



T.C.  
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İYONOSFERİK ANOMALİLERİN GNSS  
İLE BELİRLENMESİ VE DEPREM  
ÖNCÜLÜ OLARAK İNCELENMESİ

İrem KÖZ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2022  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

İrem KÖZ tarafından hazırlanan “İyonosferik Anomalilerin GNSS ile Belirlenmesi ve Deprem Öncülü Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 23/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Serkan DOĞANALP

.....

#### Üye

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

.....

#### Üye

Prof. Dr. Oya PAMUKÇU

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İrem KÖZ

Tarih: 08.07.2022

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### İYONOSFERİK ANOMALİLERİN GNSS İLE BELİRLENMESİ VE DEPREM ÖNCÜLÜ OLARAK İNCELENMESİ

İrem KÖZ

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Serkan DOĞANALP

2022, 101 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Prof. Dr. Oya PAMUKÇU

Doç. Dr. Serkan DOĞANALP

Hayatımızda kaçınılmaz olarak yer alan depremlerin maddi ve manevi hasarlarının minimum seviyeye indirilebilmesi adına depremlerin oluşum mekanizmaları, periyotları ve öncülleri sayılabilecek etkiler farklı disiplinlerce araştırılmaktadır. Sismik aktivitelerin etkilerinin, iyonosfer tabakasına kadar ulaşabildiğinin keşfinden sonra iyonosferik öncüllerin araştırılması konusuna yoğun ilgi duyulmuştur. İyonosferdeki değişimlerin incelenmesi için uydu ve yer tabanlı birçok yöntem geliştirilmiş olup bu yöntemlerden biri olan, başta konum belirleme uygulamaları amacıyla geliştirilen GNSS (Global Navigation Satellite System) teknolojileri; küresel/bölgesel anlamda çok sayıda ölçme verisi sağlayarak iyonosferdeki toplam elektron içeriği (TEC) değişimlerinin belirlenebilmesi adına önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, depremlerin hazırlık alanı sınırları içinde ve yakın çevresinde bulunan IGS (International GNSS Service) istasyonlarına ait GPS (Global Positioning System) verileri kullanılarak iyonosferdeki TEC değişimleri günlük olarak hesaplanmış, hesaplanan TEC değişimleri IGS ve CODE olmak üzere iki farklı analiz merkezine ait iyonosfer dosyalarındaki (IONEX) veriler ile karşılaştırılmıştır. Depremlerin öncesi ve sonrasını kapsayan toplam 48 günlük zaman serilerine çeyrekler arası fark bazlı hareketli ortanca yöntemi uygulanarak TEC değişimindeki anomali değerleri hesaplanmıştır. Anomalilerin uzay iklim koşulları kaynaklı olup olmadığının araştırılması adına solar aktivite (F10.7), jeomanyetik fırtına (Kp), jeomanyetik alan (B) ve jeomanyetik aktivite (Dst) indisleri incelenmiş olup TEC anomalileri ile aralarındaki korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, depremlerin öncesinde uzay iklim koşullarından bağımsız oluşan TEC anomalileri gözlenmiş ve deprem öncülü olarak kabul edilmiştir. Bu sonuç ile birlikte çalışmanın, iyonosferik TEC araştırma çalışmalarına katkı sağlaması beklenen ve deprem tahmin modelleri için TEC anomalilerinin de dikkate alınması gerekliliğini gösteren örnek bir çalışma olması umulmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Deprem, GNSS, IONEX, İyonosfer, TEC, Uzay İklim Koşulları



# ABSTRACT

## MS THESIS

### DETERMINATION OF IONOSPHERIC ANOMALIES USING GNSS AND INVESTIGATION AS PRECURSOR OF EARTHQUAKE

İrem KÖZ

Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Geomatics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan DOĞANALP

2022, 101 Pages

Jury

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ  
Prof. Dr. Oya PAMUKÇU  
Assoc. Prof. Dr. Serkan DOĞANALP

