

**BAZI İYONKÜRE PARAMETRELERİNDEKİ
DEĞİŞİM İLE $M \geq 5.0$ BÜYÜKLÜĞÜNDEKİ
DEPREMLER ARASINDAKİ İLİŞKİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tuba KARABOĞA

**Doktora Tezi
Fizik Bölümü Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. OSMAN ÖZCAN
EYLÜL-2013**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZI İYONKÜRE PARAMETRELERİNDEKİ DEĞİŞİM İLE
 $M \geq 5.0$ BÜYÜKLÜĞÜNDEKİ DEPREMLER ARASINDAKİ İLİŞKİNİN
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Tuba KARABOĞA

(06114201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02Ağustos 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 12Eylül 2013

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Osman ÖZCAN (Fırat Üniversitesi)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Mikail ET(Fırat Üniversitesi)

Doç.Dr. Ali YEŞİL (Fırat Üniversitesi)

Doç. Dr. İbrahim ÜNAL (İnönü Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Esat GÜZEL (Fırat Üniversitesi)

EYLÜL-2013

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her safhasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım başta danışman hocam Prof. Dr. Osman ÖZCAN, değerli fikirleri ve yol göstericiliği için hocam Yrd. Doç. Dr. Murat CANYILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca hayatım boyunca her zaman yanımda olan aileme, sonsuz ve karşılıksız destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Tuba KARABOĞA
ELAZIĞ-2013

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLOLAR LİSTESİ.....	X
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XI
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	7
2.1 İyonküre ve Kritik Frekans.....	7
2.2 Güneş ve Jeomanyetik İndisler.....	13
2.2.1 Güneş İndisleri.....	13
2.2.1.1 R İndisi.....	13
2.2.1.2 F10.7 İndisi.....	14
2.2.2 Jeomanyetik İndisler.....	20
2.2.2.1 K İndisi.....	20
2.2.2.2 Kp İndisi.....	21
2.2.2.3 ap İndisi.....	22
2.2.2.4 Ap İndisi.....	23
2.2.2.5 Dst İndisi.....	23
2.3. Deprem-İyonküre Etkileşimi.....	27
3. MATERYAL VE METOT.....	38
3.1 Deprem Hazırlık Alanı (ρ).....	40
3.2 Sismik-İyonküre Çalışmalarında Kullanılan Bazı Yöntemler.....	41
3.2.1 Korelasyon Analizi (KA).....	41
3.2.2 Standart Sapma Analizi (SSA).....	43
3.2.3 Çeyrekler Arası Oran (IQR).....	43
3.2.4 Dalgalanma Analizi (DA).....	44
4. BULGULAR.....	46
4.1 Hazırlık Alanı İçinde Tek İstasyon Bulunan Depremler.....	46
4.2 Hazırlık Alanı İçinde Birden Fazla İstasyon Bulunan Depremler.....	48
4.3 Hazırlık Alanı Dışında Da İstasyon Bulunan Depremler.....	50
4.4 Korelasyon Analizi.....	52
4.5 Standart Sapma Analizi.....	59
4.6 Çeyrekler Arası Oran Analizi.....	70
4.7 Dalgalanma Analizi.....	82
4.8 Güneş İndisleri.....	88

4.8.1	Uluslar Arası Güneş Lekesi Sayısı (UGLS) ve Güneş Akısı İndisi (F10.7 cm).....	88
4.9	Jeomanyetik İndisler.....	92
4.9.1	Dst İndisi.....	92
4.9.2	Kp İndisi	95
4.9.3	Ap İndisi	99
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	104
	KAYNAKLAR	116
	ÖZGEÇMİŞ.....	121

ÖZET

Bu çalışmada, Japonya’da 1975-2011 yılları arasında, $M \geq 5.0$ büyüklüğünde ve $D > 40$ km derinliğinde meydana gelen 24 tane deprem ile bu bölgede bulunan 6 istasyonda istasyonundan alınan iyonkürenin F2 bölgesine ait kritik frekans (f_oF2) dataları arasındaki ilişki, istatistiksel olarak incelendi. Bu datalara; Korelasyon, Standart Sapma (SS), Çeyrekler Arası Oran (IQR) ve Dalgalanma Analizi (DA) uygulandı. İyonkürede tedirginliğe neden olan değişkenliğin daha sağlıklı yorumlanabilmesi için elde edilen sonuçlar, bazı Güneş ve jeomanyetik fırtına aktivitelerini gösteren indislerin (F10.7, USGS, Dst, Kp, Ap) değişimiyle karşılaştırıldı.

Tüm depremler için kritik frekansta meydana gelen değişimlerde doğrudan depremin büyüklüğüne ve derinliğine bağlı olarak bir ilişki kurulamazken, istasyonun deprem merkezine olan uzaklığının önemli olduğu görüldü. Bununla birlikte benzer büyüklükteki depremler için, yüzeye yakın depremlerde daha fazla değişim görüldüğü, ifade dileyebilir. Deprem merkezinin ve istasyonların konumunun yanı sıra, depremin meydana geldiği bölgedeki tektonik plakaların sonuçlar üzerinde etkili olduğu görüldü. Japonya’nın doğu bölgesi ve bu bölgedeki tektonik plakaların hareketiyle meydana gelen depremlerde, etki ve değişim daha fazla olurken, batı bölgesinde çok azdır.

İncelenen depremlerin birçoğunda; deprem merkezine yakın istasyonlarda, Güneş ve jeomanyetik aktiviteye bağlı değişimler, merkezden uzakta istasyonlara göre daha düşük şiddettedir. f_oF2 ’de tedirginliğin meydana geldiği günlerde, Güneş ve jeomanyetik aktiviteye bağlı değişimlerin yanında, özellikle bu aktivitelerin düşük/sakin olduğu zamanlarda, sismik aktiviteye bağlı olabileceği düşünülen değişimler görüldü.

Birden fazla istasyondan veri alınan bazı depremlerde, istasyonlar arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Genel olarak her bir deprem için istatistiksel analizlerle elde edilen sonuçlar birbirleriyle günü gününe olmasa da, tutarlıdır. Ancak önemli farklılıkların olduğu depremler de mevcuttur. Dalgalanma analizi; Güneş ve jeomanyetik aktiviteye bağlı değişim pek göstermezken, diğer analiz sonuçları bu aktivitelerle ilişkili sonuçlar ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: İyonküre, Kritik Frekans, Deprem, Güneş Aktivitesi, Jeomanyetik İndisler

SUMMARY

Investigation of Relation between the Variation of Some Ionospheric Parameters with Earthquakes for Magnitude $M \geq 5.0$

In this study, relationship between ionospheric F2 region critical frequency (f_oF_2) data were taken from 6 ionosonde stations located in that area with 24 earthquakes $M \geq 5.0$ and $D > 40\text{km}$ (M = magnitude, D = depth) occurred in Japan between 1975 and 2011 were studied statistically. Correlation, Standard Deviation (SD), Interquartile Range (IQR) and Fluctuation Analysis (FA) were applied on the data. In order to make a correct interpretation of perturbations causing changes in ionosphere, obtained results were compared with variations of some indices ($F_{10.7}$, USGS, Dst, Kp, Ap) showing the activities of Solar and geomagnetic storms.

For all earthquakes at the variations occurred in critical frequency, Although there is no direct connection between the depth and the magnitude of the earthquake, the distance from the station to the center of the earthquake was observed to be significant. However for similar-magnitude earthquakes, it can be expressed that variations on the shallow earthquakes is the greater. It seen that besides position of the earthquake center and stations, tectonic plates on the area occurred earthquakes were effective. On earthquakes occurred movement of tectonic plates on that region and eastern regions of Japan, while impacts and variations are more, on the west regions they are very small.

In many of the earthquakes, on the stations near the earthquake center, variations depending on the Solar and geomagnetic activities are less severity compared to those away. On the days occurred perturbations in f_oF_2 , besides depending on the Solar and geomagnetic activities, especially when these activities were low/quiet, variations thought to be due to the activity were seen.

In some earthquakes, there are significant differences between stations that provide data for earthquakes. Results of statistical analysis for each earthquakes show consistency in general despite some contradictions about their days. However, important differences exist for some earthquakes data. While Fluctuation Analysis doesn't show variations connected to the Solar and geomagnetic activities so much, other analysis exhibit results associated with these activities.

Key Words: Ionosphere, Critical Frequency, Earthquake, Solar Activity, Geomagnetic Indices

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Atmosferik Bölgeler.	3
Şekil 2.1.	İyonküre bölgeleri ve elektron yoğunluğu ve sıcaklığın yükseklikle değişimi...	9
Şekil 2.2.	Slough (52 °K enlemi) ve Port Stanley (52 °G enlemi)'de öğlen F2 tabakasının kritik frekansı ile R-Zürih Güneş lekesi sayısı ve F10.7 Güneş akısı ilişkisi ...	16
Şekil 2.3.	Güneş lekesinin maksimum ve minimumunda, gündüz ve gece iyonküre elektron yoğunluğu profili.....	16
Şekil 2.4.	Yer manyetoküresi.....	17
Şekil 2.5.	Yer'in manyetik alanının bileşenleri.....	21
Şekil 2.6.	Manyetik fırtınalarla meydana gelen ekvator ve kutup elektrojet akımları.	24
Şekil 2.7.	Güneş indisleri ve jeomanyetik indisler arasındaki ilişki	26
Şekil 2.8.	13 Mart 1989'da meydana gelen manyetik fırtına süresince a) Dst indisi, b) f_oF_2 'nin yüzde sapması ve c) iyonküre tabakalarına ait frekansların değişimi (Fsp-F spread oluşumu, daire ve – işareti gece E ve F1 tabakalarının oluşumuna işaret eder).	26
Şekil 2.9.	Deprem-iyonküre etkileşim süreçleri.....	29
Şekil 2.10.	16 Ocak 1995 Kobe (Japonya) depremi öncesi ve sonrasında yeraltı suyu radon yoğunluğu.....	29
Şekil 2.11.	06:00 YZ (koyu) ve 18:00 (yuvarlak ince) için Taşkent iyonküre istasyonundan f_oF_2 'nin beş günlük hareketli ortalaması ve deprem merkezine yakın bir kaynaktan ölçülen radon yoğunluğu (üçgen) arasındaki ilişki.	30
Şekil 2.12.	30.08.1986 Carpathian depremi için (M=7.2), elektrik alandaki değişim. Altındaki koyu çizgi sakin zamanlardaki elektrik alanın aylık ortalamasını göstermektedir.	33
Şekil 3.1.	Çalışmada veri alınabilen iyosonda istasyonlarının konum bilgileri.....	39
Şekil 3.2.	Korelasyon analizi için; deprem hazırlık alanı, deprem merkezi ve istasyonların konumu.....	42
Şekil 4.1.	Deprem Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için, istasyon ve deprem merkezlerinin konumları.....	46
Şekil 4.2.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için, istasyona ve deprem merkezlerinin konumları.....	48
Şekil 4.3.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için, istasyona ve deprem merkezlerinin konumları	50
Şekil 4.4.	Hazırlık Alanı İçinde Tek İstasyon Bulunan Depremler için OK sonuçları	53
Şekil 4.5.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için OK sonuçları	55
Şekil 4.6.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için OK sonuçları.....	57
Şekil 4.7.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için ÇK sonuçları	58
Şekil 4.8.	Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için SS analizi sonuçları	62

Şekil 4.9.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için SS analizi sonuçları	65
Şekil 4.10.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan deprem için SS analizi sonuçları	69
Şekil 4.11.	Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan deprem için IQR analizi sonuçları	73
Şekil 4.12.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için IQR analizi sonuçları	76
Şekil 4.13.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan deprem için IQR analizi sonuçları	81
Şekil 4.14.	Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan deprem için DA sonuçları	83
Şekil 4.15.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için DA sonuçları	85
Şekil 4.16.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan deprem için DA sonuçları	88
Şekil 4.17.	Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan deprem için Güneş indisleri	90
Şekil 4.18.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için Güneş indisleri	90
Şekil 4.19.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan deprem için Güneş indisleri	91
Şekil 4.20.	Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Dst indisi	93
Şekil 4.21.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Dst indisi	94
Şekil 4.22.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Dst indisi	95
Şekil 4.23.	Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Kp indisi	97
Şekil 4.24.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Kp indisi	97
Şekil 4.25.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Kp indisi	98
Şekil 4.26.	Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Ap indisi	101
Şekil 4.27.	Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Ap indisi	101
Şekil 4.28.	Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Ap indisi	102
Şekil 5.1.	Japonya’da bulunan tektonik plakalar ve hareketleri.	106
Şekil 5.2.	1900’den günümüze Japonya’da $M \geq 6.5$ olan deprem. Şekildeki siyah üçgenler, plakaların üst üste bindiği kuşakta, batma kuşaklarını göstermektedir	107
Şekil 5.3.	Japonya için a) tektonik plakalar ve volkanlar, b) volkanik kuşaklar.	108
Şekil 5.4.	Çalışmada kullanılan deprem ve veri alınan iyosonda istasyonları	108

Şekil 5.5. (a) f_oF_2 'nin günlük medyan değerlerine göre değişimi. (1) Milkovo (5.09.1971, 18.35 UZ, $M = 7.2$); (2) Roma (23.11.1980, 18.34 UZ, $M = 6.7$); (3) Vanimò (16.07.1980, 05.26 UZ, $M = 7.3$); (4) Norfolk (14.07.1980, 16.15UZ, $M = 6.6$). Oklar deprem anını göstermektedir. (b) 15-16 Eylül ve 18-20 Eylül 1989 iki manyetik fırtına süresince bazı Avrupa iyonküre istasyonlarında F2 bölgesi kritik frekansının sakin günlerdekine göre üç istasyonda f_oF_2 'nin günlük sakin zamana göre değişimini110

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. İyonküre bölgelerinin yaklaşık olarak yükseklik ve buna bağlı elektron yoğunlukları.....	8
Tablo 2.3. K indisinin Boulder manyetometresine göre ölçeklendirilmesi ve fırtına m seviyesi.....	21
Tablo 2.2. Kp-ap dönüşüm tablosu	23
Tablo 2.3. Kp ile Ap dönüşüm tablosu.....	23
Tablo 2.4. Güneş akısı ve bazı jeomanyetik indisler (Ap, Kp) arasındaki ilişki	25
Tablo 3.1. İyosonda istasyon bilgileri	39
Tablo 4.1. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için konum, tarih, deprem ve istasyon bilgileri	47
Tablo 4.2. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için konum, tarih, deprem ve istasyon bilgileri	49
Tablo 4.3. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için konum, tarih, deprem ve istasyon bilgileri	51

SEMBOLLER LİSTESİ

$\hat{A}$	: Armstrong
A_p, a_p, K, K_p	: Jeomanyetik indisler
a_s	: Alt sınır
$A(t)$	: Belirli bir saate ait kritik frekans değeri
$\langle A(t) \rangle$	: Belirli bir saate ait ortalama kritik frekans değeri
B	: Manyetik alan
$^{\circ}C$	: Derece santigrat
c	: Korelasyon katsayısı
$dA(t)$	: Belirli bir saate ait kritik frekansın değişimi
D, E, F, F_1, F_2	: İyonküre bölgeleri
D	: Depremin derinliği
E	: Elektrik alan
$\bar{e}$	: Elektron
E_s	: Sporadik E tabakası
f, f_0	: Kritik frekans
$F_{10.7} \text{ cm}$	: Güneş akısı indisi
$f_0 D$	: D bölgesi kritik frekansı
$f_0 E$	: E bölgesi kritik frekansı
$f_0 E_s$	: E_s bölgesi kritik frekansı
$f_0 F_1$	: F_1 bölgesi kritik frekansı
$f_0 F_2$	: F_2 bölgesi kritik frekansı
$f_0 F_{2q}$	: Sakin gün f_2 bölgesi kritik frekansı
F_{sp}	: F spread oluşumu
g	: Görünen disk üzerindeki leke grubu sayısı
h	: Plank sabiti
H	: Yer'in manyetik alanının yatay bileşeni
$h_m F_2$	: F_2 bölgesi kritik frekansının ölçüldüğü maksimum yükseklik
Hz	: Hertz
k	: Gözlemesine bağlı bir katsayı (kişisel indirgeme faktörü)
k	: Ölçüm sayısı
kHz	: Kilo Hertz
km	: Kilometre
M	: Depremin büyüklüğü
m	: Medyan
m_e	: Elektron kütlesi
n	: Kırma indisi
N_e	: Elektron yoğunluğu
$N_m F_2$	: F_2 bölgesi maksimum elektron yoğunluğu
nT	: Nano Tesla
R	: Güneş lekesi sayısı
R	: Günlük rölatif sayı
s	: Gruplardaki toplam leke sayısını
V	: Volt
ϵ_0	: Boş uzayın dielektrik geçirgenlik katsayısı
ρ	: Deprem hazırlık alanı yarıçapı
σ	: Standart sapma

ω	: Dalga açısal frekansı
ω_p	: Plazma titreşim frekansı
ν	: Frekans
$\bar{f}_1$ ve $\bar{f}_2$	: Kritik frekansın medyan değeri
$\bar{x}$	: Ortalama

KISALTMALAR LİSTESİ

AGW	: Akustik Gravity Dalgaları (Acoustic Gravity Waves)
Aki	: Akita
as	: Alt sınır
CME	: Koronal Kütle Atılımı (Coronal Mass Ejection)
ÇK	: Çapraz Korelasyon
DA	: Dalgalanma Analizi
ELF	: Ekstra Düşük Frekans (Extra Low Frequency)
EM	: Elektromanyetik dalga
EUV	: Ekstra Ultraviyole
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi (Global Position System)
HF	: Yüksek Frekans (High Frequency)
IMF	: Gezegenler Arası Manyetik Alan (interplanetary Magnetic Field)
IQR	: Çeyrekler Arası Oran (Inter Quartile Range)
KA	: Korelasyon Analizi
Kha	: Khabarovsk
Kok	: Kokubunji
LF	: Düşük Frekans (Low Frequency)
MHz	: Mega Hertz
MÖ	: Milattan Önce
OK	: Oto Korelasyon
Oki	: Okinawa
SC	: Ani Başlangıç (Sudden Commencement)
sfu	: Güneş Akısı Birimi (Solar flux unit)
Sq	: Sakin Güneş (Solar Quiet)
SS	: Standart Sapma
TEC	: Toplam Elektron İçeriği (TEC-Total Electron Content)
UGLS	: Uluslararası Güneş Lekesi Sayısı (ISSN-International Sun Spot Number)
ULF	: Ultra Düşük Frekans (Ultra Low Frequency)
UV	: Ultraviyole
UZ	: Uluslararası Zaman
üs	: Üst sınır
VHF	: Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency)
VLf	: Çok Düşük Frekans (Very Low Frequency)
VTEC	: Dikey Toplam Elektron İçeriği (Vertical Total Electron Content)
Wak	: Wakkanai
Yam	: Yamagawa
YZ	: Yerel Zaman

1. GİRİŞ

Binlerce yıl önce; Güneş, Ay ve gezegenlerin Dünya'nın çevresinde dolandığına inanılırdı. Bu gün biliyoruz ki; Dünya, içinde milyarlarca galaksinin bulunduğu evrende, Samanyolu Galaksisinde bulunan milyarlarca yıldızdan biri olan Güneş'in etrafında, eliptik bir yörüngede dönen ve üzerinde yaşam barındırdığı bilinen tek gezegendir. Dünya'nın Güneş sistemindeki yeri, üzerinde yaşam barındırmasının tek sebebidir. Bu aynı zamanda Güneş'i, Yer ve üzerinde ki yaşam için oldukça önemli kılar.

Yerküre; yerkabuğu (litosfer) ile bu kabuğu saran gaz örtüsü (atmosfer), okyanus ve denizlerden (hidroküre) oluşur. Yerkabuğu; 5-200 km arasında değişen kalınlıkta, merkezde bulunan çekirdeği saran manto tabakasının üzerinde bulunan, depremlerin meydana geldiği tabakadır. Farklı büyüklükte, yedisi büyük çok sayıda yarı-sert plakalardan (levha) oluşur. Bu plakalar, mantonun oldukça yumuşak üst katmanında oturduğu için, sağa sola hareket edebilir. Bu plakaların yavaş hareketi, *plaka tektonikleri* olarak adlandırılır. Bu hareket (plakaların çarpışması veya üst üste binmesi), dağların ve de yanardağların (volkanik faaliyetler) oluşumunun yanı sıra okyanus tabanında çökme ve depremlerin oluşmasına neden olur. Bu oluşumlar, özellikle plakaların kenarlarında meydana gelir. Plakalar sürekli hareket halinde olduğundan, bu plakalar üzerinde bulunan kıtalar da hareket halindedir. Dünya'nın oluşumundan itibaren kıtalar sürekli yer değiştirmiş, bazen bu plaka hareketlerinden dolayı çökmüş, bazen de yeni oluşumlar ortaya çıkarmıştır. Bu hareketlilik halen devam etmektedir [1].

Hidroküre; Yerküre üzerinde bulunan denizler, okyanuslar ve buz tabakalarından oluşur. Deniz seviyesine göre, +3810 m ve -11033 m arasında değişir. Yerküre'nin %71' ini oluşturur ve canlılar için hayati öneme sahiptir [2].

Yerküre'yi çevreleyen atmosfer; sadece iklim olaylarının meydana geldiği yer değildir. Yaşam için gerekli gaz bileşimine sahip olmanın yanı sıra gecelerin uzayın soğuşunu, gündüzleri Güneş'in kavurucu sıcaklığını önleyerek, Yerküre'nin aşırı ısınmasını ve soğumasını engeller. Güneş'ten gelen yüksek enerjili parçacıklar atmosferin üst tabakaları tarafından engellenirken, ultraviyole (mor ötesi), X ışınları ve alt tabakalarda soğurulur ve ortamda bulunan gazları iyonlaştırır. Dış uzaydan gelen meteor yağmurları ve kayaç parçaları atmosferde parçalanır. Atmosfer; yerçekimi, sıcaklık ve basıncın etkisiyle şekillenir. Atmosferin alt sınırı kara ve deniz yüzeyiyle çakışırken, üst sınırı yer çekimine

bağlı olarak değişir. Güneş'ten gelen enerjinin %50'sinden fazlası yüzey tarafından soğurulurken (atmosfer tarafından %16), kalanı geri yansıtılır [3, 4].

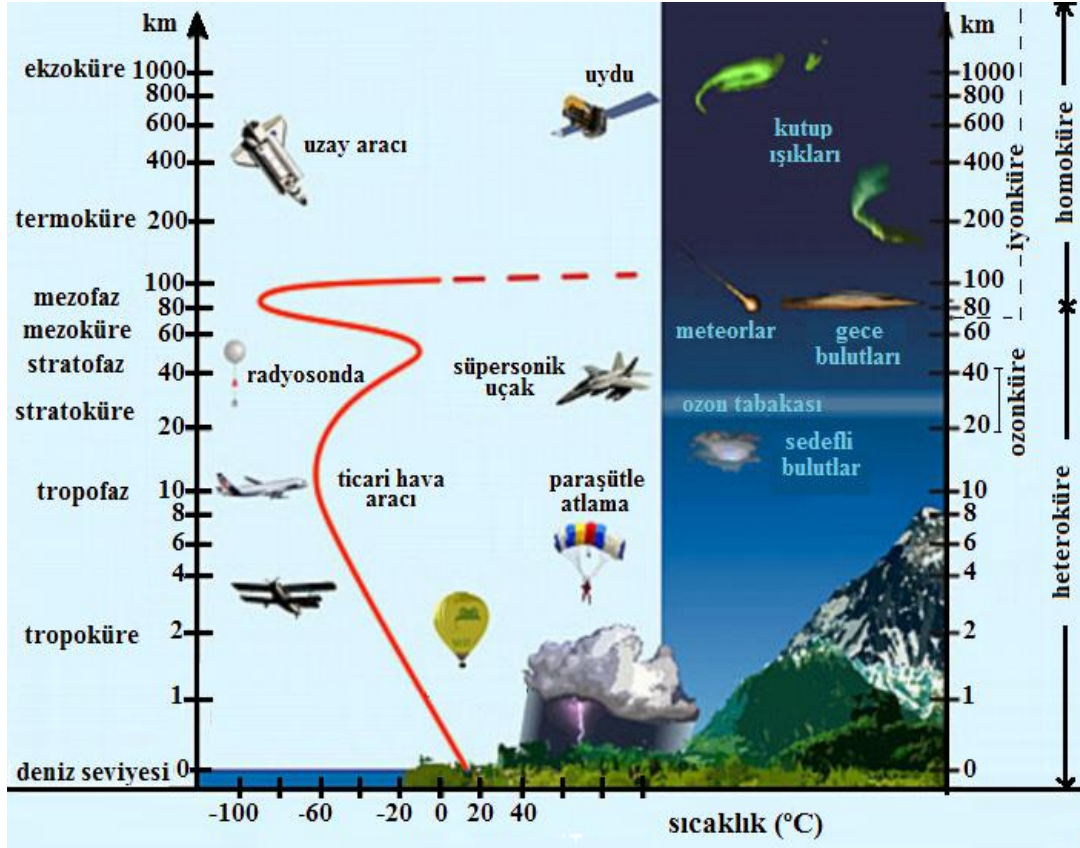
Atmosfer, fiziksel olaylar ve kimyasal bileşenlerine göre çeşitli bölgelere ayrılır. Bu atmosferik bölgeler Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Kimyasal bileşenler göz önünde bulundurularak üç bölgeye ayrılır. Bunlar; homoküre, heteroküre ve ekzoküredir. Atmosferi oluşturan gazların yerden ~80 km'ye kadar temel özellikleri değişmez, yoğunluk hemen hemen aynıdır. Bu bölge homoküre olarak adlandırılır. Bu bölgenin üzerinde yaklaşık 1000 km'ye kadar uzanan bölgede atmosferik gazlar molekül ağırlıklarına göre ayrışır. Bu seviyeden sonra yoğunluk yükseklikle azalır ve seyrek gaz kütleleri şekline dönüşür. Burada helyum, hidrojen gibi hafif gazlar bol miktarda bulunur. Bu tabakaya heteroküre denir. Ekzoküre ~1000 km'den sonra başlayan katmandır. Burada atmosfer yoğunluğu o kadar düşüktür ki; moleküller arası çarpışma çok azdır. Bu bölgede hidrojen ve helyum gibi hafif atomlar yerçekiminden tümüyle uzaklaşmaya yetecek hızlara ulaşabilirler. İyonlaşmış parçacıklar manyetik alan tarafından, nötr parçacıklar ise yerçekimi tarafından kısa mesafelere hareket ettirilebilir. Uydular genellikle bu bölgede bulunur [5].

Atmosfer ortalama sıcaklık değişimi göz önünde bulundurulduğunda, genel olarak yoğunluk ve bileşenlerine göre şu bölgelere ayrılır: Tropoküre, stratoküre, mezoküre, termoküre.

Tropoküre: Atmosferin en alt tabakası olup, su buharının büyük bir bölümü burada olduğundan; meteorolojik olaylar ve bulutlar bu tabakada bulunur. Bu tabaka tüm atmosfer kütesinin ~%75'ini kapsar. Yer'den yaklaşık 10 km yüksekliktedir. Su buharı, sıcaklık ve basınç değişkenleri nedeniyle, bu ortam homojen değildir. 800 nm dalga boyundan daha büyük ışınlar, temelde H₂O ve CO₂ tarafından soğurulur. Bu tabakada en çok bulunan gazlar O₂ ve N₂ molekülleridir [5, 6].

Stratoküre: Tropokürenin hemen üzerinde başlar ve yüksekliği 30-35 km'ye kadar değişir. Bu bölgede gazlar yaklaşık 35 km'ye kadar yoğunluklarını korurlar. Bu bölgede dikey hareket yoktur, sadece yatay hareket vardır. Sıcaklık yükseklikle artar ve hatta ekvator bölgesinde +50 °C'ye kadar ulaşabilir. Ancak kutuplarda sıcaklık -50 °C civarındadır. Bu iki bölge arasındaki sıcaklık farkı, ekvator'dan kutuplara esen rüzgârlara neden olur. Havanın seyrek ve direncin az olması nedeniyle, bu bölge jet uçuşları için idealdir. Buna karşılık üst katmanlarda motorların itme kuvveti oluşturmaya yetecek ölçüde hava yoktur. Bu tabaka içinde Dünya üzerindeki canlı yaşamı için büyük önem

taşıyan Ozon tabakası bulunmaktadır. Ozon gazı üç oksijen atomundan oluşan, zehirli bir gazdır. Dünya yüzeyi üzerinde herhangi bir yerdeki ozon miktarı; doğal olarak enlemle, mevsimlerle günlük değişim gösterir [3].



Şekil 1.1. Atmosferik Bölgeler [5].

Mezoküre: Stratoküreden sonra gelen ve 85 km'ye kadar uzanan bölgeye denir. Atmosferin en soğuk bölgesidir. Sıcaklık -80°C ile -120°C 'ye kadar düşer. 175-200 nm dalga boyu arasındaki ışınlar oksijen tarafından soğurularak bu bölgeyi oluşturmuştur.

Termoküre: Mezokürenin hemen üzerinde bulunan bu bölgede, temel iyonlaşma kaynağı 175 nm dalga boyundan küçük radyasyonlardır. Bu bölgede termal iletim çok önemlidir. Sıcaklık 1700°C 'ye kadar yükselir [3].

Manyetoküre: Dünya'nın güçlü manyetik alanın etkisiyle Güneş rüzgârı adı verilen, Güneş'ten gelen parçacıkların oluşturduğu plazma akımının engellendiği bölgeye denir. Gezegene yaklaştıkça manyetik alanın etkisi giderek artar ve Güneş'ten gelen parçacıkların tuzaklanarak manyetik kuvvet çizgileri çevresinde dolaşmak zorunda olduğu bölge, manyetokürenin alt sınırını belirler [7, 8].

İyonküre; termoküre içerisinde bulunan, atmosferin radyo dalgalarının yayılımına etki etmek için yeterli miktarda serbest elektron ve pozitif iyonlardan oluşan, atmosferin iyonlaşmış kısmıdır. Elektriksel olarak nötrdür. İyonküre bu özelliğinden dolayı, doğal plazma olarak kabul edilir. Elektromanyetik özelliklerinden dolayı, Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşir. İyonkürenin oluşumunda en büyük etki, Güneş tarafından oluşturulmakla birlikte, her bölgenin kimyasal yapısı ve bileşenleri farklı olduğundan, Güneş'ten gelen farklı dalga boyuna sahip ışınlar, farklı yapıda bölgelerin oluşmasını sağlar. Yer'den yaklaşık 50 km yükseklikte başlar ve üst sınır kesin olmamakla birlikte, He^+ ve H^+ gibi hafif iyonların O^+ iyonuna baskın olmaya başladığı yüksekliklerde bittiği kabul edilir. Elektron yoğunluğuna göre; D, E, F (F1, F2) olmak üzere üç bölgeye ayrılır [3, 9, 10].

İyonküre; Güneş karışıklıkları, meteor yağmurları, jeomanyetik fırtınalar, şiddetli hava şartları, volkanik patlamalar ve depremler gibi çeşitli olaylarla etkilenebilir. İyonküredeki elektron ve iyon yoğunluğu doğrudan Güneş'ten gelen ışınlara bağlı olduğundan, Yer'in Güneş'e göre hareketi veya Güneş aktivitesindeki değişimler elektron yoğunluğunu etkiler. Kozmik ışınlar ile Güneş'ten gelen UV ve X ışınlarının yoğunluklarındaki herhangi bir değişim; Yer'den yüksekliğe, enleme, mevsime ve yerel zamana göre iyonkürenin elektron yoğunluğunu, sıcaklığını ve yüksekliğini değiştirir. Bu etkiler bir kaç dakikadan birkaç güne kadar sürebilmektedir. Bu değişimler genel olarak iki grupta toplanır. İlki, genellikle düzenli olup belli zaman periyodunda oluşan ve önceden tahmin edilebilenler. Bunlar Güneş'in doğuşuna ve batışına (gündüz ve akşam) bağlı olarak gözlenen günlük değişimlerin yanı sıra; Güneş'in 11 yıllık döngüsüne bağlı olarak gözlenen periyodik değişimlerdir. Diğeri ise, önceden tahmin edilemeyenler olup, Güneş patlamaları, Güneş tutulmaları, jeomanyetik fırtınalar, meteor yağmurları, nükleer patlamalar, gama ışını patlamaları, volkanik faaliyetler, yıldırım... gibi olaylar, iyonkürede büyük değişimlere neden olabilirler.

Atmosferik elektrik alan iyonküredeki günlük değişkenliği sağlayan kaynaklardan biridir. Sakin Güneş ve jeomanyetik şartlar süresince iyonkürede değişikliğe neden olan anormal elektrik alanının olası kaynakları arasında şiddetli fırtınalar, orografik etki, radyoaktif kirlilik, büyük kum fırtınaları ve sismik aktiviteler bulunmaktadır. İyonkürede elektron yoğunluğunun değişmesi, iletkenlikleri, radyo yayılım şartlarını değiştirir. İyonküre parametrelerindeki bu değişim, radyo dalgalarının yayılımına doğrudan etki eder ve haberleşmelerde günlerce sürebilen büyük sorunlara neden olabilir. Yapılan son çalışmalar depremlerin de iyonküre üzerinde değişimlere neden olduğunu göstermektedir.

Pulinets vd, J. Y. Liu, Hayakawa vd ve daha birçok araştırmacı iyonkürde elektron yoğunluğu, TEC, iyon sıcaklığı ve parçacık yoğunluğu, elektrik alan, elektron sıcaklığı, kritik frekans, VLF/LF yayılımı üzerinde yaptıkları çalışmalarda depremlerden önce önemli değişimler meydana geldiğini ortaya koymuşlardır [11].

Depremin tetiklediği etkiler doğada çeşitlidir ve Yer kabuğundan atmosfer içerisinde binlerce km yukarılara doğru bu etkiler gözlenir. Bu, depremlerin doğrudan ya da dolaylı etkileşimlerle atmosferde özellikle iyonkürde karışıklığa neden olduğu anlamına gelir ve literatürde *yerkabuğu-atmosfer-iyonküre etkileşimi* olarak ifade edilir. Sismik-iyonküre etkileşim bilimsel çevreler için oldukça önemlidir. Dünya yüzeyinin büyük dikey yer değiştirmesine neden olan yüzeye yakın depremler, nötr atmosferde karışıklıkları uyarırlar. Dünya yüzeyinin 10 cm dikey yer değiştirmesi, iyonkürde muhtemelen 10 km dikey hareketi uyarır. Bu büyük genlikli dikey hareketler, sık sık iyonkürde elektromanyetik dalgaların yayılımına etki eder. İyonkürde depremin tetiklediği karışıklıklar F2 bölgesinde kritik frekanstaki değişimle kendini gösterirken, alt bölgelerde (D ve E bölgelerinde) kritik frekansın yanı sıra VLF/LF (3-30 kHz/30-300 kHz) yayılımındaki anormalliklerle kendini gösterir. Atmosferik elektrik alanla yapılan ölçümler, depremlerden önce elektrik alanda oldukça büyük değişimlerin olabildiğini göstermektedir. Bu nedenle elektromanyetik yayılımlar, yerkabuğu-iyonküre ilişki süreçlerini ve depremlerle ilişkili olayları açıklamada geniş çapta kullanılmaktadır [12-15].

Yerkabuğu-atmosfer-iyonküre ilişkisi oldukça karmaşık bir süreçtir. Deprem öncesi ve sonrası değişimler incelenirken, iyonküre üzerinde önemli etkiye sahip Güneş ve jeomanyetik aktiviteler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle; Dünya üzerinde birçok yerde konumlandırılmış olan gözlemcilerinden alınan, jeomanyetik fırtınalar ve Güneş aktivitelerinin seviyesini gösteren bazı indisler bakılarak, bu değişkenliğin kaynağı ayırt edilebilir. Meydana gelen değişimi daha iyi anlamak ve yorumlayabilmek için birçok istatistiksel yöntem geliştirilmiştir. Kullanılan yöntemlerin sonuçları değerlendirilirken; değişim kaynağının iyi bir şekilde ayırt edilmesinin yanında sonuçların güvenilirliği de büyük önem taşımaktadır [9].

Bu çalışmada, Japonya’da 1970 yılından itibaren meydana gelmiş 24 tane $M \geq 5.0$ (M depremin büyüklüğü) büyüklüğünde, yüzeye yakın ($D < 40$ km) depremler için, bu bölgede bulunan altı istasyondan F2 bölgesine ait, deprem öncesi ve sonrası kritik frekans değerleri alınmıştır. Her bir deprem için data alınabilen her bir istasyona ait verilere ilk olarak, depremden önceki bir aylık süre için Korelasyon analizi; Oto

Korelasyon ve apraz Korelasyon olmak üzere iki şekilde uygulanmıştır. İkinci olarak depremden önceki 15 günün hareketli ortalaması alınarak, bu 15 günün standart sapması ve çeyrekler arası oranı hesaplanıp, alt ve st sınırlar ayrı ayrı belirlenmiş ve kritik frekansın değişimi bu alt ve st sınıra bakılarak değerlendirilmiştir. Son olarak Dalgalanma (Fluctuation) yöntemi uygulanmıştır. Depremden nceki 15 gün alınıp sınırlar belirlenerek değişim incelenmiştir. Bu parametrelerde gözlenen değişimler; Uluslararası Güneş Lekesi Sayısı (ISSN-UGLS), Güneş Akısı (F10.7 cm), Kp, Ap ve Dst indislerinin değişimlerle karşılaştırılmış ve birlikte değerlendirilmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1 İyonküre ve Kritik Frekans

Üst atmosferde elektriksel bir olgunun varlığı, ilk olarak Gauss tarafından ortaya konulmuştur. Sonraları Balfour Stewart tarafından, Yerküre'nin manyetik alanının değişimlerine neden olan akımların bölgesi olarak, iletken bir tabaka önerilmiş ve bu iletken tabaka *iyonküre* olarak adlandırılmıştır. 1901'de Marconi Atlantik'i geçen radyo sinyallerini gönderdiğinde (Cornwall'dan Newfoundland'e), bu tabakanın varlığı keşfedilmiş ve 1902'de Lodge, Güneş ışınlarının iyonlaştırmasıyla üretildiğini, serbest elektron ve iyonları içerdiğini doğru bir şekilde tahmin etmiş ve 1903'te Taylor bu tabakanın Güneş ultraviyole radyasyonu tarafından üretilen iyonlaşmadan ileri geldiği düşüncesini geliştirmiştir. Araştırmalar; 1924-1926 yılları süresince Appleton ve Barnett ve Bre ve Tuve'nin yansıtıcı tabakanın yüksekliğini ölçmesiyle başlamış oldu. 1926'da Watson-Watt tarafından *iyonküre* ifadesi kullanılmıştır [9, 16-18].

İyonküre ile ilgili soruların cevapları 1950'lerde başlayan uydu çalışmalarından sonra alınabilmiştir. Yerküre'nin üst atmosferini incelemek için ilk gönderilen 1957'de Sputnik uydusu ve bundan bir yıl sonrada uzaya fırlatılan Explorer I ve 1960'larda gönderilen ARIEL uyduları ile atmosferin keşfi başlamıştır. İlk deneyler, yansımaya belirgin bir şekilde etkiyen değişimlere bağlı olarak, farklı tabakaların varlığını ortaya koymuştur. Atmosferin değişik tabakalarının zaman, mevsim, coğrafi konum ve Güneş aktivitesinden nasıl etkilendiği açıklanmaya çalışılmıştır. İyonküre içerisinde farklı özellikte tabakaların bulunması, her bir tabakanın adlandırılmasına sebep olmuştur. D, E, F sembollerinin kesin olarak kullanılması 1959 yılında başlamıştır. Daha sonra F tabakasının da kendi içinde farklı olduğu görülmüş ve bu tabaka F1 ve F2 olarak ikiye ayrılmıştır [9, 19].

Güneş'ten gelen ışınlamalar atmosfer tarafından emilerek sıcaklığın değişmesine, nötr atom ve moleküllerin iyonlaşmasına ve elektronların serbest kalmasına neden olur. Böylece atmosfer içinde serbest elektron, pozitif iyon ve nötr atom ve moleküllerden oluşan bir bölge meydana gelir ve bu bölge, iyonküre plazması olarak adlandırılır. Genel olarak eşit miktarda serbest elektron ve pozitif iyonlardan oluşur. Bu nedenle doğal bir plazmadır ve elektriksel olarak nötr kabul edilir. İyonküre Yer'den yaklaşık 50 km yükseklikte başlar ve üst sınır kesin olmamakla birlikte, He^+ ve H^+ gibi hafif iyonların O^+ iyonuna baskın olmaya başladığı yüksekliklerde bittiği kabul edilir. İyonküre; konuma,

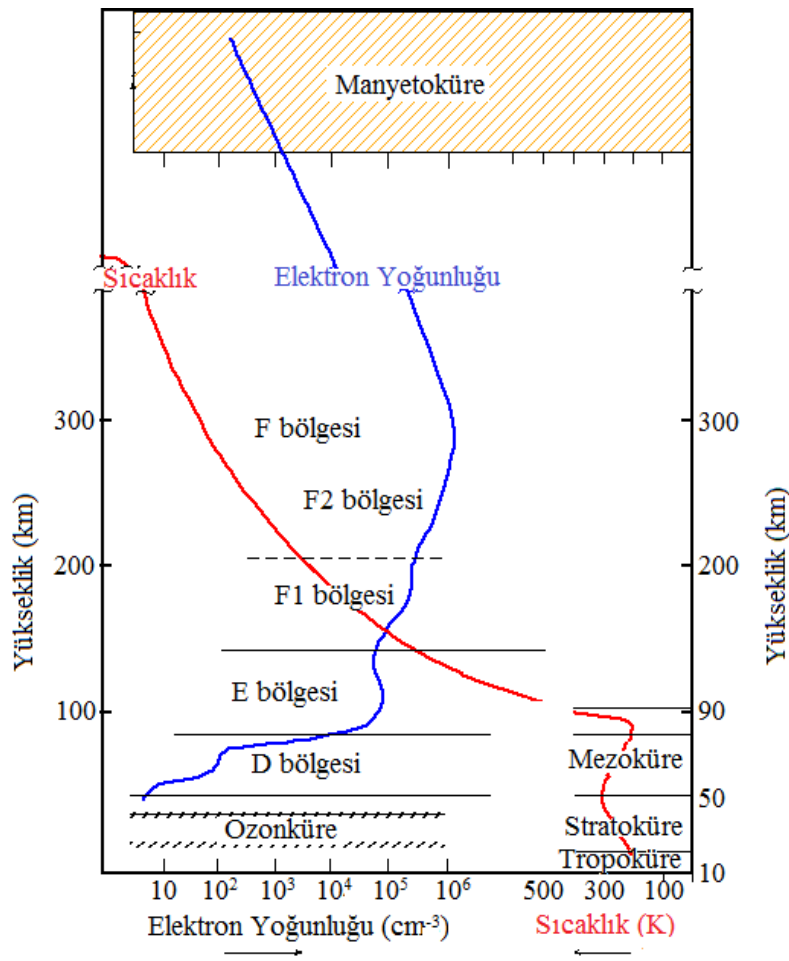
yerel zamana, Güneş ve jeomanyetik değişimlere bağlı olarak, günlük ve mevsimsel değişim gösterir. Atmosferin parçacık yoğunluğu yükseklikle değiştiğinden, atmosfer içindeki iyonlaşma da yüksekliğe bağlı olarak değişir. Atom ve moleküller içerik ve yoğunluk bakımından her yükseklikte farklı olduklarından dolayı, Güneş'ten gelen ışınlar her yükseklikte farklı oranlarda soğurular ve farklı fiziksel ve kimyasal yapıda bölgelerin oluşmasına sebep olur. Genel olarak elektron yoğunluğuna göre D, E, F (F1, F2) olmak üzere üç bölgeye ayrılır. İyonkürede iyonlaşma genellikle atmosfer molekülleri ve atomları tarafından etkin bir şekilde soğurulan 102,7 nm'den daha kısa dalga boylu Güneş ultraviyole ışınları tarafından sağlanır. Güneş X ışınları, Güneş kozmik ışınlar, yüksek enlemlerde enerjili parçacıkların nüfuz etmesi gibi diğer iyonlaşma kaynakları da Güneş aktivitesi ile ilişkili olarak etkilidirler. Atmosfer sıcaklığının yükseklikle değişimi, atmosferin bölgeleri ve iyonküredeki elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Daha ayrıntılı bir şekilde, bu bölgelerin yaklaşık olarak Yer'den yüksekliği ve elektron yoğunluğu Tablo 2.1'de verilmektedir [1, 17, 20, 21].

Tablo 2.1. İyonküre bölgelerinin yaklaşık olarak yükseklik ve buna bağlı elektron yoğunlukları [1].

Bölge	Yaklaşık Yükseklik (km)	Yaklaşık Gündüz Elektron Yoğunluğu (m^{-3})
D	50-90	10^8-10^{10}
E	90-160	10^{11}
Es	110-120	Değişken
F	140-350	$10^{11}-10^{12}$
F1	140-200	2×10^{11}
F2	200-350	10^{12}

D bölgesi iyonkürenin elektron yoğunluğu bakımından en fakir bölgesidir. Yaklaşık 50 km yükseklikte başlar ve 90 km civarında son bulur. Bu bölgedeki iyonlaşmanın en büyük kısmını 1-10Å arasındaki X-ışınları ile 1030Å'dan büyük dalga boylu UV ışınları sağlamaktadır. Bu ışınlardan başka, dalga boyları 1216Å civarında olan Lyman- α ışınları alt iyonkürede iyonlaşmaya neden olurlar. Ayrıca yüksek enerjiye sahip kozmik ışınları ($>10^{19}$ eV) alt iyonküreye kadar inerek, özellikle gece iyonküresinin oluşumunda önemli katkıda bulunurlar. Güneş patlamaları ve meteorolojik olaylardan en çok etkilenen bölgedir. Maksimum iyonlaşma öğlen saatlerinde olduğundan, elektron yoğunluğu öğlen

saatlerinde maksimuma ulaşır ve sonra elektron üretimi Güneş'in doğusuna kadar azalır. Bu bölgedeki temel iyonlar O_2^+ , N_2^+ ve NO^+ olup O_2^+ ve NO^+ iyonlarının yoğunluklarının artması elektron kaybına sebep olduklarından oldukça önemlidirler. X ışınları ile O_2 ve N_2 'nin ve alfa ışınları ile NO 'nun foto iyonlaşmasıyla ($NO+h\nu \rightarrow NO^++e^-$) iyon ve elektron yoğunlukları aniden değişir. NO^+ ortamdaki elektronlarla birleşerek elektron kaybına neden olur. Sonuç olarak NO^+ iyonlarının üretilmesi bu bölgede önemli bir kayıp sebebidir. Bu nedenle en büyük değişim 100 km'nin altındaki bölgelerde meydana gelir. Çünkü alt iyonkürede kimyasal süreçler baskındır [1, 19].



Şekil 2.1. İyonküre bölgeleri ve elektron yoğunluğu ve sıcaklığın yükseklikle değişimi [22].

D bölgesi, özellikle LF/VLF yayılımında önemli bir rol oynar. Atmosferdeki VLF deneyleri elektromanyetik dalgaların iyonkürenin D bölgesinden yansımaya dayanır. D bölgesi çok düşük frekanstaki radyo dalgaları için iyi bir yansıtıcıdır. D bölgesinde VLF

dalgalarının yansması elektron yoğunluğuna bağlıdır ve F bölgesinin altında yapılan radyo dalga yayılımı için elektron yoğunluğunun yanı sıra elektron-nötr çarpışma frekansları da önemlidir. İyonkürede elektron yoğunluğunu en fazla etkileyen süreç iyonlaşmadır. İyonlaşma zamanın, yüksekliğin, Güneş aktivite seviyesinin ve diğer faktörlerin bir fonksiyonu olarak değişir. Gece süresince D bölgesindeki düşük elektron yoğunluğundan dolayı bu tabakanın radar ve iyosondalarla incelenmesi mümkün değildir. Çok düşük frekanslı dalgalar ise D bölgesindeki geçici iyonküre karışıkları uzaktan algılamak için kullanılan çok güçlü bir yöntemdir [18, 23].

E bölgesi, D bölgesinin hemen üzerinde başlar ve ~150 km civarında son bulur. Temel iyonlaşma kaynakları; 10–100 Å X- ışını ve 800–1027 Å UV ışınlarıdır. Bu bölgede en fazla NO^+ iyonu bulunmaktadır. Daha sonra sıra ile O_2^+ , O^+ ve N_2^+ iyonları bulunur. E bölgesinde NO^+ ve O_2^+ iyonları O^+ ve N_2^+ iyonlarına göre çok fazla miktarda bulunduklarından foto-kimyasal süreçlerle büyük ölçüde elektron kaybı olmaktadır [16, 17].

Gündüz süresince E bölgesinin davranışı oldukça düzenlidir ve Güneş'in zenit açısıyla kontrol edilir. Alacakaranlık ve gece süresince E bölgesinin davranışı daha karışıktır. Artan iyonlaşma nedeniyle, E bölgesi içerisinde (100-120 km civarında) çok ince (yüzlerce km genişliğinde ve sadece 1 km dikey kalınlığında), yamalı tabakalar şekillenebilir. Tabakalar hem dikey hem de yatay yönde oldukça düzensizdir. Dikey yönelimde yapı çok tabakalı bir oluşum sergilerken, yatay yönelimde yapı, yamalı bazen periyodiksel bir özellik gösterir. *Sporadik E* (Es, ara sıra görünen E) adı verilen bu tabakalar birçok nedene bağlı olarak oluşabilmektedir. Oluşumunda Güneş aktiviteleri etkili olmakla birlikte, oluşumu uzun ömürlü metalik iyonların (Mg^+ , Na^+ , Al^+ , Si^+ , K^+ , Fe^+ , Ni^+ ,...) dikey akışının yakınsamasından kaynaklanır. Es oluşumu için iyon taşıma süreçleri çok önemlidir; rüzgârlar, gelgitler, gravitasyonel dalgalar ve elektrik alanları ile bağlantılıdır. Sismik kaynaklı anormal dikey elektrik alanının Es oluşumunda etkili olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Normal E tabakası içerisinde oluşan bu ilave yoğunlaşmış tabakaların olması, kırma indisi ve kritik frekansı, normal E tabakasından çok farklı olabilmesi nedeniyle, özellikle daha üst yüksekliklerden (F bölgesi) yansıtılmak istenen dalganın yayılma şartlarını değiştirir (bazen $f_o\text{Es}$, $f_o\text{F2}'$ den bile büyük olur). Bazen elektron yoğunluğu o kadar yüksek olur ki, dalga alıcıya ulaşmaz [1, 10, 17, 18].

F bölgesi ~150 km'de başlar ve üst sınır manyetoküreye kadar ulaşabilmektedir. Kendi içinde F1 (160-200 km) ve F2 (200-400 km) olmak üzere iki bölgeye ayrılır. F1

tabakası iyonlaşmanın, F2 tabakası dinamik süreçler ve elektron yoğunluğu açısından en yoğun iyonküre tabakasıdır. Gece F2 bölgesinin varlığı, uzun mesafelerde yüksek frekanslı (veya kısa dalga) radyo haberleşmelerini kolaylaştırarak, radyo dalgalarının genellikle gök dalgası olarak yayılımının yapılmasını sağlar. 200–800 Å üstündeki UV ışınimleri temel iyonlaşma kaynağıdır. F1 bölgesinde NO^+ ve O_2^+ iyonları bulunurken ikinci dereceden O^+ ve N^+ iyonları bulunur. F2 bölgesinde başlıca iyon O^+ olmakla birlikte, H^+ , He^+ , N^+ iyonları da bulunmaktadır [10, 24].

İyonkürede en önemli parametre elektron yoğunluğudur. İyonküredeki elektron yoğunluğu bir süreçle oluşurken başka bir süreçle kaybolmaktadır. Ayrıca atmosferdeki dinamik süreçler yoluyla da bir bölgeden diğer bir bölgeye taşınabilmektedirler. Taşıma işlemleri bir bölge için kazançken, diğer bölge için kayıp olmaktadır. D ve E-bölgelerinde fotokimyasal süreçler baskınken, F2-bölgesinde fotokimyasal süreçlerin yanı sıra dinamik süreçler de etkilidir [10].

Kritik Frekans: Elektron yoğunluğu iyonküre ile ilgili araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır. İyonküreden yansıtılmak istenen bir elektromanyetik dalga için, dalganın yansıtılacağı yükseklikteki elektron yoğunluğu büyük önem taşır. Elektron yoğunluğunun değişmesiyle, iyonkürenin kırma indisi, plazma frekansı ve iletkenlikler değişir.

İyonkürenin plazma frekansı ω_p ,

$$\omega_p^2 = \frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0} \quad (2.1)$$

ve sıradan bir dalga için ortamın kırılma indisi n ;

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır [16, 25]. Burada; N_e -ortamdaki elektron yoğunluğu, $\bar{e}$ -elektron yükü ($1\bar{e} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb), m_e -elektronun kütlesi ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg), $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ olup, boş uzayın dielektrik geçirgenlik katsayısı ve ω dalganın frekansıdır. Formüllerden görüleceği üzere elektron yoğunluğunun artması, plazma frekansının ve benzer şekilde kırılma indisinin artmasına neden olur.

İyonküre Yerküre atmosferinin küçük bir kısmını oluşturmaya rağmen, telekomünikasyon sistemleri için oldukça büyük önem taşır. İyonkürenin en önemli özelliği, uygun şartlar altında radyo haberleşmeleri ve yayınları için kullanılan uzun, orta ve kısa dalgaları yansıtmasıdır. Böylece radyo frekanslarının binlerce km uzaktan alınmasına izin verir ve Yer-uzay haberleşmelerine için kullanılır. Elektromanyetik bir dalganın iyonküreden yansıtılabilmesi için, frekansının plazma frekansına eşit ($\omega = \omega_p$) olması gerekir. Dalganın frekansı yansıtılmak istenen yüksekliğin plazma frekansından küçükse, daha alt yüksekliklerden yansıtılır veya ortam içinde soğurur. Frekansı plazma frekansından daha yüksekse, ortamdaki yansımadan geçer ve hedeflenen yükseklikten daha üst yüksekliklerde yansır. Bu nedenle dalganın frekansının, Yer'e geri dönecek kadar büyük, ancak emilime engel olacak kadar küçük olması gerekir [3].

İyonküre ile ilgili yapılan araştırmalarda kullanılan önemli bir parametre *kritik frekanstır*. Genel olarak iyonküreden yansıtılabilecek maksimum frekanslı dalga olarak tanımlanır. Sıradan bir dalga için f_0 kritik frekans (Hz) yaklaşık olarak

$$f_0 \approx 9\sqrt{N_e} \quad (2.3)$$

ile ifade edilir [9, 18]. N_e -elektron yoğunluğuna (m^3) sahip bir iyonküre tabakasından kritik frekanstan daha yüksek frekanslı bir dalga yansıyamaz ve ilerleyip geçer. Her bölgenin kimyasal yapısı ve buna bağlı olarak elektron yoğunluğu ve o bölgelere ait kritik frekanslarda farklıdır. D, E, F1 ve F2 iyonküre tabakalarına ait kritik frekanslar; f_0D , f_0E , f_0F1 , f_0F2 şeklinde gösterilir [10, 18].

Bir dalganın frekansı ne kadar düşükse iyonlaşmış bir katman tarafından o kadar çabuk kırılır. Kritik frekanstan daha büyük bir frekanstaki EM dalgalar 90° 'den küçük bir çıkış açısı altında gönderilirlerse, öyle bir açığa erişilir ki, bu açıdan küçük bütün gönderme açılarında frekanstaki dalgalar yine Dünya'ya döner. Kritik frekanstan daha büyük bir frekanstaki EM (elektromanyetik) dalgaların Dünya'ya geri dönüş yapabildiği en büyük gönderme açısına, o frekansın *kritik açısı* denir. Kritik açı daima 90° 'den küçüktür. Yayınlanan bir EM dalganın frekansı, kritik frekanstan ne kadar büyük olursa kritik açı da o kadar küçük olur. Kritik frekansın kritik açısı 90° 'dir. Belirli bir mesafe ile telsiz haberleşmesi yapabilmek için EM dalgaların 90° 'den küçük bir açı ile gönderilmesi gerekir.

2.2 Güneş ve Jeomanyetik İndisler

2.2.1 Güneş İndisleri

Güneş Yerküre iklimini ve yüzeyinin yapısını, böylece Yer'e yakın uzay ortamını belirleyen ve etkileyen esas faktördür. Güneş'te meydana gelen çeşitli aktiviteler, Yerküre atmosferini, manyetik alanını ve Dünya çevresinde bulunan yapay uyduları etkilemektedir. Güneş ve karasal ilişkilerin çalışılması, hem Dünya hem de uzay kaynaklı modern telekomünikasyon sistemleri için de büyük öneme sahiptir.

Güneş aktivitesi, Güneş atmosferinin her katmanında saniye, dakika, gün ve ay mertebesinde süren, kısa dönemli değişimlerin yanı sıra yaklaşık 11 yıl gibi uzun dönemli, *Güneş Devri* adı verilen etkinlikler olarak tanımlanmaktadır. Güneş lekeleri yaklaşık 11 yıllık bir periyot içinde artar ve azalır. 11 yıllık Güneş çevrimine ek olarak, 1939 yılının haziran ayında Wolfgang Gleissberg Güneş aktivitesinin yaklaşık 80 yıllık periyodunun da varlığını açıklamıştır [21, 25].

