrusallığını belirlemek için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. En fazla kullanılan metod VVA metodudur, bu metod zaman serisinin doğrusallığını belirlemek için istatistiksel bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bazı doğrusal işlemler, bir null hipotezi olarak kabul edilmektedir. İstatistiksel bir fark, null hipotezinde uyumlu bir şekilde orijinal veriler ile vekil veriler arasında hesaplanarak yapılır. İstatistiksel karşılaştırmaların bir sonucu olarak, eğer orijinal veriler için hesaplanan değerler, vekil verilerden hesaplanan değerlerden önemli ölçüde farklı çıkıyorsa, o zaman null hipotezi reddedilir ve doğrusal olmamayı doğrular (Theiler, 1991; Sprott, 2003). Bir zaman serisinin kaotik olup olmadığını vekil verilerinin test edilmesi ile, kaotik olup olmadığı konusundaki determinizmin kaldırılması ise, istatistiksel özelliklerini taklit ederek yapılır (Theiler vd., 1992). Zaman serilerinde doğrusal olmayan determinizm için VVA metoduna dayanan yaklaşım Theiler vd. (1991) tarafından önerilmiştir ve doğrusal stokastik bir sürecin null hipotezini reddetmesiyle doğrusal olmamanın kanıtlarının varlığını ifade etmiştir. Test verilerinin “doğrusal özelliklerini” korumak için vekil verilerin analiz edilmesi önemlidir. Bu yöntemle, kaydedilen serinin, üretilen yapay/vekil sinyal ile aralarındaki ilişkilere bakılır ve buna göre sinyalin doğrusalsızlığı tespit edilir (Sprott, 2003).

Kaos, teorik olarak doğrusal olmayan deterministik sistemlerde ortaya çıktığı için ilk olarak bu çalışmada, topraktan alınan radon (^{222}Rn) verilerinden elde edilen zaman dizisinin doğrusal olmadığının gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaç için kullanılan en uygun yöntem vekil veri analizidir. Bu yöntemde gözlenen veri kümesi ile aynı uzunlukta

ve aynı ortalama varyans veya güç spektrumu değerlerine sahip yapay veri setleri üretilir. Doğrusalsızlığa duyarlı bir ayırıcı istatistik değerinin, orijinal zaman dizisi ile yapay diziler arasında farklı olması durumunda orijinal zaman dizisinin doğrusal olduğuna dair hükümsüz hipotez reddedilir. Kaos teorisi, yöntemleri zaman dizilerinin gömüldükleri faz uzayında durağan olmasını gerektirir (Sprott, 1985; Theiler, vd., 1992).

Doğrusal stokastik işaretler doğrusal olmayan kaotik süreçleri taklit edebilir ve daha sonra doğrusal olmayan bozulmaya sebep olabilirler (Theiler, vd., 1992). Yapılan analizlerin güvenilirliği için diziden elde edilen değerler için, istatistiksel olarak serinin özelliklerini taşıyan, fakat determinizmi ayıklanmış serilerden elde edilen değerler ile karşılaştırılması özellikle önerilmektedir (Kantz ve Schreiber, 1997; Sprott, 2003). Analizlerin tutarlılığı açısından seriden elde edilen değerler, istatistiksel olarak seri ile aynı dağılım özelliklerine sahip, fakat determinizmi ayıklanmış serilerden elde edilen değerler ile karşılaştırılması önerilmektedir (Sprott, 2003; Kantz ve Schreiber, 1997). Bu çalışmada, Theiler metodu vekil veri analizi için kullanılarak VVA'nin doğrusallık ile doğrusal olmama durumu arasındaki fark ayırt edilmek ile birlikte, kaotik özelliklerinin arasındaki farkı da ayırt etmemize yardımcı olduğu görülmüştür.

3.9. Hurst Üsteli

Hurst üsteli, bir sinyalin pürüzlülüğünü ve fraktal bir yapıda olduğunu karakterize eder. Dinamik bir sistem için Hurst üstel uygulamalarının fiziksel anlamına geniş bir teorik çerçevede bakılması gerekmektedir. Hurst üsteli, tek boyutlu kayıt edilen zaman serilerinin tahmin edilmesi için (kısa dönem ya da uzun dönem) kullanılmaktadır (Hurst, 1952; Şen,1974; Harris, 1987; Sprott, 2003). Ayrıca Hurst üstel katsayısı, zaman serisinin sınıflandırılması için gerekli olan bir ilave istatistiksel ölçüm tekniğidir (Harris, 1987). Hurst üsteli, uzun-dönem hafızanın belirlenmesi ve öz-benzeşimin hesaplanması için bize fırsat sunar. Hurst üstelinin hesaplanması ölçekleme aralığının R/S (Rescaled range) dönüştürülmüş genişlik yöntemiyle hesaplanması yoluyla belirlenebilir. Hurst üstelinin ölçekleme aralığı R/S , dinamik bir sistemin fiziksel değişkenlerinin zamana bağlı olarak inceleme fırsatı verir. Bunun yanı sıra bir değer ile ortalaması arasındaki farkların toplamı ile maksimum ve minimum değerlerinin değişimi hakkında bilgi verir. Burada R , minimum ve maksimum kümülatif sapma arasındaki farkı gösterirken, S ise standart sapmayı göstermektedir (Hurst, 1952).

Zamanın değişimine karşı standart sapmanın relatif değişiminin logaritması Hurst H , katsayısını ya da üstelini verir. Hurst üsteli, bir sinyalin pürüzlülük ve bir sinyalin kesirli/fraktal karakterinin anlaşılmasına yardımcı olur. Bu üstelin hesaplanması için ayrık zamanlarda sürekli ölçülmüş veri seti $\{x_i\}$ gereklidir (Harris, 1987). N boyutlu veri seti için ortalama değeri; $\bar{x}(N)$ Denklem 3.9 ile hesaplanır,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t \quad (3.9)$$

Standart sapma ise Denklem 3.10 ile verilmiştir.

$$S(N) = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x}(N))^2 \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

Verilerin kümülatif değişim aralığı Denklem 3.11 ile ifade edilir.

$$R(N) = \max\{X(n, N)\} - \min\{X(n, N)\} \quad (3.11)$$

Hurst üsteli, $R(N)/S(N)$ oranını N 'in bir fonksiyonu olarak boyutsuz bir şekilde belirlenir. Hurst üsteli (H), 0 ile 1 arasında değişir. Rastgele bir sinyal olarak zaman serisi sonlu bir aralıkta değiştiği zaman, bu oran nispeten büyük N değerleri için artar $R(N)/S(N) \propto N^H$ (Feller, 1951). Hurst üsteli, Denklem 3.12 ile verilmiştir.

$$(R(N)/S(N)) = kN^H \quad (3.12)$$

Burada k , sabit bir sayıyı göstermektedir. H 'nin alacağı değerlere göre zaman serisinin rastgele ya da kaotik olup olmadığını gösterir. Hurst üsteli, fraktal boyutla bağlantılıdır. Şöyle ki; fraktal boyut $D = 2 - H$ şeklinde gösterilir ve iki ardışık adım arasındaki korelasyon $\rho = 2^{2H-1} - 1$ ifadesi ile verilir (Feller, 1951; Hurst, 1951). Dinamik bir sistemin fiziksel olarak açıklamasının yapılması için Hurst üstelinin bulunması gereklidir. Bu algoritmaya göre (Denklem 4.12), eğer $H = 1/2$ değerini alırsa Hurst üsteli olarak adlandırılır. Bu durumda zaman serisi rastgele yürüyüşe benzer ve beyaz gürültüye

sahiptir. Hurst üsteli, (R/S) ekseninin N zaman adımlarına karşı çizilen grafiğin eğimi bir çift logaritmik alan üzerinde H değerine eşdeğer olduğunu göstermektedir. Eğer H değeri $0 < H < 1$ arasında bir değer alırsa, bu hareket, kesirli Brownian hareketi olarak adlandırılır. Eğer H değeri, $1/2 < H < 1$ arasında bir değer alıyorsa sonuçlar kalıcı bir hareketi, aksi takdirde pozitif korelasyon olarak bu aralıkta yerel eğilimi göstermektedir. Eğer H değeri $0 < H < 0.5$ arasında bir değer alırsa devamlı olmayan (negatif korelasyona) yapıya işaret eder. $H > 1/2$ olduğu durumlarda pozitif korelasyon gösterir ve zaman serisinin yörüngeden sürekli/ısrarlı bir şekilde ayrılma eğilimindedir. Eğer $H < 1/2$ ise, zaman serisi sürekli olmayan bir davranış sergiler ki bu da zaman serisinin negatif korelasyona sahip olduğunun bir göstergesidir. Bu durumda, yörünge nokta şeklini alma eğilimine geri döner (Şen, 1977 (a), (b), (c); Alvarez-Ramirez, 2008; Kamışlıoğlu vd., 2013).

3.10. Güç Spektrumu Analizi

Kaotik sinyaller gürültü gibi geniş bantlı sistemlerden oluşmaktadır. Bu nedenle, gürültüden ayrılmaları oldukça zordur. Bundan dolayı kaotik olan bir sinyalle kaotik olmayan bir sinyal güç spektrumuna bakılarak ayrılabilir. Eğer sistem kaotikse, güç spektrumunda süreklilik vardır. Sistem kaotik değilse sadece belli frekanslarda sıçramalar bulunur (Sprott, 2003; Özer, 2006). Güç spektrumu $S(f)$ Denklem 3.13 ile hesaplanır. (Sakata vd., 1999).

$$S(f) = C.(1/f^\beta) \quad (3.13)$$

Burada $S(f)$ sistemin güç spektral yoğunluğunu, frekansı f ve β spektral üs iken C oransal sabiti göstermektedir (Sakata vd., 1999). Burada, β , $S(f)$ ekseninin $\log(f)$ 'e karşı çizdirildiği grafik lineer regresyon yöntemine göre bulunur (Das vd., 2009).

β üstel değeri, $\log S(f)$ 'in $\log(f)$ 'e karşı çizilen grafiğin lineer regresyon analizi ile tahmin edilir. Pratikte, bu değer 0.5-2.0 arasında değişir ve $1/f$ ölçeği olarak adlandırılır. Gözlenen zaman serilerinin geniş bantlı güç spektrumuna sahip olması $1/f$ ölçeği ile

yüksek frekanslara doğru exponansiyel bir bozulmanın olup, zaman serisinin fraktal yapısının altında yatan sebebi oldukça açık bir şekilde görmemizi sağlar (Das, 2009).

Dinamik sistemlerden elde edilen verilere ait sistem dinamiklerinin analiz edilmesi esnasında çok az da olsa gürültü içermektedirler. Doğrusal olmayan bir zaman serisi analizi ilk olarak güç spektrumu analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak yapılır. Kaotik sinyaller geniş bir spektruma sahip ise gürültüden ayrılmaları oldukça zordur. Bu yüzden, geniş bir güç spektrumunun gösterilmesi aslında kaosu en güçlü ispatıdır. Bir dinamik sistemde güç spektrumu genlik olarak piklerden oluşur. Bu yüzden, bir kaotik bileşendeki en önemli kriterlerden biri, bu bileşenlerin güç spektrumunda daha geniş bant yapılarına sahip olmasıdır (Sprott, 2003).

Güç spektrumu, uzaysal öz-benzerlik ve $1/f$ gürültüsü ile doğrusal olmayan dinamikler arasında bağlantı kurar. Bütün bu yerler üzerinde, çeşitli uygulama alanlarında doğal bir süreç olarak davrandığı çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir (Gutenberg ve Richter, 1954; Bak vd., 1988; Crisanti vd., 1992). Güç-kuvveti dağılımı herhangi bir üstel için değişmez uzaysal ölçeği gösterir (Sprott, 2003). Kompleks dinamik sistemlerde uzaysal genişleme için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu sistemler iç dinamikler olarak bilinir ve $1/f$ gürültü, zamana bağlı olarak karakteristiğini etkileme özelliğine sahiptir. Bu yüzden güç spektrumu log-log skalasında doğrusal bir davranış gösterir (Bak vd., 1988). Bir zaman serisi için kaotik sinyallerin görünüşü (varoluşu), dinamik sistemlerin güç spektrumu analizi yapılmasıyla bulunur. Eğer spektrumun pikleri sürekli ise kaos vardır. Güç spektrumu, rastgele dalgalanmalarda tamamen rastgele davranışlar gösterir bu yüzden, bir tek frekans bileşenine ait olan çeker bölgesi için gürültü olarak görünebilir. Kaotik-olmayan sinyaller için bu yapının olmadığı görülebilir. Dar-bantlı kaosa sahip olan sistemlerin spektrum yoğunlukları grafikte uzun ve geniş pikler gösterirler. Bu yapılar, faz uzayında birbirine yakın periyodik yapılara sahip oldukları görülür. Eğer güç spektrumu geniş bantlı kaosa sahip ise, o zaman grafikteki pikler uzun ve geniştir fakat bu pikler belirsizdir (Sakata vd., 1999; Sprott, 2003).

3.11. Fraktal Boyutlar

Fraktal boyut, Mandelbrot tarafından parça ile bütün arasındaki benzer özelliklerin gösterildiği geometrik şekiller olarak tanımlanmıştır. Bu yüzden fraktal boyut (kesirli boyutlara sahip şekiller), incelenen her ölçekte benzer görüntüyü veren kendine benzer

(self-similar) yapıların görünmesi olarak değerlendirilir. Çeşitli dallanmaların olması fraktal boyutun temelini oluşturur. Kendi içinde katlanmalar göstererek kendini tekrarlayan yapıların görünmesi ile bir bütünün parçalarını oluşturur (Hilborn, 1994; Hilborn, 2000). Mandelbrot yaptığı çalışmada tam sayı değeri alan boyutların kaotik yapılara uygun olmadığını göstermiştir (Mandelbrot, 1997). Doğrusal sisteme ait olan çekerler tam sayı değerleri almasına karşın, kaotik yapıda olan dinamik sistemlere ait olan çekerler ise fraktal (kesirli) boyutlara sahiptir (Hilborn, 1994; Hilborn, 2000).

Deneysel verilerdeki kaosu tanımlamak için uzay-zaman içindeki acayip çekerlerdeki fraktal yapılara bakılabilir. Bir çekerin sahip olduğu fraktal yapıyı bulmak için boyut tahmini yöntemi kullanılabilir. Ayrıca, dinamik yapı için aktif değişkenlerin sayısının ölçülmesiyle dinamik model için gereken kompleks yapı elde edilebilir. Böylece zaman dizileri analizlerinin kullanışlılığından uzak olan tartışmalar için fraktal yapının özellikleri tespit edilebilecektir. Fraktallar, kaosu nasıl bir geometriye sahip olduğunu gösteren matematiktir. Bu durum, fraktal yapıda kaotik dinamiklerin geometrik yapısını açıkça gösterir, bu yüzden kaosu ayak izleri olarak bilinir (Richards, 1999). Fakat fraktal yapıların kendi aralarındaki ilişkiler, kaosu olan ilişkilerinden bağımsız olması bu yapıların ne kadar ilginç olduklarını kanıtlar niteliktedir. Gerçek üç-boyutlu uzayda birçok doğal nesne fraktal özelliğe sahiptir (Sprott, 2003).

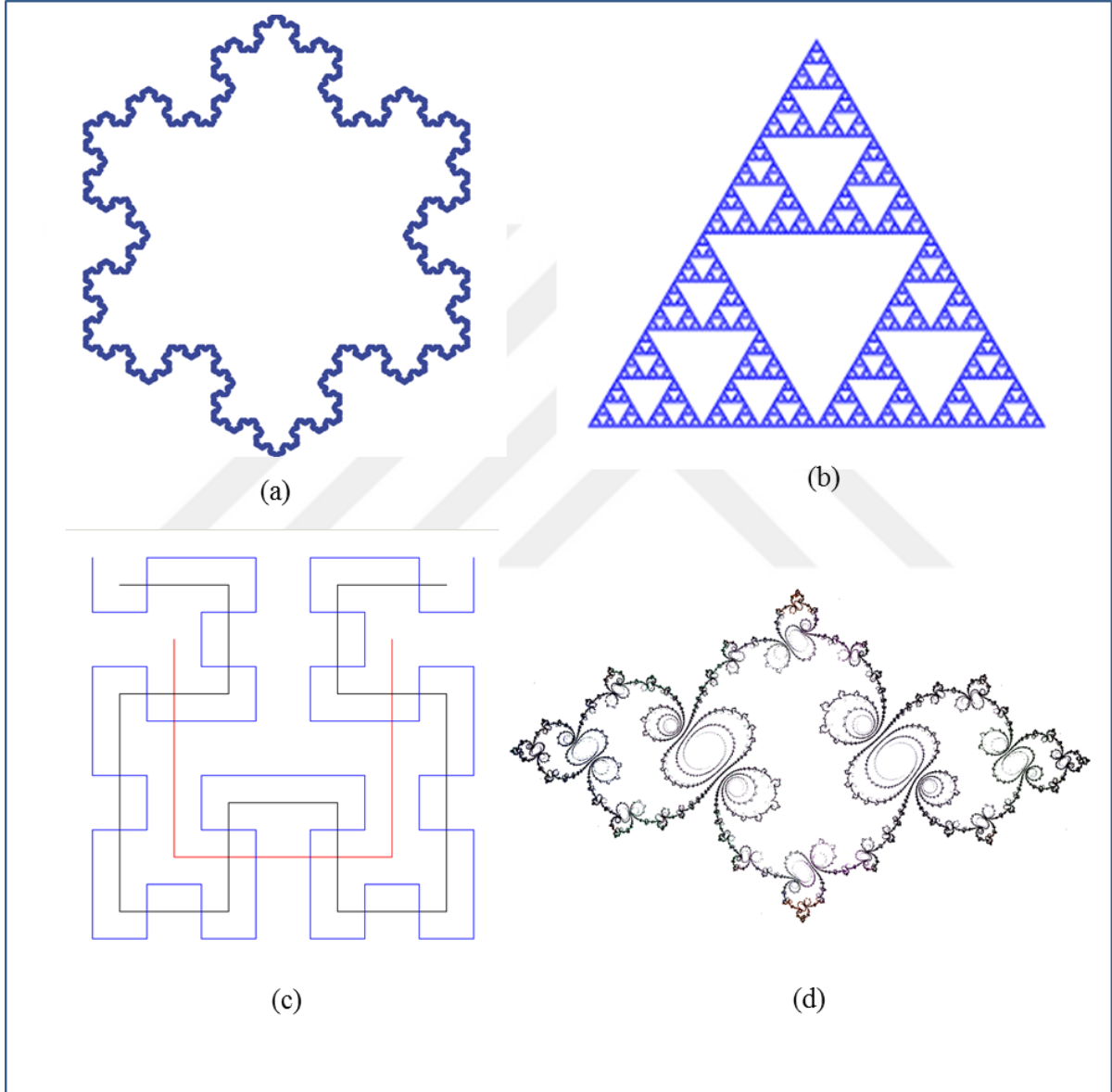
Fraktal bir yapıyı eksiksiz/açık olarak tanımlamak oldukça zordur, fakat çoğu fraktal yapının ortak olan bazı özellikleri aşağıda listelenmiştir (Falconer, 1990).

1. Fraktallar, mükemmel bir yapıya sahiptir (isteğe bağlı olarak seçilen küçük ölçeklerde bile bu yapı görünür) ve karakteristik bir ölçek sıralamaları yoktur.
2. Fraktallar, sıradan geometrik yöntemlerle tanımlanamayacak kadar çok düzensizdirler.
3. Fraktallar, öz-benzerlik (self-similarity) derecelerine sahiptirler (yaklaşık ya da istatistiksel olarak), nesnelerin küçük parçaları benzerlik açısından anlamlıdır.
4. Uygun bir şekilde tanımlanan Fraktal boyutlar, topolojik boyutlardan daha büyüktür.
5. Fraktallar, genellikle sıfır ya da sonsuz ortalama ve varyans gibi alışılmadık istatistik özelliklere sahiptirler.
6. Fraktal boyutlar, muhtemelen her zaman kendini yenileyen bir yapı gösterir.

Dinamik sistemler, fraktal yapı üretmenin yalnızca bir yoludur. Bunun dışında daha farklı yollar da vardır. Bu yapıları açıklamakta basit yöntemler oldukça yetersiz kalmaktadır. Fraktallar deterministik olabilir (tam olarak/geometrik olarak), öz-benzerlik

(self-similarity) sahip olabilir, rastgele kurallar ya da deterministik kurallar fraktalın oluşmasına sebep olabilir (Hilborn, 1994; Sprott, 2003).

Fraktal yapı bir bütünün parçalarından oluşan şekiller bütünüdür (Kraft, 1995). Daha farklı bir anlatımla, fraktal boyuta, farklı ölçeklerden bakarsak kendi kendine benzerlik yapısına sahiptir. Şekil 3.6’da bilinen bazı fraktal yapı örnekleri verilmiştir.



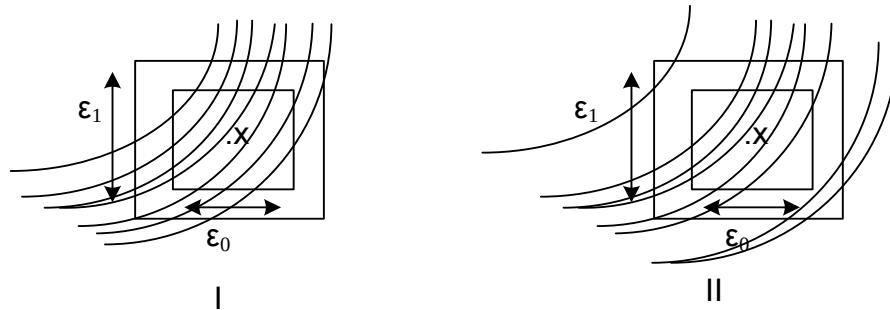
Şekil 3.6. Temel bazı tam fraktal yapılar (a) Koch eğrisi, (b) Sierpinski üçgeni, (c) Hilbert eğrisi, (d) Julia seti.

- i. Koch eğrisi: Şekil 3.6 (a)’da verildiği gibi eşkenar üçgen ve üçgenlerin kenarlarında oluşan  (işaretçisiyle) kenarlarından $4/3$ oranındaki uzunluğun katlanmasıyla elde edilen şekildir. Koch eğrisi aslında bir ada ya da göl gibi bir şekildense kıyı

şeklinde bir kesiti andırır. Aslında bütün çizgiler bir kıyı şeridi şeklinde değildir ancak bir fraktal yapı uzunlukların birbirine bağlı olduğu kurallardan oluşur ve en yüksek çözünürlükte ortaya çıktığı için Koch eğrisi bu şekilde ortaya çıkar (Richardson, 1961).

- ii. Sierpinski: Şekil 3.6 (b)'de verilen Sierpinski eşkenar üçgenin kenarlarının 1/2 oranında küçültülmesiyle oluşan fraktal bir modeldir. Ortası boş olan dokuz bölgeye sahiptir ve diğer sekiz bölge için bütün durumlarda azalarak giden fraktal bir yapıdır.
- iii. Hilbert eğrisi: Şekil 3.6 (c)'de verilen Hilbert eğrileri uzayı doldururken eğrilerde kesişme olmayan fraktal yapılardır. Eğriler oluşurken $\sqsubset$ (işaretçisiyle) uygun bir şekilde katlanarak Ξ (genel parçasını) oluşturur. Hilbert eğrileri Peano sınıfının en büyük eğrilerindendir.
- iv. Julia set: Şekil 3.6 (d)'de verilen bir diğer fraktal eğridir. Bu yapıda belirli bir çeker için ana sınırı kesindir. Julia seti, kompleks haritalar için kesin sınırları matematiksel olarak ifade edilerek daha detaylı tanımlama yapan bir fraktal yapıdır.

Geometrik bir obje, m 'nin objedeki her bir noktanın pozisyonunu en iyi şekilde belirlemeye yetecek kadar büyük olduğu bir Öklid uzayında (R^m), tamamen bir noktalar kümesi ile oluşturulmuş olabilir. R^m içindeki her bir küme $[0, m]$ aralığındaki bir tamsayı değerine sahip topolojiksel bir d boyutuna sahiptir. R^m tamamen bir kümeden oluşuyorsa $d=m$ olur. Bir fraktal boyut D , tamsayı olmayan değerlere izin veren bir boyut ölçüm yöntemidir (Mandelbort, 1997). Çeker üzerinde homojen dağılım, fraktal yapıdaki çekerin uzaydaki değişimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir (Chouet, 1991; Hilborn, 1994; Kraft, 1995; Urbach, 2000).



Şekil 3.7. Çeker üzerinde homojen dağılım, fraktal yapıdaki çeker (Urbach, 2000).

Bu şekilde olan fraktal boyutların analizi için kapasite boyutu, bilgi boyutu, fraktal boyut hesabı gibi kesirli boyut hesaplama yöntemleri vardır. Bu boyutlar arasında çeker açısından en fazla bilgiyi, ilinti boyutu tarafından verildiği yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Grassberger ve Procaccia, 1983). Kaotik yapı için faz uzayının göstergesi olan garip çekerlerin kaotikliğinin derecesi fraktal boyutu verip, fraktal boyut Denklem 3.14'deki gibi hesaplanır.

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{j=1}^{N(r)} p_j^q}{\log r}, \quad q = 0, 1, 2, \dots \quad (3.14)$$

Elde edilen bir veri kümesi için fraktal boyut analizi genellikle $D_0 \geq D_1 \geq D_2 \geq \dots$ şeklinde sıralanarak elde edilir. Fraktal boyutu analizi yapılırken D_q değerinin hesaplanmasındaki en büyük zorluk eldeki veri setini içeren kümenin çok küçük boyutlu hücrelerden oluşmasından kaynaklanır. Ayrıca bu durum oldukça büyük bir bilgisayar belleği bunun yanında oldukça fazla zaman gerektirebilir (Theiler, 1988). D boyutu, $\log(N(r))$ 'nin $\log(1/r)$ 'ye karşılık gelen eksenleri arasında çizdirilen eğrinin, doğru olan parçasının eğimini alacak şekilde hesaplanır. D_0 boyutu “kapasite boyutu” ya da “fraktal boyut” olarak isimlendirilir ve Denklem 3.15 ile hesaplanır.

$$D_0 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(r))}{\log(1/r)} \quad (3.15)$$

Dinamik sistemin zamansal davranışı hakkındaki bilgiler kullanışsızdır bu yüzden D_1 yalnızca metrik bir kavramı ifade eder. D_1 bilgi boyutunu temsil eder ve Denklem 3.16'daki ifade ile hesaplanır.

$$D_1 = \lim_{q \rightarrow 1} D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_{j=1}^{N(r)} p_j \log p_j}{\log r} \quad (3.16)$$

Kaplan ve Yorke'un yaptığı çalışmalara göre bilgi boyutunun Lyapunov üstelleri ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Kaplan-Yorke, 1979). Kaplan-Yorke'un yaptığı bilgi boyutu hesabı Denklem 3.17 ile verilmiştir.

$$D_1 = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|} \quad (3.17)$$

D_2 boyutu ilinti boyutu olarak isimlendirilir ve matematiksel ifadesi Denklem 3.18 ile verilmiştir.

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r}, \quad (3.18)$$

burada $C(r)$ korelasyon toplamıdır ve kümenin iki noktasının aynı hücre içinde olma olasılığını ifade eder (Grassberger, 1983). Korelasyon toplamı Denklem 3.19 ile hesaplanmıştır.

$$C(r) = \sum_{j=1}^{N(r)} p_j^2 \quad (3.19)$$

Korelasyon toplamı denklemi r yarıçaplı bir yörüngedeki tüm korelasyonları ifade etmektedir. Bu korelasyon toplamı fraktal yapı hakkında önemli bilgiler sunar. Fraktal boyut, reel değerler alır ve nokta ile çizgi arasında bir boyutlu yapıyı temsil eder. Fraktal geometri, literatürde depremlerin zamansal ve uzaysal dağılımının modellenmesi gibi çalışmalarda kullanılmıştır (Smalley vd., 1987; Turcotte, 1992). Garip çekerlerin genel özelliklerini;

- Zamanın sonsuza gittiği bir durum için limit kümesidir,
- Garip çeker içinde başlayan herhangi bir yörünge tüm hareketi boyunca kümenin içinde kalır,
- Genellikle sınırlı hacim içindedir, çekim havuzu tarafından sınırlandırılmaktadır,
- Kesirli boyutlara (fraktal) sahip olup, kendine benzerlik yapıları sergilerler,

- Yörüngeleri oldukça yoğundur ve uzayı her bir nokta bir yörüngeye çok yakın olacak şekilde kaplarlar,
- Ergodiktir (eğer bir sistemde zaman ortalaması ile uzay ortalaması birbirine eşit ise sistem ergodiktir),
- Genellikle kaotik yapıya sahiptirler, şeklinde sıralayabiliriz.

Fraktal boyut analizlerine bakılarak, kaotikliğin derecesini anlamamıza en fazla yardımcı olacak Korelasyon Boyutu analizinin hesabının detaylarına Bölüm 5.12’de yer verilmiştir. Korelasyon Boyutu, bir sinyalin rastgele ya da kaotik davranış gösterip göstermediğini belirlemek için kullanılan doğrusal olmayan yöntemlerden bir diğeridir.

3.12. Korelasyon Boyutu

Kaotik çekerlerde, sistemin faz uzayında ziyaret ettiği noktalardan oluşan kümeler düzensiz geometrik yapıların meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu fraktal geometri, sınırlı bir faz uzayı içindeki uzama, katlanma ve hacim küçülmesi sonucu küçük boyutlarda istatistiksel olarak kendine benzer yapılarda ortaya çıkmaktadır. Kaotik çekerlerdeki kendine benzerliğin bu şekilde ortaya çıkması Korelasyon Boyutu olarak adlandırılır. Korelasyon Boyutu, çeker diğer boyutlara göre daha ayrıntılı bir ölçekte incelememize yardımcı olur, bu yüzden kullanıcıya kullanım kolaylığı sağlayan bir yöntemdir. Ayrıca Korelasyon Boyutunun, daha hızlı ve basit yöntemlerle hesaplanabilmesi diğer boyutlara göre üstün özelliklerindendir (Grassberger vd., 1991; Berliner, 1992). Dinamik sistem için elde edilen Korelasyon Boyutu, gürültü seviyesini/derecesini anlamamıza da yardımcı olur (Theiler, 1991). Eğer incelenen bir çeker kaotik yapıya sahip ise, başlangıçta birbirine yakın olan komşu yörüngeler zamana bağlı olarak birbirinden üstel olarak uzaklaşacak ve yörünge üzerindeki noktalar anlamsız hale geleceklerdir. Bu noktalar ilk bakışta rastgele görünseler de, tamamı aynı çeker üzerinde olduğu için yeniden oluşturduğumuz faz uzayında hepsi birbiri ile ilişkili olarak konumlanırlar. Bu yüzden, boyut hesabı yapılırken, çeker üzerindeki noktaların zaman bilgisinden ziyade uzaysal ilişkileri değerlendirilir (Williams, 1997). Buradan elde ettiğimiz sonuca göre faz uzayında yörüngede birbirine yakın nokta kümeleri için, güçlü korelasyonun varlığından söz edilebilmektedir (Grassberger ve Procaccia, 1983; Sprott, 2003).

Kaotik davranışın belirlenmesi için, fraktal boyut hesaplamaları literatürde genellikle kullanılan bir yöntemdir (Grassberger ve Procaccia, 1983; Eckmann and Ruelle, 1985). Bu boyut bir sinyalin/dizinin kaotik ya da rastgele bir davranış sergileyip sergilemediğini anlamamıza yardımcı olur. Korelasyon analizi, faz uzayındaki sistem çekerlerinin dinamik sistem için yeniden yapılandırılması ile gerçekleştirilir (Abarbanel vd., 1993). Korelasyon Boyutu, Grassberger ve Procaccia (1983) tarafından önerilen bir algoritmaya göre hesaplanmış ve Theiler (1991) tarafından genişletilmiştir (Grassberger ve Procaccia, 1983; Theiler, 1991; Koçak ve Şen, 1998).

Korelasyon integrali tahmininde, zamanla ilgili korelasyon kümelerini hariç tutarak korelasyon integrali ölçeğinin dinamik karakteri ile bir Brownian sürecindeki yörüngelerin kendi kendine benzerliğini karakterize eden eğrinin doyuma ulaştığı değeri ayırt etmek için kullanılır.

Veri kümesinin fraktal boyutlarının hesaplanmasında en yaygın kullanılan metod, ilinti integralinin hesaplanmasını gerektiren Grassberger ve Procaccia algoritmasıdır. İlinti, sistemin serbestlik derecelerinin sayısını gösterir ve sistemin karmaşıklığının bir ölçüsüdür (Yılmaz, 2006). Bir zaman serisinden, sabit zaman artımı τ kullanılarak $x_i = x(t + i\tau)$ şeklinde elde edilen ve çeker üzerinde bulunan $\{x_i, i = 1, \dots, N\}$ noktalar kümesini dikkate alalım (Theiler, 1991; Koçak, 1996). Bu algoritmaya göre; bir kümenin iki noktasının $(X_i, X_j \text{ ve } i \neq j)$ aynı r boyutlu hücrede olma olasılığı, iki noktanın r 'ye eşit veya r 'den küçük bir uzaklıkla ayrılmış olma olasılığına yaklaşık olarak eşittir (Grassberger, 1983; Schreiber ve Schmitz, 1996). Korelasyon integralinin çift logaritmik eksen takımında verdiği lineer bölgenin (ölçekleme bölgesinin) eğimi Korelasyon Boyutuna karşılık gelecektir ve korelasyon boyut hesabı için kullanılan ilinti integrali Denklem 3.20 ile verilmiştir.

$$C(r) \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \left\{ \left| x_i - x_j \right| \leq r \right\} \quad (3.20)$$

Gömülü boyutların toplam veri sayısının N tane noktalar kümesinden oluştuğu bilinir. r korelasyon integralini hesaplamak için kullanılan dairenin yarıçapını gösterir ve bu ilinti r yarıçaplı dairenin etrafına çizilen noktalar kümesinin içinden seçilir. Bu döngü bütün noktalar için ve çeşitli yarıçaplarda tekrarlanır.

Korelasyon integralinin uygulamada sağladığı yararları;

- Korelasyon Boyutunun hesaplanmasında kullanılır. Korelasyon Boyutu Denklem (3.20) ile verilen $\ln C(r) - \ln(r)$ doğrusunun eğimidir,
- Deterministik kaotik süreç için, farklı gömme boyutlarına (m) karşı gelen korelasyon boyutları için, D_2 , belli bir m değerinden sonra doyuma ulaştığı için bu eğrinin eğiminin sıfır olduğu noktanın apsisi, çekerinin kaç boyutlu bir uzay içerisine gömüleceğini gösterir, bu da kullanıcıya korelasyonu yorumlama kolaylığı sağlar,

şeklinde sıralayabiliriz. İki noktanın olasılığı (x_i, x_j and $i \neq j$) r boyutlu bir dairede bir noktalar kümesinden seçilir, bu eşitlik Denklem 3.21 ile hesaplanır.

$$C(r, m) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \Theta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|) \quad (3.21)$$

Korelasyon Boyutu hesabı yapabilmek için ilk olarak $C(r, m)$ ifadesini kullanarak korelasyon integralini hesaplamak gerekir. İki ölçüm arasındaki Öklid mesafesi Denklem 3.22 ile verilmiştir;

$$|x_i - x_j| = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_i(k) - x_j(k))^2} \quad (3.22)$$

Burada $|x_i - x_j|$, herhangi iki nokta arasındaki x_i ve x_j Öklid mesafesini göstermektedir. x 'in 0'dan büyük olduğu zaman 1 değerini, 0'dan küçük olduğu durumlarda ise 0 değerine eşittir, bu eşitlik Denklem 3.23 ile gösterilmiştir.

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (3.23)$$

Burada Θ , Heaviside adım fonksiyonunu temsil eder (Lakshmi, 2009). Gömme boyutunun ve kullanılan veri sayısının yeterince büyük olmasının yanında verilerin gürültü içermemesi durumunda $\ln C(r)$ ve $\ln(r)$ 'nin grafiği lineer bir bölgeye karşılık gelecektir. Bu bölge, ölçeklendirme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Ölçeklendirme bölgesinin

eğimi ise Korelasyon Boyutunu D_m vereceğinden (Smith, 1986; Theiler, 1988; Schreiber ve Schmitz, 1996). Korelasyon Boyutu, $C(r, m) \propto r^d$ ifadesi ile boyut hesabı Denklem 3.24 ile hesaplanır.

$$D_m = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{d \log C(r, m)}{d \log(r)} \quad (3.24)$$

Eğim, D_m gömülü boyutun bir fonksiyonu olarak grafiği çizildiğinde, en küçük kareler metoduna göre eğri fit edilir. Belirli bir m değerinden sonra bu değer doyuma ulaşır ve bu durumda sistem kaotik süreç gösterir. Ayrıca bu nokta, D_m 'in en büyük değeri aldığı noktadır (Kaplan ve Yorke, 1979). Korelasyon integrali tahmininde, karşılıklı ilişki durumlarının ihmal edilmesi, faz uzayı boyunca yörüngelerin öz-ilişkilerini düşük değerli saturasyonlarda karakterize etmek ve korelasyon integral ölçeğinin dinamik karakterlerinin arasındaki farkı ayırt etmek için kullanılır (Theiler vd., 1991). Doğrusal olmayan dinamik sistemden elde edilen zaman serisinde, bağlı yapılarda doğrusal ve doğrusal olmayan kısımların toplamalarının birbirlerinden ayrılması mümkün değildir. Kaotik dinamiklerin doğrusal ve doğrusal olmayan kısımlarının ayrıştırılması için Theiler tarafından özel bir yöntem önerilmiştir (Theiler vd., 1991; Schreiber ve Schmitz, 1996). Veri setlerini kontrol etmek için vekil veriler üretilmesi önerilmiştir. Theiler'in penceresini güvenli bir şekilde tahmin etmek için uzay-zaman ayırımında grafik kullanılmalıdır (Provenzale, 1992). Theiler metoduna göre bir zaman serisi için düşük Korelasyon Boyutu uygulanması gerekmektedir (Theiler vd., 1991). Bir zaman serisindeki Theiler parametresinin ω Denklem (3.23)'ün toplamının, $|i - j| > \omega$ toplamından büyük olması gerektiğini söylemektedir (Theiler, 1991; Schreiber ve Schmitz, 1996).

Bu çalışmada Korelasyon Boyutu korelasyon integralleri kullanılarak hesaplanmıştır ve ²²²Rn sinyallerinin yeniden yapılandırılması için Theiler algoritması kullanılmıştır. Stokastik zaman serilerinde serbestlik derecesinin sayısı gömülü boyut sayısına bağlıdır, bu yüzden sonlu gömülü boyutlar dağılımların yeniden yapılandırmaları için yetersizdir. Sonuç olarak bu hesaplama eksiksiz bir sonuç vermez. Bu yüzden korelasyon integralinin eğimi kullanılır ve bu eğim D_m , zaman serisinin şiddetini (kaotikliğin ölçütü) tahmin edilmesi için kullanılır. Korelasyon üstelinin saturasyon (doyuma) ulaştığı anda bu durum incelenilen zaman serisi için kaosu varlığına işaret eder.

3.13. Geçici En Yakın Komşular Metodu (GEK)

Dinamik sisteme ait ölçülen tek boyutlu zaman dizisinin faz uzayında yeniden oluşturulmasında yeterince büyük bir Öklid uzayı (R^m) oluşturularak, dinamik sisteme ait olan çekerin yapısını bir belirsizlik olmadan gözlemleyebiliriz. Bu sayede, m boyutlu bir yörüngede birbirine oldukça yakın olan nokta çifti için, m 'in daha büyük değerlerine ait oluşturulan faz uzayı içinde görünür durumda olur (Abarbanel,1993). Bulunan bu fark noktalarında belirsizlik vardır. Belirtilen noktaların komşu olup, diğer noktaların hangilerinin komşu olmadığı tespit edilemez. Bu yüzden, çekerin üç boyutlu uzay içinde çizdirilmesiyle bu sorun ortadan kalkar. Bütün belirsizliklerin çözüldüğü R^m uzayı çekerin gömülü boyutunu verir (Abarbanel,1993). Alınan sinyalden, gömülü boyutu (m) tespit edebilmek için farklı metotlar kullanılmıştır. Bu metodlardan biri olan sistem niceliklerinin doyuma ulaşması yöntemi, çekere ait niceliklerin hesaplanmasıyla ilgilidir. Hesabı yapılan niceliğin değerinin değişimi sabit oluncaya kadar gömülü boyutlar artırılır ve hesaplamalar tekrarlanır. Kennel ve arkadaşları tarafından sunulan bu metoda, Geçici En Yakın Komşuluklar Metodu (GEK) denir (Kennel, 1992; Abarbanel,1993; Sprott, 2003).

Gömülü zaman gecikmeleri kullanılarak fraktal boyut hesaplanırken, uygun gömülü boyutu GEK metodu kullanarak seçebiliriz. Bunun yanında literatürde, m boyutunun doyuma ulaştığı yere bakmak için Cao'nun metodu gibi birçok yöntem mevcuttur (Kaplan-Yorke, 1979; Fraser ve Swinney, 1986; Cao, 1997; Sprott, 2003). Eğer zaman serisi ayrık zamanla örneklenmiş bir noktadan geliyorsa Δt gibi bir zaman adımı seçilmelidir. Aslında bu seçimin bir önemi yoktur (Sprott, 2003). Pratikte eğer zaman adımı çok küçük ise her veri noktası önceki noktalara çok yakın ve çeker gömülü uzayda matris boyunca çok küçük bir r boyutu vardır ve farklı bir boyutta görülebilir (Fraser ve Swinney, 1986; Sprott, 2003).

GEK metodu, bir boyutlu zaman serisinden minimum gömme boyutunu seçen bir metottur. Bu metotta yüksek boyutlarda hâlâ komşular birbirine yakın ise verilen dizideki çiftler arasındaki en yakın komşular bulunur. GEK'nin oranı sıfıra düştüğünde, en uygun gömülü boyuta ulaşılır. Uygun gömülü boyut tahmin edilecek değer olarak adlandırılır (Kantz ve Schreiber, 1997; Hegger, 1999). Eğer geçici en yakın komşuların sayısı, sıfır değil fakat çok düşük ise, gömülü boyut analizi yapmak için en uygun değerdedir. m -boyutlu komşular eğer noktalar arasındaki mesafelerin geçici olduğu düşünülürse, onun

komşularında $m+1$ boyutundan daha büyük bir kriter zamanı, önceki m boyutunun her bir komşusu ve ortalama mesafe arasındaki kriter zamanından daha büyük ise komşuların geçici olduğu düşünülür. Her vektör için, zaman serisinde onun en yakın komşuları arasındaki farklar hesaplanır (Kantz ve Schreiber, 1997; Hegger, 1999; Sprott, 2003). Bu metodda, m boyutundaki her bir vektör için Denklem 3.25'teki gibi zaman serileri oluşturulur.

$$y(k) = [x(k), x(k+T), \dots, x(k+(m-1)T)] \quad (3.25)$$

Bu eşitlik geçici en yakın komşuluğu gösterir ($y^{NN}(k)$), $y(k)$ ile $y^{NN}(k)$ arasında m boyutlu Öklid fark değeri ($R_m(k)$) ise Denklem 3.26'daki gibidir.

$$R_m(k)^2 = [x(k) - x^{NN}(k)]^2 + [x(k+T) - x^{NN}(k+T)]^2 + \dots + [x(k+T(m-1)) - x^{NN}(k+T(m-1))]^2 \quad (3.26)$$

$m+1$ boyutta bu en yakın komşu farkı $(m+1)$ 'inci koordinatlarda $x(k+mT)$ ve $x^{NN}(k+mT)$ bağlı olarak değişir ve Denklem 3.27'de verilmiştir.

$$R_{m+1}^2(k) = R_m^2(k) + [x(k+mT) - x^{NN}(k+mT)]^2 \quad (3.27)$$

Komşuların geçici olduğu kararını vermek için bir eşik değeri R_T gerekir. Eğer R_T Denklem 3.28'de verildiği gibi ise,

$$\frac{|x(k+Tm) - x^{NN}(k+Tm)|}{R_m(k)} > R_T \quad (3.28)$$

k (veya $t_0 + k\tau_s$) zaman noktasındaki en yakın komşular geçici olarak değerlendirilir (Kennel, 1992; Abarbanel, 1993). En yakın komşular geçici değil ise, bu noktaya ait olarak hesaplanmış en yakın komşular doğrudur ve bu noktadaki boyut, gömülü boyut olarak kabul edilebilir. Bu metodda, elde edilen bu eşik R_T değerinin belirlenmesinde herhangi bir kuralın olmayışı dezavantajdır. Eşik değerinin subjektif olarak seçimi, özellikle zaman serilerinin analizlerinde, farklı gömülü boyut değerlerinin elde edilmesine sebep

olmaktadır (Kennel, 1992; Abarbanel,1993; Sprott, 2003; Marín Carrión, 2012; De Domenico, 2013). Eğer, ilk kriter R_T 'yi aşarsa bu noktanın geçici en yakın komşuluk olduğu kabul edilir. Geçici en yakın komşular metodu ayrıca ikinci bir kriter tarafından $R_m(k) > R_T$ eşik değerinden büyük ise de çekerin boyutları belirlenebilir. Uygun gömülü boyut burada geçici en yakın komşuluk oranının sıfıra düştüğü yer olarak gösterilir (Kennel, 1992; Abarbanel,1993; Sprott, 2003).

Geçici en yakın komşuluk metodu, bir boyutlu zaman serisinin en küçük gömülü boyutunu seçmemize yardımcı olduğu için çeker yörüngelerinin noktaları faz uzayında geçici komşulara sahip olur. Bu komşuların davranışı tahmin denklemleri üretmek için komşuluk ilişkisini anlamamız açısından önemli bilgi sağlar (Abarbanel vd., 1993). Uygun bir gömülü boyuta ulaşıldığında, geçici en yakın komşuluk değeri sıfıra düşer. Bunun için yapılması gereken ilk adım zaman serisini faz uzayında yeniden oluşturmaktır. Ardışık hesaplamalar faz uzayındaki yerel komşuluğu tanımlar ve bu yüzden “geçici en yakın komşular” en yakın komşuya yakın bir nokta olarak görülür. Gömülü uzay çok küçük olduğu için, her nokta çekerde bir yörünge ile bağlantılıdır. Bu yaklaşım minimum gömülü boyutun tanımlanması için kullanılır. Bunun altında yatan temel düşünce, gömülü alanda birbirine yakın noktaları tespit etmektir. Bu metod, oldukça küçük noktalar kümesinden ziyade gömülü alana yakın noktalar kümesini bulmamıza yardım eder. Eşik değerinden daha büyük hesaplanan mesafe değerlerinde geçici komşular görülür. Eğer gömülü boyut değeri m , çok büyük ise o zaman istatistiksel özelliklerini ve bilgiyi kaybeder (Kennel vd., 1992; Abarbanel,1993; Sprott, 2003).

3.14. Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu

Karşılıklı bilgi, ölçülen herhangi iki değişkenin bilgi miktarının simetrik olarak ölçümüdür. Kaotik analiz yönteminde uygun gömülü bulmak için geniş bir kullanım alanı vardır. Karşılıklı bilginin en büyük avantajlarından biri, iki değişken arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin tespit edilebilmesidir.

Zaman serisi analizi yapılırken, kaydedilen tek boyutlu işaret için $x(t)$ için gecikme vektörleri $x(t), x(t+\tau), x(t+(m-1)\tau)$ oluşturulur. $x(t) = x(t_0 + t\tau_s)$ burada t_0 başlangıç zamanı, τ_s ise cihazın örnekleme periyodudur. Dinamik sistemden alınan zaman dizileri her biri τ_s aralığındadır. Faz uzayının yeniden oluşturulması için seçilmesi gereken bir

zaman aralığı; zaman serisinden istenen bilgileri çıkarmak için uygun olmayabilir. Bu durumda, τ zaman aralığında veriden istenilen bilgiyi çıkarmak için uygun zaman adımının seçilmesi gerekmektedir. Eğer gecikme zamanı (τ), çok küçük seçilirse o zaman sistemdeki periyodiklik kaybedilir. τ sistemin periyotlarından birine yakın seçilirse, bu kez de bahsedilen boyut sabit bir nokta gibi görünecek ve çekerin boyutu yanlış örneklenmiş olacaktır. Doğrusal bir analiz yapılacaksa otokorelasyon fonksiyonunun ilk sıfır olduğu değer uygun gecikme zamanını verirken, doğrusal olmayan bir analiz yapılacaksa bu durumda karşılıklı bilgi fonksiyonunun ilk minimuma düştüğü değer, gecikme zamanı olarak alınır (Fraser ve Swinney, 1986; Fraser, 1989; Sprott, 2003). Otokorelasyon fonksiyonu, lineer istatistiksel bir metoddur. Bu yüzden doğrusallık içermeyen korelasyonlar için hesaplanmaz. τ 'nun seçimi için Fraser ve Swinney tarafından önerilen, iki değişken arasında sadece doğrusal değil, ayrıca doğrusal olmayan bağımlılığı da ölçen karşılıklı bilgi fonksiyonu (mutual information function) metodu önerilmiştir. Bu metod τ 'nun en uygun değerini seçmek için kullanılmaktadır (Fraser ve Swinney, 1986; Fraser, 1989). Karşılıklı bilgi fonksiyonunun ilk lokal minimuma karşı gelen değeri τ olarak alınmaktadır (Sprott, 2003).

Karşılıklı bilgi fonksiyonu, bu iki rastgele seri arasındaki bağıllığın bir ölçüsüdür. Karşılıklı bilgi fonksiyonundaki zaman gecikmesi kavramı Fraser ve Swineey (1986) tarafından önerilmiştir. Otokorelasyon fonksiyonunun aksine karşılıklı bilgi fonksiyonu, doğrusal olmayan korelasyonlar için de göz önünde bulundurulur. Karşılıklı bilgi fonksiyonu $I(\tau)$ Denklem 3.29 ile tanımlanmıştır;

$$I(\tau) = \sum P(x(i), x(i + \tau)) \log_2 \left[\frac{P(x(i), x(i + \tau))}{P(x(i))P(x(i + \tau))} \right] \quad (3.29)$$

Burada $Px(i)$ ve $P(x(i + \tau))$ gibi normalde bağlı frekanslar tarafından tahmin edilen iki farklı olasılık vardır. Diğer taraftan $x(i)$ ve $x(i + \tau)$ olarak adlandırılan iki seriden hesaplanan $Px(i), P(x(i + \tau))$ olasılık yoğunlukluğunu hesaba katar (burada i , sayacı göstermektedir). Optimum zaman gecikmesi τ , Denklem (3.29)'dan $t = \tau$, $x(i + \tau)$ burada $x(i)$ maksimum bilgiyi göstermek üzere hesaplanır (Sprott, 2003; Khatibi vd., 2012).

$x(i)$ ve $x(i + \tau)$ olarak sistemden alınan ölçümlerden $x(i)$ ve $x(i + \tau)$ olarak $x(i)$ ölçümü ile $x(i + \tau)$ ölçümü hakkında öğrenebileceklerin miktarına $x(i)$ ve $x(i + \tau)$ ölçümlerinin

karşılıklı bilgisi denir. Elde edilen bir zaman gecikmesi için $I(\tau)$ fonksiyon eğrisinin sıfırdan ilk geçtiği yere bakılır ve buda bize $x(i)$ ve $x(i+\tau)$ 'nin doğrusal olarak serbestliğinin bir ölçüsünü verir. Karşılıklı bilgi fonksiyonu, bütün ölçümlerin ortalamasını gösterdiği için genel ifadesi; $I(\tau) \geq 0$ şeklinde ifade edilir. Buradan, karşılıklı bilginin iki rastgele değişkenin birbirleri hakkında ne kadar bilgi içerdiğini gösteren bir yöntem olduğu söylenebilir. Sonlu bir Δt için karşılıklı bilgi fonksiyonu minimum olmalıdır, fakat sonuçlar istatistiksel dalgalanmalar tarafından baskın ise zamandaki ek artışlar karşılıklı bilgiyi bulmaya engel bir durumu gösterir (Sprott, 2003). İki rastgele değişken ne kadar ilgiliyse karşılıklı bilgi miktarı da o kadar yüksek olur. Bağımsız iki değişkenin karşılıklı bilgisinin sıfır olduğunu söyleyebiliriz (Fraser ve Swinney, 1986).

3.15. Doğrusal Olmayan Tahmin Metodu

Doğrusal olmayan tahmin teknikleri doğrusal olmayan dinamik sistem teorisi düşüncesine dayanır, özellikle doğal gözlemler için oldukça güçlü bir metoddur (Sugihara ve May, 1990). Literatürde, çeşitli çok boyutlu (değişkenli) jeofiziksel verilerin analizlerini yapmak için doğrusal olmayan tahmin metodları kullanılmıştır (McCloskey, 1991; McCloskey, 1993; Tiwari vd., 2004; Lakshmi, 2009). Doğrusal olmayan tahmin teknikleri, uygulama alanı çok geniş ve güçlü bir uygulama alanıdır. Bu teknikler, özellikle jeofiziksel araştırma uygulamalarında kaos ve düzensizliği ayırt etmek için kullanılır bunun dışında, borsa indeksi tahminlerinde, hava tahminlerinde ve bunun gibi kaotik yapı içeren çok geniş bir uygulama alanına sahiptir (McCloskey, 1991; McCloskey, 1993; Lakshmi, 2009).

Doğrusal olmayan analizde, tahmin yapmak için, Simpleks Metodu kullanılır (McCloskey, 1991; McCloskey, 1993; Tiwari vd., 2004; Lakshmi, 2009). Simpleks Metodunda tahmin yapmak için, faz uzayındaki m boyutlu bir noktalar kümesi seçilir. Bu işlemten sonra, verilerin alt kümesi, atık veri setinden ayrılır. Optimum simpleksi belirlemek için m boyut uzayındaki bir nokta $m+1$ en yakın komşu olarak tanımlanır. Bu durumda, simpleks dikeyde (tek yönlü), her faz uzayını çevreleyecek şekilde dizilir. Yerleştirme işlemi, bütün veri setleri üzerinden bir sıralama yapılarak bir simpleks etrafında dönerek yapılır (McCloskey, 1991; McCloskey, 1993). Doğrusal olmayan tahmin yaklaşımının temelinde en yakın komşuların bir “simpleks” davranışı gözlenerek bir noktanın pozisyonunun tahmini yapılır.

Simpleks seçim kriteri faz portresindeki noktaların merkez noktasına d mesafede olan noktaların tamamını sıralama yöntemine dayanır ve bu hesaplama için kullanılan Denklem 3.30 ile verilmiştir.

$$d = \left[\sum_{j=1}^m (X_{cj} - X_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad (3.30)$$

Burada X_{cj} , j . merkez noktasının j .koordinatını ve X_{ij} ise faz uzayındaki noktalar için j . koordinatı göstermektedir. Optimum simplex, r yarıçaplı bir yörüngede, V faz uzayının ürettiği hacimlerden biridir ve $\bar{d}$ merkez noktadaki bütün değişken vektörleri göstermektedir. Burada V iki sonraki ifade olarak Denklem 3.31 ile verilmiştir.

$$V \propto \left\{ \frac{1}{m+1} \sum_{i=1}^{m+1} \left[\sum_{j=1}^m (X_{cj} - X_{ij})^2 \right]^{1/2} \right\}^m \quad (3.31)$$

ve ortalama $\bar{d}$ değeri ise Denklem 3.32'deki gibi hesaplanır,

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{m+1} \left\{ \sum_{j=1}^m \Phi [(X_{cj} - X_{ij})^2] \right\}^{1/2} \quad (3.32)$$

Burada $\Phi = 1$ için $(X_{cj} - X_{ij}) > 0$ ve $\Phi = -1$ için $(X_{cj} - X_{ij}) < 0$ olacak şekilde değer aralığında bulunur. Bu tahmin metodları basit lineer interpolasyon yaklaşımları ile bulunur ve tahmin edilen koordinatların sonuçları kaydedilir (McCloskey, 1991; McCloskey, 1993).