In order to minimize the economic and moral damages of earthquakes, which are inevitable in our lives, the formation mechanisms, periods and effects of earthquakes, which can be considered as precursors, are investigated by different disciplines. There has been a rise of interest in the study of ionospheric precursors since the realisation that the impacts of seismic activity can reach the ionosphere layer. Many satellite-based and ground-based methods have been developed to examine the changes in the ionosphere, and as one of these methods; GNSS (Global Navigation Satellite Systems) technologies, which were created primarily for position determination applications, provide an essential alternative for determining the total electron content (TEC) changes in the ionosphere by providing a huge amount of measurement data in a global/regional scale. Within the scope of this study, daily TEC changes in the ionosphere were calculated using GPS (Global Positioning System) data of IGS (International GNSS Service) stations located in and around the boundary of earthquake preparation area, and the calculated TEC changes were compared with ionospheric data (IONEX) from two different analysis centers, IGS and CODE. Anomaly values in TEC changes were computed by applying the moving median method based on the difference between quarters to the 48-day time series covering before and after the earthquakes. The indices of solar activity (F10.7), geomagnetic storm (Kp), geomagnetic field (B) and disturbance storm time (Dst) were evaluated in order to investigate whether the anomalies were caused by space climate conditions, and the correlation coefficients between them and TEC anomalies were calculated. As a result of the study, TEC anomalies that occurred independently of space weather conditions before earthquakes were observed and were accepted as earthquake precursors. With this result, it is expected that the study will be an exemplary study that will contribute to ionospheric TEC research studies and demonstrate the necessity of considering TEC anomalies for earthquake prediction models.

**Keywords:** Earthquake, GNSS, IONEX, Ionosphere, TEC, Space Weather Conditions

## ÖN SÖZ

Yüksek lisans çalışma sürecimde bilgi, birikim ve manevi destekleri ile bana yol gösteren, beraber çalışmaktan mutluluk duyduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Serkan DOĞANALP'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmamda bana destek olan ve yönlendirmeleri ile çalışmamın ilerlemesinde önemli katkılarda bulunan Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ ve Prof. Dr. Ekrem TUŞAT hocalarıma içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için kullanılan verilere kaynak sağlayan NASA CDDIS (National Aeronautics and Space Administration-Crustal Dynamics Data Information System) merkezine, NASA SPDF (National Aeronautics and Space Administration-Space Physics Data Facility) merkezine, USGS (United States Geological Survey) araştırma kurumuna, kullanılan yazılımların geliştiricileri olan MathWorks, Autodesk, Wessel ve ark. (2019), Jin ve ark. (2012), QGIS geliştiricilerine ve Bern Üniversitesi Astronomi Enstitüsü'ne teşekkür ederim.

Son olarak yaşamımdaki en büyük motivasyon kaynağım olan aileme, her daim kıymetlerini bilmeyi umarak saygı, sevgi ve en iyi dileklerimi sunuyorum.

İrem KÖZ  
KONYA-2022

## İÇİNDEKİLER

ÖZET . . . . .	iv
ABSTRACT . . . . .	v
ÖN SÖZ . . . . .	vi
İÇİNDEKİLER . . . . .	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR . . . . .	viii
1. GİRİŞ . . . . .	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI . . . . .	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM . . . . .	6
3.1. Deprem . . . . .	7
3.1.1. Depremin oluşum süreci . . . . .	10
3.2. İyonosfer . . . . .	12
3.2.1. İyonosferin katmanları . . . . .	15
3.2.2. İyonosferi etkileyen koşullar . . . . .	17
3.2.2.1. Zamansal koşullar . . . . .	17
3.2.2.2. Konumsal koşullar . . . . .	18
3.2.2.3. Uzay iklim koşulları . . . . .	19
3.3. GNSS . . . . .	25
3.4. İyonosferin GNSS Sinyallerine Etkisi . . . . .	26
3.5. GPS Verileri ile TEC Değeri Belirleme . . . . .	28
3.5.1. Polinom yüzeyi oluşturma . . . . .	35
3.5.2. İyonosfer dosyası ile TEC değerlerinin güvenilirlik analizi . . . . .	37
3.6. TEC Değişimlerinin Deprem Öncülü Olarak Analiz Edilmesi . . . . .	39
4. UYGULAMA . . . . .	42
4.1. Kuzey Kaliforniya Deprem Dizisi (2019) . . . . .	42
4.2. Chignik/Alaska Depremi (2021) . . . . .	58
4.3. Denali/Alaska Depremi (2002) . . . . .	78
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER . . . . .	94
KAYNAKLAR . . . . .	97