2.2.1.1 R İndisi

Güneş lekeleri en yaygın Güneş aktiviteleridir. Güneş lekeleri ilk kez MÖ 325'de Yunanlı bilim adamı Theophrastus tarafından tanımlanırken, ilk defa 1182'de İngiltere'de kaydedilmiş, düzenli gözlemleri ilk olarak 1610 yılında Çinliler tarafından gözlenmeye başlamıştır. Günlük Güneş leke gözlemleri 1749'da Zürih Gözlemevi'nde, Johann Rudolph Wolf tarafından yapılmıştır. Wolf'un şimdiki adıyla *Uluslararası Güneş Leke Sayısı* (UGLS) (International Sun Spot Number-ISSN) veya *Zürih Sayısı* olarak bilinen Güneş leke sayısı bize, bağımsız lekelerin ve leke gruplarının sayılarının bir birleşimini sunar [16, 26].

Güneş lekesi sayısı, Güneş aktivitesinin bir göstergesi olup,

$$R=k(10g+s) \quad (2.4)$$

şeklinde ifadeyle verilir. Burada R günlük rölatif sayıyı, g gözlemesine bağlı (teleskopun açıklığına, gözlemciye) bir katsayıyı (kişisel indirgeme faktörü), g görünen disk üzerindeki leke grubu sayısını, s de bu gruplardaki toplam leke sayısını gösterir [16, 21].

Güneş lekeleri çok büyük manyetik alan şiddetine sahip kuvvetli manyetik alanlardır. Bu şiddetli alanın leke içinde plazmayı sınırladığı ve leke ile etraftaki plazma arasındaki etkileşimi azalttığı düşünülmektedir. Bu etkileşim eksikliği soğuyarak karanlık bir görünüm oluşur. Leke denilmesinin sebebi de sıcaklığının Güneş'e göre (5000–6000 K) daha az (3000–4000 K) olmasından kaynaklanır. Karanlık bölgeler için umbra (tam gölge), tam gölgeyi sınırlayan gri sınır bölgesi için de penumbra (yarı gölge) ifadesi kullanılır. [21, 27]

Güneş maksimumu bu lekelerin en çok olduğu, minimumu ise en az olduğu yılları ifade eder. Çevrimlerin maksimumlarından itibaren gözlenen çevrim süresi 7,3 yıl kadar olabildiği gibi, bazıları da 17,1 yıl gibi uzun olabilmektedir.

Güneş patlamaları bir Güneş lekesinin yanında aniden kromosfer içinde meydana gelir. Manyetik alan ne kadar karmaşıksa patlama üretme olasılığı da o kadar fazladır. Genelde Güneş patlamalarıyla açığa çıkan enerjinin salınımı 10^{25} joule'dur. Güneş aktivitesindeki değişimler sırasında Güneş birkaç kHz'lik radyo frekansından, en şiddetli gama ışınımına kadar uzanan elektromanyetik ışınım yayınlar. Bunlar milimetre dalga boylarından dekametre dalga boylarına kadar geniş bir aralığı kapsar [28].

2.2.1.2 F10.7 İndisi

Güneş; plazma salınımları, siklotron yayılımları ve ağır parçacıklarla elektronların rastgele çarpışmalarıyla üretilen bir radyo gürültüsü kaynağıdır. Sakin Güneş'ten gelen gürültü minimum temel seviyededir ve sakin Güneş'ten gelen termal yayılımlardır. Güneş aktivite seviyesini karakterize eden önemli parametrelerden biri, *Güneş Akısı* indisidir. Güneş aktivitesinin genel seviyesini veren ve en yaygın kullanılan göstergelerden biridir. Günlük tüm Güneş diski üzerinde mevcut tüm kaynaklardan 10.7 cm dalga boyundaki (2800 MHz) yayılımların (radyo gürültüsü akısı) toplamının bir ölçümüdür. Birimi sfu olup, $1sfu = 10^{-22} Js^{-1}m^{-2}Hz^{-1}$ (Joule/metre²) 'dir. Güneş'teki aktif bölgeler üzerindeki manyetik alanlar tarafından hapsedilen toplam plazma miktarıyla doğrudan ilişkilidir ve dolayısıyla Güneş lekesi sayısı ve toplam Güneş lekesi alanlarıyla da

ilişkilidir. Düzgünleştirilmiş Güneş lekesi sayısı (SSN) ile ortalama Güneş akısı indisi (SFI-Solar Flux Index) arasındaki ilişki

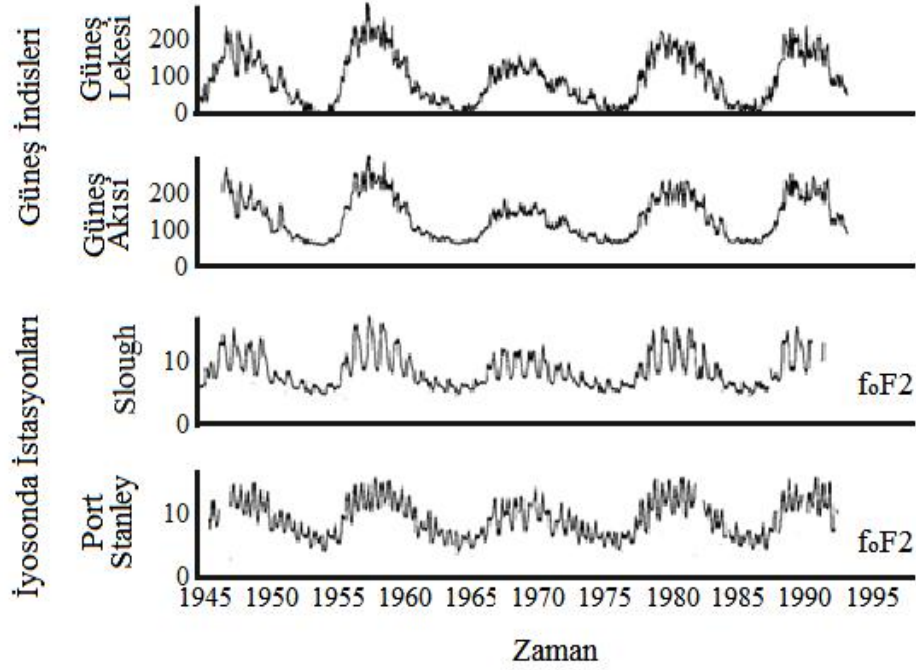
$$SFI=63.7+0.727 \text{ SSN}+8.95 \times 10^{-4} \text{ SSN}^2 \quad (2.5)$$

şeklindedir. Örnek olarak 85 SFI, 28 SSN'a eşdeğerdir [28, 29].

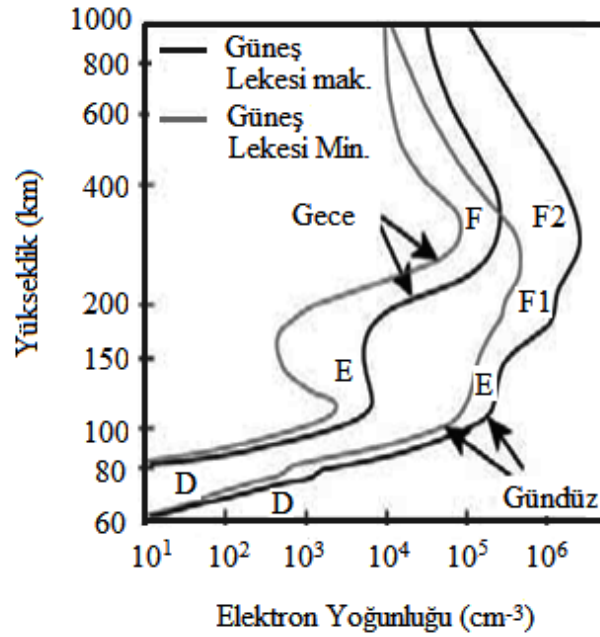
Tüm Güneş aktivite seviyeleri için mükemmel bir göstergedir. Değer aralığı teoriksel olarak 60-300 arasında değişir. Sakin günlerde 50'nin altındadır. Güneş lekesi aktivitelerinde 200'den fazla değer alır ($\text{SSN} \geq 250$). 1947'den itibaren günlük, aylık ve yıllık kaydedilmekte ve Güneş ve yeryüzü ile alakalı birçok çalışmada kullanılmaktadır. 2800 MHz'de günlük ve aylık ortalama Güneş akısı değerleri 1AU'ya (Dünya-Güneş mesafesi) ayarlanır ve *Solar-Geophysical Data*'da yayınlanır. *National Geophysical Data*'da farklı frekanslarda, 1 AU'da ayarlanan günlük Güneş akısı değerlerini bulmak mümkündür. Bu indisin küresel günlük değeri Kanada'da Pendiction Radyo Gözlemevi'nde (Ottawa yakınlarında 1.8 m çapında bir aynalı teleskop ile) yerel öğlen saatinde ölçülür. X-ışını, aşırı ultraviyole ve ultraviyole ışınlarıyla oldukça ilişkili olduğundan, uzun vadede birçok iyonküre ve üst atmosfer parametresiyle de ilişkilidir. Bir dalga boyunda tüm disk emisyonlarının tek bir radyo ölçümünü beklemek ve iyonlaşma etkisini temsil etmek için günün sadece bir zamanını gerçekçi olmamasına rağmen, üst atmosfer olayları için 10.7 cm akı oldukça iyi bağlantılıdır. Bu ilişki Şekil 2.2'de açık bir şekilde görülmektedir. R-Güneş lekesi Sayısı ve F10.7-Güneş akısı ile iyonkürenin F2 bölgesine ait kritik frekansın birbiriyle uyumlu olarak değiştiği görülmektedir [18, 26, 28, 29].

İyonküre kendi dinamikleri ve morfolojisiyle karakterize edilir ve küresel ölçüde bazı düzensizlikler gösterir. İyonkürede değişkenlik geçici olup, en büyük geçici ölçülü değişkenlik Güneş aktivitesiyle ilişkilidir. Güneş'in doğuşu ve batışına bağlı olarak; günlük ve Dünya'nın Güneş etrafındaki dönmesinden kaynaklanan değişimlerin yanı sıra Güneş diskinde gözlenen lekelerin yaklaşık 11 yıllık döngüsü, Güneş proton olayları, koronal kütle atılımları (CME) ve Güneş patlamaları, zaman zaman iyonküre ve Yerküre manyetoküresi üzerinde önemli değişikliklere neden olabilmektedir. Günlük, Güneş'in doğuşu ve batışına bağlı olarak iyonkürede elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi, Güneş lekelerinin maksimum ve minimum olduğu durumlarla birlikte Şekil 2.3'de verilmektedir. Gündüz elektron yoğunluğu tüm bölgeler için artarken, gece azaldığı

görülmektedir. Nitekim Güneş lekesi maksimumunda elektron yoğunluğu, minimum olduğu dönemden daha fazladır [18].

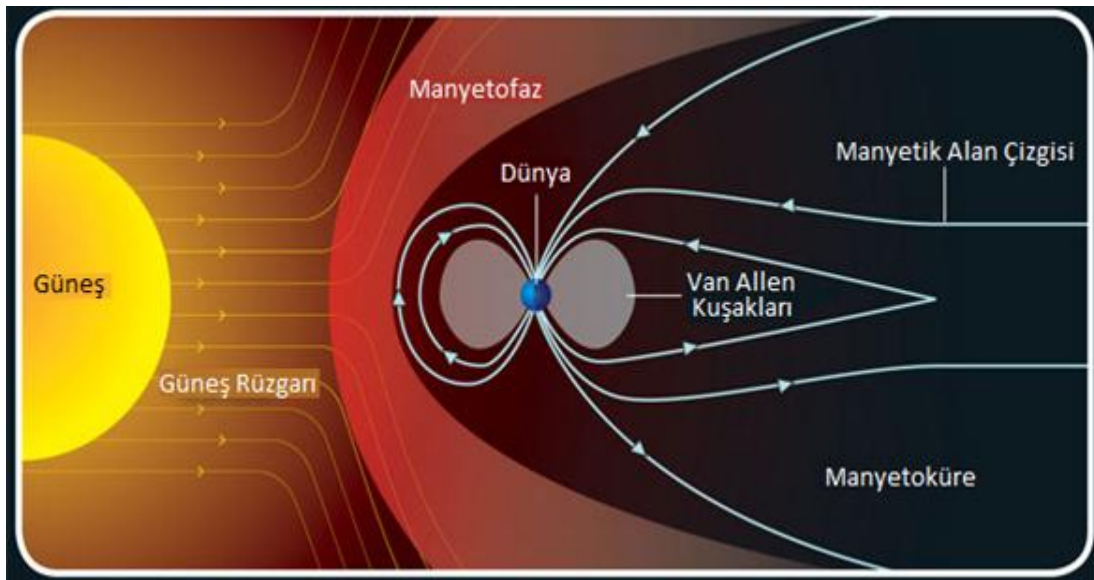


Şekil 2.2. Slough (52 °K enlemi) ve Port Stanley (52 °G enlemi)’de öğlen F2 tabakasının kritik frekansı ile R-Zürich Güneş lekesi sayısı ve F10.7 Güneş akısı ilişkisi [18].



Şekil 2.3. Güneş lekesinin maksimum ve minimumunda, gündüz ve gece iyonküre elektron yoğunluğu profili [18].

Güneş ile gezegenler arasında kalan bölge, gezegenler arası ortam adıyla anılmaktadır. Bu ortam çoğunlukla mükemmel bir boşluk gibi düşünülse de, Güneş rüzgârının etkisi altında oldukça çalkantılı bir bölgedir. Güneş'ten Güneş rüzgârı şeklinde radyo dalgalarından, X ışınları, Ultraviyole ışınlar, elektron, proton gibi yüklü parçacıklara kadar sürekli bir madde akıntısı dış uzaya doğru yayılmaktadır. Tipik bir Güneş rüzgârı hızı 400 kms^{-1} 'dir ve Güneş'in aktif olduğu dönemlerde 1000 kms^{-1} 'e ulaşabilir. Güneş yüzeyi üzerinde büyük lekeler görülmeye, Güneş patlamalarının, aktif prominansların, koronal deliklerin, koronal kütle atımlarının sayısı artmaya başladığında, Güneş rüzgârının kimyasal bileşimi, yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti artmaktadır. Gezegenler arasında akan Güneş rüzgârıyla, gezegenlerin manyetik alanları farklı biçimlerde etkileşmektedirler. Yerküre'yi sarmalayan manyetik alan çizgileri Güneş yönünde Güneş rüzgârının etkisiyle bastırılmış, ters yönde ise gezegenler arası ortama doğru uzanmıştır. Bu yapı Şekil 2.4.'de gösterildiği şekliyle, Yer manyetoküresini oluşturmaktadır. Van Allen radyasyon kuşakları ve atmosferin üst katmanlarından iyonküre bu yapının içerisinde yer almaktadır. Güneşten gelen X ışınlarının ve EUV ışınımının neden olduğu foto iyonlaşma sürekli olarak bu katmanda serbest elektronlar yaratmaktadır. Öte yandan Yer'in manyetik alanı Güneş rüzgârının manyetik alanının, yoğunluğunun ve hızının artışlarına da duyarlıdır. Güneş rüzgârındaki bu değişimlerde Güneş aktivitesinin değişimlerine bağlıdır [18, 20, 30].



Şekil 2.4. Yer manyetoküresi [5].

Güneş'ten gelen elektromanyetik dalgaların yayılımındaki ani artış, Yerküre'nin günışığı kısmında iyonkürenin normal S_q (sakin Güneş-Solar quit) akımlarını değiştirir. Jeomanyetik alanda meydana gelen bu etki, jeomanyetik alanın yatay bileşeninde (**H**) 50 nT kadar pozitif ya da negatif büyük bir değişime neden olabilir. Bu etki orta enlemlerde daha büyükken, düşük enlemlerde daha azdır. Ancak tam tersinin olduğu durumlar da gözlenebilmektedir. Etkiler bütün Güneş devri boyunca gözlenebilmesine rağmen, Güneş maksimumunda daha çok görünürler. Güneş tutulmalarında ise etkinin tam tersi olduğu ifade edilebilir. [6–8,13–15].

Gezegenler arası manyetik alan gün yarımküreye doğru döndüğü ve uzun süre güneye doğru kaldığında, Güneş rüzgârı şok dalgası şeklinde manyetoküreye ulaşır. Bu etkiler Dünya'ya iletildiğinde, manyetokürede *manyetik fırtınalar* ve iyonkürede *iyonküre fırtınaları* olarak adlandırılan karışıklıklara neden olurlar [19].

Değişen Güneş rüzgârının Yerküre'ye etkisi çok ani olabilir. Yerküre'nin Güneş'e bakan kısmında Yer'in manyetik alan çizgileri Yerküre'ye doğru geriler ve gece tarafındaki manyetik alan çizgileri Yerküre'ye ekvator düzlemine doğru sıkışır. Meydana gelen sıkıştırma Yerküre'ye gelirken gecikir. Bu nedenle, ani sıkıştırma Yerküre'nin farklı yerlerinde birkaç dakika farkla gözlenebilir. Birkaç saat boyunca sıcaklık, parçacık yoğunluğu ve hızı ile beraber Yer'in manyetik alanında artış meydana gelir. Bu durum, *ani başlangıç* (SC) veya *pozitif evre* olarak adlandırılır. Birkaç gün devam edebilir ve bütün Dünya'da eş zamanlı başlar. En şiddetli fırtınalar Güneş kromoküresinin patlamasıyla başlar. Büyük patlamalar en yaygın olarak Güneş lekesi maksimumunda gözlenir ve bu nedenle SC fırtınaları çok sık olur. Şok dalgası şeklinde etki eden Güneş rüzgârı, Dünya'yı sarar ve SC biter. Bu gibi karışıklıklar süresince büyük miktarda enerji, yüksek enlemlerde termoküre içine birikir. Nötr gaz sıcaklığını artırarak, nötr yoğunluk miktarını artırır. Dünya çevresinde enerjili parçacıklar, elektronlar bir yönde protonlar diğer yönde olacak şekilde hareket ederler. Bu manyetik alanın şiddetinin ve de parçacık yoğunluğunun hızlı bir şekilde azalmasına neden olur. Bu manyetik fırtınanın *ana evresi* veya *negatif evresi* olarak adlandırılır ve birinci evrenin tersidir. Bu iki evre arasında genellikle birkaç saatlik süre vardır. Ana evrenin iki sebepten meydana geldiği düşünülmektedir. İlki, Yerküreyi saran enerjili parçacıkların diğer yüklü parçacıkları beslemesi ve pozitif parçacıkların batıya, negatif parçacıkların doğuya doğru sürüklenmesidir. Bu *halka akımı* adı verilen batıya doğru bir akımın meydana gelmesine neden olur. Bazı parçacıklar artan manyetik alanla beraber ivmelenerek daha güçlü elektrik alanlarını ve halka akımını üretirler.

Ekvator bölgesinde ise bu parçacıklar dışarı doğru ivmelendirilirler. İkincisi ise, fırtınayla beraber özellikle kutuplarda E tabakası yüksekliklerinde iyonlaşmayı artırmasıdır. Bu nedenle iletkenlikte bir artış meydana gelir ve elektrojet, manyetik alanda kutup bölgelerinde akımların artmasına neden olur ve bu etkiler orta enlemlere yayılır. Oluşan bu akım nedeniyle meydana gelen manyetik alan, Yer'in manyetik alanının aksi yönde oluşarak, azalmasına neden olur. Fırtınanın tetiklediği sirkülasyon F2 tabakasında iyonküre plazmasının dikey sürüklenmesini artırır ve böylece bu tabakanın yukarı doğru kalmasını sağlayarak, elektron yoğunluğunun artmasına neden olur ve sonraki birkaç gün içinde bütün etkiler normale döner. Bu ise fırtınanın *geri alma (düzeltme) evresi*dir [19, 20, 31, 32].

İyonkürede meydana gelen fırtınalar büyük etkili olup, ara sıra meydana gelirler ve homojen değildir. İyonkürenin her bölgesinde aynı şekilde görülmezler ve manyetik karışıklıklarla ilişkilidirler. Jeomanyetik fırtına süresince kutup iyonküresine enerji girişi olur ve kompozisyon, sıcaklık ve sirkülasyon gibi alt atmosferdeki bir çok parametreyi değiştirir. Jeomanyetik fırtınalar süresince, yüksek enlemlerde parçacık yağmuru, D tabakası yüksekliklerinde karışıklıklar üretir. Bu etkiler orta enlem D tabakasına yayılır ve etkileri birkaç gün devam eder. Kompozisyon değişimleri en çok F2 bölgesindeki elektron yoğunluğuna etki eder. Manyetik fırtınalar gibi üç evreden oluşurlar. İlk evre *birinci* veya *pozitif evre* olarak adlandırılır. Bu, Güneş rüzgârının Yer'e ulaşmasıyla, elektron yoğunluğunda büyük bir artış meydana gelmesidir. Bu pozitif evre süresince F2 bölgesi kritik frekansı artar. Daha sonra elektron yoğunluğu aniden normalin altına düşer ve F2 bölgesi kritik frekansı azalır. Bu *ana evre (negatif evre)* olarak adlandırılır. Sonra değerler yavaşça tekrar normale döner. Bu ise aynı şekilde *geri alma* veya *düzeltme* evresi olarak adlandırılır (Negatif evre süresince N_2 ve O_2 artarken, O azalır, $[N_2/O]$ oranının artması kayıp sebebidir. Böylece elektron yoğunluğunun azalmasıyla, kritik frekans da azalır). Oluşum nedenleri manyetik fırtınalarla aynıdır [18, 20, 31, 32].

Şiddetli bir fırtına süresince iyonküre karışmış durumdadır. Tabakaların kat kat oluşumu ortadan kalkar ve sonuç olarak haberleşme düzensizdir. Maksimum elektron yoğunluğu güçlü bir fırtınada %30 azalabilir. İyonkürenin E tabakası sporadik E'nin oluşumu hariç pek fazla etkilenmezken, D ve F tabakaları daha kuvvetli etkilere maruz kalır. Özellikle F tabakasını daha çok etkiler. Jeomanyetik fırtına süresince kutup iyonküresine enerji girişi olur ve kompozisyon, sıcaklık ve sirkülasyon gibi alt atmosferdeki bir çok parametreyi değiştirir. Kompozisyon değişimleri doğrudan F2

bölgesindeki elektron yoğunluğuna etki eder. Bu etkiler ani veya kademeli olabilir. D bölgesi elektron yoğunluğu (uzun dalgalar için yansıma yüksekliği) ve F2 tabakasının difüzyon ve genişmesinde bir artış vardır. Fırtınanın daha sonraki safhasında fırtına yavaşlar (etkileri hafifler) ve iyonkürenin üst kısmı genişir, difüzyona uğrar. Böylece tabakaların yükseklikleri değişir. D tabakasında radyo dalgalarının soğurulması artar. HF bandı tamamen olumsuz bir şekilde etkilenebilir [17, 19, 31].

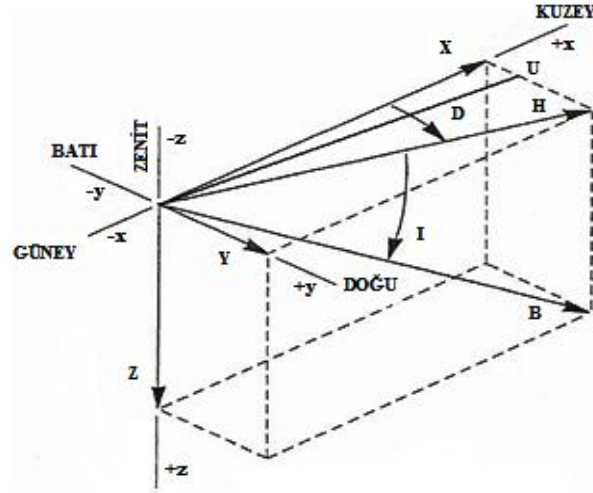
2.2.2 Jeomanyetik İndisler

Jeomanyetik indisler Yer'in manyetik alanındaki değişimlerin bir ölçüsünü bize verir. Manyetik indisler, bir gözlemevine ait kayıtları bizzat inceleme imkânı bulamayan araştırmacılara bu olanağı kısmen de olsa sağlamak amacıyla, kayıtları farklı yönlerde tanımlayabilmek amacıyla düzenlenmektedir. Dünya üzerinde değişik enlemlerde bulunan manyetometre istasyonları, elektrik akımlarının etkisiyle Yer'in manyetik alanında meydana gelen değişimleri saptamaktadır [33]. Jeomanyetik indislerden birkaçı şunlardır:

2.2.2.1 K İndisi

Dünya'da konumlandırılmış 13 jeomanyetik gözlemevinin her biri (tek bir jeomanyetik gözlem bölgesi) için kabul edilen sakin gün eğrisine bağlı, manyetik aktivitedeki 3 saatlik yarı logaritmik bir indekstir. Yer'in manyetik alanının yatay bileşeninin değişimini verir. Her bir gözlemevi için ayrı ayrı hesaplanır. Bu nedenle her gözlemevi için ayrı bir değer alır. Yer'in manyetik alanının bileşenleri Şekil 2.5'de gösterilmektedir [21, 33].

Birimi nT'dır ve 0'dan 9'a ölçeklendirilir. Aşağıda Tablo 2.3'de K indisinin Boulder manyetometresine göre ölçeklendirilmesi ve bunlara karşılık gelen nT cinsinden değerleri verilmektedir. $K > 4$ için yüksek jeomanyetik aktivite vardır denir. K indisi yerel jeomanyetik aktiviteyi ölçeklendirmek için geliştirilmiştir. Günlük, enlemsel ve mevsimsel özelliklere bağlı olarak değişiklik gösterir [33].



Şekil 2.5. Yer'in manyetik alanının bileşenleri [33].

Tablo 2.3. K indisinin Boulder manyetometresine göre ölçeklendirilmesi ve fırtına seviyesi [5]

K İndisi	nT	Derecesi	Jeomanyetik Fırtına Seviyesi
0	0-5	Aktif Değil	Sakin
1	5-10	Çok Sakin	Sakin
2	10-20	Sakin	Sakin
3	20-40	Tedirgin	Tedirgin
4	40-70	Aktif	Aktif
5	70-120	Küçük Fırtına	G1 Küçük Çaplı
6	120-200	Büyük Fırtına	G2 Hafif
7	200-330	Şiddetli Fırtına	G3 Güçlü
8	330-500	Çok Şiddetli Fırtına	G4 Şiddetli
9	>500	Uç, Aşırı Fırtına	G5 Aşırı

2.2.2.2 Kp İndisi

Gezegenler arası 3 saatlik Kp indisi, 44° - 60° arasındaki kuzey veya güney enlemlerdeki 13 jeomanyetik gözlemevinden alınan standartlaştırılmış K indisinin ortalamasıdır. Jeomanyetik karışıklıklar üç manyetik alan bileşenini kaydeden yer konumlu manyetik gözlemevleriyle gözlenebilir. Küresel Kp indisi, iki yatay alan bileşenindeki karışıklık seviyelerinin ortalama değeri olarak elde edilir. Dünya'nın manyetik alanında bir karışıklık olup olmadığını ve ne kadar şiddetli olduğunu bulmanın en kolay yoludur.

1932'den beri ölçülmektedir ve Güneş aktivitelerinde meydana gelen manyetik karışıklıkları çalışmada kullanılır [21].

K indisinde bulunan 0-9 arası derecelendirme, K_p indisinde 3'er aralığa daha bölünmüştür: 0°-9° arasında 0°, 0⁺, 1⁻, 1°, 1⁺, 2⁻, 2°, 2⁺, 3⁻, 3°, 3⁺, 4⁻, 4°, 4⁺, 5⁻, 5°, 5⁺, 6⁻, 6°, 6⁺, 7⁻, 7°, 7⁺, 8⁻, 8°, 8⁺, 9⁻, 9°, 9⁺ şeklinde gösterilir. Burada 5⁻ $\left(4\frac{2}{3}\right)$, 5°(0), 5⁺ $\left(5\frac{1}{3}\right)$ gibi değerler alır. Örnek olarak herhangi bir gün için aşağıdaki gibi ölçülen 3'er saatlik K_p indisi ve buna bağlı olarak o günkü toplam K_p değeri aşağıdaki gibi tanımlanır [33, 34].

$$K_p = 2^-, 2^+, 2^0, 3^+, 3^0, 3^0, 3^-, 3^+$$

$$2^- = 1 + 2/3 = 5/3$$

$$2^0 = 2$$

$$2^+ = 2 + 1/3 = 7/3$$

$$3^- = 2 + 2/3 = 8/3$$

$$3^0 = 3$$

$$3^+ = 3 + 1/3 = 10/3$$

$$\Sigma K_p = 5/3 + 7/3 + 10/3 + 8/3 + 2 + 3 \times 3 = 21$$

Jeomanyetik olarak sakin periyodlar süresince K_p indisinin değeri, 2⁺'dan daha küçüktür. 2⁺ ve 4⁺ indisleri arasındaki değerler jeomanyetik olarak karışık şartlara işaret eder. 4⁺'den büyük değerler ise, şiddetli jeomanyetik aktiviteyi ifade eder. Bu indis, günlük, enlemsel ve mevsimsel özelliklere bağlı değildir [5, 26, 33].

2.2.2.3 ap İndisi

ap indisi, 3 saatlik bir indistir ve doğrudan K_p indisi ile ilgilidir. Gottingen, F. R. Almanya'da Jeofizik Enstitüsü tarafından 46° ve 63° jeomanyetik enlemleri arasında 11 kuzey ve 2 güney yarımküre manyetik gözlemlerinden K indisi verilerine dayanan manyetik aktivitenin 3 saatlik eşdeğer genliğidir. K_p indisi ile ap indisi arasındaki ilişki Tablo 2.2'de gösterilmektedir [5, 35].

Tablo 2.2. Kp-ap dönüşüm tablosu [26, 28].

Kp	0°	0 ⁺	1 ⁻	1°	1 ⁺	2 ⁻	2°	2 ⁺	3 ⁻	3°	3 ⁺	4 ⁻	4°	4 ⁺
ap	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
Kp	5 ⁻	5°	5 ⁺	6 ⁻	6°	6 ⁺	7 ⁻	7°	7 ⁺	8 ⁻	8°	8 ⁺	9 ⁻	9°
ap	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

2.2.2.4 Ap İndisi

Her bir gün için sekiz ap değerinin 24 saatlik ortalamasıyla elde edilir ve Kp indisinden çıkarılır. Verilen bir gün için tüm Dünya üzerinde genel jeomanyetik aktivite seviyesinin bir ölçümüdür. İyonküredeki akımlardan dolayı jeomanyetik alanın Dünya çapındaki birçok istasyondaki değişiminde yapılan ölçümlerden çıkarılır. Kp indisi ile Ap indisi arasındaki ilişki Tablo 2.3’de gösterilmektedir [5, 35].

Tablo 2.3. Kp ile Ap dönüşüm tablosu [28].

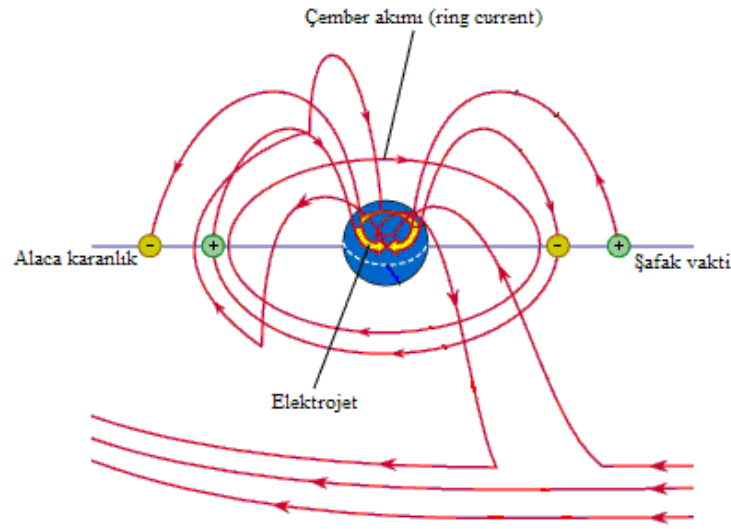
Ap İndisi	Kp İndisi	Aktivite
0 - 7	0 - 1	Sakin
8 - 15	2 - 3	Tedirgin
16 - 29	4	Aktif
30 - 49	5	Küçük Fırtına
50 - 99	6	Büyük Fırtına
100 - 400	7 - 9	Şiddetli Fırtına

2.2.2.5 Dst İndisi

Güneş’ten gelen proton ve elektronların neden olduğu ekvatorial halka akımından dolayı, jeomanyetik alandaki değişimlerin bir ölçümü için kullanılan en yaygın indislerden biridir. Dünya çapında manyetik fırtına seviyesini gösterir. Saatlik aralıklarla yaklaşık olarak ekvator bölgesindeki dört istasyonda jeomanyetik alanın yatay bileşeninden hesaplanır. Verilen bir zamanda Dst (Disturbance storm time) indisi, tüm boylamlar üzerindeki değişimin ortalamasıdır [26].

Halka akımı Yer’e yakın bölgede elektron ve protonların eğik sürüklenmesi ve diferansiyel gradientinden meydana gelir ve şiddeti Güneş rüzgârı şartları ile birleşir. Gezegenler arası manyetik alan (IMF) doğuya doğru yöneldiğinde, ekvatorial düzlemde

doğudan batıya yönelen halka akımı oluşur. Şekil 2.6’da halka akımının olduğu bölge gösterilmektedir. Halka akımı Yer’in manyetik alanın tersi yöndedir manyetik fırtınalarla artar ve Dst’nin negatif değeri Yer’in manyetik alanını zayıflatır. Bu nedenle manyetik fırtına ne kadar büyükse, Dst o kadar negatif olacaktır. Klasik bir manyetik fırtına süresince, Dst ani bir artış gösterir, bu ani başlangıca karşılık gelir ve sonra keskin bir şekilde azalır (halka akımı şiddetlenir). IMF tekrar kuzeye doğru yönelir yönelmez. Dst kendi sakin seviyesine yavaşça geri döner. Bu nedenle klasik bir manyetik fırtınada, Dst aniden artarken, daha sonra keskin bir şekilde azalır. IMF’nin yön değiştirmesiyle (halka akımının düzelmesiyle), sakin zaman seviyesine yavaşça geri döner [24, 33].



Şekil 2.6. Manyetik fırtınalarla meydana gelen ekvator ve kutup elektrojet akımları [33].

Dst indisinin aldığı değerlere göre meydana gelen manyetik fırtına sınıflandırılır. Buna göre: $Dst > -20$ nT ise düşük, -20 nT $> Dst > -50$ nT ise zayıf, -50 nT $> Dst > -100$ nT ise orta, -100 nT $> Dst > -200$ nT ise şiddetli, $Dst < -200$ nT ise süper şiddette jeomanyetik fırtına olduğu anlamına gelir [5, 28].

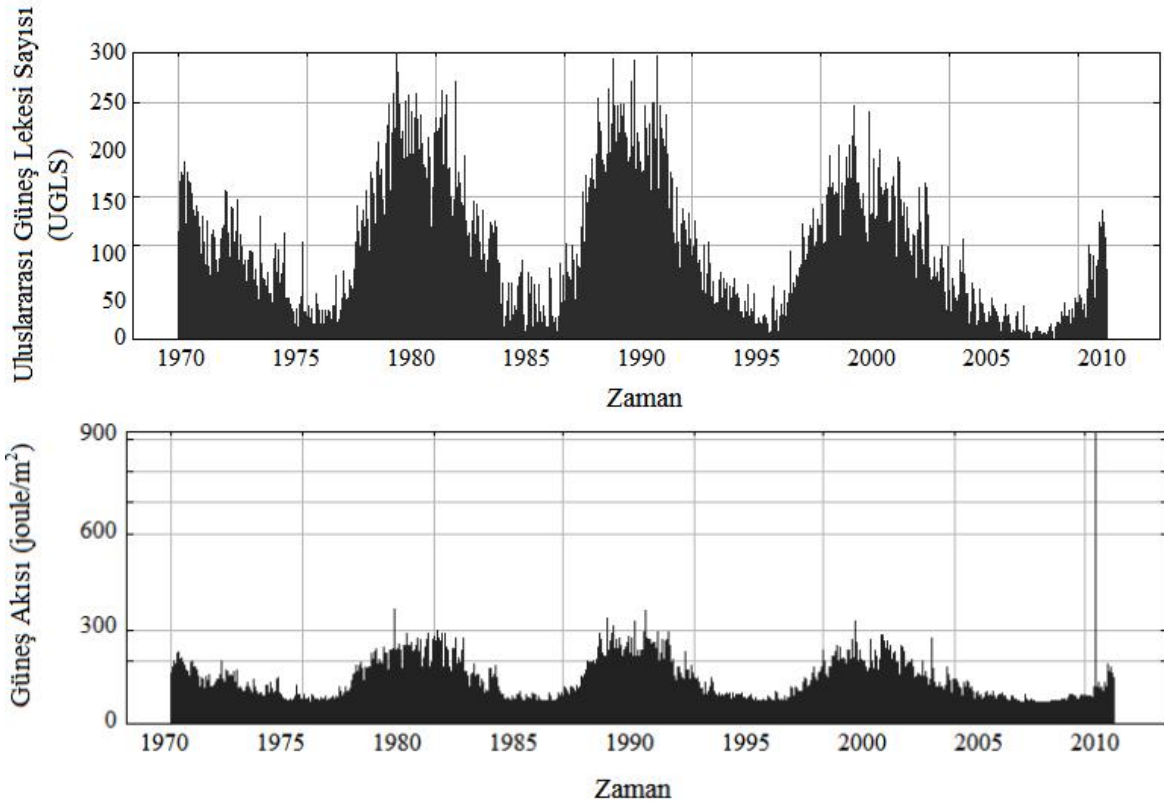
Yapılan çalışmalarda jeomanyetik ve Güneş indisleri arasında önemli ilişkiler bulunmuştur. Şekil 2.7’de Güneş indisleri ile (F10.7 ve R-UGLS) jeomanyetik indisler (Kp ve Dst) ilişkisi görülmektedir. Tablo 2.4’de, Güneş akısı indisinin aldığı değerlere bağlı olarak Kp ve Ap ile ilişki verilmektedir [5, 28].

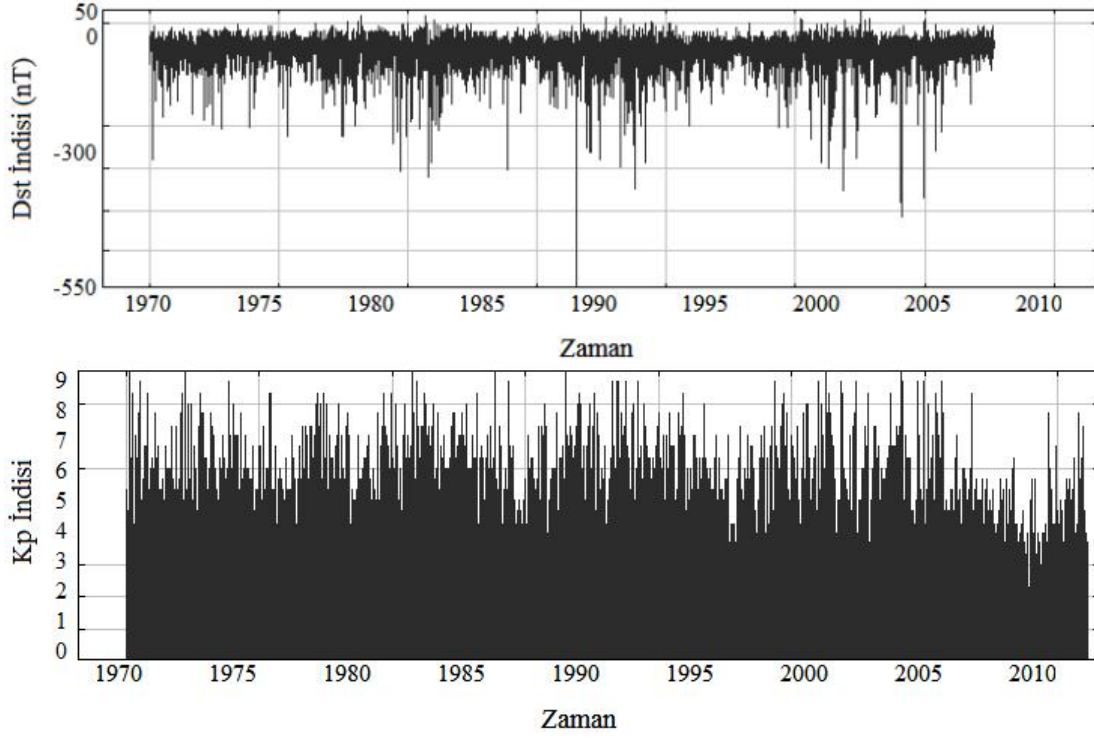
Jeomanyetik Dst indislerle iyonkürenin kritik frekansları arasındaki ilişki Şekil 2.8’de görülmektedir. 13-14 Mart 1989 tarihleri arasında iyonkürenin E ve F tabakalarına

ait kritik frekansların değişimi, Dst indeksiyle birlikte verilmiştir. 13 Mart'ta Dst -589 nT ve Kp 8-9 değerlerine ulaşmıştır. f_oF2 sakin gün (f_oF2q) değişimiyle kıyaslanmıştır. Ani başlangıç ve negatif evre belirgin bir şekilde görülmektedir. Ana evre süresince f_oF2 , %65 kadar azalarak değişim göstermektedir [36].

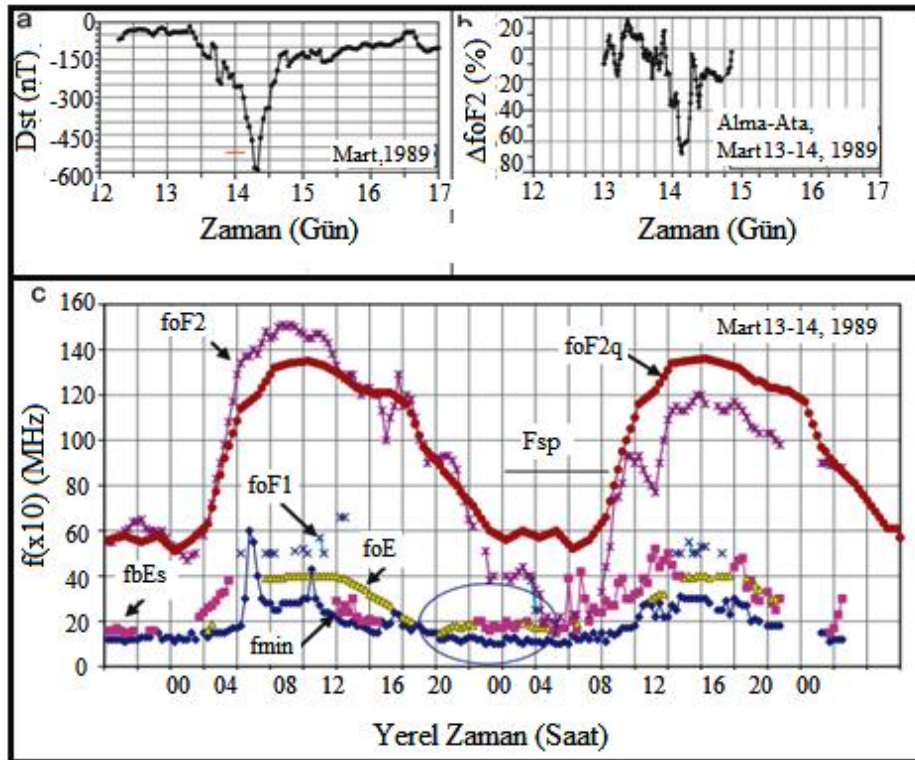
Tablo 2.4. Güneş akısı ve bazı jeomanyetik indisler (A_p , K_p) arasındaki ilişki [28].

Güneş Akısı	A_p İndisi	K_p İndisi
> 180	< 8	< 3
> 180	< 8	> 3
> 250	> 30	> 3





Şekil 2.7. Güneş indisleri ve jeomanyetik indisler arasındaki ilişki [5].



Şekil 2.8. 13 Mart 1989’da meydana gelen manyetik fırtına süresince a) Dst indisi, b) f_oF2 ’nin yüzde sapması ve c) iyonküre tabakalarına ait frekansların değişimi (F_{sp} -F spread oluşumu, daire ve - işareti gece E ve F1 tabakalarının oluşumuna işaret eder) [36].

2.3. Deprem-İyonküre Etkileşimi

Milyonlarca yıldır levha tektoniklerinin hareketleri Yerküre'yi şekillendirir. Bazen bu hareket kademelidir. Bazen de levhalar birbirine kenetlenir ve biriken enerjinin salınımı mümkün olmaz. Biriken enerji yeterince büyük olduğunda, levhalar serbest kalır ve yer yüzeyinin sarsılmasına neden olur. *Deprem*, Yer yüzeyi altındaki kayanın kırılması ve kaymasının neden olduğu ani, hızlı sarsıntıdır. Deprem oluşumu, Yer kabuğunun dinamikleriyle bağlantılıdır. Oldukça kompleks ve yaygın bir konu olan deprem fiziği; tektonik plakalardan başlayarak, elektrik yükleri, kimyasal yüklerin üretimi ve sürtünmeyi içine alan, mikroskobik süreçlerle biten, Yer kabuğunu kapsar. Jeofiziksel bir olgu olarak da düzensiz, lineer olmayan ve karmaşık süreçleri ihtiva eder. Deprem hazırlığı süresince, yer kabuğunun yer değiştirmesinden dolayı oluşan enerji transferiyle birlikte, depremin meydana geldiği zamanda, kaynak ve ortam arasında bir bozulma meydana gelir. Son alan çalışmaları ve eşzamanlı uydu gözlemleri, sismik aktivitelerin sadece yer kabuğunda değil, atmosfer ve iyonkürede de değişimlere neden olduğunu (yüzey sıcaklığı, toplam ozon içeriği, atmosferik su buharı, toplam elektron içeriği,...) göstermektedir. Yer yüzeyindeki değişimler iyonküre yüksekliklerine ulaşarak genliklerini arttırdığı nötr atmosferdeki basınç dalgalarını başlatır. Sismik aktivitelerden önce elektrik alanların yer yüzeyinden atmosfer içine iletildiği, termal anormalliklerin gözlenebildiği, iyonların yeryüzünden yayılabildiği, atmosferik iletkenliğin etkilendiği, iyonküre plazma anormalliklerinin gözlemlendiği, yeryüzü potansiyelinin yerel veya bölgesel olarak değişebildiğini gösteren, birçok kanıt vardır [13, 24, 37].

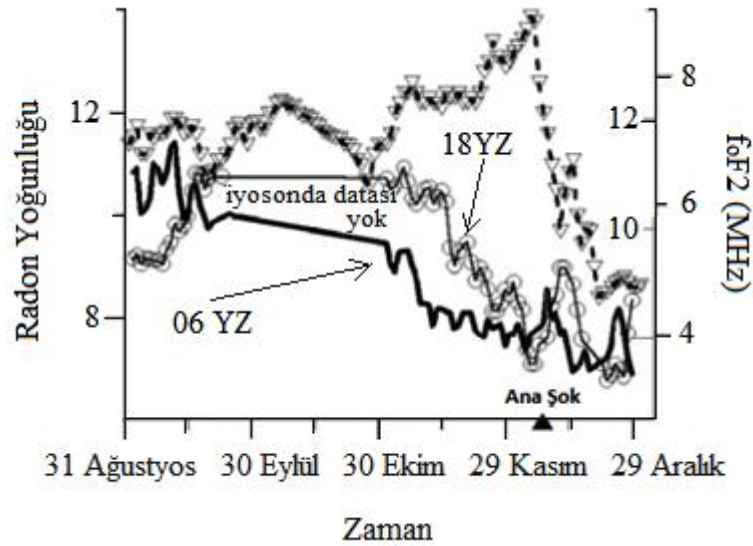
Deprem hazırlık aşamasında, sismik şoktan önce başlayan ve iyonküreye kadar uzanan süreçler ve süreçleri gösteren fiziksel mekanizma, Şekil 2.9'da şematik olarak gösterilmektedir [38-41].

Deprem hazırlık alanında mekaniksel transformasyonların yanı sıra, soy gaz ve sera gazı gibi çeşitli türde gaz bileşenleri ve radon salınımını içeren, jeokimyasal süreçler yer alır. Deprem hazırlığında ilk safha, depremden önce yer kabuğundan sızan gazlardan (radon, CO₂,...) dolayı, alt atmosferdeki nötr iyon kümelerinin dikey anormal elektrik alan üretmesi ve atmosferi iyonlarla zenginleştirilmesiyle başlar.

Sismik alanlarla sismik olmayan alanlar arasındaki fark, tektonik faylarda radon salınımının ve hava iyonlaşmasının daha yüksek olmasıdır. Yer yüzeyinden radon salınımını içeren gaz sızıntıları, aerosol içeriğine etki eder (Cu, Fe, Ni, Zn, Pb, Co, Cr ve

Rn metalik aerosollerin başlıca miktarı yere yakın atmosferde oluşur) ve alt atmosferde iletkenliğin beş katına kadar artmasına sebep olurlar. Radon gözlenmesi, jeofiziksel çalışmalarda kullanılan tekniklerden biridir. Bilindiği gibi radon ^{238}U bozunumu sonrası sırayla ortaya çıkan rodyum bozunumunun üretimidir. Tektonik faylar üzerindeki yeraltı sularında çözünmüş uranyum iyonları vardır. Bunlar Yer yüzeyine yakın yerlerde çökelirler. Böylece bunların bozunmasından oluşan radyumdan radon yayılır. Yer kabuğundaki şekil değişimleri ve deprem merkezi alanı içinde veya yakınındaki kayalarda gerilmeler nedeniyle meydana gelecek genleşmeler sonucu, kayalardan yeraltı sistemine radon geçişi artmaktadır. Bu nedenler, sismik faaliyetlerden önce radon yoğunluğunda artış görülmektedir. Herhangi bir yapıda sürekli olarak üretildiğinden, jeolojik araştırmalarda ideal bir indikatördür. Aktif tektonik faylar civarında yoğunluğu daha yüksektir. Deprem hazırlık süresince yükleme-boşaltma süreci, depremlerden önce gözlenen radon yoğunluğundaki değişimin nedenidir. Birçok çalışmada depremlerden önce radon yoğunluğunda değişim rapor edilmiştir. Bazı çalışmalarda depremlerden önce gözlenen radon yoğunluğundaki azalmalar doğrudan fay üzerinde değil ama biraz uzakta gözlenmiştir. Bu anormallikler 1-2 hafta ile 3-4 aya varan bir süreyi kapsayabilmektedir. Yağmurlar, rüzgâr ve atmosferik basınç gibi radon salınımına etki eden birçok faktörden dolayı, radon kayıtlarında sonuçlar değerlendirilemeyebilir. Ancak burada esas önemli soru “Her deprem için radon değişimi ortaya çıkar mı?” şeklindedir. Bunun cevabını vermek zordur ancak Türkiye ve İsrail’de yapılan çalışmalar, çok küçük şoklarda bile radon yoğunluğunda değişimler meydana geldiğini ortaya koymaktadır. 16 Ocak 1995’de meydana gelen Kobe depremi öncesinde yeraltı suyundan ölçülen radon yoğunluğunun giderek arttığı ve depremden hemen önce yaptığı pik Şekil 2.10’da görülmektedir. Sonrasında azalmış ve sabit sayılabilecek değerde kalmıştır [1, 21, 42, 43].

Radon salınımının atmosferdeki en büyük etkisi, 10^5 - 10^6 cm⁻³'e varan iyon kümelerindeki artışlardır. Radonun iyonlaştırma yeteneği ve bundan kaynaklanabilecek ekstra iyonlaşmalar atmosferde iletkenliğin değişmesine katkıda bulunurlar. Bu değişimler değişimin büyüklüğüne bağlı olarak, alt atmosferden iyonküreye kadar taşınabilmektedir. İlk olarak 11 Aralık 1980 Nazarberk depreminde, F2 bölgesi kritik frekans değişimi ve radon yoğunluğu arasında ilişkinin bulunması, bu teoriyi desteklemektedir. Bu ilişki sadece yerel zamanın belirli aralıkları için alınan kritik frekans değerleri için elde edilmiştir ki; bu da yerel zamana bağlılığı gösterir. Bu deprem için radon yoğunluğu ve f_oF2 arasındaki ilişki Şekil 2.11'de görülmektedir. Sismik şoktan özellikle birkaç gün önce maksimum ve keskin bir şekilde radon yoğunluğu artarken, hem sabah hem de akşam kritik frekans değerlerindeki düşüş oldukça belirgindir. Sonrasında radon salınımı sonrasında pozitif ve negatif iyonların yoğunluğunun ve elektrik alanının arttığını gösteren birçok çalışma mevcuttur. Bu da radon-kritik frekans etkileşim zincirinin varlığını gösterir. Sadece radon tarafından üretilebilecek hava iyonlaşmasının varlığı da, depremlerden önce radon değişimlerinin olduğunu gösteren kanıtlardır [1].



Şekil 2.11. 06:00 YZ (koyu) ve 18:00 (yuvarlak ince) için Taşkent iyonküre istasyonundan f_oF2 'nin beş günlük hareketli ortalaması ve deprem merkezine yakın bir kaynaktan ölçülen radon yoğunluğu (üçgen) arasındaki ilişki [1].

Birçok çalışma sismik aktivitelerle bağlantılı CO₂ salınımlarını göstermektedir. CO₂ boşalımlarının kabukta ve potansiyel sismik bölgelerde yüksek basınca işaret

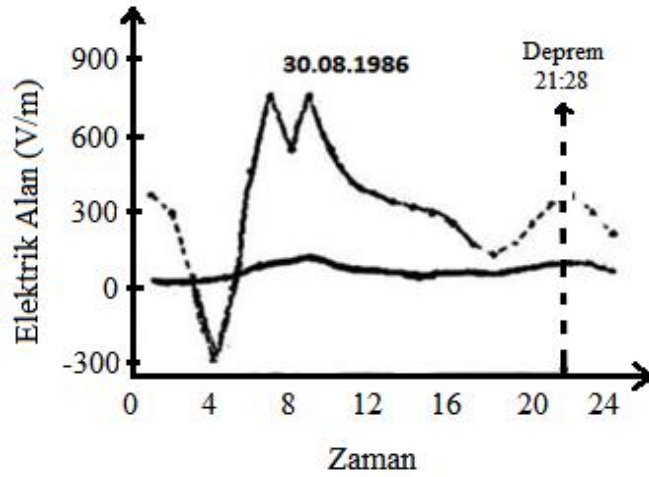
edebileceği düşünülmektedir. Olayın sürekliliği, aktif fayların göstergesidir ve CO₂'nin kırık faylar üzerinde Yer yüzeyine radon taşınmasına büyük bir rolü vardır. Bu tarz boşalmalar akustik gravity dalgalarının oluşumunu başlatabilir. CO₂ boşalmaları, termal kabuk anormalliklerinin bir sonucu olarak tektonik faylarda düzenli bir karaktere sahiptir ancak bazen gözlenmez. Bu durumda helyumla zenginleştirilmiş nitrojen sismik faylarda gözlenebilir. Depremden önce büyük gaz akışları, aerosol biçiminde taşınabilir. C₂, CH₄ gibi gazlar, aromatik hidrokarbonlar, Hg, As, Sg gibi uçucu metaller bazı yazarlar tarafından tektonik faylarda rapor edilmiştir ve sismik-iyonküre etkileşimde rol oynamaktadırlar. Çalışmalar sismik aktivitelerden önce CO₂ ve aerosollerin yanında kabuktan helyum salınımı da göstermektedir. Helyum salınımı radon salınımına göre daha derin bir orijine sahip olup magmanın yukarı çıkışına işaret edebilir ki, ³He/⁴He izotop oranı helyumun kabuksal mı yoksa atmosferik orjinli mi olduğu konusunda bilgi verir. Depremlerden önce deprem hazırlık kuşağı üzerinde iyon kompozisyonundaki ölçümler, yerel plazma parametrelerinin en ilgi çekici ve umut vadeden sonuçlarını vermektedir. [1, 44]

Deprem öncesi meydana gelen değişimlerle ilgili olarak yapılan çalışmalarda, Yer yüzeyi termal anormallikleri önemli bir yer tutmaktadır. Uydulardan elde edilen termal gözlemler, yere yakın atmosfer tabakalarının ve Yerküre sıcaklığının belirgin bir şekilde değiştiğine işaret eder. Deprem öncesi birçok termal anormali; Orta Asya, İran, Çin, Türkiye, Japonya, Hindistan, İtalya, Yunanistan ve İspanya'da rapor edilmiştir. Özellikle büyük depremlerden yaklaşık 6-24 gün öncesinde görünür ve sonrasında yaklaşık bir hafta devam eder. Bu anormalliklerin gelişim zamanı, iyonkürede meydana gelen anormalliklerin oluşum zamanına benzerdir. Bu anormalliklerin olası sebebi, Dünya kabuğu ile yeraltı su konveksiyonundaki stresle salınan ısı olmakla birlikte; tropokürede denge; atmosferik basınç, sıcaklık, nem, su buharlaşma süreçleri ve gizli ısıyı da içine alan kompleks bir sistemdir. Bu parametrelerden birindeki değişim, hemen bir diğerinde değişime neden olur. Su moleküllerinin eklenme ve ayrılma süreçleri, toplam atmosfer basıncı değerine yansiyarak, su buharlaşması için gerekli miktarda ısı ve hava nemini değiştirir. Alt atmosferde elektrik alan değişimlerinin su buharlaşmasındaki değişimlere katkıda bulunduğu deneysel olarak gözlenmiştir. Özellikle elektrik alan aşağı doğru yöneldiğinde, buharlaşma hızı artmaktadır. Tropokürede büyük miktarda bulunan su buharı moleküllerinin, oldukça hızlı bir şekilde, ortalama ömrü 30-40 dk olan, temel iyonların hidrasyonuna neden olması ve ve gizli ısının açığa çıkmasından dolayı hava sıcaklığında

ve iyonlar üzerinde su buharının yoğunlaşmasından dolayı nemde değişimler gözlenmelidir. (iyonlaşmanın artmasının sonucu olarak havanın bağıl neminde azalma, yer yüzeyinin hava sıcaklığında artma gözlenmelidir.) Büyük depremlerde hava nemi ve sıcaklıktaki değişimler kaydedilmekte, bu değişimlerin oluşum zamanı ile iyonkürede gözlenen anormallikler benzerdir. Sıcaklık anormalliği; yere yakın atmosferdeki gaz bileşenlerinin yoğunluğu ve içeriğinin değişmesinden dolayı, aktif faylar üzerinde görünen sera etkisinin bir sonucu da olabilir. Örneğin deneylerde yere yakın atmosferde CO₂ veya CH₄ yoğunluğunun artması, yüzey sıcaklığını birkaç derece artmasına neden olduğu tespit edilmiştir (sera etkisi). Bu anormallikler depremden önceki 2 gün ile bir aylık zaman periyodunda (bazen depremden sonraki bir hafta), 200-1000 km mesafede artış şeklinde görülebilmektedir [1, 11, 14, 15, 37, 42, 43, 45, 46].