Tahmin değerlerini elde etmek için hesaplanan orijinal tahminleyicilerin bu simpleks değişimi içinde olması gerekmektedir, bu mesafenin gerçeğini komşu noktalarının üstel değişimi verir. Seçilen simpleks köşeleri faz uzayındaki zaman adımları için hesaplanır ve yeni pozisyonlar elde edilir. Bütün dönüşümler, her faz yönünde eklenerek bu yolla merkez noktanın koordinatına eklenir (McCloskey, 1991; McCloskey, 1993; Tiwari vd., 2004; Lakshmi, 2009).

Zaman serileri için tahmin teknikleri, dinamik sistemin karakterinin niteliğini değerlendirmek için kullanılır ve kısa-dönem tahmin yordamalarında oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Doğrusal olmayan analizler, dinamik sisteminin yönetiminden sorumlu olan fiziksel mekanizması hakkında yüksek/düşük boyutlu kaotik yapı içerip-içermediği hakkında nihai fikir alabilmek için kullanılan bir yöntemdir (McCloskey, 1991; McCloskey, 1993; Tiwari vd., 2004; Lakshmi, 2009).



4. ÇALIŞMA BÖLGESİ

Deprem habercisi olarak bilinen toprak ^{222}Rn gazının doğrusal olmayan değişimi ile kaos analiz yöntemleri arasındaki ilişki pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (McCloskey, 1991; Bejar, 1995; Cuculeanu, 1996; Cuculeanu, 2001; Planinić, 2004; Das, 2009). Yapılan bu çalışmalarda ^{222}Rn 'nin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun yakınında yer alan Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin bölgelerine ait olan ^{222}Rn verileri ile çevresel parametrelerin (toprağın 10 cm, 20 cm, 50 cm derinlikteki sıcaklıkları, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıkları) ve ayrıca bu bölgelerde 2008-2010 yılları arasında istasyonlara 80 km yarıçapında meydana gelen deprem büyüklükleri arasındaki ilişki matematiksel olarak incelenmiş ve ^{222}Rn 'nin doğrusal olmayan davranışı kaotik zaman serileri analizi yöntemleri ile yorumlanmıştır.

Türkiye sınırları içinde sağ ve sol yönlü doğrultu atımlı, normal, bindirme ve yeni gelişmeye başlamış açılma çatlakları olarak belirlenen oldukça fazla fay sistemi mevcuttur (Şaroğlu, 1987; Kayabalı ve Akın, 2003). Şu ana kadar alüvyon örtüyle kapalı alanlarda yeterince araştırma yapılmamış olması bilinmeyen birçok diri fayın varlığının henüz tespit edilememiş olma olasılığını destekler niteliktedir. Tektonik gelişime bağlı olarak bugüne kadar Anadolu'nun depremselliği artmış, aktif faylar ve deprem kuşakları oluşmuştur (Şaroğlu, 1987; Şaroğlu, 1992).

Deprem geçmişte ve günümüzde sürekli beraber yaşamak zorunda olduğumuz ve değiştiremeyeceğimiz bir doğa olayıdır. Bununla beraber depremin yıkıcı etkilerinden korunmak ve oluşacak hasarı en aza indirmek mümkündür. Önemli deprem kuşaklarının birinin üzerinde olan ülkemizde, depremin yıkıcı etkilerini azaltmak için çeşitli deprem kestirim çalışmaları yapılmaktadır (King, 1978; Freidmann, 1988; Seidel, 1998; Saç ve Camgöz, 2000; Erees, 2001; Virk ve Singh, 2001; Zmazek, 2002; Zmazek, 2003; Külahcı, 2009; Saç ve Camgöz, 2013; Woith, 2015; Kamışlıoğlu ve Külahcı, 2016).

Alp-Himalaya tektonik bölgesinde bulunan Türkiye, yıkıcı ve hasar verici depremlerin oldukça fazla görüldüğü bir kuşakta yer almaktadır. Türkiye ve çevresinin Avrasya, Afrika ve Avusturalya levhalarının hareketleri etkisiyle güçlü depremlerin meydana geldiği

kuşakta yer alır (McKenzie, 1972). Anadolu levhasının güney sınırını, Türkiye'nin güneyinde Ege levhasının güney sınırı ile birleşerek Kıbrıs'ın güneyinden İskenderun körfezine, oradan da Kuzey Anadolu Fayı ile birleşerek Erzincan'ın doğusuna kadar (Karlıova bölgesinin 10 km doğusu) uzanan İskenderun köfrezisi ile Karlıova arasında, aktif sol yönlü doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fayını (DAF) izler. Bilindiği gibi DAF, sismolojik/sismotektonik özellikleri iyi bilinen dünyanın en önemli doğrultu atımlı faylarından birisidir ve Türkiye'nin en önemli tektonik hareketlerinin bulunduğu birisini oluşturmaktadır. İçerisinde birçok fay parçasını (segment) barındırdığı için de bir zon özelliği taşımaktadır ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) olarak adlandırılmaktadır. DAFZ, 1939 Erzincan Depremi sonrasında bilimsel açıdan ilk tanımlanması yapılmıştır ve sağ yönlü doğrultu atımlı fay olarak nitelendirilmiştir (Ketin, 1966; Ketin, 1968).

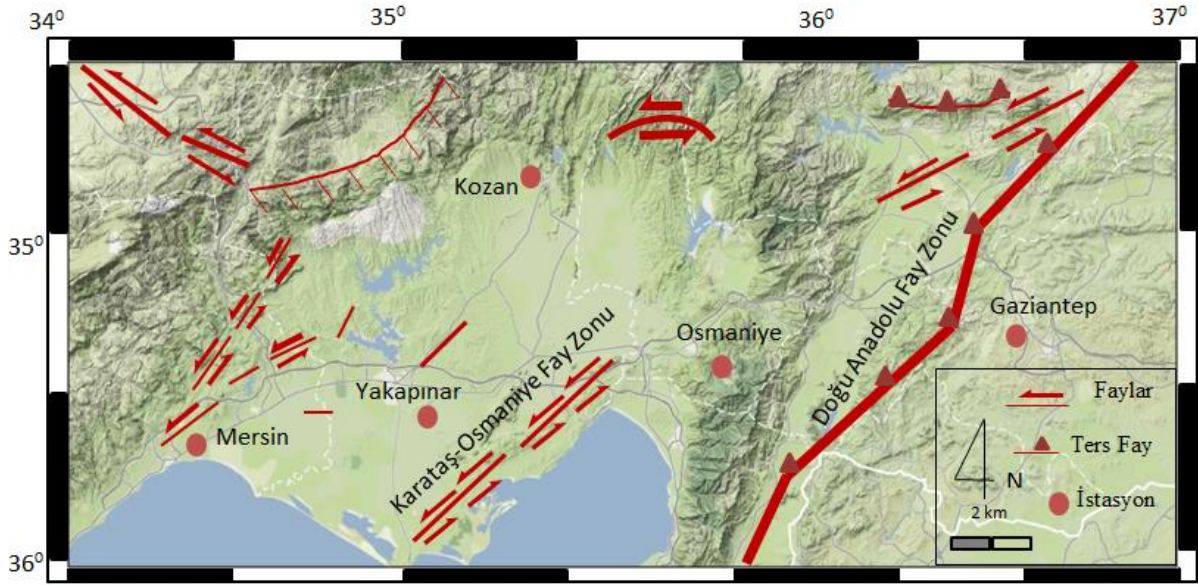
Türkiye'nin genç oluşumlu bir yapı olması nedeniyle henüz levha hareketleri devam etmekte ve bu durum ülkenin birinci dereceden deprem kuşağında yer almasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, çalışma alanı olarak Türkiye'nin en aktif fay hatlarını üzerinde bulundurduğu DAFZ ve çevresindeki bölgelerden Gaziantep, Adana, Osmaniye ve Mersin bölgelerine ait istasyonlardan Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin istasyonlarından elde edilen veriler kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan istasyonlara yakın fayların olduğu harita Şekil 4.1 ile gösterilmiştir. Bu istasyonlara ait enlem, boylam ve diğer özellikler ise Tablo 4.1'de verilmiştir. Her bir istasyon için eksiksiz veri ölçüm zamanı 2008-2010 yılları arasında olduğu için çalışma, her istasyon için kullanılabilecek zaman dilimi olması için 2008-2010 yılları arasındaki ^{222}Rn konsantrasyonu ve çevresel parametrelere ait veriler için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışma istasyonları hakkında genel bilgi

İl	Boylam	Enlem	İstasyonun Yeri*	^{222}Rn ölçüm tarih aralığı
Gaziantep	36.70757	37.16434	Nurdağı (Gökçedere)	2008-2010 (06.04.2008-06.06.2010)
Osmaniye	36.29781	37.08418	Osmaniye (Çardak Köyü)	2008-2010 (06.04.2008-06.06.2010)
Adana	35.80364	37.44426	Kozan	2008-2010 (01.01.2008-01.05.2010)
Adana	35.62737	36.95122	Yakapınar (Yüreğir, Geçitli)	2008-2010 (01.01.2008-01.06.2010)
Mersin	34.5706	37.16443	Çamlıyayla (Taliç Mah)	2008-2010 (01.01.2008-06.06.2010)

*Her bir istasyonda 1 gün için; 24 saat $\times$ 4 =96 kez ölçüm alınmıştır (Çalışma bir yıl için= 366 $\times$ 96=35136 tane ölçümden oluşmaktadır).



Şekil 4.1. Araştırma istasyonları

Ölçüm alınan istasyonların genel tektonik özellikleri, jeolojik yapısı ve toprak özellikleri incelendiğinde; bu bölgelere ait toprak yapısının genel karakteristik özellikleri hakkında detaylı bilgi edinildi. Çalışma bölgelerimizden olan, Adana bölgesinin ve yakın çevresinde bulunan depremleri ana ya da büyük levhalar olarak tanımlanan Avrasya-Afrika-Arap levhaları arasındaki hareketler tarafından belirlenmektedir. İnceleme bölgesinin de içinde yer aldığı, Kozan-Feke-Saimbeyli bölgesinde, Güneyde Adana havzasında bulunan Toros ve Amanos dağları stratigrafik istifleri arasında yer almaktadır. Bu bölgeler arasında çökelen Tersiyer eski formasyonlar, sıkışma hareketlerinin etkisiyle bugünkü şekillerini almışlardır. Alp-Himalaya kıvrımının sismik dağılımı homojen değildir. Bu alanın sismisitesi levhalara yakın bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Çalışma alanımızın içinde bulunduğu Akdeniz ve çevresinde üç ana levhanın bölgedeki sismik harekette etkisinin olduğunu söyleyebiliriz (Le Pichon, 1968; McKenzie, 1970; Rojay, 2001). Bu levhalar, Afrika, Avrasya ve Arap levhalarıdır. Yerel sismik davranışın levhaların hareketleri sonucu oluştuğu söylenebilir (Bilgin vd., 1981).

Diğer bir araştırma bölgesi; Osmaniye bölgesi, Yumurtalık Fayı ile Amanos Dağları arasında konumlanmıştır. Kozlu (1996) Karataş-Osmaniye fay zonunun tektonik olarak ayrı ayrı inceleyerek aktif bir sismisiteye sahip olduğunu göstermiştir. KB-GB doğrultulu faylardan olan bu faylar, Orta Miyosen sonu gelişmiş Misis yükselimi sonrası dönem ile ilişkilidir. Bu doğrultudaki faylar, Üst Pliyosen ve sonrasındaki döneme ait olmak üzere, bölgenin genişlemeli tektonik rejiminin etkisi altında gelişmiş normal faylardan

oluşmaktadır (Kozlu, 1996). Kozan fayı, Kozan ilçesinin güneyinden başlamakta ve İmamoğlu ilçesinin kuzeyinden geçip, DKD-BGB doğrultusundan Mersin iline doğru devam etmektedir. Bu fay Adana Neojen havzasının açılmasında güçlü rol oynayan en önemli tektonik hatlardan biridir. Fayın ilk durumda Alt Miyosen veya Üst Eosen-Oligosen olup, daha sonra aktif hale gelmiştir. Kozan fayı, Adana Miyosen havzasının ayrılmaya başlamasından önce olduğu için, Neojen istif tarafından kaplanmıştır (Kozlu, 1996).

İnceleme alanlarından bir diğeri olan Gaziantep bölgesi, karmaşık bir istif gösteren kaya toplulukları tarafından temsil edilir. Bölgedeki yapılar genellikle, volkanik kaya, kumtaşı, silisli şeyl, killi kireçtaşı ve tektonik olarak ofiyolitlerden oluşmuştur. Gaziantep fayının, kireçtaşı ve tebeşirden oluşan bir yapısının olduğu ve yumuşak bir topografik özelliğe sahip olduğu ilk olarak Wilson ve Krummenacher (1957) tarafından incelenmiştir. Gaziantep bölgesindeki yapısal, alt miyosen, alt paleosen, orta paleosen ve üst miyosen formasyonlarından oluşmuştur. Yumuşak topografik özellik gösteren killi ve tebeşirli kireçtaşlarından oluşmuştur. Bu yapısından dolayı Doğu Anadolu Fayı ile ilişkili ya da Orta Miyosen'de başlayan sıkışmanın sebep olduğu açılımlarla alakalı olabileceği düşünülmüştür. Gaziantep ve yakın çevresindeki fayların yapısıyla alakalı, genellikle karmaşık bir yapıdan oluştukları söylenebilir (Karig ve Kozlu,1990; Sungurlu, 1972).

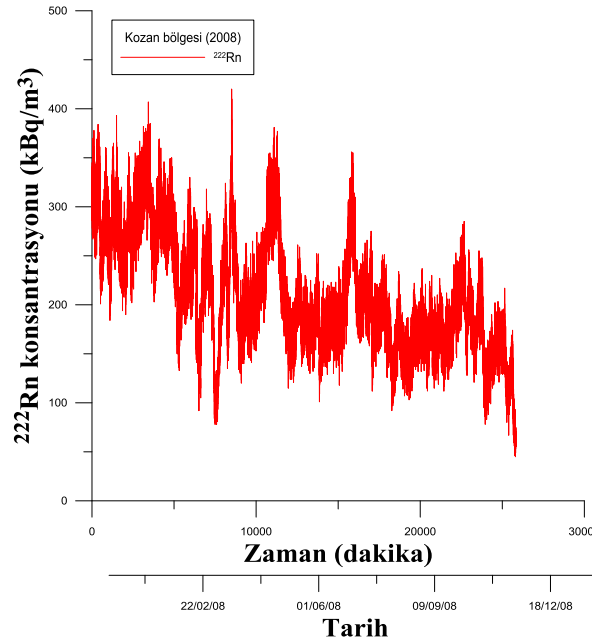
Son çalışma bölgemiz olan; Mersin fayı, batıda sağ yönlü Kırkkavak Fayı, doğuda sol yönlü Ecemiş Fayı olmak üzere iki ana doğrultu atımlı fay arasında yer almaktadır. Mersin bölgesindeki fayların genel doğrultusu KD-GB yönlüdür ve bindirme yönlerine paraleldir (Demirtaşlı, 1981).

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

5.1.Kaos Metodolojilerinin Uygulanması

5.1.1. Zaman Serileri Analizi

Dinamik sisteme ait sistem özellikleri hakkında nicel ve nitel analizler yapılmadan önce sisteme ait değişkenlerden oluşan tek boyutlu zaman dizisinin incelenmesi gerekmektedir. Kaydedilen bu zaman dizileri sistem dinamikleri hakkında güçlü yorumlamalar yapmamıza yardımcı olmaktadır. Eşit zaman aralıklarında alınan ölçümlerden oluşturulan zaman dizileri, sistem davranışı hakkında genel bir bakış açısına sahip olmamız açısından oldukça önemlidir. Doğal olaylar genellikle doğrusal olmayan davranış gösterirler. Ancak bu doğrusal olmama durumunu tespit etmek için matematiksel olarak ifade edilemeyen, matematiksel ifadesi olsa bile tam çözümü yapılamayan dinamik durum değişkenlerinin analiz edilmesi, dinamik sistemden kaydedilen zaman dizileri hakkında bilgi almamıza yardımcı olur. Bu tez çalışmasında, aktif fay zonları ve yakınlarında bulunan yerleşim yerlerindeki Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin (Çamliyayla) istasyonlardan 2008, 2009 ve 2010 yıllarında alınan ölçümler için yapılmıştır.



Şekil 5.1. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2008 yılı Kozan bölgesi)

Çalışmada yapılan uygulamalar; MATLAB®, TISEAN, SPSS 16.0, ve Grapher 8 programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, aktif fay zonları ve yakınlarında bulunan yerleşim yerlerindeki Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin istasyonlardan 2008, 2009 ve 2010 yıllarında alınan ölçümlere göre çizilen zaman serileri grafikleri Ek 1’de Şekil 1-14’te verildi. Örnek olarak, Kozan istasyonu için 2008 yılına ait zaman serisi grafiği Şekil 5.1’de gösterildi.

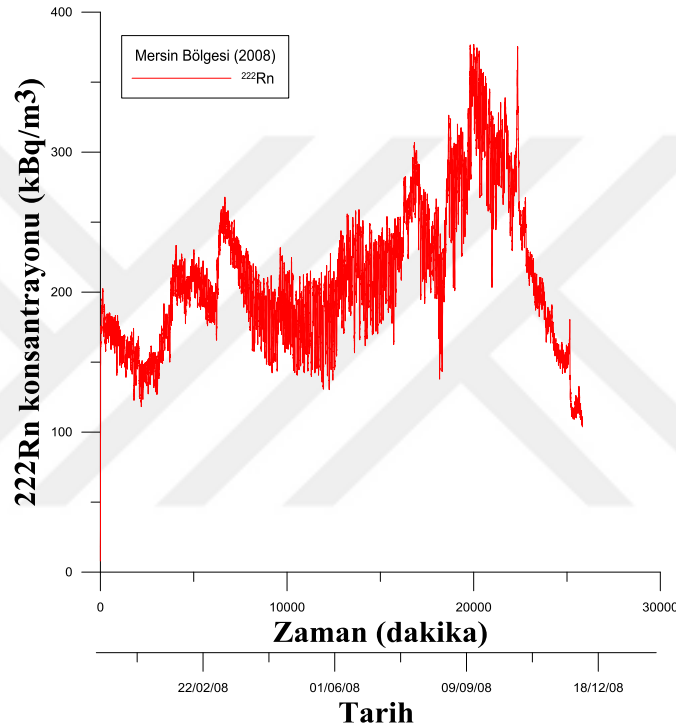
2008, 2009 ve 2010 yılları boyunca eşit zaman aralıklarıyla alınan verilerden oluşturulan zaman serileri, bölgelerin alfabetik sıralamalarına göre elde edildi. Kozan bölgesi 2009 ve 2010 yıllarına ait oluşturulan zaman serileri Ek 1 Şekil 1-2, ile Mersin Bölgesi için 2008, 2009 ve 2010 yıllarına ait zaman serileri Ek 1 Şekil 3-5, ile Nurdağı Bölgesi 2008, 2009 ve 2010 yıllarına ait zaman serileri Ek 1 Şekil 6-8, ile Osmaniye Bölgesi 2008, 2009 ve 2010 yıllarına ait zaman serileri Ek 1 Şekil 9-11, ile ve Yakapınar Bölgesi’nin aynı yıllara ait zaman serileri Ek 1 Şekil 12-14, ile verilmiştir ve tüm tez boyunca bu sıraya göre analizler yapılmıştır.

Elde edilen bu zaman serilerinin nitel incelenmesi, rastgele olmayan ve aynı zamanda gürültü gibi bir davranış göstermeyip kaotik yapı gösteren zaman serilerine ait olan durum değişkenlerinin karakteristiğini anlamamız açısından oldukça önemlidir. Ekte sunulan şekillerden de görülebileceği gibi ^{222}Rn ölçümleri herhangi bir periyodiklik, rastgelelik ya da gürültü işaretleri gibi bir davranış göstermemektedir. Bu durum, verilerde kaos aranabileceğinin bir göstergesidir. Ancak daha önce açıklandığı gibi yörüngenin izlenmesi yöntemi nitel bir analiz yöntemi olduğu için tek başına zaman dizilerinin doğrusal olmayan özelliklerinin açıklanmasında yeterli değildir. Bu yüzden bir sonraki bölümde açıklanacak olan Lyapunov Üstelleri, Hurst Üstelleri, Güç Spektrumu, Korelasyon Boyutu, Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu, Geçici En Yakın Komşuluk Metodu gibi yöntemlerle de bu analizden elde edilen sonuçların doğrusal olmayan davranış gösterdiği doğrulanmıştır.

5.1.2. Zaman Serisi Analizi Yapılan Veriler için Filtre Kullanılması

Dinamik sistemlere ait olan değişkenler için doğrudan elde edilen zaman dizilerinde, verileri toplamak şüphesiz oldukça karmaşık bir işlemdir. Bu verilerin elde edilmesinde değişkenlerin dönüştürülmesi ve verilerin toplanmasının yanında filtre edilmesi de gerekebilir. Verilerin ölçüldüğü detektörün/cihazın oldukça hassas olması gerekmektedir.

Bu nedenle, cihaz yüksek ya da düşük frekansların daraltıldığı, sınırlı bir bant genişliğine sahip olmalıdır. Bazı durumlarda ise zaman türevlerini ya da değişkenlere ait integralleri hesaplanıyor olması gerekmektedir. Birçok durumda sadece sinyal ve gürültünün derecesi ile yapılan filtreleme, ya çok az olmalıdır ya da hiç olmamalıdır. Doğrusal olmayan filtreleme bazı durumlarda çok iyi bir şekilde kullanılmaktadır (Broomhead, 1992, 1996, Başkurt, 2011; Kamyşhoğlu, 2014; Namvaran, 2015). Böylece yapılan analizlerin güvenilirliği artmış olur.



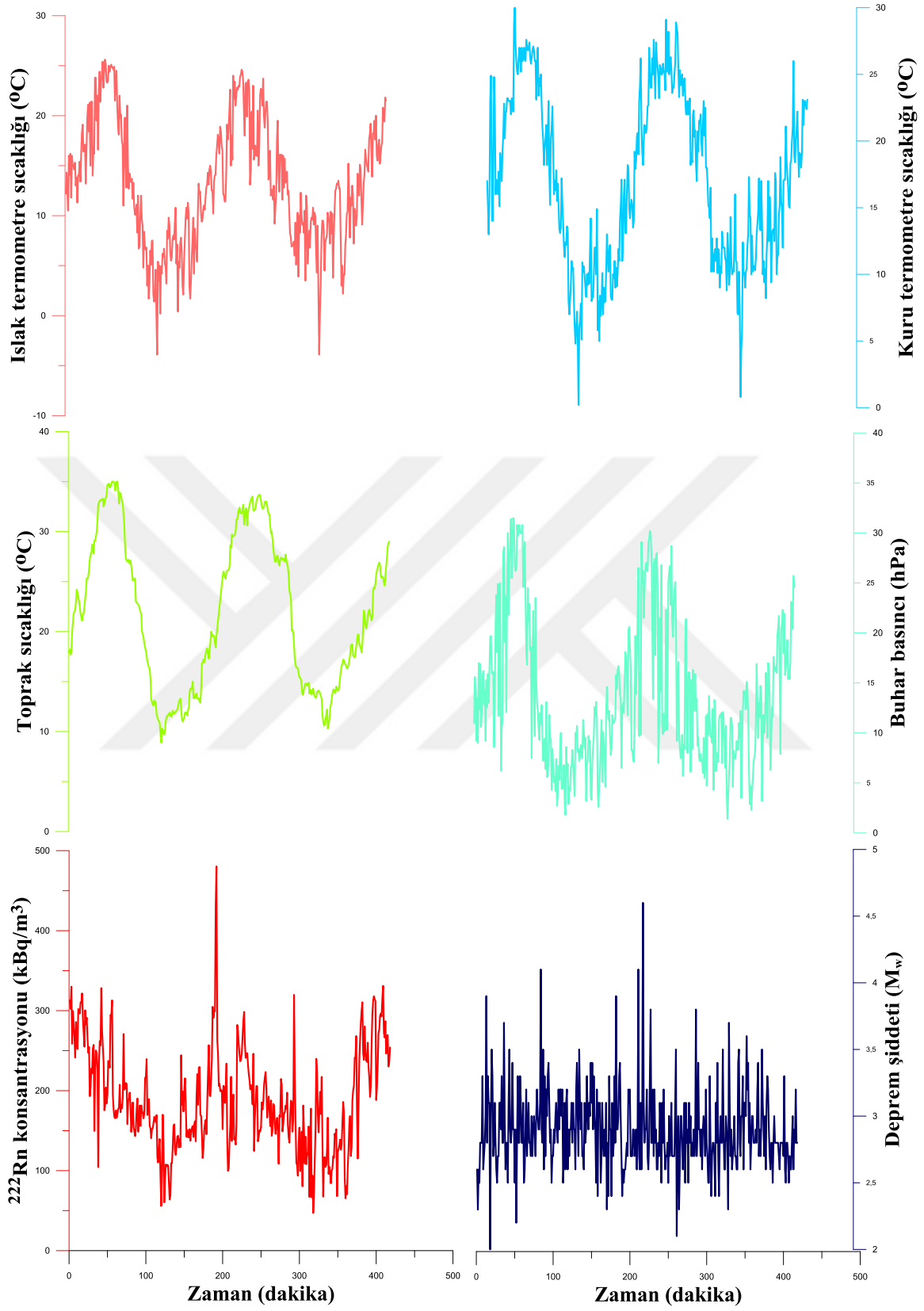
Şekil 5.2. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi 10.dereceden FIR Kaiser pencereli (2008 yılı Mersin bölgesi)

Çalışma bölgelerimiz olan Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin istasyonlardan alınan ölçümlerden elde edilen zaman serileri için elde ettiğimiz grafiklere bakarak gürültü içeren bölgelere ait filtre edilmiş grafikler Ek 2 Şekil 1-6'da verildi. Örnek olarak, Mersin istasyonu için 2008 yılına ait 10. dereceden FIR süzgeci ile filtreleme işlemi Şekil 5.2'de gösterildi. Elde edilen zaman serilerine baktığımızda ^{222}Rn gazı konsantrasyonu açısından gürültü içeren ve analiz yapılması için uygun olmayan piklerin varlığından söz edebiliriz. Osmaniye 2008, 2009 ve 2010 yılları için çizilen grafikler Ek 2 Şekil 1-3, Yakapınar bölgesi 2008, 2009 ve 2010 yıllarına ait zaman

serileri Ek 2 Şekil 4-6'da verilen grafikler gürültü içermektedir ve bu durum verilerin sağlıklı bir şekilde analiz edilmesi için sorun oluşturmaktadır. Bu yüzden sadece analiz işlemlerimizi kolaylaştırmak için, gürültülü bölgelere filtre uygulanmıştır. Bu tarz grafiklerin tespit edildikten sonra sistem davranışını ayırt edebilmek için grafiklere 10. dereceden Kaiser pencereyi bir pencereyi filtre uygulanmıştır. Filtre edilmiş verilere ait elde edilen grafikler; Ek 2 Şekil 1-6'da verilmiştir. Ek 2'de verilen şekillerde de görüldüğü gibi keskin kesim frekansı 100 Hz olan 10. derece yüksek geçiren FIR süzgeç kullanıldı. Kayıt işlemleri ve cihaza bağlı olarak oluşan geniş bantlı gürültülerin giderilmesi için de dalgacık analizi kullanıldı. Veriler filtre edildikten sonra sistem ya da ölçüm hatalarından kaynaklanan gürültüler elimine edildi.

5.1.3. Çevresel Parametrelerin ^{222}Rn ile Olan Değişimi ve Temel İstatistiksel Analiz Sonuçları

Doğadaki jeofiziksel gözlem ve incelemeler sonucu; depremler sırasında meydana gelen değişikliklerin dinamik sistem olarak görülen jeofiziksel sistemlerin davranışlarını da değiştirdiği sonucuna varıldı (McCloskey, 1991; Bejar, 1995; Cuculeanu, 1996; Planinić, 2004). Depremlerin oluşumları sırasında ^{222}Rn gazı anomalilerinin yanı sıra, atmosferik basınç, yağış ve toprak sıcaklığı gibi meteorolojik parametrelerin de incelenmesi gereklidir (Friedmann ve Hernegger, 1978; Külahcı vd., 2009). Bu çalışmada; Gaziantep, Adana, Osmaniye ve Mersin yerleşkelerinde ölçülen ^{222}Rn ve toprağın (10 cm, 20 cm, 50 cm) derinlikteki sıcaklıkları, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıkları gibi bir takım çevresel parametrelerin deprem şiddetiyle olan değişimleri istatistiksel olarak incelendi. Çalışma istasyonlarından 2008-2010 yılları arasında alınan ^{222}Rn gazı konsantrasyonu, deprem ve meteorolojik parametreler arasındaki değişimleri gösteren grafikler Ek 3 Şekil 1-4'te verildi.



Şekil 5.3 Kozan Bölgesi için ^{222}Rn konsantrasyonu, deprem şiddeti, toprak sıcaklığı, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarının değişim grafiği

Kozan Bölgesi için ^{222}Rn konsantrasyonu, deprem şiddeti, toprak sıcaklığı, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarının değişim grafiği Şekil 5.3'te gösterildi. İstatistiksel değerlendirmesinde, ilk olarak frekans, yüzde, aritmetik ortalama, standart sapma ve varyans analizleri yapıldı. Daha sonra seriler için parametrik olmayan testlerden, Kolmogorov-Smirnov testleri yapılarak, değişkenlerin birbiri arasındaki değişimin yönünün ve gücünün belirlenmesi için korelasyon analizleri yapıldı. Tüm analizlerde $p < 0.05$ istatistiksel olarak anlamlı kabul edildi. Uygulama yapılan beş bölge için Skewness ve Kurtosis katsayılarına bakıldığında, normallik sınırlarının ($\pm 1,96$) dışında kaldığı görüldü. Analiz sonuçlarına göre, verilerin doğrusalsızlığı tespit edilerek, birbirleri arasında olan korelasyon ilişkilerine bakıldı ve sonuçta ^{222}Rn serilerine kaotik analizlerin yapılmasının uygun olduğu görüldü. Zaman serilerinin temel istatistiksel analiz sonuçları Ek 12. Tablo 1-5 ile verildi.

Kolmogorov-Smirnov testi, zaman dizilerinde örnekleme yoluyla elde edilen dizilerin, gözlenen değerlerinin, teorik (beklenen) değerlere uygun olup-olmadığını gösteren bir testtir. Kolmogorov-Smirnov testi; verilerin doğrusal olup olmadığının tespit edilmesi için kullanılan tanımlayıcı bir istatistik analiz yöntemi olduğu için bu çalışmada verilerin doğrusalsızlığını tespit etmek için kullanıldı. Veri setimiz doğrusal olmayan yapıda olduğu için Kolmogorov-Smirnov testi kullanılarak ^{222}Rn gazı, deprem ve meteorolojik parametrelerin doğrusalsızlığı tespit edildi. $p < 0.05$ olduğundan, istatistiksel olarak anlamlı bulundu. Verilerin Kolmogorov-Smirnov testinden elde edilen sonuçlar Ek 12 Tablo 6-10'da gösterildi. Tablolara bakıldığında, deprem şiddeti, ^{222}Rn ve meteorolojik parametrelerin normal dağılıma uymadığı görüldü.

Verilerin doğrusal olup olmadığı test edildikten sonra, ^{222}Rn gazı, deprem ve meteorolojik parametrelerin arasındaki ilişkilerin derecesini ölçmek için korelasyonlarına bakıldı. Ancak bunun için normallik şartını sağlamayan veriler log-log sklasında yeniden çizilerek korelasyon analizi yapıldı. Korelasyon analizlerinin sonuçları Ek 12. Tablo 11-15 ile verildi. Tablolara bakıldığında, deprem şiddeti ile ^{222}Rn konsantrasyonu arasında zayıf korelasyon, meteorolojik parametrelerin birbiri arasında orta dereceli korelasyonun varlığından söz edilebilir. Ek 12. Tablo 11-15 incelendiğinde, toprak ^{222}Rn konsantrasyonu ile meteorolojik değişkenler arasında düşük korelasyon katsayısının varlığı, bu değişkenler arasında güçlü bir ilişki bulunmadığını gösterdi. Çalışma istasyonlarının 2008-2010 yılları arasında ölçülen ^{222}Rn konsantrasyonu, deprem şiddeti ve meteorolojik parametrelerin

değişim grafikleri Ek 3 Şekil 1-4'te gösterildi. Ortaya konan zaman serilerinin kaotik özellik gösterme durumu diğer bulgularla desteklenerek açıklandı.

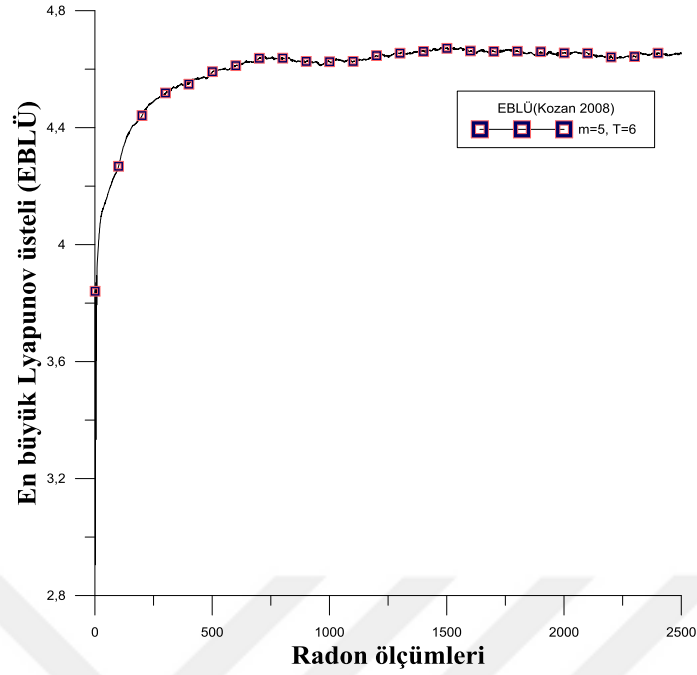
5.2. ²²²Rn Verilerinin Kaotik Zaman Serisi Analizi Yöntemleriyle İncelenmesi

Kaos, deterministik bir sistemin düzensiz ve beklenmedik bir şekilde davranabilmesidir. Kaosun meydana gelmesi, ilgilenilen dinamik sisteme ait bazı değişkenlerin belirli parametrelere bağlı olduğu gibi dinamik sistemin yapısına da bağlı olduğu Bölüm 3.4'te söylendi. Kaos; kararsız, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde görülmektedir. Bu yüzden, kaos teorisinin uygulanacağı zaman dizilerinin doğrusal olmadığının gösterilmesi gerekir. Kaydedilen bir zaman serisinin kaotik bir yapıda olup olmadığını anlamak için tek başına zaman dizisinin nicel olarak incelenmesi, bu zaman dizisinin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğunu söylememiz için yeterli değildir, fakat aranan şartlardan biridir. Kaos teorisine göre, sistem çok boyutlu olsa bile, tek-boyutlu bir zaman dizisi kullanılarak sistemin davranışını tahmin edilecek şekilde modelleme yapmak mümkündür.

Kaotik sistemlerin en önemli özelliği başlangıç şartlarına hassas bağımlı olmasıdır. Buradan hareketle, kaotik sistemlerin ürettiği işaretler periyodik ya da yarı periyodik işaretler gibi değildir. Grafikleri karmaşık görünümlüdür ve ilk bakışta sistemin belli bir düzene göre hareket etmediği izlenimini verir. Hassas ölçümler sonucu, zaman serisi şeklinde kayıt edilen verilere ait olan çekerlerin çizilebilmesi için faz uzaylarının yeniden kurulması gerekmektedir. Bunun için, topraktan alınan ²²²Rn verilerinden zaman serilerini oluşturacak şekilde sinyaller kaydedildi ve bu sinyallerden faz uzayının gömme boyutu hesaplandı. Elde edilen gömülü boyutlarda veriler faz uzayında yeniden oluşturularak, vekil veri analizi yapıldı. Oluşturulan yeni boyutlu zaman serilerinin en büyük Lyapunov üstelleri hesaplandı. Daha sonra Korelasyon Boyutu, Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu, Geçici En Yakın Komşuluk metodları ile kaotik serilerin varlığı ispatlanarak, bu serilerin tahmin hesaplamaları yapılarak dağılım grafikler Bölüm 3.4.1 ile Bölüm 3.4.8'de bahsedildi.

5.2.1. Lyapunov Üsteli

Doğrusalsızlığı tespit edilen dinamik sistem için en büyük Lyapunov üstellerinin pozitif değerler alması, elde edilen zaman dizisi için kaotik yapının varlığının en büyük göstergesidir.



Şekil 5.4. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

Bu çalışmada, ^{222}Rn verilerinden oluşan tek boyutlu zaman serileri için, Sano ve Sawada algoritması kullanılarak istasyonlardan alınan ölçümler için; hesaplanan en büyük Lyapunov üstelleri Ek 4 Şekil 1-14’te verildi. Örnek olarak Kozan istasyonu için 2008 yılına ait En Büyük Lyapunov Üsteli grafiği Şekil 5.4’de gösterildi. Verilerin analizi sonucu elde edilen en büyük Lyapunov üsteli pozitif değere sahip olduğu için dinamik sistemin kaotik davranışa sahip olduğunu söyleyebiliriz. 01.01.2008–01.01.2010 yılları arasında düzenli olarak ölçülen radon verileri üzerinde yapılan kaotik zaman serisi analizi sonucunda, en büyük Lyapunov üstelleri, Tablo 5.1’de verildi. Elde edilen sonuçlar, Das (2009)’da gerçekleştirdiği çalışma ile büyük oranda uyumludur. Bu çalışma, daha büyük bir veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1. Çalışma istasyonlarına ait En Büyük Lyapunov Üstel değerleri

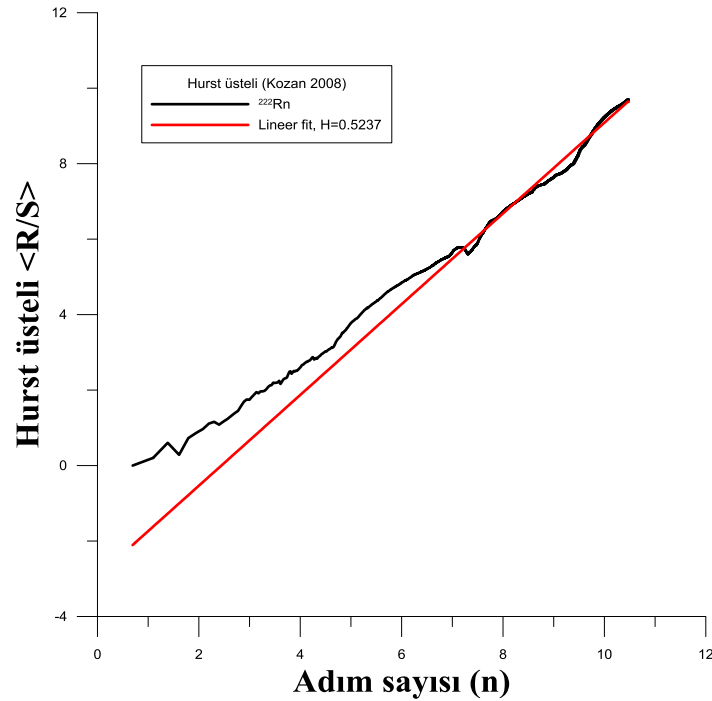
İstasyonlar	En Büyük Lyapunov Üsteli Değeri		
	2008	2009	2010
Kozan	4.4743	4.7043	4.8763
Mersin	4.6709	4.5320	3.8131
Nurdağı	4.9923	5.0677	5.1147
Osmaniye	3.5532	3.8070	3.0390
Yakapınar	3.9612	3.9370	3.6316

Farklı gömülü boyutlar için birden fazla pozitif Lyapunov üsteli bulunmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, Ek 1 Şekil 1-14’de verilen bu zaman serilerinin dinamik yapılarının rassal ya da gürültü benzeri işaretler değil, kaotik yapıda yani kendi içinde bir düzene sahip yapılar olduğunun bir sonucudur. Bu sonuç, kaotik yapı gösteren bu zaman serilerinin kısa dönemli tahmininin mümkün olduğunu göstermektedir.

Lyapunov üsteli çok küçük pozitif bir sayı olarak bulunmuştur. Lyapunov üstelinin pozitif olması uzun süreli tahmin yapmanın imkânsız olduğunu, çok küçük olması ise ^{222}Rn miktarının çok yavaş değiştiğini ve kısa süreli tahmin yapmanın mümkün olduğunu göstermektedir.

5.2.2. Hurst Üsteli

Dinamik sistem davranışının incelenmesi için incelenilen parametrelerin elde edilmesine yönelik kullanılan uzun dönemli hafızaya sahip olma durumu, Hurst üsteli yorumlanarak yapılabilir. Hurst üstelinin hesaplanması ek istatistiksel analiz yöntemlerindendir. ^{222}Rn verilerinden oluşan zaman serileri Ek 5 Şekil 1-14’te verildi.



Şekil 5.5 ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

Örnek olarak Kozan istasyonu için 2008 yılına ait Hurst Üsteli grafiği Şekil 5.5’de gösterildi. Eğer Hurst üsteli 0.5’e eşit ise, o zaman dinamik sistemin davranışı rastgele davranışı (random walk) gösterir. Bu durum, dinamik sistemin tahmin edilebilir bir davranış sergilemediğini gösterir. Hurst üstelinin 0.5 ve 1 arasında değerler alması, sistemde kaosu varlığını göstermektedir. Hurst üstelinin 0 ve 0.5 arasında bir değer alırsa, zaman serisinin rastgele davrandığını gösterir. İşlem yapılan herhangi bir istasyonu örnek olarak alacak olursak, Kozan istasyonu için 2008 yılında alınan ^{222}Rn verileri için oluşturulan zaman serisi için, Denklem (24) ile Hurst üsteli 0.56 olarak hesaplandı. Bu hesaplama sonucunda elde edilen değer sistemde kaos varlığının bir göstergesidir.

01.01.2008–01.01.2010 yılları arasında düzenli olarak ölçülen radon verileri üzerinde hesaplanan Hurst üsteli değerleri, Tablo 5.2’de verildi.

Tablo 5.2. Çalışma istasyonlarına ait Hurst Üstel değerleri

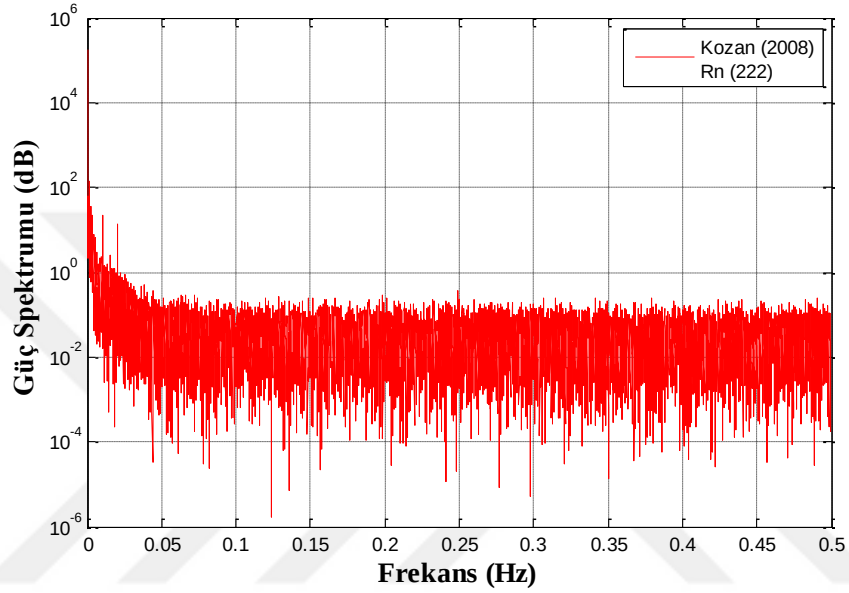
İstasyonlar	Hurst Üsteli Değeri		
	2008	2009	2010
Kozan	0.5237	0.4638	0.4687
Mersin	0.5059	0.5901	0.6467
Nurdağı	0.5609	0.5646	0.5313
Osmaniye	0.6675	0.7167	0.5026
Yakapınar	0.7660	0.6013	0.4069

Hurst üstel değerinin bire yakın olması, serinin uzun dönemli hafızasının ne kadar anlamlı olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile bu değer, deprem kestirim çalışmalarında sıklıkla kullanılan toprak ^{222}Rn gazının zaman serisi davranışına bakılarak, uzun dönemli hafızanın olduğu anlamına gelmektedir (önceki değerlerden etkileniyor yani). Topraktan yayılan radon gazının önceki değerleri ile korelasyonu ise denklem 3.12’den hareketle, 0,7301 olarak elde edildi. Dolayısı ile bu değer sonra oluşacak verilerin önceki değerleri ile ilişkili olduğu şeklinde yorumlanabilir.

5.2.3. Güç Spektrumu Analizi

Bir zaman serisi için kaotik sinyallerin görünüşü (varoluşu), dinamik sistemlerin güç spektrumu analizi yapılmasıyla da elde edilebilir. Eğer spektrumun pikleri sürekli ise, kaosu varlığından söz edilir. Ancak, güç spektrumu, rastgele dalgalanmalarda tamamen

rastgele davranışlar gösterir. Güç spektrumu, bir tek frekans bileşenine ait olan çeker bölgesinde “gürültü” olarak görünebilir. Kaotik olmayan sinyaller için bu yapının var olmadığı görülebilir. Dar bantlı kaosa sahip olan sistemlerin spektrum yoğunlukları grafikte uzun ve geniş pikler gösterir. Bu yapıların, faz uzayında birbirine yakın periyodik yapılara sahip oldukları görüldü. Eğer güç spektrumu geniş bantlı kaosa sahip ise, o zaman grafikteki pikler uzun ve geniştir fakat bu pikler belirsizdir.



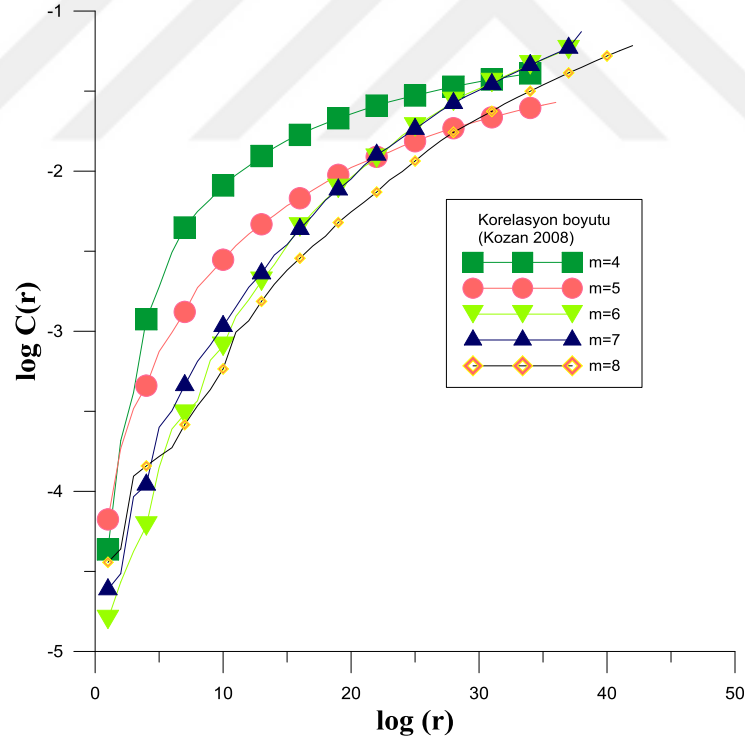
Şekil 5.6. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

İstasyonlardan alınan ^{222}Rn verilerinden elde edilen zaman serisi için Güç Spektrumuna ait grafikler Ek 6 Şekil 1-4’te verildi. Örnek olarak Kozan istasyonu için 2008 yılına ait Güç Spektrumu grafiği Şekil 5.6’da gösterildi. Elde edilen sonuçlar, Das (2009)’da gerçekleştirdiği çalışma ile büyük oranda uyumludur. Bu çalışma daha büyük bir veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, $1/f$ frekans ölçeklendirilmesi kaydedilen zaman serisi için, kendine benzeyen örneklerle sahip bir model sunar ve zamansal kesrin (fraktal) bir türü olarak düşünülebileceğini gösterir. Güç spektrumlarında geniş bantlı gürültü, gerek stokastik gerekse deterministik süreçlerde ortaya çıkabilmektedir. Bu iki durum arasındaki fark sadece büyük frekans değerlerinde ortaya çıkar (Brandstater ve Swinney, 1987). Burada, keskin kesim frekansının keskin pikler göstermesi, güç spektrumunun dar bantlı bir yapı göstermesi zaman serilerinin kaotik olduğunu göstermektedir.

5.2.4. Korelasyon Boyutu

Korelasyon integralinin çift logaritmik eksen takımında verdiği lineer bölgenin eğiminin Korelasyon Boyutuna karşılık geldiğine Bölüm 3.12’de değinilmişti. Buna göre, Korelasyon Boyutunu elde etmek için $\log(r)$, $\log C(r)$ ’nin bir fonksiyonu olacak şekilde çizilir. Böylece, Korelasyon Boyutunun alacağı değerlere bakılarak korelasyon analizi yapılır. Verilerden geçirilen fit eğrisinin eğimi Korelasyon Boyutunun nümerik sonuçlarını D_2 vermektedir. Deterministik kaotik süreç için, farklı gömme boyutlarına (m) karşı gelen korelasyon boyutları, aktif fay zonları ve yakınlarında bulunan istasyonlardan alınan ^{222}Rn ölçümlerinden elde edilen zaman serileri için elde edildi. Korelasyon boyutlarına ait grafikler Ek 7 Şekil 1-14’te verildi. Örnek olarak Kozan istasyonu için 2008 yılına ait Korelasyon Boyutu grafiği Şekil 5.7’de gösterildi.



Şekil 5.7. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

m değeri arttırıldıkça $D(m)$ belirli bir değerde sabitlenerek doyuma ulaşır ve bu değer korelasyon boyutunu verir. Bu eğrinin eğiminin sıfır olduğu noktanın apsisi, çekerin kaç boyutlu bir uzay içerisine gömüleceğini gösterir. Kaotik deterministik süreçlerde belirli bir zaman periyodu için korelasyon boyutlarına karşılık gelen gömme boyutları Ek 7'deki grafiklerle verildi. Zaman dizisinin durağan olmaması veya az sayıda veri içermesi ilinti boyutu değerinin olması gerekenden düşük çıkmasına neden olmaktadır. $C(r, m)$ korelasyon boyutu ifadesi, gömülü boyut değeri m ; 3-8 aralığında artırılarak hesaplanmış ve gecikme zamanı için $\tau = 2$ olarak seçildi. D_2 ise *log-log* eksenlerde çizdirilen eğrilerin doğrusal kısımlarının eğimleri olarak hesaplandı.

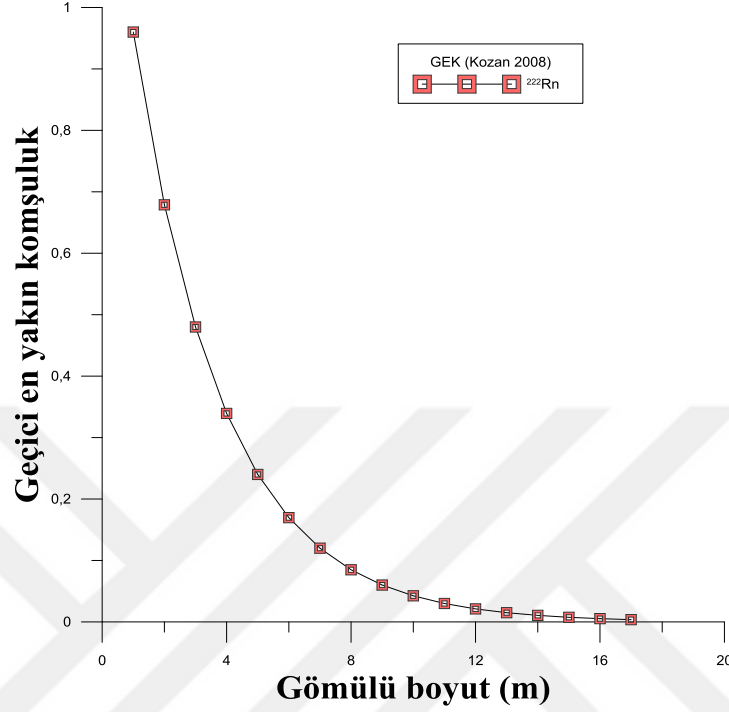
Ek 7'de sunulan şekillerde de gösterildiği gibi 3'ten 8'e kadar değişen m değerleri için hesaplanan korelasyon boyutu değerlerine üstel eğriler fit edildi. Pratikte, korelasyon boyutu değerlerinin hesabı için, veri kümesindeki noktaların tamamı kullanıldığında çok uzun zaman harcandığından, sadece belirli sayıda noktanın referans nokta olarak seçileceğini söylemiştik. Bu çalışmaya ait yazılan MATLAB® programında da bu nedenden dolayı, veri sayısının onda biri referans nokta olarak kullanıldı.

Theiler parametreleri $\omega=10$, $\ln(r)$ 'nin bir fonksiyonu olarak gömme boyutu ve gecikme süresi kullanılarak korelasyonun şiddeti çizildi. Sonuçlar düşük boyutlu doğrusal olmayan deterministik süreçlerin altında yatan sebepleri açıkça göstermektedir. Çekerin boyutu kesirli ve 2'den büyük olduğundan çekerin kaotik harekete sahip ve acayip çeker olduğu anlaşıldı. Ek 7 Şekil 1-14'te de verilen eğrilerdeki gibi değilse ve eğri lineer devam ediyorsa ve eğer D_2 belli bir m değerinden itibaren doyuma ulaşmıyorsa söz konusu süreç rastgeledir, kaotik değildir. Ekteki şekillere baktığımızda, sonuçların açıkça güçlü bir korelasyonun varlığına işaret ettiği gösterildi. Elde edilen sonuçlar, Cuculeanu (2001) ve Das (2009)'da gerçekleştirdiği çalışma ile büyük oranda uyumludur. Bu çalışma daha büyük bir veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.2.5. Geçici En Yakın Komşuluk Metodu

Düşük boyutlu sistemler için yüksek boyutlu projeksiyonlardan dolayı yörüngelerin kavşakları/dönüş noktaları gözlemlenerek geçici kesitler meydana gelir. Bu geçici kesitler yörüngelerin geçici en yakın komşuluklara neden olur. MATLAB® ve TISEAN programıyla hesaplanan Geçici En Yakın Komşuluklara ait grafikler Ek 8 Şekil 1-14'de

verildi. Örnek olarak Kozan istasyonu için 2008 yılına ait Geçici En Yakın Komşuluk grafiği Şekil 5.8’de gösterildi.



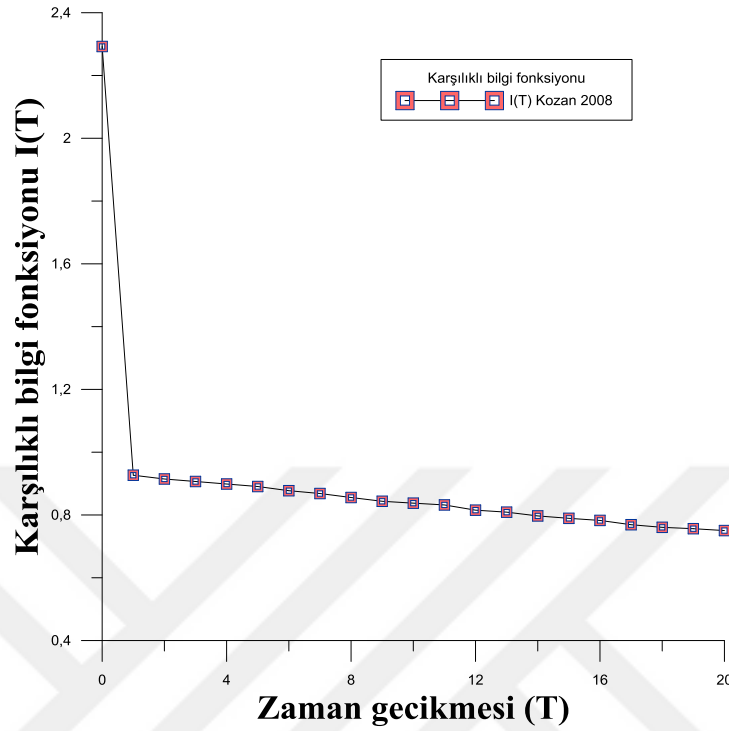
Şekil 5.8. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

Elimizdeki zaman serilerinde, verinin gerektirdiğinden çok daha büyük boyutlarda çalışılırsa, veriden istenilen özelliklerin çıkarılması için yapılan hesaplamaların sayısı artar ve gereksiz zaman harcanır. Bu yüzden, geçici en yakın komşular hesaplanarak bu dezavantaj, avantaja dönüştürülür. Elde edilen bu kesitlerle yapılan işlemler neticesinde, en uygun zaman gecikmesinin bulunması için geçici en yakın komşular metodu kullanıldı.