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\alpha$	: Rastgele hatalar
$\alpha_{SLM}/\Psi_{IPP}$	: Tek tabaka modelindeki jeosentrik açı
$a_{el}$	: Elipsoit büyük yarı eksen uzunluğu
$a_{i,j}$	: Polinomal yüzey katsayıları
$A$	: Düzeltme denklemlerine ait katsayılar matrisi
$Az$	: Alıcıdan uyduya olan azimut açısı
$B$	: Dünyanın manyetik alanının akı yoğunluğu (Tesla)
$B_{i,a}^u$	: Başlangıç fazı belirsizliğini içeren sapma değeri
$c$	: Işık hızı
$\Delta H$	: Ölçek yüksekliği
$\Delta t_a$	: Alıcı saati hatası
$\Delta t^u$	: Uydu saati hatası
$D$	: Gün
$\epsilon_0$	: Uzaydaki di-elektrik sabiti
$\epsilon_i^u, \epsilon_{i,a}$	: Uydu ve alıcıya ait donanımsal gecikmeler
$e$	: Elektron yükü
$e_{el}^2$	: Elipsoitin 1. dışmerkezliği
$\varphi, \lambda$	: Coğrafi koordinatlar
$f$	: Frekans
$f_{el}$	: Elipsoit basıklığı
$F10.7$	: Güneş Akısı İndisi
$H$	: Tek tabaka modelinde iyonosfer katmanının (F2) yüksekliği
$H_0$	: $\chi=0$ iken maksimum iyon üretimindeki referans yüksekliği
$I_{i,a}^u$	: İyonosferik gecikme
$\lambda$	: Dalga boyu
$\lambda_0$	: Ortalama Güneş boylamı
$l$	: Ölçü vektörü
$L_{i,a}^u$	: Faz gözlemi
$m_e$	: Elektron kütlesi
$M$	: Ay
$n$	: Sabit terimler vektörü

$n, e, u$	: Lokal jeodezik koordinat sistemine ait koordinatlar
$N$	: Normal denklem matrisi
$N_e$	: Elektron yoğunluğu
$N_{i,a}^u$	: Başlangıç faz belirsizliği
$\omega$	: Radyal frekans
$P_{i,a}^u$	: Uydu-alıcı ölçülen uzaklık (pseudorange)
$q, p$	: Grid enterpolasyonu enlem ve boylam değerleri
$q_0$	: $z_{iyon}=0$ 'da iyon üretimi oranı
$q_{iyon}$	: İyon üretimi oranı
$\rho_a^u$	: Uydu-alıcı arası gerçek uzaklık
$R$	: Dünya'nın ortalama yarıçapı
$R(A, B)$	: A ile B değişkenleri arasındaki korelasyon katsayısı
$\sigma_A, \sigma_B$	: A ve B'ye ait standart sapmalar
$T_e$	: Elektron sıcaklığı
$T_{i,a}^u$	: Troposferik gecikme
$v$	: Elektron çarpışma frekansı
$\chi$	: Solar zenit açısı
$x$	: Bilinmeyenler vektörü
$Y$	: Yıl
$z_{iyon}$	: Ölçeklenmiş yükseklik
$z$	: Zenit açısı
$z'$	: Uydunun iyonosferin delinme noktasındaki (IPP) zenit açısı

## Kısaltmalar

CIO	: Conventional International Origin
CODE	: Center for Orbit Determination in Europe
CSES	: China Seismo-Electromagnetic Satellite
DCB	: Differential Code Biases
DEMETER	: Detection of Electro-Magnetic Emission Transmitted from Earthquake Regions
Dst	: Disturbance Storm Time
E	: Electric
ECEF	: Earth Centered Earth Fixed
EKK	: En Küçük Kareler
ESA	: European Space Agency
FI	: Field-Ionize
GGB	: Güney-Güneybatı
GGD	: Güney-Güneydoğu
GIM	: Global Ionosphere Map
GLONASS	: Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GPS	: Global Positioning System
IAU	: International Astronomical Union
IGS	: International GNSS Service
IONEX	: Ionosphere Map Exchange
IRNSS	: Indian Regional Navigation Satellite System
JME	: Julian Ephemeris Millennium
JCE	: Julian Ephemeris Century
JC	: Julian Century
JDE	: Julian Ephemeris Day
JD	: Julian Day
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KKB	: Kuzey-Kuzeybatı
KKD	: Kuzey-Kuzeydoğu
Kp Index	: Planetary K Index
LB	: Lower Bound
LGS	: Local Geodetic System