Deprem hazırlığında ikinci safha, anormal elektrik alanın üretilmesidir. Depremden önce deprem hazırlık kuşağında Yer kabuğundan şiddetli gaz boşalımlarının (çoğunlukla CO₂) iyi bilinmektedir. Bu gaz akışları, hem hava hareketi üretirler hem de akustik gravity dalga üretimini uyarmak için yeterli kararsızlıklar üretirler. Kısa süre içinde atmosferin yere yakın tabakası iyonca zengin (10^5 - 10^6 cm⁻³) olur. Yük ayırım süreçleri, açık hava elektrik alanlarıyla karşılaştırıldığında (~ 1000 Vm⁻¹ ve 100 Vm⁻¹), anormal derecede güçlü dikey elektrik alanın üretilmesine öncülük ederler. Anormal elektrik alan üretimi; yerkabuğu-atmosfer-iyonküre içinde süreçlerin sismik-iyonküre etki zincirinde ilk etkinin son safhasıdır. Gaz boşalımlarının yanı sıra, aerosoller de atmosferik elektrik alanı değiştirmektedir. Küçük parçacıklı tozların çekimi, toz parçacıklarının sürtünmesi ve saçılmasının sonucunda elektriksel olarak değişmiş bölgelerin oluştuğu, birçok çalışmada kabul edilmiştir. Tektonik fayların olduğu bölgelerde depremlerden önce, 1000 V/m'ye kadar elektrik alan pulslarının elde edildiği çalışmalar vardır. Bunun bir örneği Şekil 2.12'de, 30 Ağustos 1986'da Carpathian'da meydana gelen 7.2 büyüklüğündeki depremde, deprem merkezinden 700 km uzaklıktaki Swider gözlemevinde kaydedilen atmosferik elektrik alandaki anormallik görülmektedir. Elektrik alandaki değişim, normal sakin günlerindeki ortalamasından oldukça farklıdır [1, 39, 46].

Radon, aerosol ve diğer gazların salınımı, elektrik alandaki değişimler, depremlerden önce doğrudan gözlenebilen anormalliklerdir. Bunun yanı sıra bu anormal değişimlerin neden olduğu iyonkürede gözlenebilen elektron-iyon yoğunluğu ve sıcaklığındaki değişimler oluşabilmektedir [12, 42].



Şekil 2.5. 30.08.1986 Carpathian depremi için ($M=7.2$), elektrik alandaki değişim. Alttaaki koyu çizgi sakin zamanlardaki elektrik alanın aylık ortalamasını göstermektedir [1].

Sismik olaylardan önce meydana gelen değişimler incelenirken sıkça iyonküreye ait parametrelere başvurulur. Sismik aktivitelere bağlı iyonkürede görülen karışıklıklar, Davies ve Baker'in (1965) Büyük Alaska depremiyle ilgili ilk sismik-iyonküre anormallikleri rapor ettiğinden buyana, birçok çalışmacı yer ve uydu konumlu gözlemleri kullanarak bu problemi çözmeye çalışmışlardır. Özellikle 1995 Kobe depreminden sonra kısa vadede deprem tahmini daha büyük önem kazanmıştır. VLF gözlemleri aracılığıyla Kobe depremi için iyonküredeki tedirginliklerin keşfi, iyonkürenin sismik aktivitelere oldukça hassas olduğunu göstermiştir. Bu amaçla 29 Haziran 2004'de Fransız DEMETER mikro-uydusu uzaydan depremleri gözlemlemek için fırlatılmıştır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki; sismik-iyonküre anormallikleri, depremde 1-10 gün önce başlar ve sonrasında birkaç gün devam eder. Sismik olaylardan önce birkaç gün iyonkürede meydana gelen karışıklıklar; manyetoküre ve iyonküre seviyelerde ölçülen elektrik alanları ve elektromanyetik alanlarda, hem pozitif hem de negatif, elektron yoğunluğu ve toplam elektron içeriği (TEC) değişimlerinde, Dünya-iyonküre dalga kılavuzunda uzun dalga boylu dalgaların anormal şekilde soğurulmasıyla rapor edilerek tanımlanmaktadır. Depremin büyüklüğüne ve derinliğine bağlı olarak özellikle iyonkürenin E ve F2 bölgesinin davranışı belirgin bir şekilde değişmektedir. Depremin büyüklüğüne bağlı olarak, iyonkürede sismik olaylar öncesi meydana gelen etkiler, iyonkürenin elektron ve iyon yoğunlukları, sıcaklık ve kritik frekansın yanı sıra VLF/LF yayılımı kullanılarak da çalışılabilir. Bunun için depremde önce, deprem anında ve sonrasında iyonsonda ve GPS

(yer konumlandırma sistemi) ile yapılan ölçümlerin yansıra VLF/LF dalgalarının alıcı-verici arasında genlik, faz,...değişimlerine bakılarak birçok şekilde incelenir. VLF/LF/VHF elektromanyetik dalgaların alıcı ve verici arasındaki iletim anormallikleri ile atmosferdeki depremler öncesi anormal görünüm doğrulanmaktadır [13, 14, 24, 26, 37, 47, 48].

Intercosmos-19 yapay uydusuyla, manyetik olarak sakin zamanlarda, $M > 5.0$ ve yüzeysel depremler için yapılan dalga (0,1-16 kHz) deneyinde, orta ve alt enlemlerdeki geçişlerde VLF-ELF osilasyonlarındaki anormal sıçrayışların keşfi, deprem öncesinde iyonkürede bazı değişimlerin meydana geldiğini göstermiştir. Bu değişimler, hem deprem tahmini hem de iyonküre araştırmaları için önem taşımaktadır [1, 39, 43].

Sismik kuşaklar üzerinde, güçlü sismik aktivitelerden önce anormal iyonküre reaksiyonları ve yer yüzeyinden yayılan anormal VLF/ELF yayılımları; iyonküre ve manyetoküredeki elektromanyetik alanın ve iyonküre plazmasının etkilendiğini göstermektedir. Bu elektromanyetik etkiler iki kısma ayrılabilir. Birinci haberci yayılımları olarak adlandırılırlar ve yerkabuğundan çeşitli frekans aralıklarında ve deprem merkezinden farklı mesafelerde kaydedilen elektromanyetik yayılımların doğrudan radyasyonudur. Dünya yüzeyine yakın sensörler aracılığıyla ölçülebilir. Birçok depremde, ana şoktan birkaç gün önce ELF ve VLF yayılımların şiddetinin arttığı gözlenmiştir. İkincisi; farklı frekanslarda önceden var olan verici sinyallerinin yayılım anormallikleriyle tespit edilen, ya iyonkürede ya da atmosferde yer alan karışıklıkların tespit edilmesidir [26, 46, 49].

Sismik olaylardan önce depremler tarafından elektromanyetik yayılımların üretildiğini gösteren birçok çalışma vardır. Bu yayılımların oluşum mekanizması tam olarak anlaşılmamakla birlikte, radon yoğunluğundaki artışın iletkenliği değiştirdiği bilinmektedir. Yer yüzeyinden radon ve diğer gazların salınımı gibi jeokimyasal etkilerin sonucu oluşan anormal iyonlaşmanın alt atmosferde bazı yük boşalmalarına neden olduğu yönündedir. Anormalliklerinin, akustik ve içerideki gravity dalgalarıyla üretilen elektrik alanının etkisi altında iyonkürenin alçalmasıyla, ULF (<10 Hz) ve VLF/ELF anormalliklerinin meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca kayalara hareket ve sıkıştırma uygulandığında, elektrik yükü ürettikleri (piezoelektrik ve/veya triboelektrik) bilinmektedir. Yapılan laboratuvar çalışmalarında kayaların kırılmasıyla, 10 Hz'den 10 MHz'e değişen frekans aralıklarında elektromanyetik yayılımlar elde edilmiştir. Yeraltında basınç altında kayalara doğru suyun akması, akışkan ve kaya gözenekleri arasında elektro kinetik etkileşim üretebilmektedir. Bu mekanizmaların biri veya bir kaçının etkisiyle

depremlerden önce veya sırasında yeryüzü kaynaklı çeşitli frekans aralığında elektromanyetik yayılımlar ortaya çıkabilmektedir. Son zamanlarda Yer yüzeyinde, atmosferde ve iyonkürede Tayvan, Avrupa ve Japonya’da meydana gelen birçok depremle ilişkili anormal değişimler bulunmuştur. Birçok depremden önce çeşitli yüzey ve atmosferik parametrelerde görülen bu değişimler, yerkabuğu-atmosfer-iyonküre bağlantısı için güçlü kanıtlar oluşturmaktadır [14, 26, 37, 42, 48, 50].

Radyo dalgalarının yayılımında Yer-iyonküre dalga kılavuzu kullanılmaktadır. Alıcı-verici arasındaki ortamın değişmesi, bu dalgaların yayılımına doğrudan etki eder ve sinyal alıcı istasyonda belirgin değişimlerle alınır. İyosonda 20 yıldan fazla bir süredir iyonkürenin elektron yoğunluğunu araştırmada kullanılan en popüler cihazdır. Yer yüzeyinden yapılan ölçümlerde, iyosondalar aracılığıyla yerden yollanan yüksek frekanslı dalgalar iyonküre tabakalarından yansıtılarak, elde edilen ölçümler ile ilgili, sismik şoktan önce ve sonra iyonküre tabakalarının ve buna bağlı olarak kritik frekansının değişimi incelenir. İyonogram adı verilen bu ölçümler, iyonküreye ait birçok parametrenin değişimiyle ilgili bilgi vermektedir. Alt iyonkürede değişimi gözlemlemek için oldukça kullanışlı bir metottur. Bu gibi anormallikler D, E, F bölgelerinde gözlenir ve elektrik alandaki değişimlerinin yeniden dağılmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Sismik aktivitenin neden olduğu VLF sinyallerindeki değişimler sismik aktiviteden birkaç gün önce başlar ve sonrasında da 1 hafta kadar devam eder [13, 24, 45, 51].

Sismik-iyonküre etkileşimi açıklamak için temelde iki hipotez göz önünde bulundurulur. Birinci; iyonkürede deprem kuşağında üretilen akustik gravity dalgalarının etkisidir. Depremler süresince Yerküre’nin dikey hareketinin, nötr atmosferde akustik gravity dalgalarını (AGW) tetiklemesidir. Bu dalgalar iyonlaşmış gazla etkileşir ve iyonküreye yayılır. Diğeri ise; iyonküre içinde deprem kuşağından nüfuz eden anormal dikey elektrik alanların oluşmasıdır. İyonkürede değişimlerin meydana gelmesi için gerekli hazırlık safhası; atmosferin yere yakın tabakasında radonun iyonlaşmasından sonra, iyon-molekül reaksiyonları ve sonuç olarak iyonlara su molekülü eklenmesiyle uzun ömürlü iyon kümelerinin oluşması sonucunda başlar. Meydana gelen pozitif ve negatif iyon kümeleri arasındaki Coloumb etkileşiminden dolayı yarı nötr kümeler oluşur. Nötr kümelerin oluşması hazırlık safhasında son adımdır ki; yere yakın atmosfer, deprem hazırlık alanında nötr kümelerle maskelen gizli iyonlarla zengin hale gelir. Genellikle sismik-iyonküre etkileşimiyle ilgili olarak ilk tasarlanan modellerde, fay bölgelerinde

Yerküre çekirdeğinde dışarı metalik aerosollerin ve radyoaktif parçacıkların dışarı çıkışıyla, iyon-molekül reaksiyonlarının başlaması şeklindedir [1, 39, 43].

Sismik aktivitelerden önce alt iyonkürenin empedansı daha düşük olur ve iyonkürede elektrik alanın değişimine neden olur. Bunun elektrik alanı beslemesi, tropoküreden başlar. Tropokürede sıcaklık, bulutlardan ve radon sızıntısı ile üretilen su kümesi iyonlarından dolayı gizli ısı ve muhtemelen yer yüzeyinden aşırı derecede sıcak materyallerin çıkmasıyla yükselir. Atmosferik sıcaklığın artması, tropokürede iç gravity dalgalarına neden olabilir ve dalga 100 km'nin üzeri yüksekliklere yayılır. Bu *dinamo etkisi* olarak adlandırılır ve elektrik alanının varlığında nötr rüzgârlar tarafından üretilir. Dinamo bölgesindeki elektrik alan tropoküreden yayılan dalgalarla değiştirilir. Etki dinamo bölgesine ulaştığında değişen elektrik alan iyonkürenin üst kısmına yayılır. Elektrik alan iyonküre ile etkileşir ve $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ plazma sürüklenmesinden dolayı üst yüksekliklere taşınır [24].

Atmosferik elektrik alanın iyonkürede günlük değişkenliği sağladığı iyi bilinmektedir. Genellikle normal açık hava şartlarında atmosferik elektrik alan 0,1-100 V/m civarında ve yere doğru yönelmiştir. Yapılan çalışmalar depremden önce ± 1000 V/m'ye ulaşan elektrik alan anormalliklerini göstermektedir. Elektrik alandaki bu değişim, alt atmosferin iletkenliğini etkiler ve bu etkiler üst yüksekliklere taşınır. Deprem öncesi elektrik alan ve onun kutupsallığı, F tabakasındaki elektronların daha alt tabakalara nüfuz etmesine neden olur ve bu nedenle, iyonküre parametrelerde anormallikler meydana gelir. Güçlü depremlerden önce iyonkürede meydana gelen değişikliklerin oluşumunda anormal elektrik alan ile ilgili birçok teori bulunmaktadır. Bunlar içinde en yeni olan fiziksel model üç kısma ayrılmaktadır. Bunlar; deprem hazırlık alanında anormal elektrik alanının oluşması, bu alanın iyonküreye nüfuz etmesi ve iyonküreye ve manyetoküreye etki etmesi şeklindedir. Elektrik alan kaynağının büyüklüğü, deprem hazırlık alanı büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Elektrik alan kaynağının minimum büyüklüğü (Yer yüzeyinde 1000 V/m civarında elektrik alanının şiddeti için), iyonkürede kayda değer bir etki oluşturmak için 200 km olmalıdır. Bu büyüklükte bir alan için depremin büyüklüğünün $M = 4.6$ olması gerektiği hesaplanmıştır. Eğer radon ve salınan diğer gazların miktarı oldukça büyük olursa (akustik gravity dalgalarını başlatırlar), anormal elektrik alanının üretilmesine neden olurlar [11, 42, 52].

Jeomanyetik alan çizgilerinin eş potansiyel olmasından dolayı elektrik alan, herhangi bir zayıflama olmaksızın iyonkürenin daha üst yüksekliklerine nüfuz eder. F

bölgesinde iki ana etkiye dikkat edilmelidir. Joule ısınmasından dolayı, iletkenliğin maksimum olduğu alanda AGW üretilecektir ve iyonküre içinde küçük ölçekli yoğunluk düzensizlikleri oluşacaktır. Bu süreçler iyonkürede optiksel olarak gözetlenemez ama radyo fiziksel tekniklerle, farklı iyonküre yüksekliklerine kaydedilen periyodik elektron yoğunluğu salınımlarında kendini gösterir ve deneysel datalarla iyi desteklenmişlerdir. Diğer, etkisi ise; F2 bölgesinde büyük ölçekli elektron yoğunluğu düzensizliklerinin oluşmasıdır. Bunlar; uydu, iyonsonda ve GPS alıcılarıyla kaydedilmiş etkilerdir. Elektrik ve jeomanyetik alan içerisinde F bölgesindeki parçacık sürüklenmesinin karmaşık karakterinden dolayı, AGW yayılımıyla bağlantılı anormallikler, sadece yaklaşan deprem merkezi üzerinde değil, ekvatora doğru taşınabilmektedir [13, 39].

F2 tabakasındaki sismik etkiler genelde deprem oluşumundan ~10 gün önce başlamakta ve gündüz görülme eğiliminde olmakla beraber, gece-sabaha karşı görülen değişimler de vardır. Özellikle birçok büyük depremden önce, TEC'e benzer şekilde F2 bölgesi kritik frekansında belirgin azaldığı ve $h_m F2$ 'nin attığı görülmüştür [1].

İyonkürenin E bölgesine nüfuz eden anormal elektrik alan, deneysel olarak kaydedilen düzensizlikler meydana getirir. Yer yüzeyinde elektrik alanın yönelimine bağlı olarak, elektron yoğunluğunda sırasıyla artış veya azalmalar oluşabilir. Ayrıca meydana gelen elektrik alanın şekli; iyonküredeki düzensizliklerin şeklini belirler. Bununla birlikte; tüm durumlarda anormal elektrik alanın jeomanyetik alan çizgilerine dik bileşeni, iyonküreye nüfuz eder. Bu alanın sadece yer yüzeyine yöneldiği durumlarda, deprem hazırlık alanı üzerinde sporadik E tabakası oluşumları gözlenecektir. Birçok çalışmada depremlerden önce sporadik E tabakası oluşumları veya sayılarında artış görülmüştür ve $f_o E_s$ 'deki artışın büyük sismik kaynaklardan yayılan radon sızıntısından kaynaklandığı kabul edilmektedir. E bölgesi kritik frekansında ise, deprem oluşumundan 2-20 gün öncesinde başlayan artışlar gözlenmektedir [39].

İyonküre plazmasındaki sürüklenme süreçlerinden dolayı, manyetoküre yüksekliklerinde değişen alanın biçimi, Yer yüzeyindeki gibi tam olarak aynı olmayacaktır. Buradaki parçacıklarla VLF yayılımlarının siklotron etkileşimini sonucu olarak, alt iyonküreye parçacık yağışı başlar. İyonlaşma D bölgesinde elektron yoğunluğunun artmasına neden olur ve iyonküre alçalır. Bu alçalma; deneysel olarak da kaydedilen, VLF'den VHF'ye kadar farklı frekans bantlarında radyo dalgalarının yayılım şartlarını değiştirir. Bu, D bölgesindeki değişikliğin en iyi göstergesidir [39].

3. MATERYAL VE METOT

Geleneksel deprem tahmini, kabuk hareketlerinin ölçümüne dayanmaktadır. Fakat bu tür mekaniksel ölçümler deprem tahmini için kullanışlı değildir. Kısa vadede deprem tahmininde iki temel yönelim vardır. İlki belirleyici yaklaşımdır ki, radon salınımı gibi bazı değişimlerin geçici ve spatial dağılım davranışını çalışır. Diğer, verilen parametrenin istatistiksel karakteristiğinin davranışında bazı düzensizlikleri bulmak amacıyla yapılan istatistiksel modellerdir. Depremlerle ilişkili olarak iyonkürede meydana gelen karışıklıkları doğrulamak için araştırma iki şekilde yapılmalıdır. İlk olarak meydana gelen karışıklıkların karakteristiği iyi belirlenmeli ve bu değişikliklere neden olabilecek mekanizmalar ortaya konmalıdır. Daha sonra depremlerle bu karışıklıklar arasındaki ilişki istatistiksel analizlerle incelenmelidir.

Bu çalışmada, sismik aktivitelerin iyonkürede bir değişime neden olup olmadığı ve varsa, bu değişkenliğin kısa vadede deprem tahmininde kullanılıp kullanılamayacağını görmek amacıyla, Japonya’da 1975-2011 yılları arasında meydana gelen $M \geq 5.0$ büyüklüğünde ve $D > 40$ km (D =derinlik) 24 tane deprem incelenmiştir. $M \geq 5.0$ eşiği iki nedenden dolayı alınmıştır. İlk olarak depremlerin iyonkürede meydana getirebileceği karışıklıklarda gerekli elektrik alanın etki etmesi için 200 km’lik bir alan olmalıdır ($M = 4.6$) ve ikinci olarak da genel olarak depremin yıkıcı etkisinin $M \geq 5.0$ için daha belirgin olmasıdır.

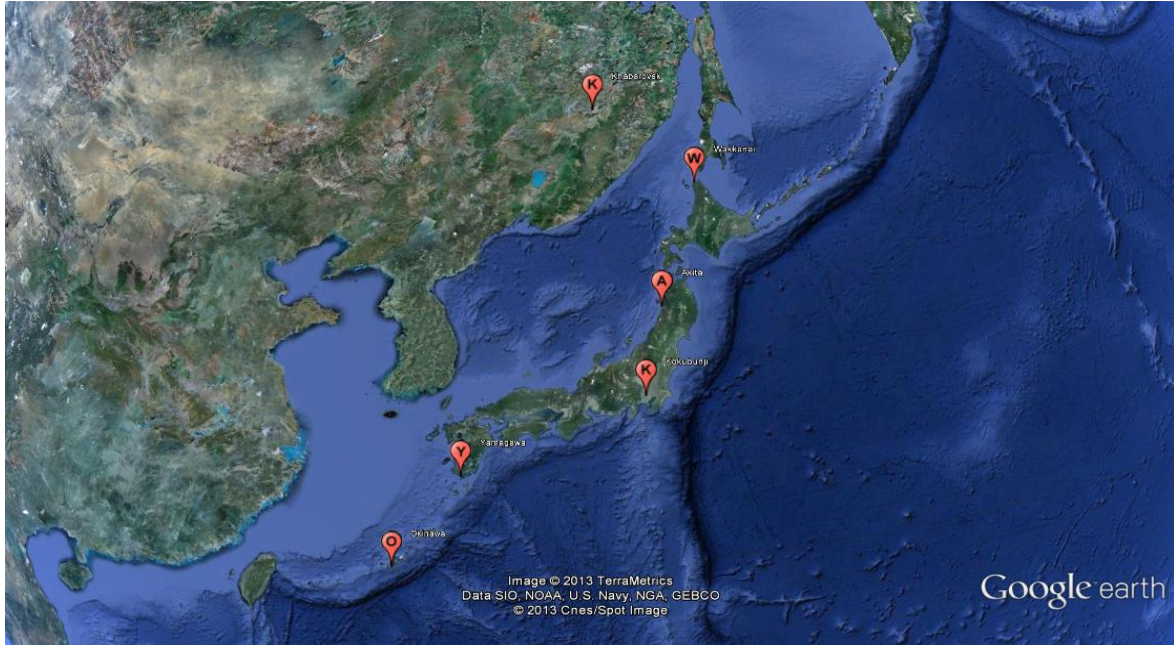
Tayvan’da meydana gelen $M \geq 5.0$ büyüklüğündeki depremlerin tekrar oluşum süresi 15 gün olduğundan, sismik-iyonküre çalışmalarda, sonraki etkilerden kaçınmak ve depremlerin yeniden oluşum aralığını göz önünde bulundurmak için, Liu vd. (2000) ve Chuo vd. (2000) çalışma aralığını 15 gün ile sınırlamışlardır. Bizde çalışmalarımızın çoğunda bu zaman aralığını kullandık. Korelasyon analizinde sonucu daha iyi görebilmek amacıyla deprem günü ve öncesindeki bir aylık periyod ele alınmıştır [53].

İyosondalar 20 yılı aşkın bir süredir iyonküredeki elektron yoğunluğunu araştırmak için kullanılan en popüler cihazdır. Dünya çapında 180’den fazla iyosonda mevcuttur. İyonküre tabakalarının depremlerden önce, deprem anında ve sonrasında iyosondalar aracılığıyla, yerden yollanan yüksek frekanslı dalgaların yansıtılmasıyla, dalganın frekansı, dalganın yansıtıldığı yükseklik ve iyonküre tabakasına ait birçok parametrenin incelenmesine dayanır. İyonogram adı verilen bu ölçümler, bazı matematiksel ve istatistiksel yöntemlerle incelenerek yorumlanır. Çalışmamızda kullandığımız verilere ait

iyosonda istasyonlarına ait enlem, boylam bilgileri Tablo 3.1’de verilmektedir. Bu istasyonların birbirlerine olan konumları Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Bu istasyonlar: Kokubunji (Kok), Wakkanai (Wak), Akita (Aki), Yamagawa (Yam), Okinawa (Oki) ve Khabarovsk (Kha)’dur.

Tablo 3.1. İyosonda istasyon bilgileri

İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Çalışma Süresi
Akita	39.7250 N	140.0533 E	1957-1993
Kokubunji	35.71 N	139.49 E	1957-2003
Wakkanai	45.39 N	141.68 E	1957-2003
Yamagawa	31.20 N	130.62 E	1957-2010
Okinawa	26.28 N	127.81 E	1957-2010
Khabarovsk	48.5 N	135.1 E	1959-2018



Şekil 3.1. Çalışmada veri alınabilen iyosonda istasyonlarının konum bilgileri

Depremle ilgili büyüklük, derinlik, saat, enlem, boylam verileri <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/anss/>, birer saat arayla ölçülmüş kritik frekans verileri ise, http://wdc.nict.go.jp/IONO/index_E.html, www.spidr.com web adreslerinden, alınmıştır. Deprem ve kritik frekans incelenirken, yerel saat (UZ = uluslararası zaman, LT (YZ) = yerel zaman, LZ = UZ + 9.0) göz önünde bulundurulmuştur [54-56].

Sismik olayların sebep olduğu iyonküredeki değişimlerin belirlenmesi ve güvenilir bir şekilde yorumlanması önemli bir problemdir. İyonküre parametreleri hem yapay hem de doğal orjinli değişikliklere oldukça hassastır. Özellikle manyetik fırtınalarla ilişkili değişimler iyi ayırt edilmelidir. Manyetik fırtınaların etkisi tüm Dünya üzerinde görülürken, sismik olayların etkisi yereldir, deprem hazırlık alanı üzerinde görülürler ve daha kısa sürekliliğe sahiptirler [13, 14, 57].

İyonkürede değişkenliğe sebep olan başta Güneş aktiviteleri olmak üzere, elde edilen sonuçların daha sağlıklı yorumlanabilmesi için, özellikle Güneş ve jeomanyetik fırtına aktivitelerini gösteren bazı önemli indislere (F10.7, UGLS, Dst, Kp- ve Ap), belirlenen sismik aktivite periyodu süresince bakılarak ve bu doğrultuda değerlendirilmiştir. Karşılaştırma yapılırken aktivite seviyesini belirlemede alt aktivite sınırı $Kp \geq 4$, $Ap \geq 30$ nT, $Dst \geq -50$ nT ve $F10.7 > 180$ joule /m² kabul edilmiştir. Her bir deprem için, her bir yöntem ve Güneş ve jeomanyetik indislerle olan ilişkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Güneş ve jeomanyetik indisler www.kyoto.com, <http://isgi.cetp.ipsl.fr/> ve <http://www.usgs.gov/> web adresinden alınmıştır [58-60]

3.1 Deprem Hazırlık Alanı (ρ)

Depremlerle ilgili olarak çalışmalar yapılırken sıkça kullanılan kavramlardan biri *deprem hazırlık alanıdır*. Deprem hazırlık alanı kavramı, ilk olarak Dobrovosky vd. (1979) tarafından kullanılmıştır ve gelecek depremin kaynağıyla ilişkili bölgesel deformasyonların gözlemlendiği yer olarak açıklanabilir. Dünya kabuğunun elastik deformasyonunun hesaplaması kullanılarak geliştirilmiştir. Farklı tektonik kuşaklar, farklı tektonik faylar, farklı kaya yapısı ve özellikleri, bu alanın büyüklüğünü tahmin etmek için tam olarak evrensel bir formül vermez, ancak depremin büyüklüğü ile orantılı olup, genel olarak şu ifade ile verilir.

$$\rho = 10^{0,43M} \quad (3.1)$$

ρ deprem hazırlık alanının yarıçapı (km), M depremin büyüklüğüdür [15, 38, 39, 42].

3.2 Sismik-İyonküre Çalışmalarında Kullanılan Bazı Yöntemler

3.2.1 Korelasyon Analizi (KA)

Sismik-iyonküre çalışmalarda yoğun olarak kullanılan yöntemlerden biri “Korelasyon Analizidir (KA)”. Korelasyon analizinde iki değişken arasındaki ilişkinin yönü ve şiddeti hesaplanır. c, korelasyon katsayısı +1 ile -1 arasında değer alır. Sonuçların +1’e yakın olması, incelenen nicelikler arasında olumlu yönde bir ilişki olduğunu (ikisi artar veya ikisi azalır), -1’e yakın olması ise nicelikler arasında ters ilişki olduğu (biri artarken, diğeri azalır) anlamına gelir. Katsayının 0 olması, aralarında olumlu veya olumsuz bir ilişki olmadığı anlamına gelir. Burada korelasyon katsayısındaki düşüşler, ilişkinin ters yönde değiştiğini gösterir. Korelasyon katsayısı (c) şu şekilde bulunur:

$$c = \frac{\sum_{i=0,k} (f_{1,i} - \bar{f}_1)(f_{2,i} - \bar{f}_2)}{k(\sigma_1\sigma_2)} \quad (3.2)$$

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=0,k} f_i}{k+1} \quad (3.3)$$

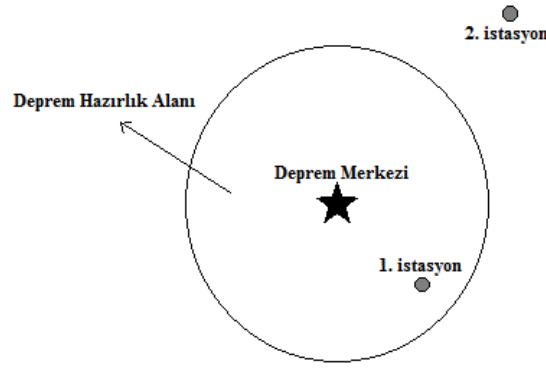
$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0,k} (f_i - \bar{f})^2}{k} \quad (3.4)$$

Burada, 1 ve 2 indisleri, istasyonları (Şekil 3.2) (veya ardışık günleri) temsil eder, f kritik frekans değerini (f_0F2), k günlük değerler alındığında $k=23$ ölçüm sayısı $\bar{f}_1$ ve $\bar{f}_2$ kritik frekansın medyan değeri ve σ standart sapmadır [15, 39].

Korelasyon yöntemi kritik frekans datalarına iki şekilde uygulanır. İlk olarak alınan periyot içerisinde, her bir istasyonun ardışık günlerine ait f_0F2 arasındaki korelasyona bakılır. Aynı istasyona ait günler içerisinde değişiklik olup olmadığı incelenir. Bu, Oto Korelasyon (OK) olarak adlandırılır

İkinci olarak Çapraz Korelasyon (ÇK) uygulanır. Çapraz korelasyon uygulamadan önce, istasyonlarla ilgili şu özelliklere dikkat etmek gerekir. İlk olarak, istasyonlar aynı veya çok yakın jeomanyetik enlemlerde olmalıdır. Böylece, jeomanyetik karışıklıklara

reaksiyonları benzer olacaktır. İkinci olarak, boylamları çok farklı olmamalıdır (saat farkı olmaması için). Bu şekilde görülen etkiler için, aynı yerel zaman başlangıcına sahip olunacaktır. Bu yöntem uygulanırken; alıcı ve kontrol istasyonu olmak üzere iki istasyon seçilir (Şekil 3.2). İstasyonlar seçilirken birinin deprem hazırlık alanının içinde, diğerinin bu alanında dışında seçilmesi gerekir. Doğal olarak bu alan içindeki istasyondan elde edilen verilerin, sismik olaylardan daha fazla etkilenmesi beklenmelidir. Böylelikle deprem merkezine farklı uzaklıktaki istasyonların verileri karşılaştırıldığında, sismik etkiler daha iyi gözlenebilmektedir. Bu iki istasyonun dataları arasında yüksek korelasyon sağlamak için, ikinci istasyon ilkinden ~500-700 km uzaklıkta olmalıdır [15, 39, 61].



Şekil 3.2. Korelasyon analizi için; deprem hazırlık alanı, deprem merkezi ve istasyonların konumu

Sakin şartlar süresince hiçbir yada önemli Güneş aktivite olmadığında, korelasyon katsayısının 0.9-1 olması beklenir. Korelasyon katsayılarındaki düşüş, anormallik olarak yorumlanır. İyonküre parametrelerini etkileyen herhangi bir durum olması halinde, korelasyon katsayılarında düşüşler gözlenecektir. OK analizinde sismik aktivitenin yanı sıra, jeomanyetik karışıklıkların da etkisi görülebilir. Sismik olarak meydana gelen değişimler, jeomanyetik fırtına kaynaklı değişimlerle gölgelenebilir ve jeomanyetik fırtına etkilerini ayırt etmek zor olur. Her bir günün benzer bir trendde olması beklenilir ve anormallik gözlenirken, nedenine açıklık getirmek zordur. Oto korelasyondaki düşüşler, hem jeomanyetik hem de sismik kaynaklı olabilirken, ÇK ile jeomanyetik fırtına etkisi elenmiş olur. Çapraz korelasyon uygulandığında, istasyonlar aynı veya benzer jeomanyetik şartlara sahip olduğundan ve yerel saat farkı hiç veya az olacağından dolayı, herhangi jeomanyetik fırtına etkisi her iki istasyonda da görülecektir. Bu durumda deprem merkezine yakın istasyonun daha fazla etkilenmesi beklenirken, uzak olanın daha az ya da

hiç etkilenmemesi beklenir. Bu nedenle çapraz korelasyon katsayısındaki düşüşler, deprem kaynaklı olarak yorumlanabilir.

3.2.2 Standart Sapma Analizi (SSA)

Chuo vd. (2000) tarafından düzenlenen Standart Sapma Analizinde IQR hesabına benzer şekilde alt ve üst sınırlar belirlenir ancak medyan yerine ortalama ($\bar{x}$) alınır [53].

$$\text{Üst sınır} = \bar{x} + \sigma \quad (3.7)$$

$$\text{Alt sınır} = \bar{x} - \sigma \quad (3.8)$$

Değerlendirme aynı şekildedir. Günlük kritik frekans değerlerinin bu sınırları geçmesi halinde, anormallik vardır denir ve değişime etkisi olabilecek diğer parametrelerin değişimine bakılarak, sonuçlar yorumlanır.

Bilindiği üzere ortalama değeri aşırı küçük ve büyük değerlerden etkilendiğinden, hesaplamalarda medyan almak daha kullanışlıdır ve daha güçlü sonuçlar verir. Bu nedenle, yapılan çalışmalarda IQR ile yapılan deprem tahmininde seviye yaklaşık %95 iken, standart sapmada yaklaşık %68'dir [53, 62].

3.2.3 Çeyrekler Arası Oran (IQR)

İlk olarak Liu vd. (2000) ve Chuo vd. (2000) tarafından geliştirilen ve sonraları birçok araştırmacının çalışmalarında yer verdiği Çeyrekler Arası Oran (IQR) analizinde, depremden önceki 15 günün ve medyan değerlerine dayanarak, deprem gününün ve öncesindeki 15 günün değişimine bakılır [53, 62].

IQR yönteminde, depremin ana şokundan önceki 15 güne ait kritik frekansın saatlik hareketli ortalama alınır ve buna bağlı olarak medyan (m) hesaplanır. Daha sonra depremden önceki 15 günün o saat dilimine ait Çeyrekler Arası Oran (IQR-Inter Quartile Range) değerleri bulunarak, aşağıdaki Üst sınır (üs) ve Alt sınır (as) değerleri elde edilir [53, 62, 63].

$$\text{Üst sınır} = m + \text{IQR} \quad (3.5)$$

$$\text{Alt sınır} = m - \text{IQR} \quad (3.6)$$

Kritik frekans değerleri medyan, alt sınır ve üst sınır değerlerine bakılarak değerlendirilir. Günlük kritik frekans değerlerinin, hesaplanan alt sınır veya üst sınırı geçmesi halinde bir anormallik vardır denir.

3.2.4 Dalgalanma Analizi (DA)

Hayakawa vd. tarafından VLF dalgalarının genliğine uyguladığı bu teknik, sadece gece elde edilen data'lara uygulanmıştır. Gece süresince gönderilen sinyaller gündüze oranla çok daha nettir ve gürültüden uzaktır. Güneş'in iyonküredeki etkisi en aza indirgenmiş olacağından, sinyaller üzerindeki değişim doğrudan depremlere dayandırılabilir (sakin jeomanyetik şartlar süresince), Ns-başlangıç ve Ne-bitiş zamanları olmak üzere;

$$dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle \quad (3.9)$$

$$D = \int_{N_s}^{N_e} (dA(t))^2 dt \quad (3.10)$$

İlk olarak depremden önceki 15 güne ait saatlik ortalamalar- $\langle A(t) \rangle$ alınır. Her bir günün o saate ait değeri ($A(t)$) saatlik ortalamasından çıkarılır ve her gün için t saatine ait elde edilen farklar ($dA(t)$) elde edilir. Her günün bu fark değerlerine bakılır, negatif olanlarının karesi alınarak, toplanır. Bu işlem Dalgalanma (D) olarak adlandırılır. Dalgalanmada negatif değerlerinin alınmasının sebebi, böyle bir değişimin nedeninin sismik kaynaklı olabileceğidir. Günlük dalgalanma değerleri 15 güne ait standart sapmaya bölünerek, dalgalanma normalizasyonu elde edilir. Elde edilen Trend ve Dalgalanma normalizasyonları, $\pm 2\sigma$ alt ve üst sınırları ile birlikte değerlendirilir. Hayakawa vd. yaptıkları çalışmalarda gece değerlerini kullanarak, depremden birkaç gün önce ve birkaç gün sonrasında trend değerinde azalma, dalgalanma da ise artma elde etmişlerdir. Trend ve Dalgalanma normalizasyonları bu sınırlar arasında değerlendirilirken, $m + 2\sigma$ ve $m + 3\sigma$ kriterlerini kullanarak, ne kadar değiştiği değerlendirilmiştir. [14, 26, 49, 64].

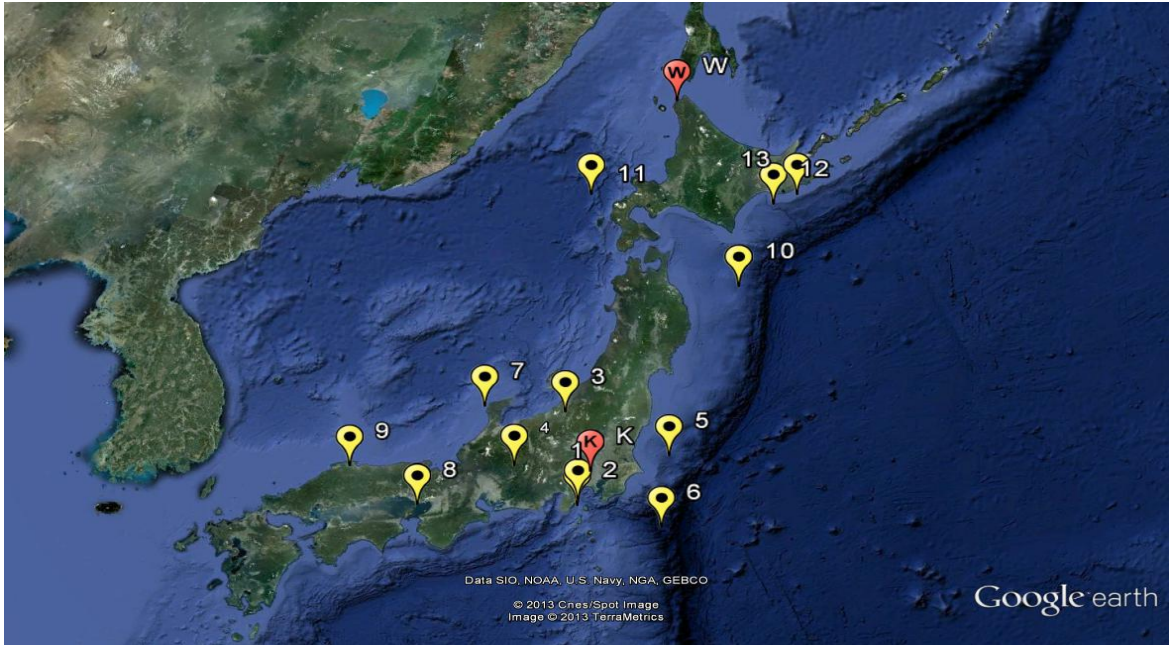
Bu çalışmamızda ilk olarak depremden önceki 15 güne ait saatlik ortalamalar alındı. Her bir günün o saate ait değer saatlik ortalamasından çıkarıldı İkinci kısımda, her günün bu fark değerlerine ait negatif olanlarının karesi alınarak, toplandı. Dalgalanma olarak adlandırılan bu işlemde, günlük dalgalanma değerleri 15 güne ait standart sapmaya bölünerek, dalgalanma normalizasyonu elde edildi. Elde edilen Dalgalanma normalizasyonları, $\pm 2\sigma$ alt ve üst sınırları kabul edilerek, yorumlandı [26, 49].

4. BULGULAR

İncelenen depremler veri alınan istasyonların deprem hazırlık alanı içinde ve dışında olması ve sayısına göre üç bölümde ele alınmaktadır: Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler, hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler ve hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler. Analiz sonuçlar bu sınıflandırma baz alınarak verilmektedir.

4.1 Hazırlık Alanı İçinde Tek İstasyon Bulunan Depremler

Bu kısımda incelenen deprem sayısı 13'dür. Büyüklükleri $5.0 \leq M \leq 7.8$ ve derinlikleri $5 \leq D < 39$ km'dir. Tablo 4.1'de bu depremlere ait tarih, saat, enlem/boylam, büyüklük, derinlik, deprem hazırlık alanı yarıçapı ve bu istasyonlara uzaklığını içeren bilgiler verilmektedir. Şekil 4.1'de Kokubunji ve Wakkanai için istasyon ve depremlerin birbirlerine göre konumlarını göstermektedir.



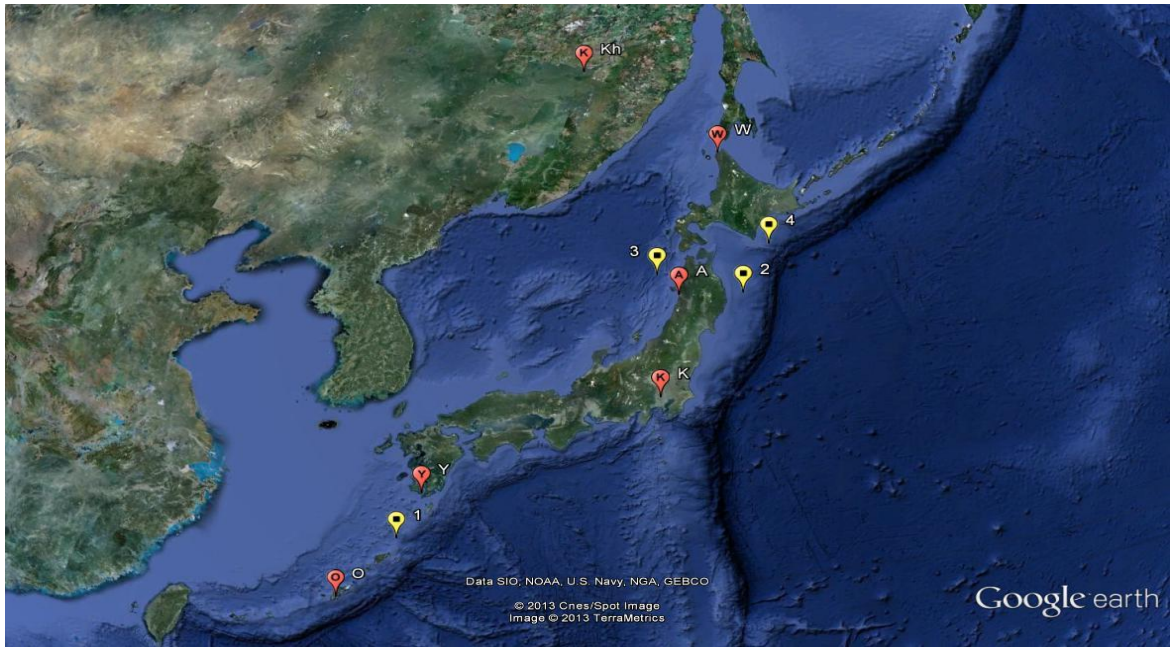
Şekil 4.1. Deprem Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için, istasyon ve deprem merkezlerinin konumları

Tablo 4.1. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için konum, tarih, deprem ve istasyon bilgileri

No	Konum	Tarih	Saat (YZ)	Enlem Boylam	Büyük­lük (M)	Derinlik (D) (km)	Deprem Hazırlık Alanı Yarıçapı (ρ) (km)	Data Alınan İstasyon	İstasyonun Deprem Merkezine Uzaklığı (km)
1	Honshu, Ito, Ajiro	09.07.1989	11:09:09:01	34.942 °K 139.193 °D	5.0	5	141.3	Kokubunji	89.384
2	Honshu ‘nun Güney Sahili	29.06.1980	16:20:05:05	34.808 °K 139.181 °D	6.2	15	463.5	Kokubunji	103.950
3	Honshu’nun Batı Sahilleri	23.10.2004	17:56:00	37.231 °K 138.753 °D	6.6	16	688.65	Kokubunji	179.89
4	Honshu Merkez, MT Ontake	14.09.1984	08:48:49:09	35.789 °K 137.488 °D	6.1	10	419.8	Kokubunji	181.290
5	Honshu’nun Yakın Doğu Kıyısı	08.05.2008	01:45:19	36.141 °K 141.54 °D	6.8	36.6	839.46	Kokubunji	191.09
6	Honshu’nun Uzak Doğu Kıyıları	30.05.2004	05:56:12	34.256 °K 141.385 °D	6.5	38.1	623.73	Kokubunji	236.54
7	Honshu’nun Yakın Batı Sahili	25.03.2007	09:41:57	37.281 °K 136.602 °D	6.7	5	760.33	Kokubunji	311.98
8	Kobe (Batı Honshu)	17.01.1995	05:46:52:01	34.583 °K 135.018 °D	6.9	22	926.8	Kokubunji	426,210
9	Batı Honshu	06.10.2000	13:30:19:01	35.456 °K 133.134 °D	6.7	10	760.3	Kokubunji	576.670
10	Honshu	28.12.1994	21:19:23	40.525 °K 143.419 °D	7.8	27	2259.5	Kokubunji	635.72
11	Hokkaido, Güneydoğu Rusya, Güney Kore	12.07.1993	22:17:11	42.851 °K 139.187 °D	7.7	17	2046.5	Kokubunji	793.20
12	Hokkaido	08.10.2003	18:06:55	42.658 °K 144.487 °D	6.7	32	760.33	Wakkanai	377.83
13	Hokkaido	06.12.2004	23:15:11	42.907 °K 145.200 °D	6.8	35	839.46	Wakkanai	394.170

4.2 Hazırlık Alanı İçinde Birden Fazla İstasyon Bulunan Depremler

Bu kısımda incelenen depremlerde deprem hazırlık alanı içinde bulunan istasyon sayısı birden fazladır ve incelenen deprem sayısı 4'dür. Büyüklükleri $6.8 \leq M \leq 8.3$ ve derinlikleri $24 \leq D \leq 35$ km'dir. Tablo 4.2'de bu depremlere ait tarih, saat, enlem/boylam, büyüklük (M), derinlik (D), deprem hazırlık alanı yarıçapı (ρ) ve bu istasyonlara uzaklığını içeren bilgiler verilmektedir. Şekil 4.2'de istasyon ve depremlerin konumları gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için, istasyona ve deprem merkezlerinin konumları

Tablo 4.2. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için konum, tarih, deprem ve istasyon bilgileri

No	Konum	Tarih	Saat (YZ)	Enlem Boylam	Büyüklik (M)	Derinlik (D) (km)	Deprem Hazırlık Alanı Yarıçapı (ρ) (km)	Data Alınan İstasyon	İstasyonun Deprem Merkezine Uzaklığı (km)
1	Ryukyu Adası	30.10.2009	16:03:39	29.192 °K 129.877 °D	6.8	35	839.46	Yamagawa	233.81
								Okinawa	380.71
2	Honshu Aomori, Misawa	02.11.1989	03:25:34	39.837 °K 142.760 °D	7.4	29	1520.6	Kokubunji	541.03
								Khabarovsk	1139.7
3	Honshu-Akita	26.05.1983	11:59:59	40.462 °K 139.102 °D	7.7	24	2046.5	Akita	115.23
								Kokubunji	528.56
								Wakkanai	586.43
								Yamagawa	1280,6
								Okinawa	1888
4	Hokkaido	25.09.2003	04:50:06	41.775 °K 143.904 °D	8.3	27	3706.81	Kokubunji	439.93
								Wakkanai	774.69

4.3 Hazırlık Alanı Dışında Da İstasyon Bulunan Depremler

Bu kısımda incelenen depremler 7 tanedir. Tüm depremler için deprem hazırlık alanı dışında bulunan istasyon sayısı 1'dir. Büyüklükleri $5.8 \leq M \leq 6.7$ ve derinlikleri $5 < D \leq 20$ km'dir. Deprem hazırlık alanı içinde olan istasyon/istasyonlara oto korelasyon uygulanırken, bu alanın dışında olan ve gerekli şartları sağlayan istasyonlar için çapraz korelasyon da uygulanmıştır. İncelenen depremler ve veri alınan istasyonların konumu Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Tablo 4.3'de bu depremlere ait tarih, saat, enlem/boylam, büyüklük, derinlik, deprem hazırlık alanı yarıçapı ve bu istasyonlara uzaklığını içeren bilgiler verilmektedir.

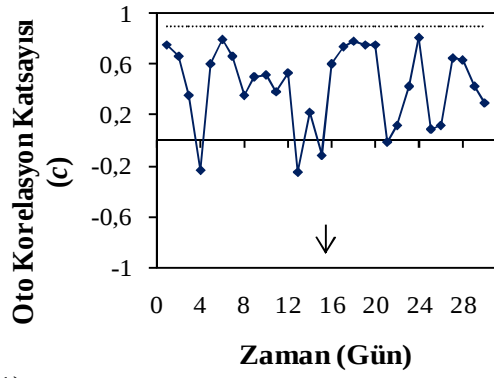


Şekil 4.3. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için, istasyona ve deprem merkezlerinin konumları

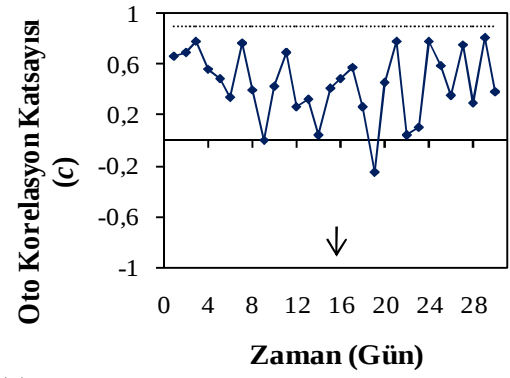
Tablo 4.3. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için konum, tarih, deprem ve istasyon bilgileri

No	Konum	Tarih	Saat (YZ)	Enlem Boylam	Büyük­lük (M)	Derinlik (D) (km)	Deprem Hazırlık Alanı Yarıçapı (ρ) (km)	Data Alınan İstasyon	İstasyonun Deprem Merkezine Uzaklığı (km)	İstasyonlar Arası Uzaklık (km)
1	Arosan	23.01.1975	23:19:14	33.00 °K 131.10 °D	5.8	10	311.9	Yamagawa	204.68	610,41
								Okinawa	810.01	
2	Miyakejima, Oshima	03.10.1983	22:33:35	33.941 °K 139.513 °D	6.0	12	380.19	Kokubunji	196.26	448,39
								Akita	643.68	
3	Oita, Arosan	20.04.1975	02:35:50	33.190 °K 131.300 °D	6.1	7	419.8	Yamagawa	229.80	610,41
								Okinawa	836.91	
4	Kyushu	20.03.2005	10:53:41	33.805 °K 130.078 °D	6.6	10	688.7	Yamagawa	293.34	610,41
								Okinawa	862.30	
5	Tokkaido, Oshima	14.01.1978	12:24:39	34.809 °K 139.259 °D	6.6	14	688.7	Kokubunji	102.15	643,28
								Akita	550.11	
								Wakkanai	1192.7	
6	Honshu	07.09.2004	08:29:35	33.184 °K 137.201 °D	6.7	10	688.65	Kokubunji	350.35	610,41
								Yamagawa	658.25	
								Okinawa	1186.9	
7	Ryukyu Adaları	17.08.2009	09:05:49	23.494 °K 123.486 °D	6.7	20	760.33	Okinawa	534.84	610,41
								Yamagawa	1107.23	

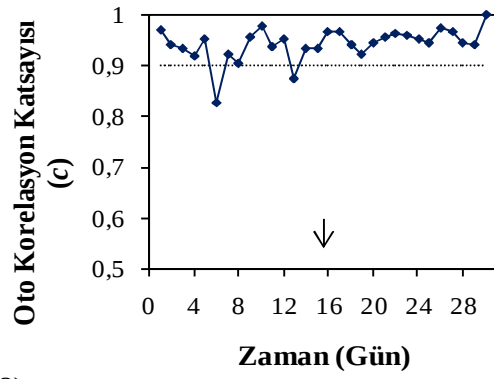
4.4 Korelasyon Analizi



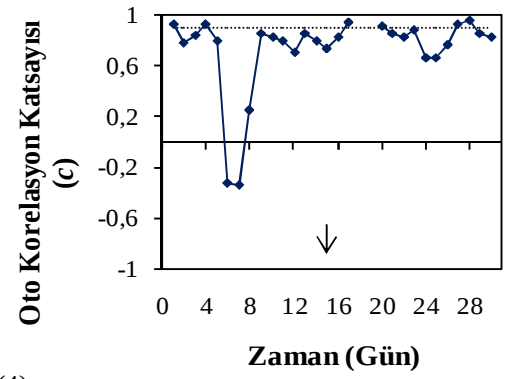
(1)



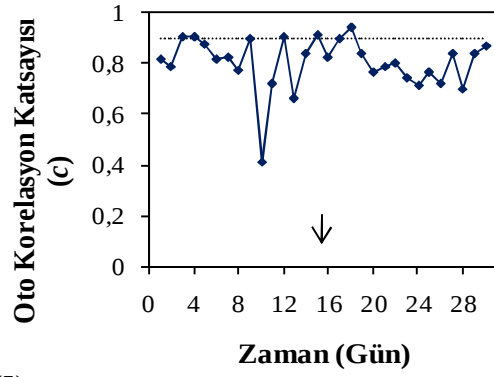
(2)



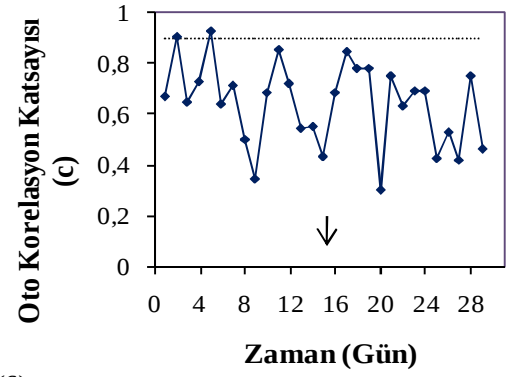
(3)



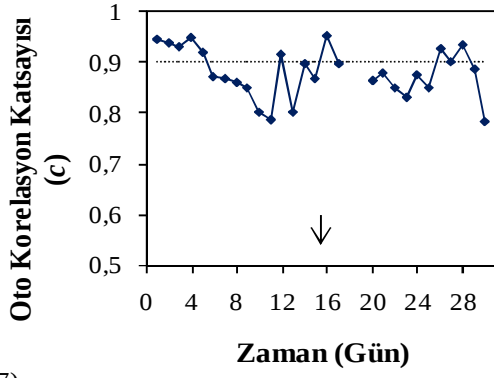
(4)



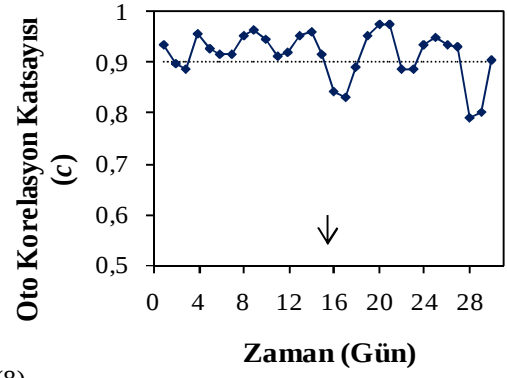
(5)



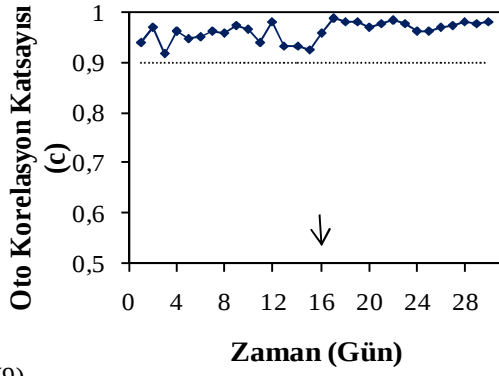
(6)



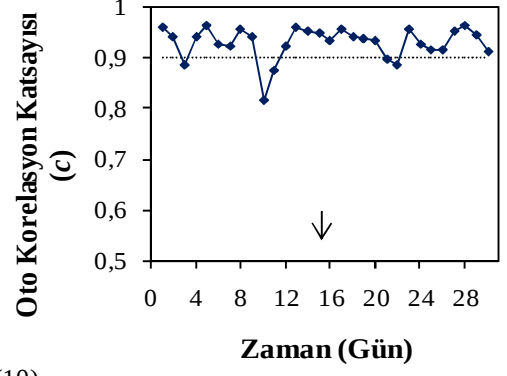
(7)



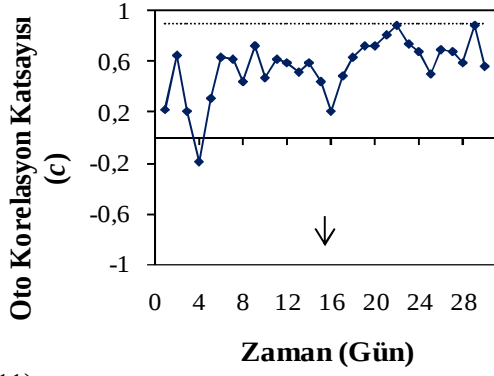
(8)



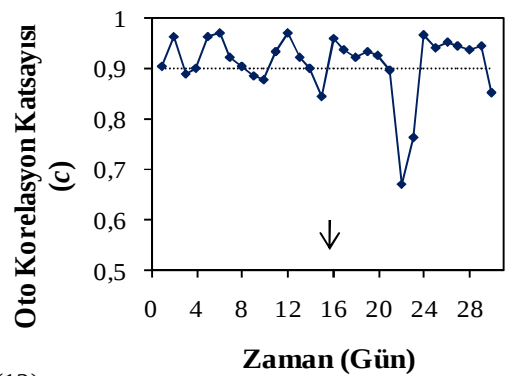
(9)



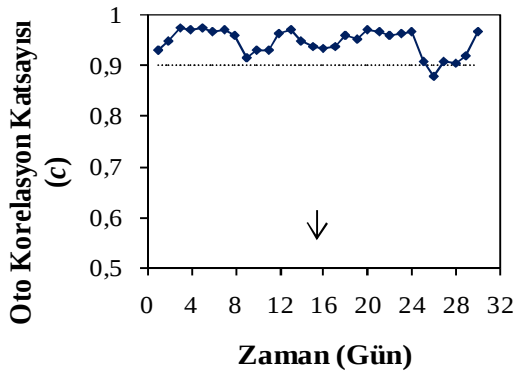
(10)



(11)



(12)



(13)

Şekil 4.4. Hazırlık Alanı İçinde Tek İstasyon Bulunan Depremler için OK sonuçları

Deprem hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için, OK sonuçları Şekil 4.4’de gösterilmektedir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında, veri alınan istasyon deprem merkezinden uzaklaştıkça oto korelasyon katsayısındaki değişim miktarı giderek azalmıştır. İstasyonun deprem merkezine uzaklığı ~250 km’yi geçtiğinde katsayıdaki değişim çok az hatta normal değişim aralığını (0.9-1.0) pek geçmemektedir. Deprem merkezinin konumuna ve meydana geldiği yere (okyanus, kara) bakmaksızın, depremin büyüklüğü ve derinliğine bakıldığında doğrudan ilişki kurulamamıştır.