5.2.6. Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu

Otokorelasyon fonksiyonunun lineer olmayan formu olan karşılıklı bilgi fonksiyonu, yeniden yapılandırılmış bir çeker üzerindeki zaman gecikmelerini tahmin etmek için uygulanan kullanışlı bir yöntemdir. MATLAB® ve TISEAN programıyla hesaplanan Karşılıklı Bilgi Fonksiyonuna ait grafikler Ek 9 Şekil 1-14’te gösterildi. Örnek olarak

Kozan istasyonu için 2008 yılına ait Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu grafiği Şekil 5.9'da gösterildi.



Şekil 5.9. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

Ek 9'daki şekiller gömülü boyut ($m=5$) ve gecikme zamanı ($\tau = 0,1,2,\dots,20$) için çizilmişlerdir. Bu değerlere (m,τ) 'ya karşı çizilen karşılıklı bilgiler, hangi zaman aralığında ani düşüşler gösteriyorsa maksimum ve minimum değerleri belirlenir. 01.01.2008–01.01.2010 yılları arasında düzenli olarak ölçülen radon verileri üzerinde yapılan kaotik zaman serisi analizi sonucunda hesaplanan Karşılıklı bilgi değerleri, Tablo 5.3'te verildi.

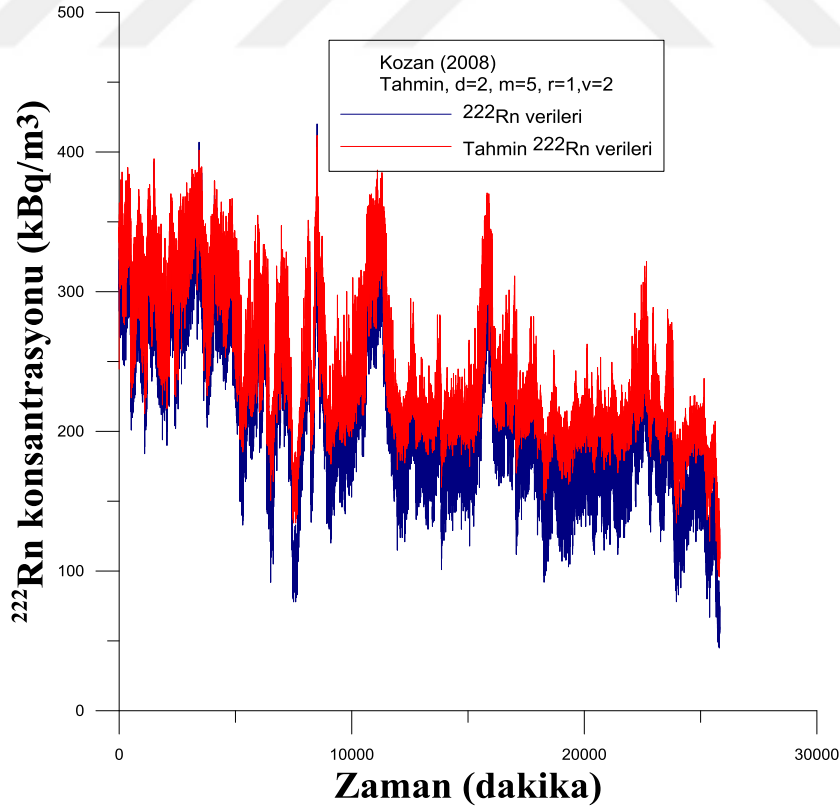
Tablo 5.3. Çalışma istasyonlarına ait Karşılıklı Bilgi Fonksiyonunun minimum ve maksimum değerleri

İstasyonlar	Karşılıklı Bilgi Fonksiyonunun Minimum ve Maksimum Değerleri					
	2008(max)	2008(min)	2009(max)	2009(min)	2010(max)	2010(min)
Kozan	2.2921	0.7504	2.0293	0.7976	2.6228	0.9745
Mersin	2.2931	0.5899	2.2473	1.1832	2.2656	1.0324
Nurdağı	2.3275	1.2220	2.5163	1.2651	2.2991	1.1431
Osmaniye	2.3106	0.8746	2.3139	0.8984	2.1885	0.5571
Yakapınar	2.4535	1.0583	2.4099	1.0167	1.8911	0.7177

Bu değerler maksimumdan minimuma düşerken ani piklerin elde edildiği nokta (ilk minimum) her bir zaman serisi için, en uygun gömme boyutuna karşılık gelmektedir. Bu şekilde her seri için işlem yapılacak en uygun gömülü boyut değerleri hesaplandı.

5.2.7. Doğrusal Olmayan Tahmin Sonuçlarının Karşılaştırılması

Son zamanlarda, zaman serisinden kaydedilen verilerdeki gürültü ve kaos arasındaki farkı ayırt etmemize olanak sağlayan belirli doğrusal olmayan tahmin metodları önerilmiştir. Doğrusal olmayan tahmin metodu, özellikle jeofiziksel araştırma uygulamalarında kaos ve rastgeleliği ayırt etmek için kullanılan bir yöntemdir (McCloskey, 1991; Bejar, 1995; Cuculeanu, 1996; Cuculeanu, 2001; Planinić, 2004; Das, 2009). Kaotik zaman serisi analizi ile elde edilen doğrusal olmayan tahmin metodu sonuçlarına göre; MATLAB® ve TISEAN programıyla hesaplanan sonuçlara ait çizilen grafikler Ek 10 Şekil 1-14 ile verildi. Örnek olarak Kozan istasyonu için 2008 yılına ait ^{222}Rn konsantrasyonları için yapılan doğrusal olmayan tahmin grafiği Şekil 5.10'da gösterildi.



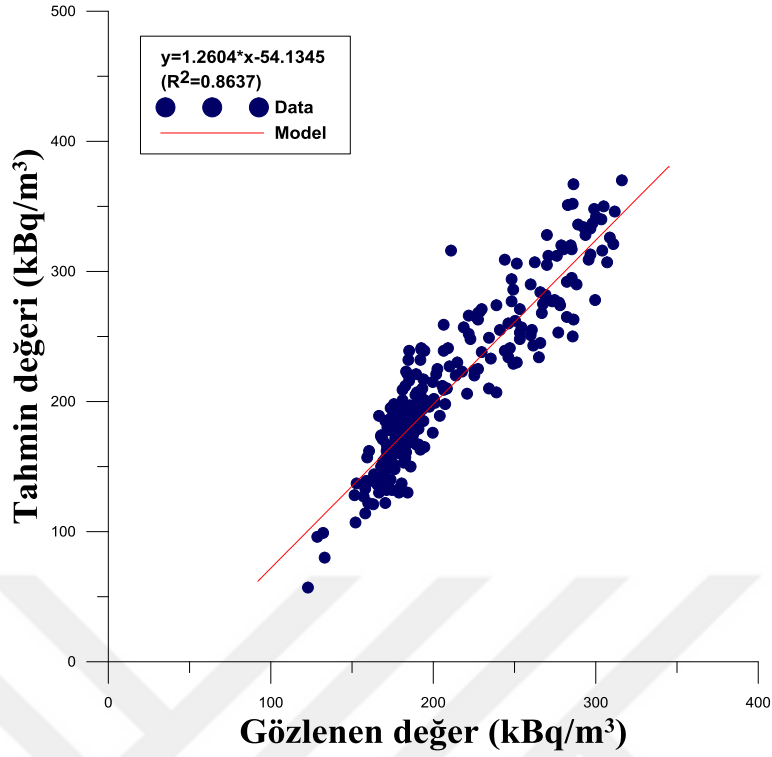
Şekil 5.10. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

Ek 10'daki şekiller, gecikme zamanını $d=2$, gömülü boyutu $m=5$, komşuların mutlak yarıçapları $r=1$, ve ayrıntı düzeyleri bir tam sayı argümanını $v=2$ göstermek üzere; uygun Theiler parametreleri seçilerek bütün tahmin işlemleri yapıldı. Burada ideal olan doğrusal olmayan tahmin yaparken, oldukça fazla veri sayısı içeren dinamiklerin uzun dönem tahminlerinde başarılı olmasıdır. Fakat bunu yaparken elde edilen uzun dönem için sürüklenmelerin olmamasıdır. Yapılan tahmin sonuçlarına göre, tahmin edilen seri ile orijinal seri arasındaki gerçek değere yakın sonuçları görmek için Bölüm 5.2.8'de verildiği gibi saçılma (scatter) grafikleri çizilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre R^2 yorumları yapılarak standart sapmalarına bakıldı. Bölüm 5.2.8'de bunlara ait sonuçlar verildi.

5.2.8. ^{222}Rn Verilerinin Gözlem ve Tahmin Edilen Değerlerinin Saçılma Grafikleri

Doğada pek çok gözlemin değişimi genellikle düzenli değildir, fakat birçok durumda Gauss dağılımına uyacak şekilde davranış gösterirler (McCloskey, 1991; Bejar, 1995; Cuculeanu, 1996; Cuculeanu, 2001; Planinić, 2004; Das, 2009). Bu ifadeye göre bu gözlemlerden bir trend elde etmek mümkün değildir. Fraktal değişim, zamanla ölçülmüş verilerin doğal olarak sahip olduğu düzensizliği tanımlar. Ayrıca, aralarında zamansal ilişki bulunan tam olarak rastgele olmayan düzensiz değişimlerin teşhis edilmesine yardımcı olur. Bu durum, topraktan yayılan ^{222}Rn gazı değişimi gibi dinamik olayların normal dağılıma uyduğunu göstererek ispatlanmıştır (Papadopoulos ve Vassilis, 1992).

Bu çalışmada da, aktif fay zonları ve yakında bulunan yerleşim yerlerindeki Nurdağı (Gaziantep), Kozan (Adana), Yakapınar (Adana), Osmaniye ve Mersin istasyonlardan alınan ölçümlerden elde edilen zaman serilerine Ek 1 Şekil 1-14 grafiklerine bakıldığında değişimler oldukça rastgeledir. Çalışmada verilerin istatistiksel karakteristiklerini anlamak için saçılma dağılımları incelendi. Örnek olarak Kozan istasyonu için 2008 yılına ait ^{222}Rn konsantrasyonları için çizilen saçılma grafiği Şekil 5.11'de gösterildi.



Şekil 5.11. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için saçılma grafiği (2008 yılı Kozan bölgesi)

Saçılma grafikleri, Ek 11 Şekil 1-14’te verildi. Modelin R^2 (açıklayıcılık katsayısı) değeri bire yakın ise parametreler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilir. Eğer R^2 değeri sıfıra yakın ise parametrelerin istatistiksel olarak uyumlu olmadıkları kabul edilir. Bu ilişki değişkenlerin sahip olduğu yapıya bağlı olarak analiz edilir. 01.01.2008–01.01.2010 yılları arasında düzenli olarak ölçülen radon verileri üzerinde yapılan kaotik zaman serisi analizi tahmin sonucunda hesaplanan R^2 değerleri, Tablo 5.4’te verildi.

Tablo 5.4. Çalışma istasyonlarına ait R^2 değerleri

İstasyonlar	R^2 Değerleri		
	2008	2009	2010
Kozan	0.8637	0.8779	0.9277
Mersin	0.8405	0.9309	0.8902
Nurdağı	0.9200	0.9419	0.9516
Osmaniye	0.8699	0.8651	0.8100
Yakapınar	0.9264	0.9253	0.8903

Ek 11 Şekil 1-14’de verilen Kozan 2008 yılı için alınan ^{222}Rn ölçüm konsantrasyonlarına bakıldığında, zaman serisi düzeyinde meydana gelen değişim, serinin

zaman içerisinde göstermiş olduğu dalgalanmaların devamlı olduğunu ve belirli bir periyodikliğinin olmadığını gösterir. Performans ölçümlerinin bu R^2 değerlerine bakıldığında, tahmin sonuçlarının bire oldukça yakın olduğu görüldü. Ayrıca bu metod ile korelasyon boyutu ile kaos boyutunu oldukça iyi hesaplar.



KAYNAKLAR

- Abarbanel, H.D.I., Brown R., Sidorowich J.J. and Tsimring L.S.,** 1993. The analysis of observed chaotic data in physical systems, *Rev. Mod. Phys.*, **4**, 1331-1392.
- Ablameyko, S.,** 2003. Introduction to neural networks for instrumentation, measurement, and industrial applications, Amsterdam, Berlin, Oxford, Tokyo, Washington, DC, *Published in cooperation with NATO Scientific Affairs Division*.
- Akyil, S., Aytas, S., Turkozu, D.A., Aslani, M.A.A., Yusan, S., and Eral, M.,** 2009. Radioactivity levels in surface water of lakes around Izmir/Turkey, *Radiat. Meas.*, **44**, 390-395.
- Albarello, D., Lapenna, V., Martinelli, G., and Telesca, L.,** 2003. Extracting quantitative dynamics from ^{222}Rn gaseous emissions of mud volcanoes. *Environmetrics*, **14**, 63-71.
- Alligood, K.T., Sauer, T.D. and Yorke, J.A.,** 1997. Chaos, *Springer-Verlag*, New York, 603.
- Alvarez-Ramirez, J., Alvarez, J., Rodriguez, E., and Fernandez-Anaya, G.,** 2008. Time-varying Hurst exponent for US stock markets, *Physica A*, **387**, 6159-6169.
- Badii, R., Heinzelmann, K., Meier, P.F., and Politi, A.,** 1988. Correlation functions and generalized Lyapunov exponents, *Phys. Rev. A*, **37**, 1323-1328.
- Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K.,** 1988. Self-organized critically, *Phys. Rev. A*, **38**, 364-74.
- Barman, C., Chaudhuri, H., Ghose, D., Deb, A., and Sinha, B.,** 2014. Multifractal detrended fluctuation analysis of seismic induced Radon-222 time series. *J. Earth. Sci.*, <http://www.joes.org.in>, ©JOES.
- Başkurt, P.,** 2011. Kaotik sinyallerden model bilgisi olmadan gürültü temizlenmesi için uyarlamalı süzgeç algortimalarının performans karşılaştırması, *Yüksek Lisans Tezi*, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Anadolu Üniversitesi.
- Berliner, L.M.,** 1992. Statistic, probability and chaos, *Stat. Sci.*, **7**, 69-122.
- Bourai, AA., Aswal, S., Dangwal, A., Rawat, M., Prasad, M., Naithani, NP., Joshi, V., and Ramola, RC.,** 2013. Measurements of radon flux and soil-gas radon concentration along the Main Central Thrust, Garhwal Himalaya, using SRM and RAD7 detectors, *Acta Geophys.*, **61**, 4, 950-957.

- Baker, G.L., and Gollup, J.P.,** 1990. Chaotic Dynamics (an introduction), *Cambridge University Press*, 052138897. London.
- Barnett, W.A.,** 1998. Martingales, *Nonlinearity and Chaos*, Department of Economics, Campus Box.
- Bejar, J., Facchini, U., Giroletti, E., Magnoni, S.,** 1995. Low dimensional chaos is present in radon time variations. *J. Environ. Radioact.*, **28**, 73-89.
- Bilgin, A.Z.,** 1981. Ceyhan-Karataş-Yumurtalık-Osmaniye-Haruniye-Kadirli dolayının Jeolojisi. M.T.A. Genel Müdürlüğü, *Jeoloji Der.*, Der. No:7215, Ankara.
- Bonotto, D.M., Bueno, T.O., Tessari, B.W., and Silva, A.,** 2009. The natural radioactivity in water by gross alpha and beta measurements, *Radiat. Meas.*, **44**, 92-101.
- Brandstater, A., and Swinney, H.L.,** 1987. Strange attractors in weakly turbulent couette-taylor flow, *Physc. Rev. A*, **35**, 2207-2220.
- Broomhead, D.S., Huke, J.P., and Muldoon, M.R.,** 1992. Linear filters an nonlinear systems. *J. Roy. Stat. Soc.*, **B54**, 373-382.
- Broomhead, D.S., Huke, J.P., and Potts, M.A.S.,** 1996. Cancelling deterministic noise by constructing nonlinear inverse to linear filters, *Physica D*, **89**, 439-458.
- Cao, L.,** 1997. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series, *Physica D*, **1**, 43-50.
- Chouet, B., and Shaw, H.R.,** 1991. Fractal properties of temor and gas piston events observed at Kilauea Volcano Hawaii, *J. Geophys. Res.*, **96**, 10177-10189.
- Chyi, L.L., Quick, T.J., Yang, T.F., and Chen, C.H.,** 2010. The experimental investigation of soil gas radon migration mechanisms and its implication in earthquake forecast. *Geofluids*, **10**,556-563.
- Cothorn, C.R. and Smith, J.E.,** 1987. Environmental Radon, *Environmental Science Research*, **35**, Plenium Press, New York, USA.
- Cox, B.L., and Wang, J.S.Y.,** 1993. Fractal sufaces measurement and applications in earth sciences. *Fractals*, **1**, 87-115.
- Crockett, R.G.M., Gillmore, G.K., Phillips, P.S., Denman, A.R., and Groves-Kirkby, C.J.,** 2006. Radon anomalies preceding earthquakes which occurred in the UK, in summer and autumn 2002. *Sci. Total Environ.*, **364**, 138– 148.
- Crockett, R.G.M., and Gillmore, G.K.,** 2010. Spectral-decomposition techniques for the identification of radon anomalies temporally associated with earthquakes occurring in the UK in 2002 and 2008, *Nat. Hazard. Earth Sys.*, **10**, 1079–1084.

- Crisanti, A., Jensen, M.H., Vulpiani, A., and Paladin, G.,** 1992. Strongly intermittent chaos and scaling in an earthquake model. *Phys. Rev. Lett.*, **46**, 7363-7366.
- Cuculeanu, V., and Lupu, A.,** 1996. Fractal dimensions of the outdoor radon isotopes time series, *Environ. Int.*, **22**, 171-179.
- Cuculeanu, V., and Lupu, A.,** 2001. Deterministic chaos in atmospheric radon dynamics, *J. Geophys. Res.*, **17**, 961-968.
- Çelebi, N.,** 1995. Çevresel örneklerde uranyum, radyum ve radon ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi. *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çehreli, A.,** 1994. Characterization of dynamical systems and detecting determinism in a time series, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çoban, G.,** 2007. Zaman serilerinde faz uzayının oluşturulması ve kaosu tespiti: döviz kurları üzerine bir uygulama, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Das, N.K., Sen, P., Bhandari, R.K., and Sinha, B.,** 2009. Nonlinear response of radon and its progeny in spring emission, *Appl. Radiat. Isotopes*, **67**, 313-318.
- Daşdağ, S., and Çelik, S.,** 1990. Mikrodalgaların biyolojik etkileri ve güvenlik standartları, *Çevre Sorunlarının Boyutları "90" Sempozyumu*, Diyarbakır, 22-23 Mart.
- Davutoğlu, H.,** 2008. Radon gazını ölçme metotları, *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- De Domenico, M., Ghobani, M.A., Makarynsky, O., Makarynska, D., and Asadi, H.,** 2013. Chaos and reproduction in sea level, *Appl. Math. Model.*, **37**, 3687-3697.
- Demirtaşlı, E.,** 1981, Summary of the paleozoic stratigraphy and Variscan events In the Taurus. Belt; Newsletter. I.G.C.P. Project No:5, *Correlation of Variscan and Pre-Variscan events in the Alpine Mediterranean*, Belt. **3**, 44-57.
- Değerlier, M.,** 2007. Adana ili ve çevresinin çevresel doğal radyoaktivitesinin saptanması ve doğal radyasyonların yıllık etkin doz eşdeğerinin bulunması, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ditto, W., and Munakata. M.,** 1995. Chaotic Systems: *Principles and Applications*, *Commun. ACM*, **38(11)**, 96-102.
- Durrani, S.A., and R. Ilić.,** 1997. Radon measurements by etched track detectors. Application in Radiation Protection, *Earth Sciences and the Environments*. World Scientific, Signapore.

- Eckhardt, B., and D. Yao.,** 1993. Local Lyapunov exponents in chaotic systems. *Physica D*, **65**, 100-108.
- Eckmann, J.P., and D. Ruelle.,** 1985. Ergodic theory of chaos and strange attractors, *Rev. Mod. Phys.*, **57**, 617-656.
- Eckman, J.P., Kamphorst, S.O., Ruelle, D., and Ciliberto, S.,** 1986. Lyapunov exponents from time series. *Phys. Rev. A*, **34**, 4971–4979.
- El-Ghossian, M.O., and Abu Shammala, A.A.,** 2012. Radioactivity measurements in tap water in Gaza Strip, *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, **11**, 21-26.
- Evans, R.E.,** 1968. Engineers' guide to the elementary behavior of radon daughters, *Health Phys.*, **38**, 1173-1197.
- Erees, S., Aytas, S., Sac, M.M., Yener, G., and Salk. M.,** 2001. Investigation of Correlation between the earthquake and radon concentration in thermal water along the faults at Denizli Basin in Turkey. *IAEA Research Contract 11096*.
- Erees, S., Aytas, S., Sac, M.M., Yener, G., and Salk. M.,** 2007. Radon concentrations in thermal waters related to seismic events along faults in the Denizli Basin, Western Turkey, *Radiat. Meas.*, **42**, 80-86.
- Falcanor, K.,** 1990. Fractal geometry: mathematical foundations and applications, *Wiley*, Chichester.
- Feller, W.,** 1951. The asymptotic distribution of the range of sums of independent random variables, *Ann. Math. Stat.*, **22**, 427-43.
- Firat, U.,** 2006. Kaotik zaman serilerinin yapay sinir ağlarıyla kestirimi: deprem verisi durumu, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fleischer, R.L., and Magro-Campero, A.,** 1978. Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gases within the earth: Techniques and principles, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3539-3549.
- Fleischer, R.L.,** 1981. Discolation model for radon response to distant earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 477-480.
- Fleischer, R.L. and Magro-Campero, A.,** 1985. Association of subsurface radon changes in Alaska and the northeastern United States with earthquakes, *Geochim. Cosmochim. Ac.*, **49**, 1061-1071.
- Fleischer, R.L., and Mogro-Campero, A.,** 1978. Radon enhancements in the Earth: Evidence for intermittent upflows, *Geophys. Res. Lett.*, **6**, 361-364.

- Fraser, A.M., and Swinney, H.L.,** 1986. Independent coordinates for strange attractors from mutual information, *Phys. Rev. A*, **33**, 1134-1140.
- Frazier, C., and Kockelman, K.M.,** 2004. Chaos theory & transportation systems: an instructive, *Transport. Res. Rec.*, **1897**, 9-17.
- Friedmann, H., and Hernegger, F.,** 1978. A method for continuous measurement of radon in water of springs for earthquake prediction, *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 565-568.
- Friedmann, H., Aric, K., Gutdeutsch, R., King, C.Y., Altay, C., and Sav, H.,** 1988. Radon measurements for earthquake prediction along the North Anatolian zone: a progress report, *Tectonophysics*, **152**, 209-214.
- Freidmann, H., Aric, K., King, C.Y., Çakmak, İ.T., Sav, H., and Altay, C.,** 1988. Radon measurements for earthquake prediction along the North Anatolian Fault Zone, A progress report, *Tectonophysics*, **152**, 209-214.
- Freund, F.T., Kulahci, I.G., Cyr, G., Ling, J., Winnick, M., Tregloan-Reed, J., and Freund, M.,** 2009. Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, **71**, 1824-1834.
- Ghosh, D., Deb, A., Sengupta, R., Patra, K.K., and Bera, S.,** 2007. Pronounced soil-radon anomaly-Precursor of recent earthquakes in India, *Radiat. Meas.*, **42**, 466-471.
- Ghosh, D., Deb, A., and Sengupta, R.,** 2009. Anomalous radon emission as precursor of earthquake, *J. Appl. Geophys.*, **69**, 67-81.
- Giannakopoulos, K., Deliyannis, T., and Hadjidemetriou, J.,** 2002. Means for detecting chaos and hyperchaos in nonlinear electronic circuits, *Digit. Signal Process.*, **2**, 951-954.
- Golden Software, Grapher version 8.0.278. September** 2009. 809 14 Street, Golden, Colorado 80401.
- Grassberger, P., and Procaccia, I.,** Measuring the strangeness of strange attractors, *Physica D*, **9**, 189-208, 1983.
- Guzmán- Vargas, L., Ramírez-Rojas, A., Hernández-Pérez, R., and Angulo-Brown, F.,** 2009. Correlations and variability in electrical signals related to earthquake activity, *Physica A*, **388**, 4218-4228.
- Gutenberg, B., and Richter, C.F.,** 1954. Seismicity of the Earth and associated phenomena, *Princeton University Press*, Princeton, NJ.
- Güler, Ç., and Çobanoğlu, Z.,** 1997. Radon kirliliği çevre sağlığı temel kaynak dizisi **44**, 9-11.

- Harris, C.M., Todd, R.W., Bungard, S.J., Lovitt, R.W., Morris, J.G., and Kell, D.B.,** 1987. The dielectric permittivity of microbial suspensions at radio-frequencies: a novel method for estimation of microbial biomass, *Enzyme Microb. Tech.*, **9**,181-186.
- Hegger, R., Kantz, H., and Schreiber, T.,** 1999. Practical implementation of nonlinear time series methods: The **TISEAN** Package. *Chaos*, **9**, 413-435.
- Hilborn, R.C.,** 1994. Chaos and nonlinear dynamics. Oxford University Press, Oxford.
- Hilborn, R.C.,** 2000. Chaos and nonlinear dynamics (An introduction for scientists and engineers, *Oxford University Press*, New York.
- Holford, D.J., Schery, S.D., Wilson, J.L., and Phillips, F.M.,** 1993. Modeling radon transport in dry, cracked soil, *J. Geophys. Res.*, **98**, 567-580.
- Hurst, H.E.,** 1951. Long-term storage capacity of reservoirs, *T. Am. Soc. Civ. Eng.*, **116**, 770-808.
- Hurst, H. E.,** 1952. The Nile, Constable, *London*, **326**.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., and Sano, Y.,** 1995. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science*, **269**, 60–61.
- Iliopoulos, A.C., and Pavlas, G.P.,** 2010. Global low dimensional seismic chaos in the hellenic region, *Int. J. Bifurcat. Chaos.*, **20**, 2071-2095.
- Iokibe, T., and Fujimoto, Y.,** 2001. Predicting combustion pressure of automobile engine employing chaos theory. Proceedings of 2001 IEEE Int. Symp. On Comp Intell, *In Robotics and Automation*, 511-516.
- Jaki, S.L., and Hess, V.F.,** 1958. A study of the distribution of Radon, thoron and their decay products above and below the ground, *J. Geophys. Res.*, **63**, 373.
- Jinkui, Z., Yi, C., and Ying, W.,** 2009. Chaotic analysis of seismic time series and short-term prediction with RBF neural networks, *Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, 506-509.
- Kamışhoğlu, B.,** 2014. Yeni çeyrek ayna süzgeç bankası tasarımı ve uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Kamışhoğlu, M., Külahcı, F., and Özkaynak, F.,** 2013. Nonlinear reply of soil radon (^{222}Rn) gas measurements and deterministic chaos, *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)* **2**, 153-160.
- Kamışhoğlu M., and Külahcı F.,** 2014. Investigation nonlinear behavior of Radon Gas (^{222}Rn). *2014 IEEE 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference*, (SIU 2014) 208-211, 2014.

- Kamışhoğlu, M., Külahcı, F., and Niksarlıoğlu, S.,** 2014. Toprak Radon (^{222}Rn) Gazı anomalilerinin ARIMA analizi, *SDU Journal of Science*, **9(2)**, 93-99.
- Kamışhoğlu M., and Külahcı F.,** 2015. Time series analysis of ^{222}Rn Gas measurements received from osmaniye region. *2015 IEEE 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2015)*.
- Kamışhoğlu, M., and Külahcı, F.,** 2015. Chaotic behavior of soil radon gas and applications, *Acta Geophysica*, (accepted).
- Kamra, L., Choubey, V.M., Kumar, N., Rawat, G., and Khandelwal, D.D.,** 2013. Radon variability in borehole from multi-parametric geophysical observatory of NW Himalaya in relation to meteorological parameters, *Appl. Radiat. Isotopes.*, **72**, 137-144.
- Kantz, H., and Schreiber, T.,** 1997. Nonlinear time series analysis, *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Kaplan, J. and Yorke, J.,** 1979. Functional Differential equations and the approximation of fixed points, *Lecture Notes in Mathematics*, **730**, Berlin: SpringerVerlag.
- Karig, D.E., and Kozlu, H.,** 1990. Late Paleogene-Neogene evolution of the triple junction region near Maraş, South-central Turkey, *J. Geol. Soc. London.*, **147**, 1023-1034.
- Kayabalı, K., and Akin, M.,** 2003. Seismic hazard map of Turkey using the deterministic approach, *Eng. Geol.*, **63**, 221-232.
- Kennel, M.B., Brown, R., and Abarbanel, H.D.I.,** 1992. Determining embedding dimension for phase space reconstruction using a geometrical construction, *Phys. Rev. A*, **45**, 3403-11.
- Keskin, G.,** 1998. Ağır metallerin ve radyasyonun biyolojik etkilerinin karşılaştırılması, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ketin, İ.,** 1966. Tectonic units of Anatolia, *Bull. Min. Res. Exp. Inst. Turkey*, **66**, 23-24.
- Ketin, İ.,** 1968. Türkiye'nin genel tektonik durumu ile başlıca deprem bölgeleri arasındaki ilişkiler, *M.T.A. Derg.*, **71**, Ankara.
- Khatibi, R., Sivakumar, B., Ghorbani, M.A., Kisi, O., Kocak, K., and Farshidizadeh, D.,** 2012. Investigating chaos in river stage and discharge time series, *J. Hydrol.*, **414-415**, 108-117.
- King, C.Y., Zhang, W., and King, B.S.,** 1993. Radon anomalies on three kind of faults in California, *Pure Appl. Geophys.*, **141**, 111-124.
- King, C.,** 1978. Radon emanation on San Andreas fault, *Nature*, **271**, 516-519.

- King, C.**, 1980. Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **85**, 3065-3078.
- King, C. Y.**, 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: A Review; *Geophys. Res.*, **91**, 12269-12281.
- Koçak, K., and Şen, Z.**, 1998. More information regarding dynamical systems via convergence to correlation dimension, *An Interdisciplinary Journal of Physics and Engineering Sciences*, **51**,1-5.
- Koçak, K.**, 1996. Kaotik davranış kriteri olarak fraktal boyut değişimi ve dinamik sistemlere uygulanması. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kolbaşı, A.**, 1997. Nükleer iz kazıma dedektörleri ile İzmir fay hattında deprem tayinine yönelik radon ölçümleri. Nükleer Bilimler Anabilim Dalı, *Yüksek Lisans Tezi*. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kobyay, Y.**, 2009. Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki doğal maden ve kaynak sularında radyoaktiflik tayini, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kozlu, H.**, 1996. Doğu Akdeniz Bölgesinde yer alan neojen (İskenderun, Misis-Andırın) Tektono-Stratigrafi birimleri buların tektonik gelişimi.
- Köklü, N.**, 2006. Radyasyonun insan sağlığı üzerinde etkileri ve tıpta uygulama alanları, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kraft, R.**, 1995. Fractals and dimension. *Technical Report*. Munich, Germany: Munich University of Technology.
- Krane, K. S.**, 2001. Nükleer Fizik, 1.Cilt, Palme yayıncılık, Ankara.
- Kumar, A., Walia, V., Yang, T.F., Chang, H.H., Lin, S.J., Eappen, K.P., and Arora, B.R.**, 2013. Radon-thoron monitoring in Tatun volcanic areas of northern Taiwan using LR-115 alpha track detector technique: Pre-calibration and installation, *Acta Geophys.*, **61**, 4, 958-976.
- Kulalı, F.**, 2009. Topraktaki radon konsantrasyonu ölçümü ve deprem ilişkisinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kumar, N., Rawat, G., Choubey, V.M., and Hazarika, D.**, 2013. Earthquake precursory research in western Himalaya based on the multi-parametric geophysical observatory data, *Acta Geophys.*, **61**, 54, 977-999.
- Külahcı, F.**, 2000. Hazar Gölü (Elazığ) suyunun radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Külahcı, F., İnceöz, M., Doğru, M., Aksoy, E., and Baykara, O.** 2009. Artificial neural network model for earthquake prediction with radon monitoring, *Appl. Radiat. Isotopes.*, **67**, 212-219.
- Külahcı, F., and Şen, Z.**, 2013. Perturbed effects at radiation physics, *Radiat. Phys. Chem.*, **90**, 26-31.
- Külahcı, F. and Şen, Z.**, 2014. On the correction of spatial and statistical uncertainties in systematic measurements of ^{222}Rn for earthquake prediction, *Surv. Geophys.*, **35**, 449-478.
- Külahcı, F. and Çiçek, Ş.**, 2015. Time-series analysis of water and soil radon anomalies to identify micro-macro-earthquakes, *Arab. J. Geosci.*, **8**, 5239-5246.
- Lakshmi, S.S., and Tiwari, R.K.**, 2009. Model dissection from earthquake time series: A comparative analysis using modern non-linear forecasting and artificial neural network approaches, *Comput. Geosci.*, **35**, 191-204.
- Lane-Smith, D., and Sims, K.W.W.**, 2013. The effect of CO_2 on the measurement of Rn-220 and Rn-222 with instruments utilising electrostatic precipitation, *Acta Geophys.*, **61**, 4, 822-830.
- Le Pichon, X., Eitner, S.L., and Ludwig, W.J.**, 1968. Sediment transport and distribution in the Argentine basin, 1, Antarctic bottom current passage through the Falkland fracture zone, *Phys. Chem. Earth.*, **8**, 2.
- Li, Q., and Xu, G.M.**, 2012. Characteristic variation of local scaling property before puer M6.4 earthquake in China: The Presence of a New Pattern of Nonlinear Behavior of Seismicity, *Izv. Phys. Solid Earth.*, **48**, 155-161.
- Lorenz, E.N.**, 1960. Maximum simplification of the dynamic equations. *Tellus*, **12**, 243-254.
- Mandelbrot, B.B.**, 1997. Fractals: form, chance and dimension, W.H. Freeman, San Francisco.
- Marín Carrión, I., Arias Antúez, E., Artigao Castillo, M.M., and Miralles Canals, J.J.**, 2012. A distributed memory architecture implementation of the False Nearest Neighbors method based on distribution of dimensions, *J. Supercomput.*, **59**, 1596-1618.
- Martinelli, G.**, 2015. Hydrogeologic and geochemical precursor of earthquakes: an assesment for possible applications, *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **56**, 83-94.
- May, R.M.**, 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics, *Nature*, **261**, 459-467.
- McCloskey, J., Bean, C.J., Jacob, A.W.B.**, 1991. Evidence for chaotic behavior in seismic wave scattering, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1901-1904.

- McCloskey, J.**, 1993. A hierarchical model for earthquake generation on coupled segments of a transform fault, *Geophys. J. Int.*, **115**, 538-551.
- Mckenzie, D.P.**, 1972. Active tectonics of Mediterranean region, *Geophys. J. Roy. Astr. S.*, **30**, 109-185.
- Miklavčić, I., Radolić, B., Vuković, M., Poje, M., Varga, M., Stanić, D., and Planinić, J.**, 2008. Radon anomaly in soil gas an earthquake precursor, *Appl. Radiat. Isotopes.*, **66**, 1459-1466.
- Montagne, R., and Vasconcelos, G.L.**, 2004. Complex dynamics in a one-block model for earthquakes, *Physica A*, **342**, 178-185.
- Namvaran, M., and Negarestani, A.**, 2015. Noise reduction in radon monitoring data using Kalman filter and application of results in earthquake precursory process research, *Acta Geophys.*, **63**, 2, 329-351.
- Negarestani, A., Setayeshi, S., Ghannadi-Maragheh, M., and Akashe, B.**, 2002. Layered neural networks based analysis of radon concentration and environmental parameters in earthquake prediction, *J. Environ. Radioactiv.*, **62**(3), 225-233.
- Negarestani, A., Setayeshi, S., Ghannadi-Maragheh, M., and Akashe, B.**, 2003. Estimation of the radon concentration in soil related to the environmental parameters by a modified Adaline neural network. *J. Environ. Radioactiv.*, **58**(2), 269-273.
- Ott, E., Grebogi, C., and Yorke, J.A.**, 1990. Controlling chaos, *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 1196-1199.
- Ott, E., Sauer, T., and Yorke, J.A.**, 1994. Coping with chaos: analysis of chaotic data and the exploitation of chaotic systems, *J. Wiley*, New York.
- Özden, N.**, 1990. Sanayide radyasyondan korunma esasları, Aliğa Petrokimya San. ve Tic. A.Ş., İzmir.
- Özer, A.B., ve Akın, E.**, 2005. Tools for detecting chaos, SAÜ Inst, *Science Magazine*, **9**, 60-66.
- Özer, A.B., and Akın, E.**, 2006. Kaos kuramı-bilişim ansiklopedisi, *Papatya Yayıncılık*, İstanbul.
- Özger, A.G.**, 2005. Ceyhan, Yumurtalık ve Pozantı bölgelerinin doğal radyoaktivite düzeylerinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Özkaynak, F.**, 2007. Doğrusal olmayan sistemlerde lyapunov üstellerini hesaplayan yazılımın gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Papadopoulos, G.A., and Vassilis, D.**, 1992. Fractal approach of the temporal earthquake distribution in the Hellenic arc-trench system, *Pure Appl Geophys.*, **139**, 269-276.
- Peterson, J., MacDonell, M., Haroun, L., and Monette, F.**, 2007. Radiological and chemical fact sheets to support health risk analyses for contaminated areas, U.S. department of energy, Richland Operations Office and Chicago Operations Office.
- Plastino, W., Povinec, P.P., Luca, G.D., Doglioni, C., Nisi, S., Ioannucci, L., Balata, M., Laubenstein, M., Bella, F., and Coccia, E.**, 2010. Uranium groundwater anomalies and L'Aquila earthquake, 6th April 2009 (Italy), *J. Environ. Radioactiv.*, **101(1)**, 45-50.
- Planinić, J., Vuković, B., and Radolić, V.**, 2004. Radon time variations and deterministic chaos, *J. Environ. Radioactiv.*, **75**, 35-45.
- Provenzale, A., Smith, L.A., Vio, R., and Murante, G.**, 1992. Distinguishing between low-dimensional dynamics and randomness in measured time series, *Physica D*, **58**, 31-49.
- Qiang, L., and Gui-Ming, X.**, 2012. Characteristic variation of local scaling property before Puer M6.4 earthquake in China: The Presence of a New Pattern of Nonlinear Behavior of Seismicity, *Izv. Phys. Solid Earth.*, **48**, 155-161.
- Ramirez, J.A., Echeverria, J.C., and Rodriguze, E.**, 2008. Performance of a high-dimensionan R/S method for Hurst exponent estimation, *Physica A*, **387**, 6452-6462.
- Ramola, R.C., Prasad, G., and Gusain, G.S.**, 2011. Estimation of indoor radon concentration based on radon flux from soil and groundwater, *Appl. Radiat. Isotopes.*, **69(9)**, 1318-1321.
- Rasband, S.N.**, 1990, Chaotic dynamics of nonlinear systems, John Wiley & Sons, **415- 7** 90072800.
- Reiss, J.D.**, 2001. The analysis of chaotic time series, *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology.
- Richards, R.**, 1999. The subtle attraction: beauty as a force in awareness, creativity, and survival. In Affect, creative experince, and psychological adjustment, 195-215. (Brunner/Mazel, Philadelphia).
- Richardson, L.F.**, 1961. The problem of contiguity: an appendix of statistics of deadly quarrels. *Yearbook of the Society for General Systems Research*, **6**, 139-187.

- Rikitake, T.**, 1976. Recurrence of great earthquakes at subduction zones, *Tectonophysics*, **35**, 335-362.
- Rojay, B., Heimann, A., and Toprak, V.**, 2001. Neotectonic and volcanic characteristics of the Karasu Fault Zone (Anatolia, Turkey): the transition zone between the Dead Sea Transform and the East Anatolian Fault Zone, *Geodin. Acta.*, **14**, 197-212.
- Ruelle**, 2000. Raslantı ve Kaos, 2000. Tübitak.
- Saç M., and Camgöz B.**, 2000. Investigations of correlations between the magnitude of the earthquake and radon concentrations in soil gas in izmir fault zones, *I. Eurasia Conf. on Nuclear Science and its Application*, Eng. Abst. 315-316, İzmir.
- Saç M., Camgöz B., and Kumru, M.N.**, 2013. Relationships between radon anomalies and seismic activities in Tuzla fault zone in Western Turkey, *Eur. J. Environ.t.*, 2146-961.
- Sakata, S., Hayano, J., Mukai, S., Okada, A., Galdrikian, B., and Farmeret, J.D.**, 1999. Aging and spectral characteristic of the nonharmonic component of 24-h heart rate variability, *Amer. J. Phys.- Reg. Interative Comp. Physiol.*, **276**, 1724-1731.
- Sano, M., and Sawada, Y.**, 1985. Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series, *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 1082-1085.
- Sato, S., Sano, M., and Sawada, Y.**, 1987. Practical methods of measuring the generalized dimension and the largest Lyapunov exponent in high dimensional chaotic systems, *Prog. Theor. Phys.*, **77**,1.
- Sauer, T., and Yorke, J.A.**, 1991. Rigorous verification of trajectories for the computer simulation of dynamic systems, *Nonlinearity*, **4**, 961.
- Schuster, H.G.**, 1988. Deterministic chaos: An introduction. Second Revised Edition, Physick- Verlag GmnH, D-6940 Weinheim, Federal Republic of Germany.
- Schreiber,T., and Schmitz, A.**, 1996. Improved surrogate data for nonlinearity test. *Phys. Rev.Lett.*, **77**, 635-638.
- Seidel J.L., and Monnin M.**, 1998. An automatic radon probe for earth science studies, *J. Appl. Geophys.*, **39**, 209-220.
- Smalley, R.F., Chatelain, J.L., Turcotte, D.L., and Prevot, R.**, 1987. A fractal approach to the clustering of earthquakes: applications to the seismicity of the new hebrides, *Seis. Soc. Am. Bull.*, **77**, 1368-1381.

- Smirnov, V.B., Ponomarev, A.V., Jiadongand, Q., and Cherepantsev, A.S.,** 2005. Rhythms and deterministic chaos in geophysical time series, *Izv. Phys. Solid Earth.*, **41**, 6, 428-448.
- Smith, L., Fournier, A., and Spiegel, E.A.,** 1986. Lacunarity and intermittency in fluid turbulence, *Phys. Lett. A*, **114**, 465-468.
- Sprott, J.C.,** 2003. Analysis of chaotic time series, *Oxford University Press*, USA.
- Strogatz, S.H.,** 1994. Nonlinear dynamics and chaos, *Persues Books Publishing*, New york, 498.
- Sungurlu, O.,** 1972. VI. Bölge Gölbaşı-Gerger arasındaki sahanın jeolojisi: TPAO Rap. No:802., Ankara (yayınlanmamış).
- Sugihara, G., and May, R.M.,** 1990. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time serie,. *Nature*, Lond. **344**, 734-741.
- SPSS Inc** 2007. SPSS for Windows, Release 16. SPSS Inc., Chicago, IL. URL <http://www.spss.com/>.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., ve Boray, A.,** 1987. Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri, *MTA Raporu*, Ankara.
- Şaroğlu, F., Emre, O., and Kuscü, I.,** 1992. The East Anatolian fault zone of Turkey, *Ann. Tectonicae*, **6**, 99-125.
- Şen, Z.,** 1974. Small samples of stationary stochastic processes and the Hurst phenomenon in hydrology. *Unpublished PhD. Thesis*, Imperial College of Science and Technology, University of London, 256.
- Şen, Z.,** (1977a). Small sample estimation of hours, *Water Resour. Res.*, **13**, 6, 971-974.
- Şen, Z.,** (1977b). Small sample expectation of population and adjusted ranges, *Water Resour. Res.*, **13**, 6, 975-980.
- Şen, Z.,** (1977c). Small sample expectation of rescaled population and rescaled adjusted ranges, *Water Resour. Res.*, **13**, 6, 981-986.
- Takens, F.,** 1981. Detecting strange attractors in turbulence, *Lect. Notes Math.*, **898**, 366-381.
- Takens, F.,** 1985. On the numerical determination of the dimension of an attractor. In Dynamical systems and bifurcations (ed. B.L.J. Braaksma, H.W. Braer, and F. Takens). *Lect. Notes Math.*, **1125**, 99-106, Springer, Berlin.
- Tamaz, C., and Teimuraz, M.,** 2003. Electromagnetic control of earthquake dynamics?, *Comput. Geosci.*, **29**, 587-593.

- Tarakçı, M., Harmanşah, C., Saç, M.M., and İçhedef, M.,** 2014. Investigation of the relationships between seismic activities and radon level in Western Turkey, *Appl. Radiat. Isotopes.*, **83**, 12-17.
- Taşkın, H.,** 2006. İnsan sağlığı ve çevre kirliliği açısından kırklareli ilinin fon radyasyonunun belirlenmesi ve haritalandırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Teng, T.L.,** 1980. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake, *J. Geophys. Res.*, **85**, 3089-3099.
- Telesca, L., Lapenna, V., and Macchiato, M.,** 2005. Multifractal fluctuations in seismic interspike series, *Physica A*, **354**, 629-640.
- The Matworks, Inc. 2007.** MATLAB- The language of technical computing, version 7.5. The **MatWorks, Inc.**, Natick, Massachuestts. URL <http://www.mathworks.com/products/matlab>.
- Theiler, J.,** 1988. Lacunarity in a best estimator of fractal dimension, *Phys. Lett. A*, **133**, 195-200.
- Theiler, J.,** 1991. Some comments on the correlation dimension of $1/f^{\alpha}$ noise, *Phys. Lett. A*, **155**, 480-493.
- Theiler, J., Eubank, S., Longtin, A., Galdrikian, B., and Framer, J.D.,** 1992. Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data, *Physica D*, **58**, 77-94.
- Tiwari, R.K., Srilakshmi, S., and Rao, K.N.N.,** 2004. Characterization of earthquake dynamics in Northeastern India Regions: A Modern Nonlinear Forecasting Approach, *Pure Appl. Geophys.*, **161**, 865-880.
- Tiwari, R.K., Srilakshmi, S., and Rao, K.N.N.,** 2003. Nature of earthquake dynamics in the central Himalayan region: a nonlinear forecasting analysis, *J. Geodyn.*, **35**, 273-287.
- Turcotte, D.L.,** 1992. Fractals and chaos in geology and geophysics. *Cambridge University Press*, Cambridge, England.
- Ulomov, V.I., and Mavashev, B.Z.,** 1967. On a precursor of a strong tectonic earthquake, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **176**, 35-37.
- Ulomov, V.I., and Mavashev, B.Z.,** 1967. A precursor of strong tectonic earthquake. *Dokl. Acad. Sci, USSR, Earth Sci. Sect.*, **176**, 9-11.
- Urbach, R.M.A.,** 2000. Footprints of chaos in the markets: analyzing nonlinear time series in financial markets and other real systems. *Prentice Hall Publishing*, Englewood Cliffs, New Jersey.

- USGS, United States Geological Survey İnter sitesi, www.usgs.gov, Erişim tarihi: 01.01.2011.
- Virk, H.S., and Singh, B.,** 1993. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena, *Tectonophysics*, **227**, 215-224.
- Vizzini, F., and Brai, M.,** 2012. In soil radon anomalies as precursors of earthquakes: a case study in the SE slope of Mt. Etna in a period of quite stable weather conditions, *J. Environ. Radioactiv.*, **113**, 131-141.
- Virk, H.S., and Walia V.,** 2001. Helium/Radon precursory signals of Charmoli earthquake, India, *Radiat. Meas.*, **34**, 379-384.
- Yang, H., and Duan, X.,** 2003. Chaotic characteristic of electricity price and its forecasting model, *Canadian Conf. On Electrical and Computer Eng.*, **1**, 659-662.
- Yılmaz, D., ve Güler N.F.,** 2006. Kaotik zaman serisinin analizi üzerine bir araştırma, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **21**, 4, 759-779.
- Yürüklü, E.,** 2013. Kaotik özelliklerin konuşma sesleri steganalizinde kullanımı, *Doktora tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Zmazek, B., Vaupotič, J., Bidovec, M., Poljak, M., Živčić, M., Pineau, J.F., and Kobal, I.,** 2000. Radon monitoring in soil gas tectonic faults in the Krško basin. In: Book of Abstracts: New Aspects of Radiation Measurements, Dosimetry and Spectrometry, *2 Dresden Symposium on Radiation Protection, September 10-14, Dresden, Germany*, 2000.
- Zmazek, B., Zivcic, M., Vaupotic, J., Bidovec, M., Poljak, M., and Kobal, I.,** 2002. Soil radon monitoring in the Krsko Basin, Slovenia, *Appl. Radiat. Isotopes.*, **56**, 649-657.
- Zmazek, B., Todorovski, L., Dzeroski, S., Vaupotic, J., and Kobal, I.,** 2003. Application of decision trees to the analysis of soil radon data for earthquake prediction, *Appl. Radiat. Isotopes.*, **58**, 697-706.
- Zorer, S.Ö., Ceylan, H., and Doğru, M.,** 2008, Assessment of some trace heavy metals and radioactivity concentration in water of Bendimahı River Basin (Van, Turkey), *Environ. Monit. Assess.*, **147**, 183-190.
- Wakita, H., Igarashi, G., and Notsu, K.,** 1991. An anomalous radon decrease in groundwater prior to an M6.0 Earthquake: A Possible Precursor?, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 629-632.
- Wakita, H., Nakamura, Y., and Sano, Y.,** 1998, Short-term and intermediate-term geochemical precursors, *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 267-278.

- Wattananikorn, K., Kanaree, M., and Wiboolsake, W.,** 1998. Soil gas radon as an earthquake precursor: some considerations on data improvement, *Radiat. Meas.*, **29**, 593-598.
- Whitney, H.,** 1936. Differential manifolds, *Ann. Math.*, **37**, 645-660.
- Williams, G.P.,** 1997. Chaos Theory Tamed, *Taylor & Francis Publisher*, London.
- Wilson, H.H. and Krummenacher, R.,** 1957. Geology and oil prospects of Gaziantep region, SE, Turkey: Petrol Dai Bşk, teknik arşivi, Ankara (yayınlanmamış).
- Woith, H.,** 2015. Radon earthquake precursor: A short review. *Eur. Phys. J. Special Topics*, **224**, 611-627.
- Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., and Vastano J.A.,** 1985. Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica D*, **16**, 285-317.