LQ	: Lower Quartile
M	: Medyan değeri
MATLAB	: Matrix Laboratory
MHz	: MegaHertz
MSLM	: Modified Single Layer Model
NASA-CDDIS	: National Aeronautics and Space Administration-Crustal Dynamics Data Information System
NASA-SPDF	: National Aeronautics and Space Administration-Space Physics Data Facility
nT	: nanoTesla
QZSS	: Quasi-Zenith Satellite System
R	: Güneş Lekesi Sayısı
RINEX	: Receiver Independent Exchange Format
SBAS	: Satellite-based Augmentation Systems
SFU	: Solar Flux Unit
SLM	: Single Layer Model
STEC	: Slant Total Electron Content
TEC	: Total Electron Content
TECU	: Total Electron Content Unit
UB	: Upper Bound
ULF	: Ultra Low Frequency
UQ	: Upper Quartile
UPC	: Polytechnic University of Catalonia
USDOD	: United States Department of Defence
USGS	: United States Geological Survey
VTEC	: Vertical Total Electron Content

## 1. GİRİŞ

Deprem gerçeği, insanlık tarihi boyunca çok sayıda can ve mal kaybına neden olmuştur. Deprem kaynaklı oluşabilecek yıkıcı etkilerin önüne geçilebilmesi amacıyla bir çok farklı bilim dalı bu konuya yönelmiş, çok disiplinli çalışmalar ortaya koyulmuş ve depremlerin gerçekleşme mekanizmalarının adımları, deprem bölgelerindeki öncül sayılabilecek değişimleri ve deprem sonrası etkileri araştırılmıştır. Depremin oluşum sürecindeki öncül sayılabilecek değişimler, önlem alınabilmesi adına büyük önem arz etmektedir. Depremin bölgesine ve oluşum mekanizmasına bağlı olarak farklı öncüller görülebilmektedir. Gaz emisyonları, yeraltı suyu yapısındaki değişimler, gravite anomalileri, manyetik alan değişimleri, sıcaklık artışı, hayvanlarda gözlemlenen olağan dışı davranışlar gibi tespit edilebilen bu öncüllerden biri de depremden günler öncesinde meydana gelebilen iyonosfer katmanındaki toplam elektron içeriği miktarındaki anomalilerdir. Sismik etkilerin iyonosferde oluşturduğu değişimlerin araştırılması adına yapılan çalışmalar, ilk olarak Leonard ve Barnes Jr. (1965) tarafından 27 Mart 1964 yılında meydana gelen 9.2 moment büyüklüğüne sahip Alaska depremi bölgesinin iyonosonda verileri ile incelenmesi ile başlamıştır. Aktif fayların, iyonosfer katmanına kadar ulaşabilen etkileri ortaya çıkmıştır. İncelenen çok sayıda depremin ve anomalilerin ardından litosferdeki sismik aktivitelerin atmosferdeki ve TEC miktarı ölçülebilen iyonosferdeki etkileri arasındaki ilişkiyi ortaya koyan Litosfer-Atmosfer-İyonosfer İlişkisi (LAIC) modeli geliştirilmiştir (Pulinets ve ark., 1994). Söz konusu iyonosferdeki değişimlerin gözlemlenebilmesi adına yer tabanlı ve uydu tabanlı olmak üzere çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de başlangıcında konum belirleme uygulamaları amacıyla geliştirilmiş olan GNSS (Global Navigation Satellite System)'dir. İyonosferin GNSS sinyalleri üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle iyonosfer, GNSS ölçüleri ile konum belirleme tekniğinde büyük bir hata kaynağı olarak görülmektedir. Diğer taraftan iyonosferden geçen GNSS sinyallerindeki yavaşlama/hızlanma ve kırılma etkileri iyonosferdeki elektron içeriği hakkında bizlere bilgi vermektedir. Dünya'ya yayılmış çok sayıda GNSS istasyonu ve uydu takımları sayesinde küresel ölçekte iyonosferdeki TEC miktarlarının zamana bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi mümkündür.