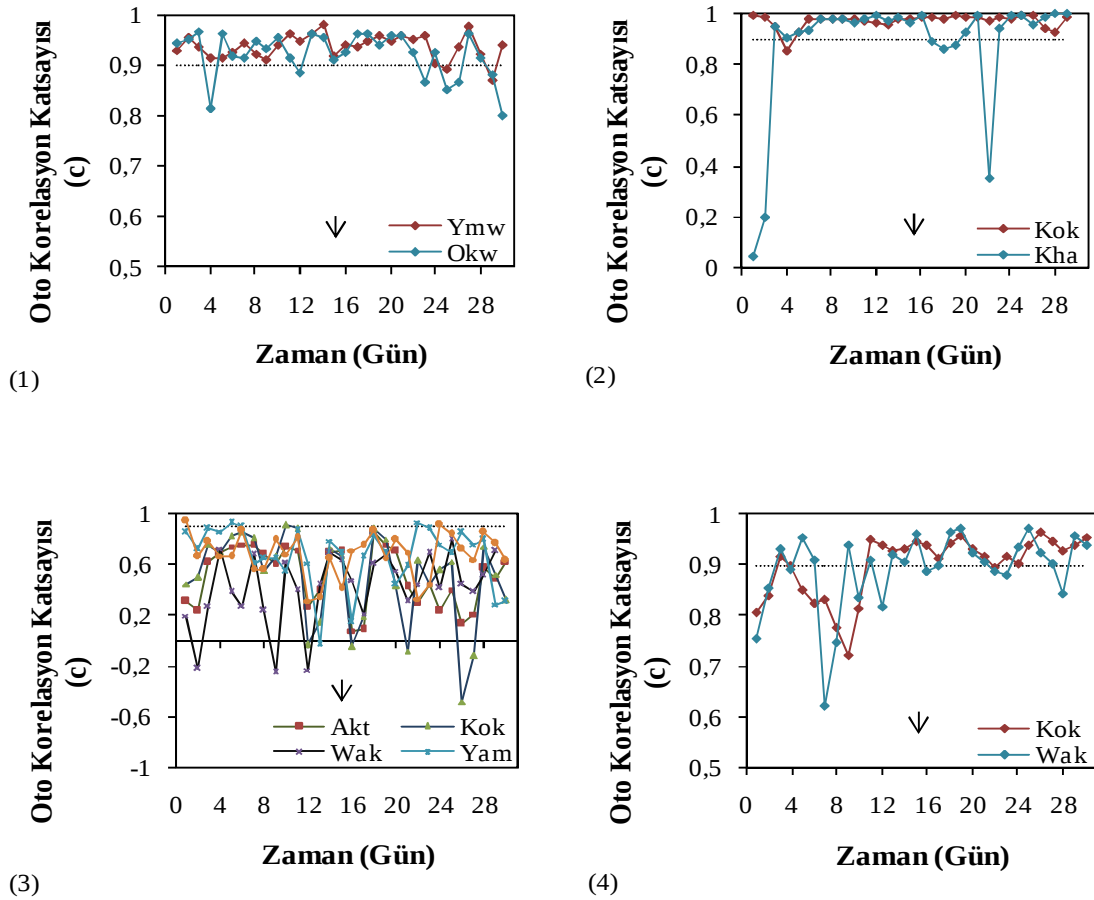
Şekil 4.1’e bakıldığında, Şekil 4.4’deki sonuçlar farklı bir durumu ortaya koymaktadır. Depremlerin meydana geldiği bölgeler incelendiğinde, özellikle Japonya’nın en büyük adası olan Honshu’nun doğu, güney-doğusunda okyanusta meydana gelen depremler (1, 2, 5 ve 6 nolu depremler) için, değişim oldukça belirgin ve yüksek gözlenirken, batı bölgelerinde hem okyanus hem de karada meydana gelen depremler (3, 7, 8 ve 9 nolu depremler için değişim yok denecek kadar azdır. Honshu’nun doğusunda ki depremlerin istasyon-deprem merkezi uzaklığı ilişkisinde yakın, batısındaki depremler içinse uzak ifadesi kullanılabilir. Batısında meydana gelen depremlere bakılacak olursa, hepsi de $M > 6.0$ olmalarına rağmen, genel olarak büyüklük ve derinlik ilişkisi kurulamamaktadır. 3 ve 4 nolu depremler karada meydana gelen depremler olup, hem istasyonun deprem merkezine uzaklığı hem de yüzeye yakın olmaları nedeniyle benzer sonuç vermeleri beklenirken, sadece 4 nolu depremde sismik şok öncesi korelasyon katsayısında oldukça büyük bir düşüş görülmektedir. Bu bağlamda incelenecek olursa Honshu’nun doğusunda meydana gelen depremler için, 1 ve 2 nolu depremler yüzeye en yakın depremler olup, deprem merkezinin istasyona uzaklığı 200 km’nin altındadır. Bu depremlerin korelasyon katsayısındaki değişim en büyüktür. 5 ve 6 nolu depremler, depremin büyüklüğü açısından ilk iki depreme göre daha büyük olmalarına rağmen, derinlikleri en büyük depremlerdendir. Ayrıca bu iki deprem karaya daha uzak mesafededirler. 2 ve 6 nolu depremler büyüklük olarak yakın olsalar da, derinlikleri farklıdır ve bu sonuçlarda da görülmektedir. Bu grup içerisinde 10 nolu deprem okyanusta meydana gelmiş olup, depremin büyüklüğü en fazla olmasına rağmen, deprem merkezi istasyona en uzak depremdir. Data alınan istasyon Kokubunji’nin deprem merkezlerine uzaklığı arttıkça değişim çok az ya da hiç gözlenmemektedir ki, 3 nolu deprem hariç diğer depremler (7, 8, 9, 10) için sonuçlar bu çıkarıma uymaktadır.

Örneğin 5 ve 8 nolu depremler yakın büyüklükte, ancak diğer depremlere kıyasla daha derinde meydana gelmişlerdir. Ancak 5 nolu deprem daha yakın ve Honshu’nun

doğusunda olup, 8 nolu deprem hem batı bölgesinde hem de istasyondan daha uzaktadır. 7 ve 9 nolu depremler batı bölgesinde ve istasyona uzaklıkları 250 km'nin üzerindedir. Burada da istasyona daha yakın 7 nolu depremde küçük de olsa değişimler varken, 9 normal sınırlar içinde kalmıştır.

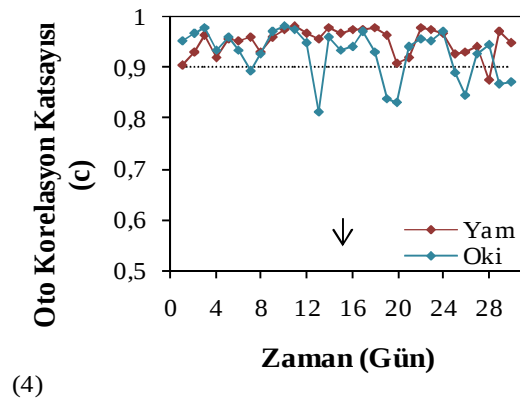
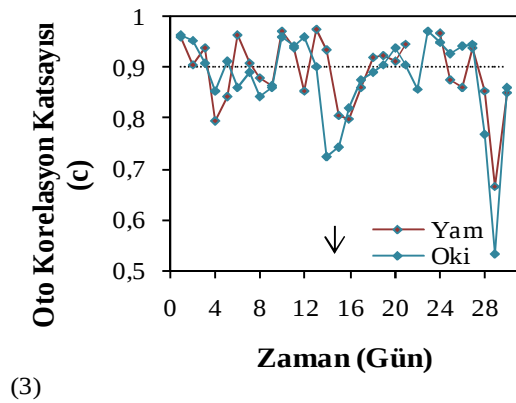
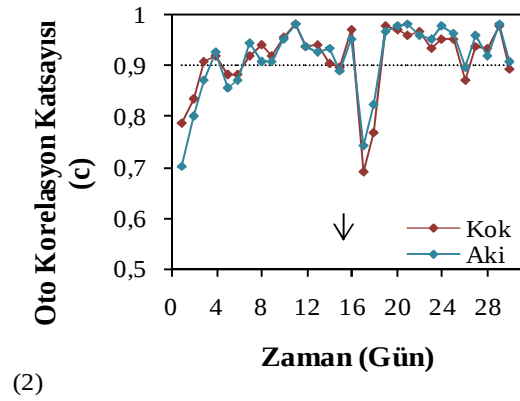
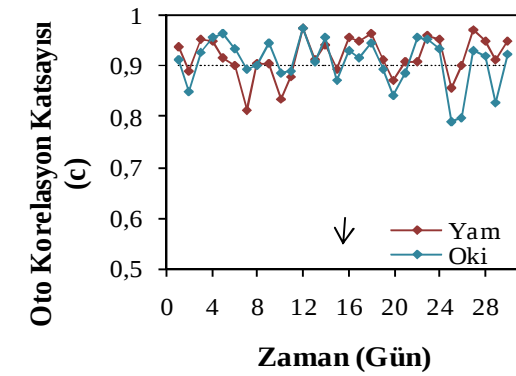
Hokkaido bölgesinde meydana gelen depremlerde veri alınan istasyonun deprem merkezlerine uzaklığı, 350 km'nin üzerindedir. Büyüklük olarak 7.0'ye yakın olmalarına rağmen, meydana geldikleri yer okyanus olup, bu kısımdaki derinliği büyük depremlerdir. 11 nolu deprem Hokkaido bölgesinde meydana gelen bir deprem olmasına rağmen, data alınan istasyon Kokubunji'dir. Belki de Wakkanai korelasyon katsayısındaki değişimi göstermemektedir. Depremler istasyonun güneyinde kalmaktadır.

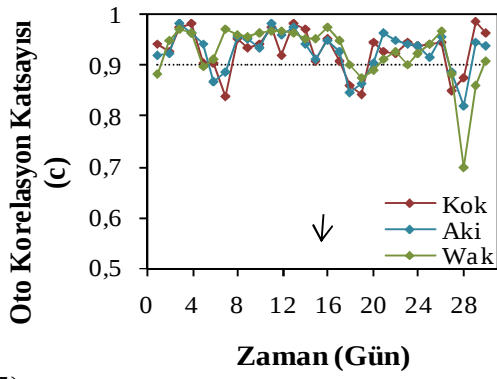
Sonuç olarak en çok değişimin gözlemlendiği depremlere bakıldığında, depremin büyüklüğünden ve derinliğinden çok, istasyona yakınlığı önemli olmaktadır.



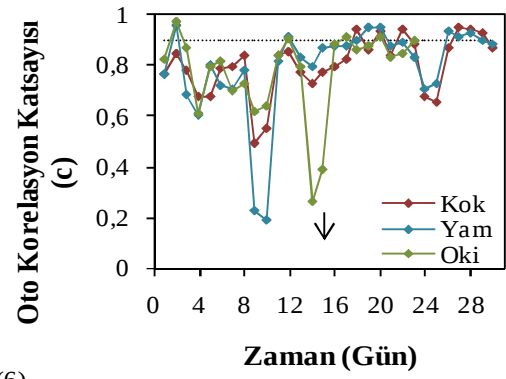
Şekil 4.5. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için OK sonuçları

Daha öncede ifade edildiği üzere korelasyon katsayısının 0,9 değerinin altına düşmesi normal kabul edilmeyip, bir anormallik olduğunu gösterir. Şekil 4.5’de verilen OK katsayısının değişimine bakacak olursak, 1 nolu deprem haricinde hepsinde bu değerin altına düşüşler mevcuttur. Depremlerin derinliği arttıkça oto korelasyon katsayısındaki değişimin azaldığını söylemek mümkündür. İçlerinde en derin kabul edebileceğimiz 1 nolu depremde değişim neredeyse yok denilebilirken, içlerinde en yüzeye yakın olan 3 nolu depremde değişim miktarı oldukça fazladır. Ancak depremin büyüklüğüyle böyle bir ilişki kurmak mümkün olmamıştır. her deprem ait data alınan istasyonların tepkisi benzerdir. Aynı zaman aralıkları için gösterdikleri değişim aynıdır. Korelasyondaki en büyük değişim miktarını veren deprem merkezine yakın olan istasyon değil, daha uzak olanı göstermiştir.

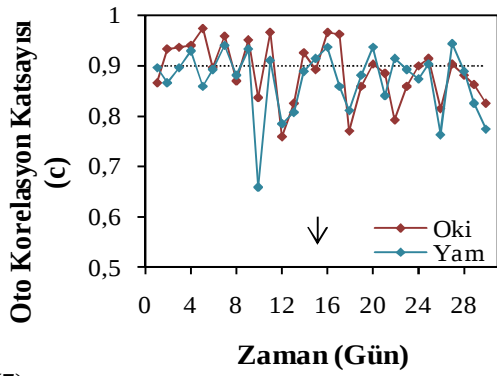




(5)



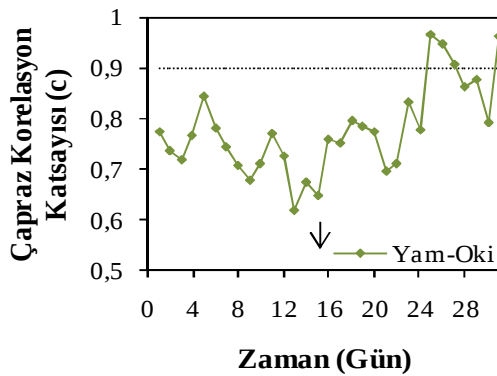
(6)



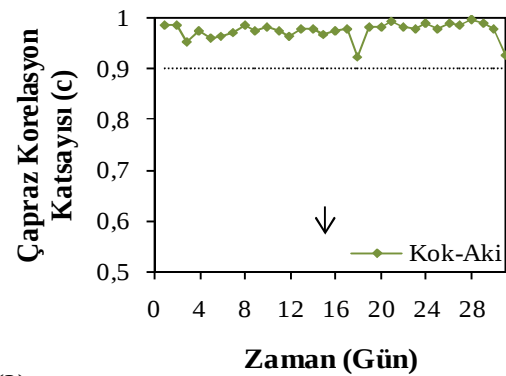
(7)

Şekil 4.6. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için OK sonuçları

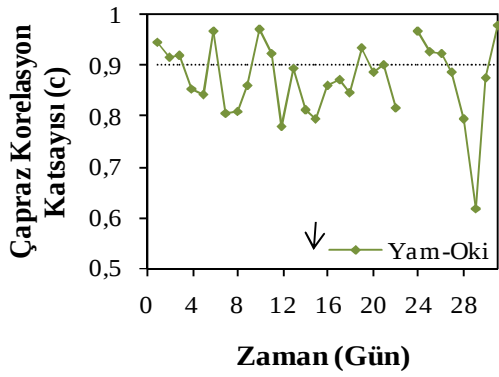
Bu kısımda incelenen depremler çok büyük olmayıp, yüzeye daha yakın depremlerdir. hepsinde de oto korelasyon katsayısında (Şekil 4.6) düşüşler olsa da sismik şok öncesi en büyük düşüşün gözlendiği 6 nolu deprem olup, 7 nolu depremle aynı büyüklükte olmasına rağmen yüzeye daha yakındır. Her bir depreme ait hem deprem hazırlık alanı içinde olan hem de olmayan istasyonlar aynı tepkiyi vermişlerdir.



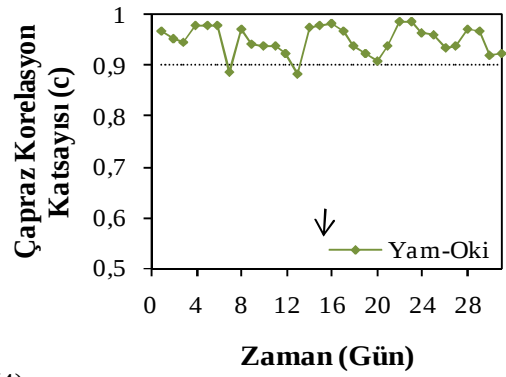
(1)



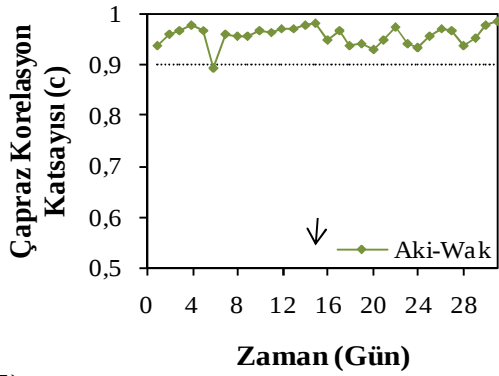
(2)



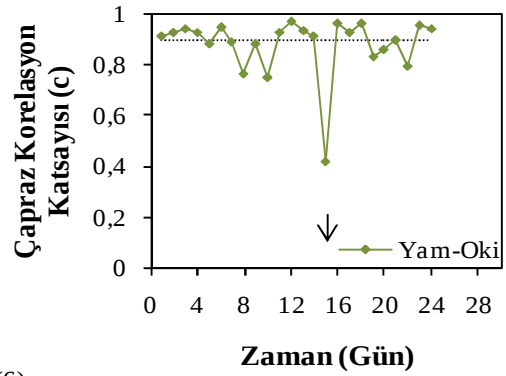
(3)



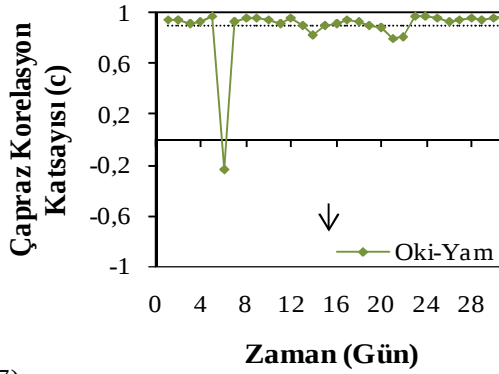
(4)



(5)



(6)



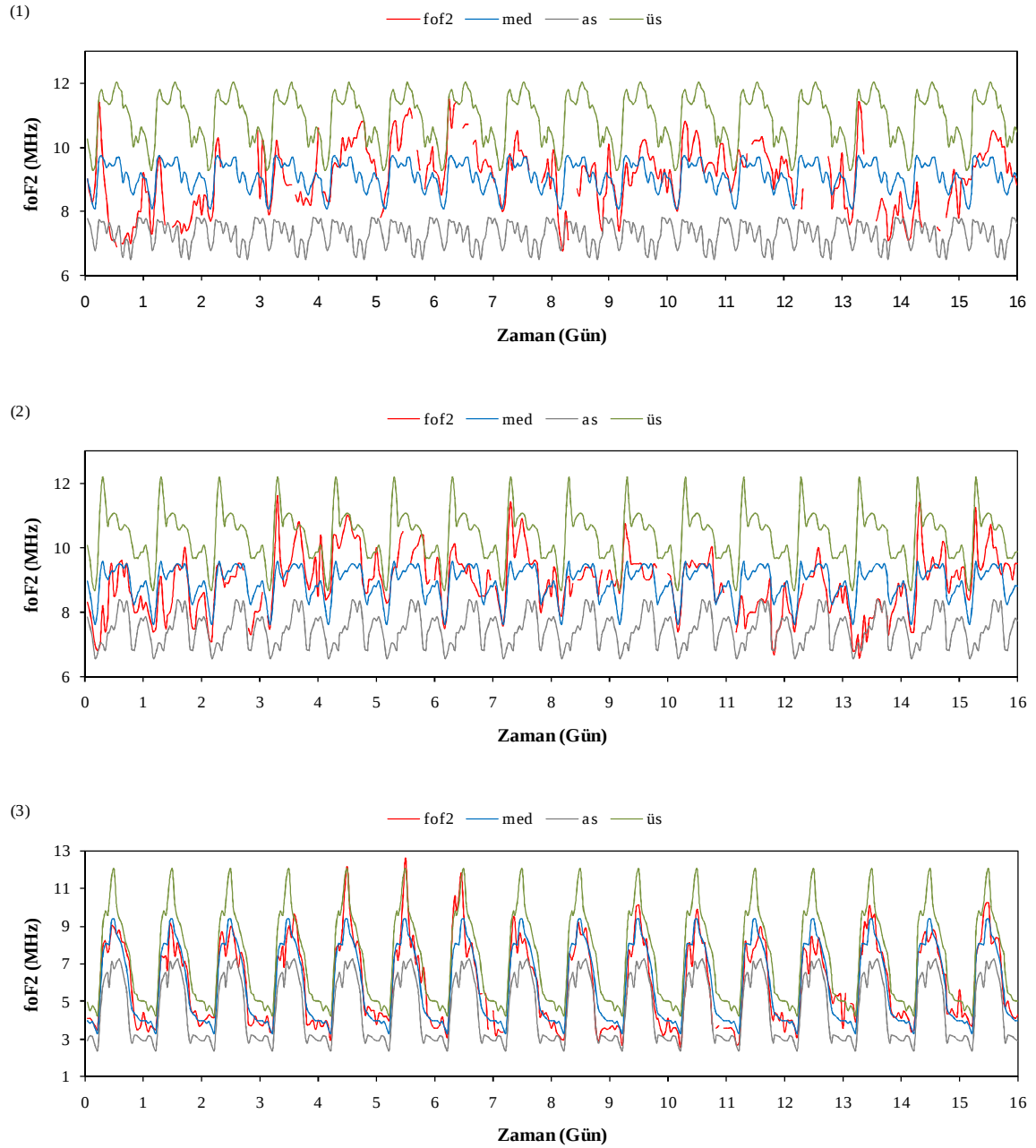
(7)

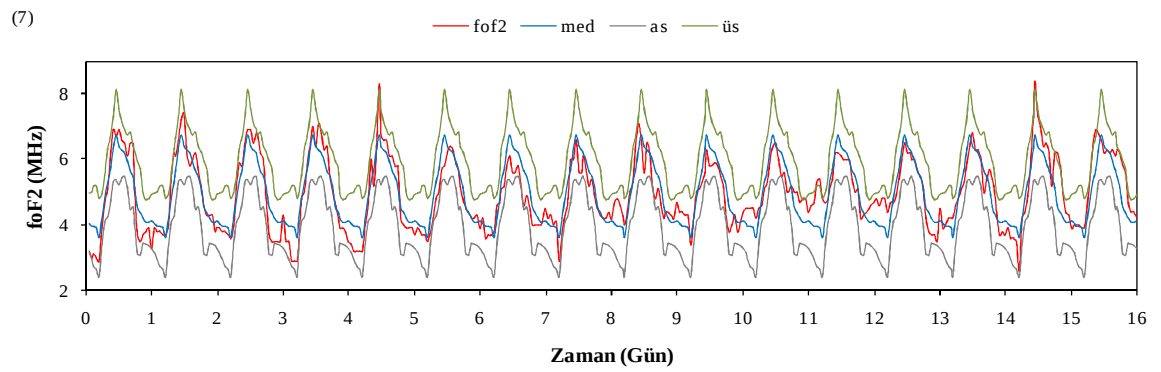
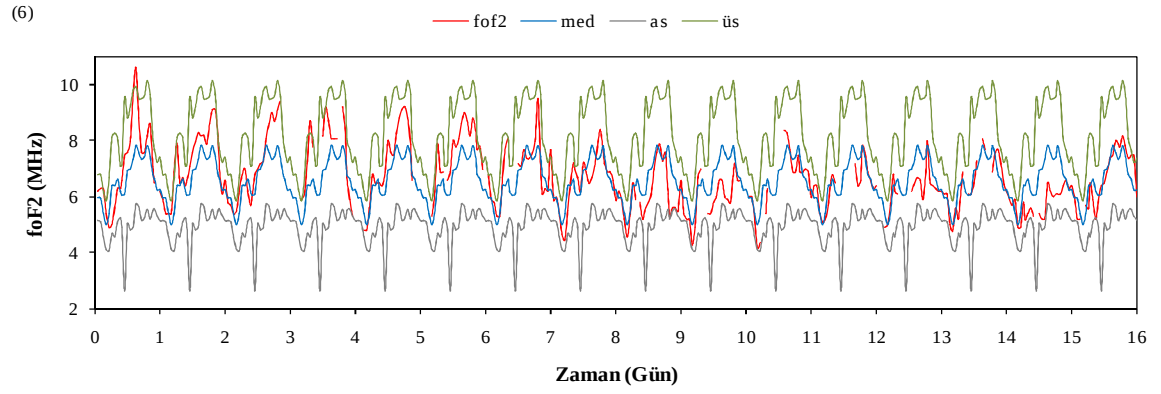
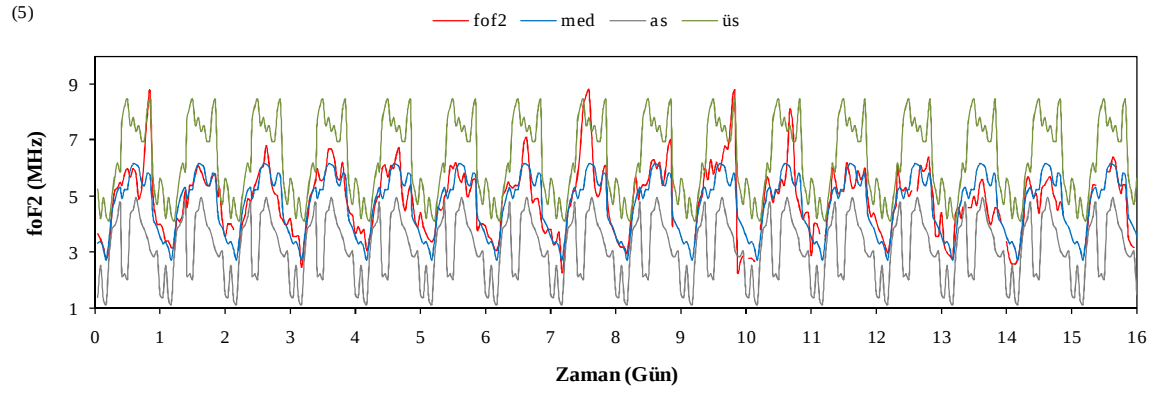
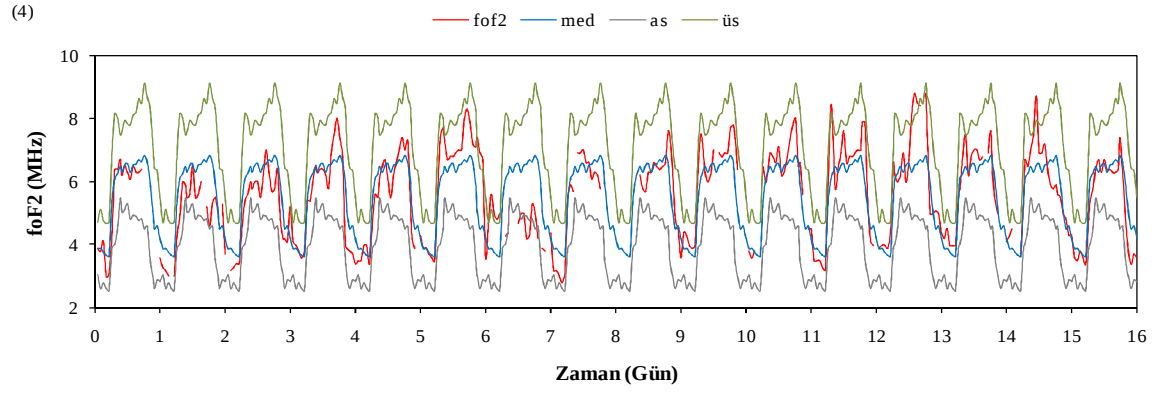
Şekil 4.7. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için ÇK sonuçları

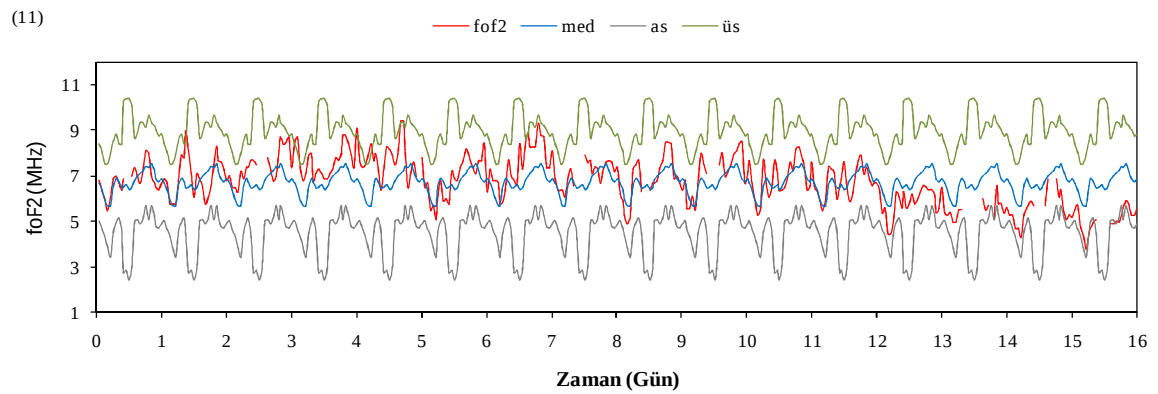
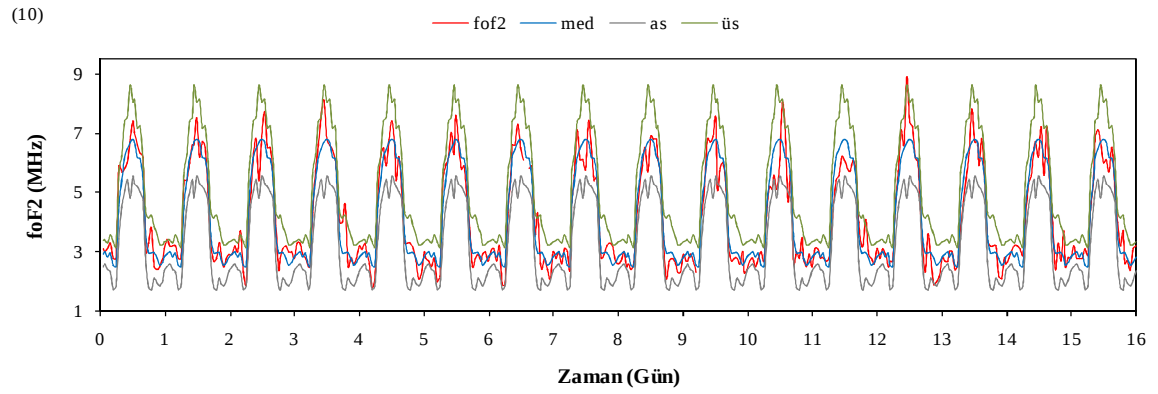
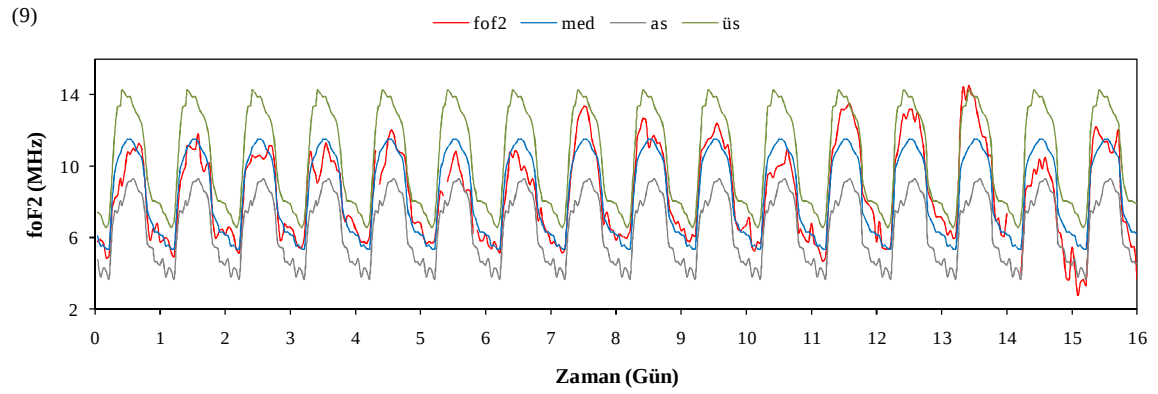
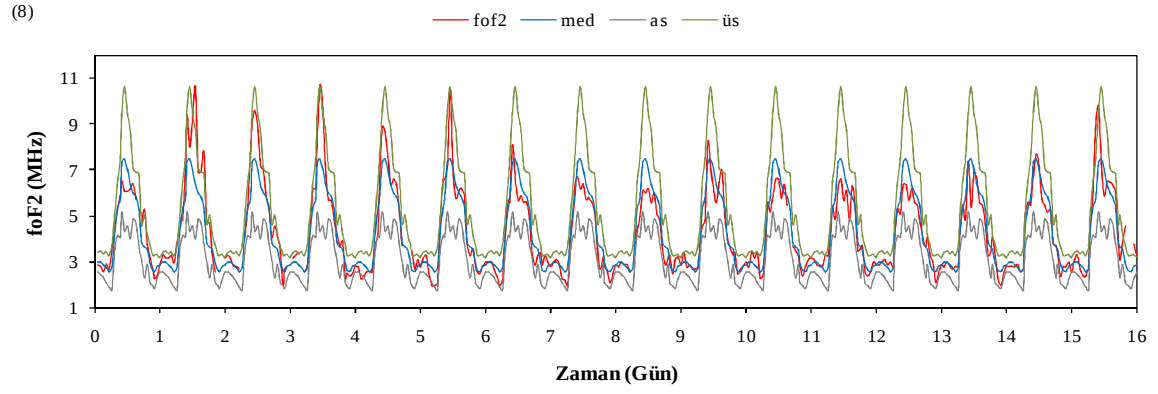
Oto korelasyon yöntemi, günler arasındaki ilişkiye bakarak bir anormallik olup olmadığını verir. Katsayının 0,9 değerinin altına düşmesi bu anormalliğin göstergesidir. Ancak anormalliğin birçok sebebi olabilir ki, bu çalışmamızda buna katkısı olabilecek en büyük etken Güneş ve jeomanyetik fırtınalardır ki etkileri küreseldir. Daha önce ifade edilen gerekli şartları sağlayan iki veya daha fazla istasyon, Güneş veya jeomanyetik fırtına olması durumunda aynı tepkiyi gösterirken, deprem kaynaklı bir değişim deprem merkezine daha yakın, deprem hazırlık alanı içinde olan istasyon için daha etkili olmalıdır.

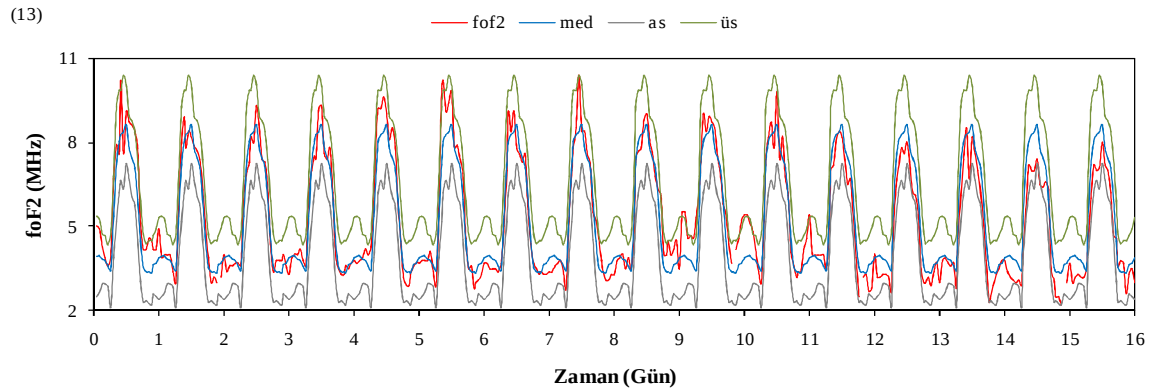
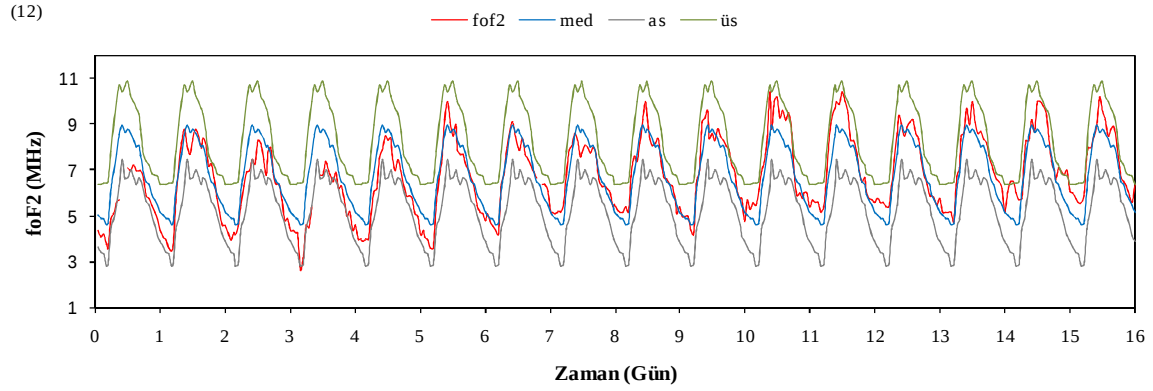
böylece iki istasyon arasında çapraz korelasyon yönteminin (Şekil 4.7) uygulanmasıyla, korelasyon katsayısındaki düşüşler sismik şok kaynaklı olabilir. Bu bölümdeki depremler içerisinde 2, 4 ve 5 nolu depremlerin çapraz korelasyon katsayısı normal sınırlar içerisinde kalmış, kayda değer bir değişim göstermemiştir. En büyük düşüşün gözlemlendiği ise 6 ve 7 nolu depremlerdir.

4.5 Standart Sapma Analizi







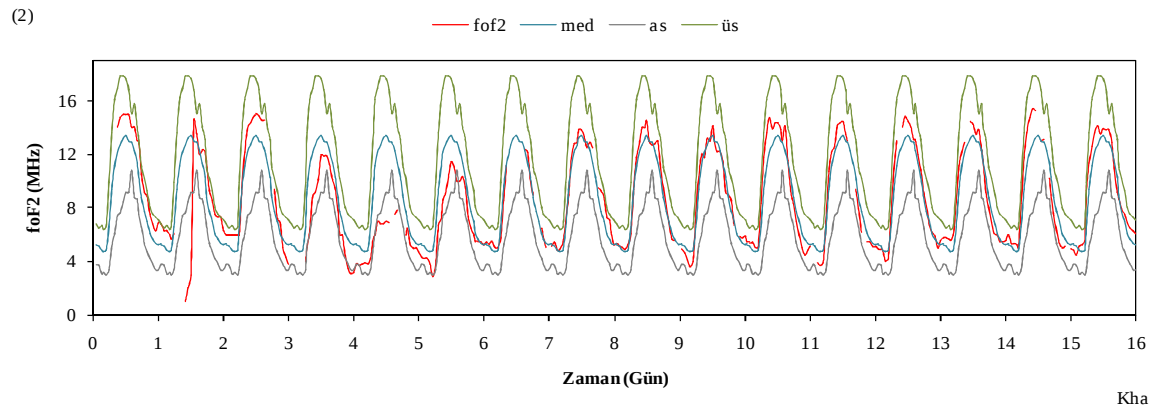
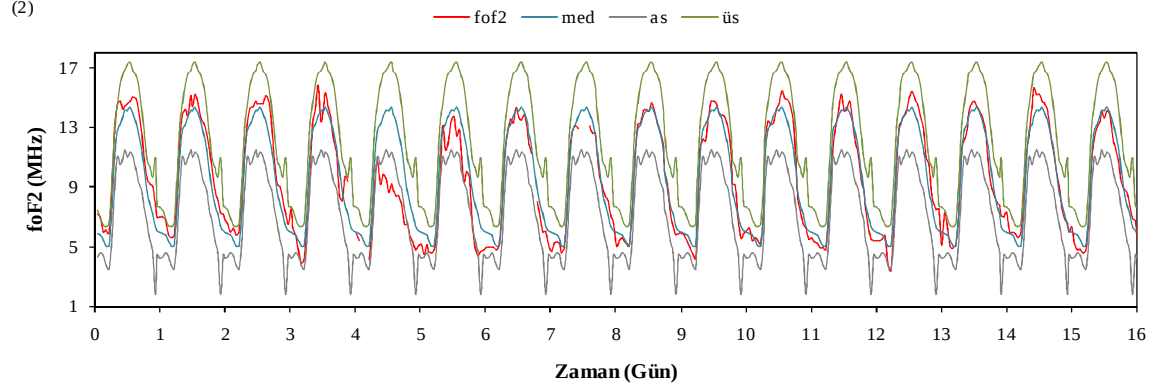
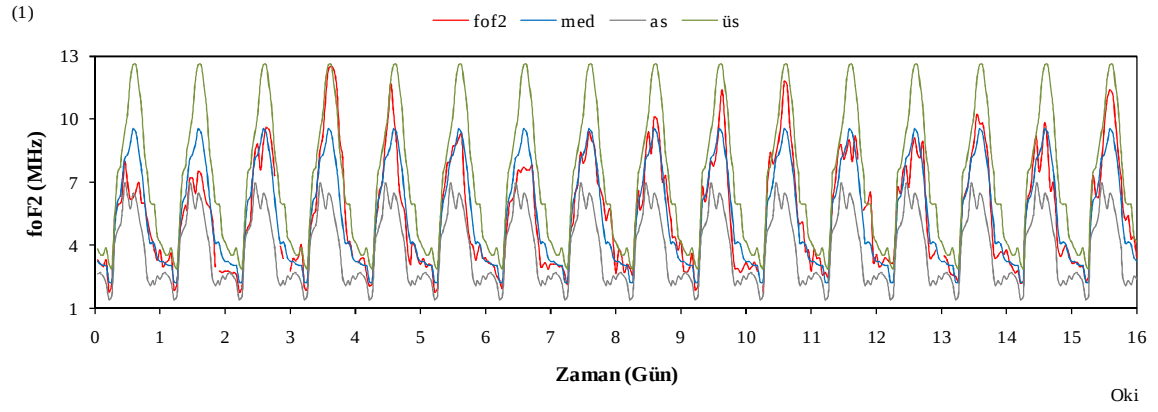
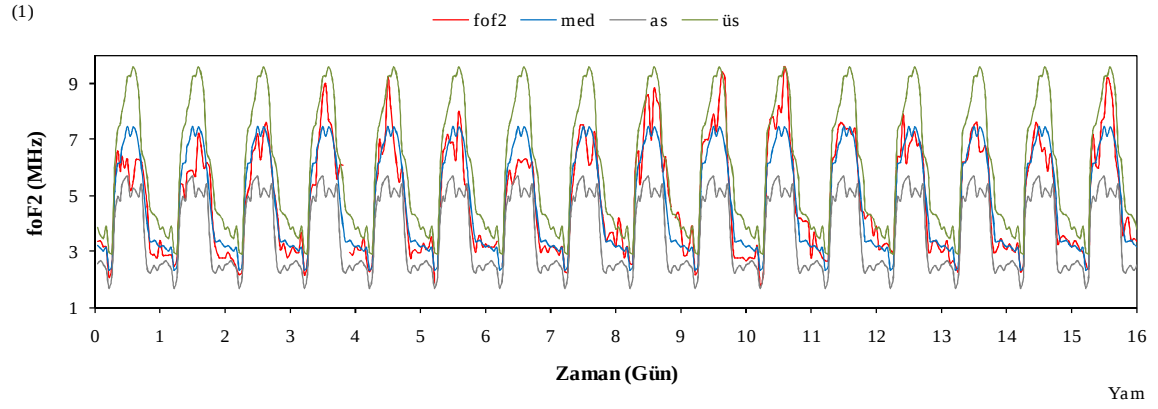


Şekil 4.8. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için SS analizi sonuçları

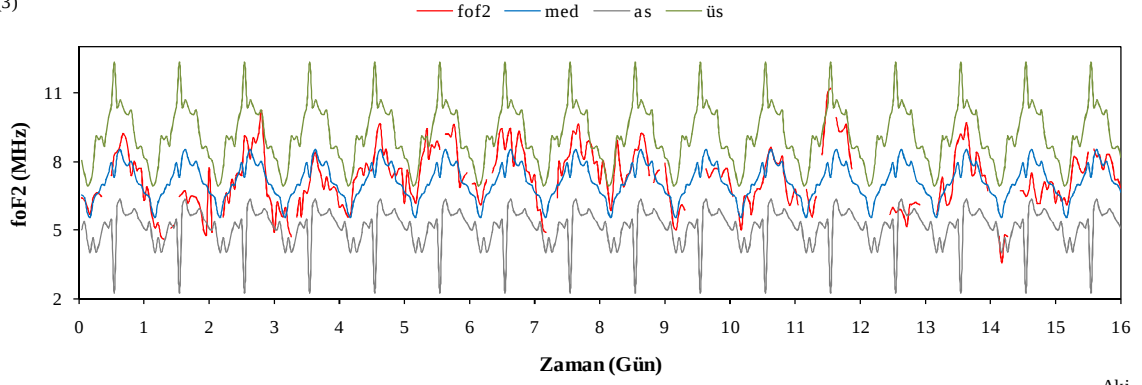
Depremin meydana geldiği gün ve 15 gün öncesi baz alınarak yapılan bu analizde, bu süre içinde kritik frekans değerleri, kendi medyanı ile birlikte 16 günlük standart sapması üzerinden elde edilen alt ve üst sınırlara göre değerlendirilerek, değişimine bakıldı. Kritik frekansın bu sınırları geçmesi anormal kabul edilmiştir.

Şekil 4.8’de görüleceği üzere, her bir deprem için kritik frekans değerleri neredeyse tüm günlerde kendi 16 günlük medyan değerlerinden belirgin bir şekilde değişirken, depremlerin çoğunda alt ve/veya üst sınır değerlerini geçmektedir.

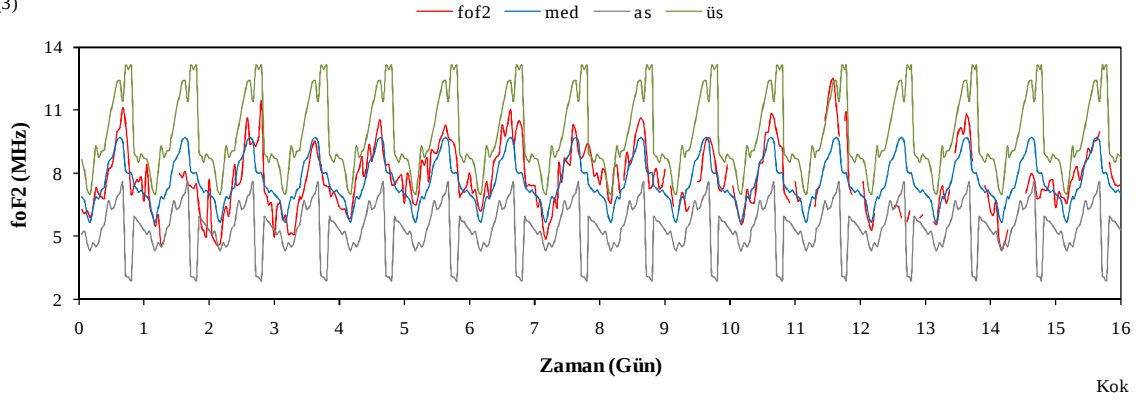
İstasyonun deprem merkezine uzaklığı arttıkça, değişimlerin görülme sıklığı ve miktarı ters orantılı bir şekilde değişmektedir. Ancak doğrudan depremin büyüklüğü ve derinliğiyle ilişki kurmak zordur.