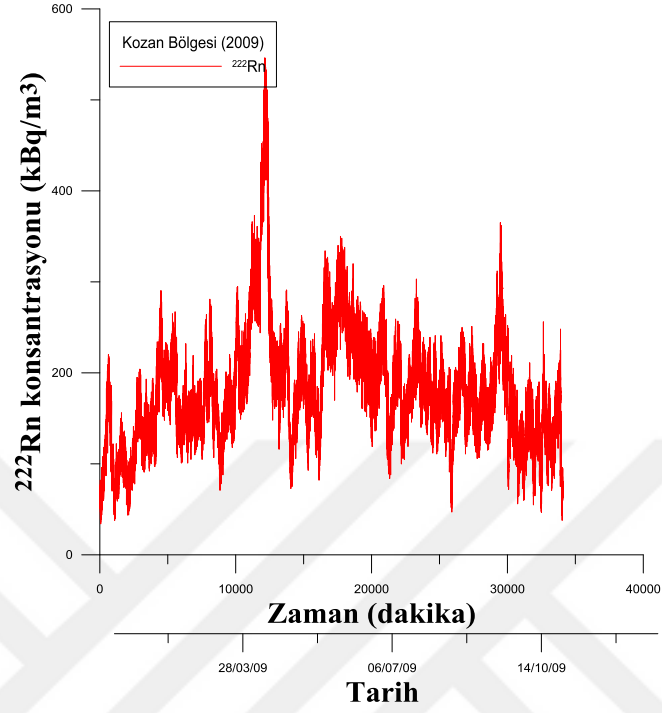


EKLER

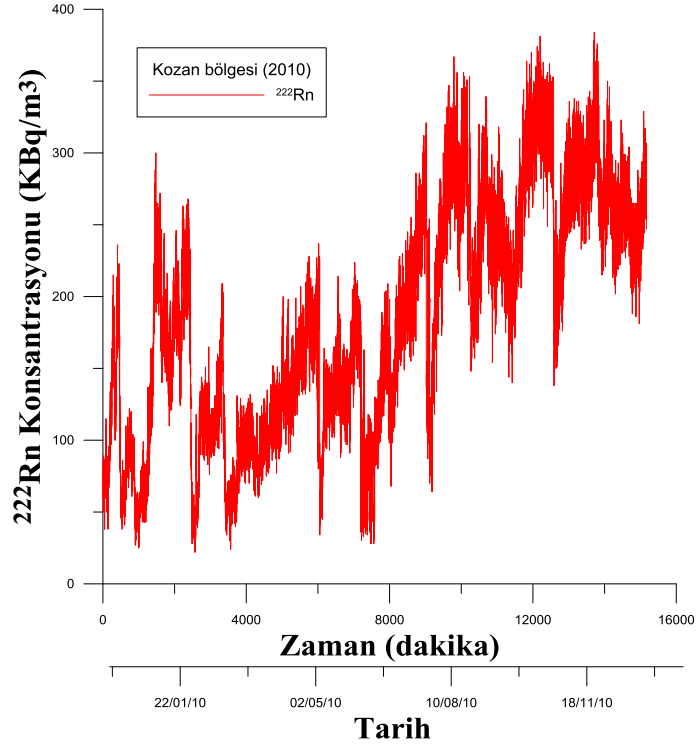


EK 1

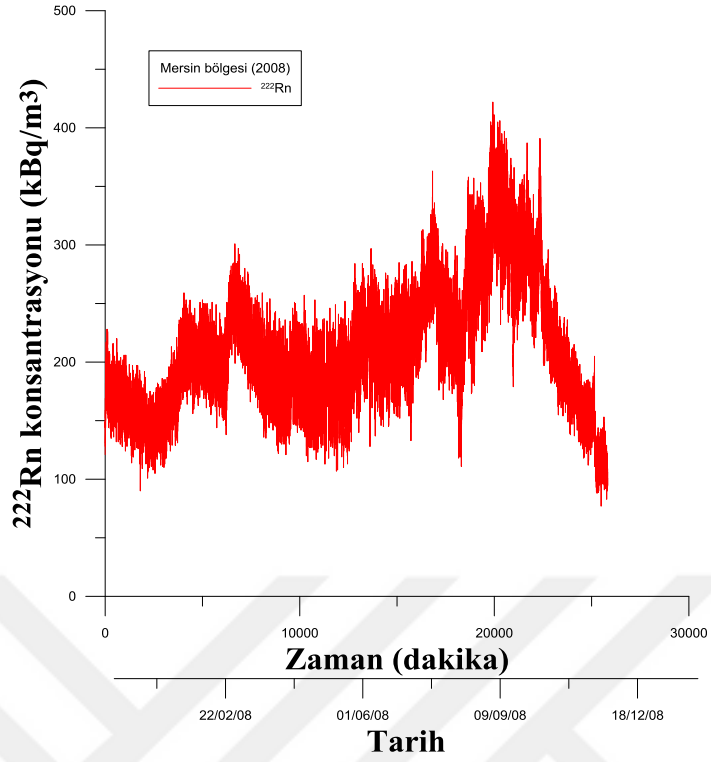
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Zaman Serisi Grafikleri



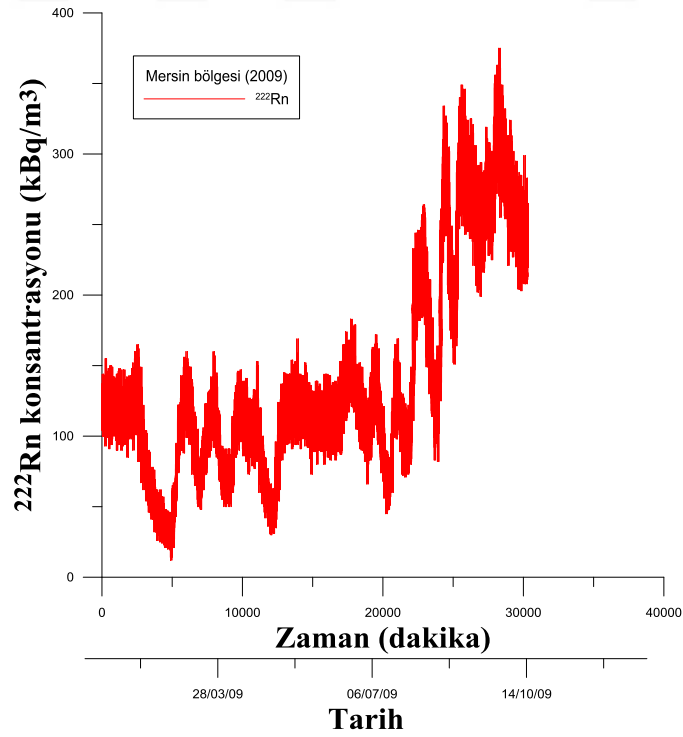
Ek 1 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2009 yılı Kozan bölgesi)



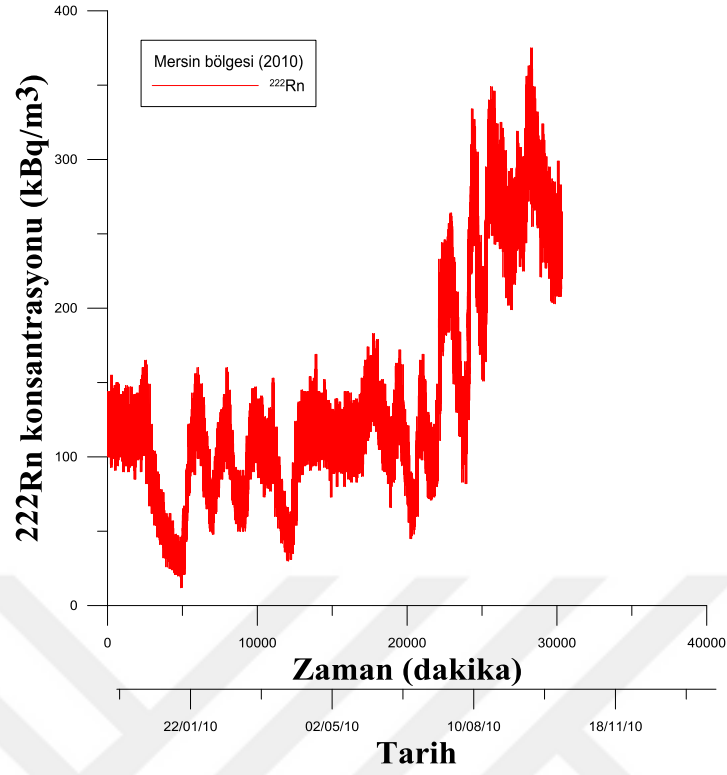
Ek 1 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2010 yılı Kozan bölgesi)



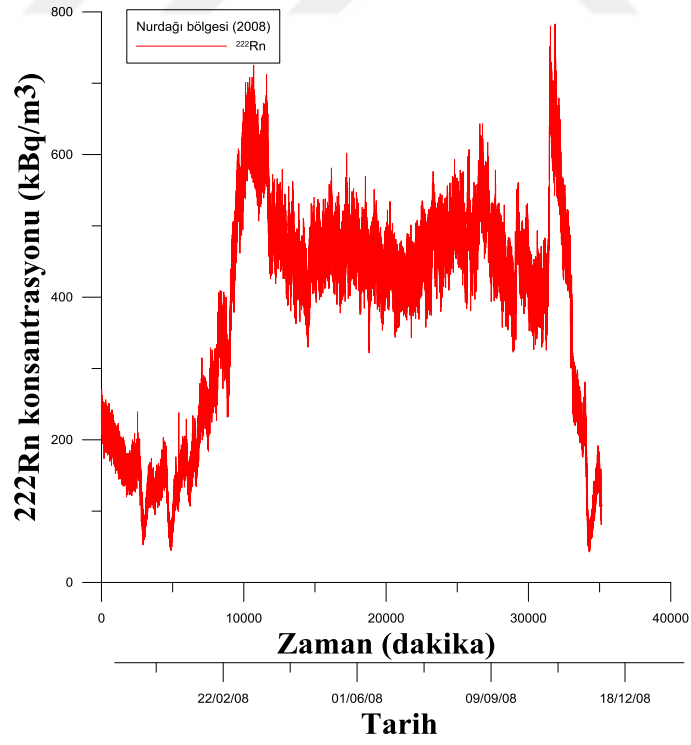
Ek 1 Şekil 3. ²²²Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2008 yılı Mersin bölgesi)



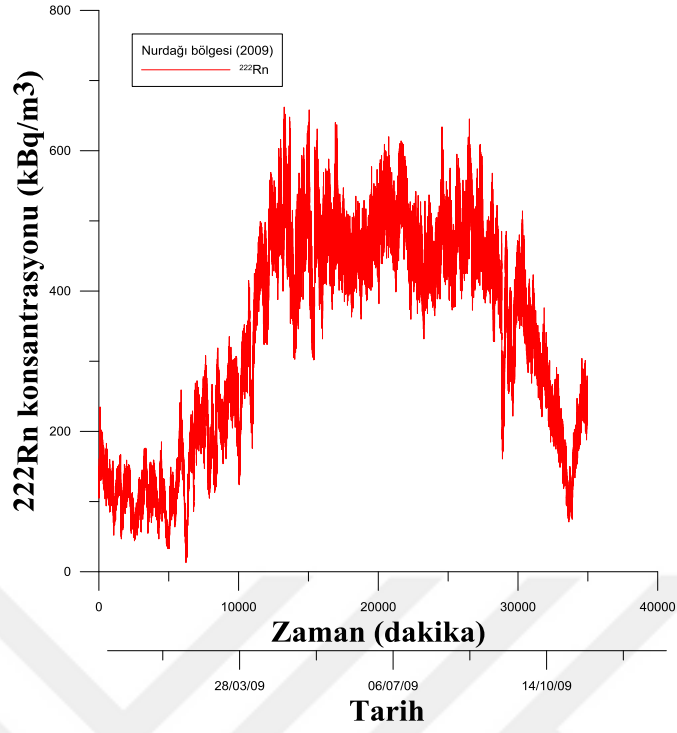
Ek 1 Şekil 4. ²²²Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2009 yılı Mersin bölgesi)



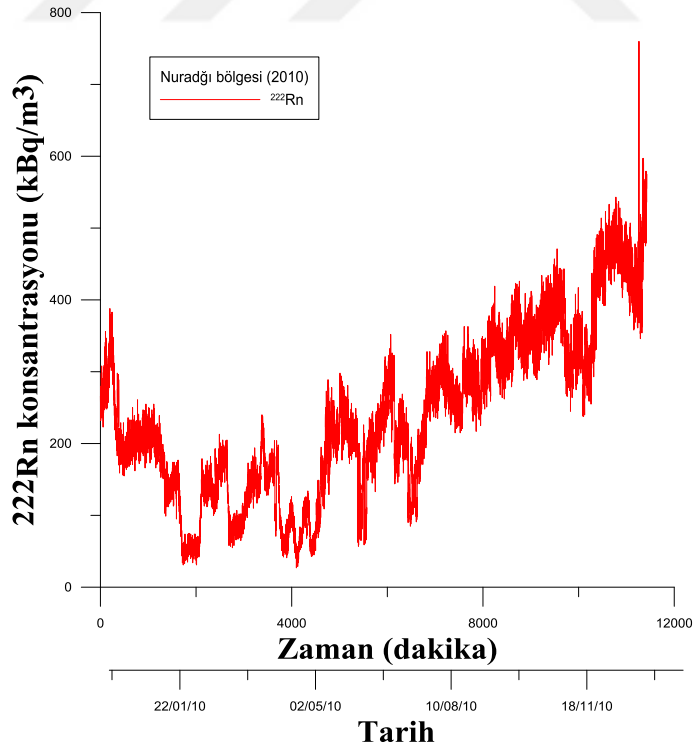
Ek 1 Şekil 5. ²²²Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2010 yılı Mersin bölgesi)



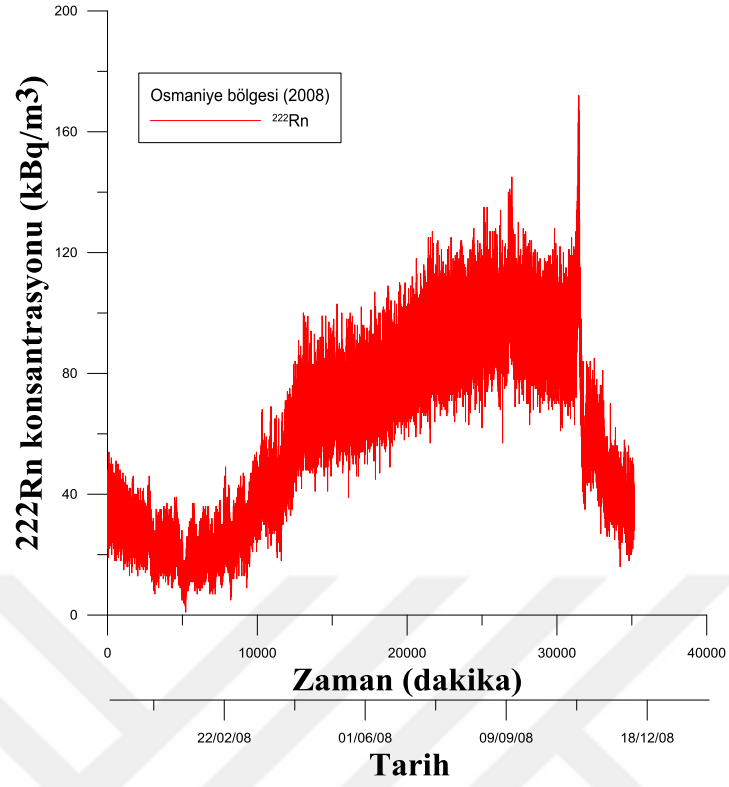
Ek 1 Şekil 6. ²²²Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2008 yılı Nurdağı bölgesi)



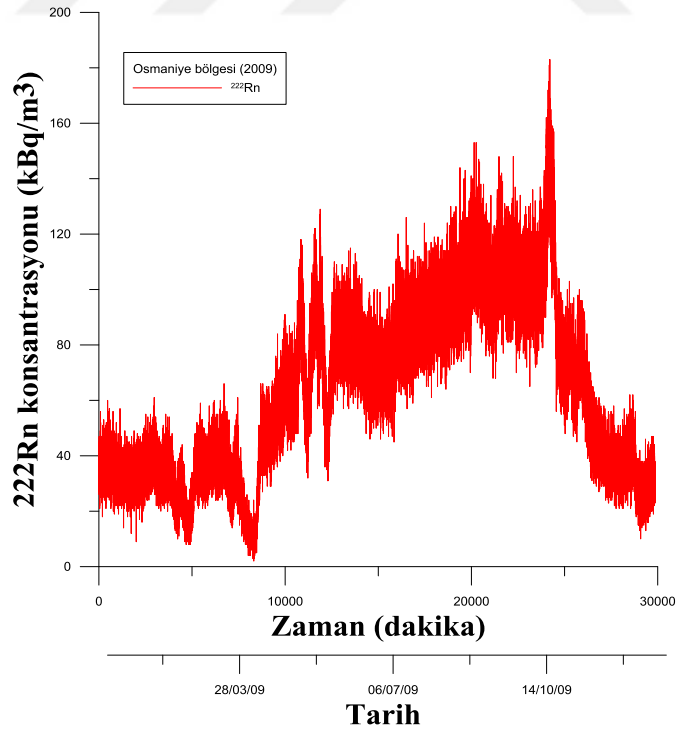
Ek 1 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



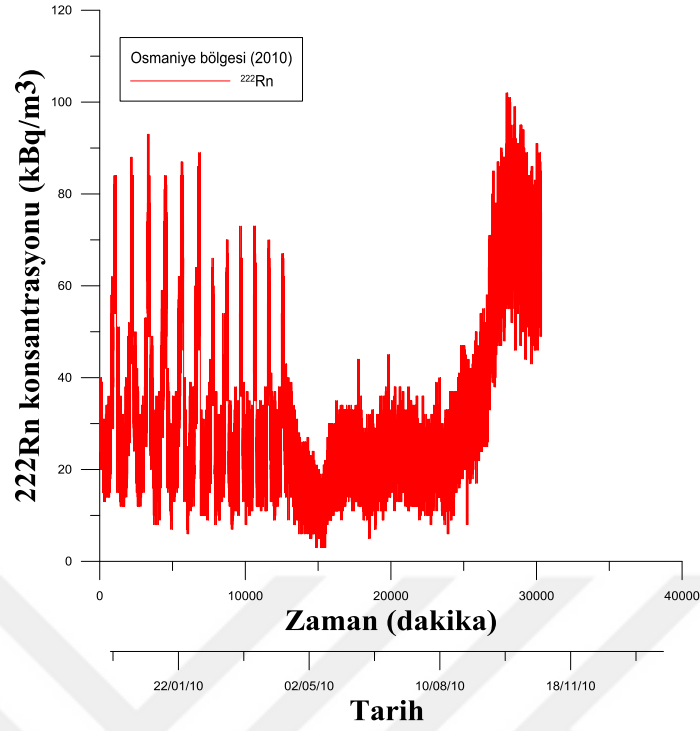
Ek 1 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



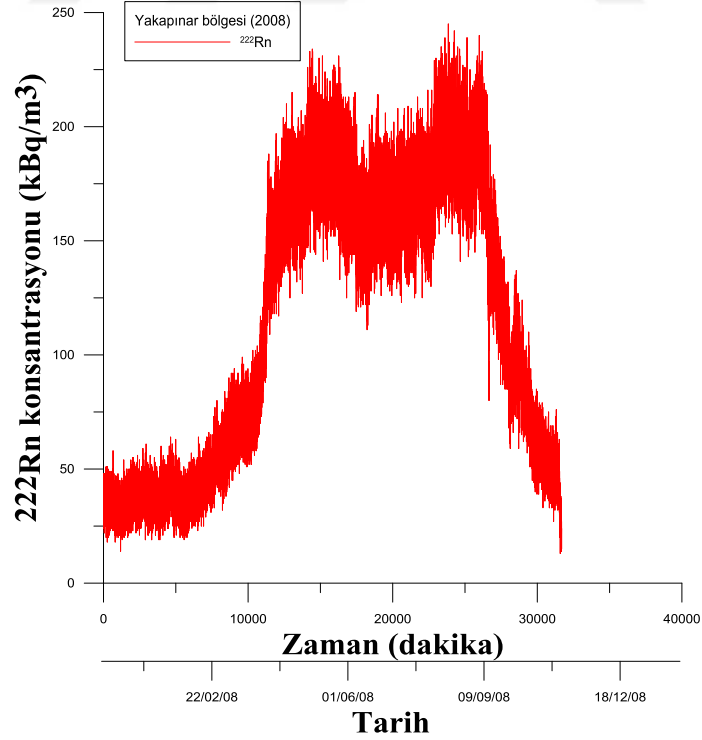
Ek 1 Şekil 9. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



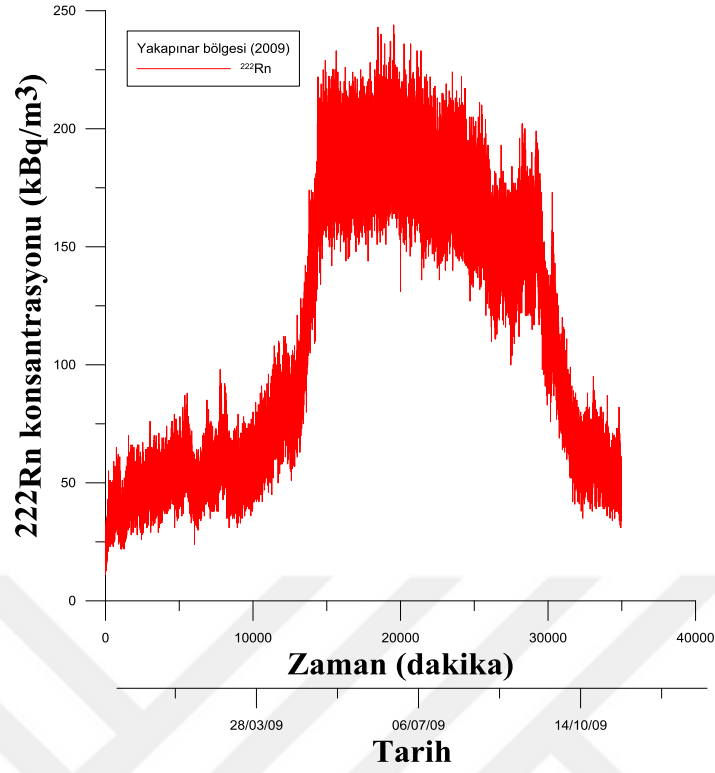
Ek 1 Şekil 10. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



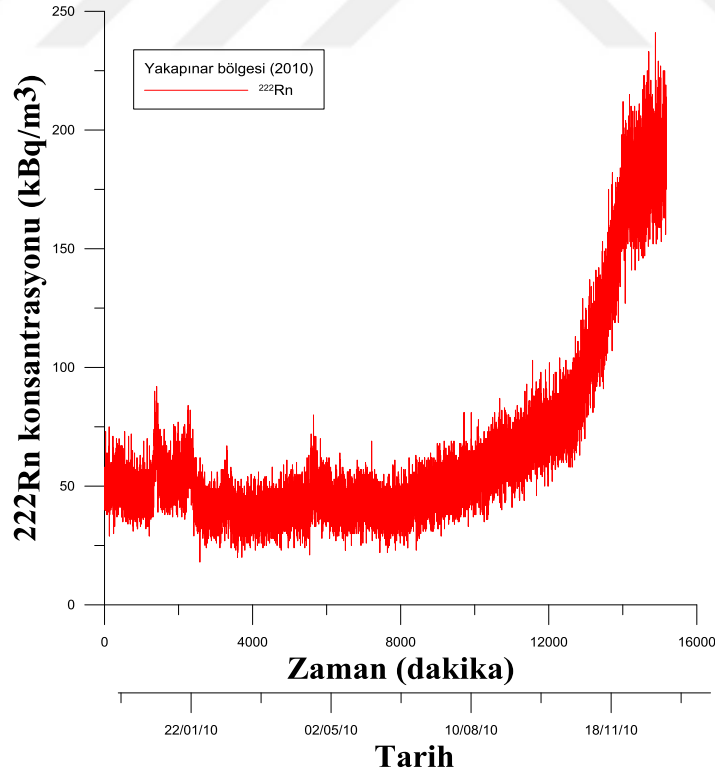
Ek 1 Şekil 11. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 1 Şekil 12. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 1 Şekil 13. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

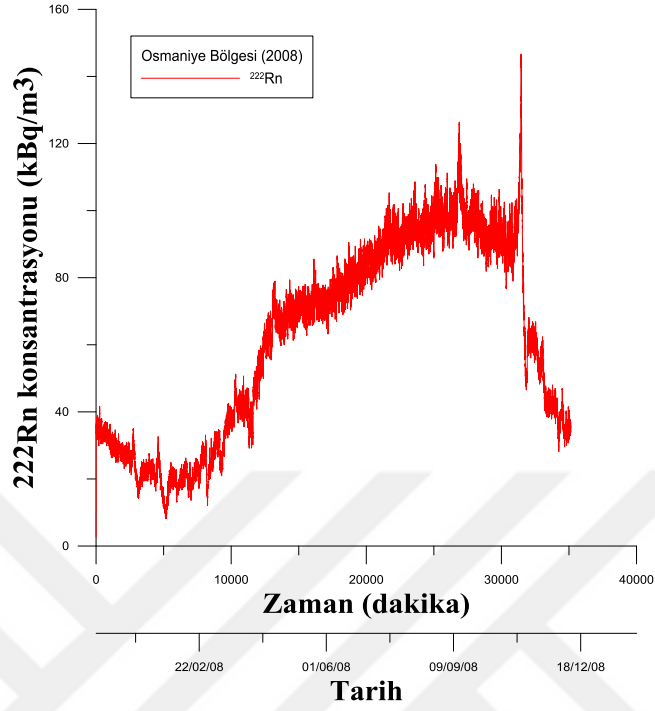


Ek 1 Şekil 14. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

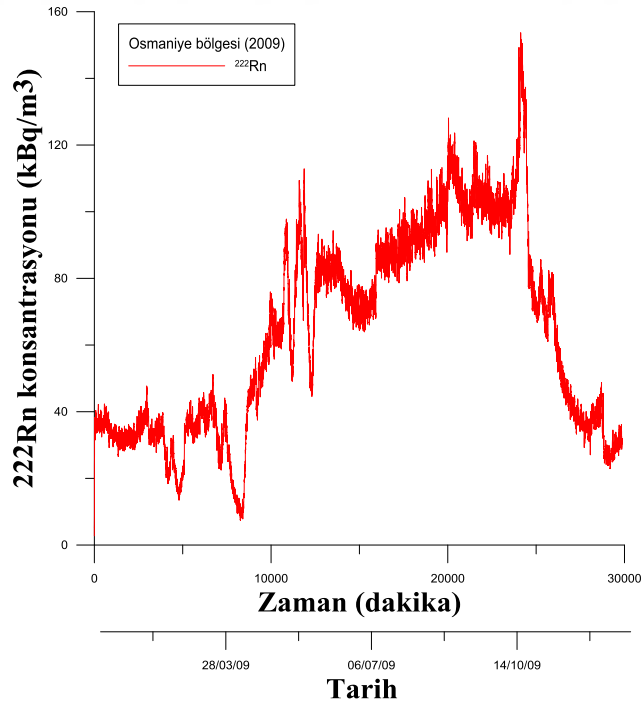


EK 2

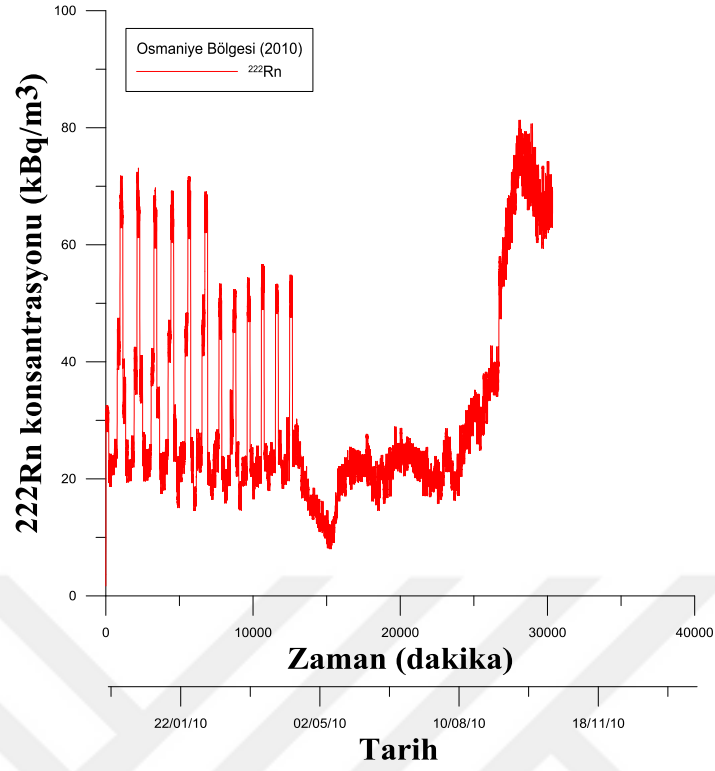
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen 10. Dereceden Kaiser Pencereli FIR Süzgeci Grafikleri



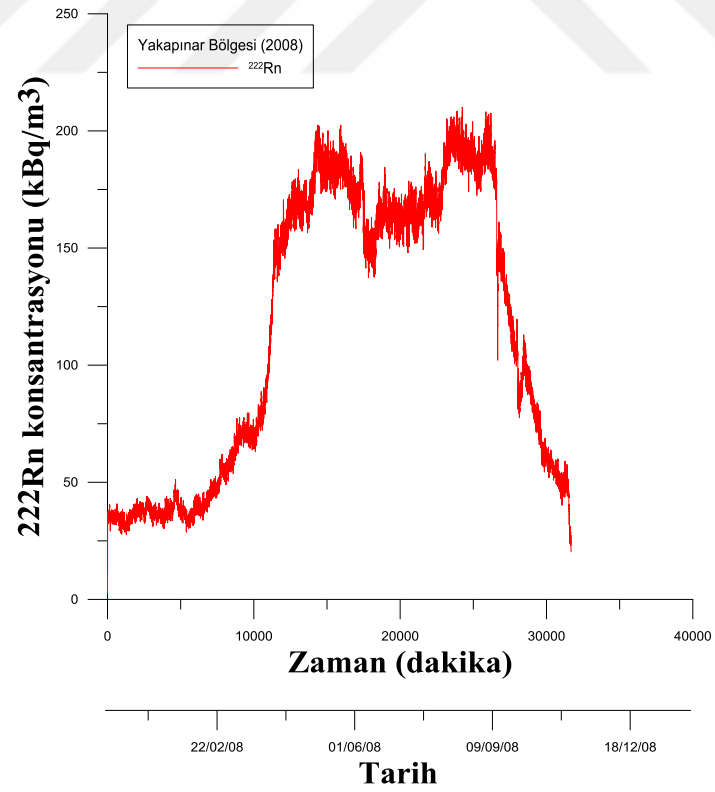
Ek 2 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi 10.dereceden FIR Kaiser pencere (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



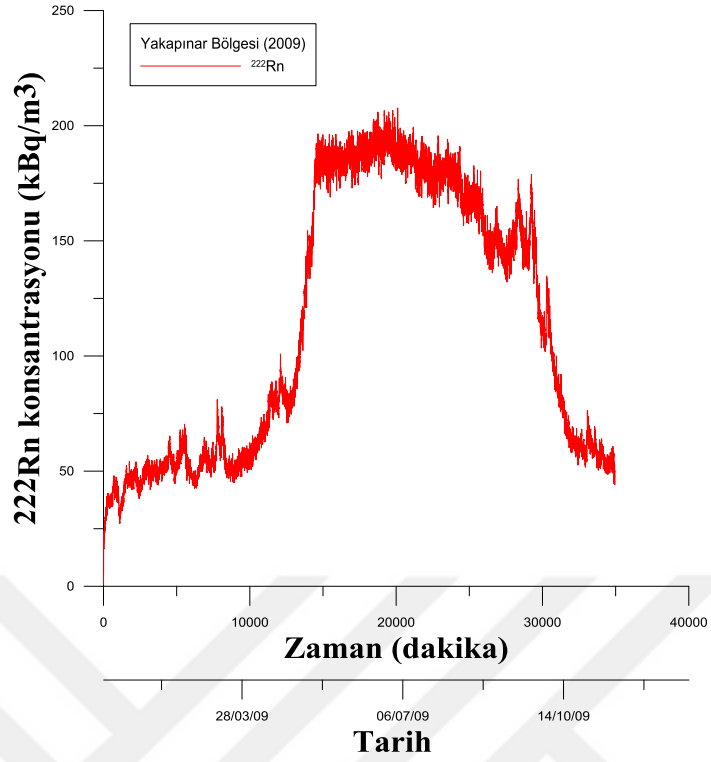
Ek 2 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi 10.dereceden FIR Kaiser pencere (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



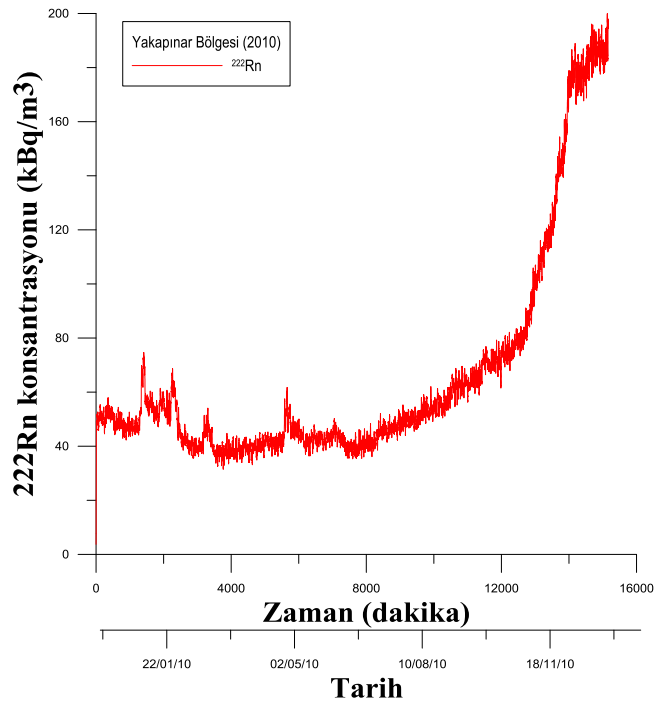
Ek 2 Şekil 3. ²²²Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi 10.dereceden FIR Kaiser pencere (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 2 Şekil 4. ²²²Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi 10.dereceden FIR Kaiser pencere (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 2 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi 10.dereceden FIR Kaiser pencereli (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

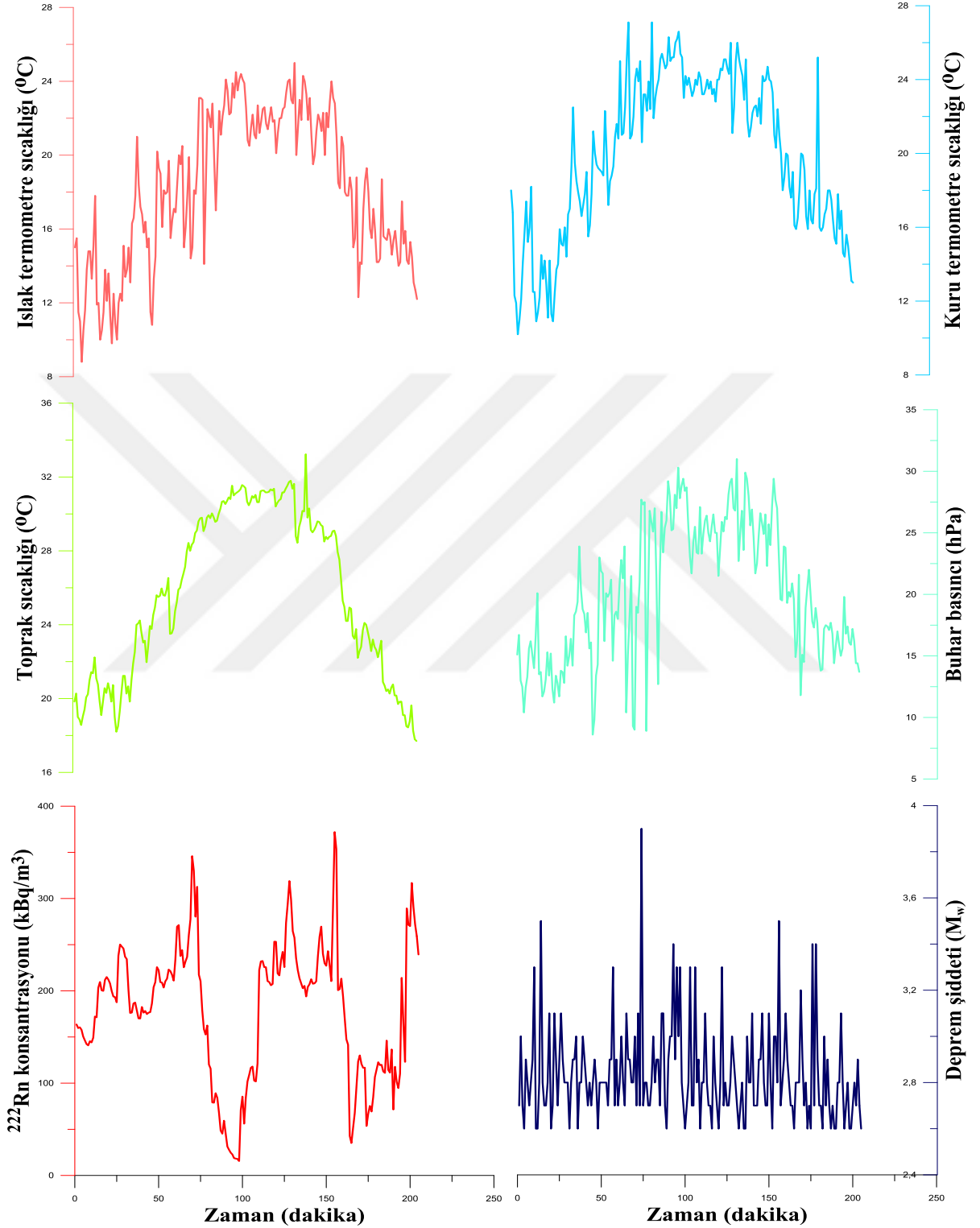


Ek 2 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun zaman serisi analizi 10.dereceden FIR Kaiser pencereli (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

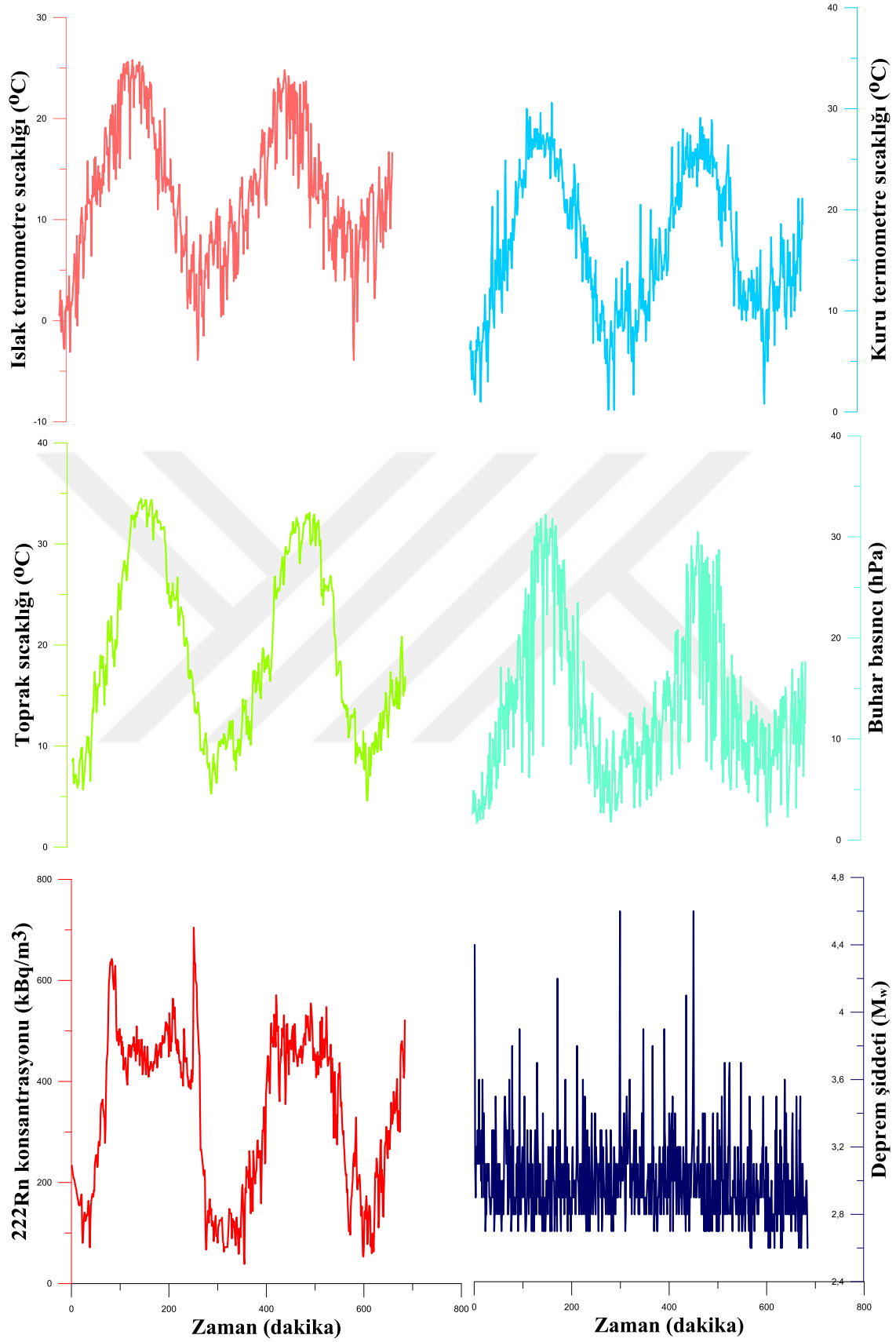


EK 3

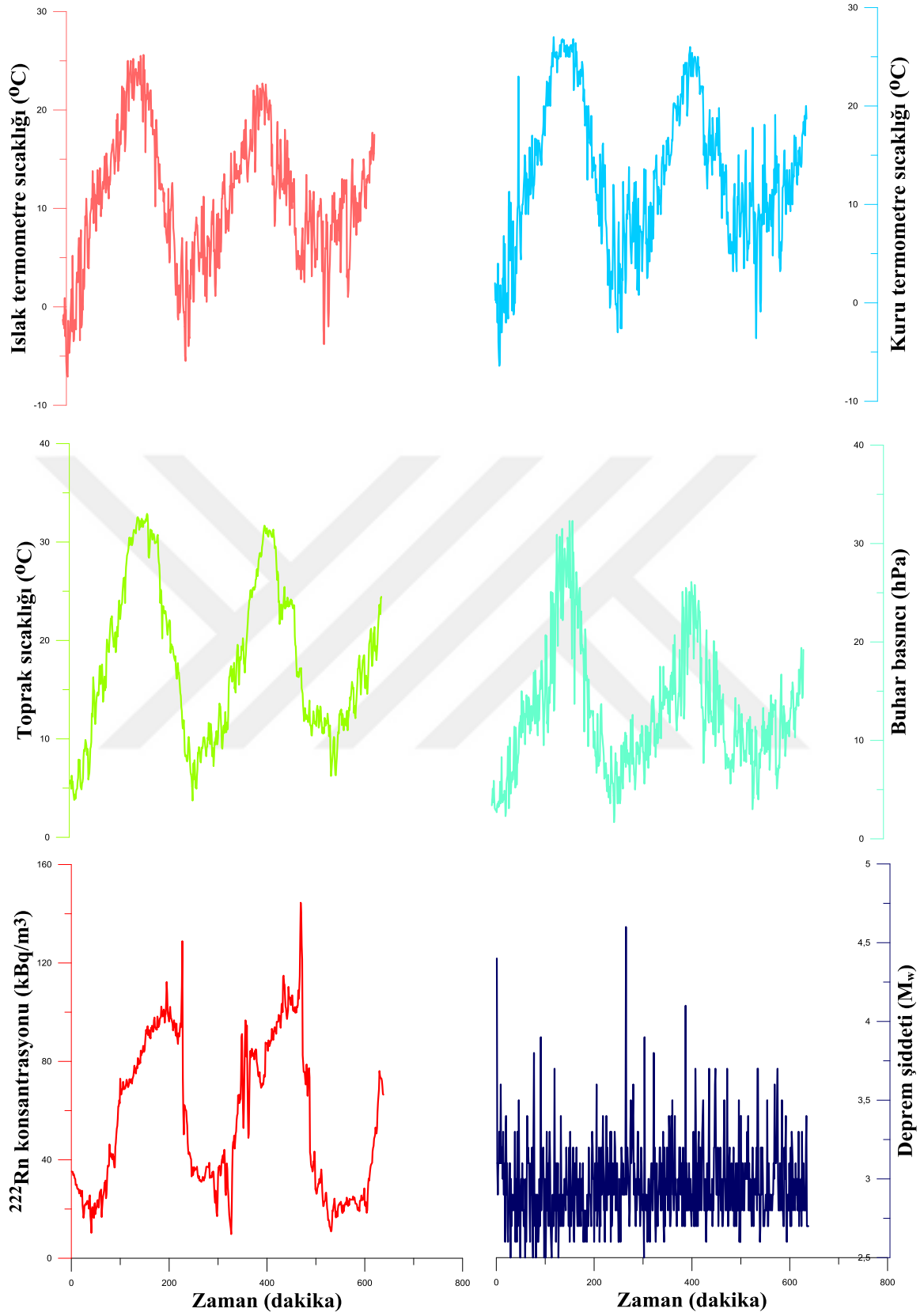
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonlarının deprem şiddeti, ^{222}Rn konsantrasyonu ve çevresel parametreler [toprak sıcaklığı buhar basıncı ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarına ait Grafikleri



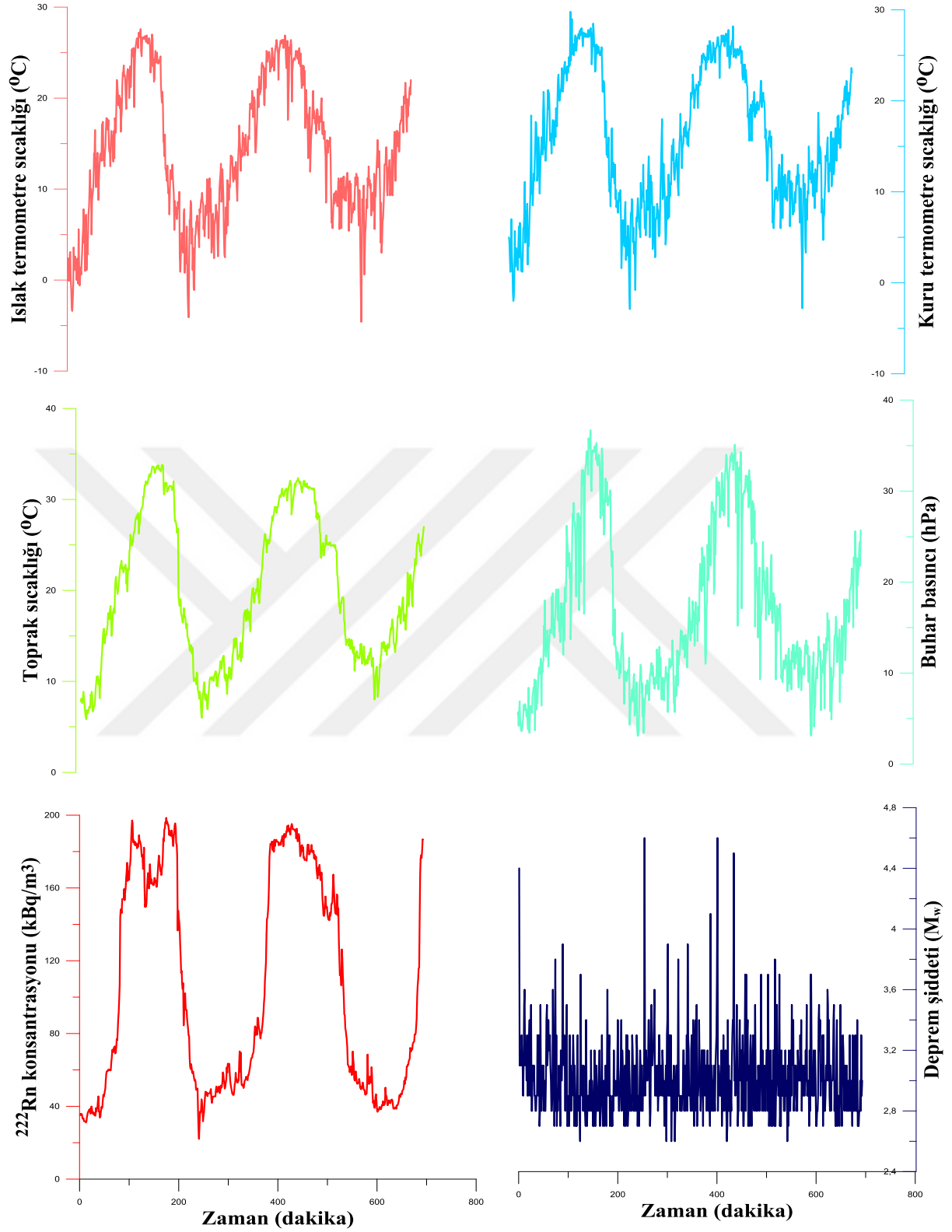
Ek 3 Şekil 1. Mersin Bölgesi için ^{222}Rn konsantrasyonu, deprem şiddeti, toprak sıcaklığı, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarının değişim grafiği



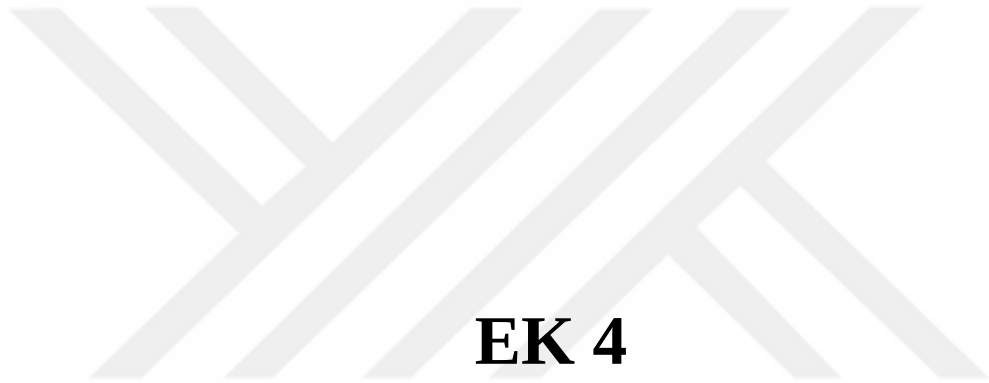
Ek 3 Şekil 2. Nurdağı Bölgesi için ^{222}Rn konsantrasyonu, deprem şiddeti, toprak sıcaklığı, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarının değişim grafiği



Ek 3 Şekil 3. Osmaniye Bölgesi için ^{222}Rn konsantrasyonu, deprem şiddeti, toprak sıcaklığı, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarının değişim grafiği

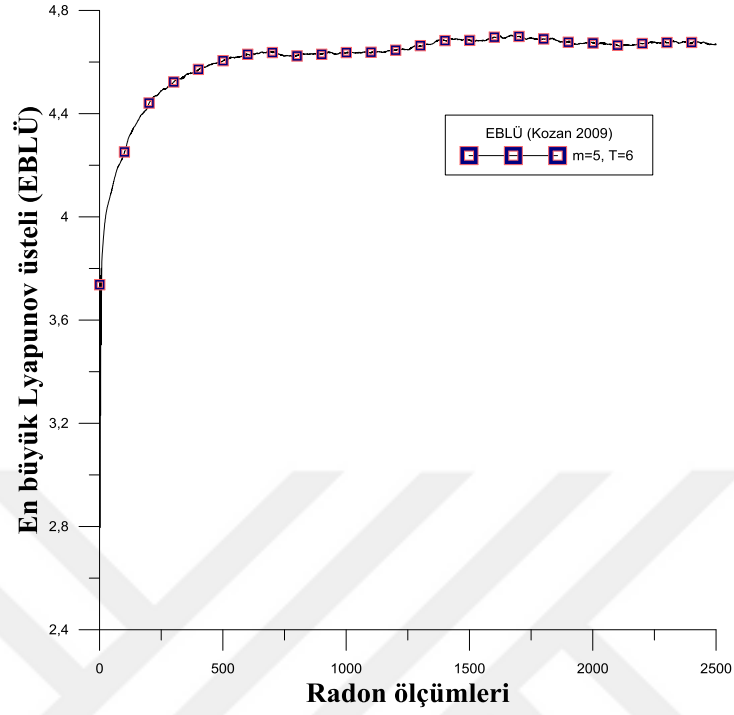


Ek 3 Şekil 4. Yakapınar Bölgesi için ^{222}Rn konsantrasyonu, deprem şiddeti, toprak sıcaklığı, buhar basıncı, ıslak ve kuru termometre sıcaklıklarının değişim grafiği

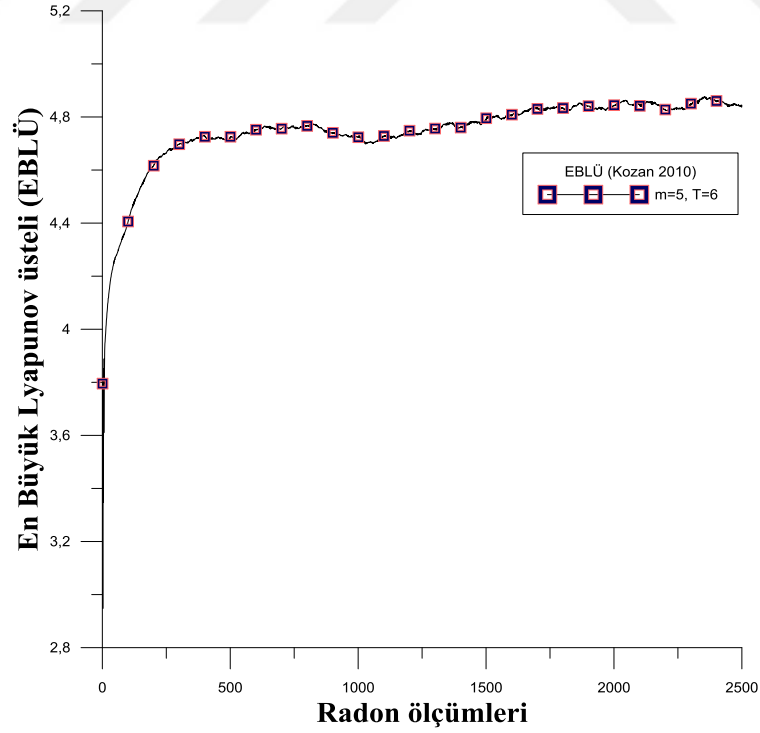


EK 4

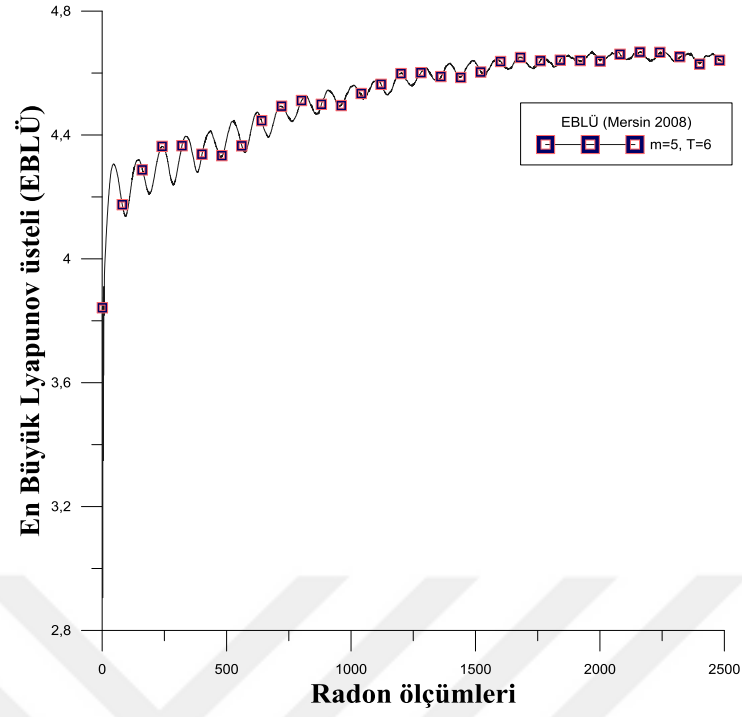
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen En Büyük Lyapunov Üsteli Grafikleri



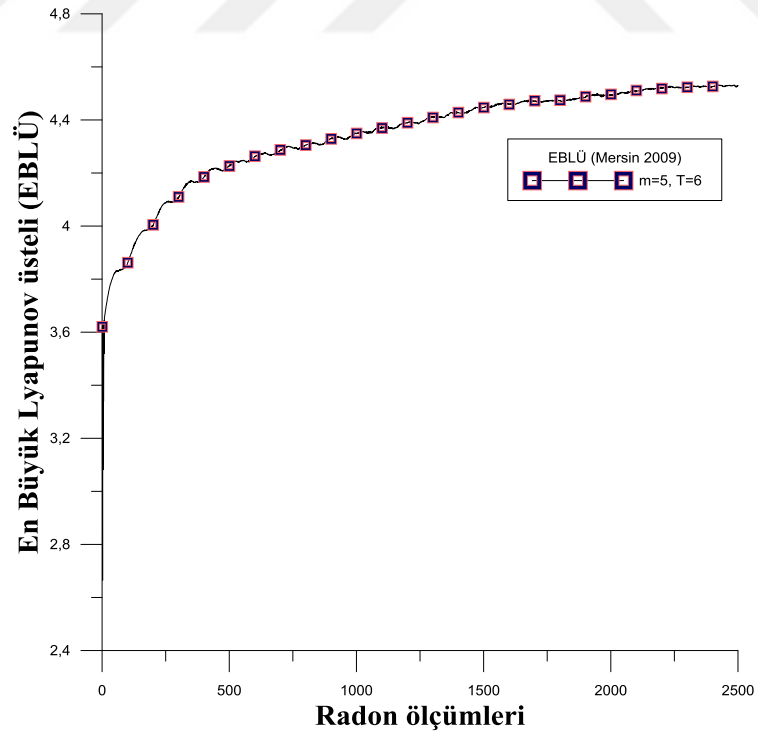
Ek 4 Şekil 1. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



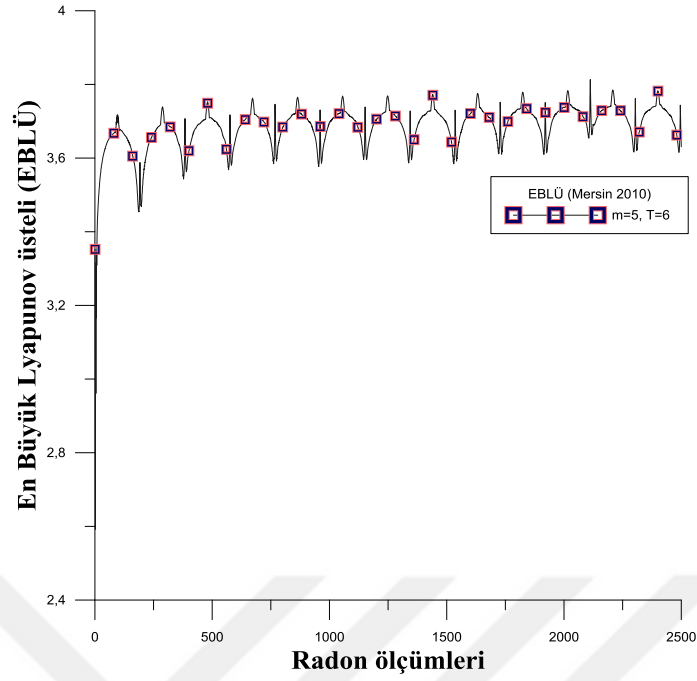
Ek 4 Şekil 2. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



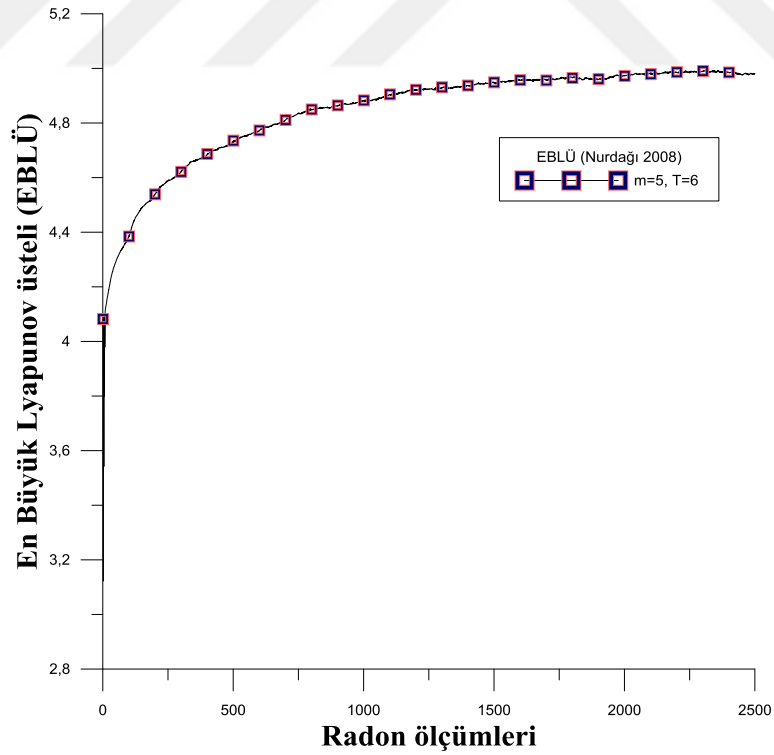
Ek 4 Şekil 3. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