Bu çalışma kapsamında, Güneş döngüsünün solar maksimum dönemlerinde olduğu 2002 yılında Denali/Alaska bölgesinde 7.9 moment büyüklüğünde, Güneş döngüsünün solar minimum dönemlerinde olduğu 2019 yılında Ridgecrest/Kaliforniya bölgesinde 7.1 moment büyüklüğünde ve 2021 yılında Chignik/Alaska bölgesinde 8.2 moment büyüklüğünde meydana gelen üç farklı depreme ait öncül sayılabilecek iyonosferik TEC anomalileri incelenmiştir. TEC değerlerinin hesabında, depremlerin hazırlık alanları içerisinde ve yakın çevresinde yer alan IGS istasyonlarına ait GNSS'yi oluşturan sistemlerden biri olan GPS ölçüleri kullanılmıştır. Yumuşatılmış kod ölçüleri ile hesaplanan TEC değerleri, IGS ve CODE analiz merkezlerine ait iyonosfer dosyalarındaki TEC değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çeyrekler arası fark bazlı hareketli ortanca yöntemi kullanılarak oluşturulan zaman serileri yardımıyla depremden öncesi ve sonrasını kapsayan dönemler için anomali değerleri bulunmuştur ve analiz edilmiştir. Oluşan anomalilerin, iyonosferdeki değişimlerin ana kaynağı olan uzay iklim koşulları ile ilişkisinin incelenmesi adına Güneş akısı indisi (F10.7) ile, jeomanyetik fırtına (Kp), jeomanyetik alan (B) ve jeomanyetik aktivite (Dst) indisleri arasındaki korelasyonlar ve kullanılan tüm IGS istasyonları için bu indisler ile anomaliler arasındaki korelasyonlar incelenerek uzay iklim koşullarından bağımsız gerçekleşen anomalilerin deprem öncülü olarak değerlendirilebileceği yorumlanmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Pulinets ve ark. (2006): Bu çalışmada 21 Ocak 2003'te Colima'da meydana gelen 7.8 büyüklüğündeki deprem, deprem zamanı civarında termal, atmosferik ve iyonosferik anomaliler göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Çalışmada toplam elektron içeriği hesapları 5 adet GPS alıcısı verileri kullanılarak yapılmıştır. Termal etkilerin belirlenebilmesi adına yersel ölçme teknikleriyle sıcaklık ve bağıl nem değerleri ve Terra ve Aqua uydularından MODIS IR sensör verileri kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre 14, 15 ve 20 Ocak günleri sıcaklıklarda standart sapmanın üzerinde bir yükseliş olduğu, bağıl nem miktarında ise 15 Ocak gününde anormal bir düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir. TEC değerlerinde, 18 ve 19 Ocak günleri pozitif anomali yaşandığı gözlemlenmiştir.

Liu ve ark. (2009): Bu çalışmada 1999-2008 yılları arasında Çin'de meydana gelen büyüklüğü 6'dan fazla 35 adet deprem için iyonosferik anomaliler küresel iyonosferik haritalar kullanılarak incelenmiş ve büyüklüğü 6.3'den büyük 17 adet deprem için 3-5 gün öncesinde GPS-TEC değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. 2008 Wenchuan depremi için küresel iyonosferik haritaların GPS-TEC değerleri ve elektron yoğunluk profilleri FORMASAT3/COSMIC uydu ölçümleri kullanılarak incelenmiş, TEC değerlerinde depremden önceki 6-3 günlük periyotta pozitif ve negatif anomaliler yaşanmış, uydu verilerine göre GPS-TEC değerlerinde düşüş olduğu zamanda F2 bölgesindeki maksimum elektron yoğunluğu (NmF2) yaklaşık %40, F2 bölgesi kritik frekansının ölçüldüğü yükseklik (hmF2) ise 50-80 km civarında düştüğü görülmüştür.

Jyh-Woei (2011): Bu çalışmada 12 Mayıs 2008'de saat 06:28 UTC'de Çin-Wenchuan'da meydana gelen 7.9 moment büyüklüğüne sahip deprem incelenmiş, deprem sonrası aynı gün saat 08:00-10:00 UTC arası meydana gelen TEC dalgalanmaları araştırılmıştır. Veri kaynakları FORMOSAT-3 uydu sistemi ve IGS GPS TEC verileridir. Toplam elektron içeriğinin yayılım alanının belirlenebilmesi adına küresel iyonosferik haritalara temel bileşenler analizi (Principal Component Analysis-PCA) ve görüntü işleme uygulanmıştır. Ayrıca jeomanyetik aktivite indisi ve jeomanyetik fırtına indisi incelenmiş, TEC anomalilerinde uzay iklim şartlarının

etkisinin olmadığı görülmüştür. Çalışma sonucunda 200 km yükseklikte anomali yaygın ve az yoğunken 300 km'de maksimum yoğunluğa ulaşmış ve daha sınırlı alandadır. Hesaplanan deprem sonrası TEC anomalileri 9 Mayıs'ta deprem öncülü olarak raporlanan TEC anomalileri ile benzer özelliktedir. Bu sürecin olası sebebinin akustik gravite dalgaları olduğu belirtilmiştir.