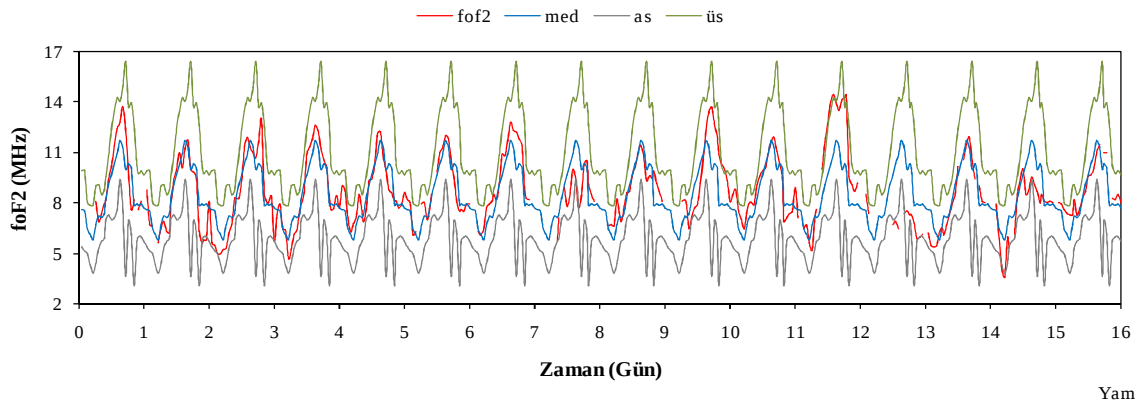
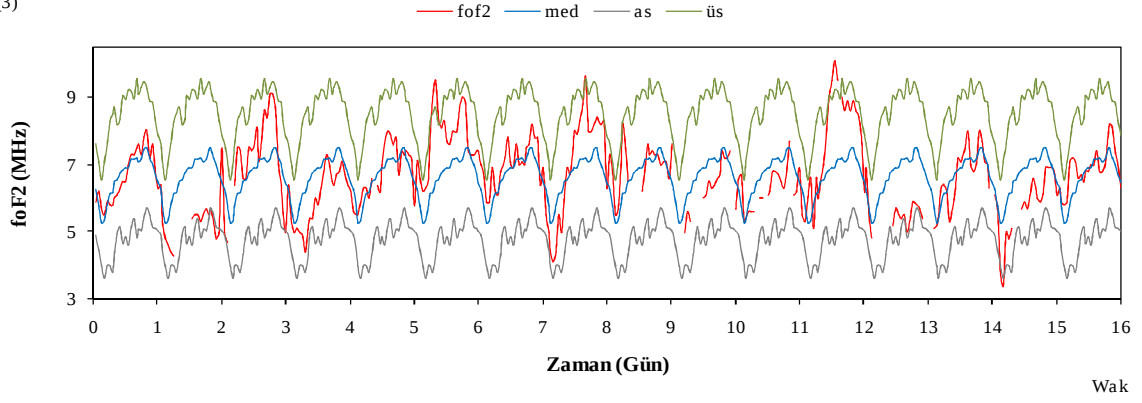
(3)

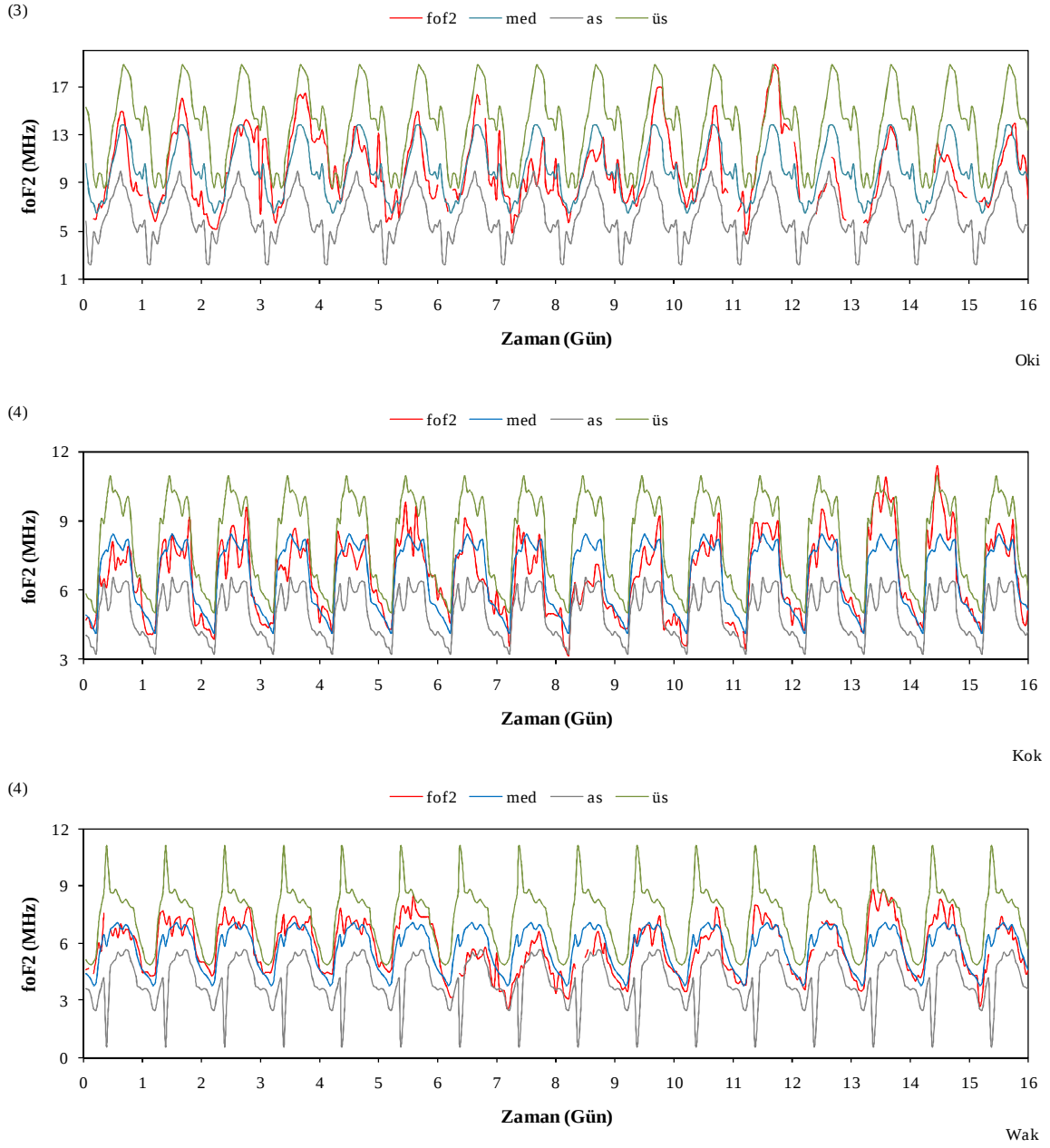


(3)



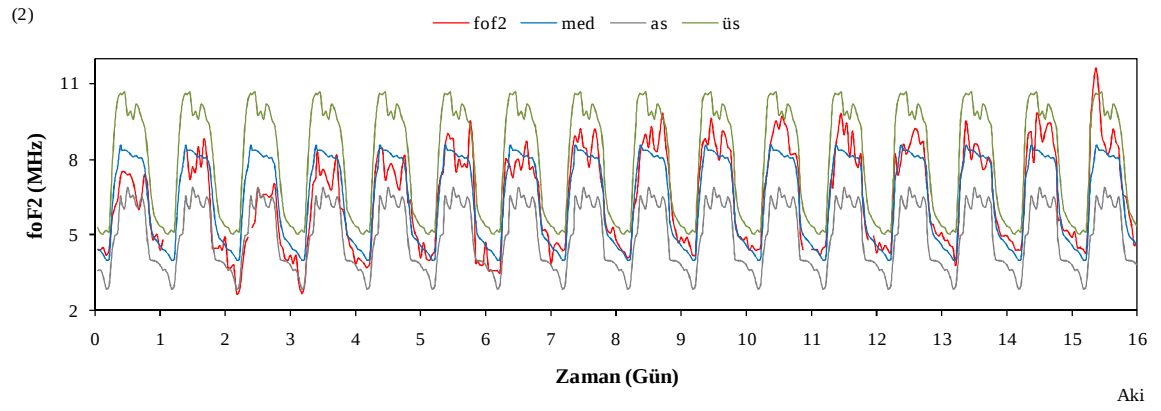
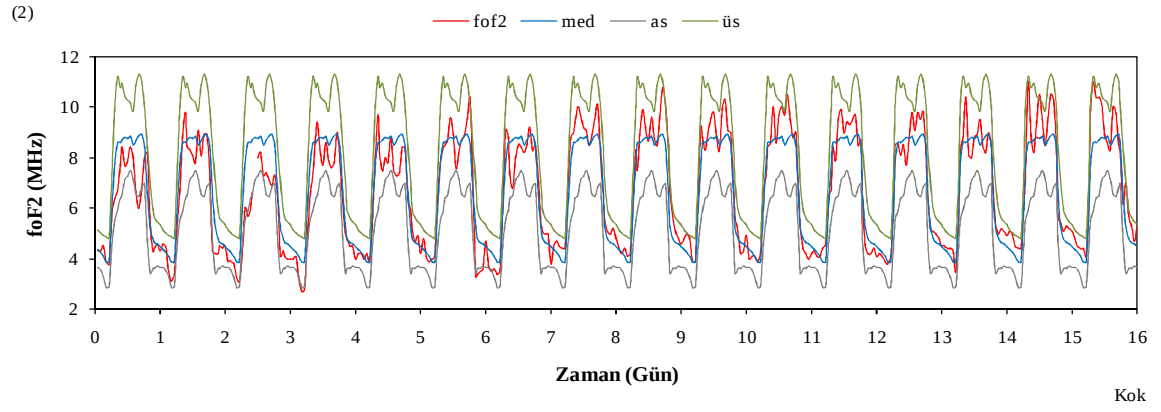
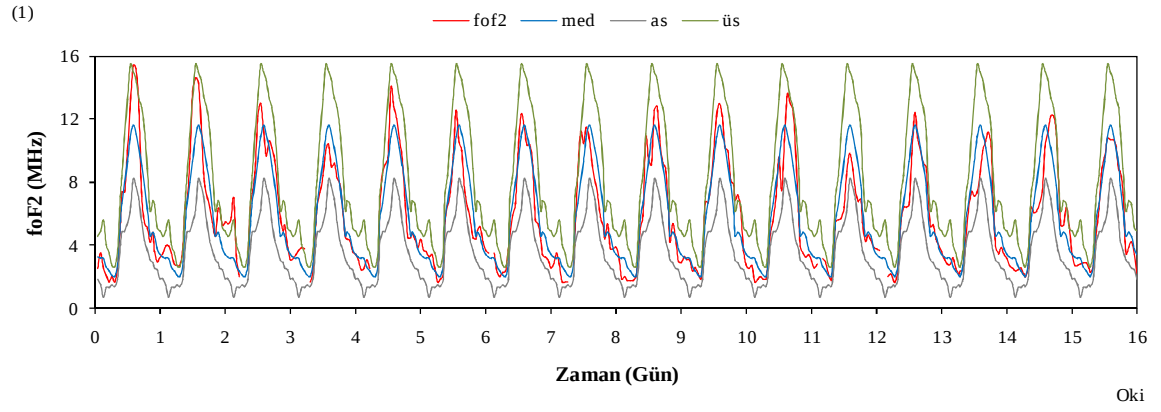
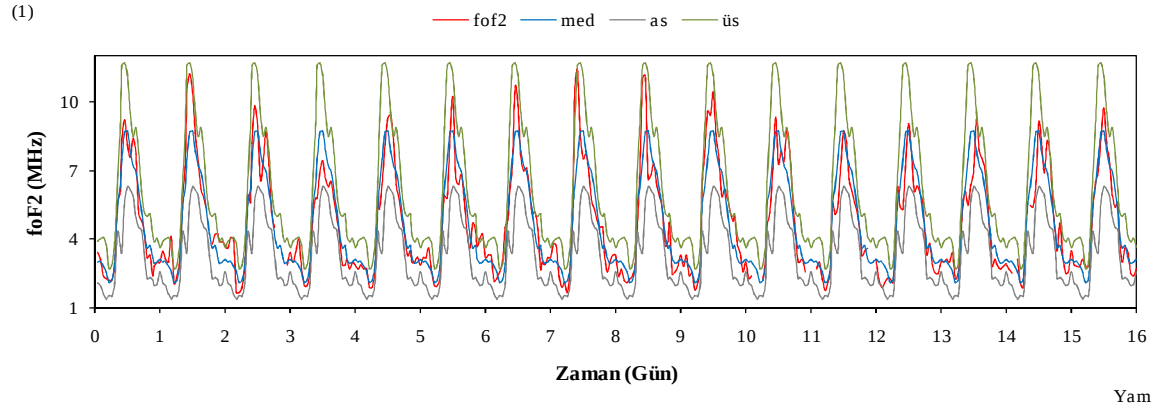
(3)

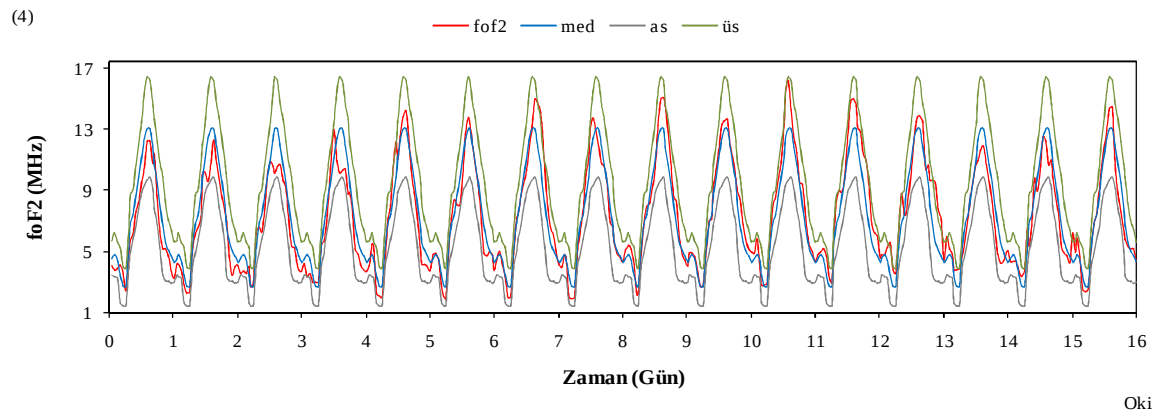
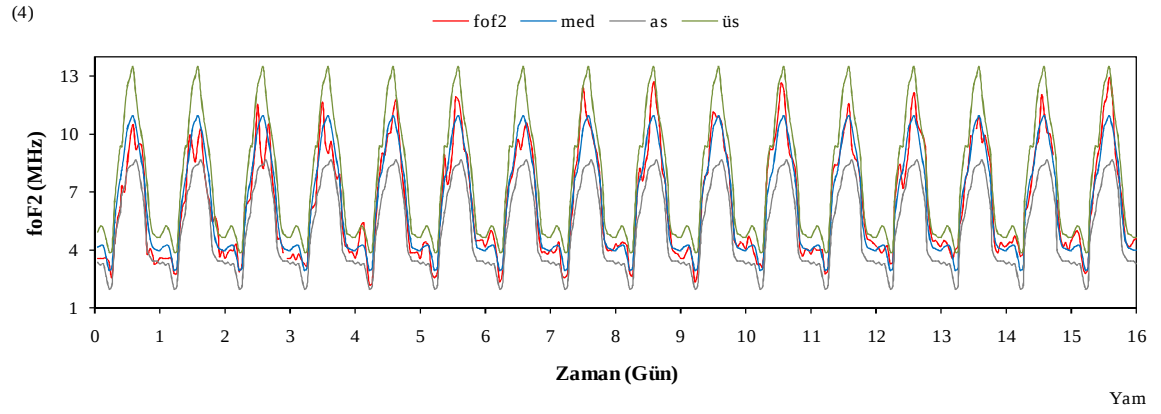
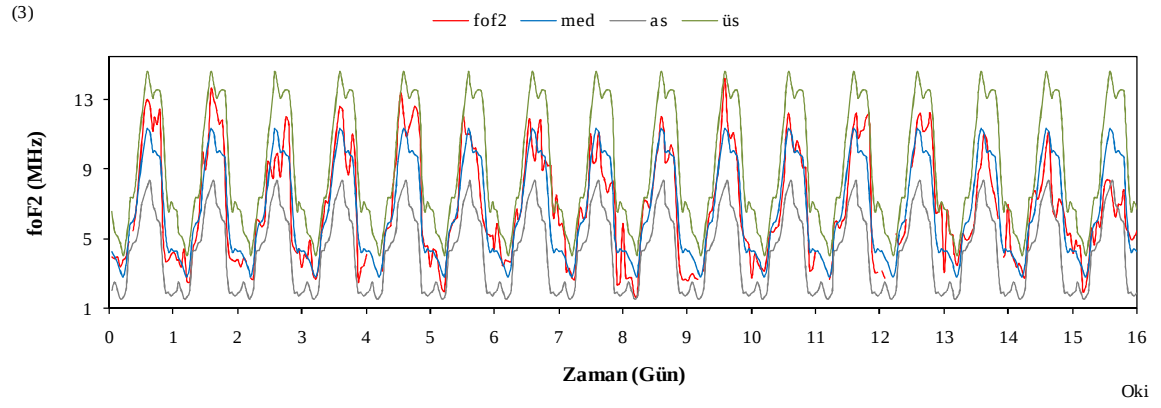
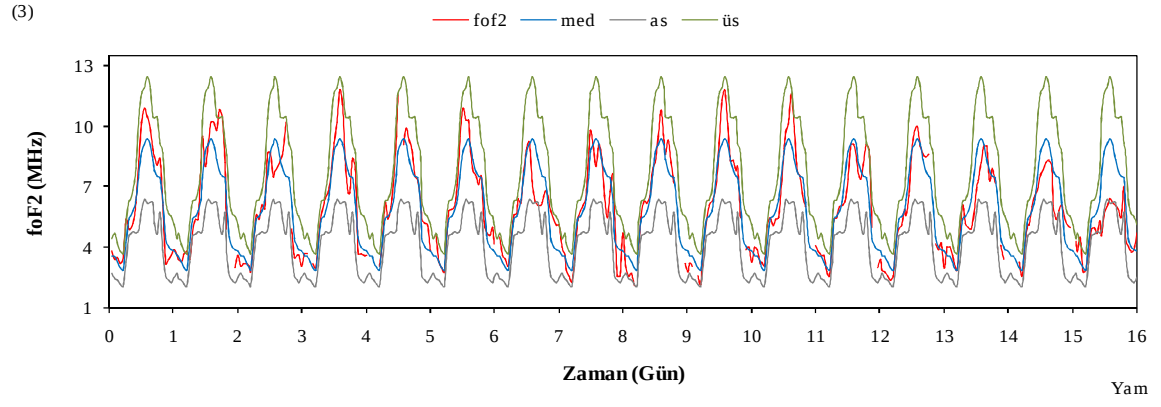


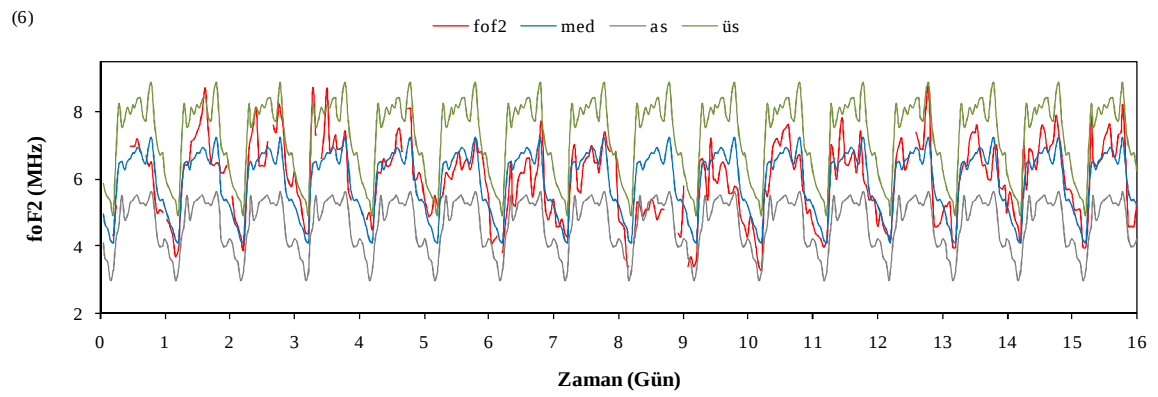
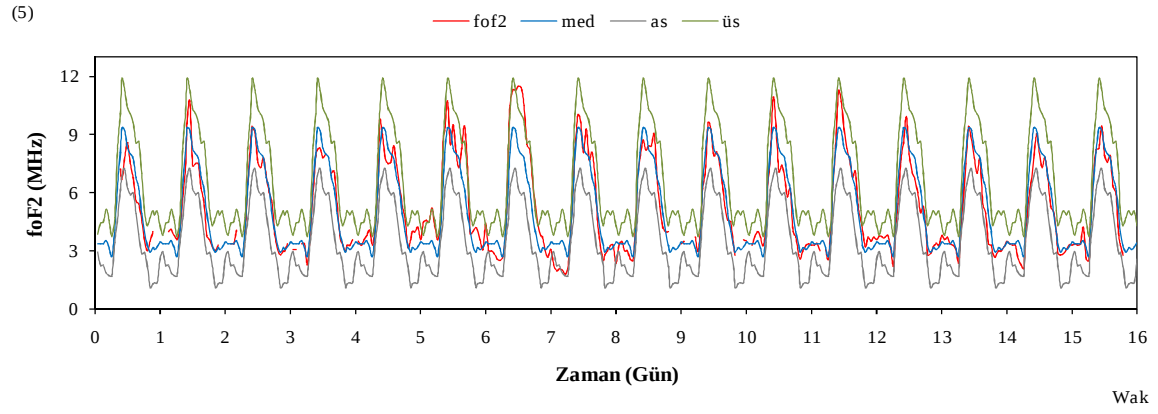
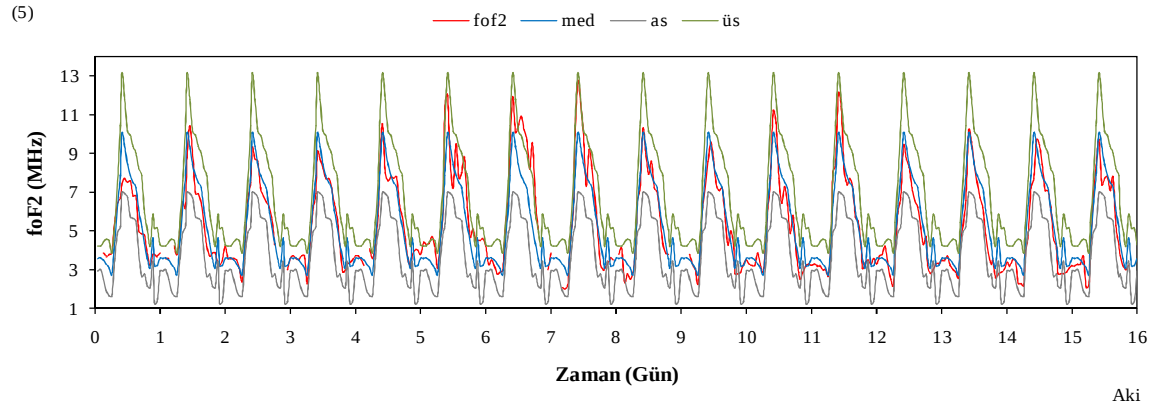
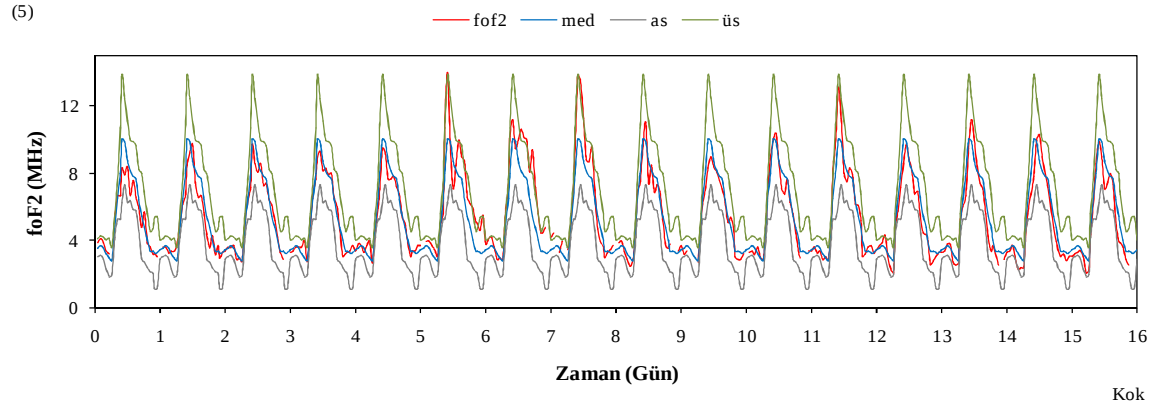


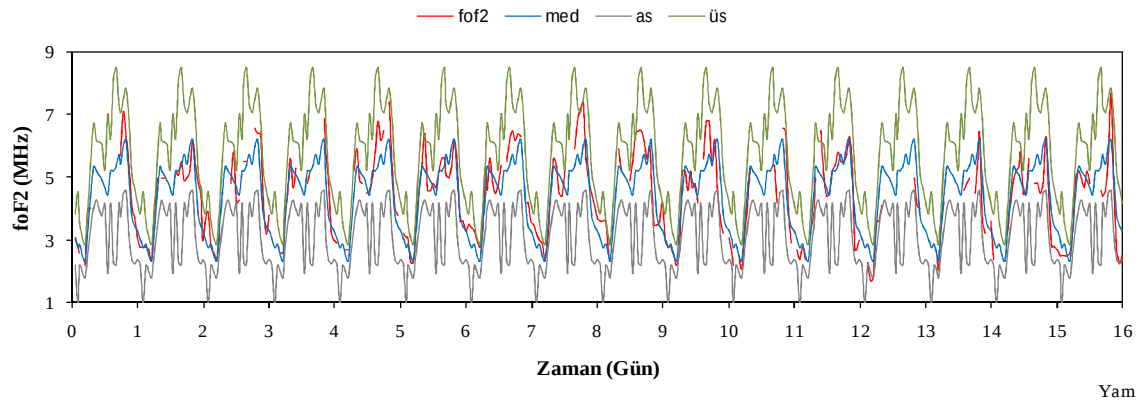
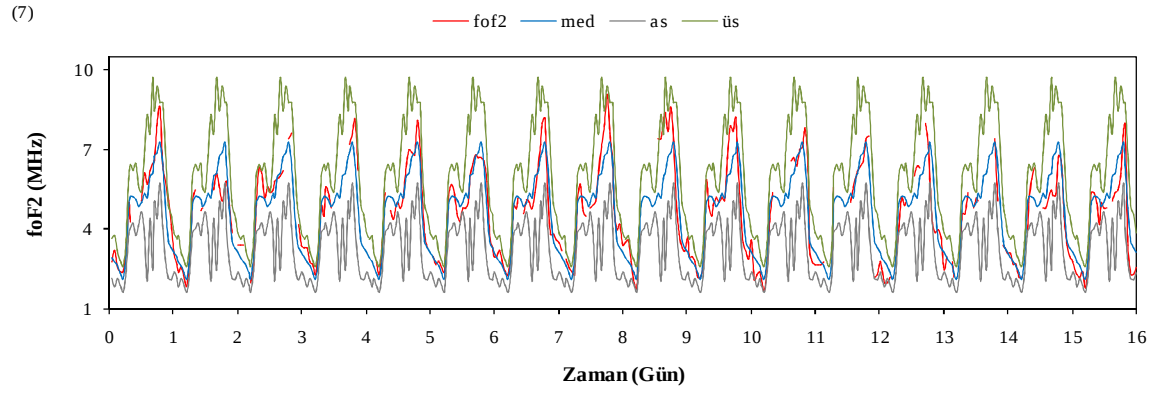
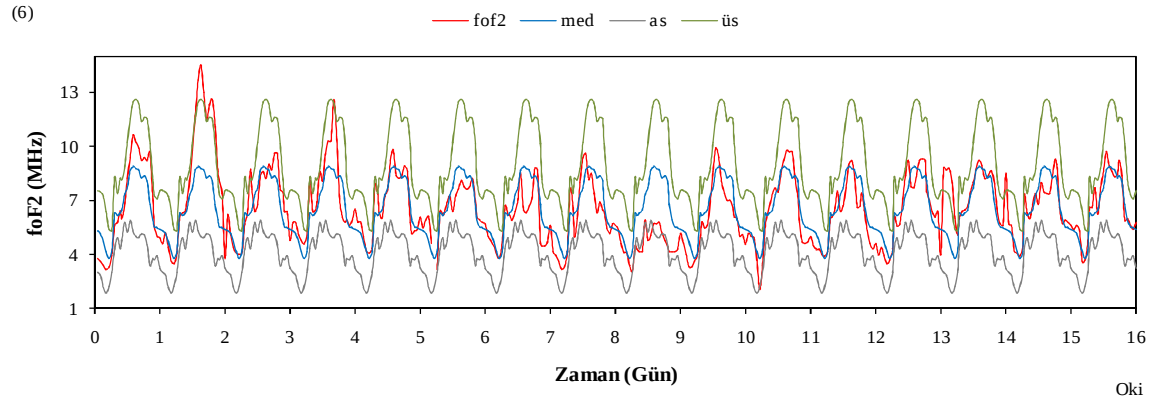
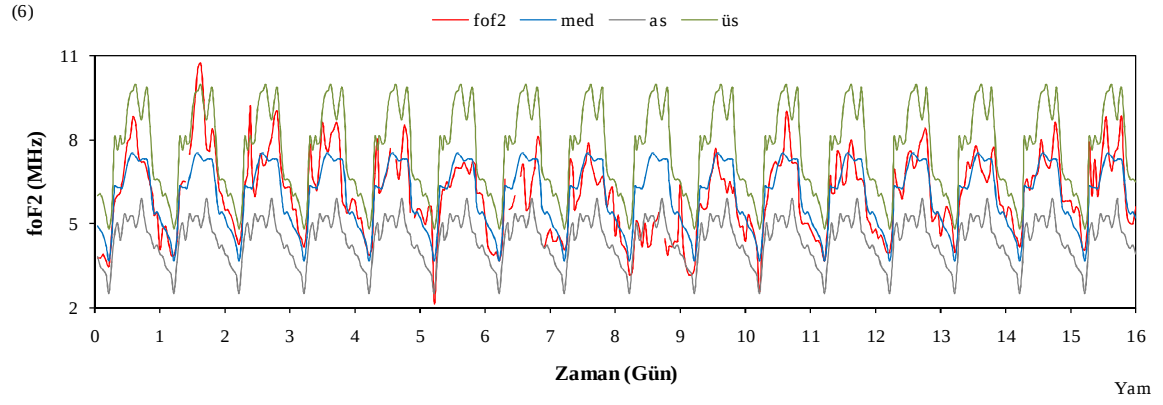
Şekil 4.9. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için SS analizi sonuçları

Şekil 4.9'da verilen SS analizine bakıldığında, tüm depremlerde deprem öncesi belirlenen periyot süresince her biri için belirlenen alt ve üst sınır değerlerine yakın, çoğunda bu değerlerin geçildiği değişimler görülmektedir. Her bir deprem için anormalliğin görüldüğü günler, deprem merkezine olan uzaklık ne olursa olsun, aynı günlere karşılık geldiği görülmektedir. Genel olarak deprem merkezine yakın istasyondan uzaklaştıkça daha az değişim görülmektedir.





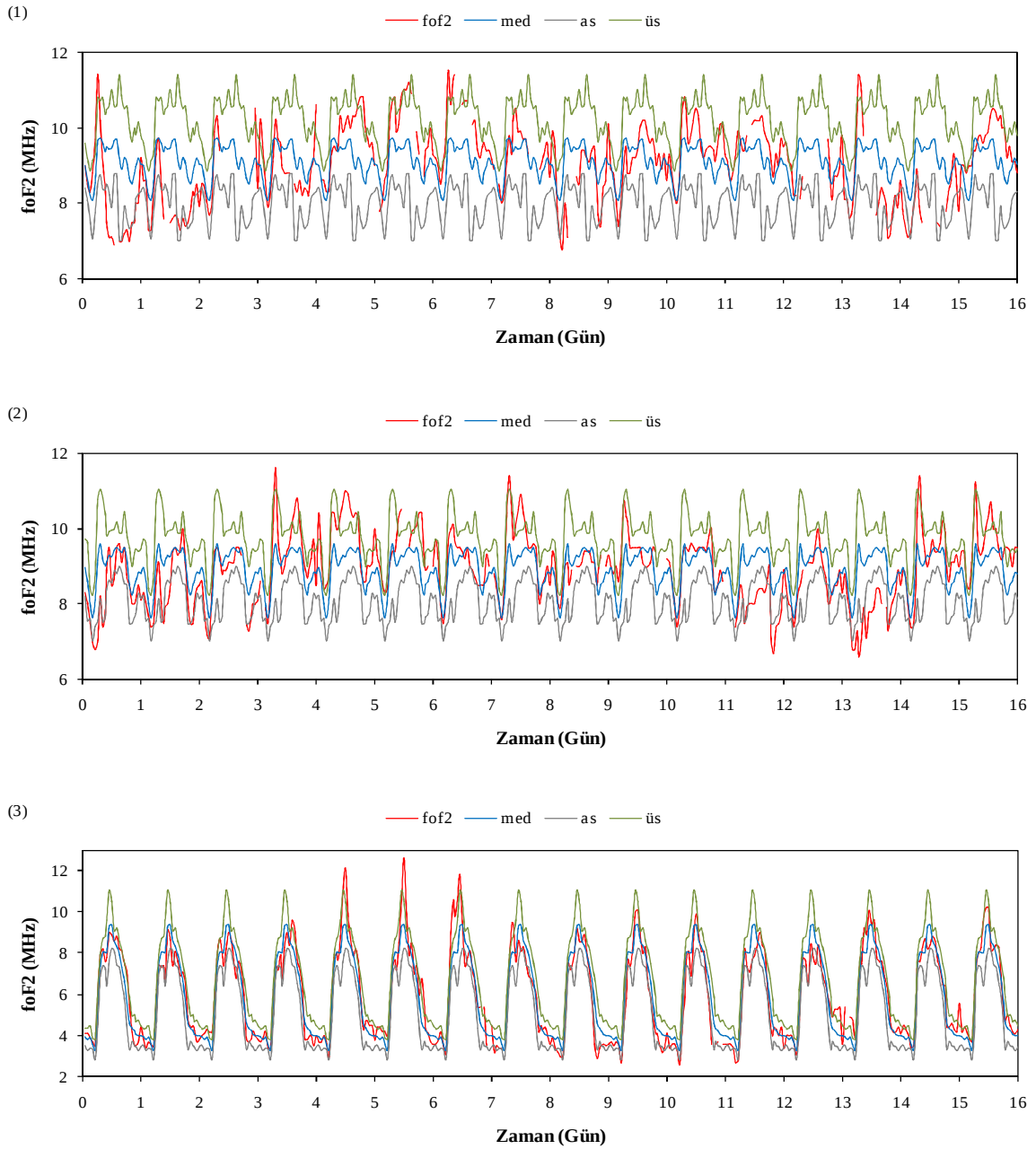


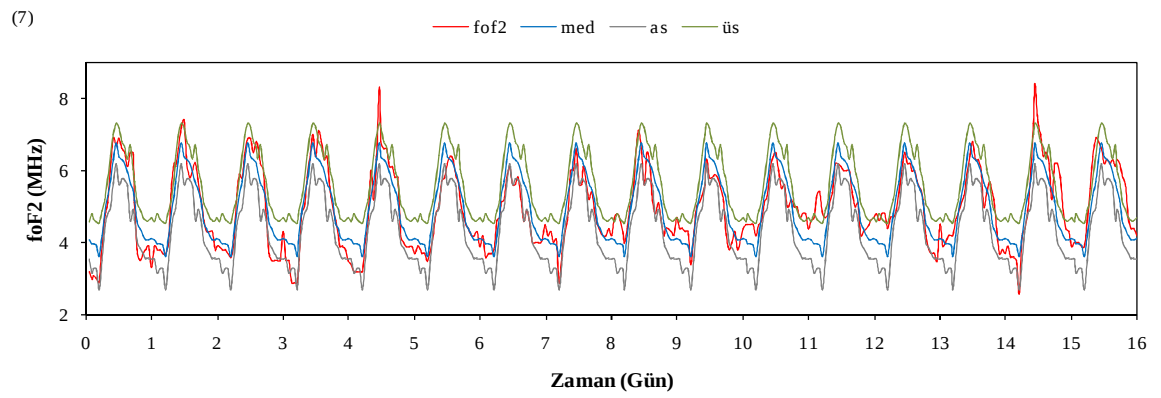
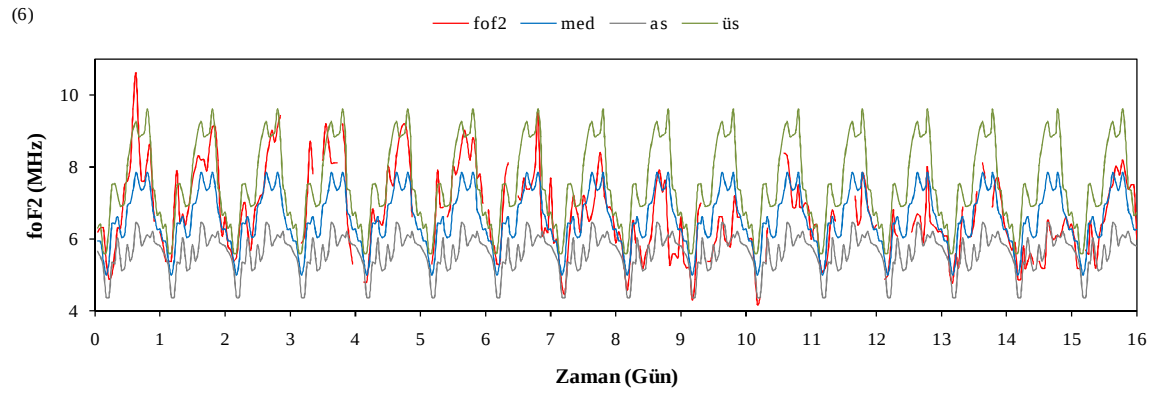
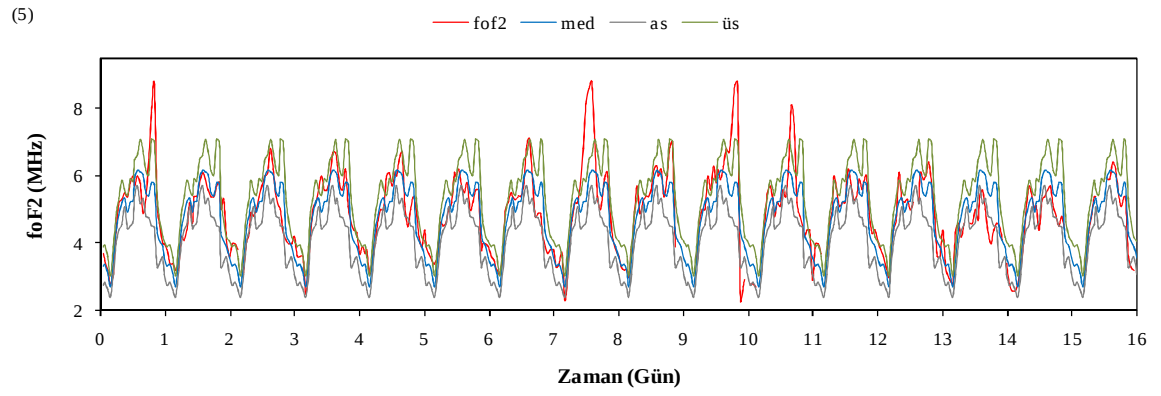
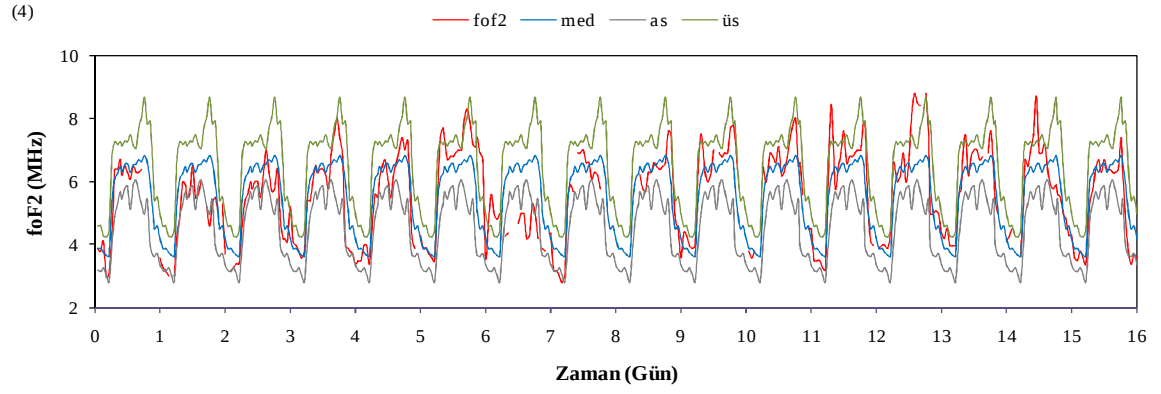


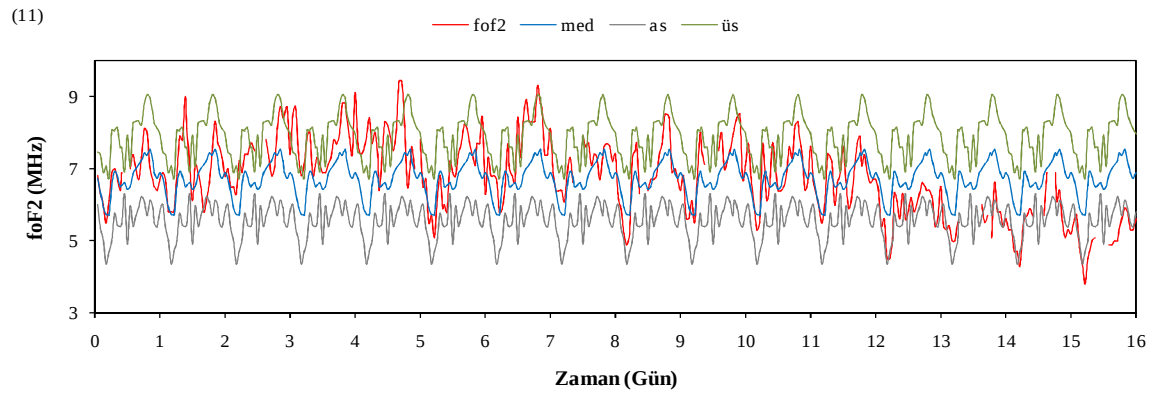
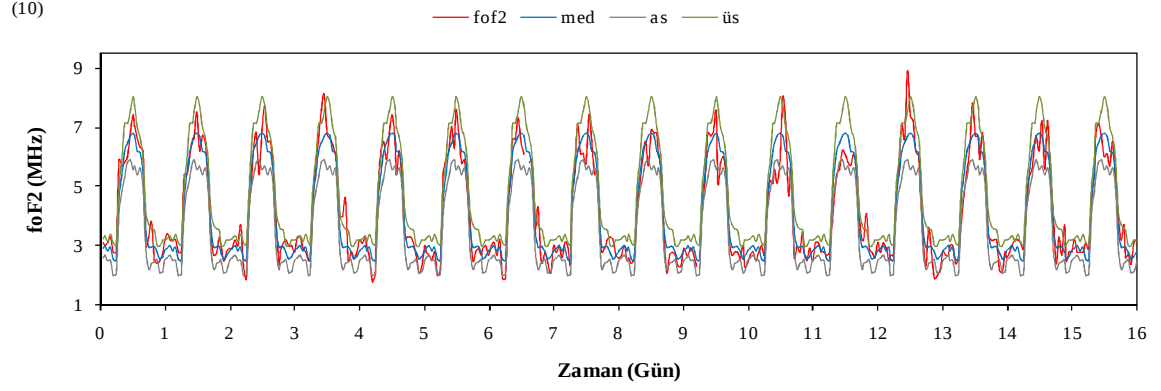
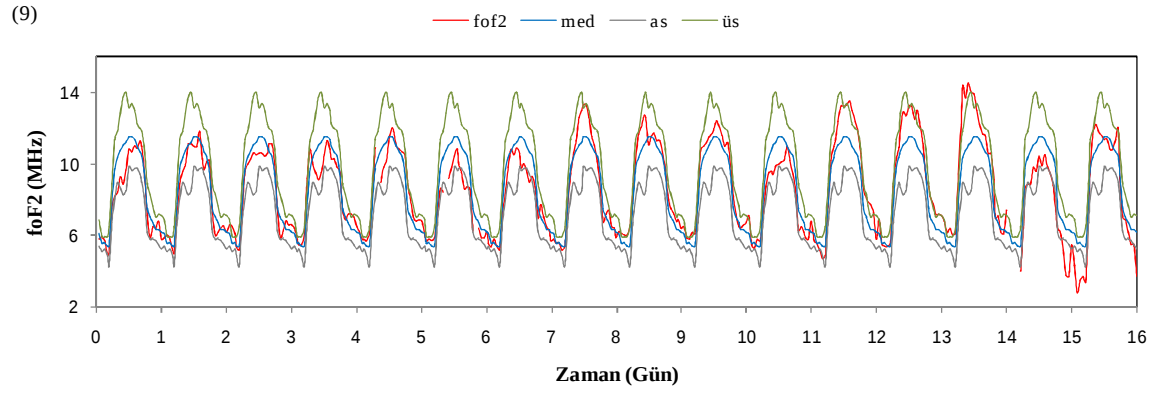
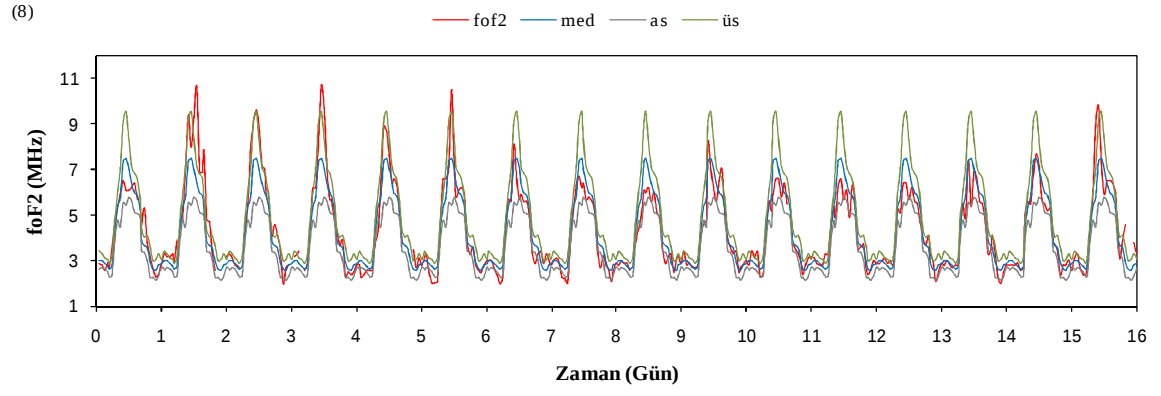
Şekil 4.10. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için SS analizi sonuçları

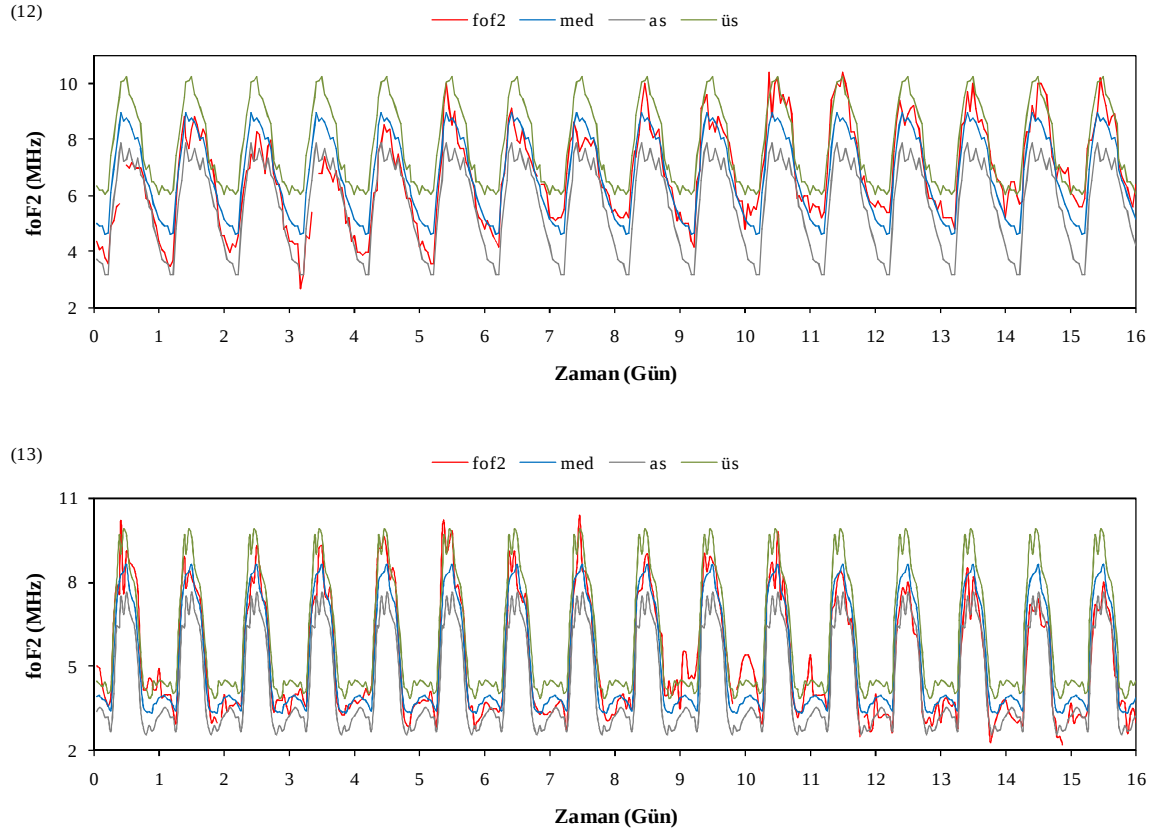
Şekil 4.10'da verilen SS analizi sonuçlarına bakıldığında tüm depremler için belirlenen periyot süresince, kendi alt ve üst sınırları civarında, zaman zaman bu sınırları aşan değişimler görülmektedir. Her bir depreme ait veri alınan istasyonlar için tedirginliğin görüldüğü günler aynıdır. Genel olarak deprem merkezine yakın istasyonlar için değişimin büyüklüğü daha büyükse de bazı günlerde uzak istasyondaki değişim daha büyük gözlenmiştir.

4.6 Çeyrekler Arası Oran Analizi



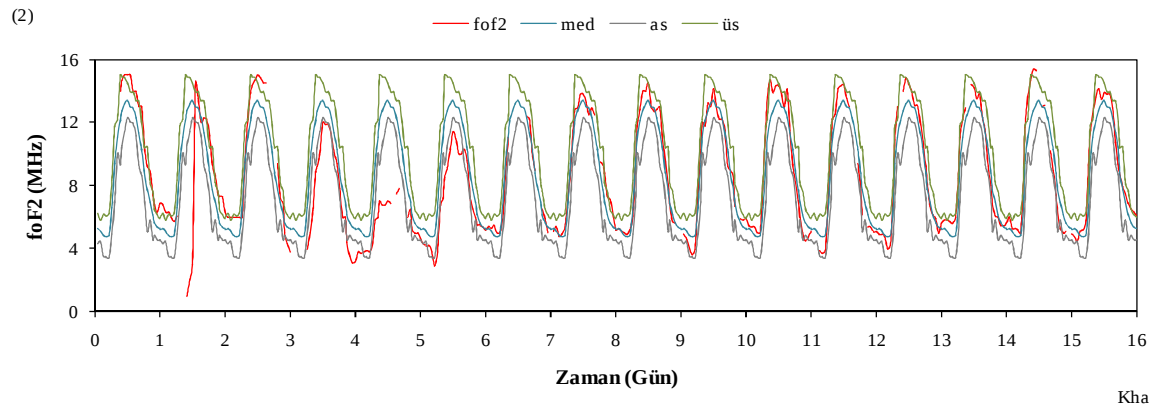
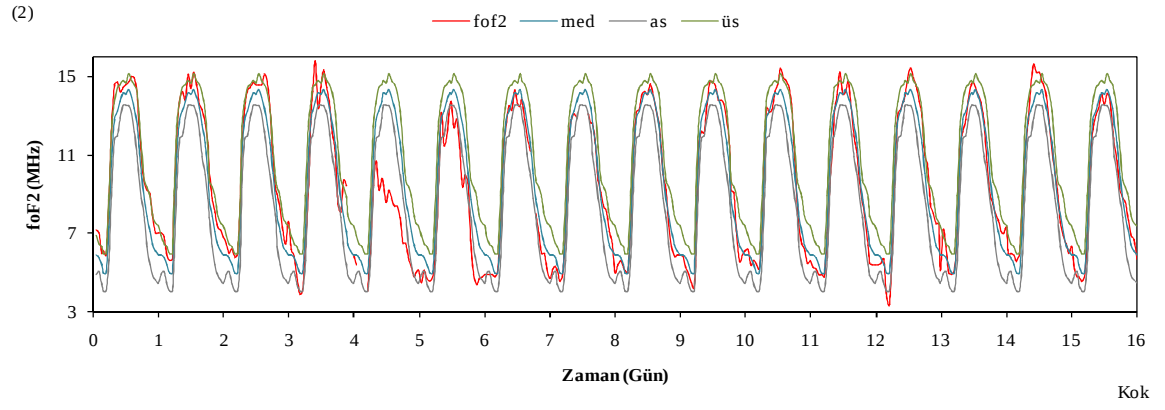
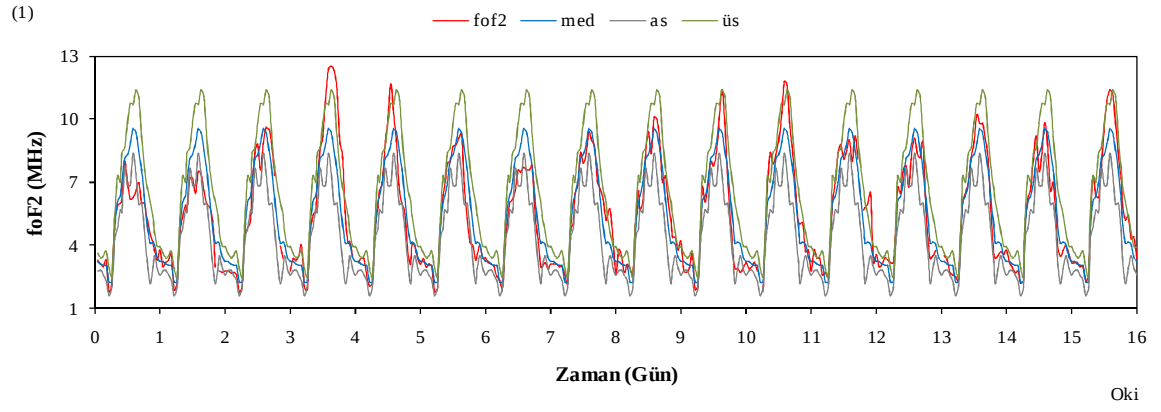
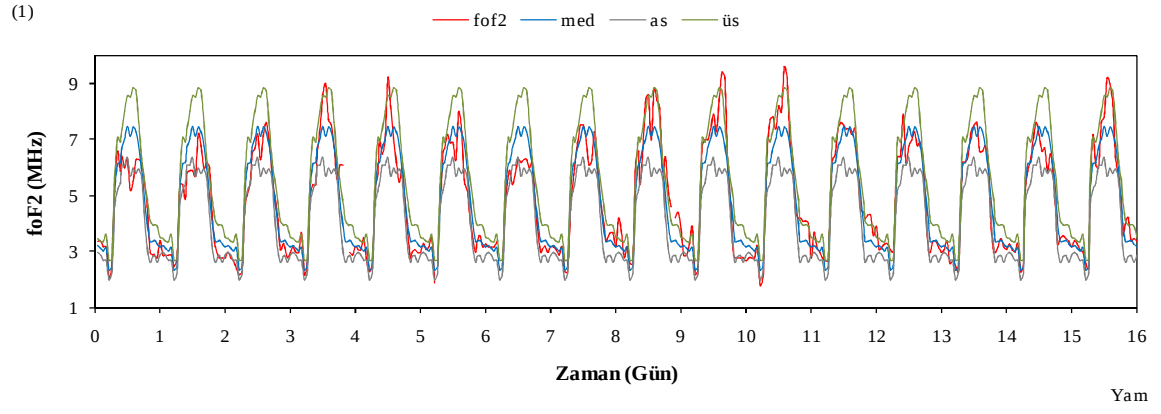


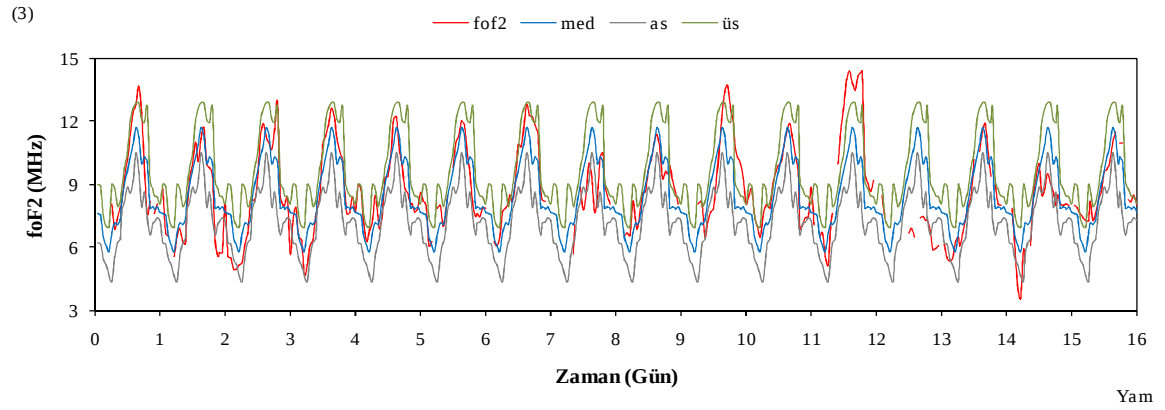
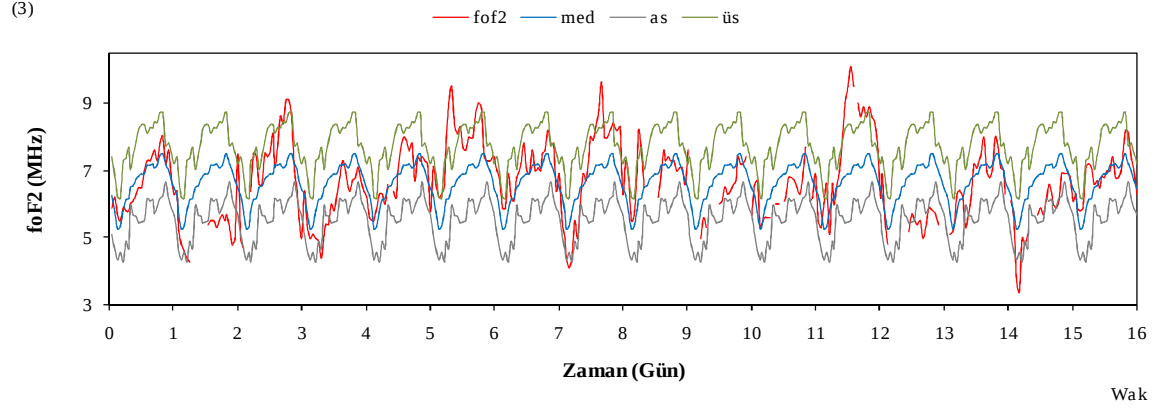
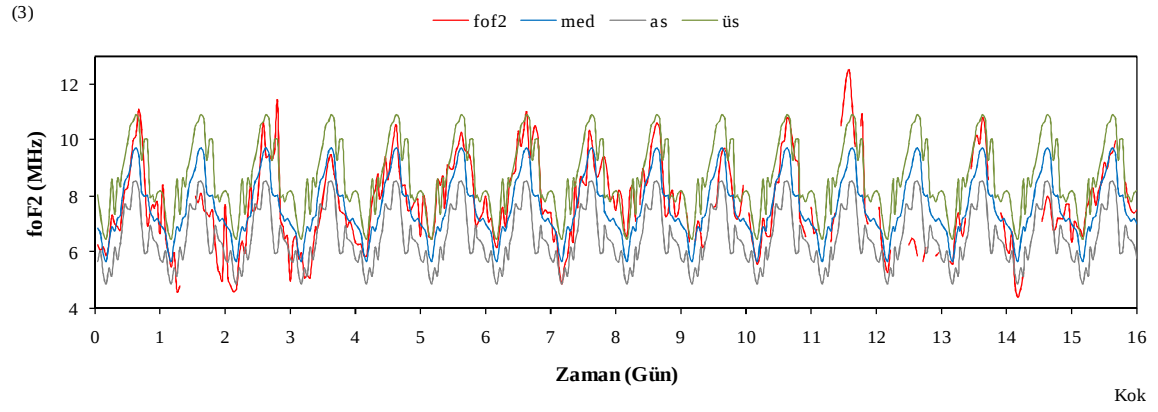
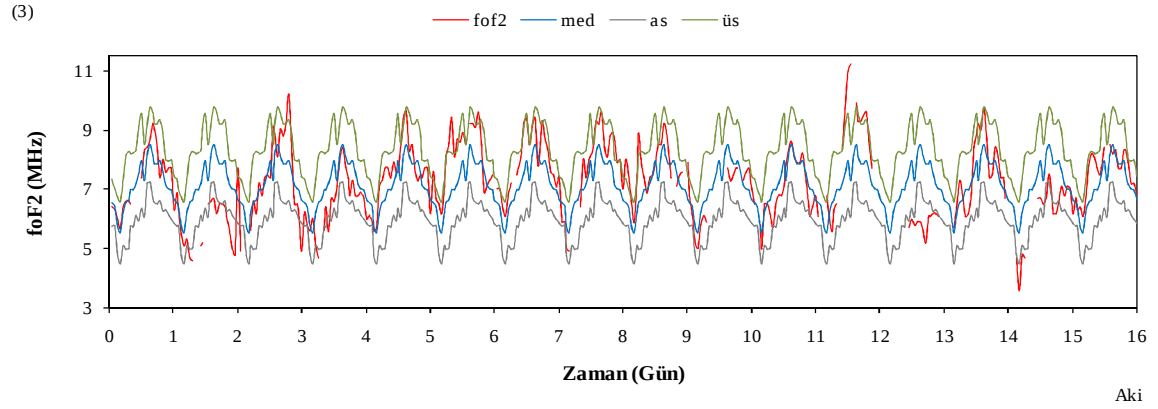


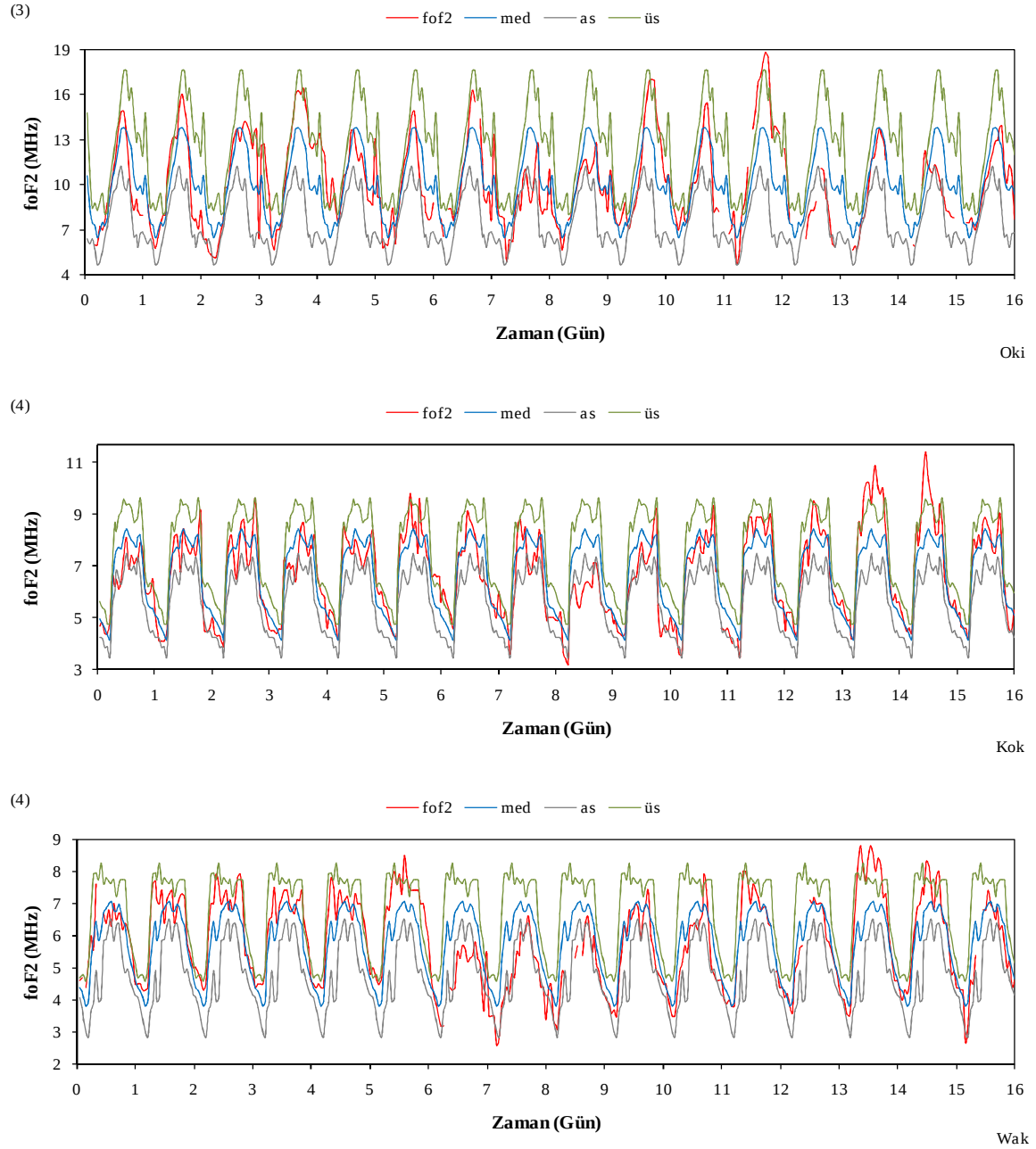


Şekil 4.11. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için IQR analizi sonuçları

Standart sapma analizinden farklı olarak IQR’de (Şekil 4.11) analizinde kritik frekansı belirlenen alt ve üst sınır geçişleri oldukça belirgindir. Deprem günü ve öncesini içine alan 16 günlük periyod süresince tüm depremlerde alt ve üst sınır geçişleri vardır. Bazılarında bu geçiler oldukça belirginken, bazılarında yüzeyseldir. Burada da genel olarak büyüklük, derinlik ilişkisi kurulamamıştır. Ancak dikkat edilirse, her bir deprem için görülen alt ve üst sınır geçişleri aynı yerel saatlerde oluşmaktadır. Deprem günü sınır geçişleri olmamıştır.