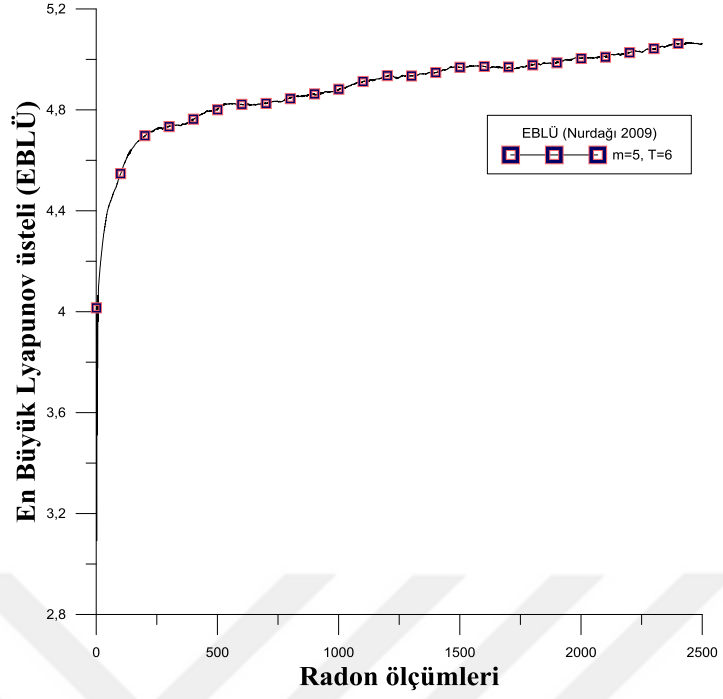
Ek 4 Şekil 4. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



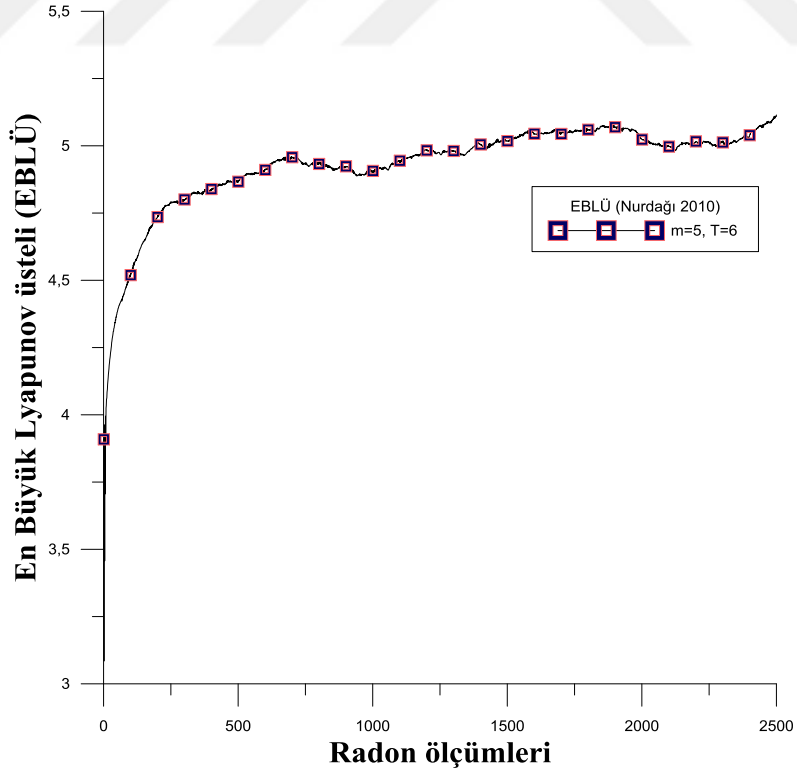
Ek 4 Şekil 5. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



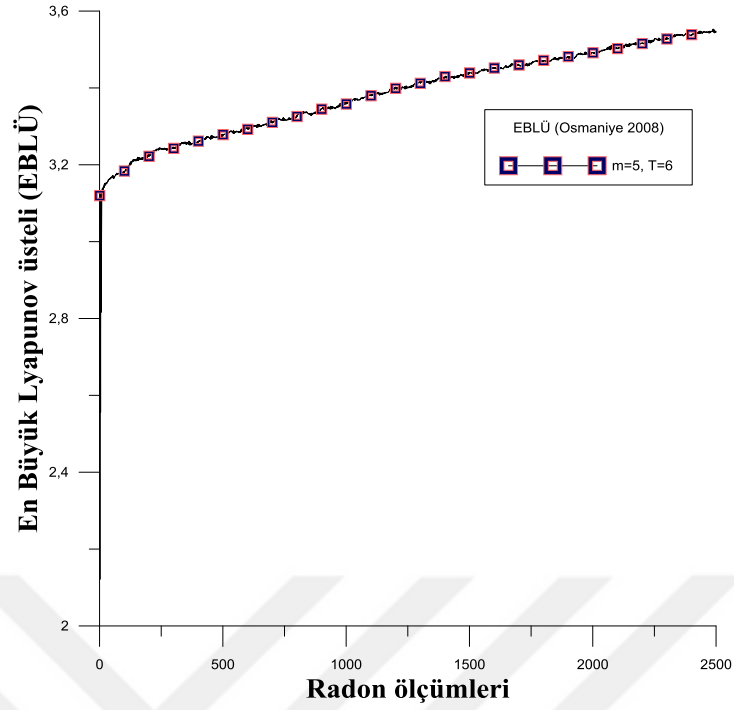
Ek 4 Şekil 6. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2008 yılı Nurdağı bölgesi)



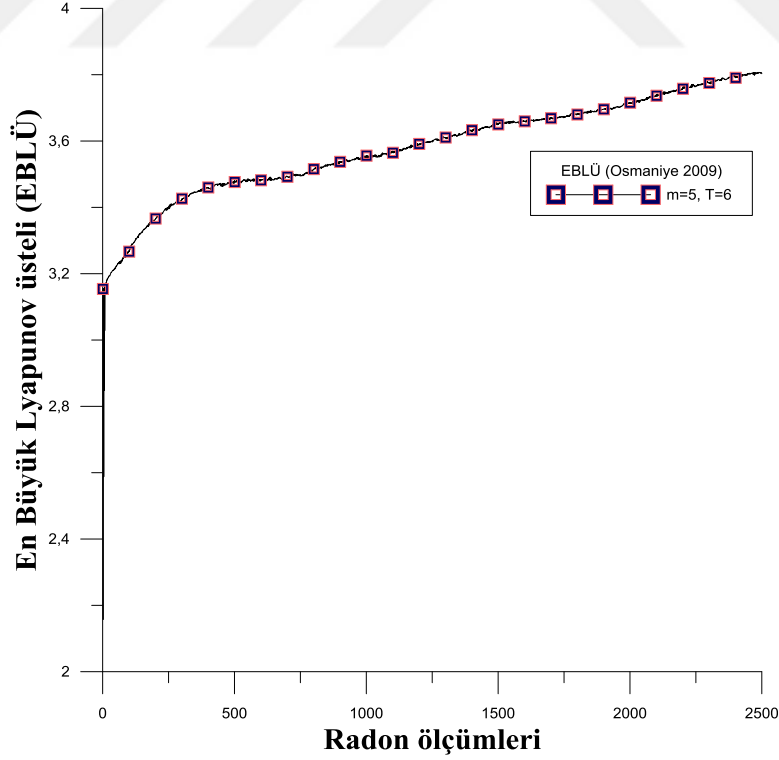
Ek 4 Şekil 7. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



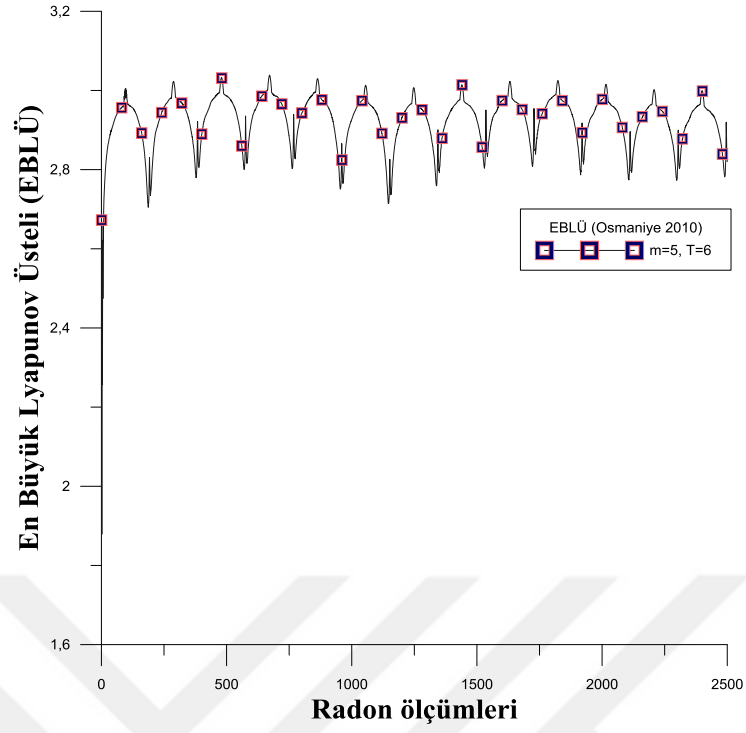
Ek 4 Şekil 8. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



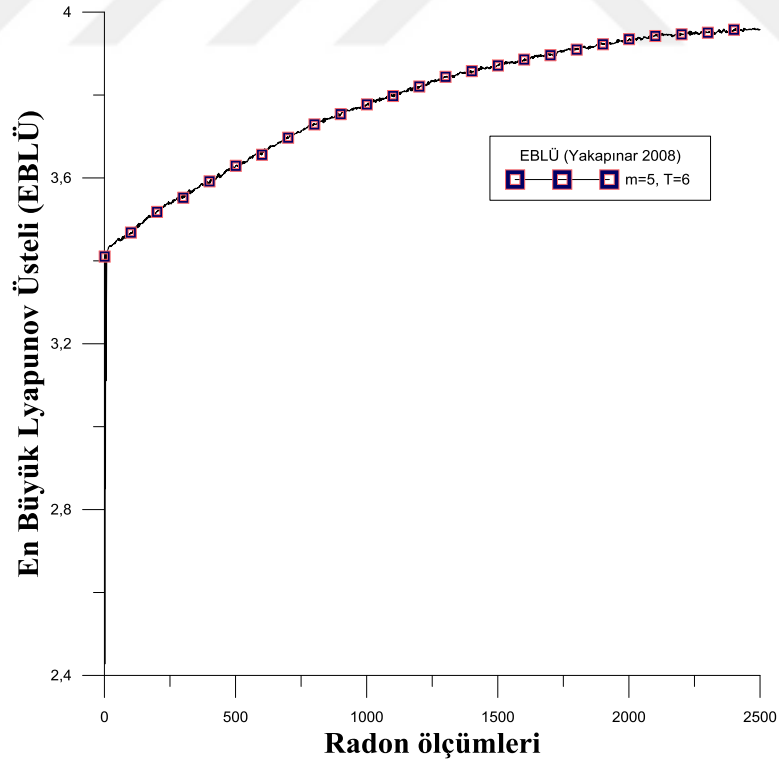
Ek 4 Şekil 9. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



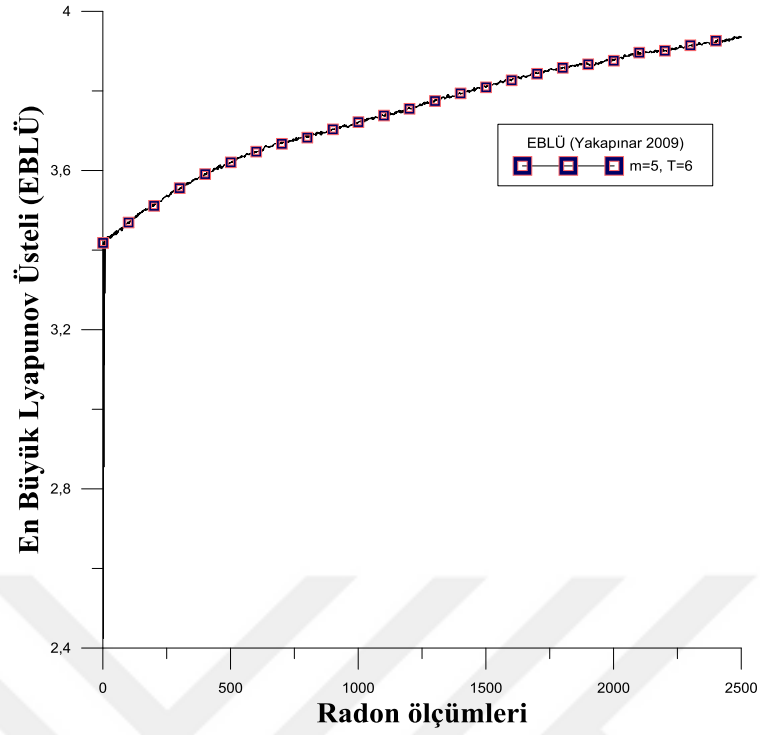
Ek 4 Şekil 10. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



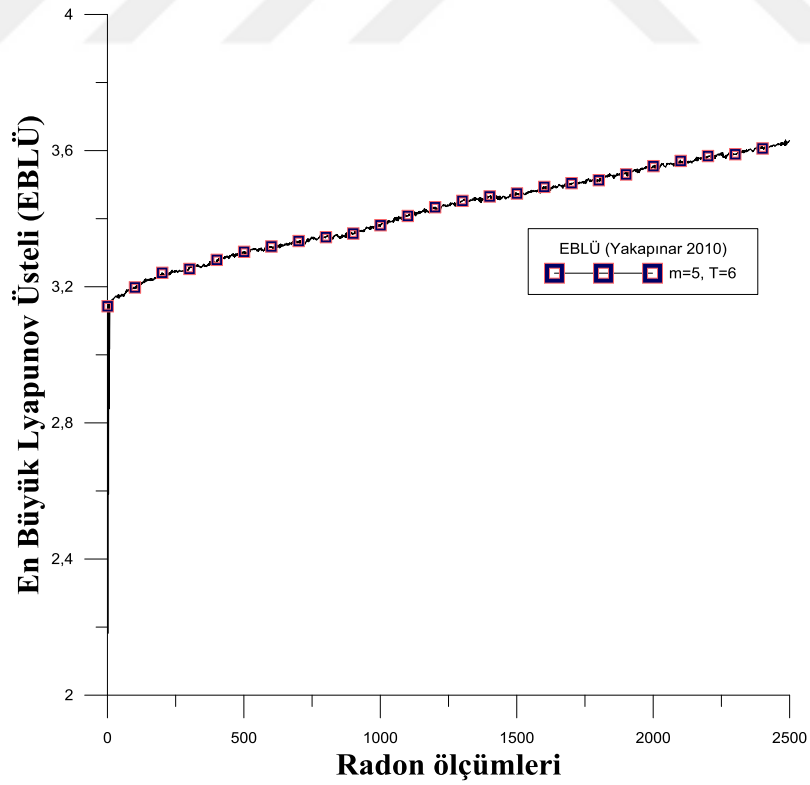
Ek 4 Şekil 11. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 4 Şekil 12. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 4 Şekil 13. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

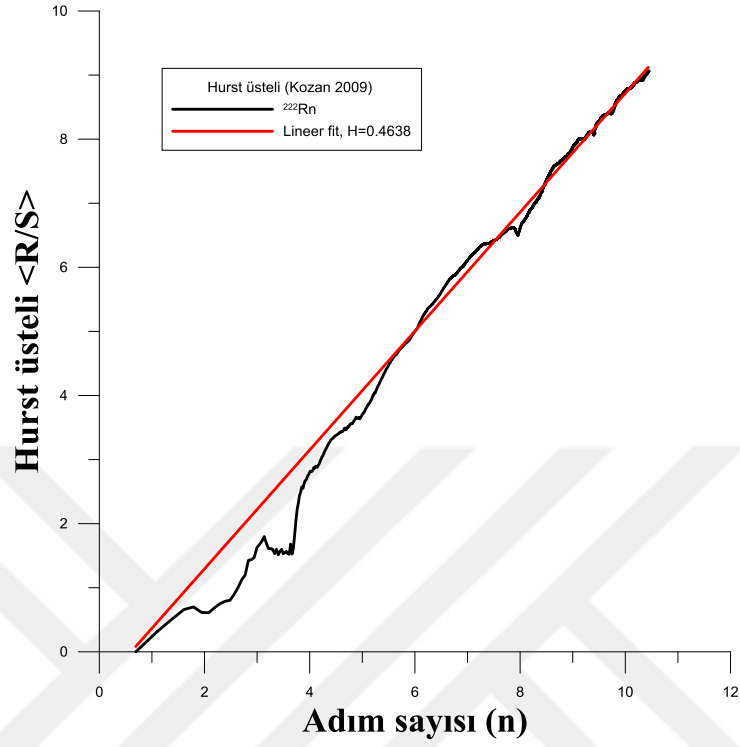


Ek 4 Şekil 14. ^{222}Rn sinyalinin zaman serisinden hesaplanan En Büyük Lyapunov üsteli grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

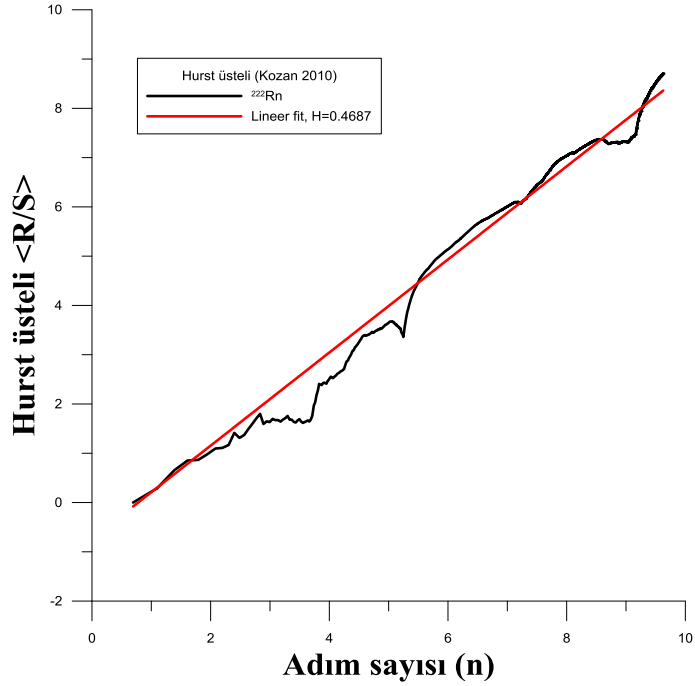


EK 5

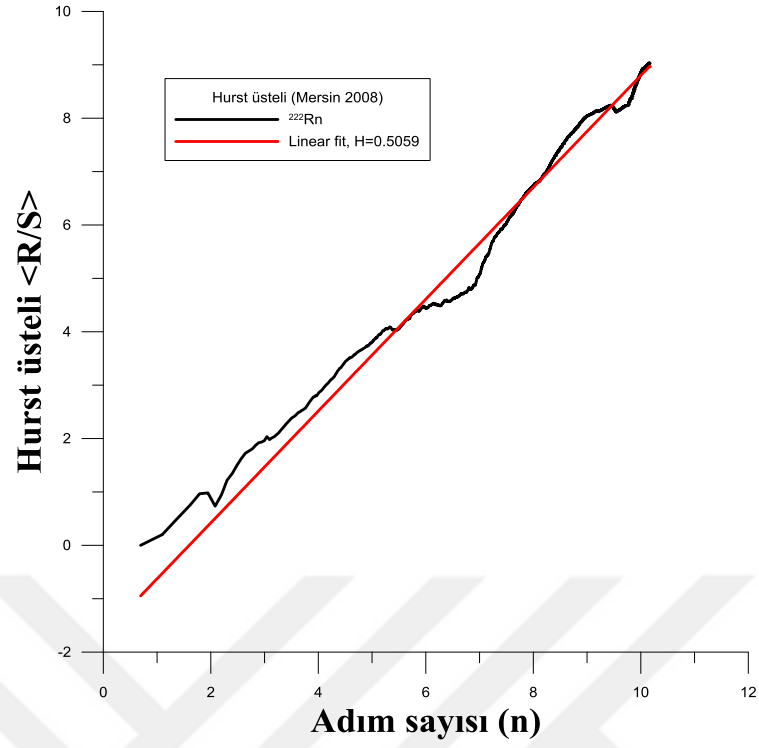
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Hurst Üsteli Grafikleri



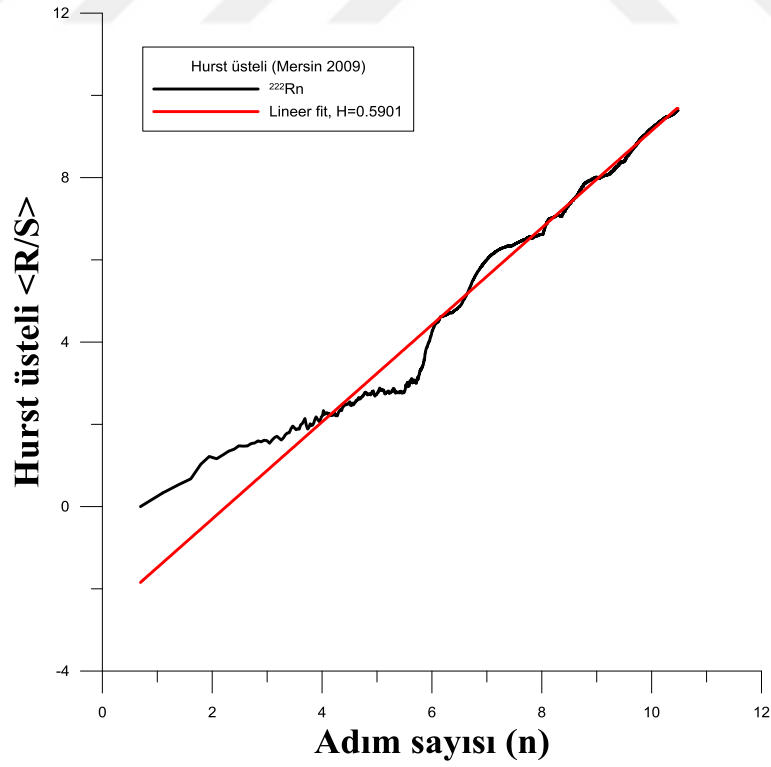
Ek 5 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



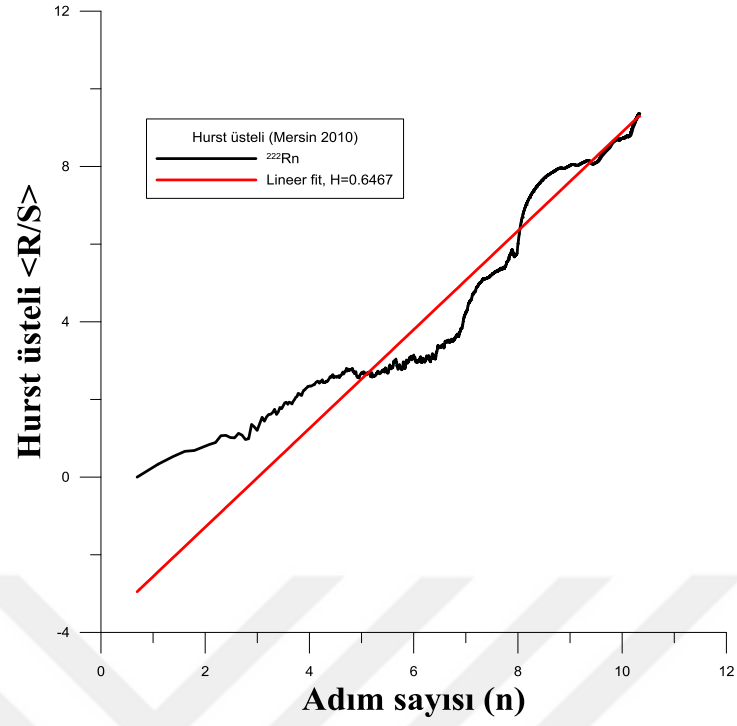
Ek 5 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



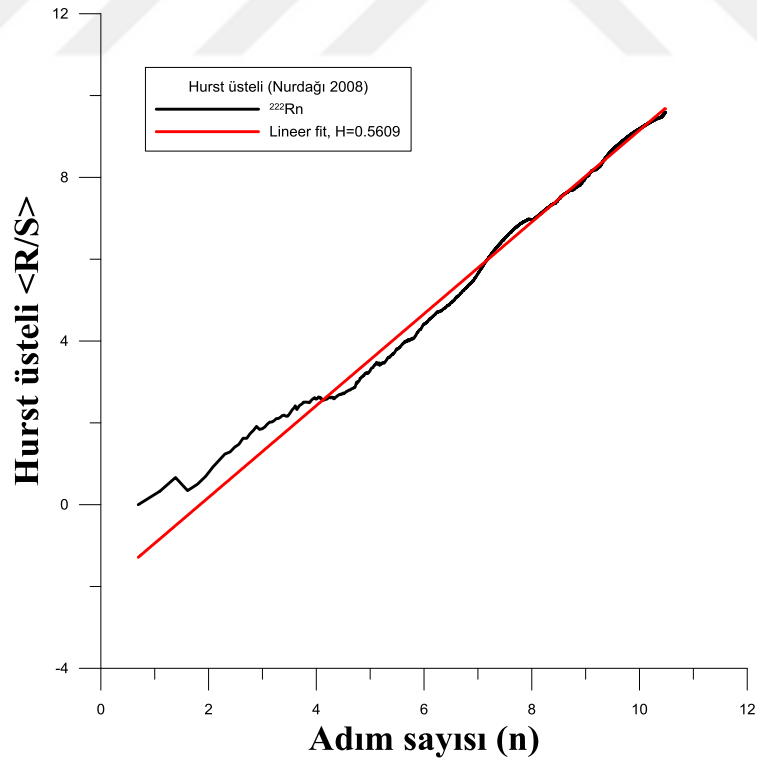
Ek 5 Şekil 3. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



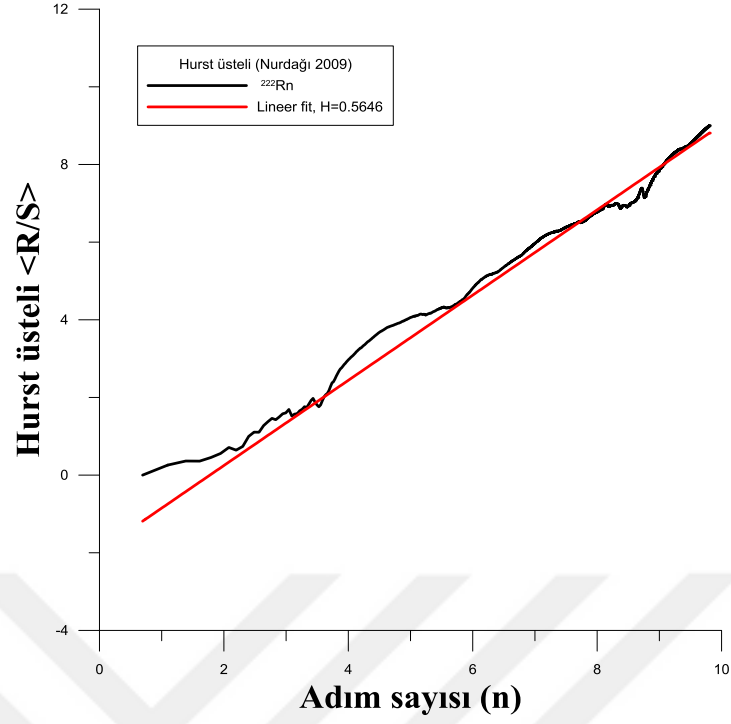
Ek 5 Şekil 4. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



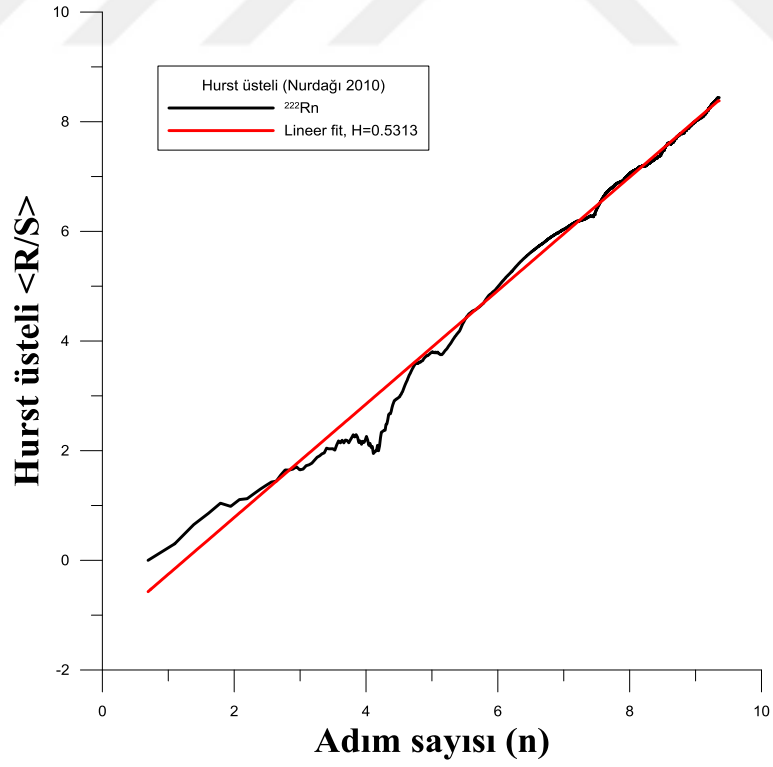
Ek 5 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



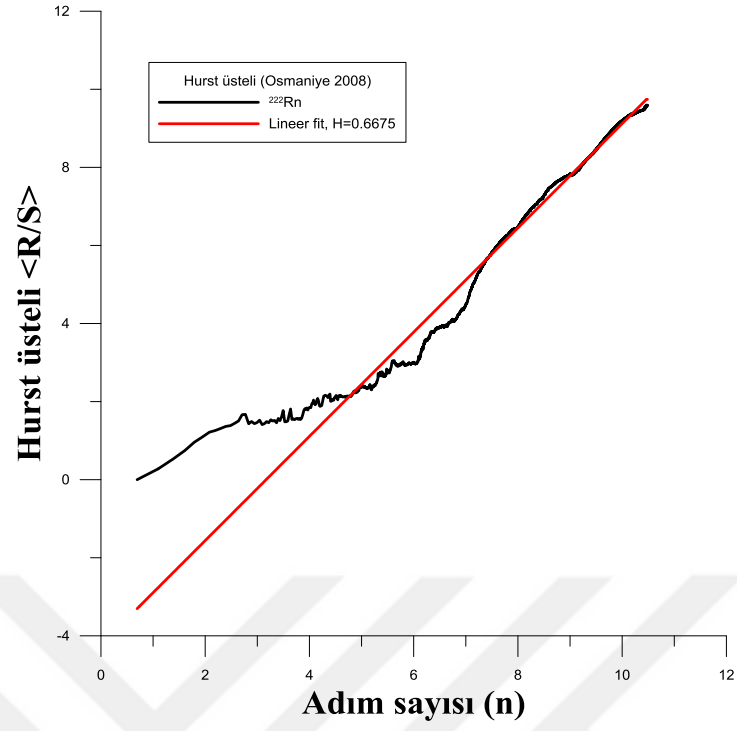
Ek 5 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2008 yılı Nurdagi bölgesi)



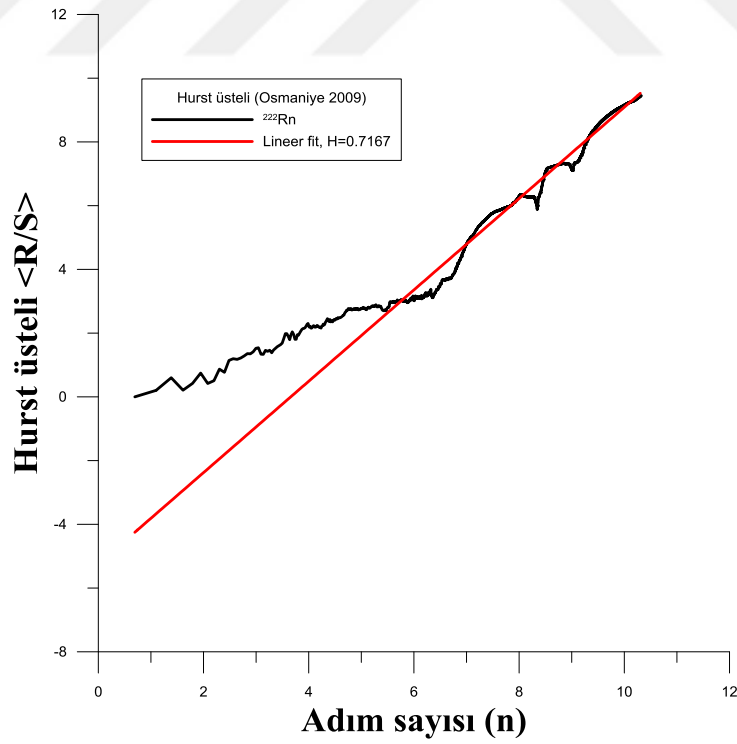
Ek 5 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



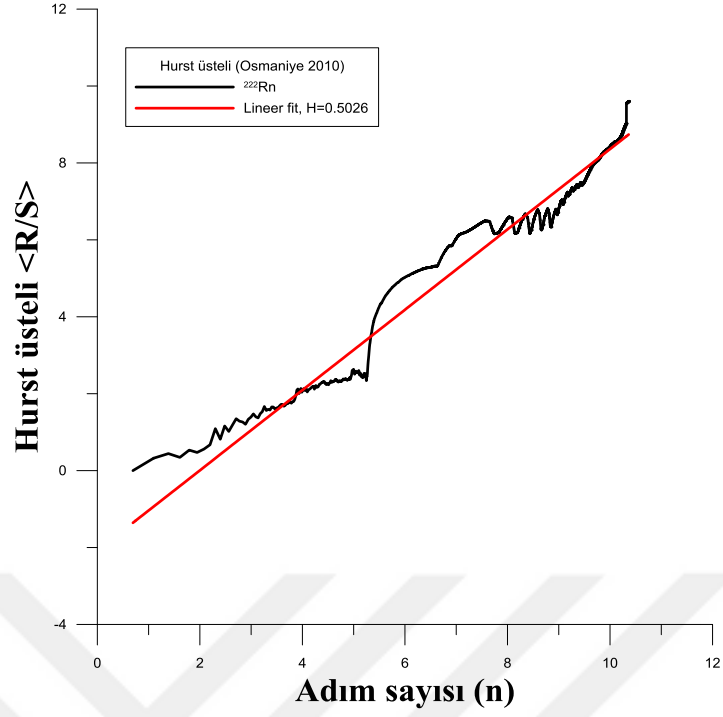
Ek 5 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



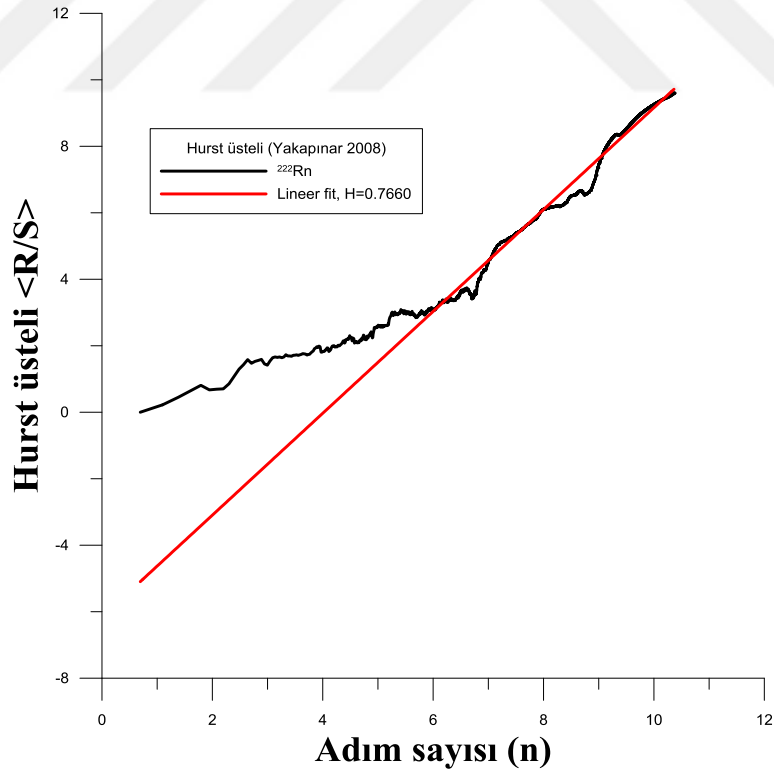
Ek 5 Şekil 9. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



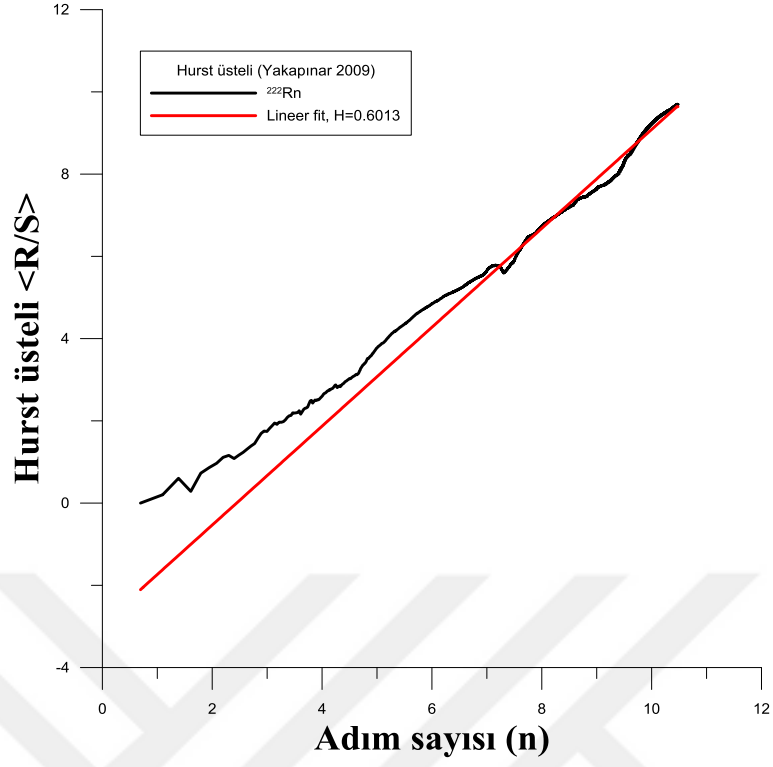
Ek 5 Şekil 10. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



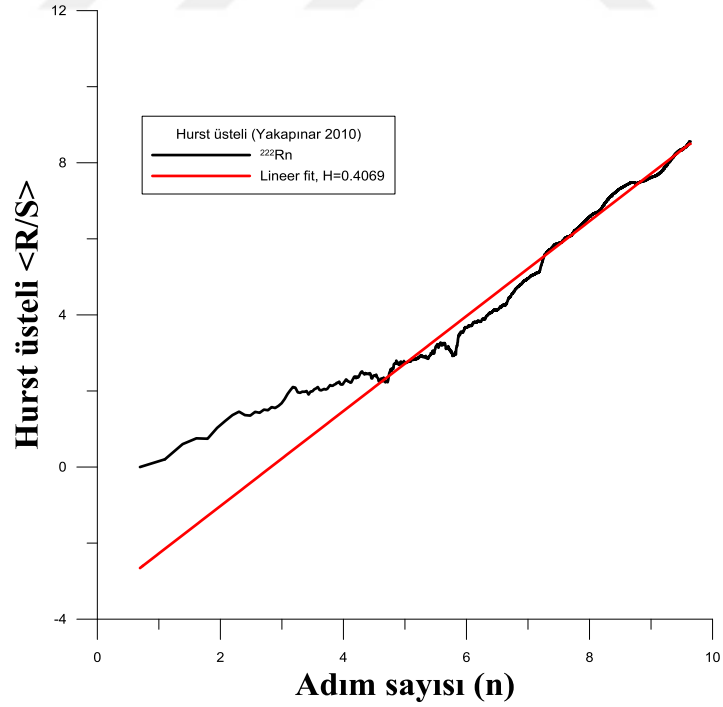
Ek 5 Şekil 11. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



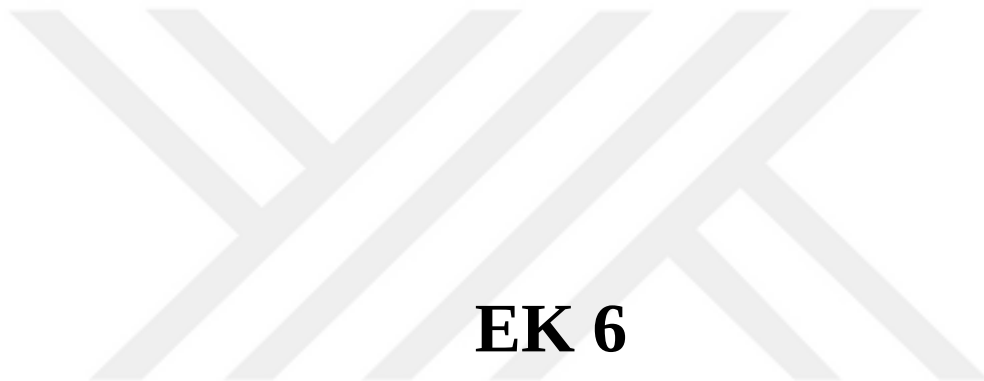
Ek 5 Şekil 12. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 5 Şekil 13. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

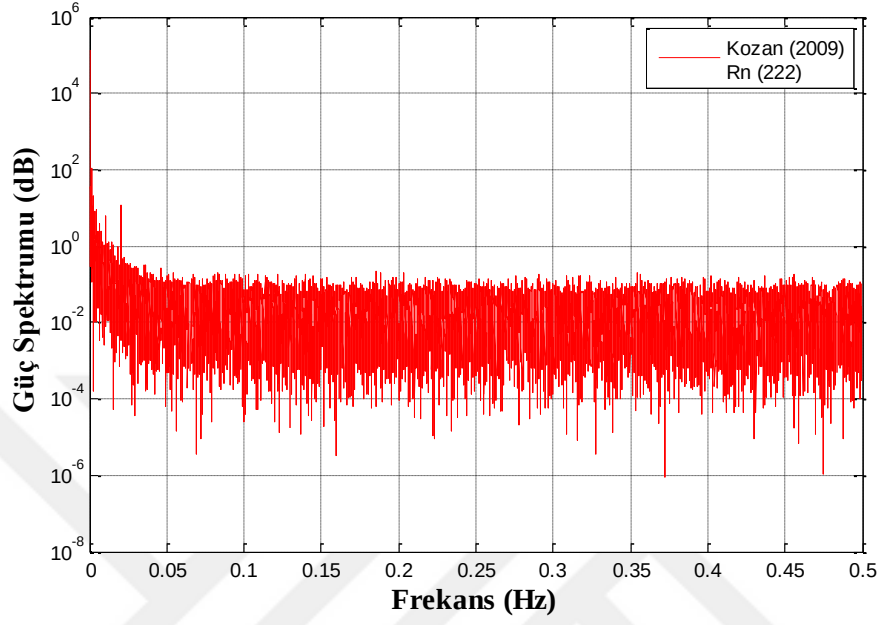


Ek 5 Şekil 14. ^{222}Rn konsantrasyonunun Hurst üsteli grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

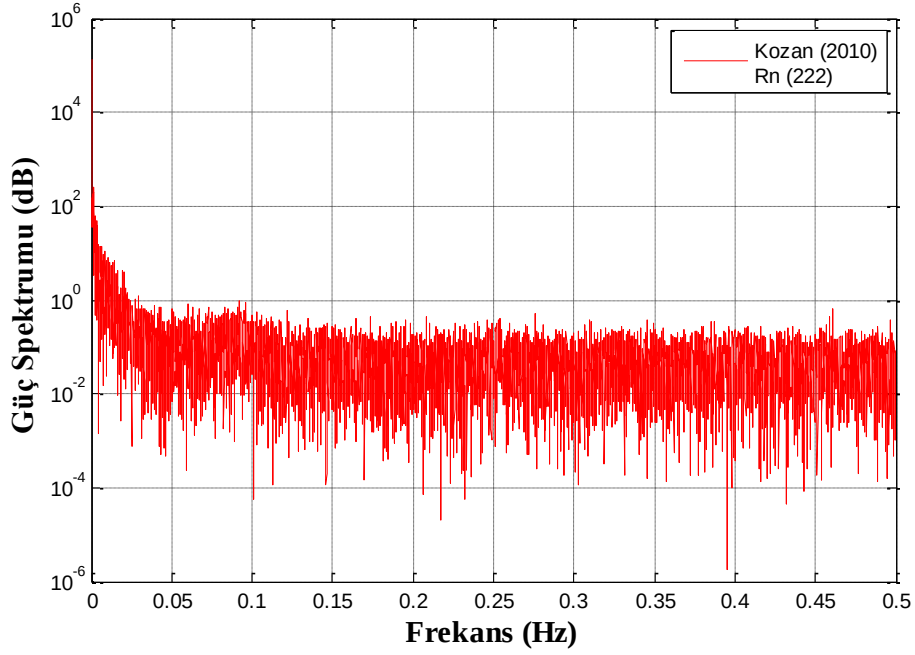


EK 6

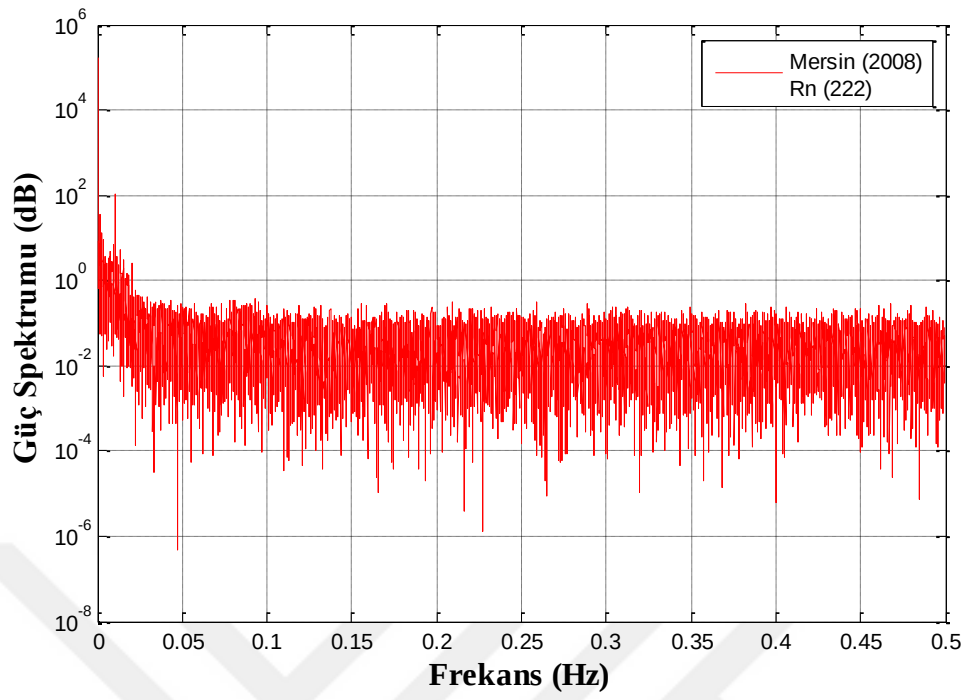
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Güç Spektrumu Grafikleri



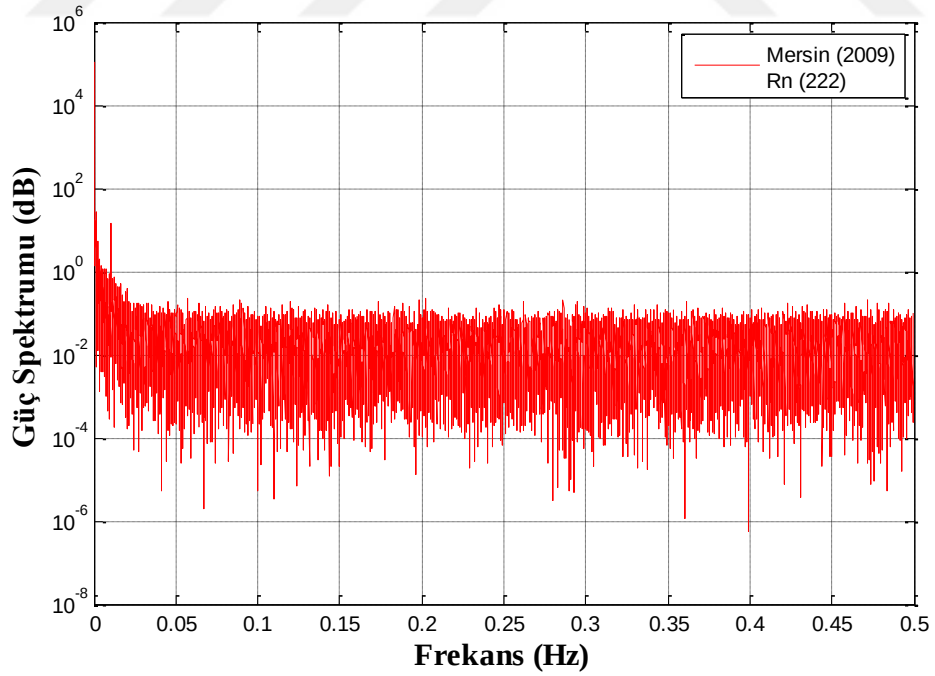
Ek 6 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



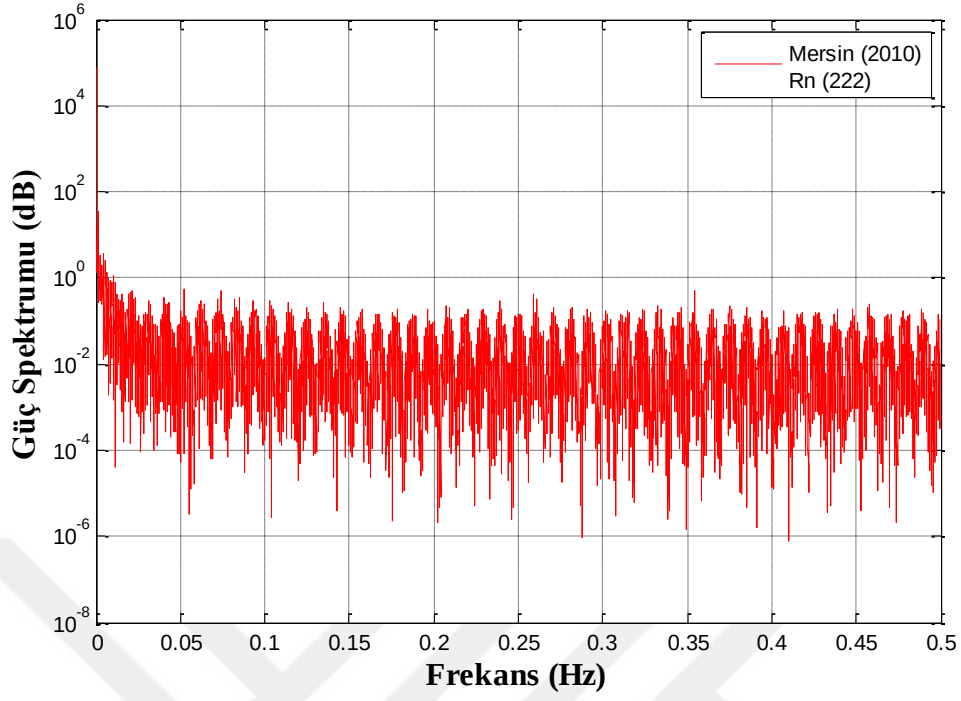
Ek 6 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



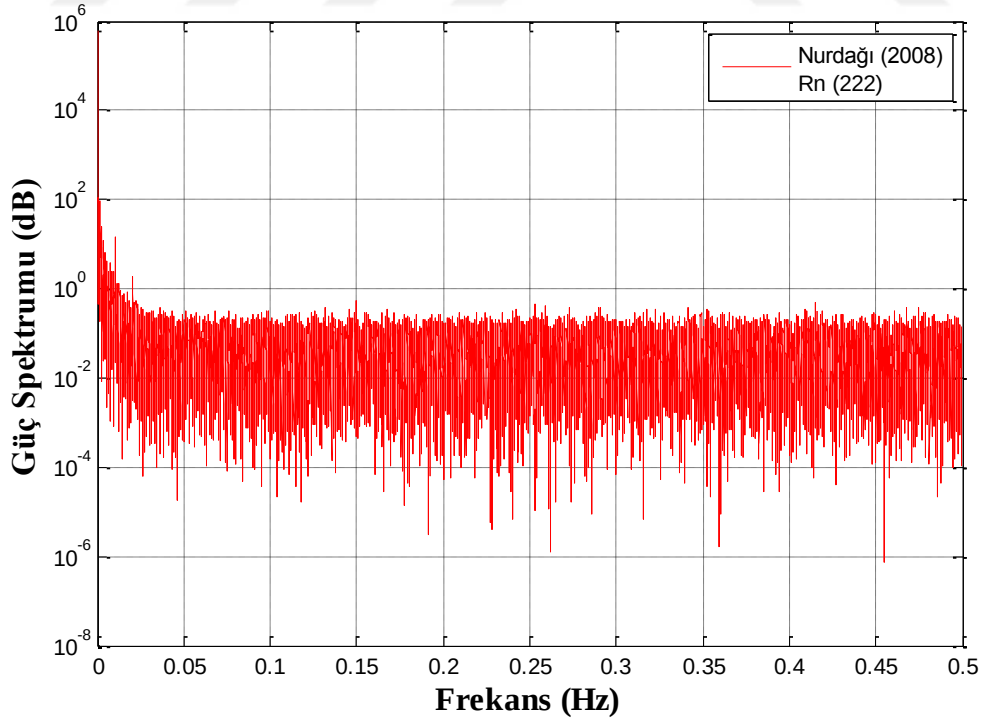
Ek 6 Şekil 3. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



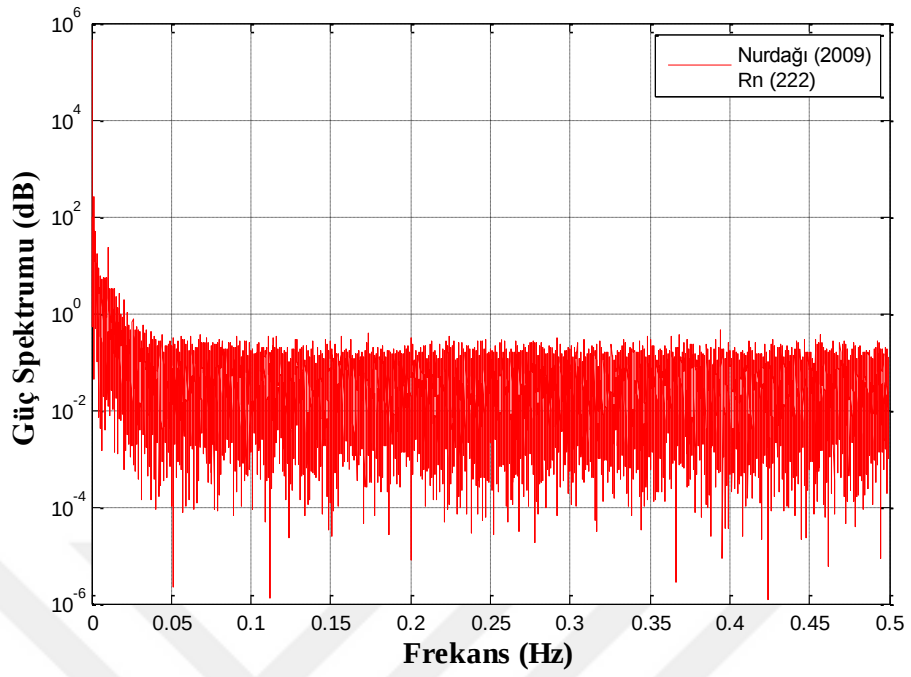
Ek 6 Şekil 4. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



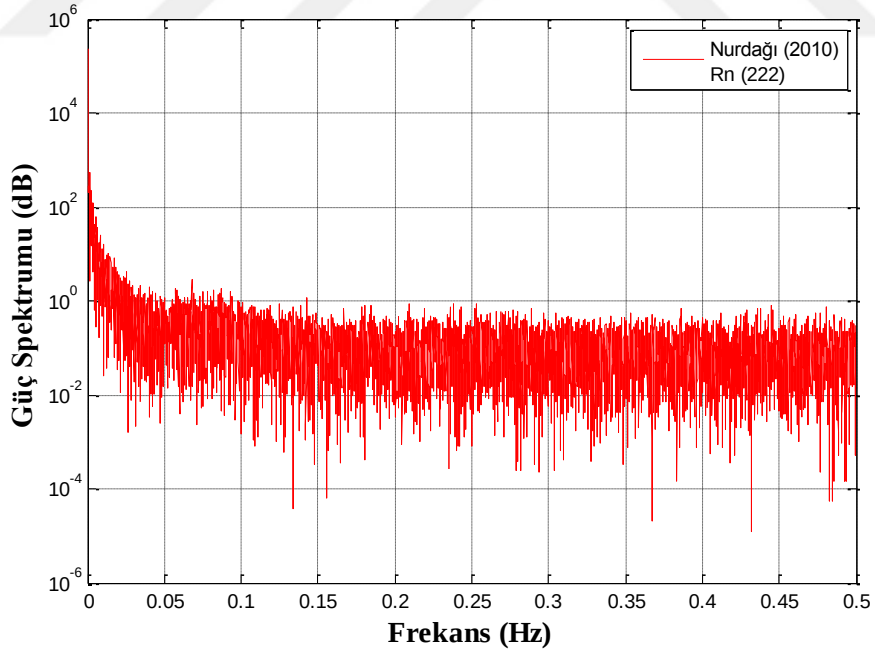
Ek 6 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



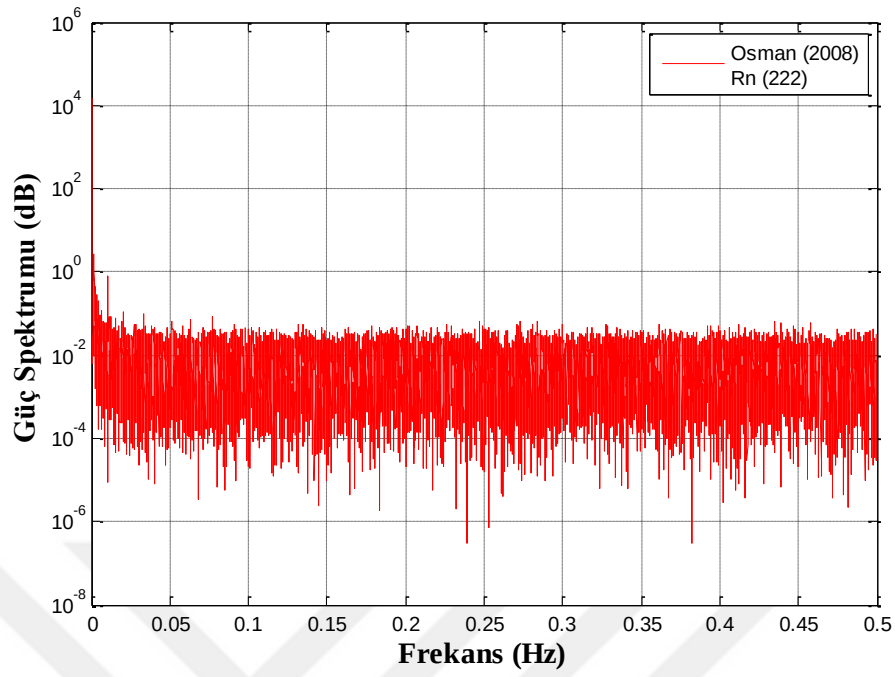
Ek 6 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2008 yılı Nurdağı bölgesi)



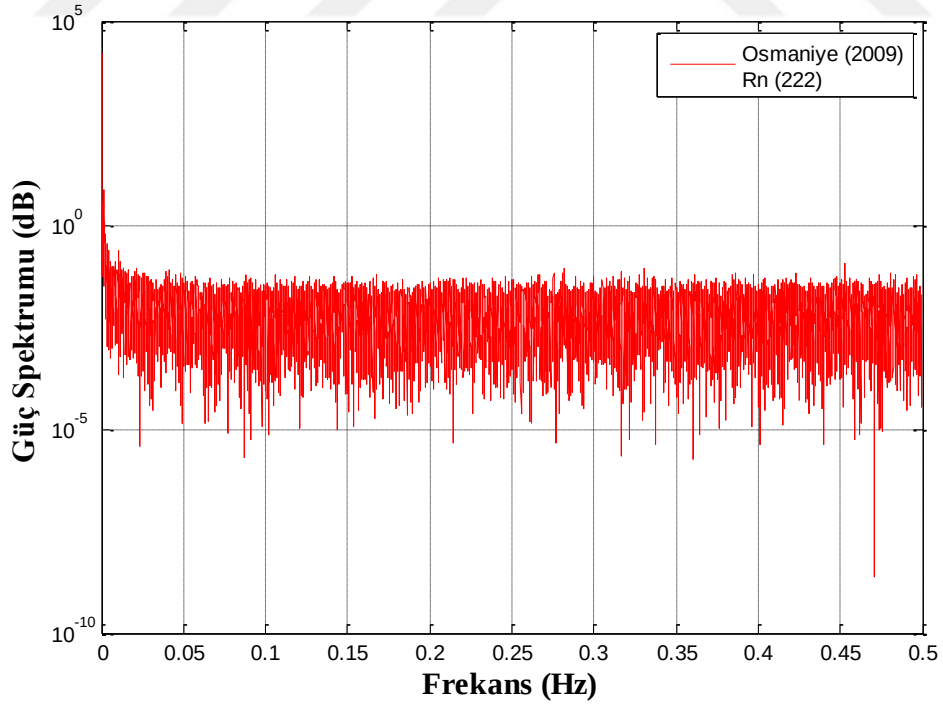
Ek 6 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



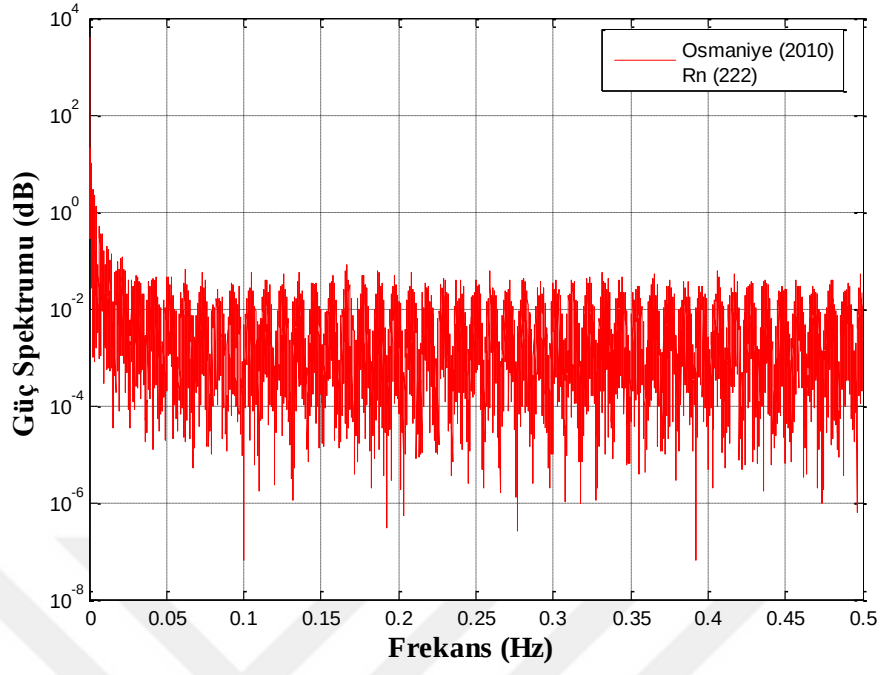
Ek 6 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



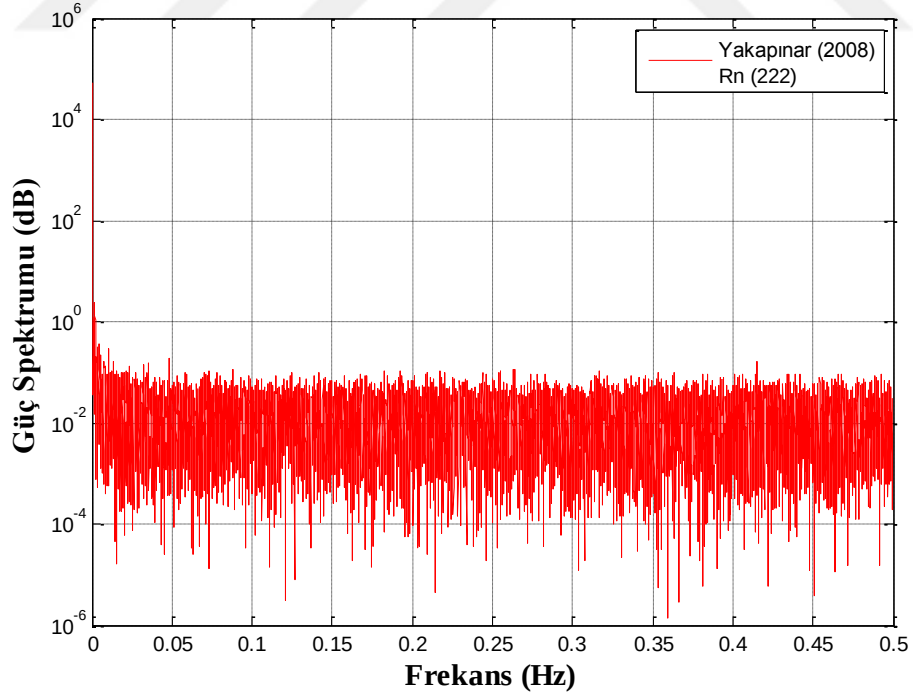
Ek 6 Şekil 9. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



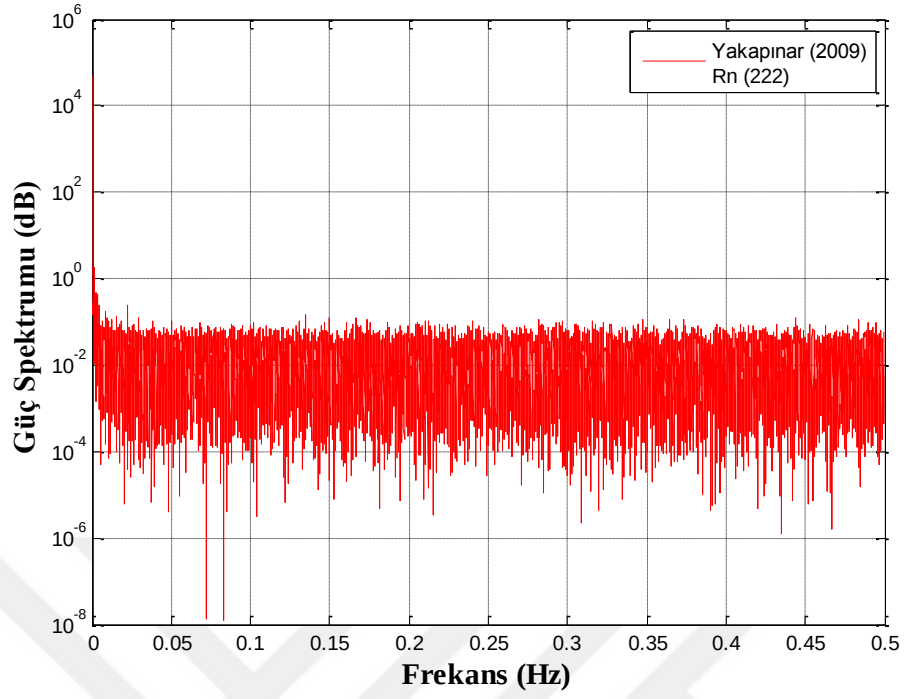
Ek 6 Şekil 10. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



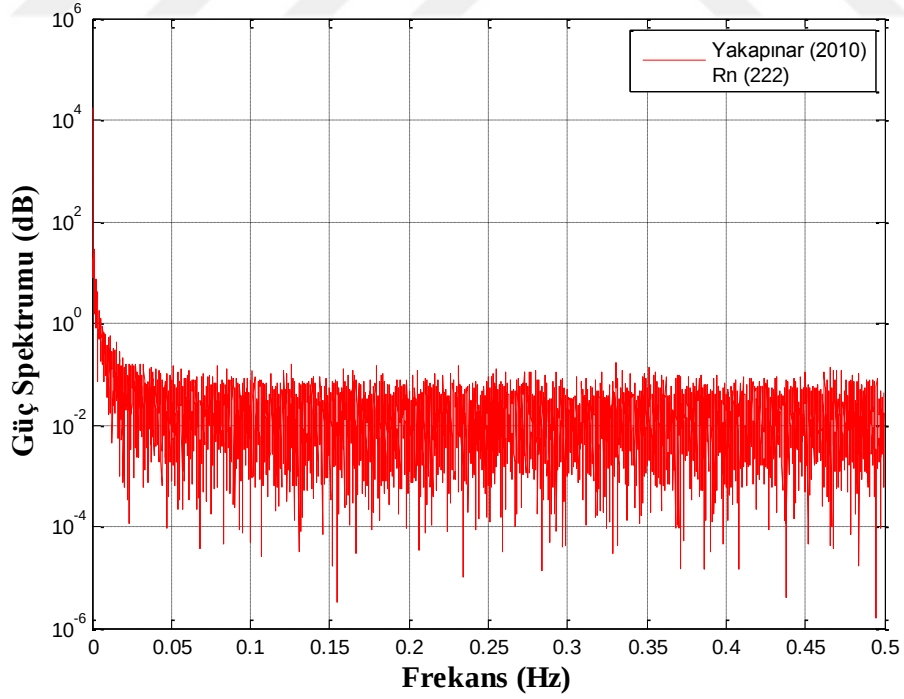
Ek 6 Şekil 11. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 6 Şekil 12. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 6 Şekil 13. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

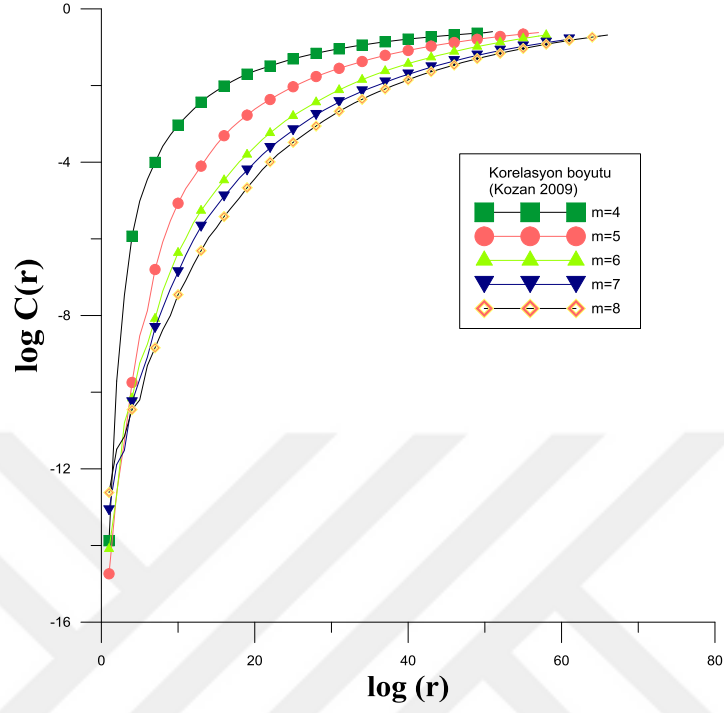


Ek 6 Şekil 14. ^{222}Rn konsantrasyonunun Güç spektrum grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

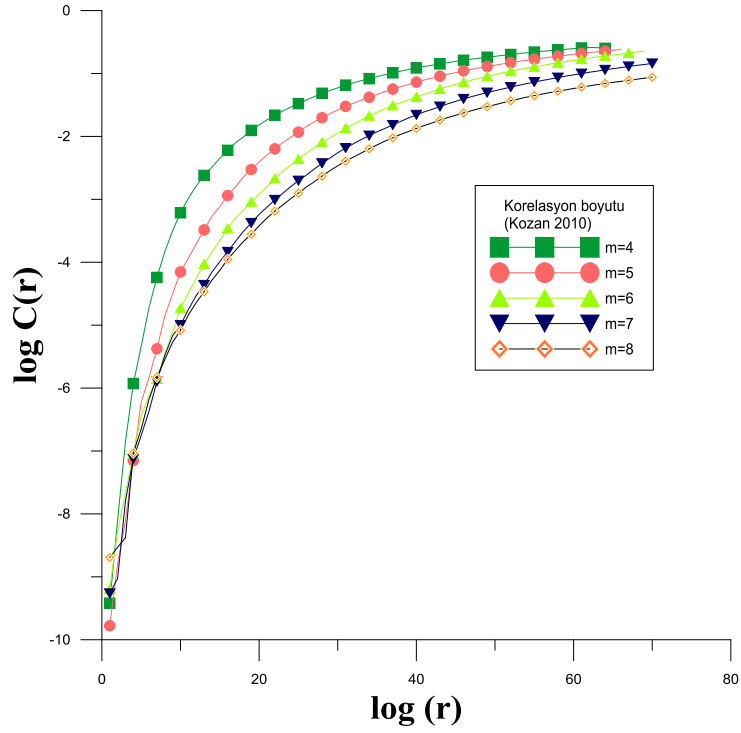


EK 7

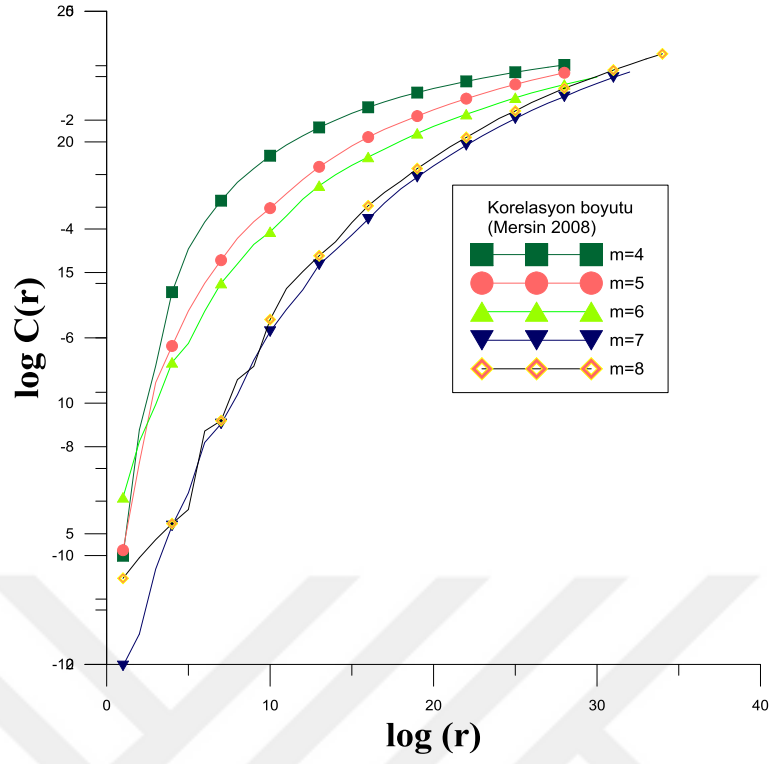
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Korelasyon Boyutu Grafikleri



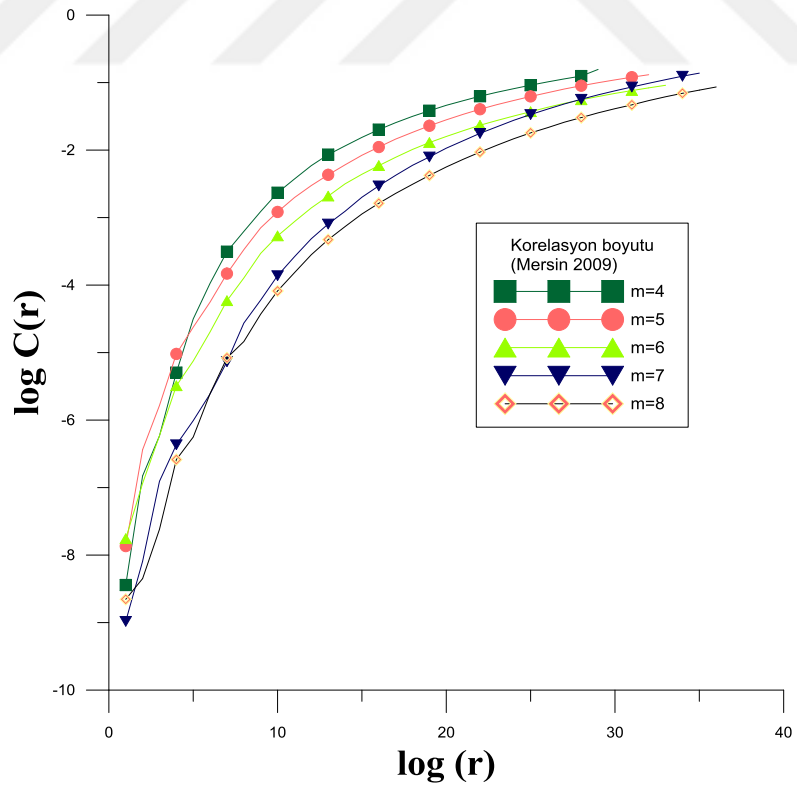
Ek 7 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



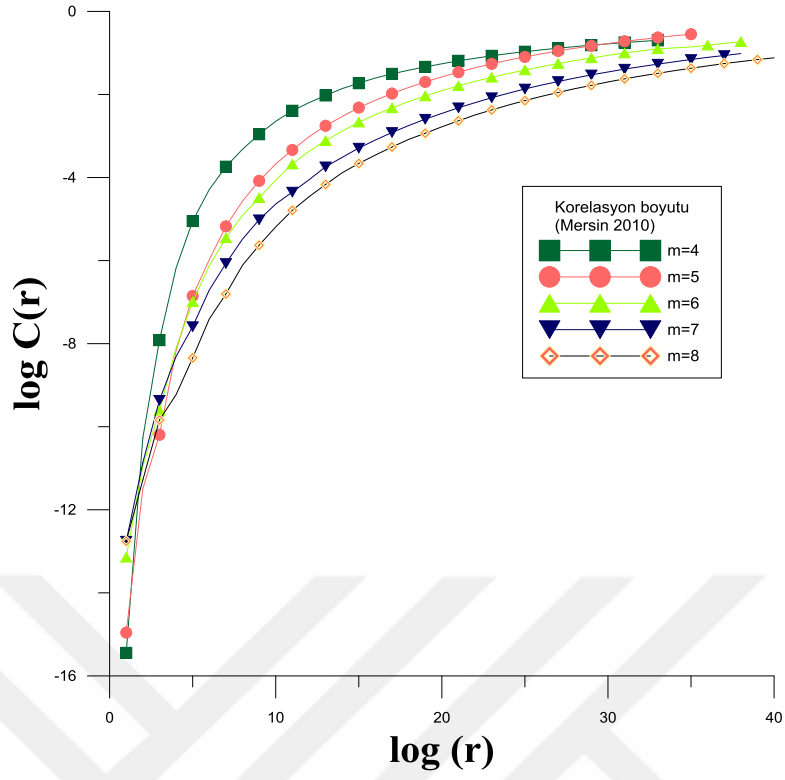
Ek 7 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



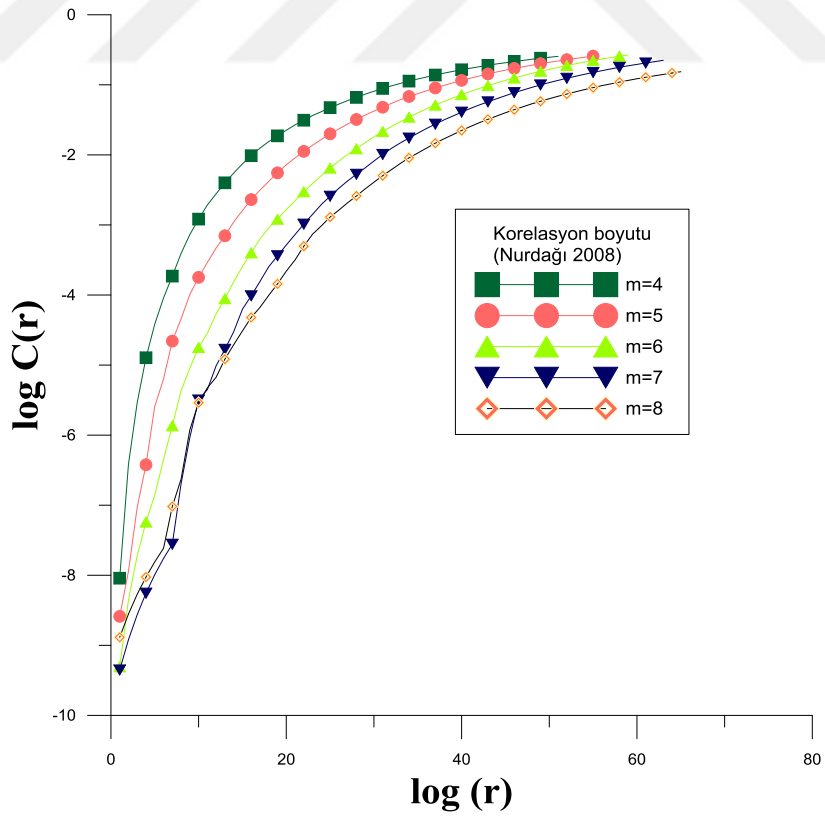
Ek 7 Şekil 3. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



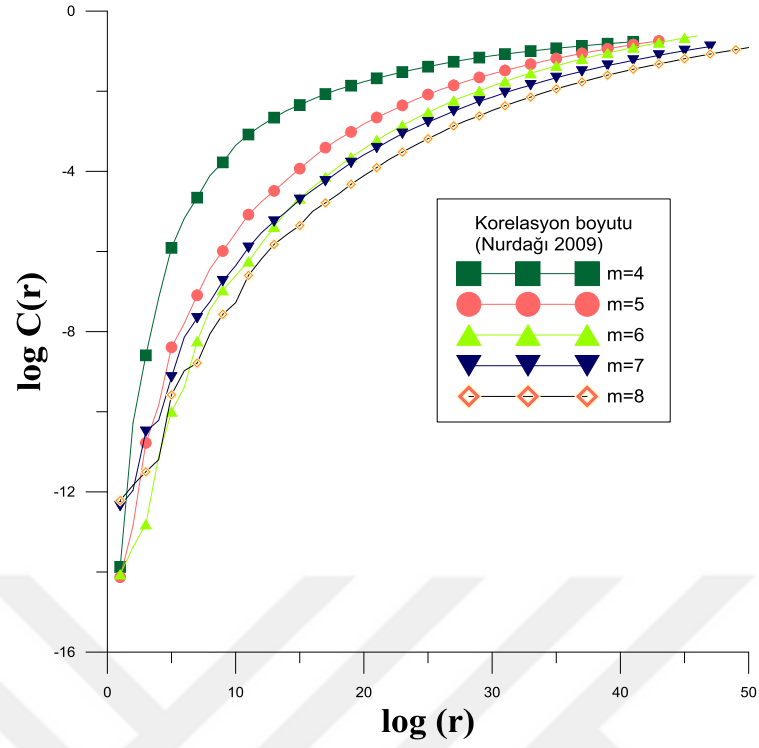
Ek 7 Şekil 4. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



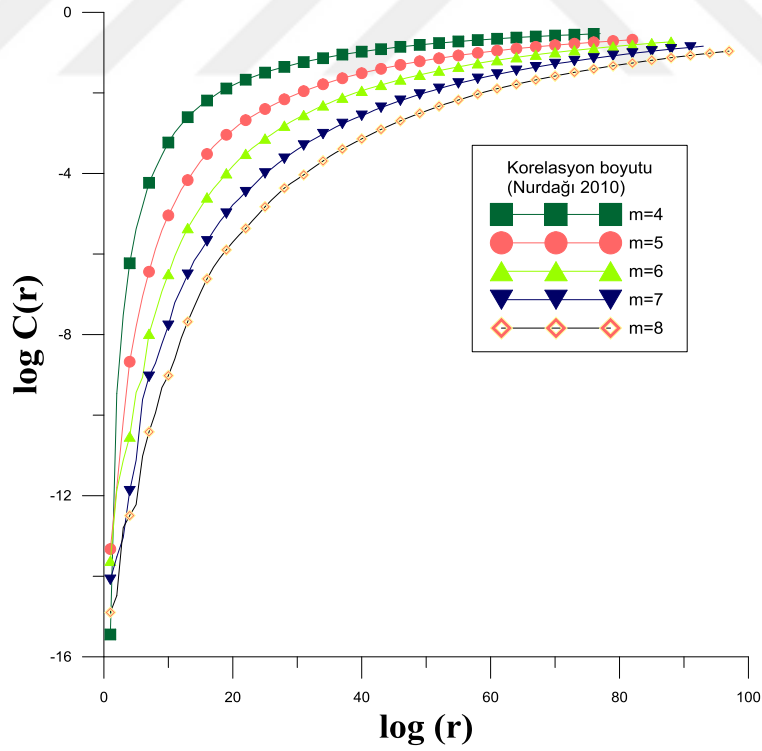
Ek 7 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



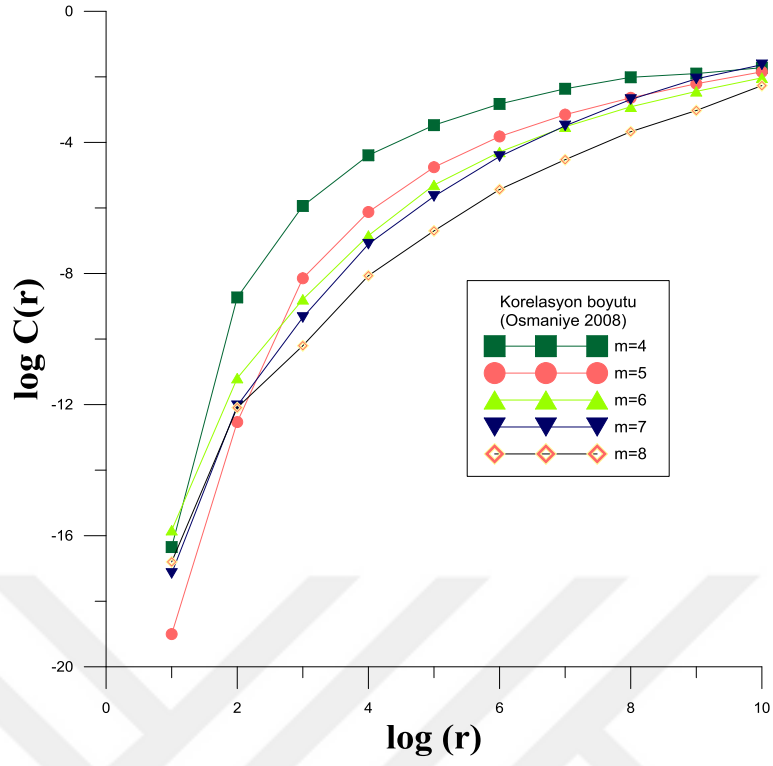
Ek 7 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2008 yılı Nurdağı bölgesi)



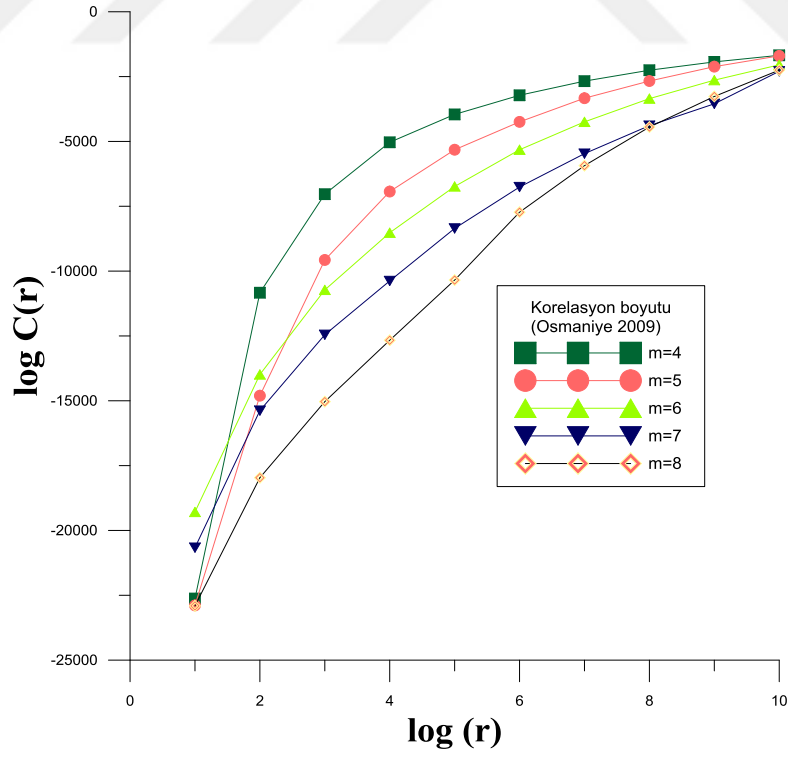
Ek 7 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



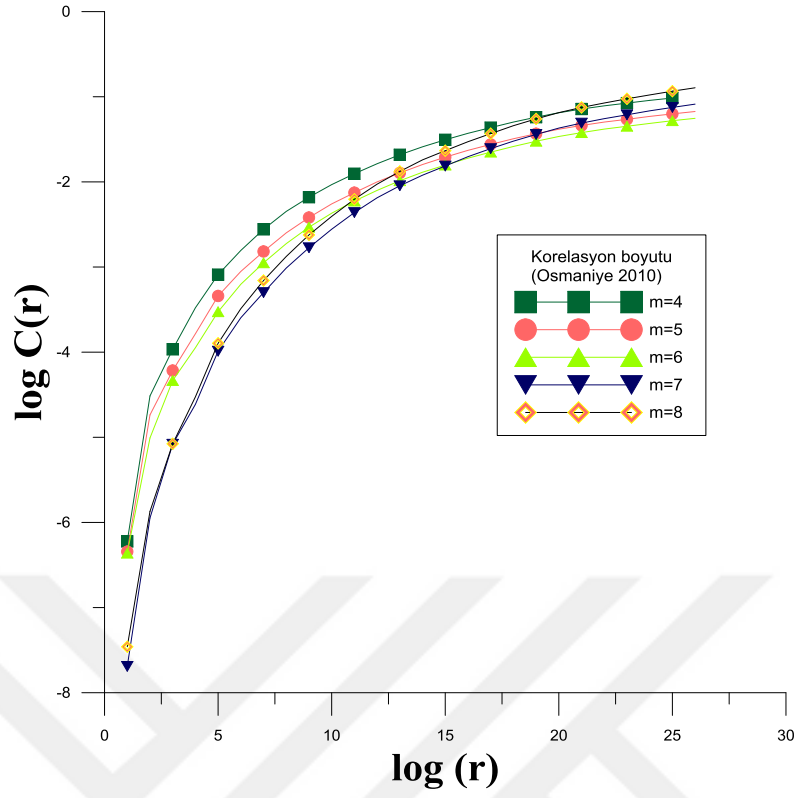
Ek 7 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



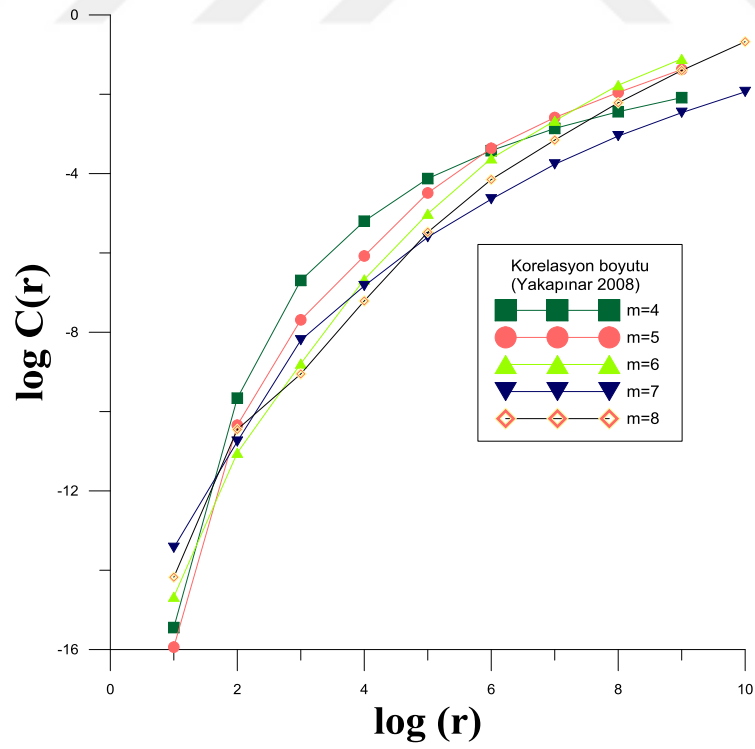
Ek 7 Şekil 9. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



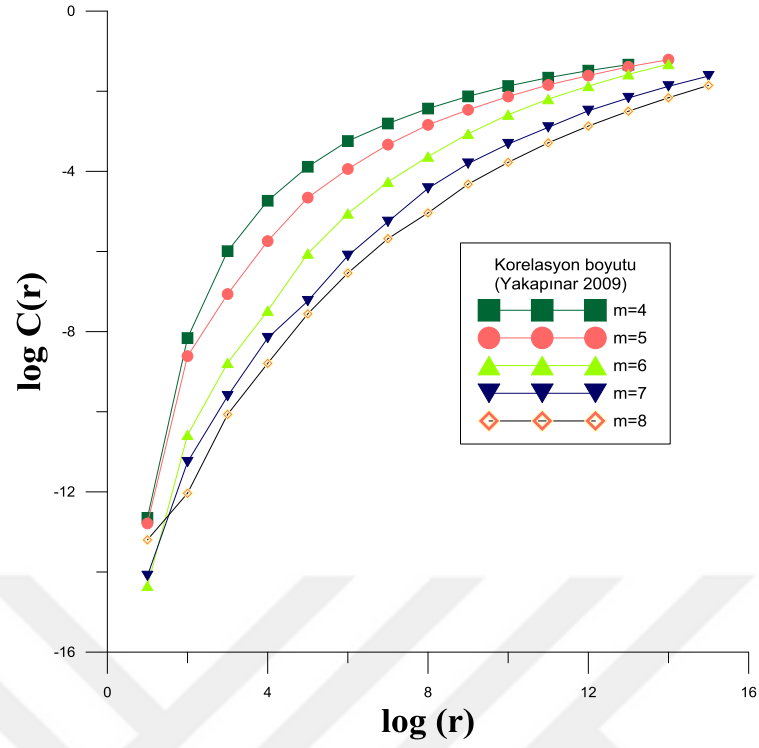
Ek 7 Şekil 10. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



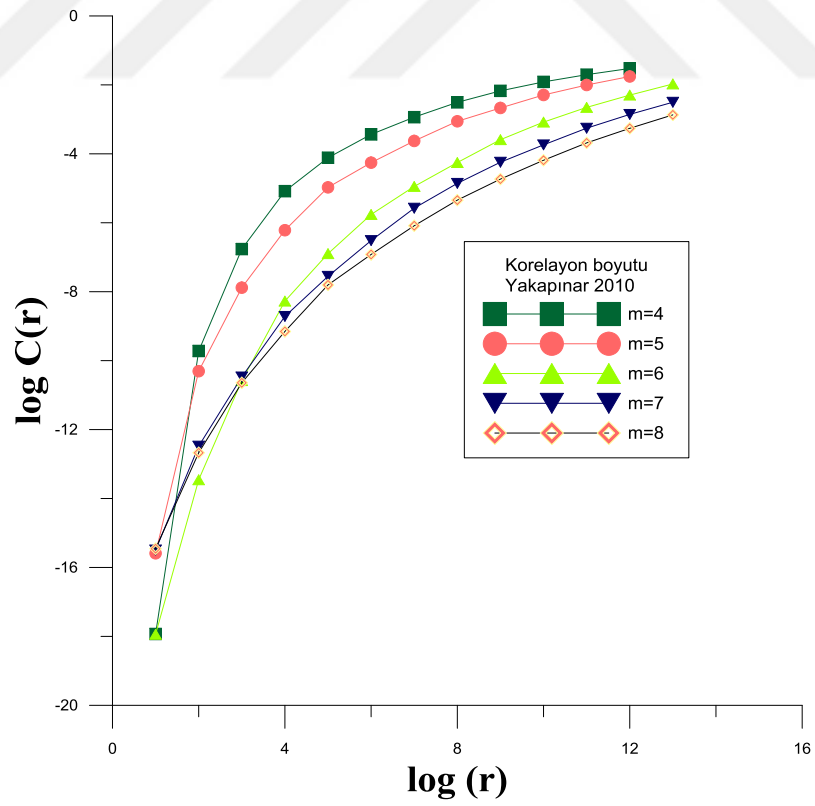
Ek 7 Şekil 11. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 7 Şekil 12. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 7 Şekil 13. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

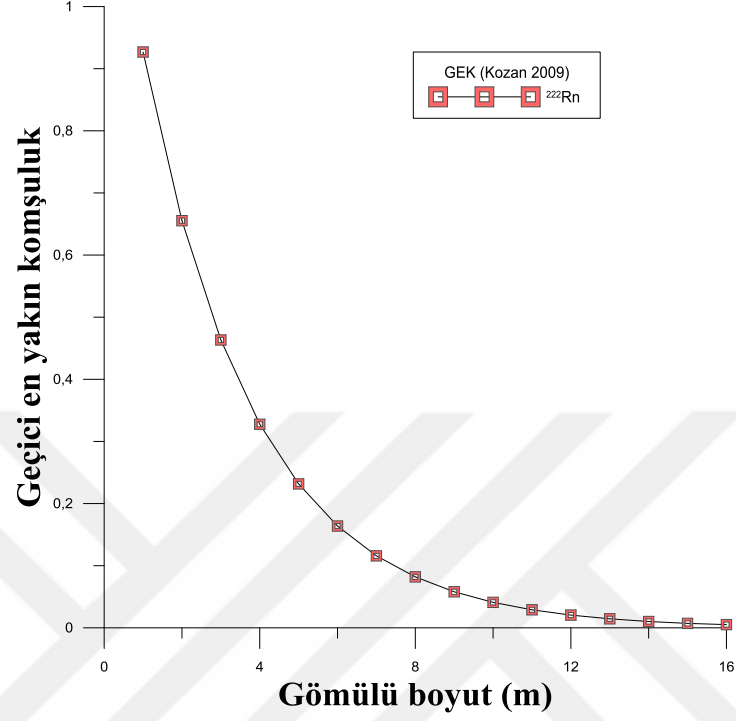


Ek 7 Şekil 14. ^{222}Rn konsantrasyonunun Korelasyon boyutu grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

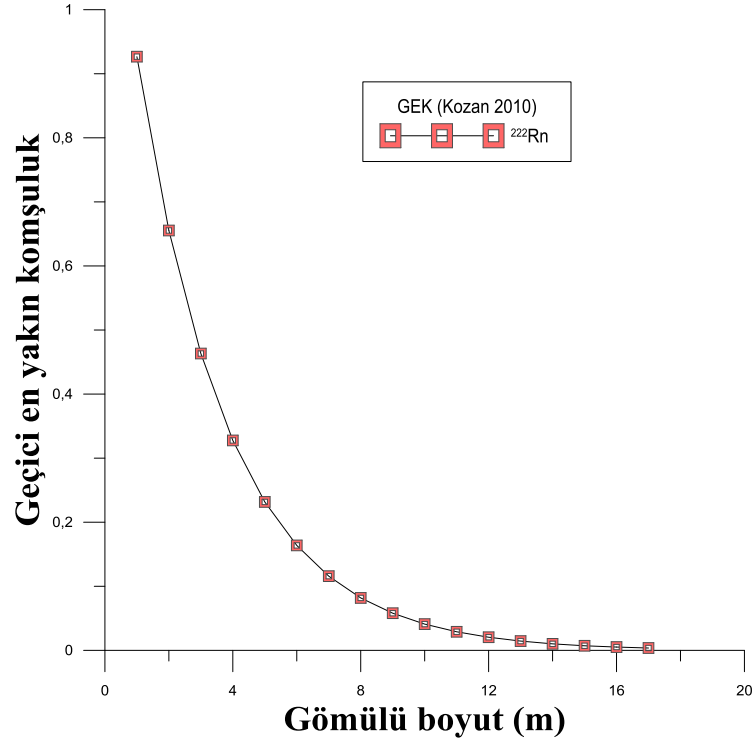


EK 8

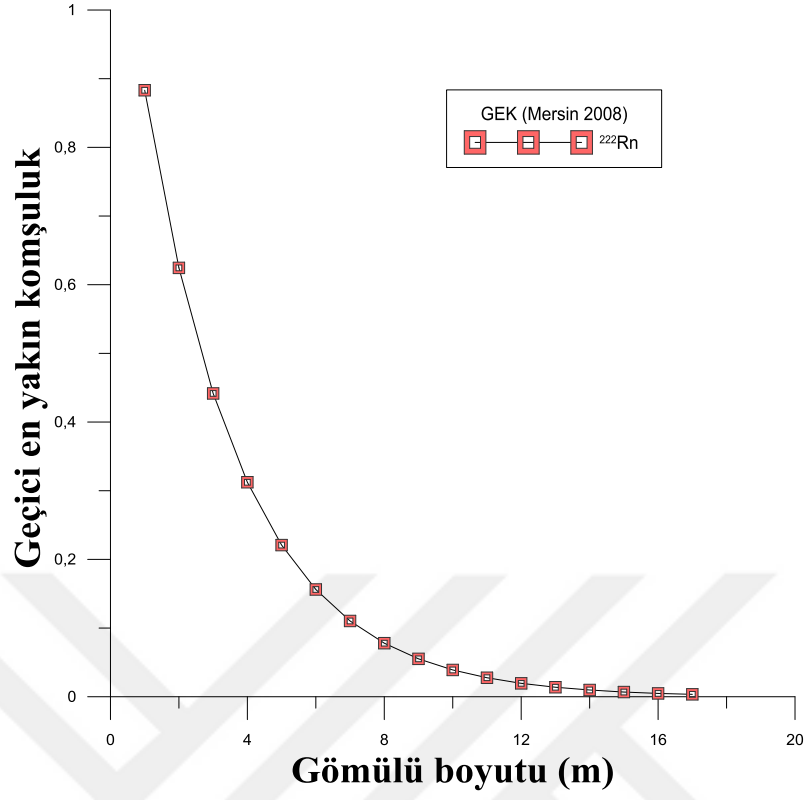
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Geçici en yakın Komşuluk Grafikleri



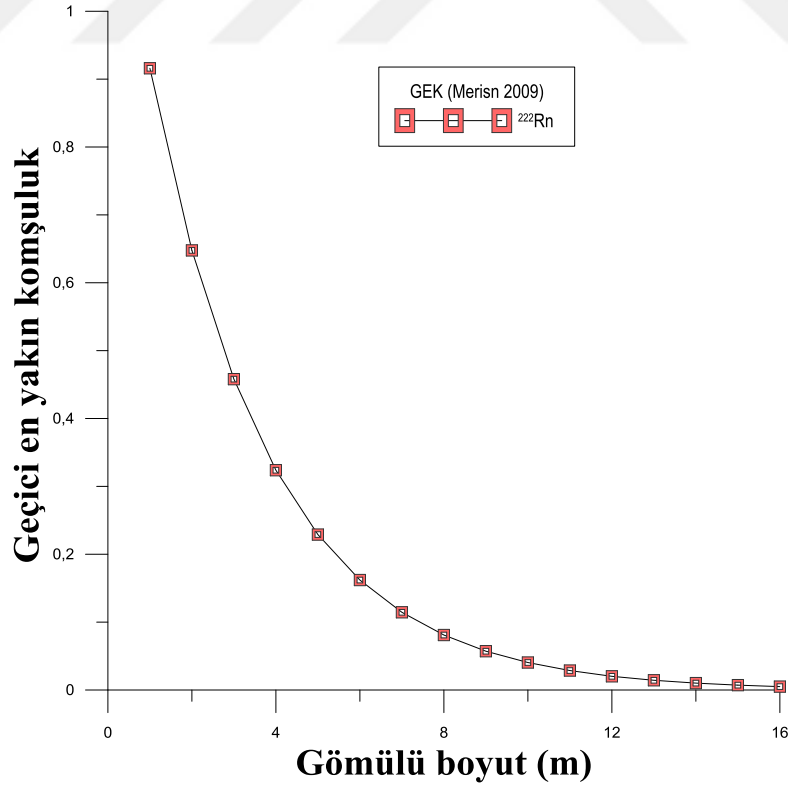
Ek 8 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



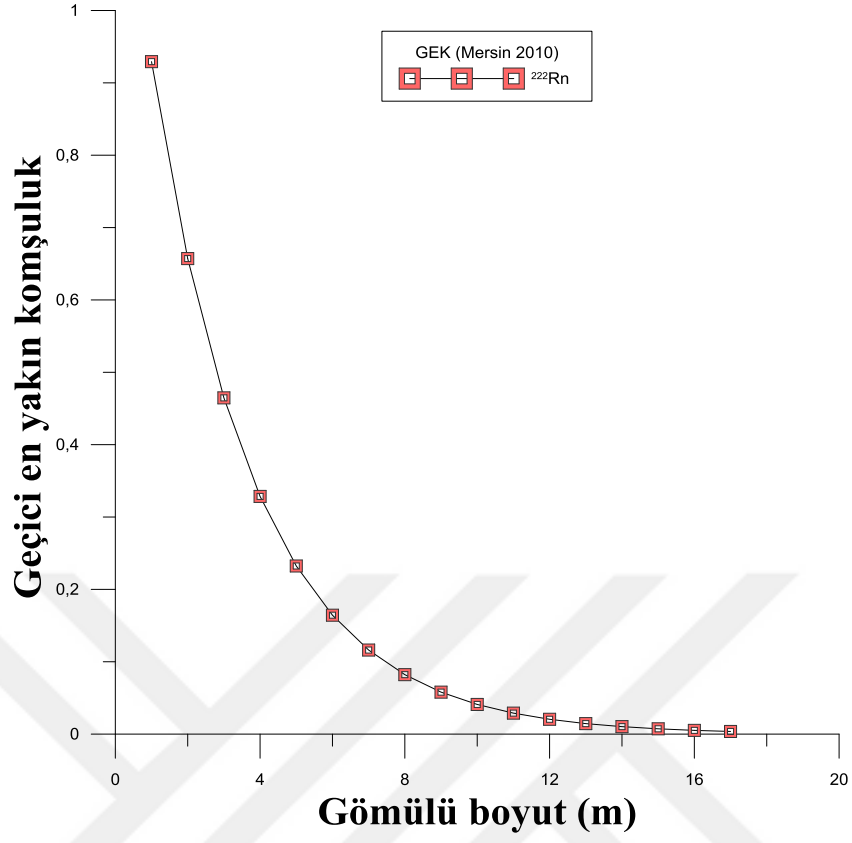
Ek 8 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



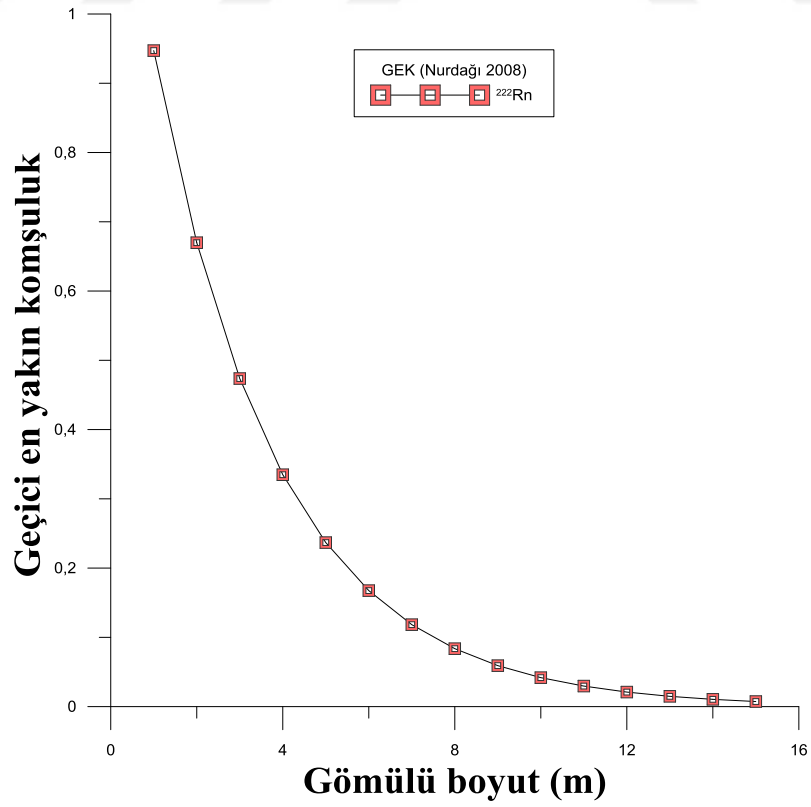
Ek 8 Şekil 3. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



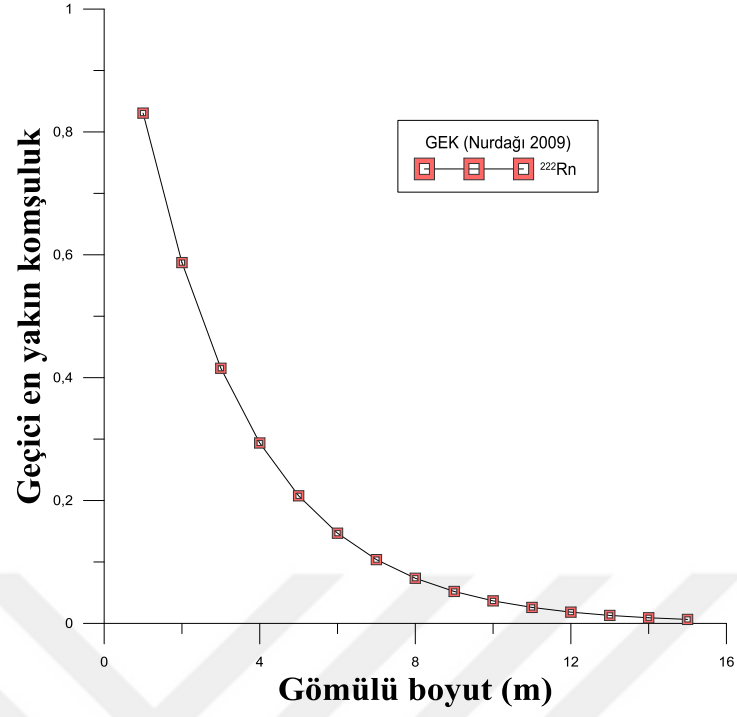
Ek 8 Şekil 4. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