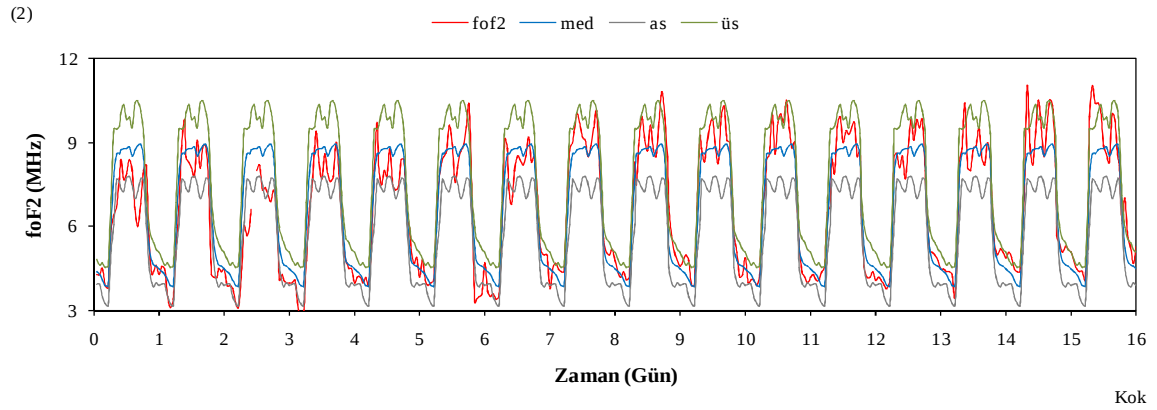
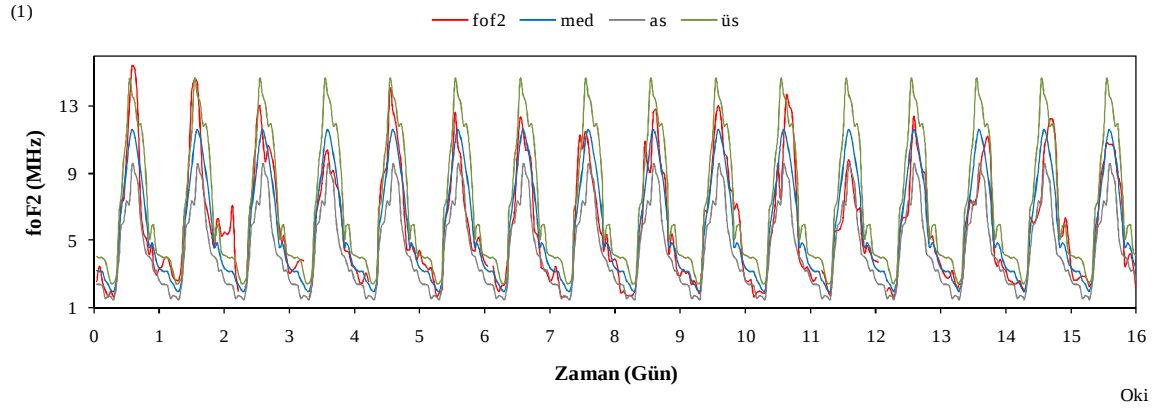
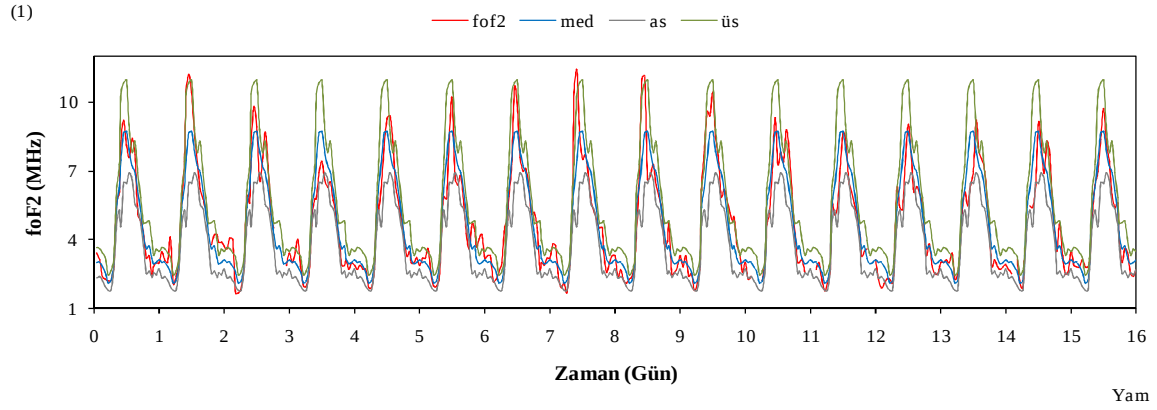




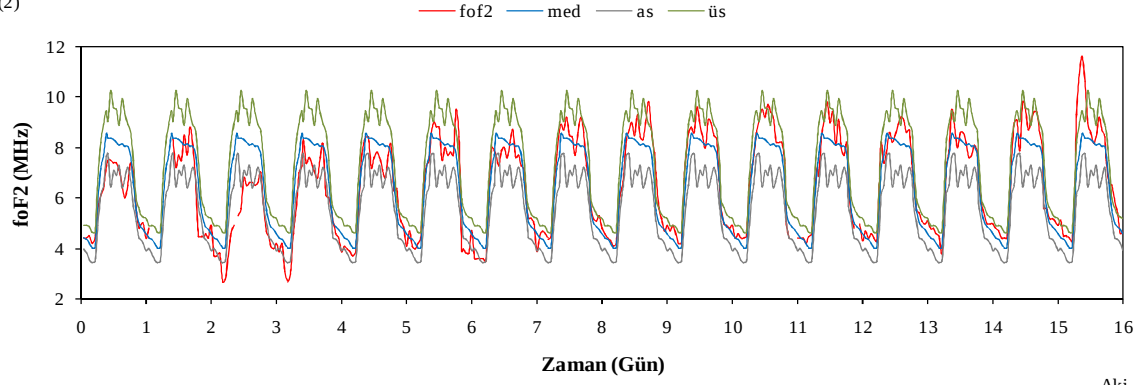
Şekil 4.12. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için IQR analizi sonuçları

Burada (Şekil 4.12) kritik frekansın değişimi standart sapma ile elde edilen sonuçlardan çok daha belirgindir. Tüm depremler ve tüm istasyonlar için kritik frekans değerleri kendi alt ve üst sınırlarını birçok günde geçmiştir. Deprem merkezine daha yakında olan istasyonlar için bu değişim daha büyüktür. Değişimin en az görüldüğü 1 ve 2 nolu depremdir. 1 nolu deprem bu grup içinde büyüklüğü en küçük ve en derin olanıdır. En çok tedirginliğin gözlemlendiği ve sapmaların görüldüğü 3 ve 4 nolu depremlerdir. Bu grup içinde 3 nolu deprem yüzeye en yakın olanken, 4 nolu deprem en şiddetli olanıdır.

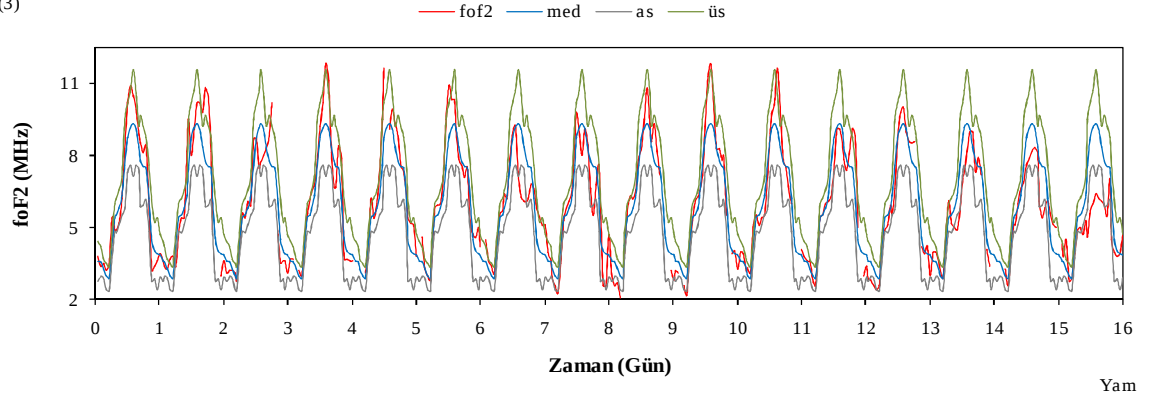
Her iki yöntemde de Hokkaido bölgesinde meydana gelen depremler için Wakkanai istasyonundan elde edilen verilere bakıldığında, sismik şok öncesi çok fazla etkilenmediği (tek dadalılarda olduğu gibi), buna karşın Kokubunji istasyonunun değişimlere daha açık olduğu burada da görülmektedir.



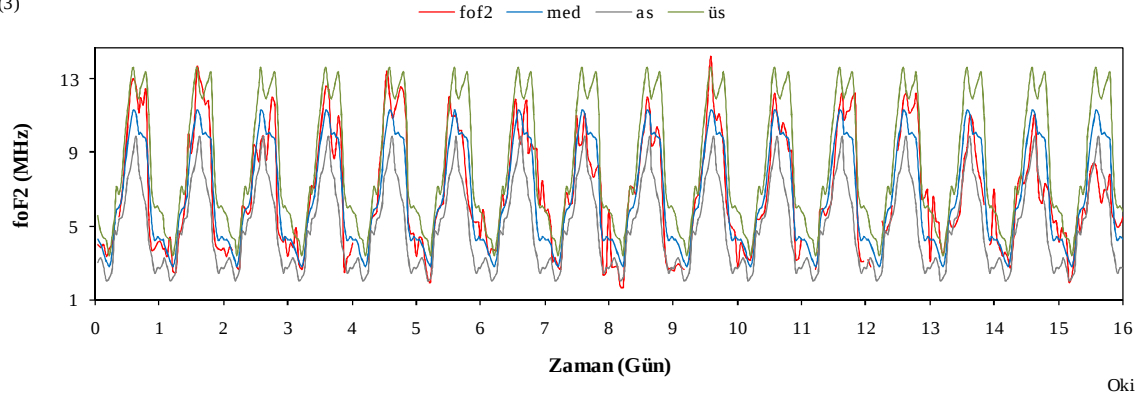
(2)



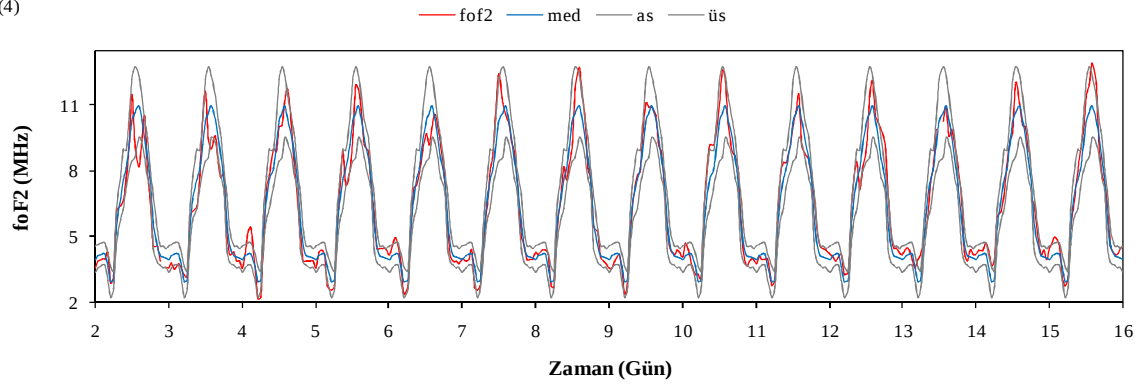
(3)

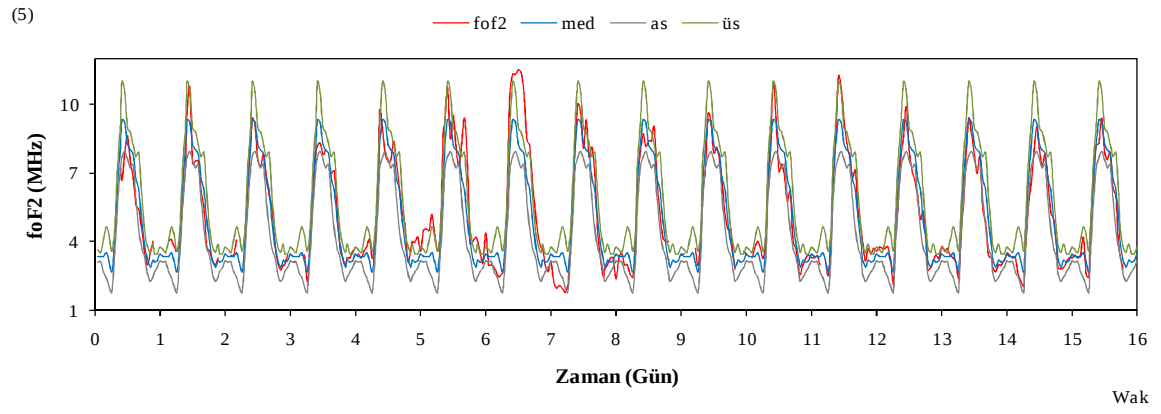
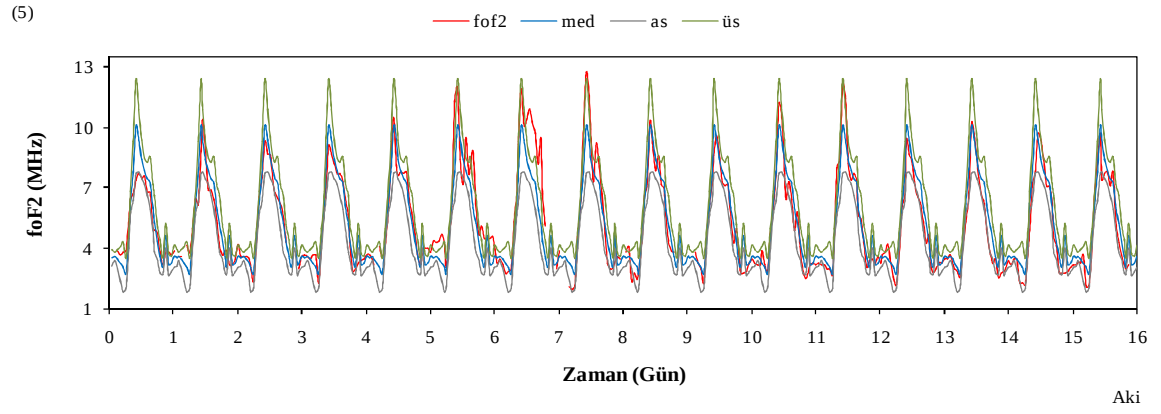
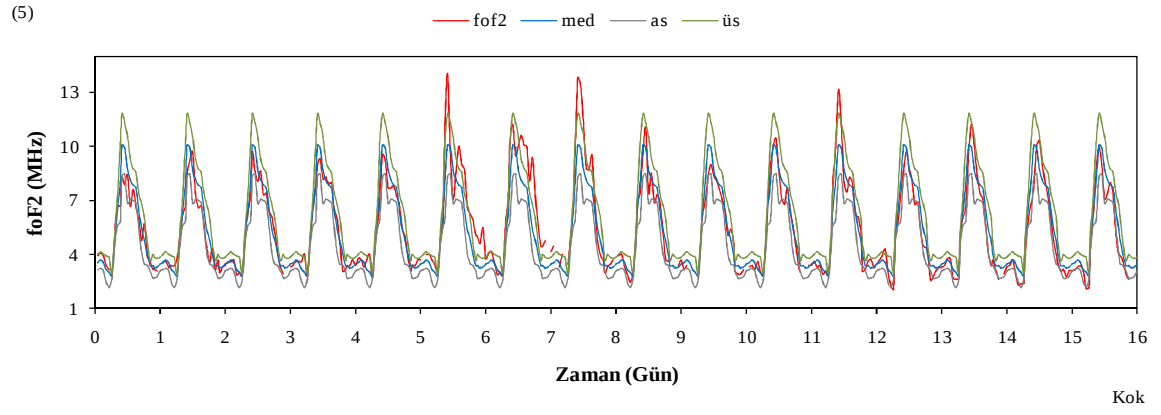
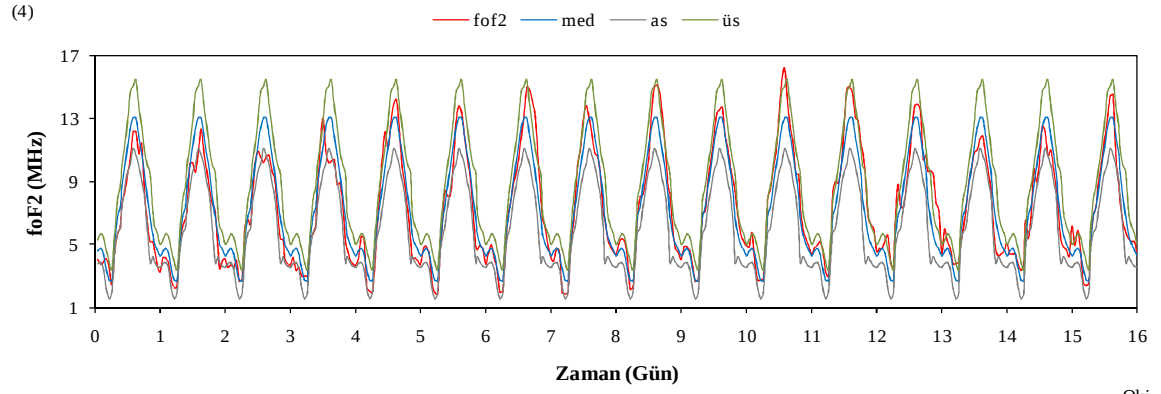


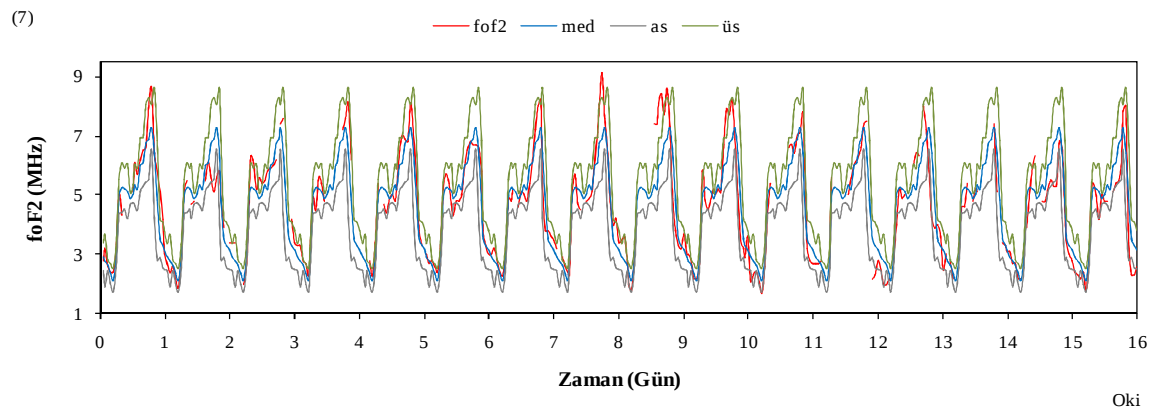
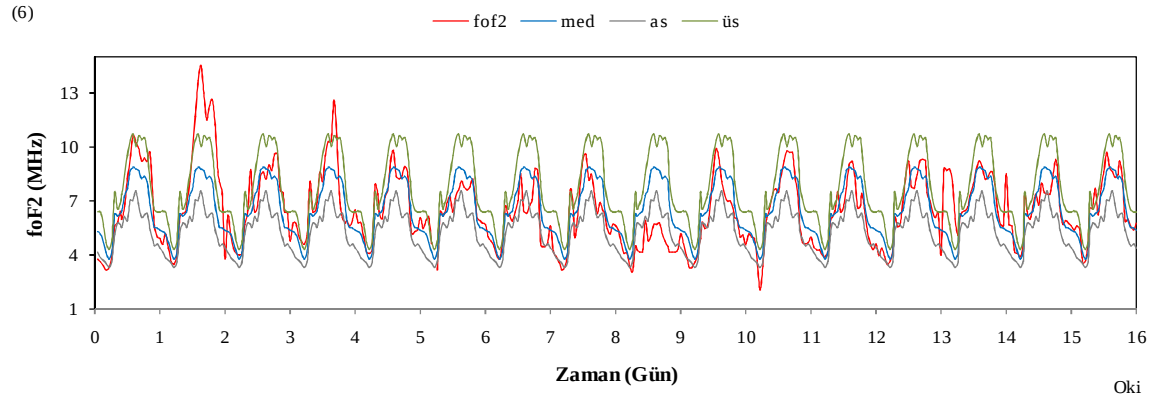
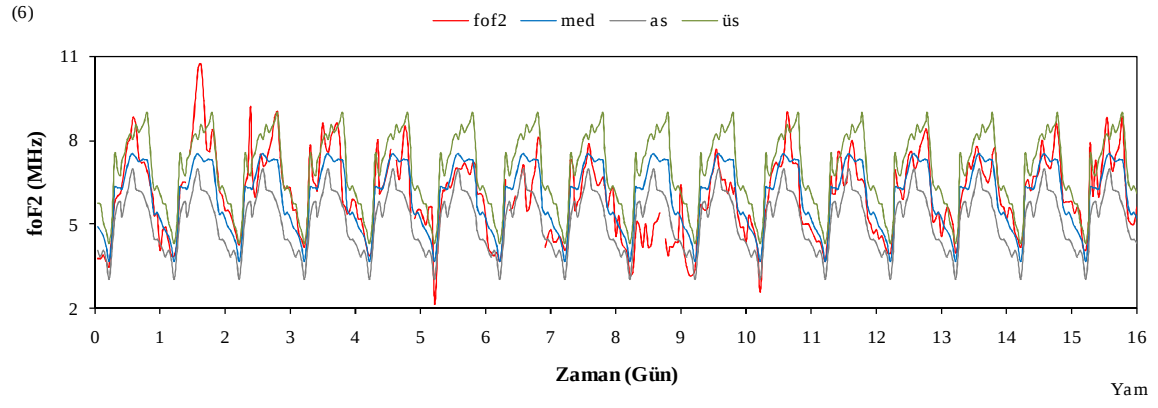
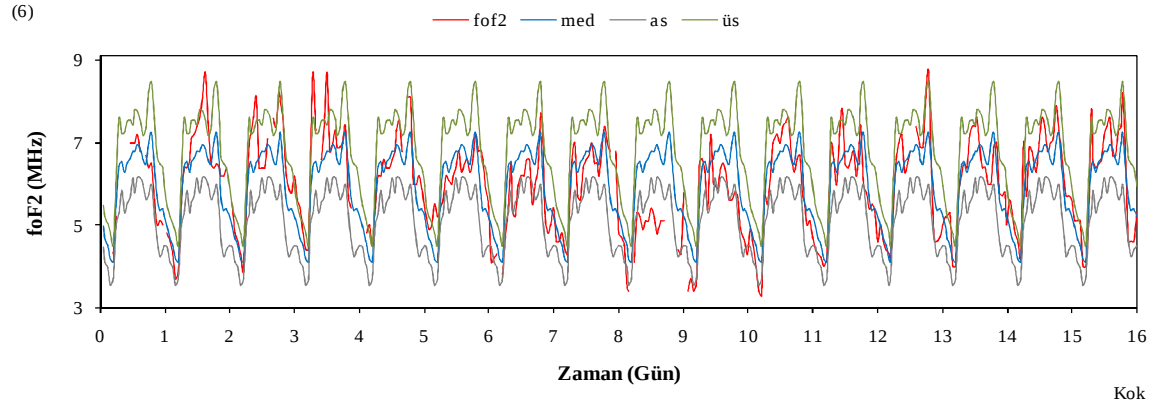
(3)

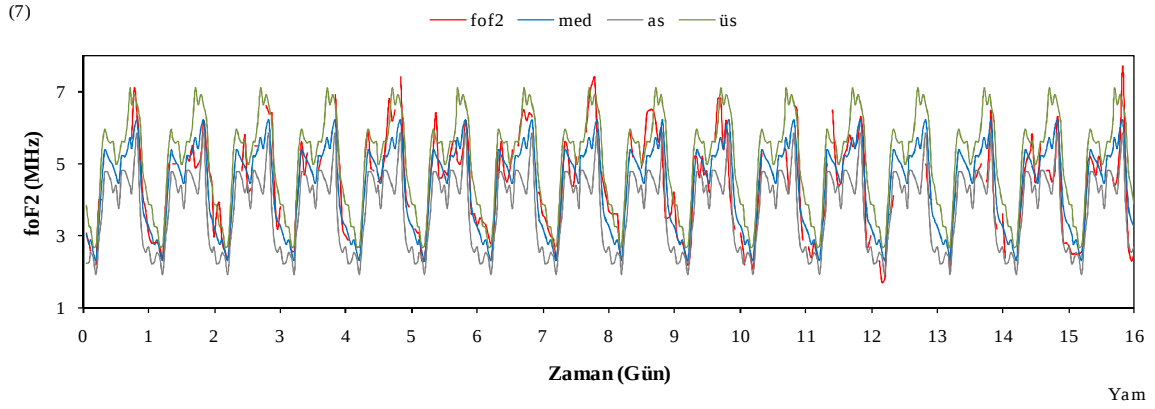


(4)





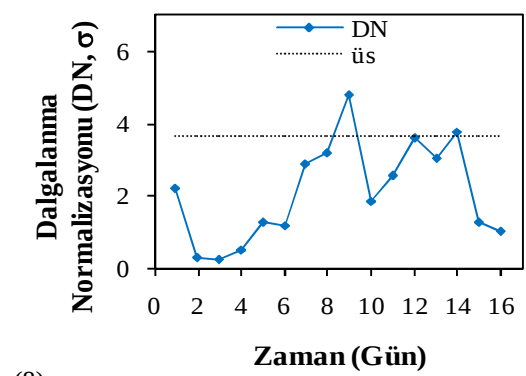
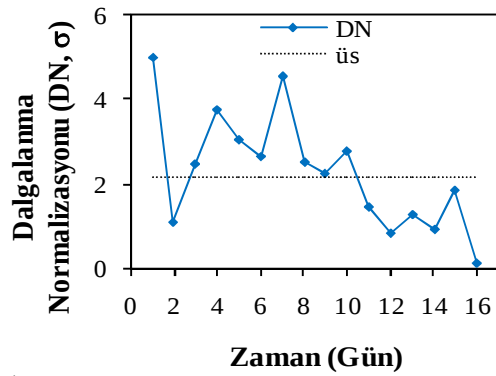
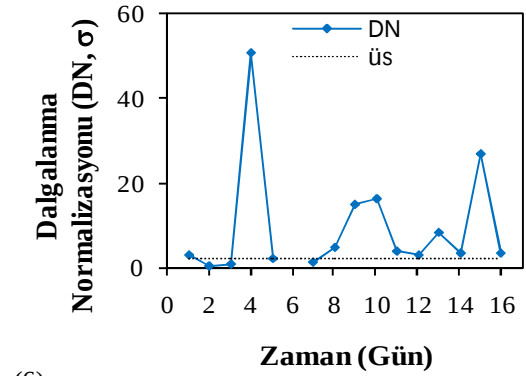
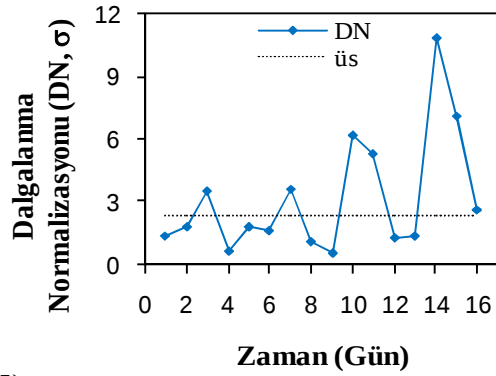
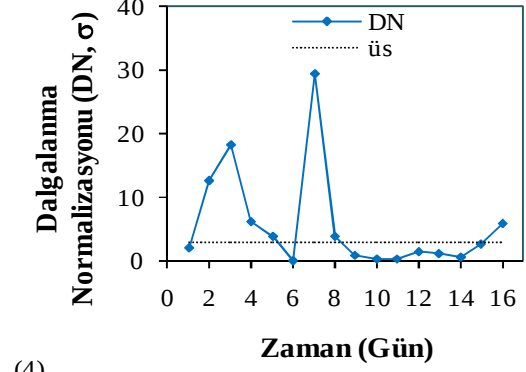
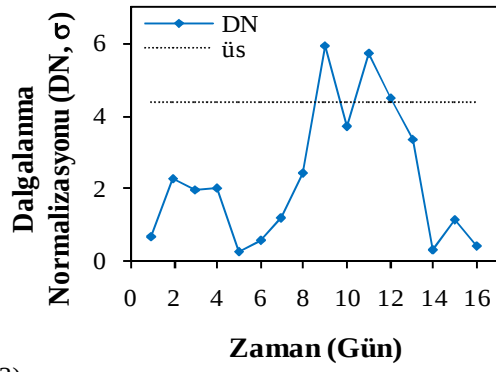
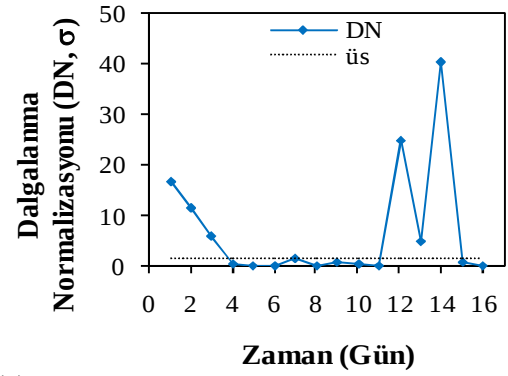
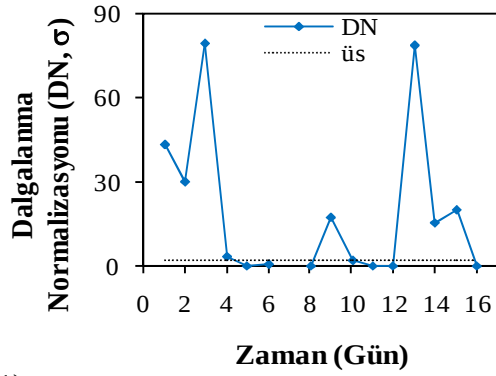


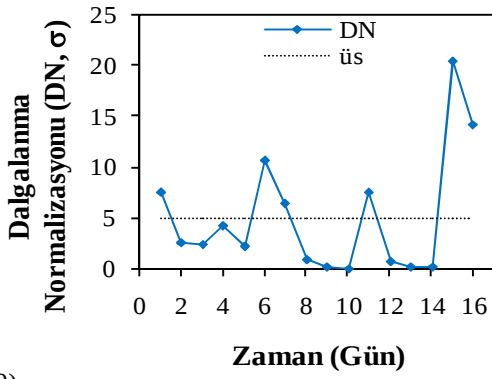


Şekil 4.13. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için IQR analizi sonuçları

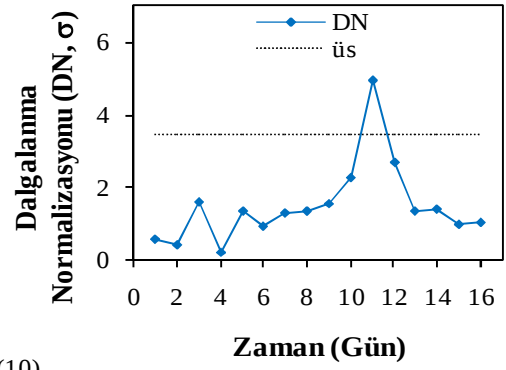
Tüm depremler için birçok günde alt ve üst sınır değerleri birçok kez geçilmiştir (Şekil 4.13). 1, 3 ve 4 nolu depremler için sınır geçişleri bu sınırlara çok yakınken, diğerlerinde oldukça belirgindir. Şekil 4.11'e bakılacak olursa, bu üç depremde aynı bölgede olup (Arosan, Kyushu), veri alınan istasyonlar Yamagawa ve Okinawa'dır. Yamagawa deprem hazırlık alanı içindeyken, Okinawa bu alanın dışındadır. İstasyonlar deprem merkezlerinin güney-güney batısında kalmaktadırlar. Yamagawa'dan ziyade Okinawa'da daha belirgin sonuçlar görülmektedir. 7 nolu depremde ise tam tersine Okinawa deprem hazırlık alanı içinde, Yamagawa dışındadır (deprem merkezinin kuzey doğusunda) ve Yamagawa için değişim biraz daha belirgindir. Bu grup içinde en fazla değişim gösteren depremlere baktığımızda hepsinde ortak istasyon Kokubunji ve aynı bölgede (Honshu'nun doğusu) meydana gelmişlerdir. İstasyonlar deprem merkezlerinin kuzeyinde kalmaktadır.

4.7 Dalgalanma Analizi

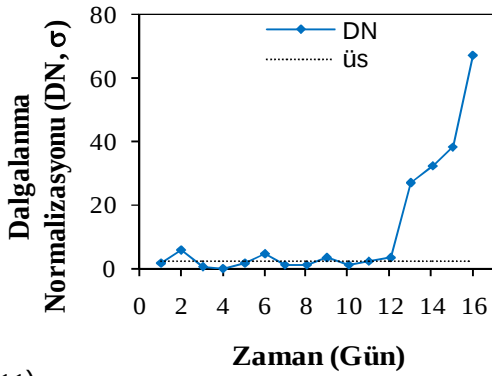




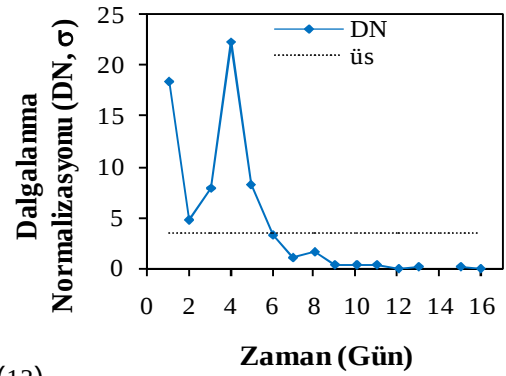
(9)



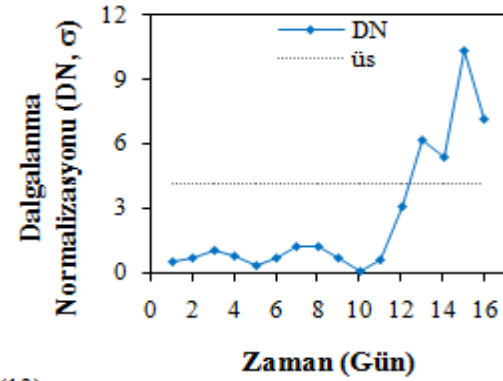
(10)



(11)



(12)

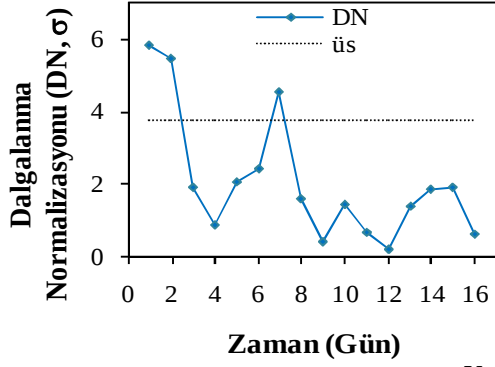


(13)

Şekil 4.14. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için DA sonuçları

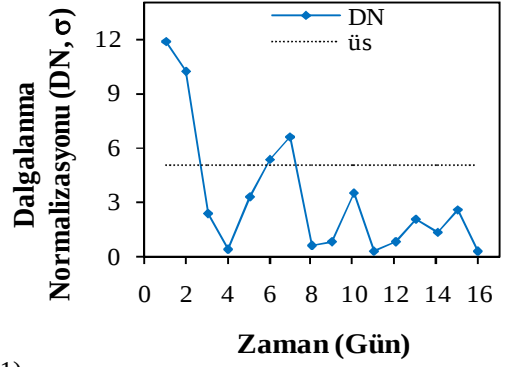
Bölüm 3’de detaylı bir şekilde verilen dalgalanma analizi sonuçları Şekil 4,14’de gösterilmektedir. Bütün depremlerde, deprem günü ve öncesi 15 günün ele alındığı 16 günlük periyot süresince, birçok günde belirlenen üst sınır değeri geçilmektedir. Bu değişim bazı depremler için (1, 2, 6, 11) oldukça yüksekken, birkaçı için daha az (4, 9, 12, 13), bazıları içinse diğerlerine nazaran küçük (3, 5, 7, 8, 10) sayılabilir. Genel olarak değişimin büyük olduğu depremlerin yüzeye daha yakın depremler olduğu ifade edilebilir.

Bu analizde depremin büyüklüğü veya istasyonun deprem merkezine yakınlığıyla alakalı ilişki kurulamamıştır.



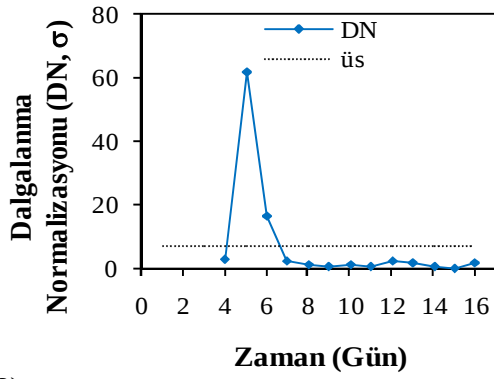
(1)

Yam

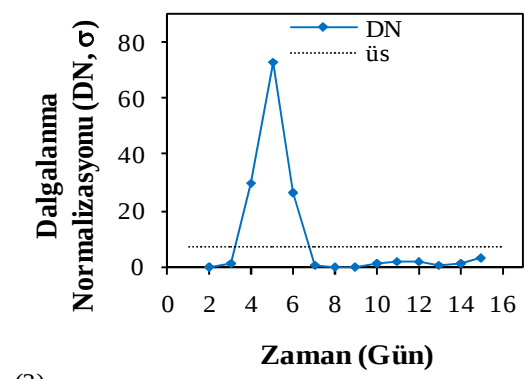


(1)

Oki

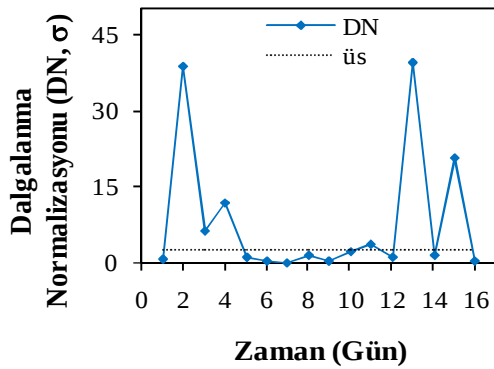


(2)



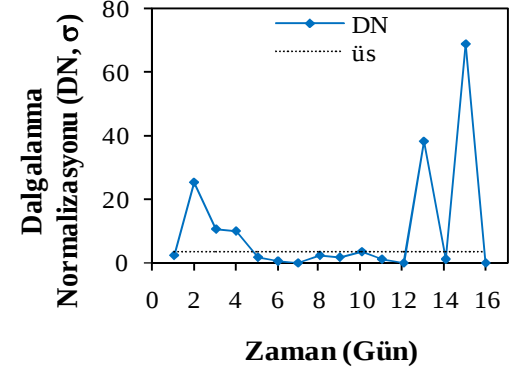
(2)

Kha



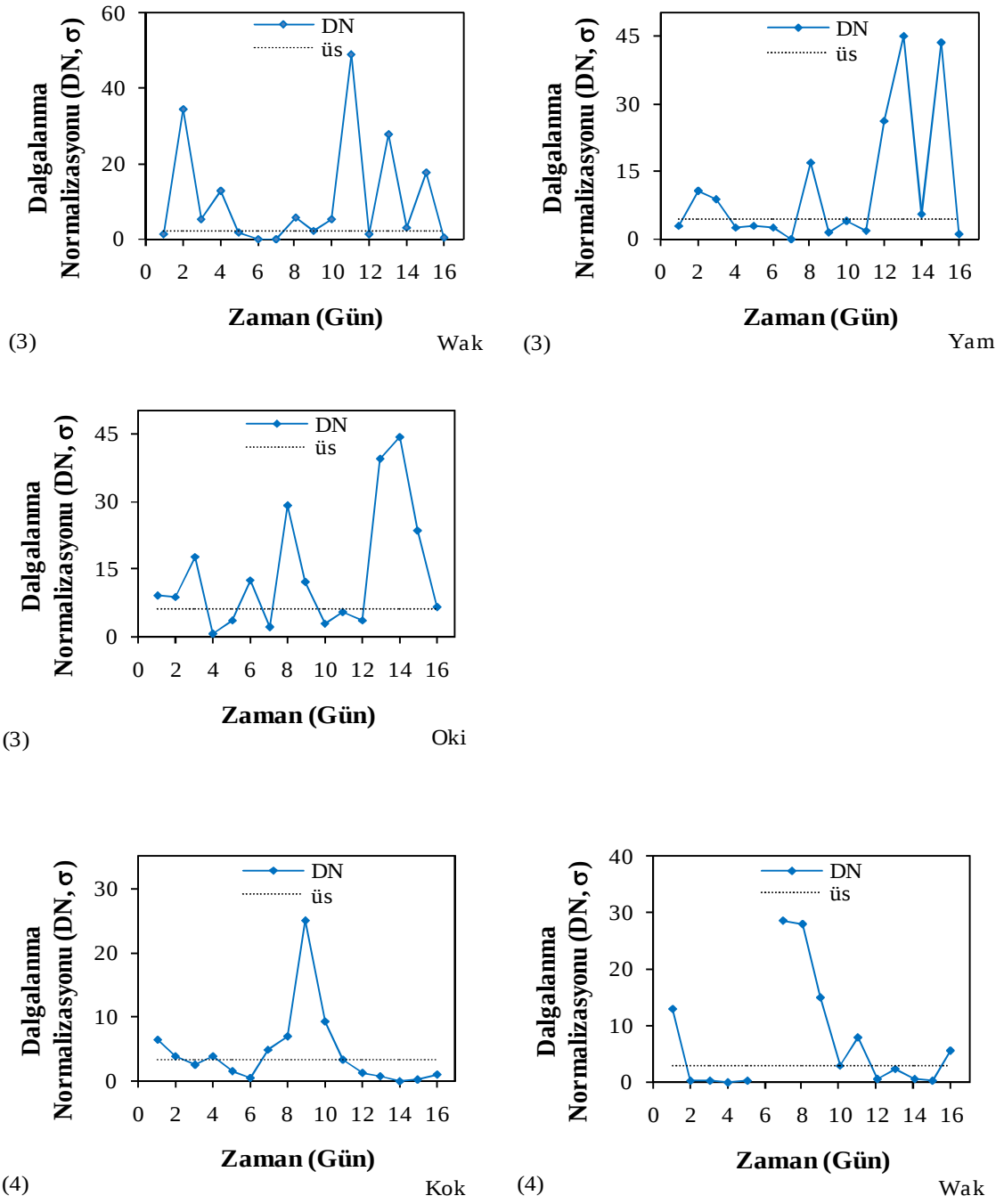
(3)

Aki



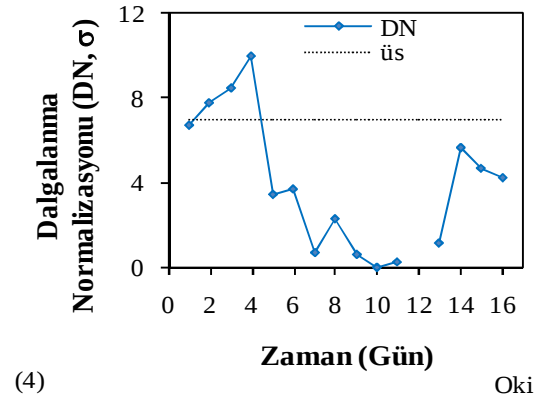
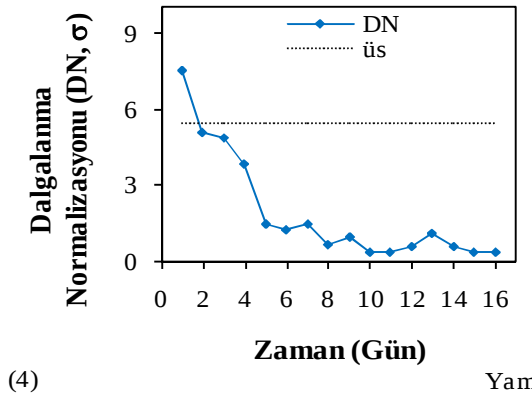
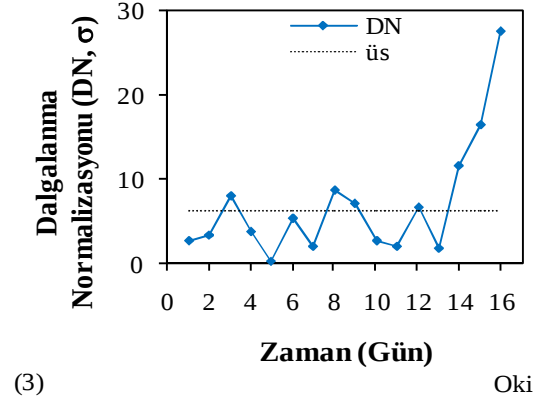
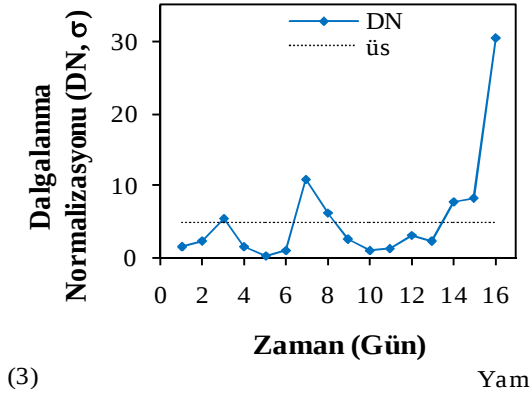
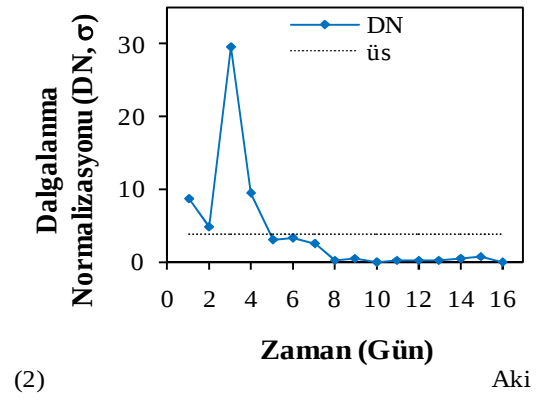
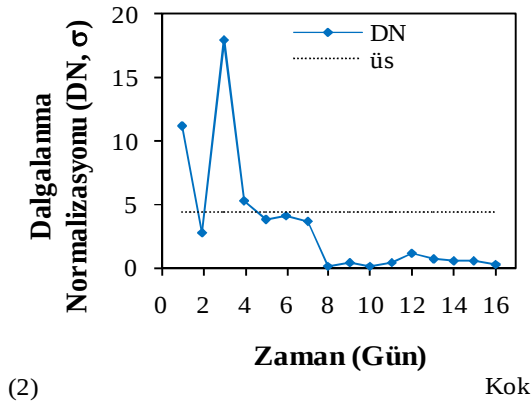
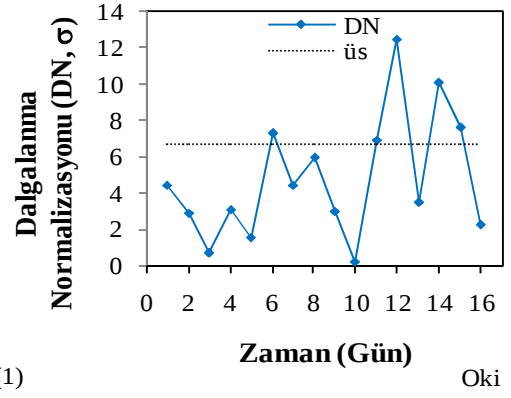
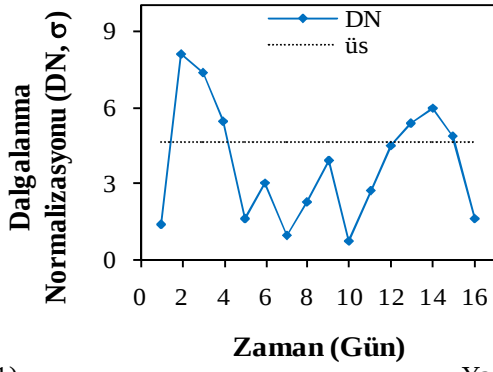
(3)

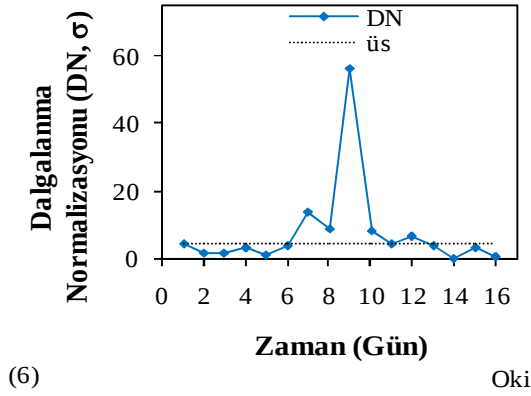
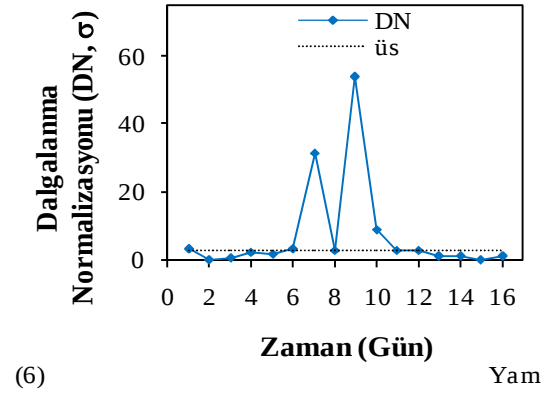
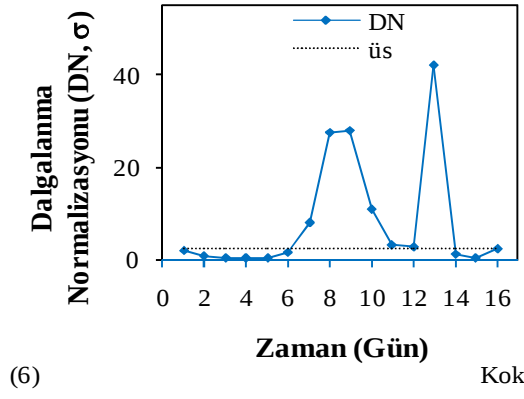
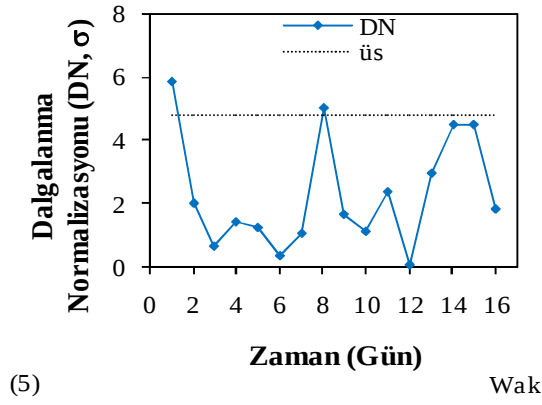
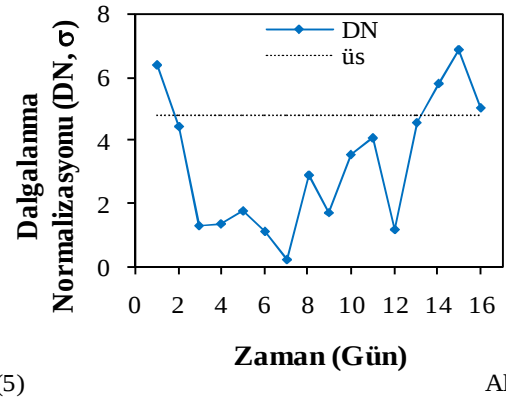
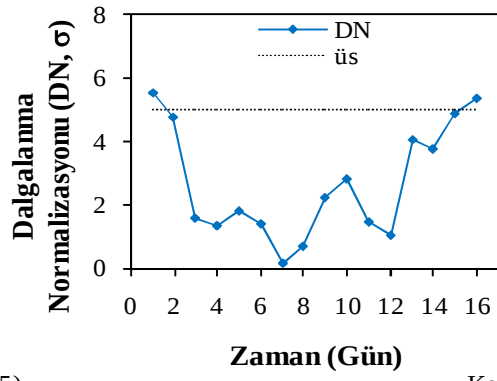
Kok

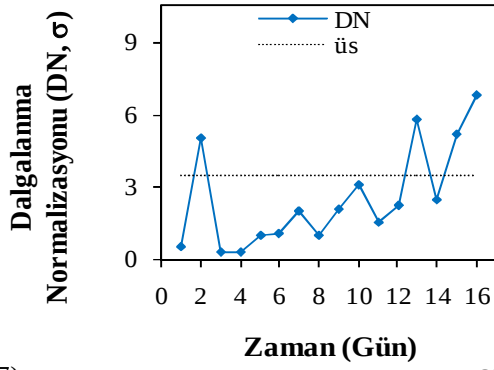


Şekil 4.15. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için DA sonuçları

Şekil 4.15’de verilen DA sonuçlarında tüm depremlerin belirlenen kendi üst sınır değerleri üzerinden değişim gösterdiği görülmektedir. Tüm istasyonlar için üst sınırın geçildiği günler aynıdır. Sonuçlar bu gruptaki depremlere uygulanan diğer sonuçlarla da uyum içeresindedir.