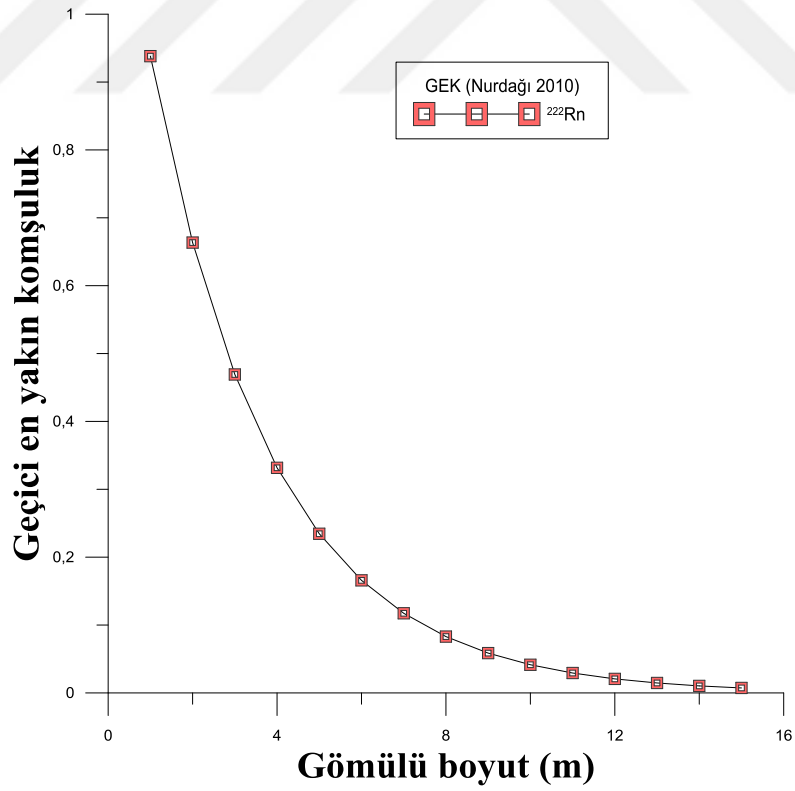
Ek 8 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



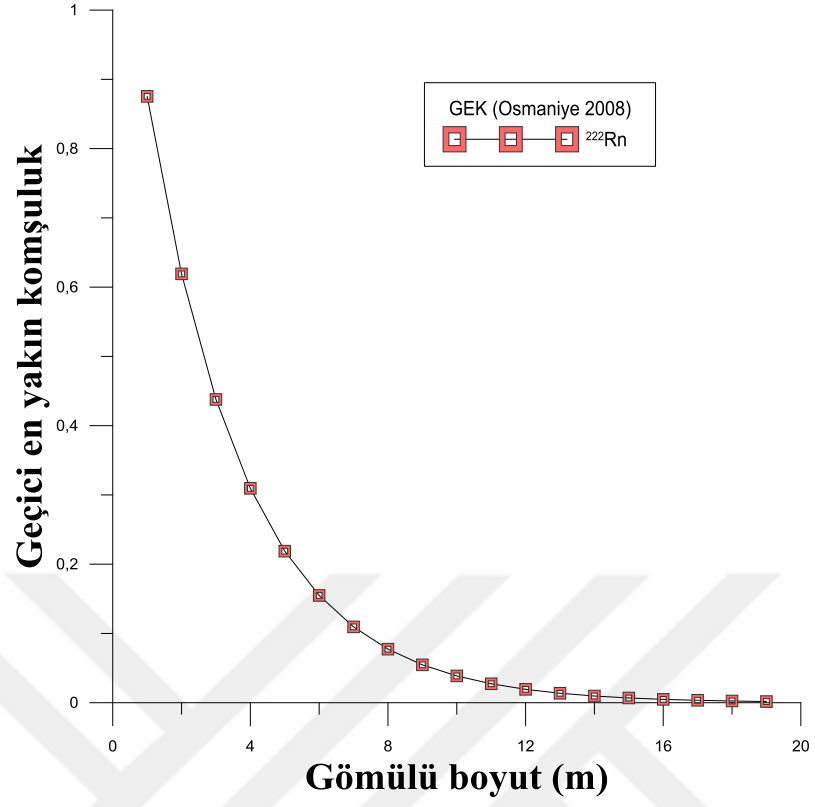
Ek 8 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2008 yılı Nurdağı bölgesi)



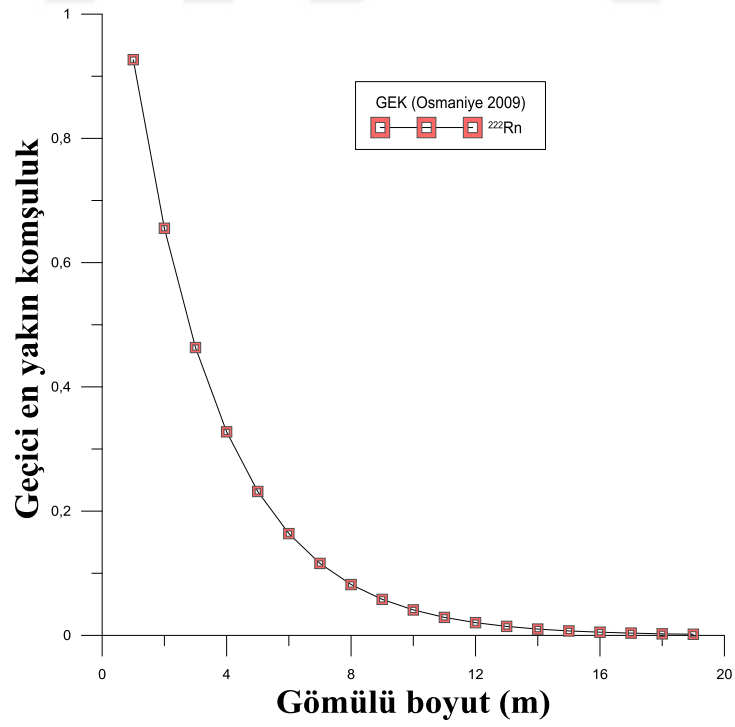
Ek 8 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



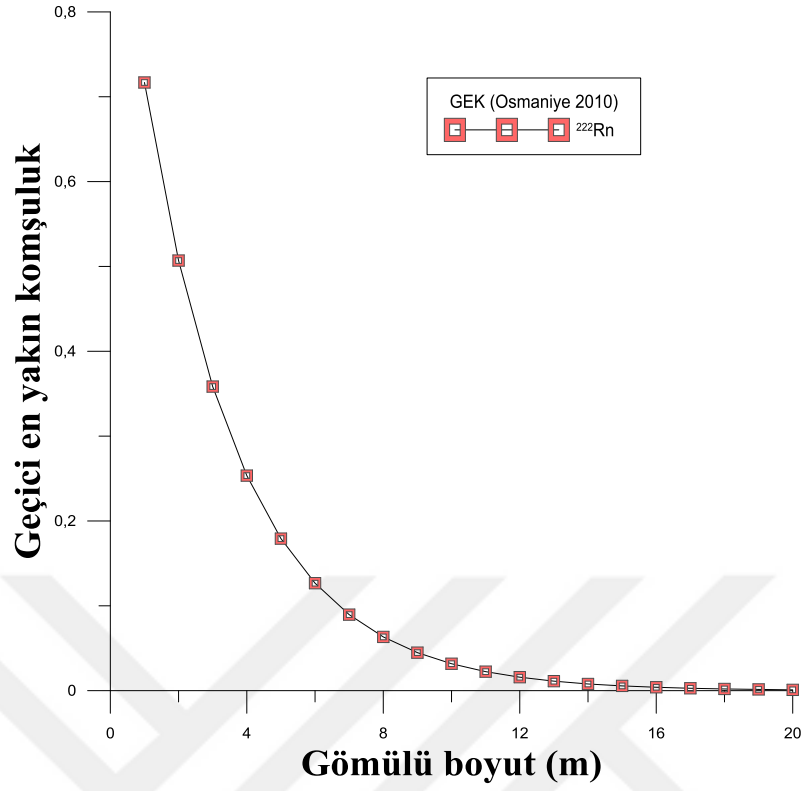
Ek 8 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



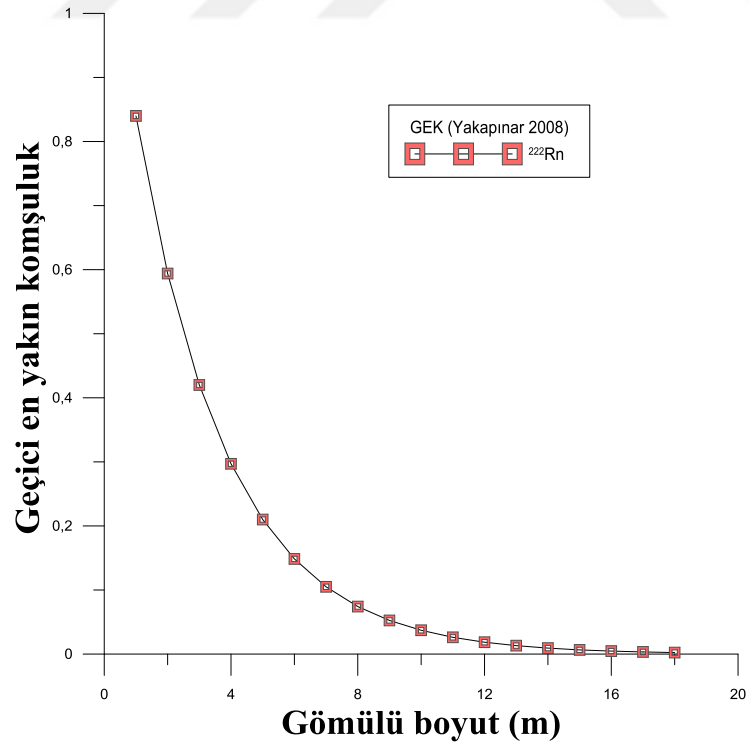
Ek 8 Şekil 9. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



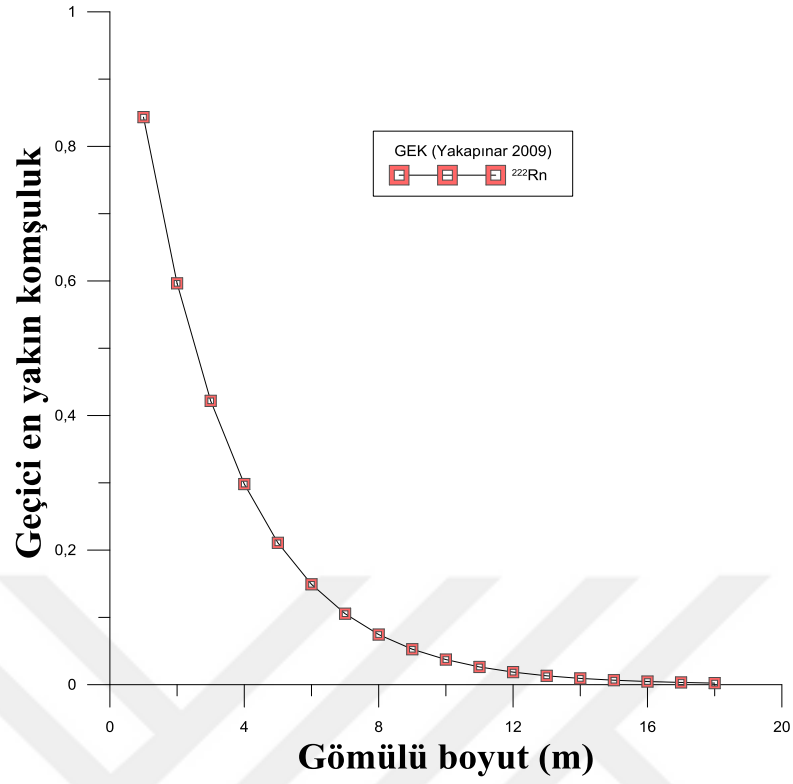
Ek 8 Şekil 10. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



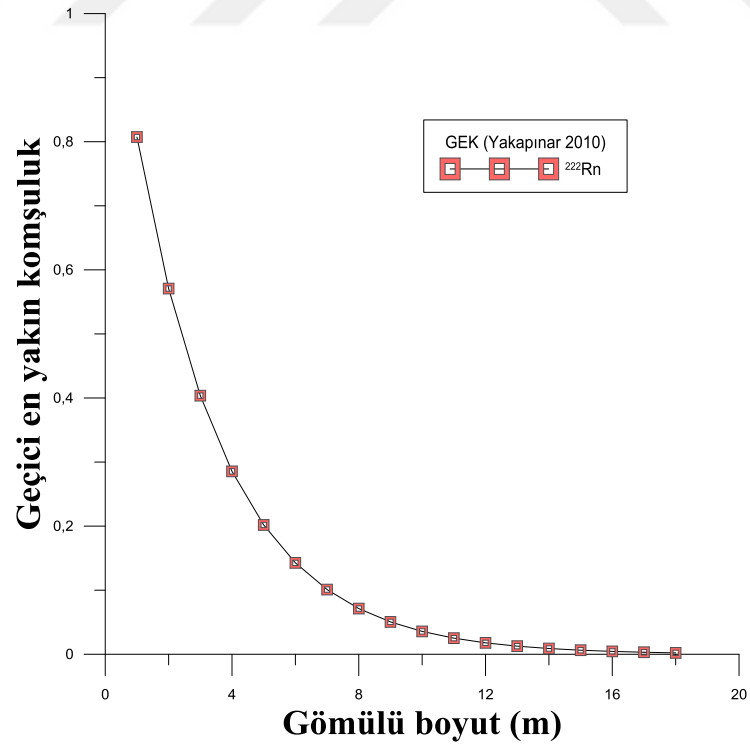
Ek 8 Şekil 11. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



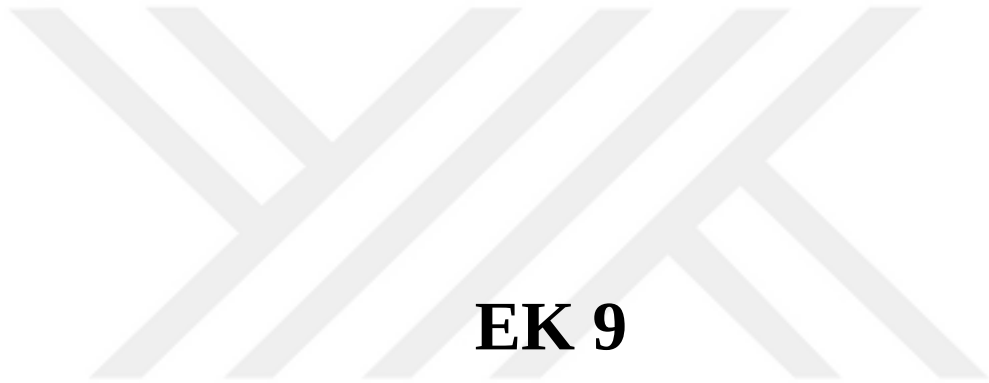
Ek 8 Şekil 12. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 8 Şekil 13. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

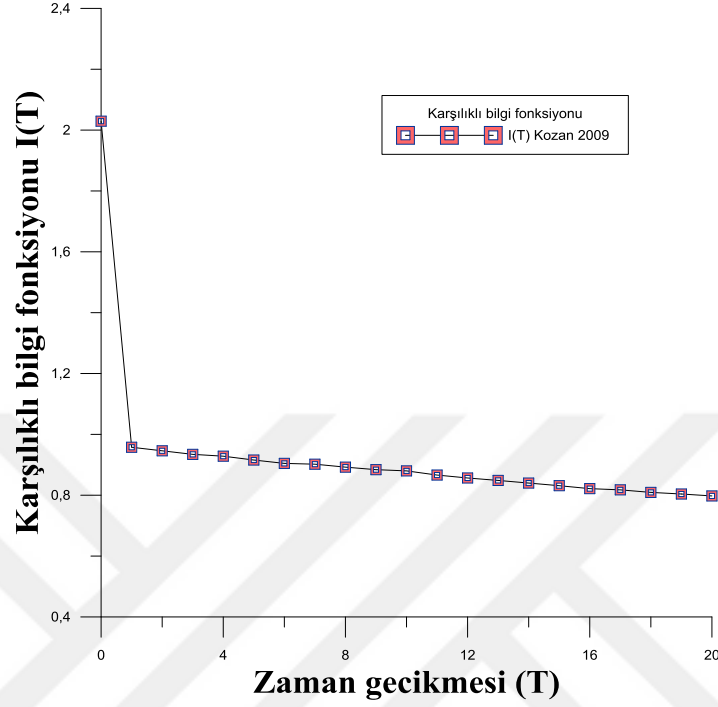


Ek 8 Şekil 14. ^{222}Rn konsantrasyonunun Geçici en yakın komşuluk grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

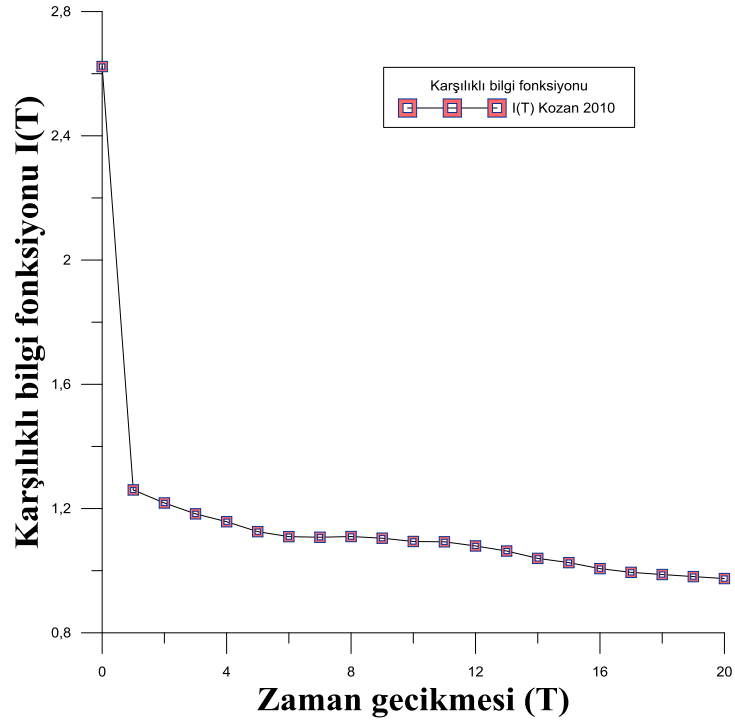


EK 9

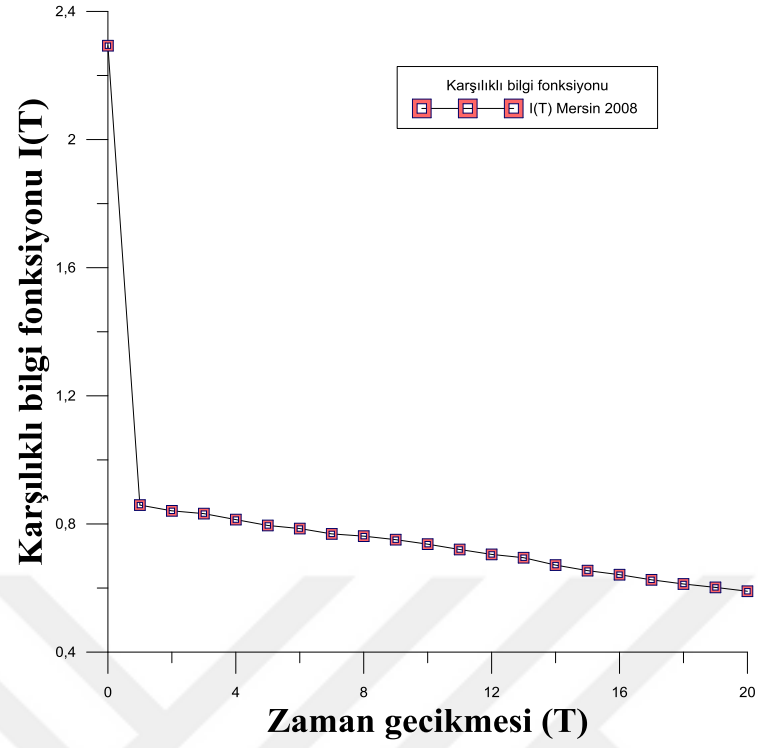
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Karşılıklı bilgi Fonksiyonu $I(T)$ Grafikleri



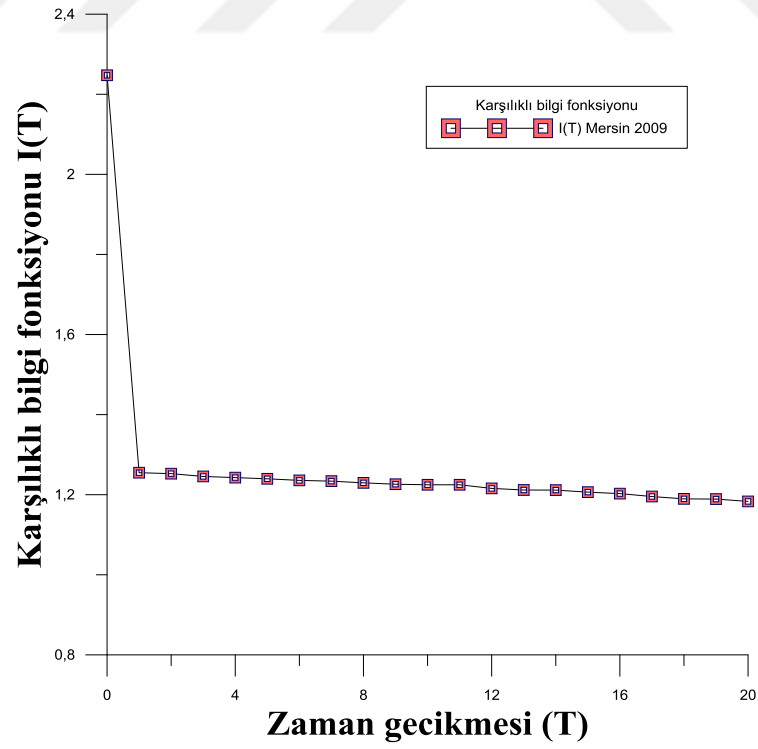
Ek 9 Şekil 1. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



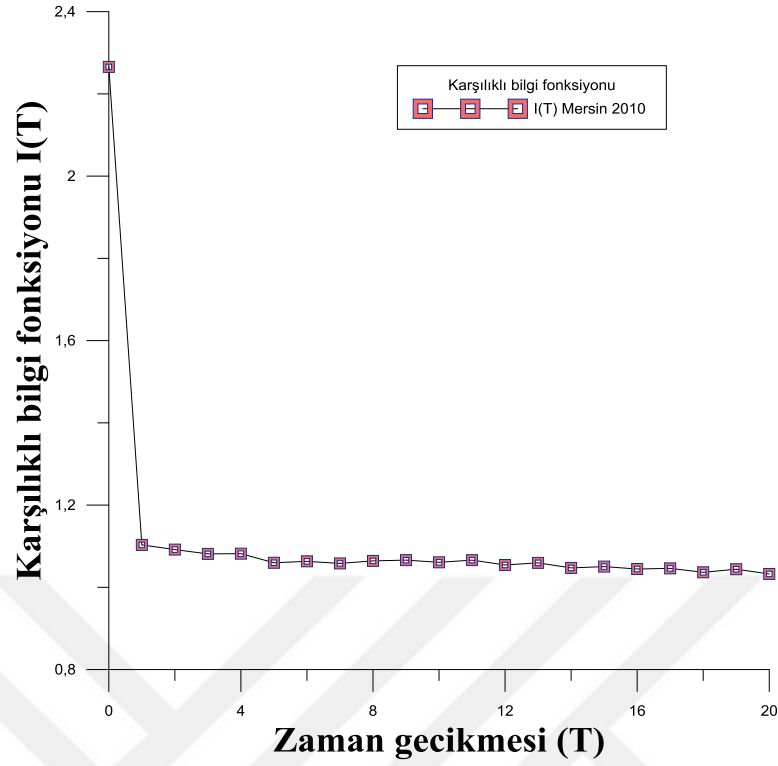
Ek 9 Şekil 2. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



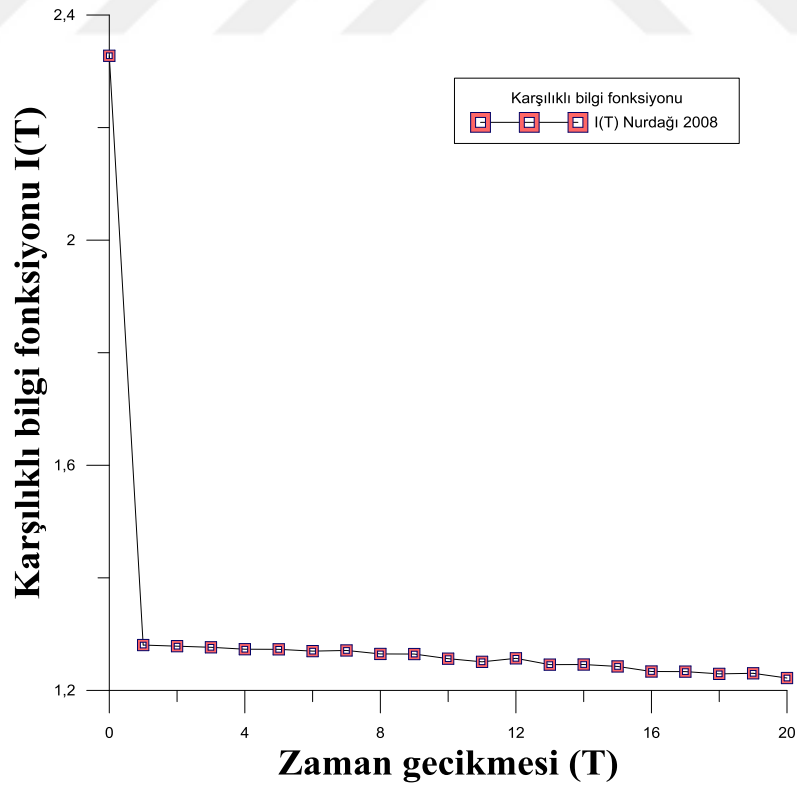
Ek 9 Şekil 3. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



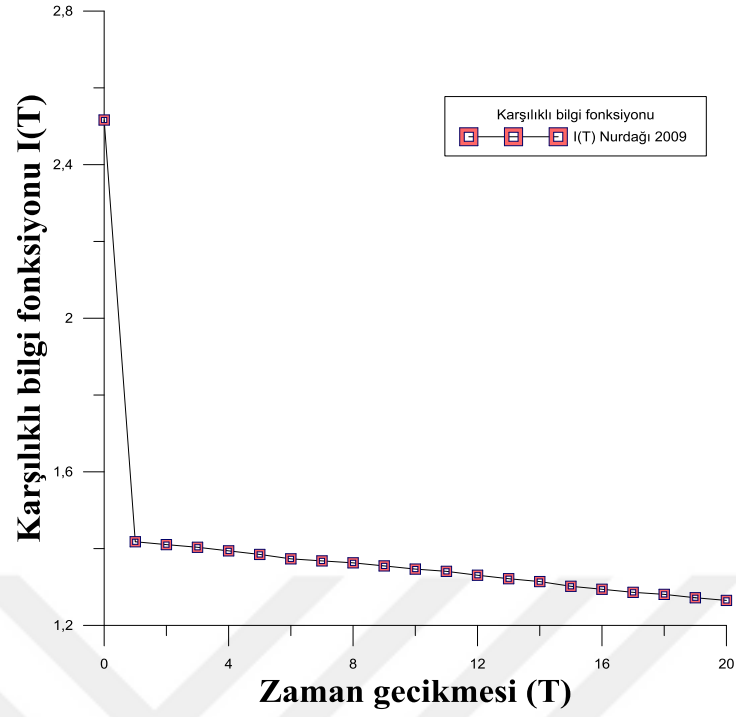
Ek 9 Şekil 4. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



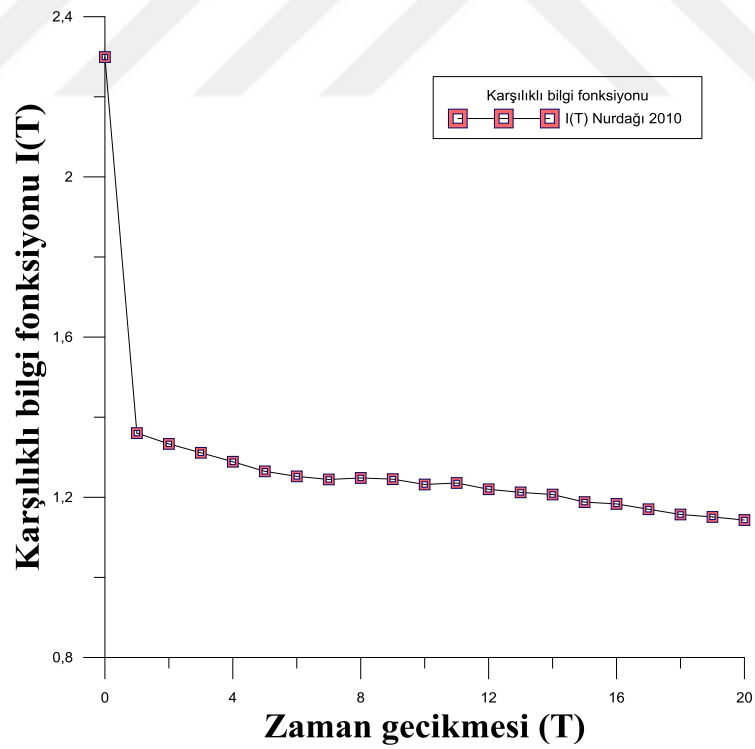
Ek 9 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



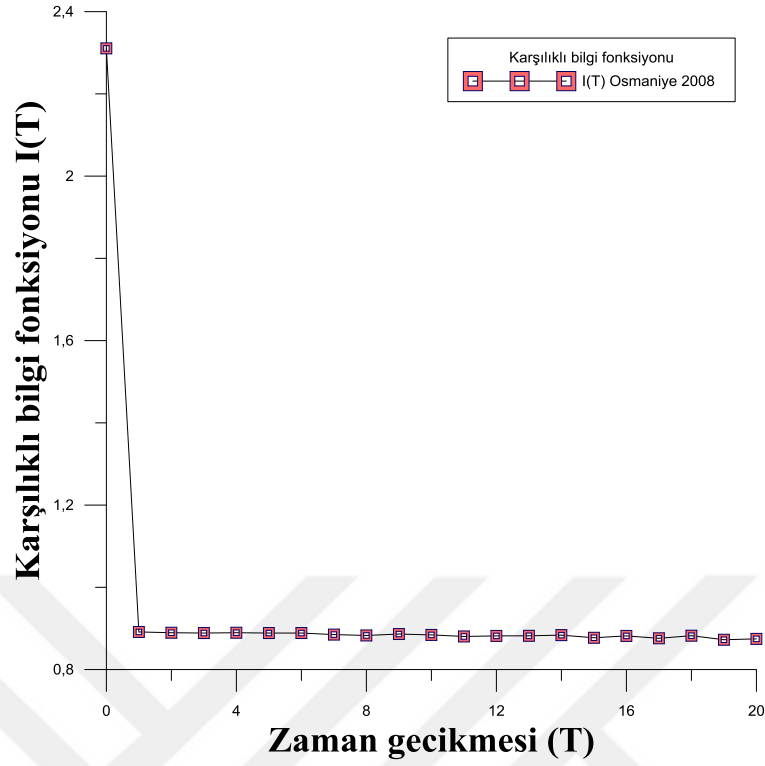
Ek 9 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2008 yılı Nurdagi bölgesi)



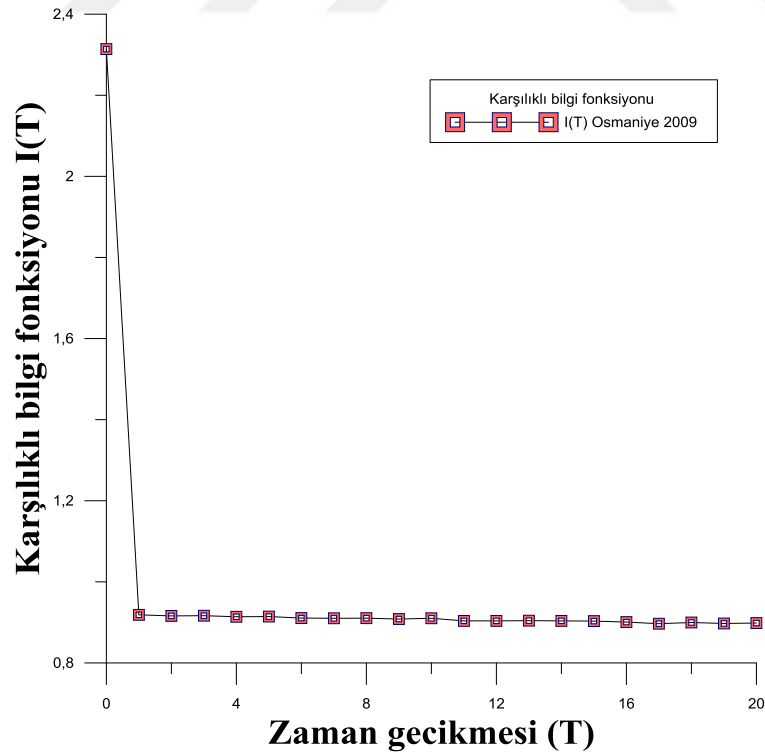
Ek 9 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



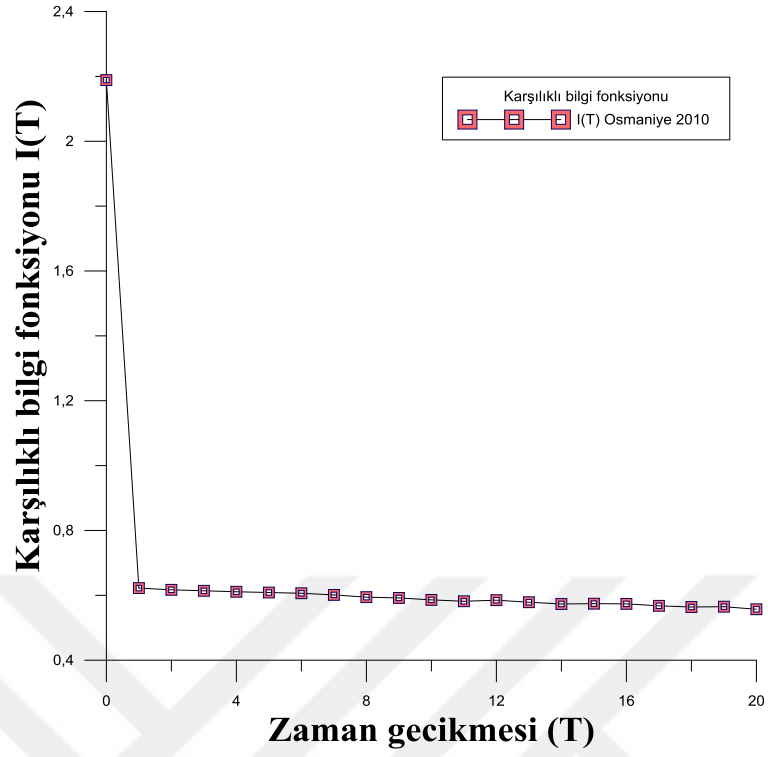
Ek 9 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



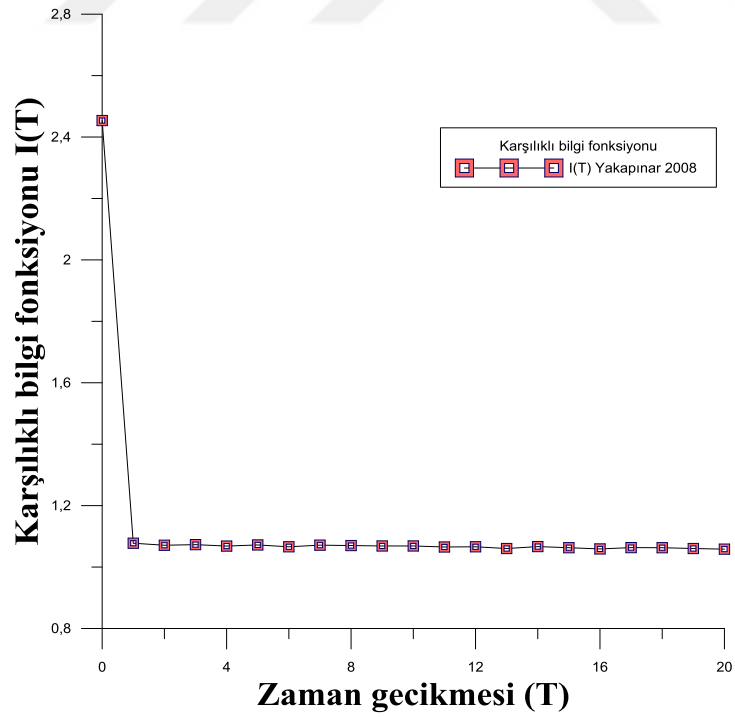
Ek 9 Şekil 9. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



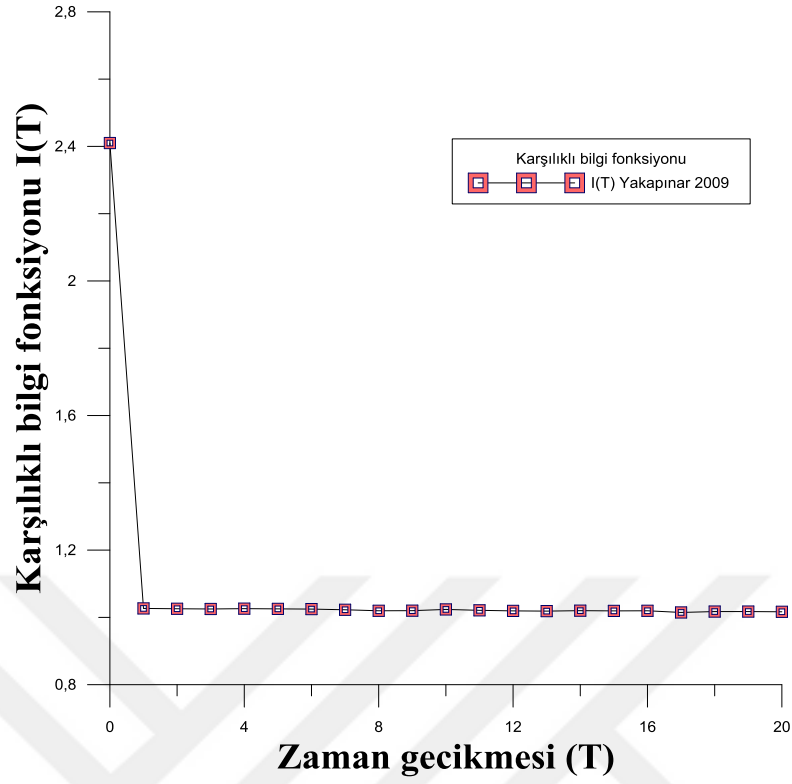
Ek 9 Şekil 10. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



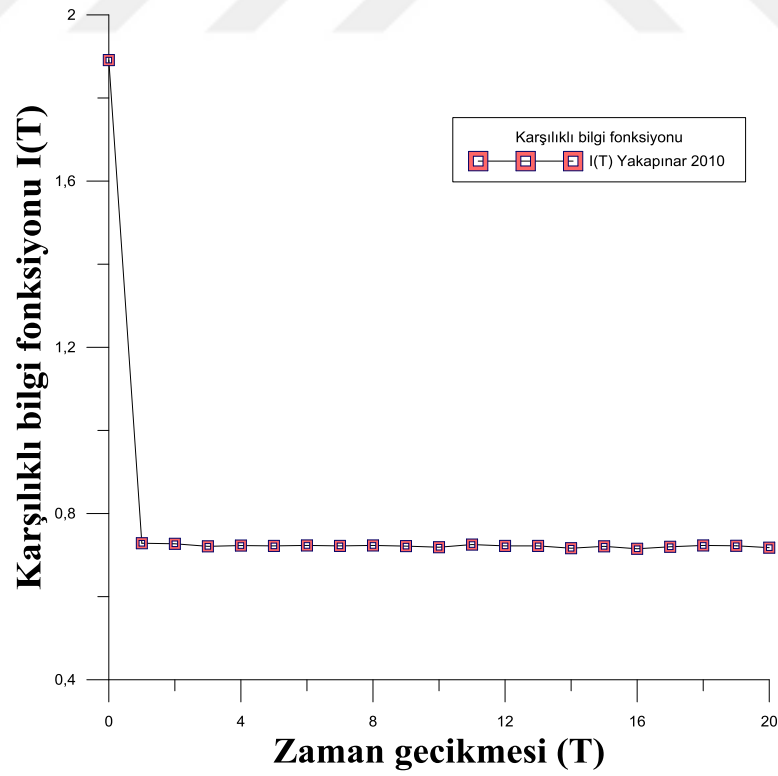
Ek 9 Şekil 11. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 9 Şekil 12. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 9 Şekil 13. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

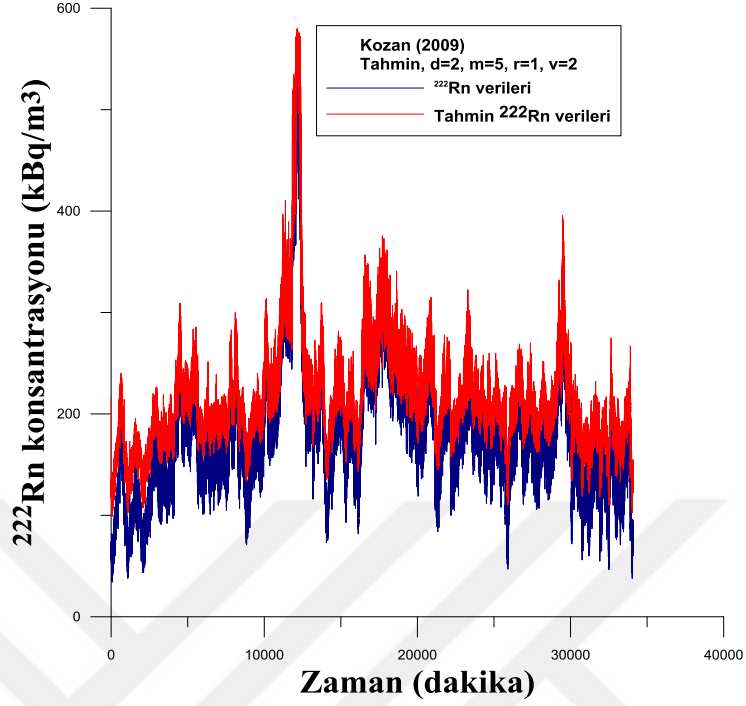


Ek 9 Şekil 14. ²²²Rn konsantrasyonunun Karşılıklı bilgi fonksiyon grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

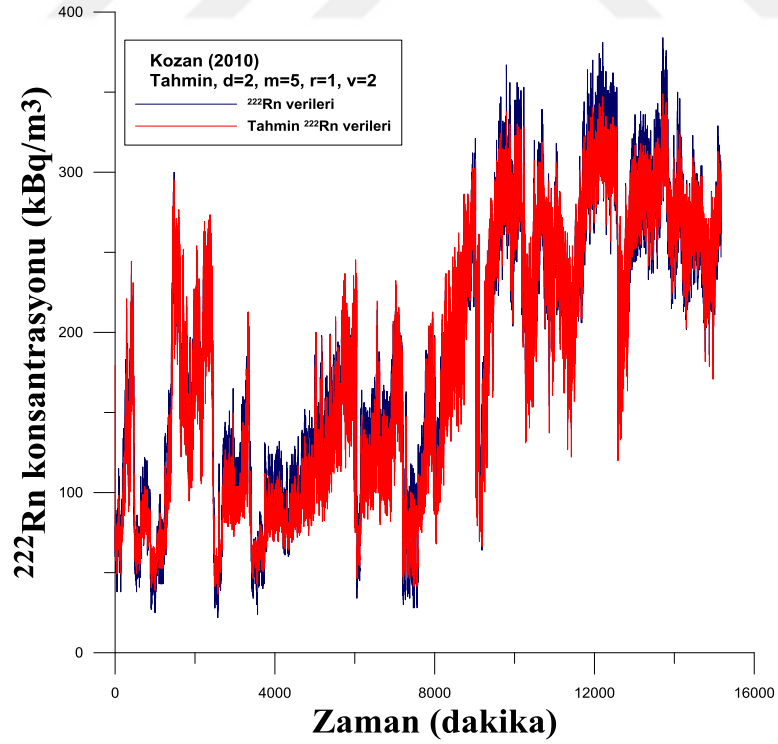


EK 10

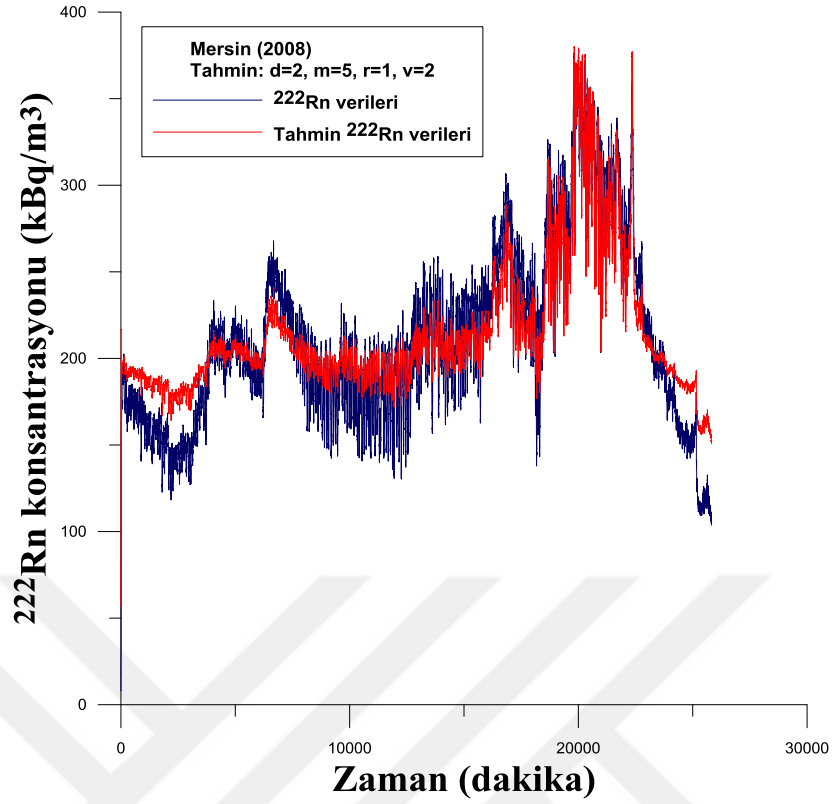
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Tahmin Grafikleri



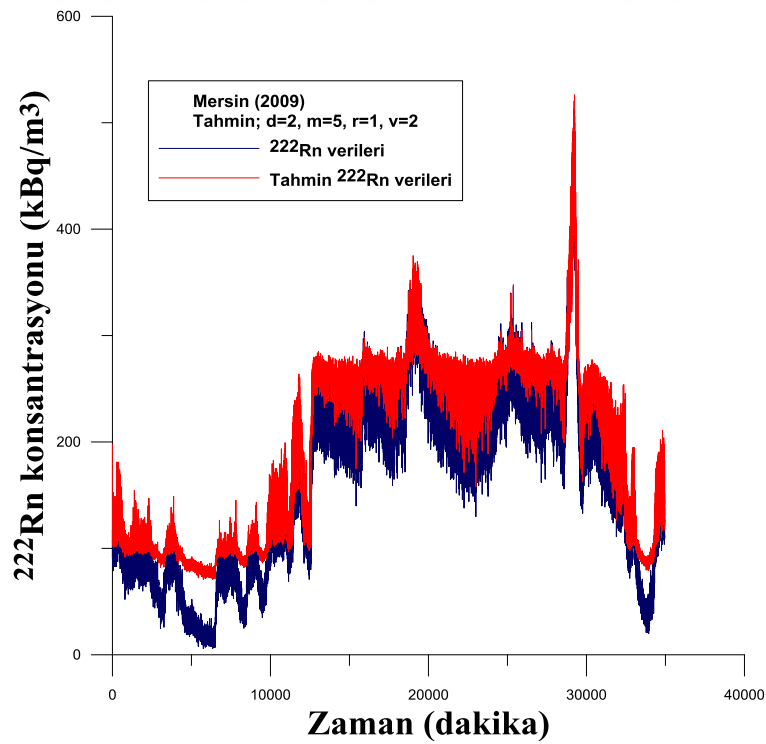
Ek 10 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



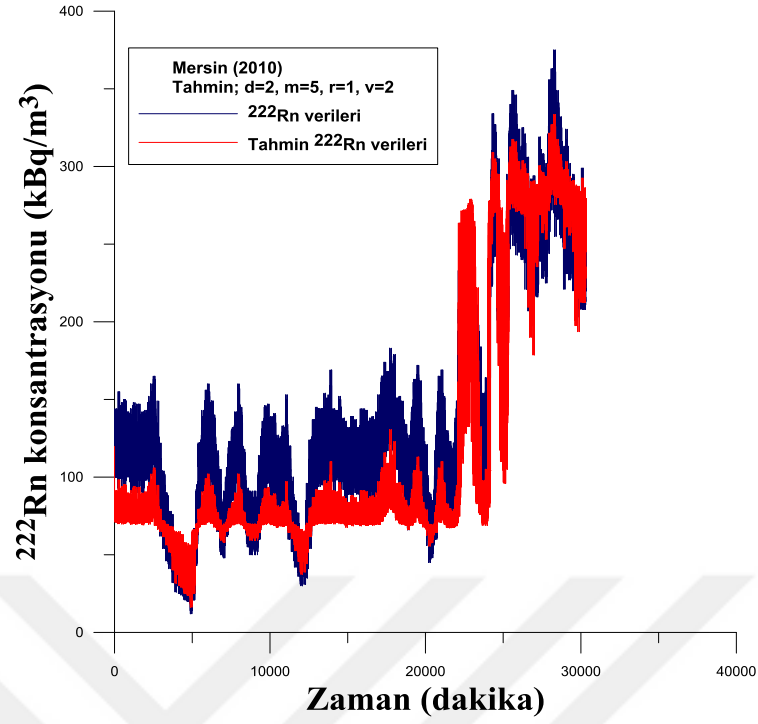
Ek 10 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



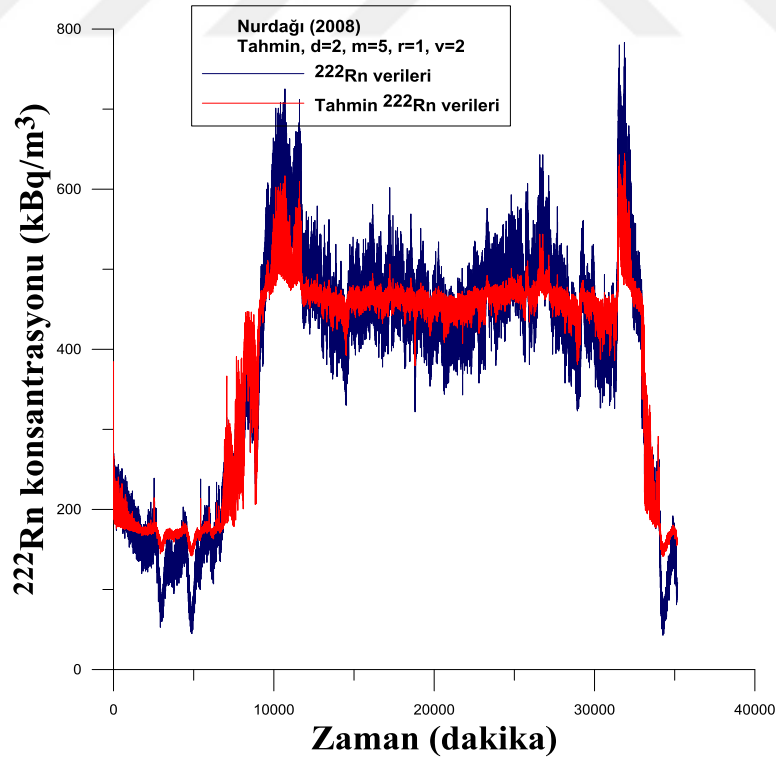
Ek 10 Şekil 3. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



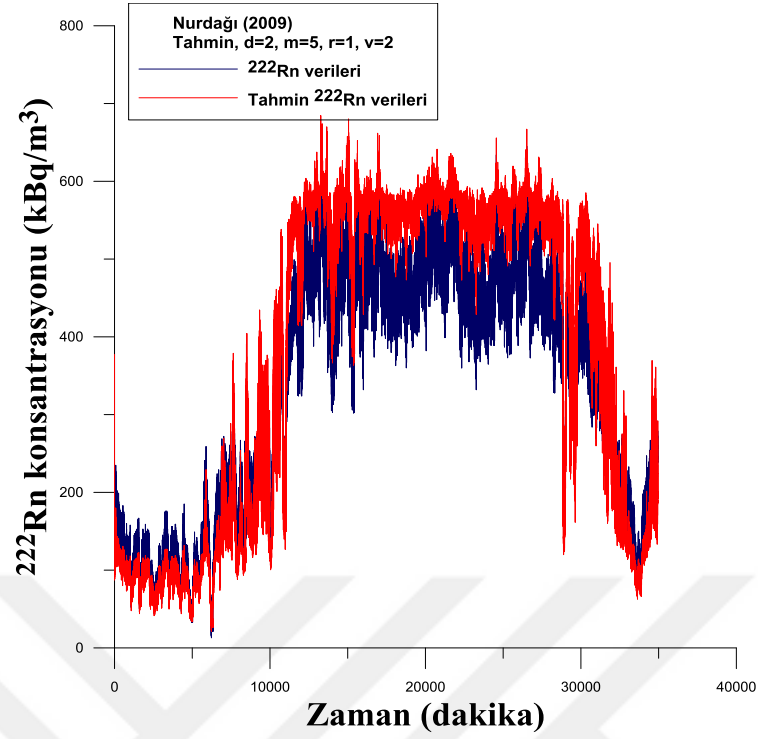
Ek 10 Şekil 4. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



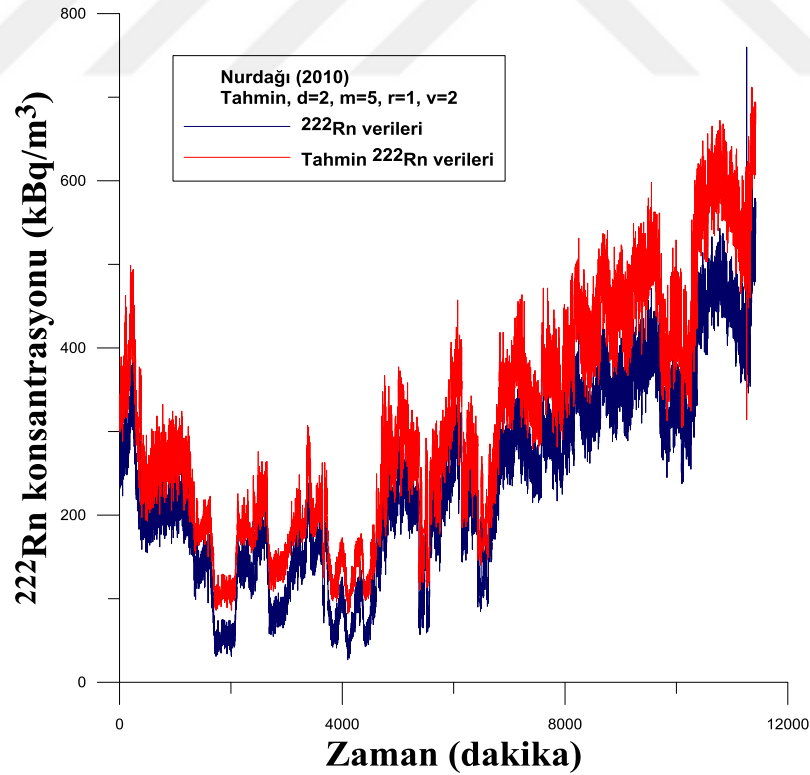
Ek 10 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için tahmin grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



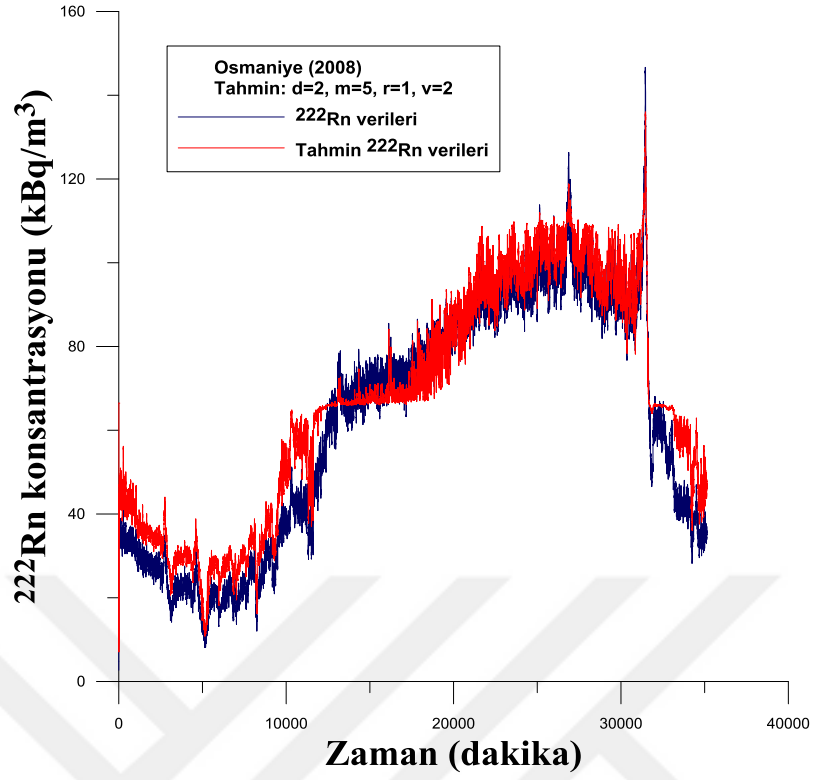
Ek 10 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için tahmin grafiği (2008 yılı Nurdağı bölgesi)



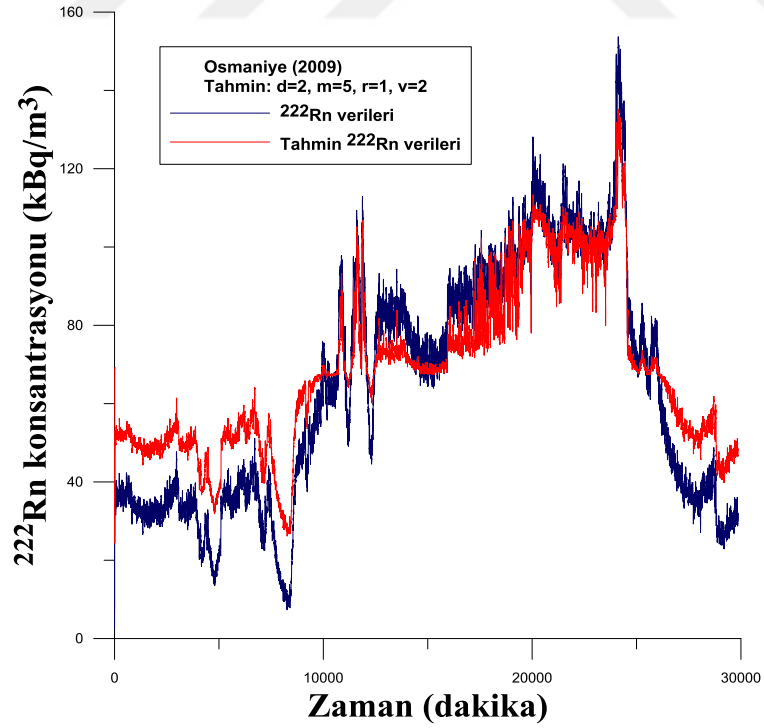
Ek 10 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



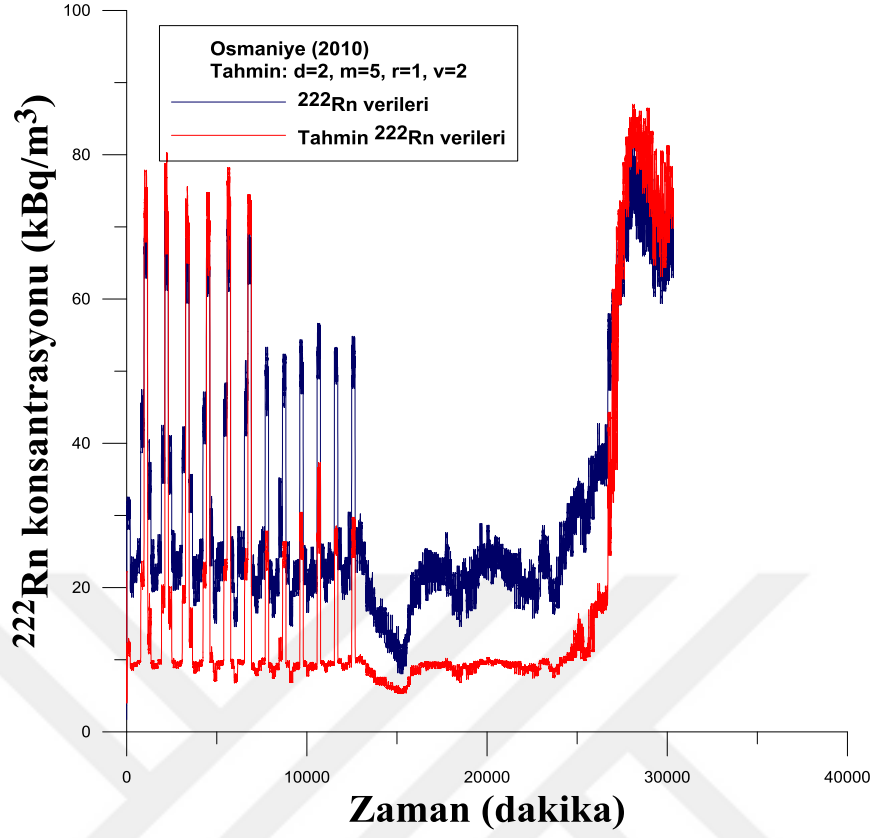
Ek 10 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



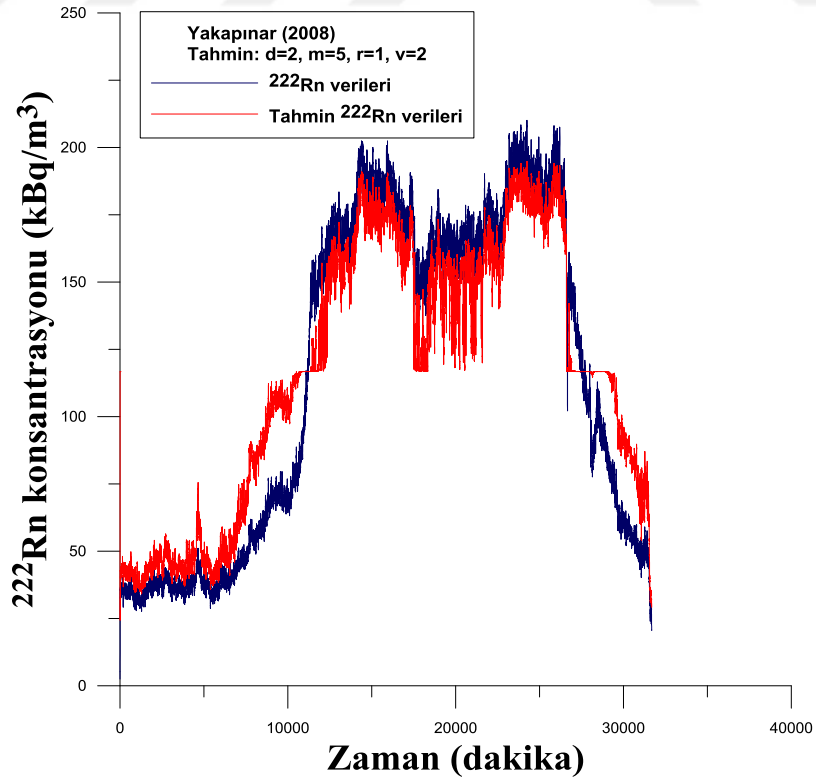
Ek 10 Şekil 9. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



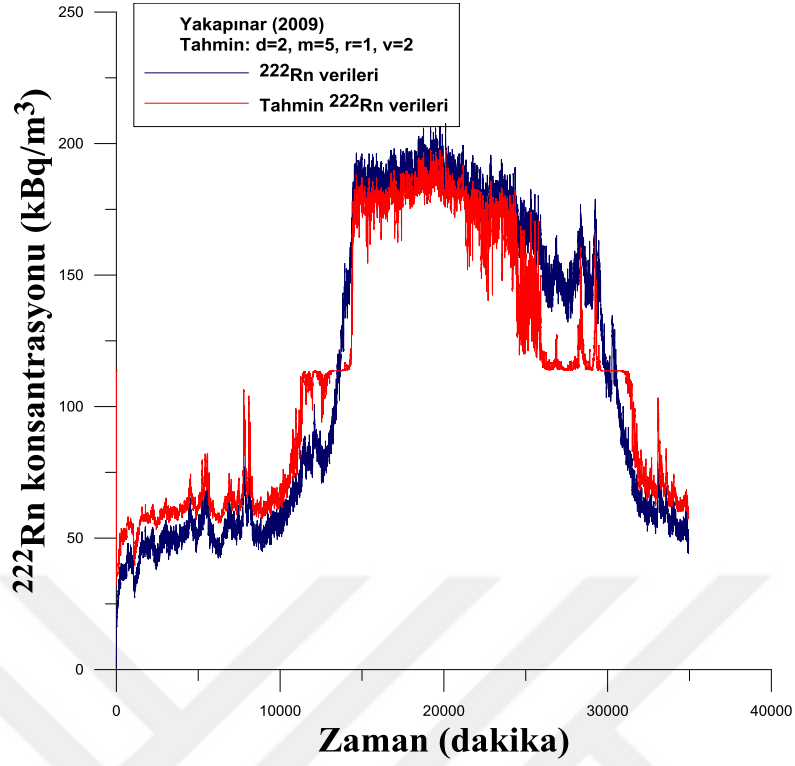
Ek 10 Şekil 10. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



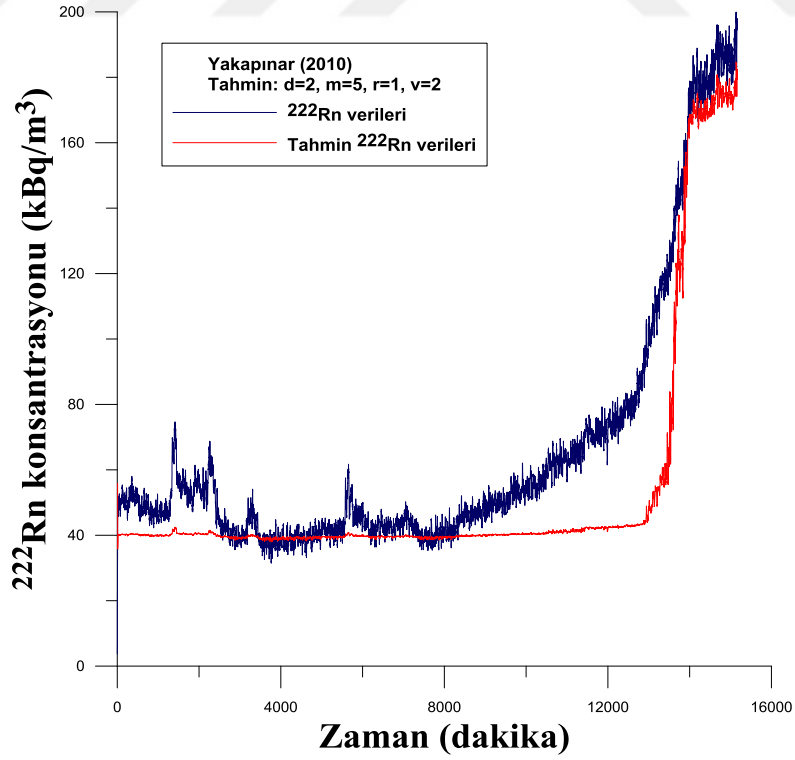
Ek 10 Şekil 11. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 10 Şekil 12. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 10 Şekil 13. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)

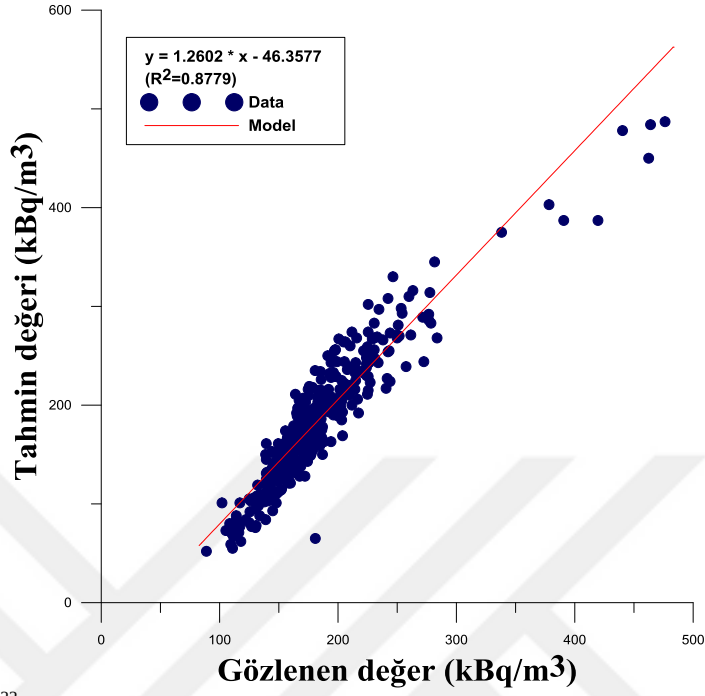


Ek 10 Şekil 14. ^{222}Rn konsantrasyonunun $d=2$, $m=5$, $r=1$, $v=2$ için tahmin grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)

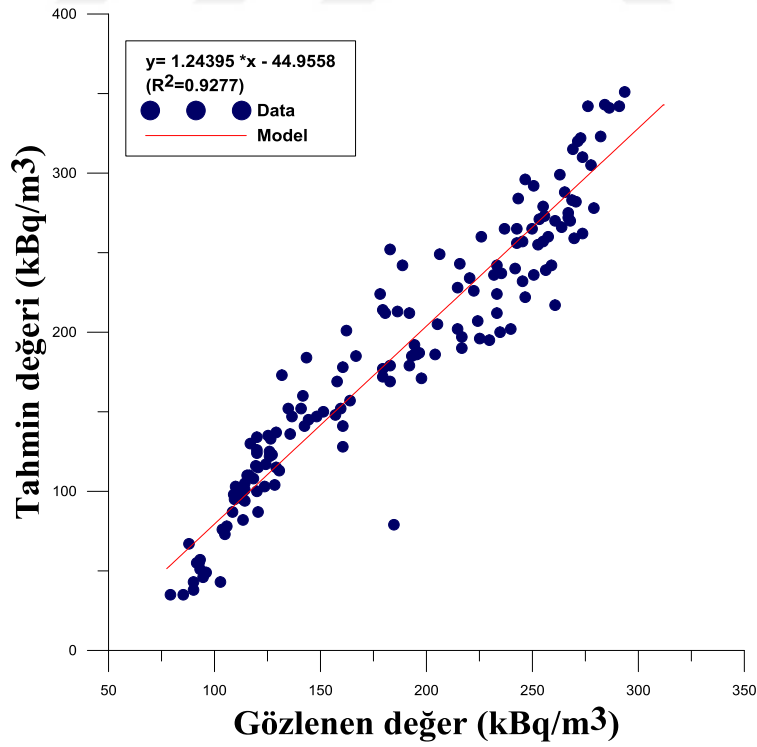


EK 11

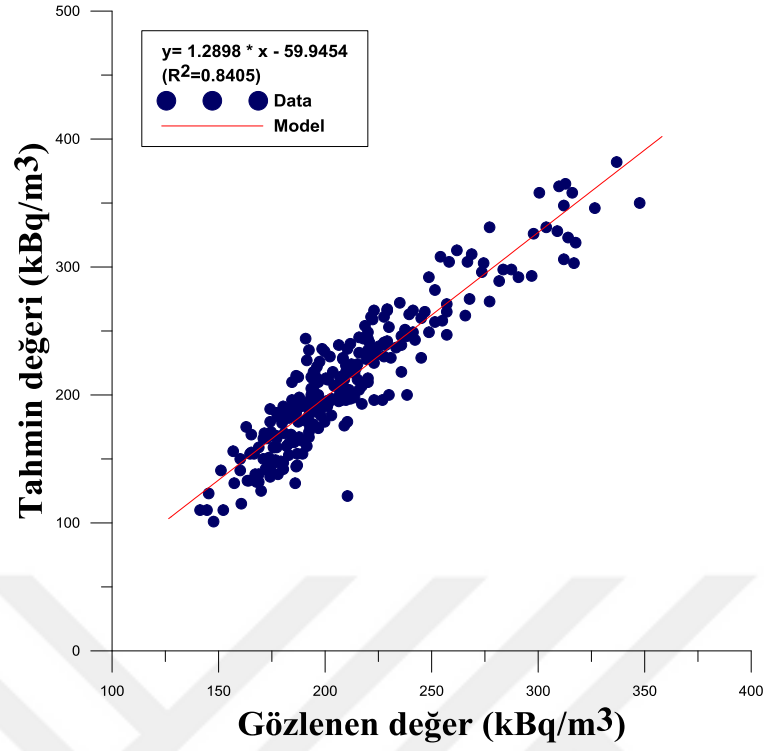
Kozan, Mersin, Nurdağı, Osmaniye ve Yakapınar İstasyonları için Çizilen Saçılma Grafikleri



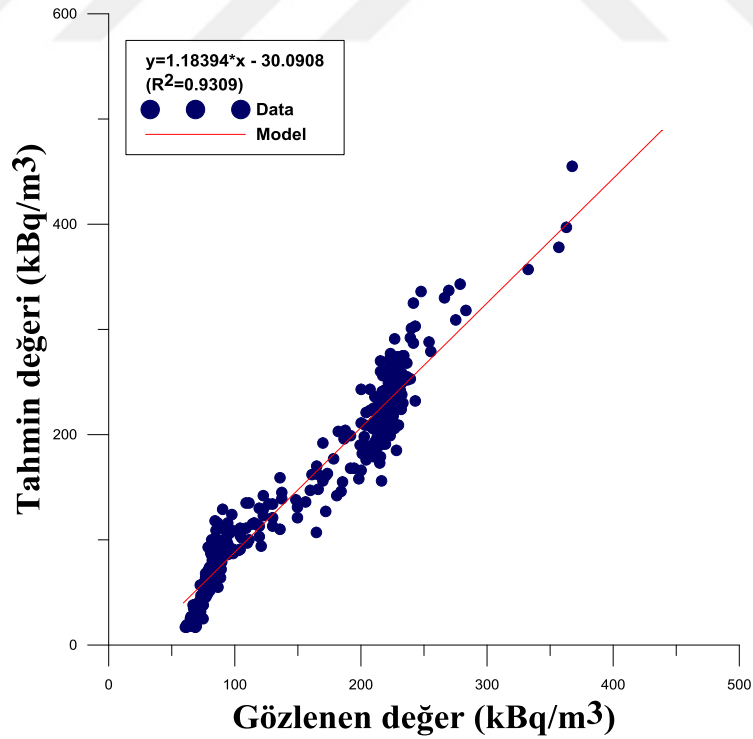
Ek 11 Şekil 1. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2009 yılı Kozan bölgesi)



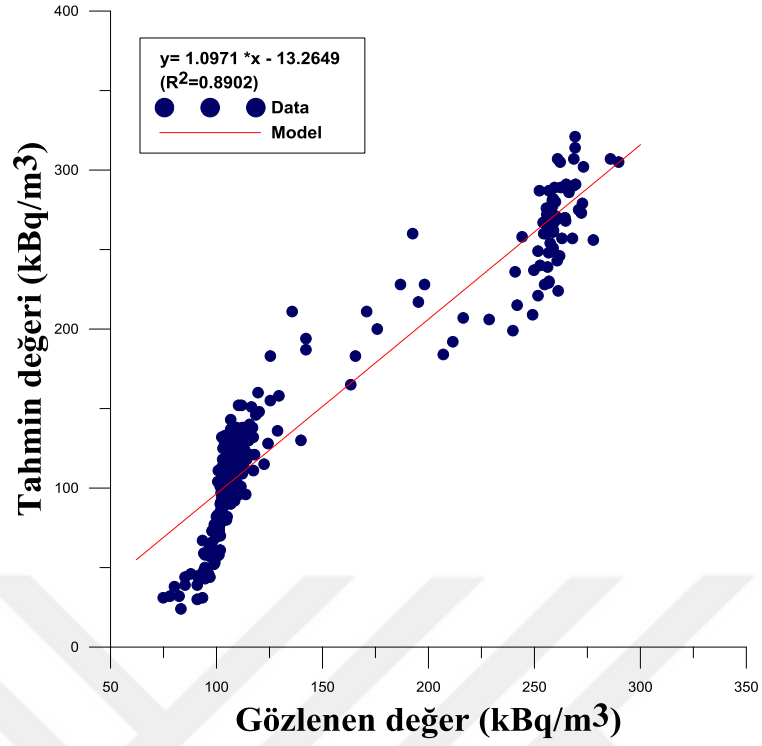
Ek 11 Şekil 2. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2010 yılı Kozan bölgesi)



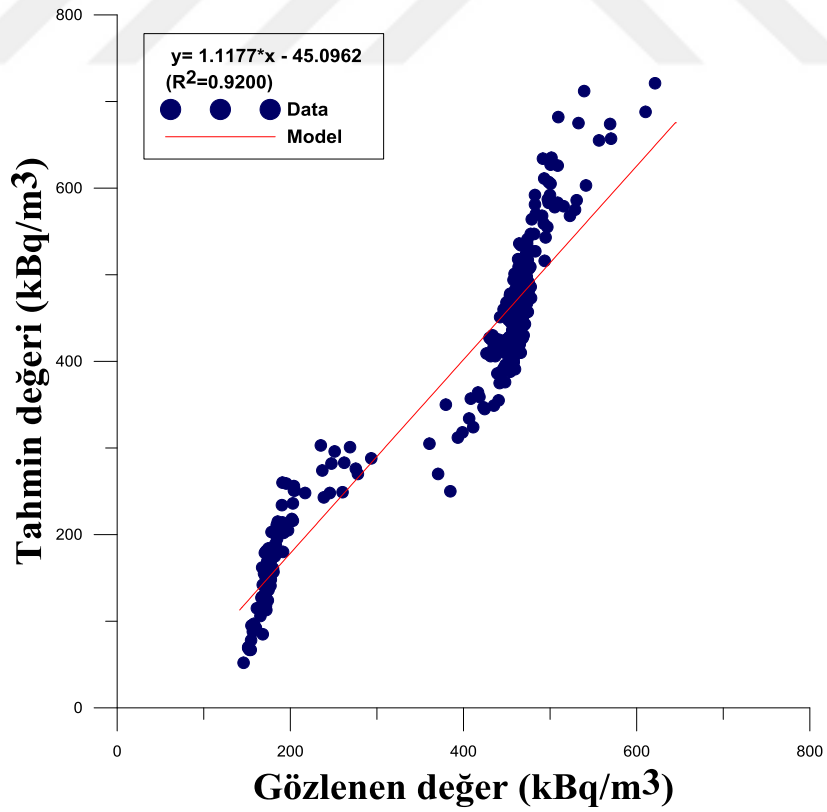
Ek 11 Şekil 3. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2008 yılı Mersin bölgesi)



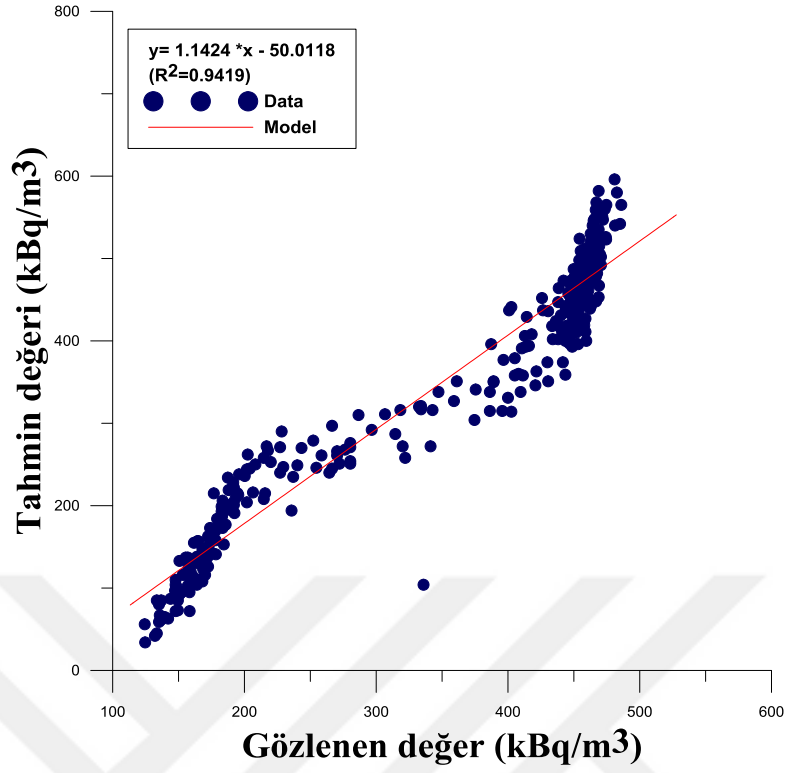
Ek 11 Şekil 4. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2009 yılı Mersin bölgesi)



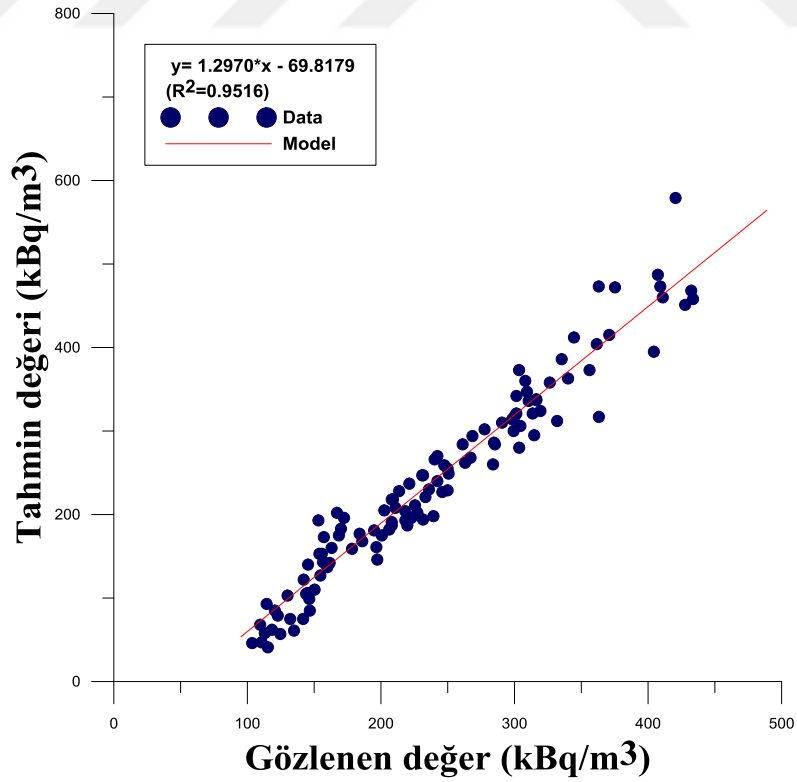
Ek 11 Şekil 5. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2010 yılı Mersin bölgesi)



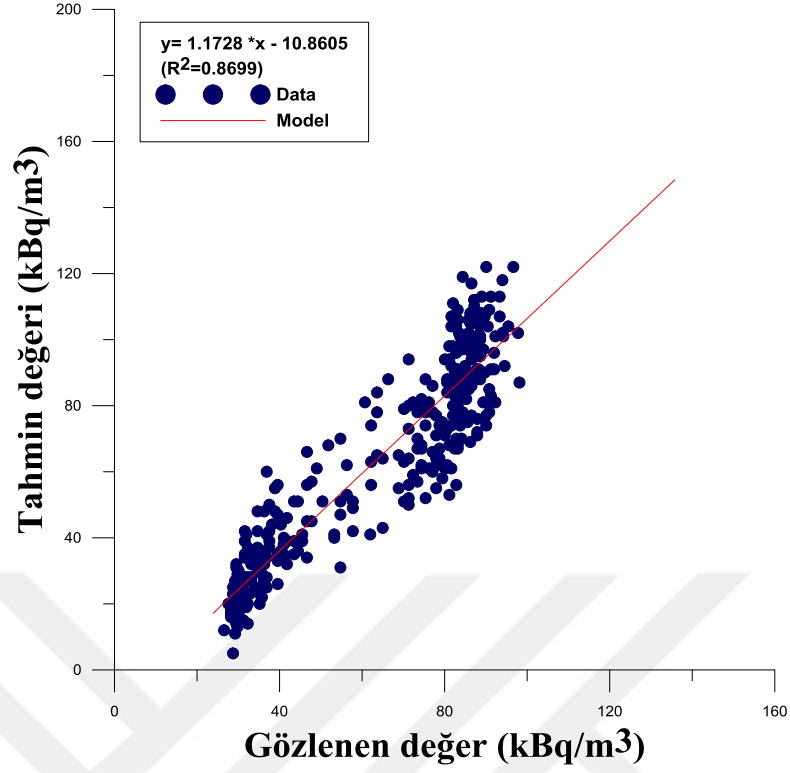
Ek 11 Şekil 6. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2008 yılı Nurdağı bölgesi)



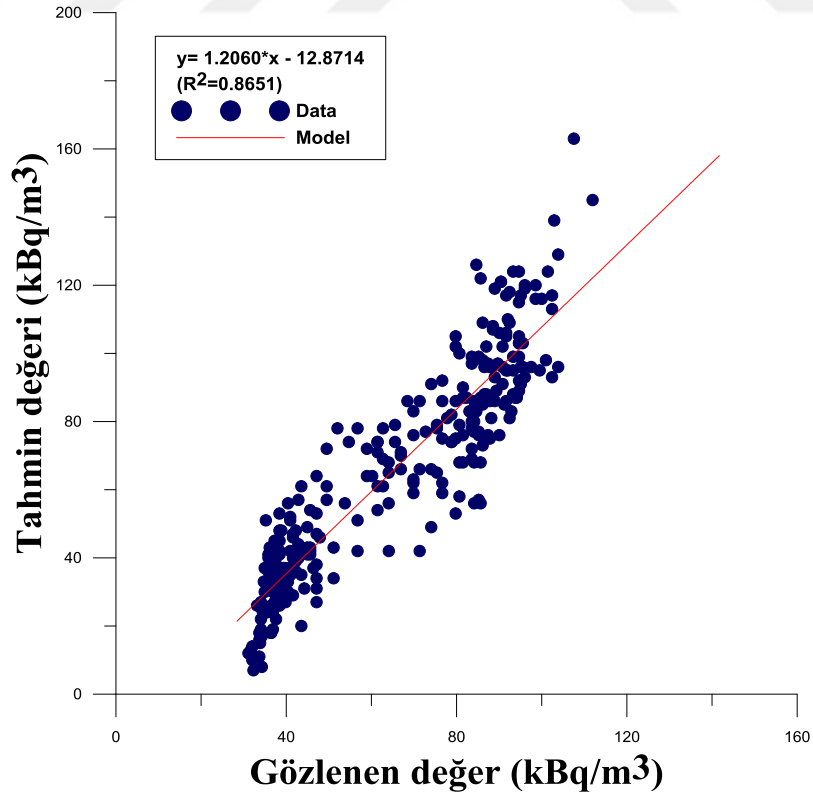
Ek 11 Şekil 7. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2009 yılı Nurdağı bölgesi)



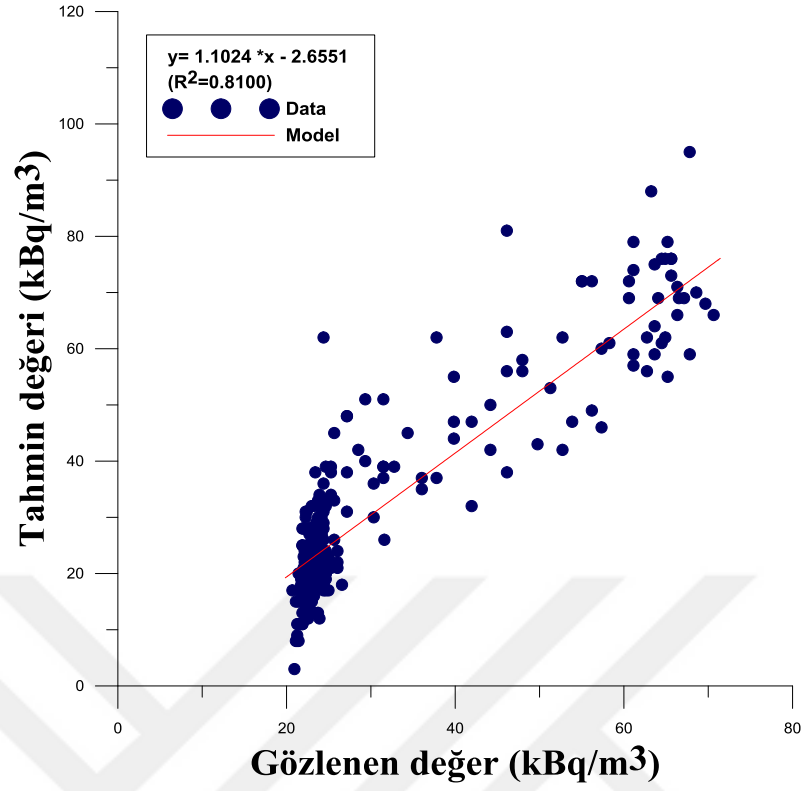
Ek 11 Şekil 8. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2010 yılı Nurdağı bölgesi)



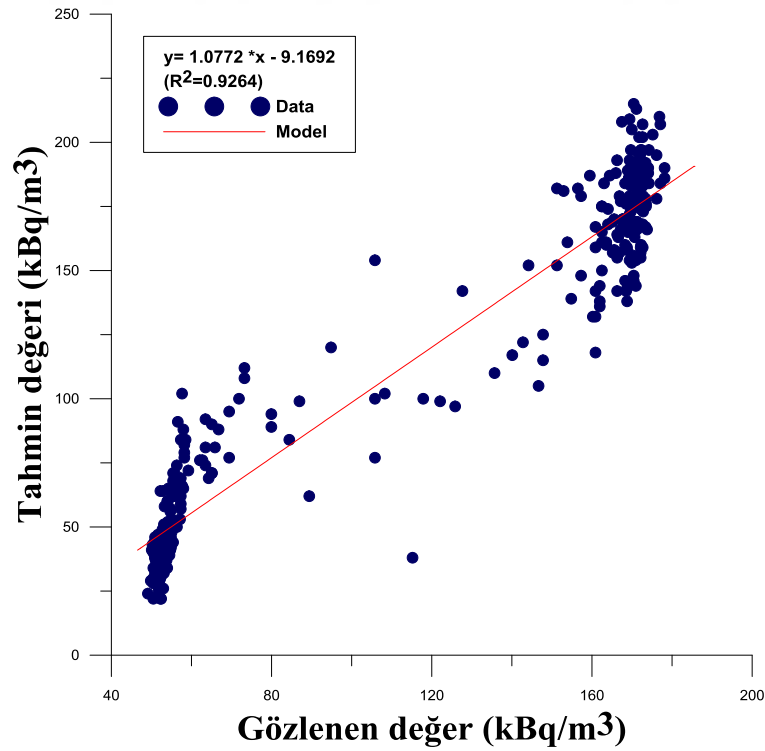
Ek 11 Şekil 9. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2008 yılı Osmaniye bölgesi)



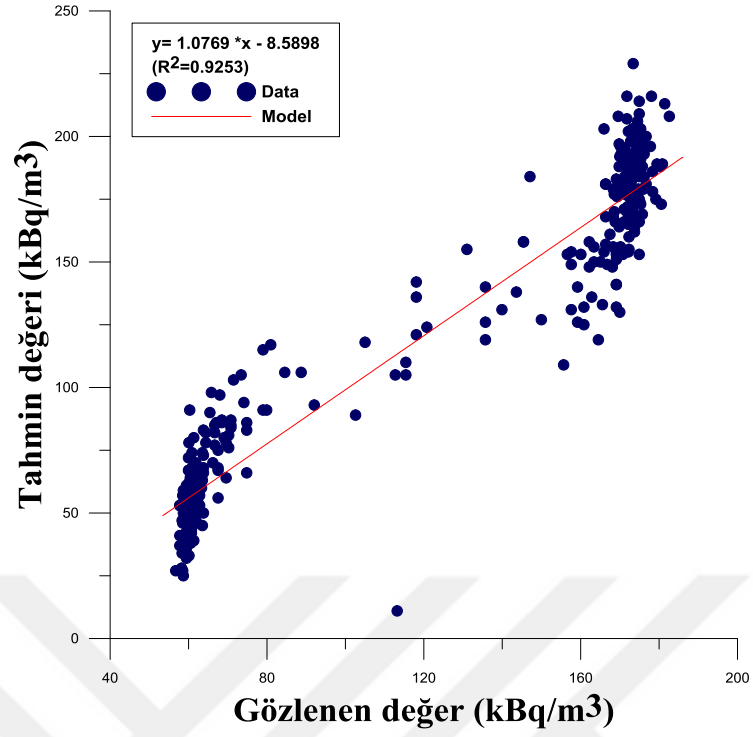
Ek 11 Şekil 10. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2009 yılı Osmaniye bölgesi)



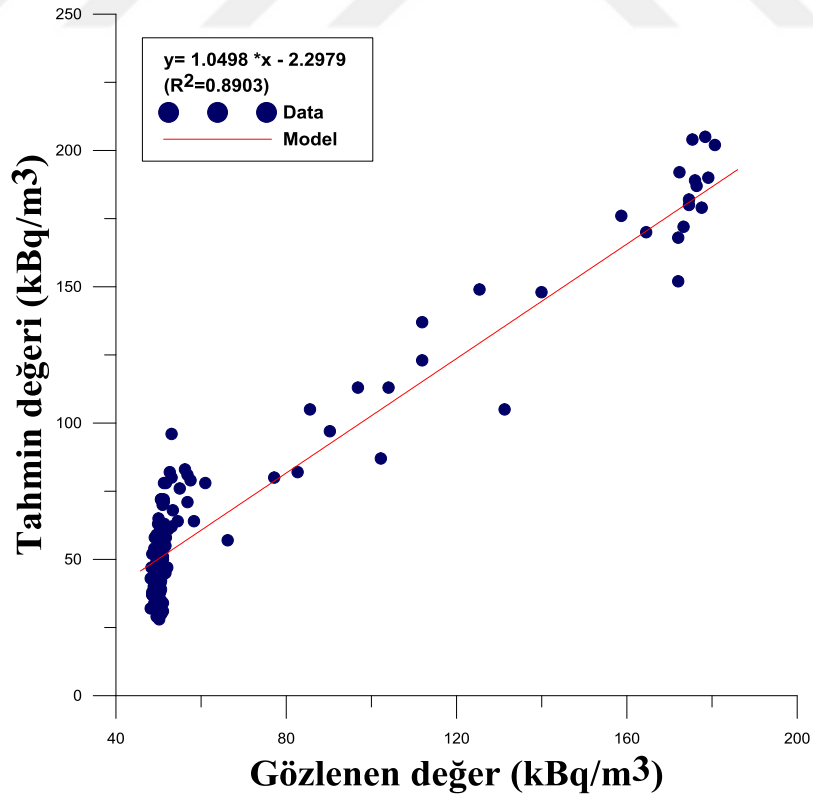
Ek 11 Şekil 11. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2010 yılı Osmaniye bölgesi)



Ek 11 Şekil 12. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2008 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 11 Şekil 13. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2009 yılı Yakapınar bölgesi)



Ek 11 Şekil 14. ^{222}Rn konsantrasyonunun d=2, m=5, r=1, v=2 için saçılma grafiği (2010 yılı Yakapınar bölgesi)



EK 12

Ek 12. Tablo 1. Kozan Bölgesi istatistiksel veri analizi

Kozan Bölgesi İçin İstatistiksel Veri Analizi	N (veri sayısı)	Menzil	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Skewness		Kurtosis	
Radon (kBq/m³)	418	433.17	47.15	480.31	188.937	64.768	4194.93	0.531	0.119*	0.519	0.238*
Deprem Şiddeti (M _w)	418	2.60	2.00	4.60	2.895	0.304	0.092	1.097	0.119*	3.453	0.238*
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	418	26.10	8.90	35.00	21.869	7.605	57.848	0.144	0.119*	-1.306	0.238*
Buhar Basıncı (hPa)	418	30.10	1.40	31.50	13.765	7.269	52.852	0.723	0.119*	-0.357	0.238*
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	418	29.50	-3.90	25.60	13.203	6.234	38.874	0.062	0.119*	-0.648	0.238*
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	418	29.80	0.20	30.00	17.043	6.399	40.954	-0.014	0.119*	-1.069	0.238*

* Standart sapma

Ek 12. Tablo 2. Mersin Bölgesi istatistiksel veri analizi

Mersin Bölgesi İçin İstatistiksel Veri Analizi	N (veri sayısı)	Menzil	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Skewness		Kurtosis	
Radon (kBq/m ³)	205	356.36	15.60	371.97	178.233	74.801	5595.27	-0.229	0.170*	-0.385	0.338*
Deprem Şiddeti (M _w)	205	1.30	2.60	3.90	2.835	0.204	0.042	1.673	0.170*	4.097	0.338*
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	205	15.53	17.70	33.23	25.693	4.482	20.093	-0.151	0.170*	-1.472	0.338*
Buhar Basıncı (hPa)	205	22.40	8.60	31.00	20.217	5.526	30.539	-0.033	0.170*	-1.088	0.338*
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	205	16.20	8.80	25.00	18.130	4.057	16.460	-0.223	0.170*	-1.087	0.338*
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	205	16.90	10.20	27.10	19.908	4.277	18.295	-0.353	0.170*	-0.968	0.338*

* Standart sapma

Ek 12. Tablo 3. Nurdağı Bölgesi istatistiksel veri analizi

Nurdağı Bölgesi İçin İstatistiksel Veri Analizi	N (veri sayısı)	Menzil	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Skewness	Kurtosis		
Radon (kBq/m ³)	684	665.33	38.83	704.17	335.307	155.806	24275.53	-0.203	0.093*	-1.244	0.187*
Deprem Şiddeti (M _w)	684	2.00	2.60	4.60	3.004	0.259	0.067	1.772	0.093*	6.133	0.187*
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	684	29.90	4.60	34.50	19.239	8.742	76.438	0.268	0.093*	-1.307	0.187*
Buhar Basıncı (hPa)	684	30.80	1.40	32.20	13.211	7.651	58.548	0.804	0.093*	-0.265	0.187*
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	684	29.70	-3.90	25.80	12.416	6.832	46.678	0.086	0.093*	-0.647	0.187*
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	684	30.40	0.20	30.60	16.217	6.994	48.922	0.060	0.093*	-1.064	0.187*

* Standart sapma

Ek 12. Tablo 4. Osmaniye Bölgesi istatistiksel veri analizi

Osmaniye Bölgesi İçin İstatistiksel Veri Analizi	N (veri sayısı)	Menzil	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Skewness	Kurtosis		
Radon (kBq/m ³)	638	136.67	9.80	144.47	56.393	30.879	953.516	0.314	0.097*	-1.258	0.193*
Deprem Şiddeti (M _w)	638	2.10	2.50	4.60	2.961	0.261	0.068	1.450	0.097*	4.503	0.193*
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	638	29.13	3.73	32.87	17.704	7.923	62.780	0.299	0.097*	-1.018	0.193*
Buhar Basıncı (hPa)	638	30.60	1.70	32.30	12.785	6.260	39.199	0.881	0.097*	0.385	0.193*
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	638	32.70	-7.10	25.60	10.833	6.873	47.22	-0.65	0.097*	-0.377	0.193*
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	638	33.40	-6.40	27.00	12.958	7.503	56.305	-0.028	0.097*	-0.632	0.193*

* Standart sapma

Ek 12. Tablo 5. Yakapınar Bölgesi istatistiksel veri analizi

Yakapınar Bölgesi İçin İstatistiksel Veri Analizi	N (veri sayısı)	Menzil	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Skewness		Kurtosis	
Radon (kBq/m³)	693	176.50	22.08	198.58	104.196	59.586	3550.59	0.314	0.093*	-1.637	0.185*
Deprem Şiddeti (M _w)	693	2.00	2.60	4.60	3.025	0.267	0.071	1.678	0.093*	5.615	0.185*
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	693	27.97	5.83	33.80	19.962	8.167	66.710	0.147	0.093*	-1.317	0.185*
Buhar Basıncı (hPa)	693	33.60	3.10	36.70	16.900	8.718	76.010	0.598	0.093*	-0.794	0.185*
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	693	32.20	-4.60	27.60	14.145	7.629	58.204	-0.019	0.093*	-0.934	0.185*
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	693	32.70	-2.90	29.80	15.637	7.622	58.103	-0.052	0.093*	-1.074	0.185*

* Standart sapma

Ek 12. Tablo 6. Kozan Bölgesi için Normallik Testi

Kozan Bölgesi İçin Normallik Testi	Kolmogorov- Smirnov		
	Katsayı	df	Sig.
Radon (kBq/m ³)	0.071	418	0.000
Deprem Şiddeti (M _w)	0.147	418	0.000
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.098	418	0.000
Buhar Basıncı (hPa)	0.118	418	0.000
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.048	418	0.000
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.085	418	0.000

df:serbestlik derecesi, **Significant (Sig).** önem derecesi

Ek 12. Tablo 7. Mersin Bölgesi için Normallik Testi

Mersin Bölgesi İçin Normallik Testi	Kolmogorov- Smirnov		
	Katsayı	df	Sig
Radon (kBq/m ³)	0.116	205	0.000
Deprem Şiddeti (M _w)	0.228	205	0.000
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.154	205	0.000
Buhar Basıncı (hPa)	0.089	205	0.000
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.112	205	0.000
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.112	205	0.000

df:serbestlik derecesi, **Significant (Sig).** önem derecesi

Ek 12. Tablo 8. Nurdağı Bölgesi için Normallik Testi

Nurdağı Bölgesi İçin Normallik Testi	Kolmogorov- Smirnov		
	Katsayı	df	Sig
Radon (kBq/m ³)	0.153	684	0.000
Deprem Şiddeti (M _w)	0.152	684	0.000
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.101	684	0.000
Buhar Basıncı (hPa)	0.121	684	0.000
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.053	684	0.000
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.081	684	0.000

df:serbestlik derecesi, **Significant (Sig).** önem derecesi

Ek 12. Tablo 9. Osmaniye Bölgesi için Normallik Testi

Osmaniye Bölgesi İçin Normallik Testi	Kolmogorov- Smirnov		
	Katsayı	df	Sig
Radon (kBq/m ³)	0.156	638	0.000
Deprem Şiddeti (M _w)	0.155	638	0.000
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.093	638	0.000
Buhar Basıncı (hPa)	0.112	638	0.000
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.037	638	0.000
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.058	638	0.000

df:serbestlik derecesi, **Significant (Sig).** önem derecesi

Ek. 12. Tablo 10. Yakapınar Bölgesi için Normallik Testi

Yakapınar Bölgesi İçin Normallik Testi	Kolmogorov- Smirnov		
	Katsayı	df	Sig
Radon (kBq/m ³)	0.189	693	0.000
Deprem Şiddeti (M _w)	0.139	693	0.000
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.102	693	0.000
Buhar Basıncı (hPa)	0.122	693	0.000
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.072	693	0.000
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.077	693	0.000

df:serbestlik derecesi, **Significant (Sig).** önem derecesi

Ek 12. Tablo 11. Kozan Bölgesi korelasyon analizi

Kozan Bölgesi İçin Korelasyon Analizi	Radon (kBq/m ³)	Deprem Şiddeti (M _w)	Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	Buhar Basıncı (hPa)	Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)
Radon (kBq/m ³)	1.000	-0.046	0.462	0.603	0.578	0.440
Deprem Şiddeti (M _w)	-0.046	1.000	-0.065	-0.045	-0.070	-0.081
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.462	-0.065	1.000	0.743	0.893	0.934
Buhar Basıncı (hPa)	0.603	-0.045	0.734	1.000	0.935	0.705
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.578	-0.070	0.893	0.935	1.000	0.906
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.440	-0.081	0.934	0.705	0.906	1.000

Ek 12. Tablo 12. Mersin Bölgesi korelasyon analizi

Mersin Bölgesi İçin Korelasyon Analizi	Radon (kBq/m ³)	Deprem Şiddeti (M _w)	Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	Buhar Basıncı (hPa)	Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)
Radon (kBq/m ³)	1.00	-0.030	0.003	-0.008	-0.015	-0.018
Deprem Şiddeti (M _w)	-0.030	1.000	0.114	0.130	0.125	0.099
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.003	0.114	1.000	0.832	0.891	0.912
Buhar Basıncı (hPa)	-0.008	0.130	0.832	1.000	0.982	0.800
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	-0.015	0.125	0.891	0.982	1.000	0.892
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	-0.018	0.099	0.912	0.800	0.892	1.000

Ek 12. Tablo 13. Nurdağı Bölgesi korelasyon analizi

Nurdağı Bölgesi İçin Korelasyon Analizi	Radon (kBq/m ³)	Deprem Şiddeti (M _w)	Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	Buhar Basıncı (hPa)	Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)
Radon (kBq/m ³)	1.000	-0.016	0.788	0.585	0.717	0.737
Deprem Şiddeti (M _w)	-0.016	1.000	-0.051	-0.049	-0.057	-0.059
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.788	-0.051	1.000	0.800	0.936	0.951
Buhar Basıncı (hPa)	0.585	-0.049	0.800	1.000	0.934	0.742
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.717	-0.057	0.936	0.934	1.000	0.926
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.737	-0.059	0.951	0.742	0.926	1.000

Ek 12. Tablo 14. Osmaniye Bölgesi korelasyon analizi

Osmaniye Bölgesi İçin Korelasyon Analizi	Radon (kBq/m ³)	Deprem Şiddeti (M _w)	Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	Buhar Basıncı (hPa)	Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)
Radon (kBq/m ³)	1.000	-0.015	0.721	0.598	0.629	0.621
Deprem Şiddeti (M _w)	-0.015	1.000	-0.107	-0.100	-0.116	-0.124
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.721	-0.107	1.000	0.893	0.940	0.938
Buhar Basıncı (hPa)	0.598	-0.100	0.893	1.000	0.974	0.898
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.629	-0.116	0.940	0.974	1.000	0.973
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.621	-0.124	0.938	0.898	0.973	1.000

Ek 12. Tablo 15. Yakapınar Bölgesi korelasyon analizi

Yakapınar Bölgesi İçin Korelasyon Analizi	Radon (kBq/m³)	Deprem Şiddeti (M_w)	Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	Buhar Basıncı (hPa)	Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)
Radon (kBq/m³)	1.000	-0.102	0.895	0.853	0.864	0.859
Deprem Şiddeti (M_w)	-0.102	1.000	-0.124	-0.118	-0.115	-0.109
Ortalama Toprak Sıcaklığı (°C)	0.895	-0.124	1.000	0.950	0.968	0.969
Buhar Basıncı (hPa)	0.853	-0.118	0.950	1.000	0.992	0.959
Islak Termometre Sıcaklığı (°C)	0.864	-0.115	0.968	0.992	1.000	0.986
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	0.859	-0.109	0.969	0.959	0.986	1.000

ÖZGEÇMİŞ

1990 Harput/ELAZIĞ doğumluyum. İlköğretimimi Nahit Ergene İlköğretim okulunda, Orta öğretimimi Aziz Gül İlköğretim okulunda yaptım. Lise eğitimimi Balakgazi Lisesinde bitirdim. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünü kazandım. 2011’de lisans eğitimimi tamamlayıp aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Fizik anabilim dalında doğrudan doktora eğitimine başladım.

2014 yılında da Malatya İnönü Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Biyofizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimime başlamış olup hâlen çalışmalarına devam etmekteyim.

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerdeki Yayınları:

- 1- Kamışlıoğlu, M., Kùlahcı, F., and Şen, Z., 2016. Nonlinear Reply of Soil Radon (^{222}Rn) Gas Measurements and Deterministic Chaos (submitted).
- 2- Kamışlıoğlu, M., Kùlahcı, F., 2016. Chaotic Behavior of Soil Radon Gas and Applications, Acta Geophysica, (doi number:).
- 3- Kamışlıoğlu M., Kùlahcı F., 2016. Application of Chaos Analyses Methods on East Anatolian Fault Zone Fractures, ICNAAM. 13th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, AIP Conference Proceedings, 1738, 130005 (2016); doi:10.1063/1.4951921.
- 4- Kamışlıoğlu M., Kùlahcı F., 2015. Time Series Analysis of ^{222}Rn Gas Measurements Received from Osmaniye Region. 2015 IEEE 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2015) 308-311, 2015.
- 5- Kamışlıoğlu M., Kùlahcı F., 2014. Investigation nonlinear behavior of Radon Gas (^{222}Rn). 2014 IEEE 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2014) 208-211, 2014.
- 6- Kamışlıoğlu M., Kùlahcı F., Özkaynak F., 2013. Nonlinear reply of radon and deterministic Chaos. The 6th Chaotic Modeling and Simulation International Conference, Istanbul, Turkey, Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM), 2: 153-160, 2014.

Ulusal Hakemli Dergilerdeki Yayınları:

- 1- Kamışlıoğlu, M., Kùlahcı, F., Niksarlıoğlu, S., 2014. Toprak Radon (^{222}Rn) Gazı Anomalilerinin ARIMA Analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Dergisi.
- 2- Niksarlıoğlu, S., Kùlahcı, F., Kamışlıoğlu, M., 2014. Spatial analysis of radon behavior on the East Anatolian Faults System (EAFS), Turkish Physical Society, 31th Congress, Bodrum, Turkey, Balkan Physics Letters (BPL), 13-22, 2015.

Uluslararası Konferans ve Sempozyumlar:

- 1- Kamlşloğlu, M., K÷lahcı, F., Yılmaz, M., 2015. Power Spectrum Analysis of Soil Radon (^{222}Rn) Gas, TESNAT.
- 2- Karaman, S., K÷lahcı, F., Kamlşloğlu, M., 2014. Modelling and prediction of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{238}U with artificial neural networks, Turkish Physical Society, 31th Congress, Bodrum, Turkey.
- 3- Kamlşloğlu, M., K÷lahcı, F., Özkaynak, F., Özer, A.B., 2014. Nonlinear analysis and test of Radon Gas (^{222}Rn) time series by using artificial neural networks, Turkish Physical Society, 31th Congress, Bodrum, Turkey.
- 4- Kamlşloğlu, M., K÷lahcı, F., 2012, Modeling with pattern recognition of ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides, Turkish Physical Society, 29th Congress, Bodrum, Turkey.

Uluslararası Konferans ve Sempozyumlar:

- 1- Niksarlıoğlu, S., K÷lahcı, F., Kamlşloğlu, M., 2014. Doğu Anadolu Fay Sistemindeki (DAFS) ^{222}Rn Değişiminin İstatiksel Analizi, Adım Fizik Günleri III, Isparta.
- 2- Miraç Kamlşloğlu, Fatih K÷lahcı, 2012, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Modeling for Earthquake Prediction, 19. İstatistiksel Fizik Günleri (28-30 Haziran 2012), Sabancı Üniversitesi, İstanbul.

Projeleri

- 1- Miraç KAMIŞLIOĞLU was supported by TUBITAK thesis study with Project number and name (1649B031305870/ 2211-C Priority Areas Related to Domestic Doctoral Scholarship Program).
2. 27. Ulusal Biyofizik Kongresi Düzenleme Kurulu Üyesi (web tasarımı). (İnönü Üniversitesi, Tıp Fakültesi Biyofizik Anabilim Dalı, 29 Eylül- 03 Ekim 2015).

Üyelikler

- 1- Türk Fizik Derneği Üyesi (2016- devam ediyor)
- 2- Türk Biyofizik Derneği Üyesi (2016- devam ediyor)