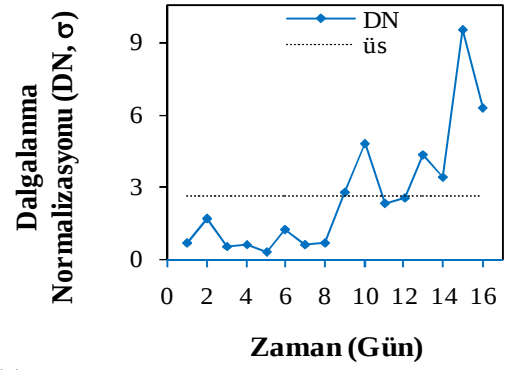






(7)

Oki



(7)

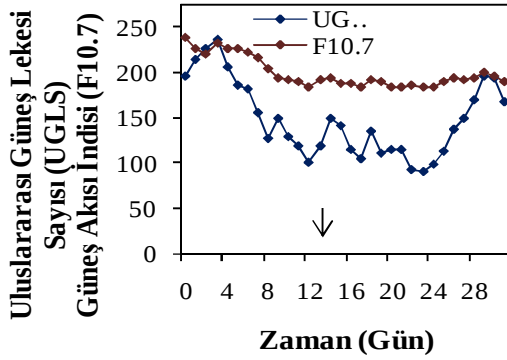
Yam

Şekil 4.16. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için DA sonuçları

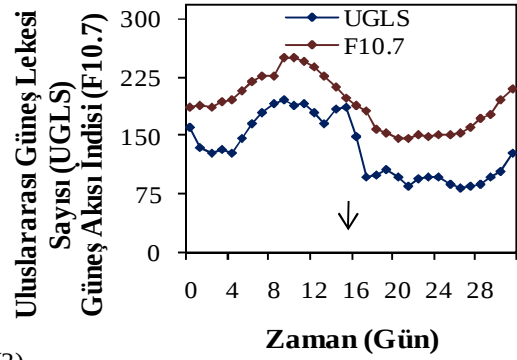
Belirlenen 16 günlük periyodları içerisinde tüm depremler kendi üst sınır değerlerini birçok kez geçmişlerdir (Şekil 4.16). Hemen hemen hepsi için üst sınır geçiş zamanları her bir istasyon için aynı günlere denk gelmektedir.

4.8 Güneş İndisleri

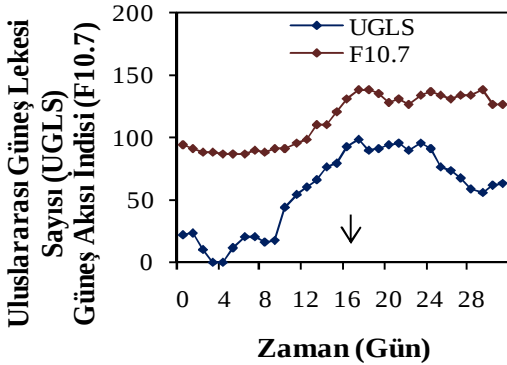
4.8.1 Uluslar Arası Güneş Lekesi Sayısı (UGLS) ve Güneş Akısı İndisi (F10.7 cm)



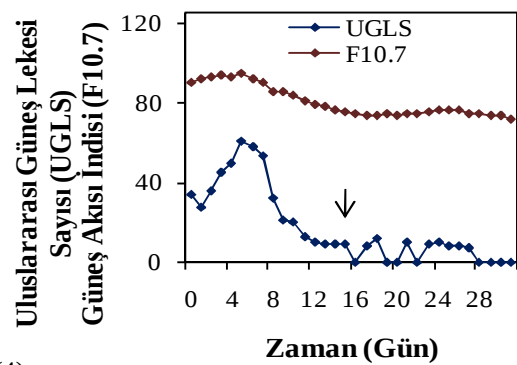
(1)



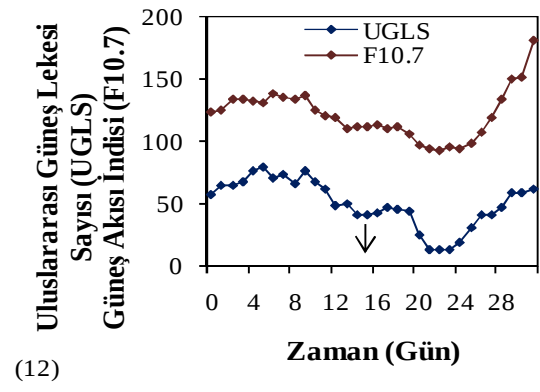
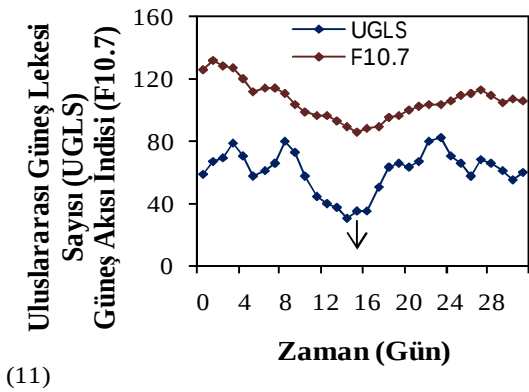
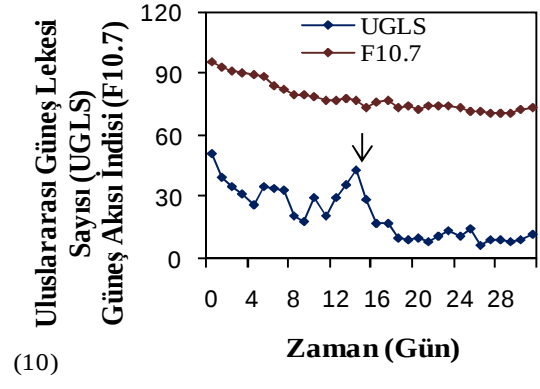
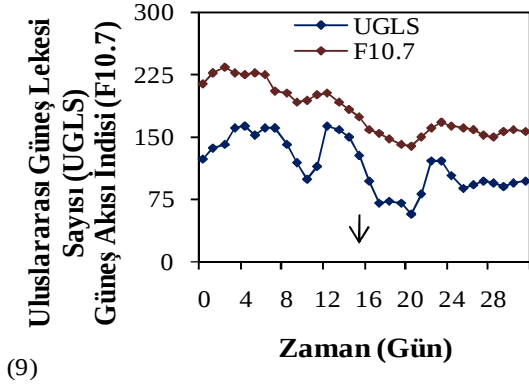
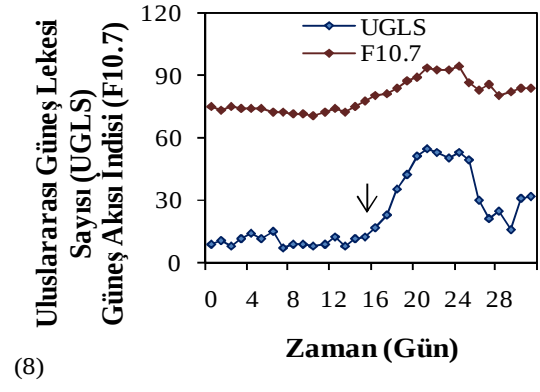
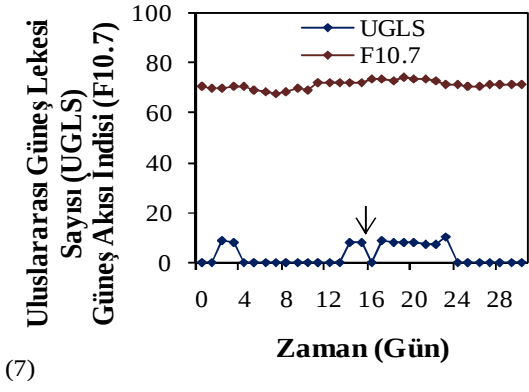
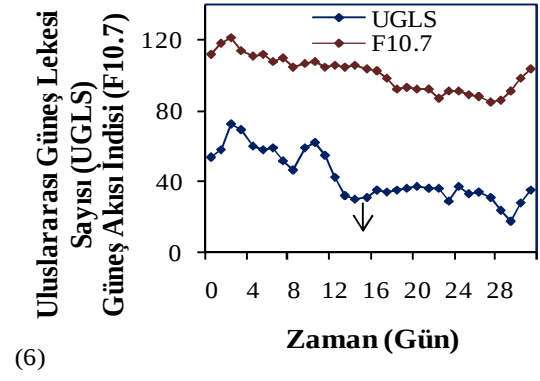
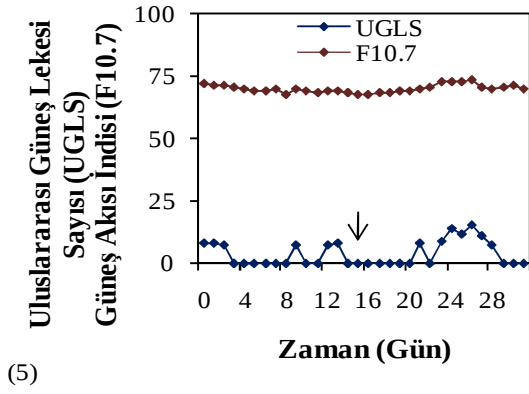
(2)

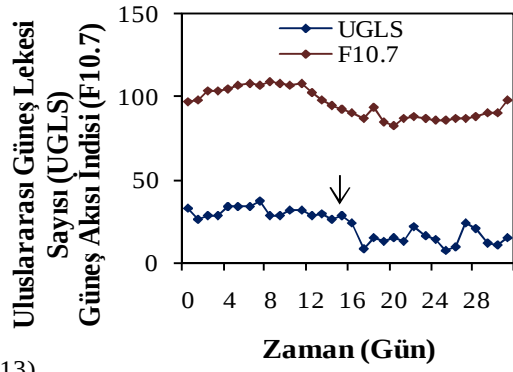


(3)



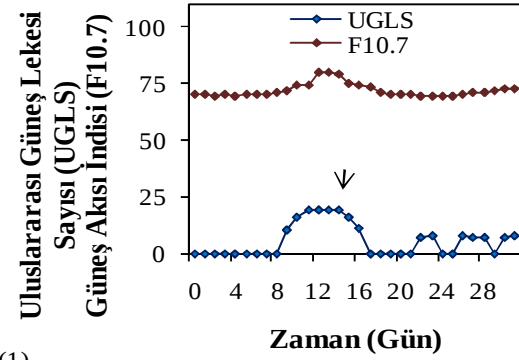
(4)



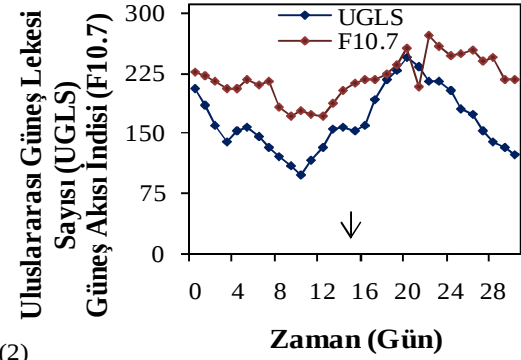


(13)

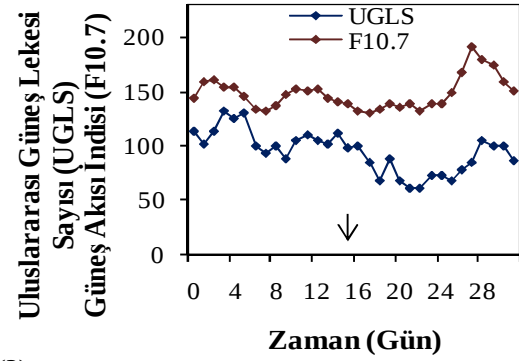
Şekil 4.17. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için Güneş indisleri



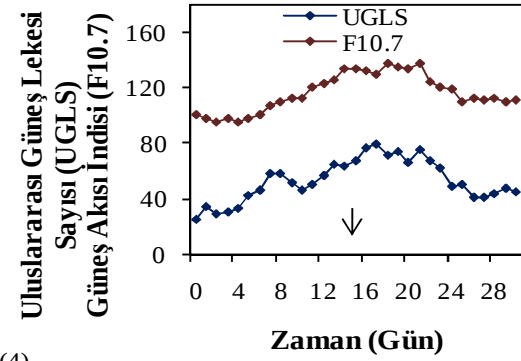
(1)



(2)

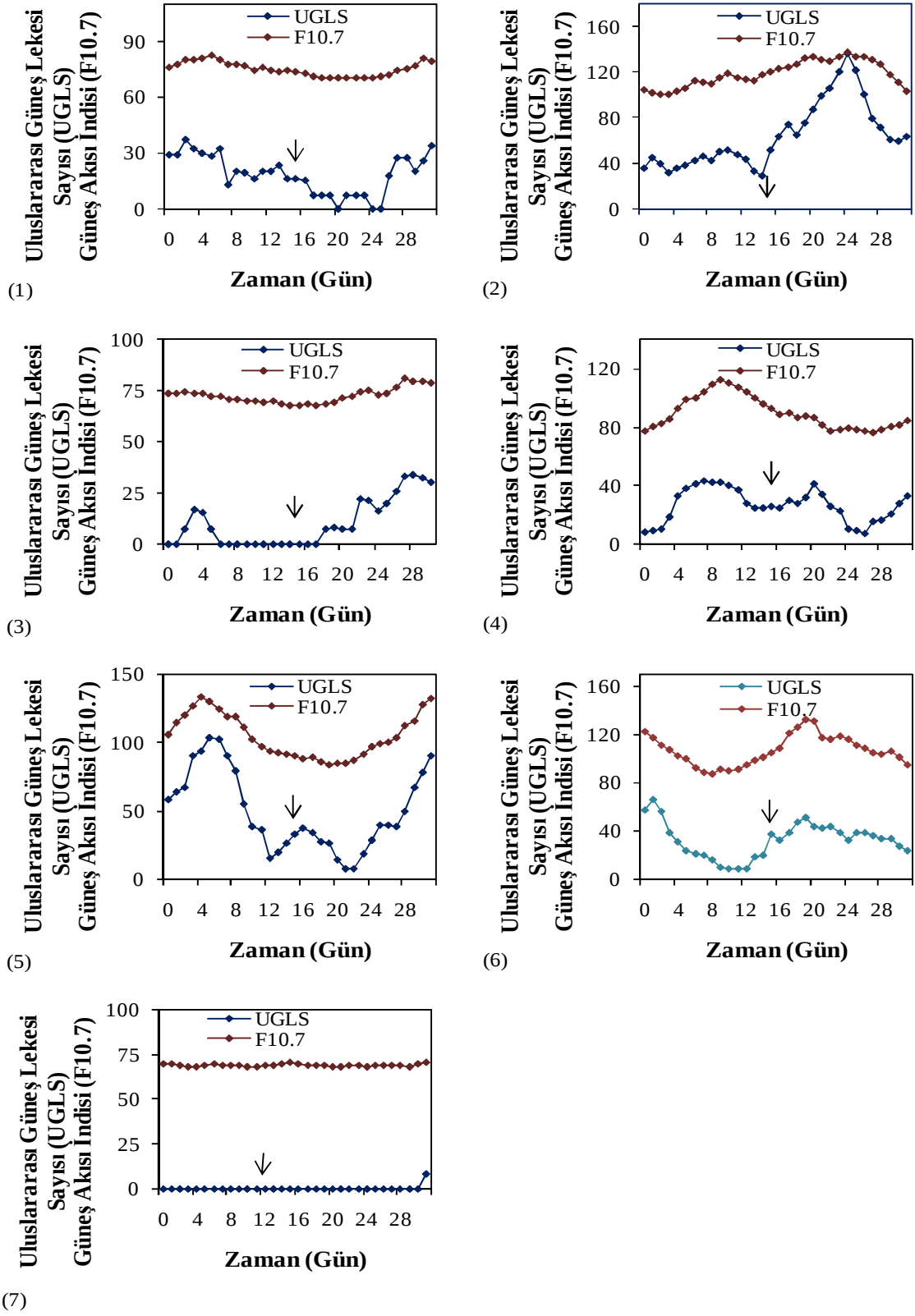


(3)



(4)

Şekil 4.18. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için Güneş indisleri

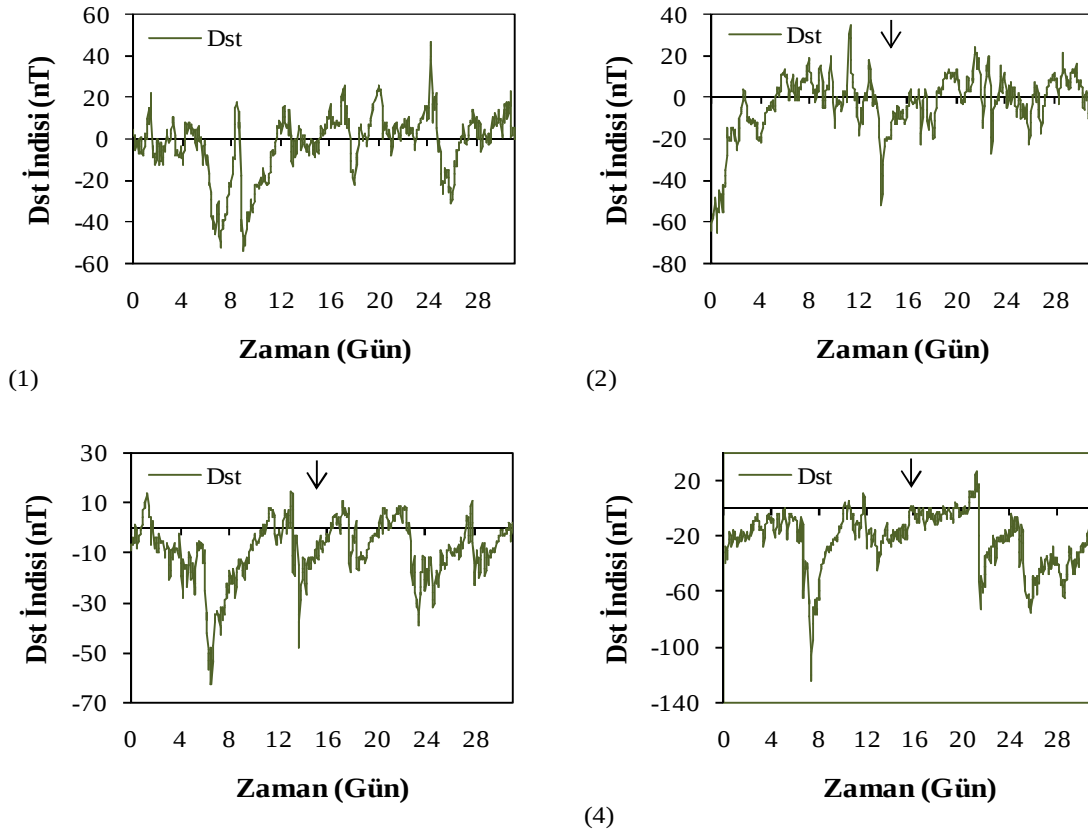


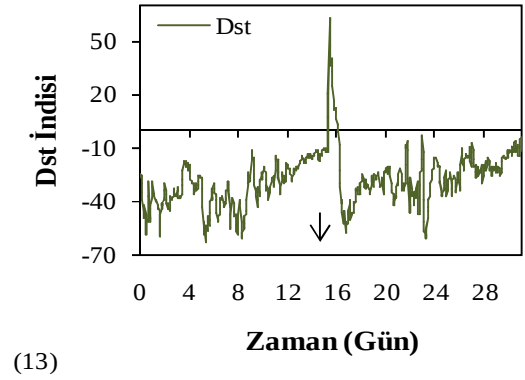
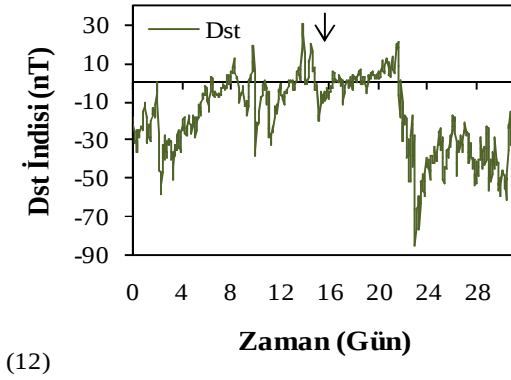
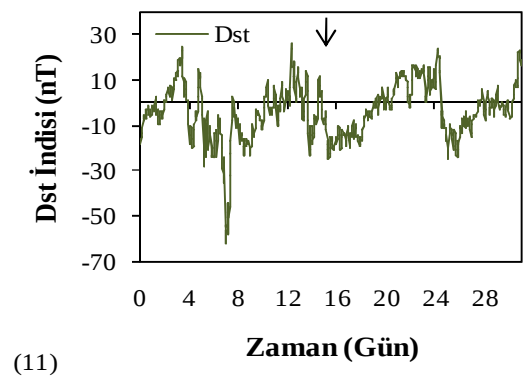
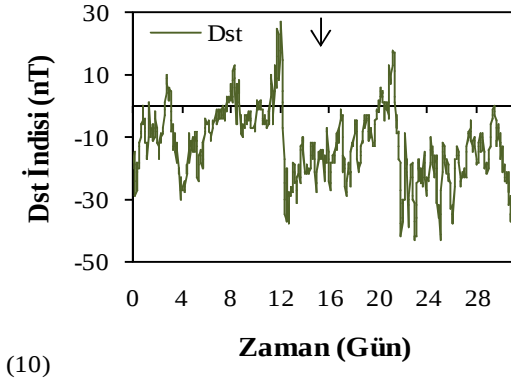
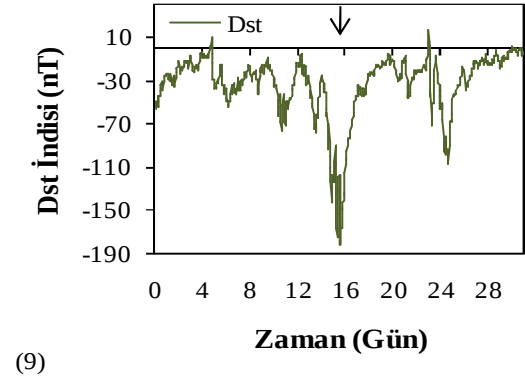
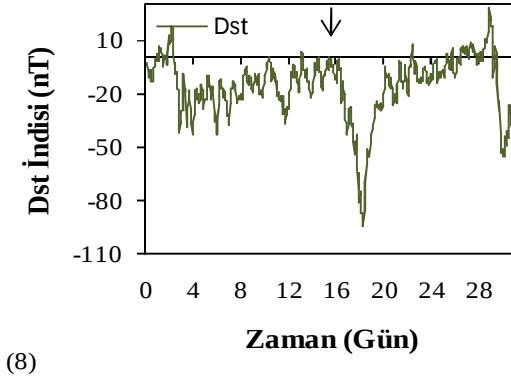
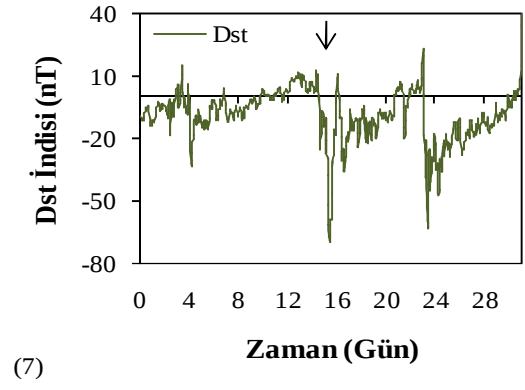
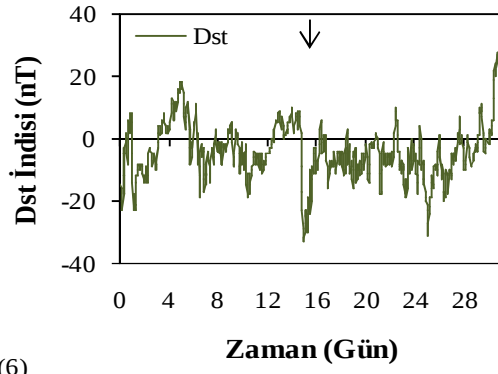
Şekil 4.19. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için Güneş indisleri

Şekil 4.17-18-19'da, deprem hazırlık alanına bağlı olarak veri alınan istasyonlara ait elde edilen Güneş indislerine ait sonuçlar görülmektedir. Depremler öncesi Güneş aktivitesinin çok yüksek olduğu depremlerin yanı sıra, orta ve sakin şartların hâkim olduğu periyotlar görülmektedir. Genel olarak ele alındığında bazı kritik frekansın artışlarının Güneş aktivitesiyle ilişkisi olduğu görülmektedir. Ancak aktivitenin düşük olduğu dönemlerde meydana gelen değişimler ve istasyonların deprem hazırlık alanına bağlı olarak sonuçların farklılık göstermesi ve bazı analizlerde bu Güneş aktivitesine bağlı olduğu düşünülen değişimlerin neredeyse hiç görülmemesi, sonuçlar üzerinde sismik aktivitenin de önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.

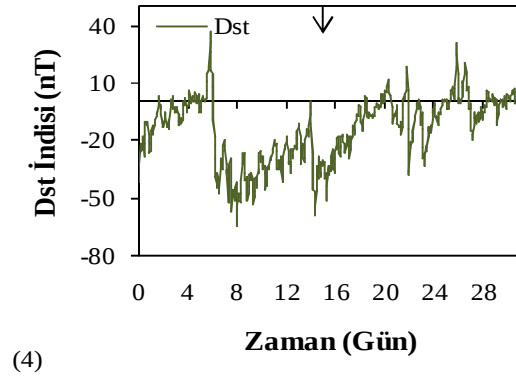
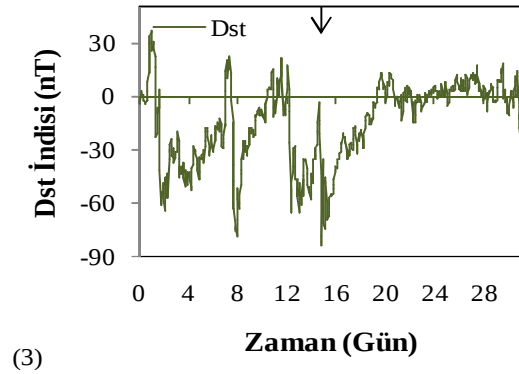
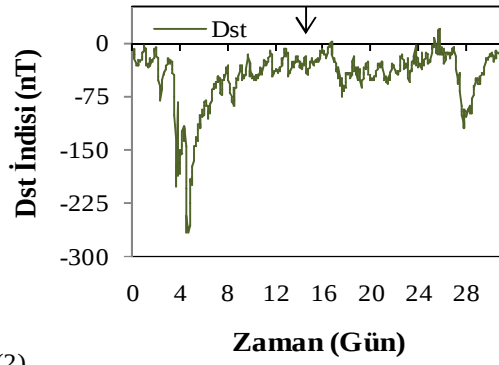
4.9 Jeomanyetik İndisler

4.9.1 Dst İndisi

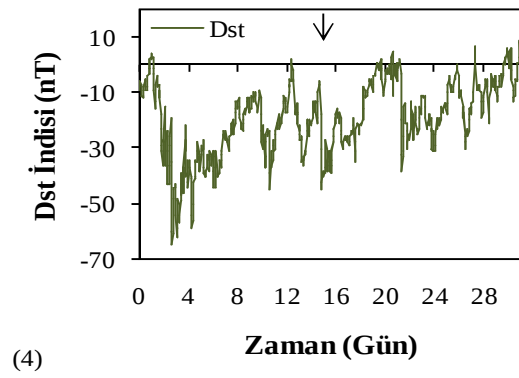
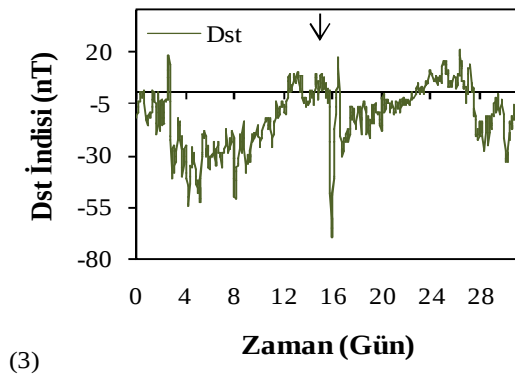
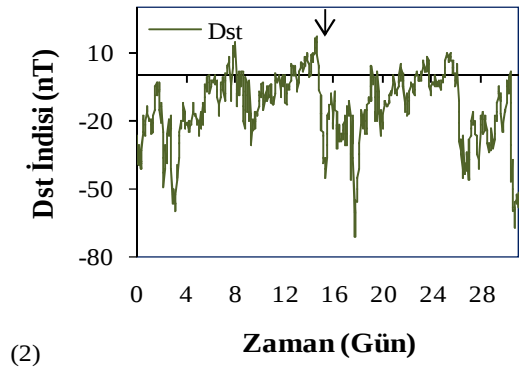
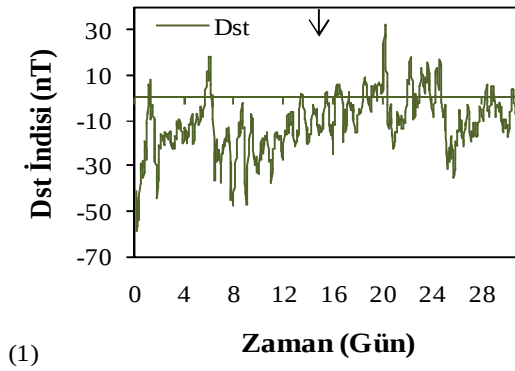


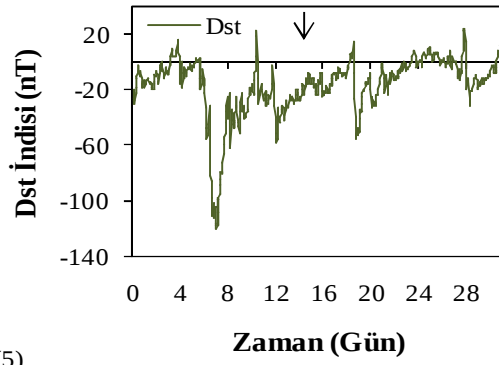


Şekil 4.20. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için jeomanyetik Dst indisi

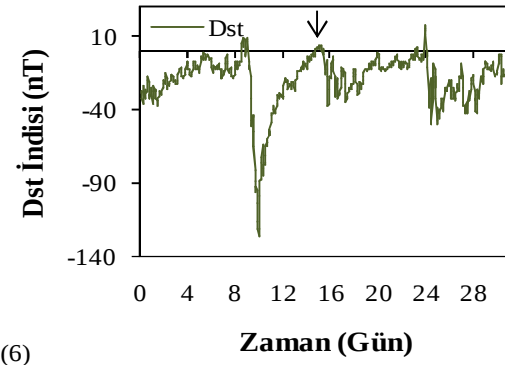


Şekil 4.21. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için jeomanyetik Dst indisi





(5)

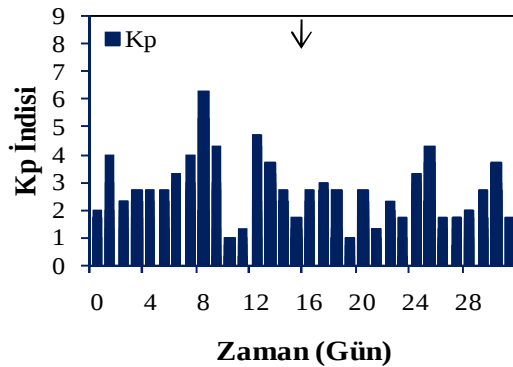


(6)

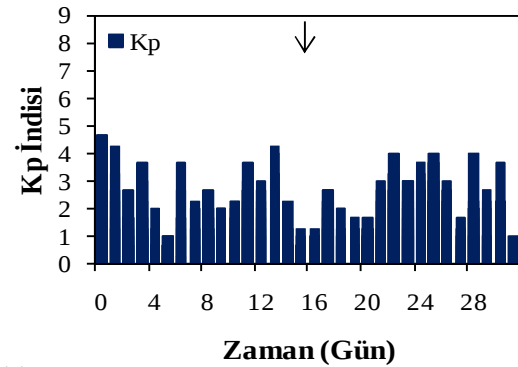
Şekil 4.22. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için jeomanyetik Dst indisi

Jeomanyetik Dst indis (Şekil 20-21-22) ile analiz sonuçları incelendiğinde, özellikle kritik frekans değişiminin Dst ile uyumlu olduğu görülmektedir. Dst'nin değeri düştükçe, kritik frekansta da buna bağlı olarak artış ve zaman zaman da azalışlar görülmektedir. Ancak bazı günlerde Dst'nin, meydana gelen değişime neden olacak kadar düşük olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, deprem hazırlık alanının içinde, daha uzakta olan istasyon ile içinde ve özellikle yakın istasyon sonuçları arasında zaman zaman ciddi farklılıklar olduğu görülmektedir. Depremlerin çoğunda deprem merkezine yakın olan istasyonda, jeomanyetik aktiviteye bağlı olduğu düşünülen değişimler daha az veya bazen hiç görülmemektedir. Özellikle Dalgalanma Analizinde elde edilen sonuçların genel olarak Dst'den bağımsız olduğu görülmektedir. Dst'nin düşük veya sakin olduğu dönemlerde de önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu da elde edilen sonuçlarda jeomanyetik aktivitenin yanı sıra, sismik aktivitelerin de etkili olduğunu göstermektedir.

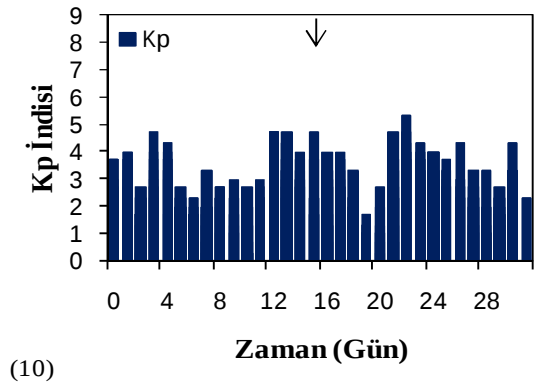
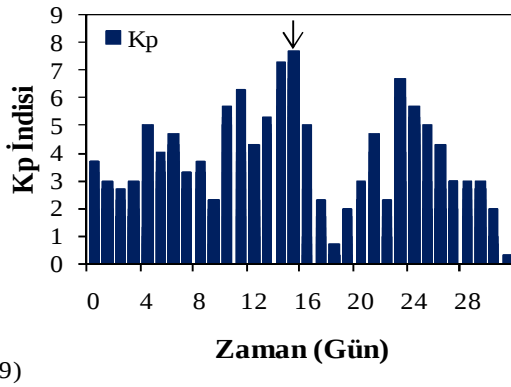
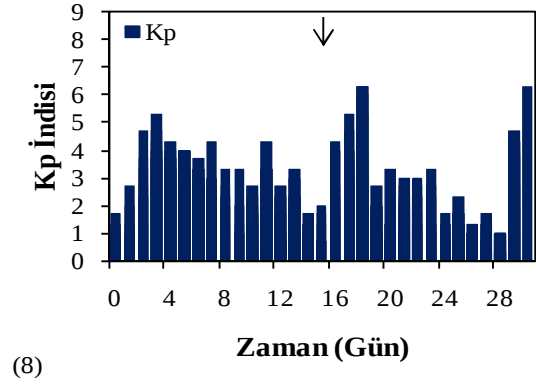
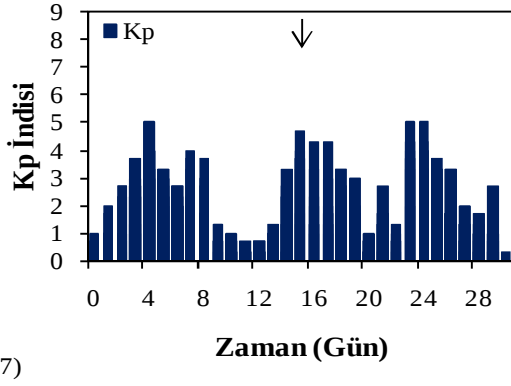
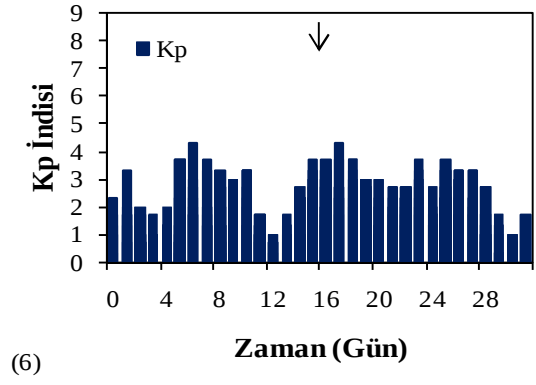
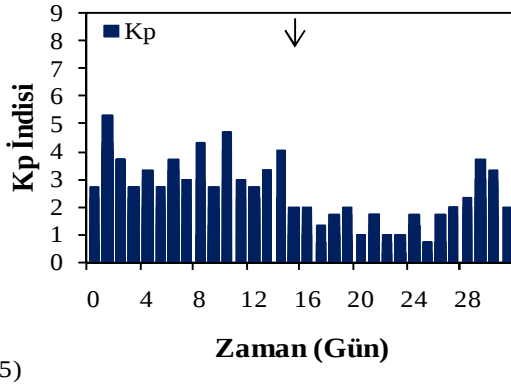
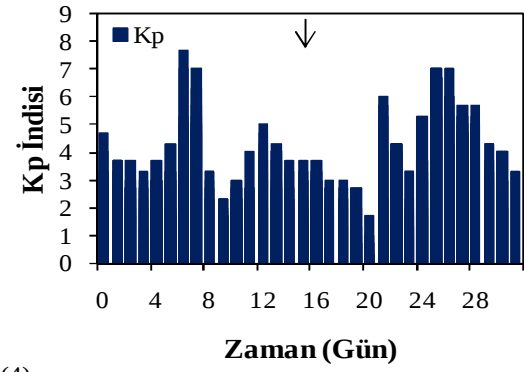
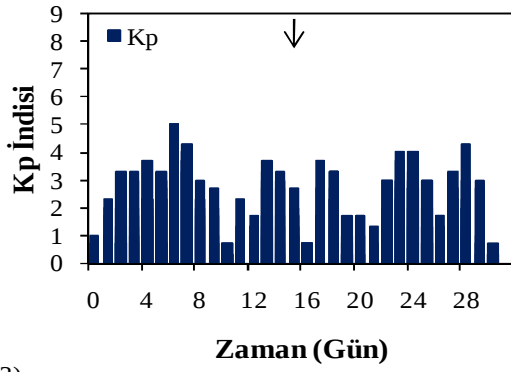
4.9.2 Kp İndisi

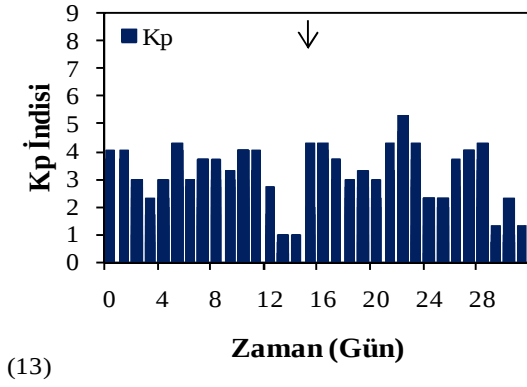
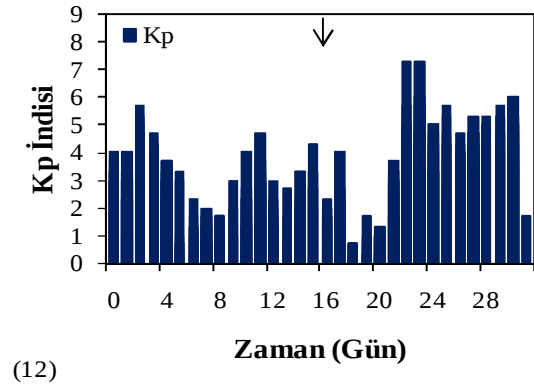
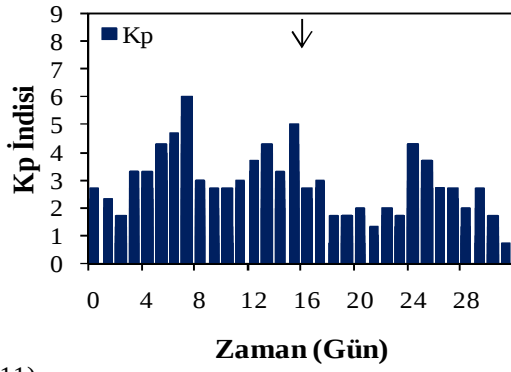


(1)

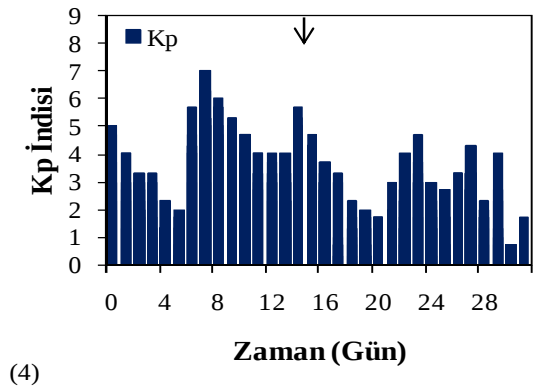
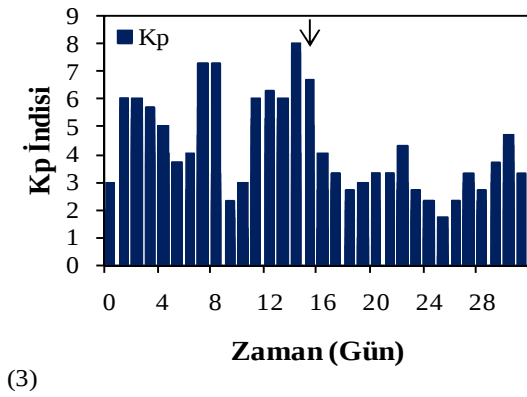
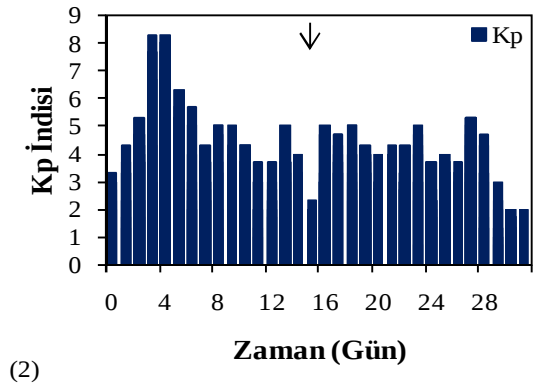
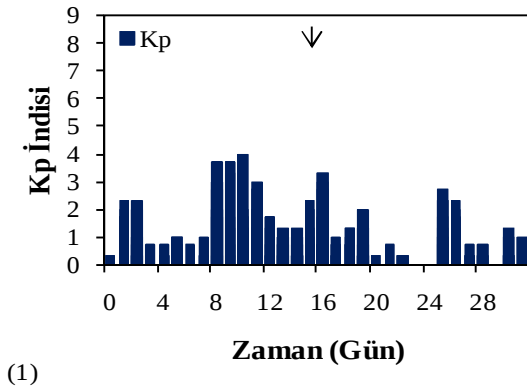


(2)

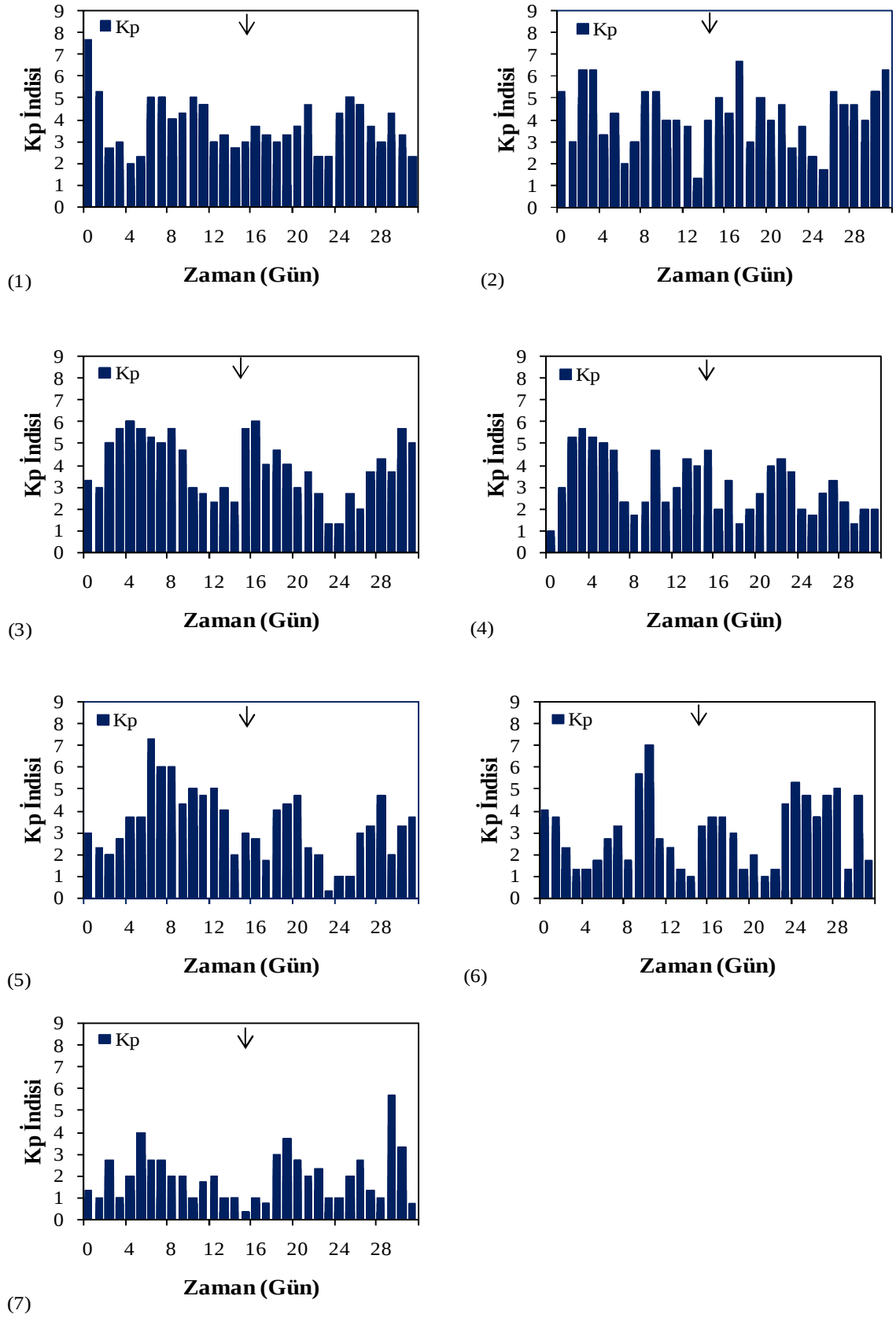




Şekil 4.23. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan depremler için jeomanyetik Kp indisi



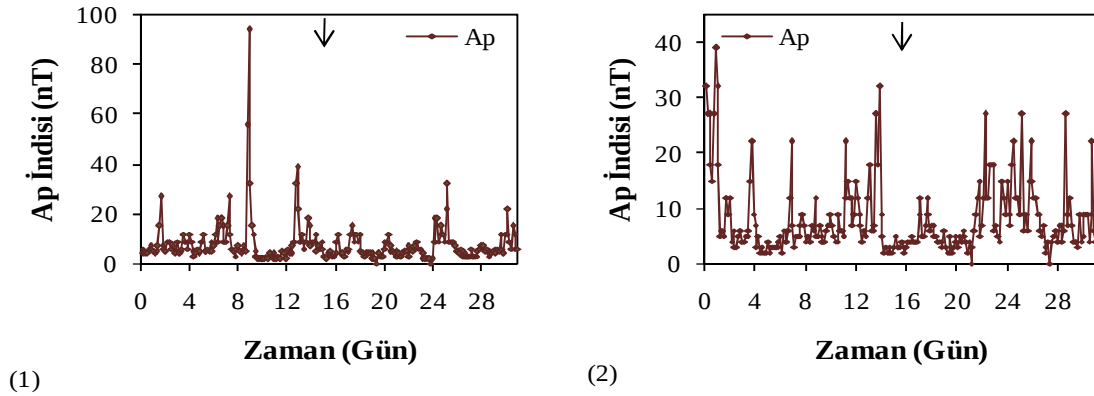
Şekil 4.24. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremler için jeomanyetik Kp indisi

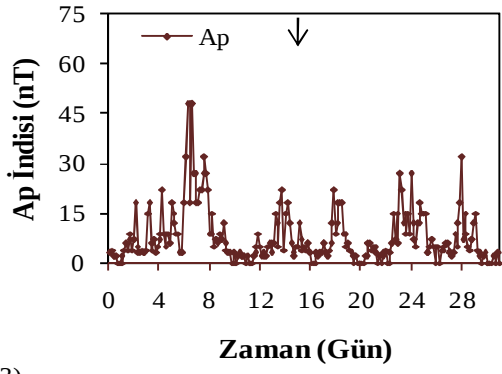


Şekil 4.25. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için jeomanyetik Kp indisi

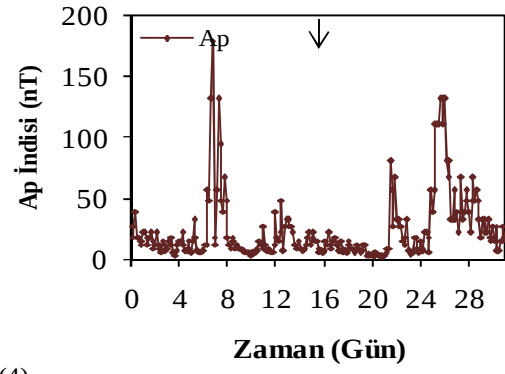
Şekil 23-24-25’de Jeomanyetik Kp indisi ile analiz sonuçları incelendiğinde, kritik frekanstaki değişimlerin bu indislere uyumlu sonuçlar verdiği ifade edilebilir. $K_p \geq 4$ eşiği ile analizlerde değişimlerin meydana geldiği günler incelendiğinde, genel olarak küçük ve büyük fırtına meydana geldiğinde, kritik frekansta buna bağlı olarak artışlar gözlenmiştir. Kp’nin daha büyük değer aldığı (≥ 7) değişim günlerinde, artışla beraber kendi medyan değerinin çok altında değişimler meydana gelmiştir. Ancak deprem hazırlık alanının içinde daha uzakta ve dışında olan istasyon sonuçları arasında farklılıklar mevcuttur. Depremlerin çoğunda deprem merkezine dışında olan istasyonlarda, manyetik fırtınaya bağlı olduğu düşünülen değişimler daha çok görülürken, alanın içinde özellikle deprem merkezine daha yakın istasyonlarda daha az veya hiç görülmemektedir. Diğer analizlerde elde edilen sonuçlar özellikle DA’de genel olarak jeomanyetik fırtınalardan bağımsız sonuçlar vermektedir. Jeomanyetik fırtınanın olmadığı veya sadece aktif olduğu dönemlerde de önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu nedenle sonuçlarda her ne kadar jeomanyetik fırtınaların etkisi görülse de, aktivitenin düşük olduğu dönemlerdeki değişimlerin olması ve istasyon sonuçlarında ki farklılar, sismik kaynaklı değişimlerin varlığını ortaya koymaktadır.

4.9.3 Ap İndisi

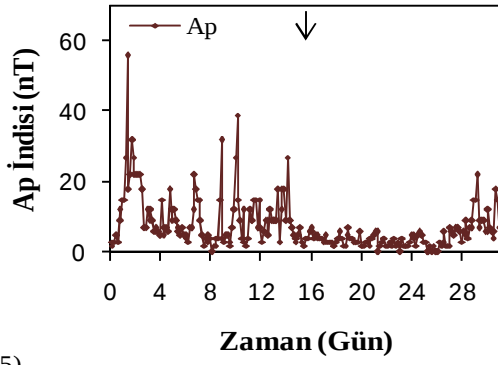




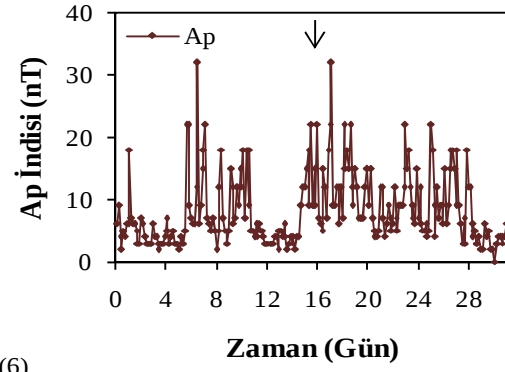
(3)



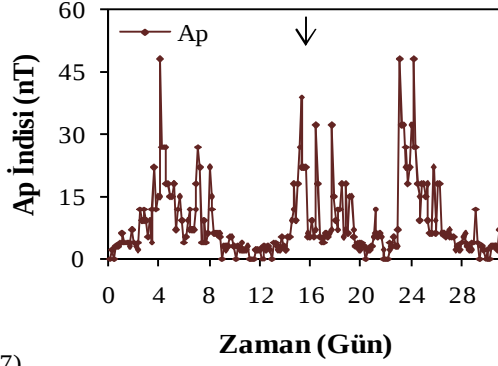
(4)



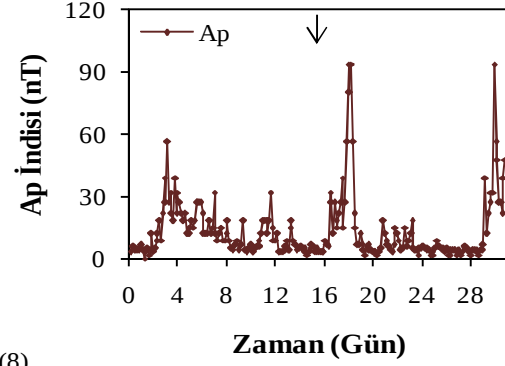
(5)



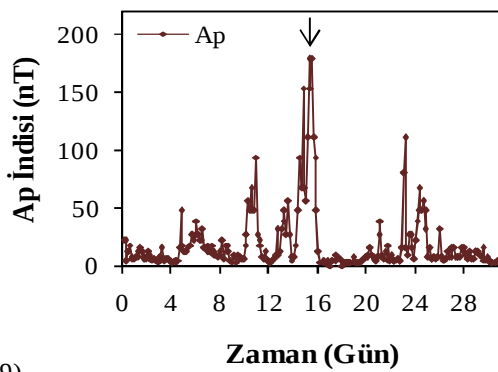
(6)



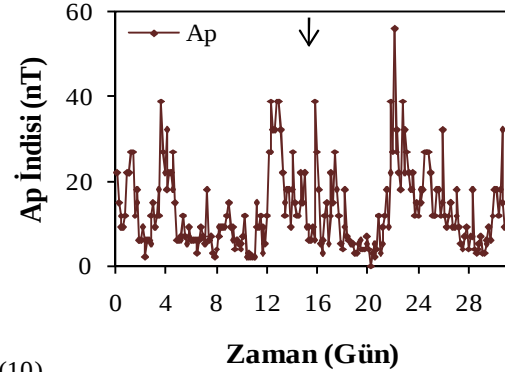
(7)



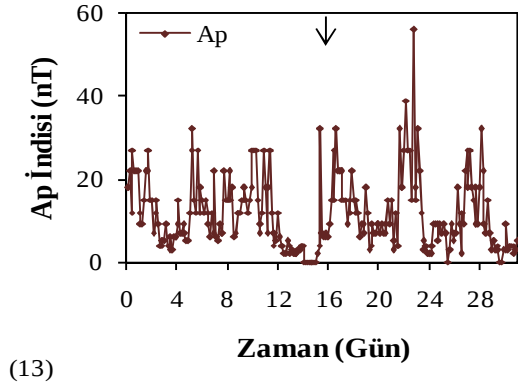
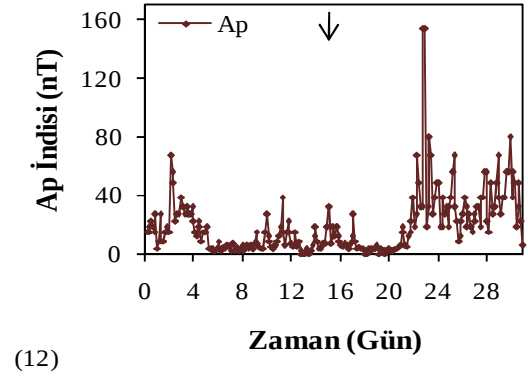
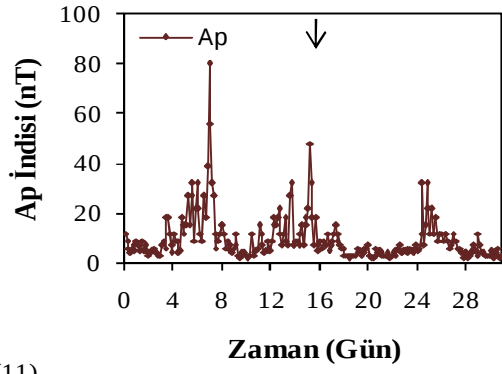
(8)



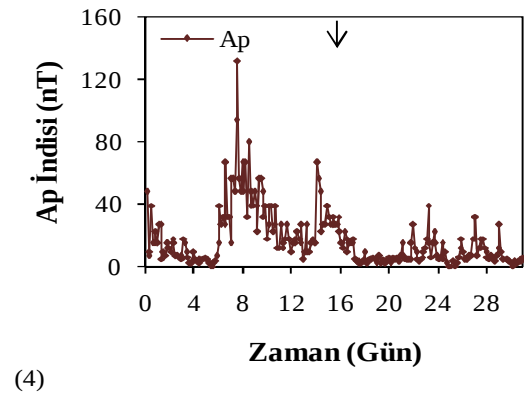
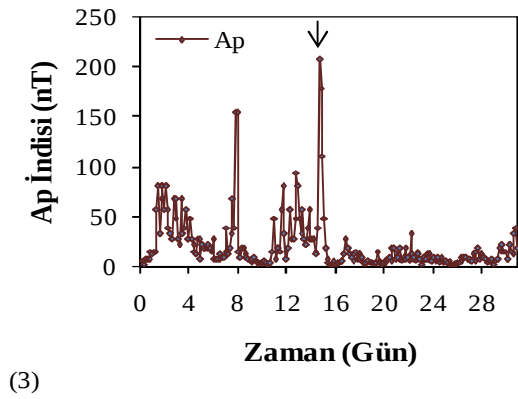
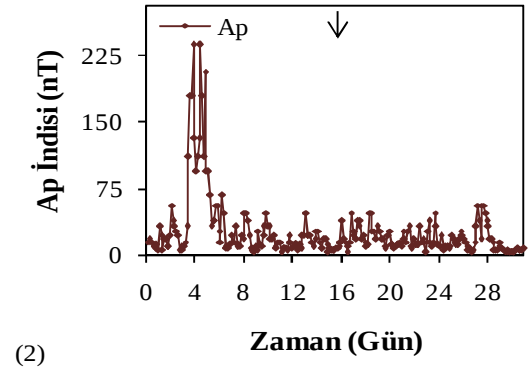
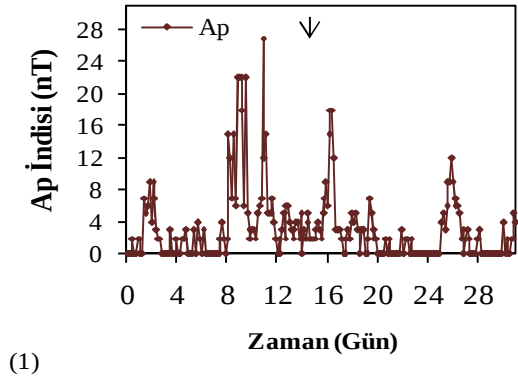
(9)



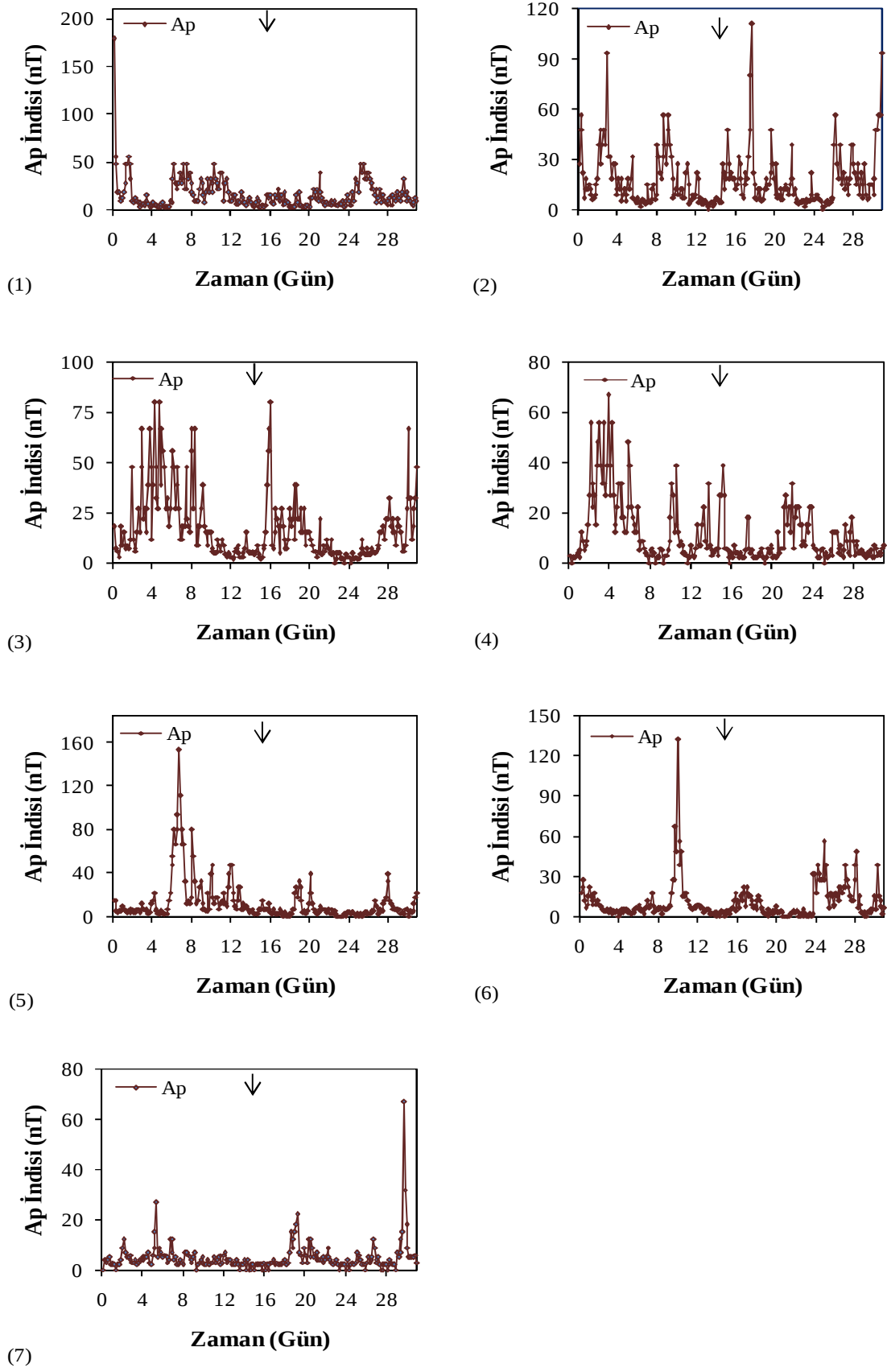
(10)



Şekil 4.26. Hazırlık alanı içinde tek istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Ap indisi



Şekil 4.27. Hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan deprem için jeomanyetik Ap indisi



Şekil 4.28. Hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremler için jeomanyetik Ap indisi

Ap indisinin tüm depremler için değişimine bakıldığında (Şekil 26-27-28), elde edilen sonuçlar Kp ile benzerdir. Korelasyon, standart sapma ve IQR analizlerinin jeomanyetik Kp ve Ap indislerinin değişimine kolay cevap verdiği görülmektedir. Ancak çoğu depremde DA sonuçlarının bu indislerle ilişkili değişim sonuçlarını vermediği görülmektedir. $Ap \geq 30$ nT eşiği ile analizlerde değişimlerin meydana geldiği günler incelendiğinde, genel olarak küçük ve büyük fırtına meydana geldiğinde, kritik frekansta buna bağlı olarak artışlar gözlenmiştir. Jeomanyetik indislerle elde edilen diğer sonuçlarda da olduğu gibi, deprem hazırlık alanının içinde ve dışında olan istasyon sonuçları arasında farklılıklar mevcuttur. Depremlerin çoğunda deprem merkezine dışında olan istasyonlarda, manyetik fırtınaya bağlı olduğu düşünülen değişimler daha çok görülürken, alanın içinde özellikle deprem merkezine daha yakın istasyonlarda daha az veya hiç görülmemektedir. Jeomanyetik fırtınanın olmadığı veya sadece aktif olduğu dönemlerde de önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu nedenle sonuçlarda her ne kadar jeomanyetik fırtınaların etkisi görülse de, aktivitenin düşük olduğu dönemlerdeki değişimlerin olması ve istasyon sonuçlarında ki farklılar, sismik kaynaklı değişimlerin varlığını ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 1975-2009 yılları arasında Japonya’da meydana gelen, $M \geq 5.0$ büyüklüğünde ve $0.0 < D < 40$ km derinliğinde toplam 24 deprem için, bölgede bulunan iyosonda istasyonlarından alınan iyonkürenin F2 bölgesi kritik frekansının (f_oF2) değişimi bazı istatistiksel yöntemlerle incelenmiştir. İncelenen depremler data alınan istasyon/istasyonların deprem hazırlık alanının içinde ve dışında olmasına göre üç bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm 13 deprem için bu alan içinde olan sadece tek istasyondan veri alınırken, 4 depremde bu alan içinde birden fazla istasyondan veri alınmıştır. Son bölümde hem deprem hazırlık alanı içinde hem de bu alanın dışında Bölüm 4’de detaylarıyla açıklandığı üzere yeterli koşulu sağlayan istasyon bulunduran 7 deprem bulunmaktadır. Bu depremlere Korelasyon [Oto Korelasyon (OK), Çapraz Korelasyon (ÇK)], Standart Sapma (SS), Çeyrekler Arası Oran (IQR) ve Dalgalanma analizleri uygulanmıştır.

Sonuçlar ilk etapta analiz analiz incelenmiş ve Güneş ve Jeomanyetik indisler göz önünde bulundurulmadan, depremin büyüklüğü, derinliği, istasyonun deprem merkezine uzaklığı, istasyonlar arası uzaklık (deprem hazırlık alanının hem içinde hem de dışında veri alınan istasyon bulunan depremler için), bölge içinde deprem merkezlerinin ve istasyonların konumlarına bakılarak incelenmiştir. Daha sonra, Güneş ve jeomanyetik indisler göz önünde bulundurularak, ele alınmıştır.

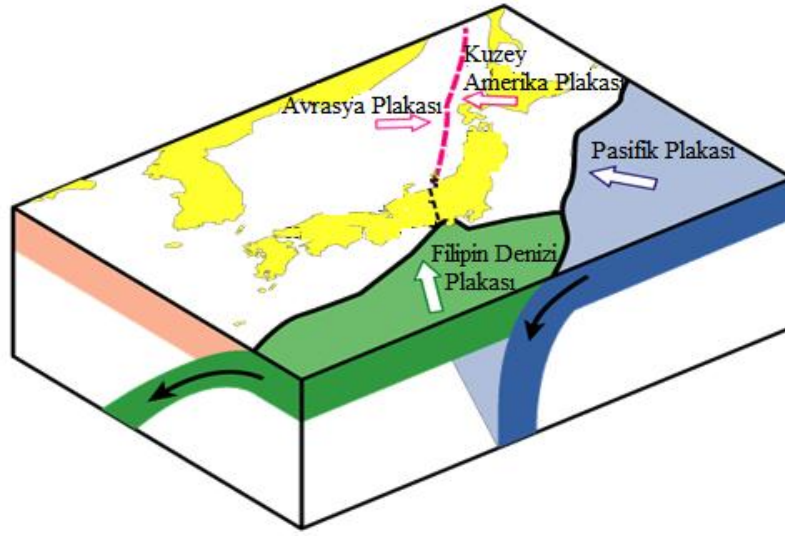
Tüm depremler için hemen hemen tüm analizlerde özellikle sismik şoktan önceki periyot incelendiğinde, büyük ya da küçük değişimler meydana geldiği görülmektedir. Genel olarak deprem merkezine yakın istasyonlarda (250 km’den büyük olmayan) görülen değişim daha fazladır. Aynı büyüklükte-yüzeye daha yakın depremler ve benzer derinlikte-farklı büyüklükte depremler incelendiğinde, büyük ve yüzeye daha yakın depremler için bu etki daha fazladır ancak bir bütün olarak ele alındığında, genelleme yapılamamaktadır. Yani doğrudan “büyük veya yüzeye yakın depremler için görülen değişim daha fazladır” sonucuna ulaşılammıştır. Yüzeye yakın depremlerde, depreme yakın görülen değişim miktarı daha fazladır.

Sonuçlar hem deprem merkezinin hem de depremlerin istasyonlara göre konumunun önemli olduğunu göstermiştir. Wakkanai istasyonu Hokkaido bölgesinde meydana gelen depremlere en yakın istasyon olmasına rağmen, depremlerin büyüklükleri yüksek olsa bile, korelasyon analizinde değişimler daha az görünmektedir. Kokibunji istasyonu hem Honshu hem de Hokkaido bölgesi için değişimlere daha belirgin yanıt

vermektedir. Honhu'nun doğusunda meydana gelen depremlerde analizler daha büyük değişimler ortaya koyarken, batısı için tam tersi bir durum görülmektedir. Analizlerde karada meydana gelen depremler için denizde meydana gelenlerden daha fazla değişim görülmesi beklenirken, özellikle Honhu'nun doğu sahillerinde, denizde meydana gelen depremler için daha fazla olduğu görülmüştür.

Japonya 4 büyük tektonik plakanın (Pasifik, Avrasya, Filipin ve Kuzey Amerika plakaları) kesiştiği bir bölgededir. Bu bölgede çok sayıda deprem meydana gelmesinin nedeni budur (Her yıl ~1500'e yakın deprem meydana gelmektedir.). Bu plakaların hareketleri (Şekil 5.1) incelendiğinde, Filipin, Pasifik ve Avrasya plakalarının dalma-batma kuşağını oluşturduğu görülmektedir. Filipin plakası ile Pasifik plakası karşılaştığında, Pasifik plakası daha yoğun ve eski bir plaka olduğundan, Filipin plakasının altına, Filipin plakası Kuzey Amerika ve Avrasya plakalarıyla karşılaştığında bu plakaların altına, Pasifik plakası Kuzey Amerika plakası ile karşılaştığında bu plakanın altına girerek, hareket eder. Kuzey Amerika ve Avrasya plakaları arasında özellikle aktif bir sınır yoktur.

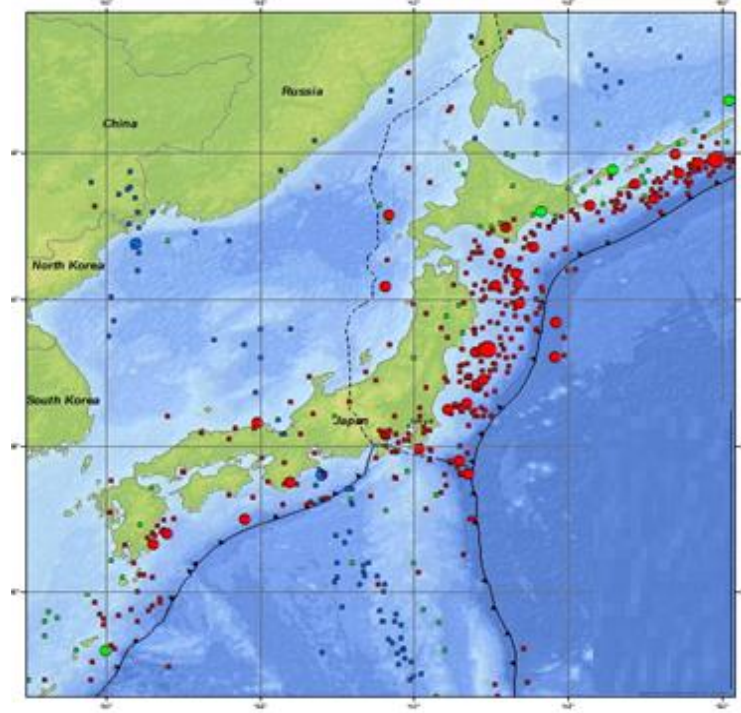
“Tektonik depremler”; Yer içinde biriken iç kuvvetlerin neden olduğu gerilmelerin boşalması ile meydana gelen katmanların yer değiştirme, oynama ve kırılma gibi hareketleri sonucu meydana gelirler ve çoğunlukla levha sınırlarında oluşurlar. Türkiye dahil, Yeryüzündeki depremlerin %90'ı bu gruba girer. Japonya'da meydana gelen depremlerin çoğunluğu tektonik olsa da, volkanik depremler de olmaktadır. “Volkanik depremler”, volkanların püskürmesi sonucunda oluşurlar. Yerin içindeki magmanın yeryüzüne çıkışı sırasındaki fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda oluşan gazların yapmış oldukları patlamalarla bu tür depremlerin meydana geldiği bilinmektedir. Volkanlar komşu plakaların kenarları boyunca yerleşmişlerdir. Volkanik faaliyetler genel olarak bu plaka sınırları boyunca yaygındırlar. Akdeniz, Pasifik ve Hint Okyanusları ve Japonya taraflarında daha sık görülürler. Önemli zarara neden olmazlar ve yereldirler. Ancak volkanik patlamaların sonucu oluşan deprem büyüklüğünün 6.0'nın üzerine çıktığı bilinmektedir. Dünya genelinde ~550 aktif volkan bulunmaktadır ve bunların ~%10'u Japonya'da bulunmaktadır [2].



Şekil 5.1. Japonya’da bulunan tektonik plakalar ve hareketleri [2].

Şekil 5.2’de 1900’den günümüze kadar meydana gelmiş $M \geq 6.5$ depremler görülmektedir. Depremlerin genellikle plaka sınırlarında, özellikle Pasifik-Kuzey Amerika plaka sınırında daha fazla, daha büyük ve yüzeye daha yakın depremler meydana geldiği görülmektedir. Kuzey Amerika-Avrasya plakalarının sınırı en az deprem meydana gelen bölgedir. Hemen altındaki Şekil 5.3 a) ve b)’de ise Japonya’daki volkan kuşağı ve bunları oluşturan üç büyük plaka görülmektedir. Şekil 5.4’de ise çalışmada kullanılan tüm depremler ve iyosonda istasyonları görülmektedir. Plaka hareketlerini göz önünde bulundurarak, Şekil 1-4’e bakacak olursak; öncelikle incelenen depremlerin bir kısmının bir kısmının volkan kuşağı üzerinde meydana geldiği görülecektir. Bu depremlere ait analiz sonuçlarına bakacak olursak en değişimin görülmediği veya sismik aktiviteyle ilişki kurulamadığı depremlerin (tek istasyonlular: 3, 7, 8; alan içinde çok istasyon olanlar: 1; alan dışında da istasyonlular: 1, 3, 4, 5, 7) bu kuşak üzerinde olduğu görülecektir. Volkanik depremler yereldir ve bu nedenle uzak mesafeler için özellikle iyonküredeki etkilerinin daha az olması beklenebilir. Plakaların dalma-batma sınırlarında meydana gelen depremlerin (tek istasyonlular: 1, 2, 5, 6; alan içinde çok istasyon olanlar: 2, 4; alan dışında da istasyonlular: 2, 6, 5), analizlerde daha fazla değişim gösterdiği görülmektedir. Hatırlanacak olursa, Bulgularda Honshu’nun batısında meydana gelen depremlerin analiz sonuçlarında değişkenlik az görülmekteyken, doğusu için tam tersi bir durum görülmekteydi. Karada meydana gelen depremlerde, okyanusta meydana gelenlerden daha fazla değişkenlik beklerken, genel olarak tersi bir sonuç ortaya çıkmaktaydı ki bu sonuçlar;

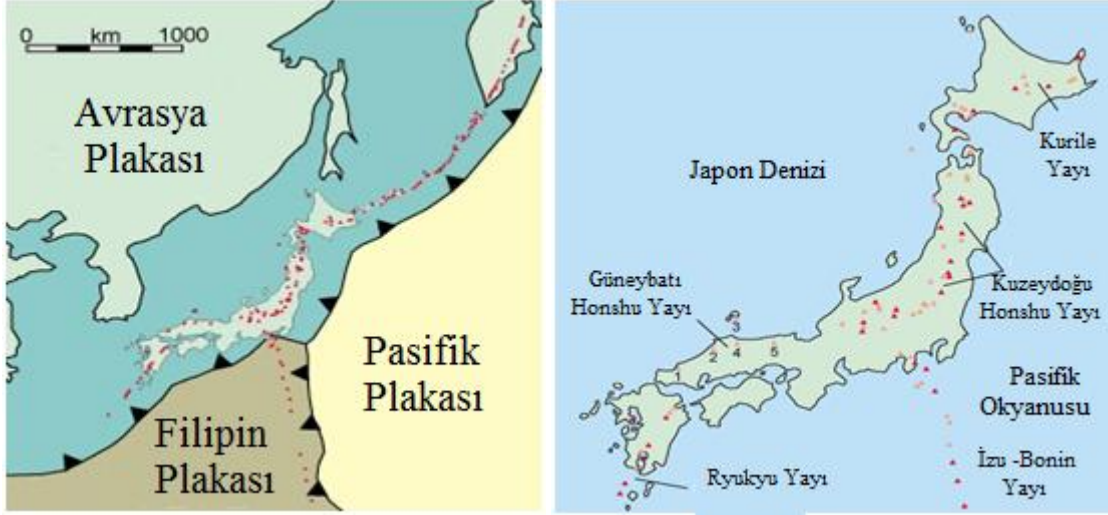
plaka konumları ve birbirleriyle etkileşim şekillerinin yanı sıra, volkanik kuşaklarla örtüşmektedir. Bu, aynı zamanda farklı plakalardaki depremlerin meydana getirebileceği etkinin farklı olabileceğini ortaya koyması açısından önemlidir ki; bu nedenle istasyonun da konumu önemli olmaktadır. Bu bulgularla birlikte analiz sonuçları, depremlerin meydana geldiği bölgenin önemli olduğunu ortaya koymaktadır [65].



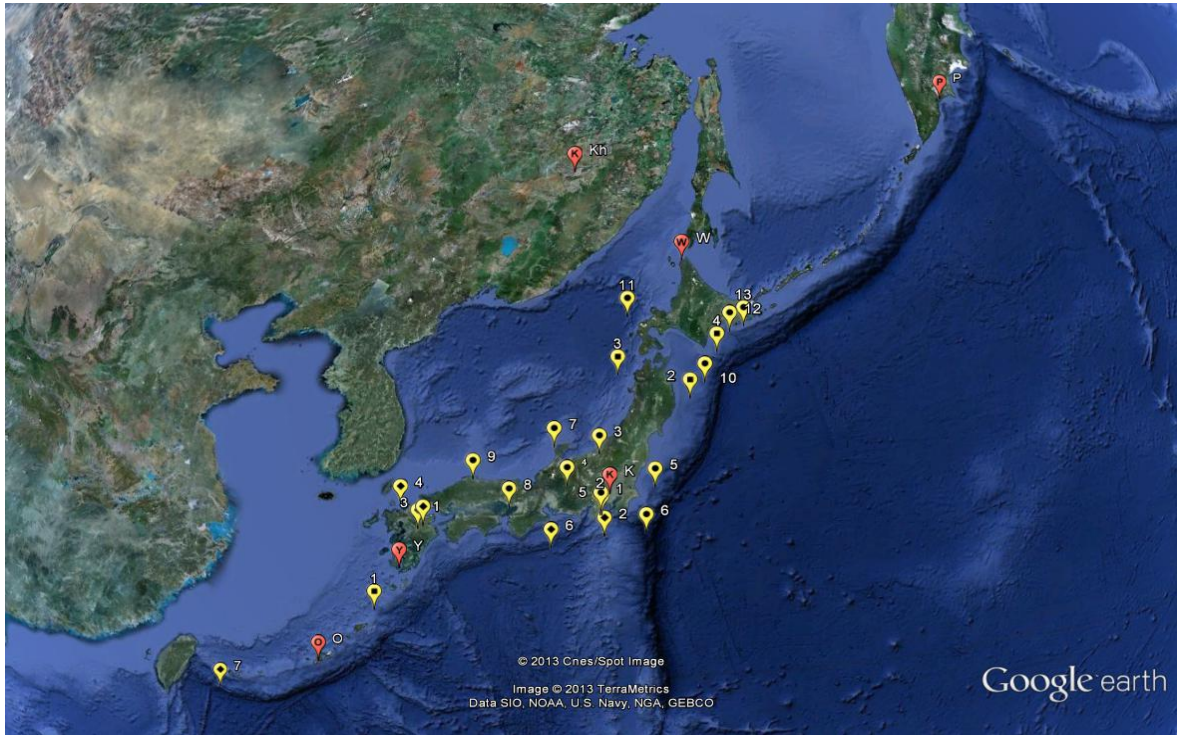
Şekil 5.2. 1900'den günümüze Japonya'da $M \geq 6.5$ olan depremler. Şekildeki siyah üçgenler, plakaların üst üste bindiği kuşakta, batma kuşaklarını göstermektedir [2].

Analiz sonuçları güneş ve jeomanyetik indislerle birlikte incelendiğinde, görülen değişimlerin kaynağı daha iyi ayırt edilebilmiştir. Bu çalışmada $K_p \geq 4$, $A_p \geq 30$ nT ve $Dst \leq -50$ nT alt sınır alınmıştır. İncelenen depremlerin birçoğunda deprem öncesi jeomanyetik olarak aktif, hatta bazen oldukça yüksek aktivitede, bazılarında ise oldukça sakin dönemler olduğu görülmektedir. Özellikle kritik frekanstaki uzun süreli büyük düşüşlerde, manyetik fırtınaların oldukça şiddetli olduğu görülmüştür. Manyetik fırtınaya bağlı değişimler, sismik aktiviteye göre daha uzun ve daha büyük genlikli değişimler meydana getirmektedir ki, bu da sonuçlarımızda da görülmektedir. Özellikle OK analizi sonuçları manyetik fırtınalarla ilgili değişimleri kolayca göstermektedir. ÇK, aynı

jeomanyetik şartlara sahip istasyonlar arasında uygulandığından, katsayıda görülecek düşüşler başka bir etkenin varlığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3. Japonya için a) tektonik plakalar ve volkanlar, b) volkanik kuşaklar [2].



Şekil 5.4. Çalışmada kullanılan depremler ve veri alınan iyosonda istasyonları

Birçok deprem için analiz sonuçları birbiriyle uyumludur. Analizlerde aynı depreme ait istasyonlar için değişimin görüldüğü günlerin aynı olduğu ifade edilebilir. İstasyonlar arasında tepkiler aynı olmakla beraber, zaman farklılıklar da görülmüştür.

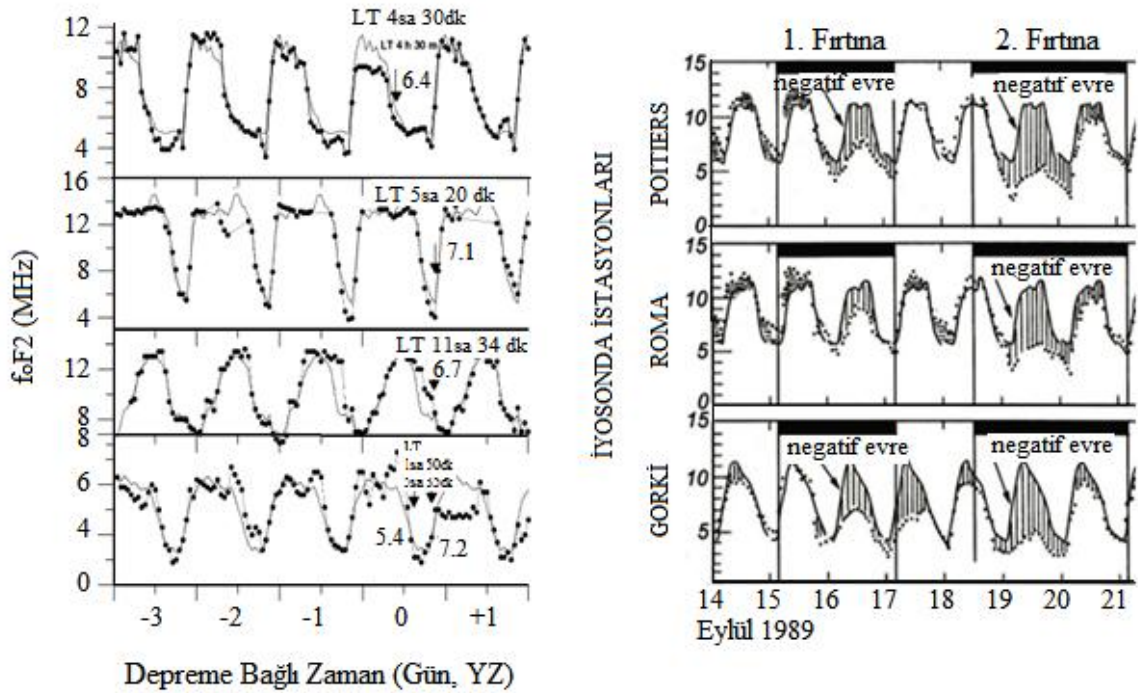
Ancak bazı depremlerde sonuçlar arasında pek uyum görülmemiştir. Deprem hazırlık alanı içinde birden fazla istasyon bulunan depremlerde, deprem merkezine yakın istasyonlar için daha fazla değişim görülmüştür. Deprem hazırlık alanı dışında da istasyon bulunan depremlere bakıldığında, zaman zaman alan dışında olan istasyonda, içerdeki istasyonda görülemeyen değişimler olduğu görülmektedir. Güneş ve jeomanyetik olarak aktif olan ve etkilerini de sonuçlarında gördüğümüz birçok depremde, zaman zaman aynı deprem için deprem hazırlık alanı içinde, genellikle daha yakın olan istasyonda bu etkilerin daha az, bazen hiç meydana gelmediği görülmüştür.

Analizlerde jeomanyetik olarak aktif olmayan günlerde meydana gelen değişimlerin sismik aktivite kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ancak deprem öncesi periyotta birçok günde jeomanyetik aktivitenin görülmesi, sonuçların ayırt edilmesini zorlaştırırken, bazı depremlerde jeomanyetik aktivite çok yüksek olmasına rağmen, analizlerde buna karşı gelen bir değişim görülmemesi veya az görülmesi, manyetik fırtınaya bağlı değişimi etkileyen başka bir etkenin olabileceğini akla getirmektedir. Bazı durumlarda deprem öncesi periyotta Güneş ve jeomanyetik aktivite çok yüksek olmadığı halde büyük değişimlerin meydana gelmesi ve aynı depreme ait istasyon sonuçları arasında ki farklılıklar, sismik aktiviteye bağlı etkiler olduğunu ortaya koymaktadır.

OK, SS ve IQR analizi sonuçları birbiriyle daha uyumlu olmakla birlikte, DA çoğu depremde diğer analizlerden farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Genel olarak, DA'nin jeomanyetik aktivite değişimlerine pek duyarlı olmadığı ifade edilebilir. Diğer analizlerin özellikle manyetik fırtına sonuçlarına daha açık olduğu ve bu nedenle değişkenliğe neden olan aktivitenin (sismik mi, jeomanyetik mi?) zaman zaman ayrımını zorlaştırdığı görülmüştür.

Jeomanyetik fırtınalar ile depremlerin iyonkürede tetiklediği etkiler birbirinden farklıdır. Şekil 5.5 (a)'da, yapılan başka bir çalışmada, büyüklüğü 5.4'den 7.1'e değişen depremler için farklı iyonsonda istasyonlarında kaydedilen tipik sismik değişimler gösterilmektedir. Sismik aktiviteyle ilişkili plazma yoğunluğunda değişimler meydana geldiği için, ortalama olarak iyonküredeki günlük değişimler aynı mertebededir. Sismik kaynaklı değişimler, yerel zamanda bazı bazı düzenli eğilimler gösterir. Ancak sismik şok öncesi farklı günler için farklıdır. Şekil 5.5 (b)'de ise; 250 km yükseklikte F bölgesi içinde elektron yoğunluğunun dağılımının teoriksel hesaplamaları göz önünde bulundurulmuştur. İyonsondanın pozisyonuna bağlı olarak, aynı dağılım için tamamiyle farklı sonuçlar görülmektedir. Deprem öncesi a-pozisyonunda, iyonsondanın kuzey-doğusunda deprem

merkezi ve pozitif sapma var. b-pozisyonunda, iyosondanın kuzey-batısında ve negatif sapma var. c-pozisyonunda, iyosondanın kuzeyde, neredeyse sıfır sapma ve d-pozisyonunda, iyosondanın kuzey-kuzey batısında ve b'dekine göre daha küçük negatif sapmalar mevcut. Bu sonuçlar farklı depremler için, iyosondalarda gözlenen değişim biçiminin, bu çalışmada olduğu gibi, deprem merkezi ve iyosondanın bağıl pozisyonlarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır (yani, değişime neden olan elektrik alanın yönü de değişmektedir) [66].



Şekil 5.5. (a) f_0F2 'nin günlük medyan değerlerine göre değişimi. (1) Milkovo (5.09.1971, 18.35 UZ, $M = 7.2$); (2) Roma (23.11.1980, 18.34 UZ, $M = 6.7$); (3) Vanimo (16.07.1980, 05.26 UZ, $M = 7.3$); (4) Norfolk (14.07.1980, 16.15UZ, $M = 6.6$). Oklar deprem anını göstermektedir. (b) 15-16 Eylül ve 18-20 Eylül 1989 iki manyetik fırtına süresince bazı Avrupa iyonküre istasyonlarında F2 bölgesi kritik frekansının sakin günlerdekine göre üç istasyonda f_0F2 'nin günlük sakin zamana göre değişimini [66].

Depremin tetiklediği etkiler [1]:

- Depremin tetiklediği değişimler çok uzun süremez (4-6 saati geçmez). Bazı çok büyük depremlerde (Büyük Alaska Depremi) ~12 saate ulaştığı görülmüştür.
- Birkaç saat süren pozitif veya negatif salınımlara sahip olabilirler.
- İyonkürede görülen değişimlerin maksimum sapması $\pm\%30$ 'dur. Ortalama olarak aynı genliğe sahiptirler. Yerel zamanın bazı özel anlarında bu değişim %100 olabilir.

- Değişimlerin görülme zamanı yerel saate bağlıdır. Gözlem noktasının deprem merkezine göre konumu ve meydana gelen anormal elektrik alnın büyüklüğüne bağlıdır.

- Depremi tetiklediği etkiler, plazma yoğunluğuna etki eder ve depremden birkaç saat ile 5 gün öncesinde gözlenir.

- Gözlenen değişimler, deprem merkezine yakın istasyonda daha belirgindir. Diğer istasyonlarda sismik aktivite kaynaklı değişimler kendi medyan değerine daha yakındır.

- Sismik-iyonküre değişimleri, iyonkürenin ölçü yüksekliğinin artmasına sebep olarak, plazmanın dikey dağılımında bir etkiye sahiptirler.

- Ölçü yüksekliğinde bu değişimler, çoğunlukla paralel parçacık akışları veya iyon kütleindeki (hafif iyon kütlelerinin artması) değişimlerden dolayıdır. Plazma sıcaklığı değişimlerinden dolayı değildir.

- Sismik-iyonküre değişimleri, hafif iyonların (H^+ ve He^+) yoğunluğunun artması ve O^+ iyonlarının manyetoküredeki akı değişimlerinden dolayı, F tabakası yüksekliklerinde ortalama ana iyon kütlelerinin azalması ile sonuçlanır.

- Depremden birkaç gün önce $h_m F2$, 50-135 km'ye kadar artar.

- Depremden önce neredeyse hiç ısınma olmaz.

- Deprem hazırlık alanı üzerinde depremden birkaç gün önce D-bölgesinde iyonlaşma artar.

- Es tabakasının oluşumu deprem hazırlık alanı üzerinde birkaç gün öncesinde artar.

- İyonkürede etkilenen alanın maksimumu, deprem merkezinin dikey izdüşümü ile uyuşmaz. Bu değişim yüksek ve orta enlemlerde ekvatora doğru kaldırılır.

- Bazı depremlerde bu değişimler, eşlenik noktalarda da görülebilir.

- Bu etkilerin görülebilmesi için $M \geq 5.0$ olmalıdır.

Manyetik fırtınaların tetiklediği etkiler [1]:

- Manyetik fırtınaların tetiklediği etkiler uzun sürekliliğe sahiptirler (12 saatten fazla). Asla birkaç saat kadar kısa sürmez. Genel olarak etkileri 40-48 saat devam etmektedir.

- Değişimin işareti pozitif veya negatif salınım karakterine sahiptirler.

- Genlik değişimleri çok daha belirgindir, 2 veya 3 katı olabilir.

- İyonkürenin manyetik fırtınalara tepkisi küreseldir. Tüm istasyonlarda benzer genlikte değişimler gözlenir.

- F tabakası yüksekliklerinde ortalama moleküler kütle artar. $[N_2+O_2]/(O)$. Ana iyon kütleleri NO^+/O^+ 'nın artmasından dolayı artar (bu da ortalama elektron yoğunluğunun azalmasına ve kritik frekansın azalmasına neden olur.).

- $\Delta h_m F2$, 60-80 km'dir sakin zamanlarda $h_m F2$, 250 km'den daha az değildir.
- Pozitif veya negatif safhalar fırtınanın gelişme safhasına bağlıdır.
- Fırtınalar süresince elektronlar ve iyonlar çok ısınır (2000-3000 K)

Deprem öncesi meydana gelen etkiler çeşitlidir ve depreme bağlı olarak oluşan bu anormalliklerin oluşma mekanizması farklı olacağı gibi, bu parametrelerin kendi backgroundlarından sapması da farklıdır. Sismik aktiviteler süresince iyonkürede gözlen anormal durum, yer kabuğu ve iyonküre arasında bir bağlantı olduğunu ortaya koyar. İyonküredeki bu anormalliklerin kaynakları tam olarak açıklanamasa da, bu bağlantıyı açıklamak için birkaç olası kaynak ileri sürülmektedir: (1) Dünya'nın yerçekimindeki değişim, (2) jeomanyetik alandaki değişim, (3) yarı-durağan elektrik alan, (4) iyonkürede sismik-elektromanyetik salınımların nüfuzu, (5) iç gravity dalgaları, (6) gaz salınımı ve (7) türbülanslı difüzyon.

Depremler öncesi yer kabuğu-iyonküre etkileşimi için sıkça bahsedilen iki model vardır: elektromanyetik model ve akustik gravity dalgalarının (AGW) etkisi. Genelde tektonik levha hareketinden dolayı sismik stres enerjisi vardır ve bazen bu *deprem hazırlık safhası* olarak bilinen patlayıcı bir safhaya ulaşır. Depremden dolayı enerji, elektriksel ve mekaniksel olarak iki formda açığa çıkar. Salınan bu enerji radon, soy gazlar ve sera gazı sızıntılarıyla birlikte olur ki bu hava türbülansına neden olur. Gaz sızıntısından dolayı anormal elektrik alan üretilir ve bu elektrik alan üretimi, hava türbülansından dolayı akustik gravity dalga üretimiyle güçlenir. Anormal elektrik alan; gizli ısı akısı ve su buharı üretiminden sorumludur. Bu sızıntılar elektrik alanları tarafından yukarı taşınır ve E tabakası yüksekliklerinde ekstra iyonlaşma üretir. ~ 1000 V/m anormal elektrik alan şiddetiyle böyle bir kaynak iyonküre içinde (E bölgesinde) 1 mV/m, jeomanyetik alan çizgilerine dik bir elektrik alana neden olacaktır. Bu, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ parçacık sürüklenmesinden dolayı iyonkürede düzensizlikleri oluşturmak için yeterlidir. Bu elektrik alan; E bölgesinde ve sporadik E oluşuşumunda pozitif ve negatif anormallikleri, akustik gravity dalgalarını üreten Joule ısısına neden olur. İyonkürenin E tabakasına nüfuz eden anormal elektrik alan yer yüzeyinde elektrik alanın yönüne bağlı olarak (aşağı veya yukarı), elektron yoğunluğunda sırasıyla azalma veya artma meydana getirir. Tüm bu süreçler süresince nötr rüzgârlar ve $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ sürüklenmesinden dolayı, F2 tabakası daha düşük elektron yoğunluklu

üst bölgelere taşınırken, Es tabakası sırasıyla f_oF2 'de azalma, f_oEs 'de artmaya neden olarak, daha yüksek elektron yoğunluğu bölgesini yukarı kaldıracaktır. F2 bölgesi kritik frekansı, F2 bölgesi maksimum elektron yoğunluğu ($NmF2$) ile doğru orantılıdır. Yani elektron yoğunluğundaki herhangi bir değişim, kritik frekansı da değiştirecektir. Birçok çalışmada depremlerden önce TEC ve kritik frekans değişimleri eş zamanlı olarak karşılaştırılmış ve birbirini destekleyen sonuçlar elde edilmiştir. Tabakasında gözlenen anormalliğin diğer bir olası nedeni ise; sismik elektrik alanlar tarafından indüklenen, sismik kuşaklar üzerindeki atmosferde bulut yük boşalmalarının neden olduğu sporadik E tabakasında ilave iyonlaşmaların meydana gelmesi ve yarı-statik ısınmadır. Sismik kaynaklardan salınan radonun elektrik alanlar tarafından yukarı taşınması, bu yüksekliklerde ilave iyonlaşmalara neden olur. Elektromanyetik salınımların ortamda yayılma kabiliyetinden dolayı bu salınımlar ve anormallikler deprem merkezinden farklı mesafelerde kaydedilmektedir [13, 15, 24, 26, 37, 42, 47].

Sonuç olarak atmosfer, iyonküre ve manyetoküredeki süreçlerin karmaşık zinciri alt iyonkürede iyonlaşma üreterek, parçacık yağmuruna sebep olur. İyonlaşma iyonkürenin D bölgesinde elektron yoğunluğun artmasına ve iyonkürenin aşağılanmasına sebep olur. Bu aşağılanma, VLF'den VHF'ye farklı frekans bantlarında radyo dalgalarının yayılım şartlarını değiştirir [15].

E ve F bölgeleri için deprem etkileri ayrı ayrı çalışılmış olmamasına rağmen, sismik aktivitelerle ilgili olarak rapor edilen etkiler her ikisi için eşzamanlıdır. Elektromanyetik dalgalarla ilgili olarak yapılan çalışmalar, iyonkürede meydana gelen anormalliklerin depremin büyüklüğü ile doğru, derinliği ile ters orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Hem güçlü hem de yüzeye yakın depremlerle iyonküre güçlü bir şekilde karışmaktadır [14, 24, 26].

VLF/LF çalışmaları depremlerle oluşan iyonküredeki tedirginliklerin, depremin derinliğiyle negatif, büyüklüğüyle pozitif ilişkili olduğunu göstermektedir. İyonküre hem büyük hem de yüzeysel depremlerle güçlü bir şekilde karışmaktadır [26].

Radon salınımı ve anormal elektrik alan yaklaşan depremi kısa-vadede belirlemede birlikte kullanılmasına rağmen, radonun depremin iyonküredeki etkileri üzerinde doğrudan etkisi gösterilmeye çalışılmış ve radonun hava iletkenliğini değiştirdiği ve sonuç olarak atmosferik elektrik alan etki ettiği iddia edilmiş olsa da, bu ilişkiyi doğrudan gösterilememiştir. Radon ve f_oF2 'nin eşzamanlı ölçümleriyle (Şekil 2.10) bu ilişki ortaya konulmuştur. Sonrasında yapılan birçok çalışmada radon salınımı sonrasında pozitif ve

negatif iyonların yoğunluğunun ve elektrik alanının arttığını gösteren birçok çalışma mevcuttur. Bu da radon-kritik frekans etkileşim zincirinin varlığını gösterir [1].

Yer seviyesinde kaydedilen ULF-ELF gürültüleri iyonküre plazmasındaki kararsızlıkların bir sonucu ise, bu kararsızlıkların şiddeti radon sızıntılarıyla yakından ilişkili olmalıdır. İsrail’de radon ve ULF salınımlarının ölçümlerinde, bunu destekleyen sonuçlar bulunmuştur [15].

Genel olarak karada meydana gelen depremlerde anormallikler daha çok ve belirgin bir şekilde gözlenirken, denizde (okyanusta) meydana gelen depremler için aynı sonuçlar (ya da çok az) elde edilmemiştir. Bu ilişki büyük ve yüzeye yakın depremlerle daha çok görülmektedir. Bu anormallikler yaklaşık 10 gün öncesine kadar görülebilmektedir. Özellikle VLF/LF yayılımındaki anormallikler, GPS ölçümleri karasal depremlerle ilişkili bulunurken, denizde meydana gelen depremlerde aynı ilişki gözlenmemektedir. Oluşan anormalliklerle ilgili temelde iki mekanizma vardır. İlk olarak kimyasal etki olup, yerkabuğundan radonun salınması ve Dünya atmosferinin alt bölgelerinde iyonlaşmaya neden olması ve sonrasında atmosferik elektrik alanı değiştirmesi şeklindedir. İkinci mekanizma ise, akustik dalgalarıdır. Akustik gravity dalgaları, yüzeyde jeokimyasal parametrelerin değişimiyle uyarılır. Bu etkiler birçok parametredeki değişimleri doğrudan veya dolaylı olarak etkileyerek, anormalliklerin oluşumuna katkıda bulunur. Karada ve denizde meydana gelen depremler için ortaya çıkan farklılığın nedeni de bu mekanizmaların her iki deprem türünde işleyişinden kaynaklanmaktadır. Birinci ve buna bağlı olarak ikinci mekanizmanın meydana geldiği yer bakımından farklı olması ve bu değişimlerin yayılması için denizin elverişli olmaması, bu farklılığı açıklar. Bu nedenle okyanusta meydana gelen depremlerde birçok öncü gözlenemeyebilecektir ve bazen öncüler tam olarak deprem merkezi üzerinde değil de, genellikle ekvatorial yönde jeomanyetik alan çizgileri üzerinde gözlenir [15, 26].

Çalışmalar yapılırken depremle ilgili olarak depremin meydana geldiği bölge, derinlik, büyüklük, ölçüm alınan yerin deprem merkezine olan uzaklığı ve bölgenin kayaç yapısının yanında bölge üzerinde iyonküre tabakasının genel trendleri iyi bilinmelidir. Sismik-iyonküre karışıklıkların ilk şoktan önce birkaç gün önce üretilir ancak her zaman deprem merkezi üzerinde konumlanmaz. Bu karışıklıklar karşı yarımkürede birleşik bölgelerde manyetik alan çizgileri boyunca transfer edilebilir [51].

Son zamanlarda iyonkürede sismik aktivelerle ilişkili olarak meydana gelen bu karışıklıkların sadece deprem merkezi üzerindeki bölgede değil, manyetik alan çizgileri

boyunca taşınarak, diğer yarımküredeki eşlenik bölgelerde meydana gelebileceğini gösteren çalışmalar vardır. Burada iki önemli etken vardır. İlki elektrik alan manyetik alan çizgileri boyunca iletilir ve bu nedenle çoğu durumda karışmış halde bulunan bölge kuzey yarımkürede deprem merkezi projeksiyonundan güneye veya güney yarımkürede kuzeye kaldırılmasıdır. Diğer ise, elektrik alan üreten mekanizmaya göre Dünya yüzeyi üzerinde uzaysal elektrik yükünün konfigürasyonu, yüzey havasındaki türbülasyon süreçlerine bağlıdır. Bu yük uzak mesafelere rüzgâr ile taşınabilir. Bazı araştırmacılar sismik aktiviteye neden olan tersi bir bağlantının olasılığını göz önünde bulundurmaktadırlar [42, 57].

KAYNAKLAR

- [1] **Pulinets, S. ve K. Boyarchuk**, 2004, Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer.
- [2] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrofer>, 2013.
- [3] **Hanslmeier, A.**, 2007, The Sun and space Weather. cilt 347, Springer Verlag.
- [4] **Akkaya, İ.**, 1997, *Antenler ve Propagasyon*.
- [5] <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>, 2012.
- [6] **Whitten, R.C. ve I.G. Poppoff**, 1971. Fundamentals of Aeronomy, New York, NY (USA): John Wiley & Sons, s: 446,. **1**.
- [7] **Ratcliffe, J.A.**, 1972. An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere, CUP Archive.
- [8] **Kelley, M.C.**, 2009. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics & Electrodynamics, cilt 96, Access Online via Elsevier.
- [9] **Barclay, L.W.**, 2003, 1973. Propagation of Radiowaves, Inst. of Engineering & Technology.
- [10] **Rishbeth, H.**, Physics and Chemistry of the Ionosphere, *Contemporary Physics*, **14**(3), s. 229-249.
- [11] **Pulinets, S. ve J. Liu**, 2004, Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity, *Advances in Space Research*,. **34**(9), s. 1926-1933.
- [12] **Tsolis, G. ve T. Xenos**, 2010. A Qualitative Study of the Seismo-Ionospheric Precursors Prior to The 6 April 2009 Earthquake in L'Aquila, Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, **10**, s. 133-137.
- [13] **Panda, G., vd.**, Study of Ionospheric Perturbations during Turkey–Central Earthquake of December 20, 2007, *J. Ind. Geophys. Union (April 2010)*, **14**(2), s. 133-138.
- [14] **Muto, F., vd.**, 2009. Ionospheric Perturbations Related to the Miyagi-Oki Earthquake on 16 August 2005, as Seen from Japanese VLF/LF Subionospheric propagation Network, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*,. **34**(6-7), s. 449-455.
- [15] **Devi, M., A.K. Barbara, ve A. Depueva**, 2009. Association of Total Electron Content (TEC) and foF2 Variations with Earthquake Events at the Anomaly Crest Region, *Annals of Geophysics*, **47**(1).

- [16] **Koskinen, H.**, 2011. Physics of Space Storms: From the Solar Surface to the Earth, Springer.
- [17] **Hunsucker, R.D. and J.K. Hargreaves**, 2002. The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation, Cambridge University Press.
- [18] **Schunk, R.W. ve A.F. Nagy**, 2004. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge University Press.
- [19] **Hargreaves, J.K.**, 1995. The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace-the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere, Cambridge University Press.
- [20] **Hanslmeier, A.**, 2010. The Sun and Space Weather. Heliophysical Processes, s. 233-249.
- [21] <http://www.k1ttt.net/technote/kn4lf/kn4lf8.html>, 2012.
- [22] **Canyılmaz, M.**, 2008. Vlf Yayılımını Kullanarak Yıldırımın Alt İyonküre Üzerine Etkilerinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- [23] **Priyadarshi, S., S. Kumar, ve A. Singh**, 2011. Ionospheric Perturbations Associated with Two Recent Major Earthquakes ($M > 5.0$), *Physica Scripta*, **84**, s. 045901.
- [24] **Hargreaves, J.K. ve M. Gadsden**, 1992. The Solar-Terrestrial Environment, cilt 420, Cambridge University Press, Cambridge.
- [25] **Hayakawa, M., vd.**, 2010. On the Correlation Between Ionospheric Perturbations as Detected by Subionospheric VLF/LF Signals and Earthquakes as Characterized by Seismic Intensity, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **72**(13), s. 982-987.
- [26] **Echer, E., vd.**, 2005. Introduction to Space Weather. Advances in Space Research, **35**(5), s. 855-865.
- [27] <http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-perturbation5.htm>.
- [28] **Davies, K.**, 1990. Ionospheric Radio.
- [29] **Ratcliffe, J.A.**, 1970. Sun, Earth, and Radio: An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere., New York, McGraw-Hill.
- [30] **Danilov, A.**, 2001. F2-Region Response to Geomagnetic Disturbances. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **63**(5), s. 441-449.

- [31] **Field, P. ve H. Rishbeth**, 1997. The Response of the Ionospheric F2-layer to Geomagnetic Activity: An Analysis of Worldwide Data, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **59**(2), s. 163-180.
- [32] **Kesmen, S.**, 2013. Orta Enlem Elektron Yoğunluğu Çukurunun İyonosferik Kritik Frekanslarındaki İzinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [33] **Pulinets, S., vd.**, 2004. Correlation Analysis Technique Revealing Ionospheric Precursors of Earthquakes, *Natural Hazards and Earth System Science*, **4**(5/6), s. 697-702.
- [34] <http://www.arl.org/files/file/Technology/tis/info/pdf/0209038.pdf>, 2012.
- [35] **Gordienko, G., V. Vodyannikov, ve A. Yakovets**, 2011. Geomagnetic Storm Effects in the Ionospheric E-and F-regions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **73**(13), s. 1818-1830.
- [36] **Ouzounov, D. ve F. Freund**, 2001. Ground-Atmosphere-Ionosphere Interactions Related to Earthquakes: How Can Earthscope Help.
- [37] **Tsolis, G. ve T. Xenos**, 2009. Seismo-Ionospheric Coupling Correlation Analysis of Earthquakes in Greece, Using Empirical Mode Decomposition. *Nonlin. Processes Geophys*, **16**, s. 123-130.
- [38] **Pulinets, S.**, 2004. Ionospheric Precursors of Earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, **15**(3), s. 413-436.
- [39] **Yu, T., vd.**, 2009. Study of the Ionospheric Anomaly Before the Wenchuan Earthquake. *Chinese Science Bulletin*, **54**(6), s. 1080-1086.
- [40] **Liu, J.Y., vd.**, 2011. Ionospheric Disturbances Triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, **116**(A6), s. A06319.
- [41] **Pulinets, S.A., vd.**, 2007. Irpinia Earthquake 23 November 1980—Lesson from Nature Reviled by Joint Data Analysis.
- [42] **Liperovsky, V., vd.**, 2005. On the Possible Influence of Radon and Aerosol Injection on the Atmosphere and Ionosphere Before Earthquakes, *Natural Hazards and Earth System Science*, **5**(6), s. 783-789.
- [43] **Bal, S.Ş.**, 2009. Sivriye Fay Zonundaki Radon Değişimi ve Doğal Aktivite, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [44] **Molchanov, O., vd.**, 2004. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling as Governing Mechanism for Preseismic Short-Term Events in Atmosphere and Ionosphere, *Natural Hazards and Earth System Science*, **4**(5/6), s.757-767.

- [45] **Ouzounov, D. ve F. Freund**, 2001. Ground-Atmosphere-Ionosphere Interactions Related To Earthquakes: How Can Earthscope Help?, in *Earthscope Workshop: Making and Breaking a Continent, Report Snowbird, UT, USA*.
- [46] **Singh, C. ve O.P. Singh**, 2007. Simultaneous Ionospheric E-and F-layer Perturbations Caused by Some Major Earthquakes in India.
- [47] **Fujiwara, H., vd.**, 2004. Atmospheric Anomalies Observed During Earthquake Occurrences. *Geophysical research letters*, **31**, s. L17110.
- [48] **Hayakawa, M.**, 2007. VLF/LF Radio Sounding of Ionospheric Perturbations Associated with Earthquakes, *Sensors*, **7**(7), s. 1141-1158.
- [49] **Parrot, M.**, 1990. Electromagnetic Disturbances Associated with Earthquakes: An Analysis of Ground-Based and Satellite Data, *J. Sci. Explor*, **4**, s. 203.
- [50] **Trigunait, A., vd.**, 2004. Variations of the Ionospheric Electron Density during the Bhuj Seismic Event.
- [51] **Sarkar, S., A. Gwal, ve R. Dabas**, 2005. Analysis Of Ionospheric Variability Associated With A Seismic Event And A Space Weather Event.
- [52] **Chuo, Y., vd.**, 2001. Ionospheric foF2 Variations Prior to Strong Earthquakes in Taiwan Area, *Advances in Space Research*, **27**(6-7), s. 1305-1310.
- [53] <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/anss/>, 2010.
- [54] http://wdc.nict.go.jp/IONO/index_E.html.
- [55] www.spidr.com, 2009
- [56] **Pulinets, S. ve A. Legen'ka**, 2003. Spatial–Temporal Characteristics of Large Scale Disturbances of Electron Density Observed in the Ionospheric F-Region before Strong Earthquakes, *Cosmic Research*, **41**(3), s. 221-230.
- [57] www.kyoto.com, 2010.
- [58] <http://isgi.cetp.ipsl.fr/>, 2010.
- [59] <http://www.usgs.gov/>, 2009.
- [60] **Tsolis, G. ve T. Xenos**, 2010. A Qualitative Study of the Seismo-Ionospheric Precursors Prior to the 6 April 2009 Earthquake in L'Aquila, Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, **10**(1), s. 133-137.
- [61] **Liu, J.Y., vd.**, 2004. Ionospheric foF2 and TEC anomalous Days Associated with $M \geq 5.0$ Earthquakes in Taiwan during 1997-1999, *Terr. Atmos. Oceanic Sci*, **15**, s. 371-383.

- [62] **Hayakawa, M., vd.**, 2010. A Statistical Study on the Correlation between Lower Ionospheric Perturbations as Seen by Subionospheric VLF/LF Propagation and Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **115**(A9), s. A09305.
- [63] <http://creationcare.org/view.php?id=230>, 2011.
- [64] **Pulinets, S., vd.**, 2003. Main phenomenological Features of Ionospheric Precursors of Strong Earthquakes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **65**(16), s. 1337-1347.
- [65] **Korsunova, L., vd.**, 2010. Experimental Evidence of the Correlation Between Possible Precursors of Earthquakes in near-Surface Quasistatic Electric Fields and in the Ionosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, **50**(7), s. 920-926.
- [66] **Jhuang, H.K., vd.**, 2010. Seismo-Ionospheric Anomalies of the GPS-TEC Appear Before the 12 May 2008 Magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake, *International Journal of Remote Sensing*, **31**(13), s. 3579-3587.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :Tuba KARABOĞA
Doğum Tarihi :05.08.1980
Doğum Yeri :Elazığ
Adres :Muş Alparslan Üniversitesi/Fizik Bölümü
Telefon :053354240666
E-mail :t.karaboga@alparslan.edu.tr

Eğitim ve Akademik Kariyer

1997 – 2002_____

Fırat Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

2003 - 2005_____

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik programında Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği alanında

Yüksek Lisans Konusu: “İyonküredeki Ani Karışıklıklar”

Danışman: Prof.Dr. Osman ÖZCAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik programında Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği alanında

Tez Konusu: “Bazı İyonküre Parametrelerindeki Değişim ile $M \geq 5.0$ Büyüklüğündeki Depremler Arasındaki İlişkinin Araştırılması” sunum aşamasında.

Danışman: Prof. Dr. Osman ÖZCAN

Katıldığı Bilimsel Faliyetler

1. 5. Nükleer Yapı Özellikleri Çalıştayı, 12-14Ekim 2011,Muş Alparslan Üniversitesi, MUŞ
2. 28. Uluslararası Fizik Kongresi (TFD), 6-9 Eylül 2011, Bodrum, MUĞLA, Investigation Of Relationship Between f_oF2 And Earthquakes By Using Autocorrelation And Cross Correlation Techniques (sözlü sunum), Karasal Gama Işını Parlamalarının Oluşum Mekanizması ve İyonküredeki Etkileri (poster sunum), Güneş Aktiviteleriyle İlişkili İyonkürede Meydana Gelen Karışıklıklar (poster sunum).
3. 30.Uluslararası Fizik Kongresi (TFD), 2-5 Eylül 2013, İstanbul Üniversitesi, İSTANBUL, Investigation of Perturbations Occuring in the Ionospheric F2 Layer Before Seismic Events (sözlü sunum).