Saradjian ve Akhoondzadeh (2011): Bu çalışmada deprem öncesi oluşan anomalilerin olası sebepleri ortaya konmuş; 5 adet deprem için elektron ve iyon yoğunluğu, elektron sıcaklığı, toplam elektron içeriği, elektriksel ve manyetik alanlar ve arazi yüzey sıcaklığı gibi parametreler deprem öncülleri olarak ele alınmıştır. Olası deprem günleri, deprem büyüklükleri tahmin edilmiştir, depremlerin gerçek tarihleri ve büyüklükleri ile karşılaştırıldığında yakın tahminler yapıldığı gözlenmiştir.

Nastase ve ark. (2016): Bu çalışmada Romanya'da meydana gelen moment büyüklükleri 5.2-6.0 arasında olan 4 adet deprem, Romanya GNSS/GPS ağı verileri kullanılarak incelenmiş ve iyonosferik anomaliler deprem öncülleri olarak araştırılmıştır. Çalışmada sırasıyla ortalama durumdan TEC sapmalarının belirlenmesi, çapraz korelasyon analizi ve spektral analiz olmak üzere 3 metot uygulanmıştır. TEC sapmalarına bakıldığında sadece 1 depremde iyonosferik anomaliler deprem öncülü olarak tespit edilmiş, diğer depremlerde iyonosferik anomaliler geomanyetik fırtınaların varlığı ile ilişkilendirilerek sismik aktivite kaynaklı anomali olsa bile geomanyetik fırtına etkisinin gölgesinde kaldığı kabul edilmiştir. Ayrıca deprem derinliğinin fazla olması olası sismik aktivite öncüllerinin ortaya çıkmasını engellediği düşünülmüştür. Sismik aktivite kaynaklı deprem öncesi iyonosferik anomaliye sahip deprem için doğruluğunun ve güvenilirliğinin artırılması için ek olarak çapraz korelasyon analizi ve spektral analiz yapılmıştır.

Ulukavak (2016): Bu çalışmada 2000 yılından sonra moment büyüklüğü 7'den büyük olan 28 adet deprem uzay iklim koşulları da göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Depremler ekvatorial ve orta kuşaklarda meydana gelmiştir. TEC değerlerinin hesabı için GNSS istasyonları verileri kullanılmıştır. GIM-TEC haritalarından alınan değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. İyonosferik anomalilerin belirlenebilmesi adına çeyrekler arası fark istatistiksel

yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre ekvatorial kuşakta meydana gelen depremlere karşın orta kuşakta meydana gelen depremlerden önce daha fazla iyonosferik anomaliler meydana gelmektedir. Ters faylanmanın olduğu deprem bölgelerinde normal ve doğrultu atımlı faylanmanın olduğu bölgelere göre daha fazla TEC anomali yüzdesi belirlenmiştir. Ayrıca depremin büyüklüğü arttıkça TEC anomali yüzdesi de artmakta, depremin odak derinliğı arttıkça TEC anomali yüzdesi azalmaktadır.

Karaboga ve ark. (2018): Bu çalışmada 1980-2008 yılları arasında Japonya'da meydana 6.0 ve üzeri büyüklükteki 7 deprem öncesi iyonosferin F2 bölgesindeki anomaliler incelenmiştir. Tüm depremler için Kokubunji iyonosonda istasyonu kullanılmış ve saatlik kritik frekans (foF2) değerleri elde edilmiştir. Analiz için standart sapma ve çeyrekler arası fark metotları uygulanmıştır. Analizde uzay iklim koşulları da göz önünde bulundurulmuştur. Çeyrekler arası fark metodunda hesaplanan foF2 değerleri üst ve alt sınırları, standart sapma metoduna göre daha fazla aşmışlardır. Bu yüzden bu metodun daha güvenilir ve duyarlı olduğu belirtilmiştir.

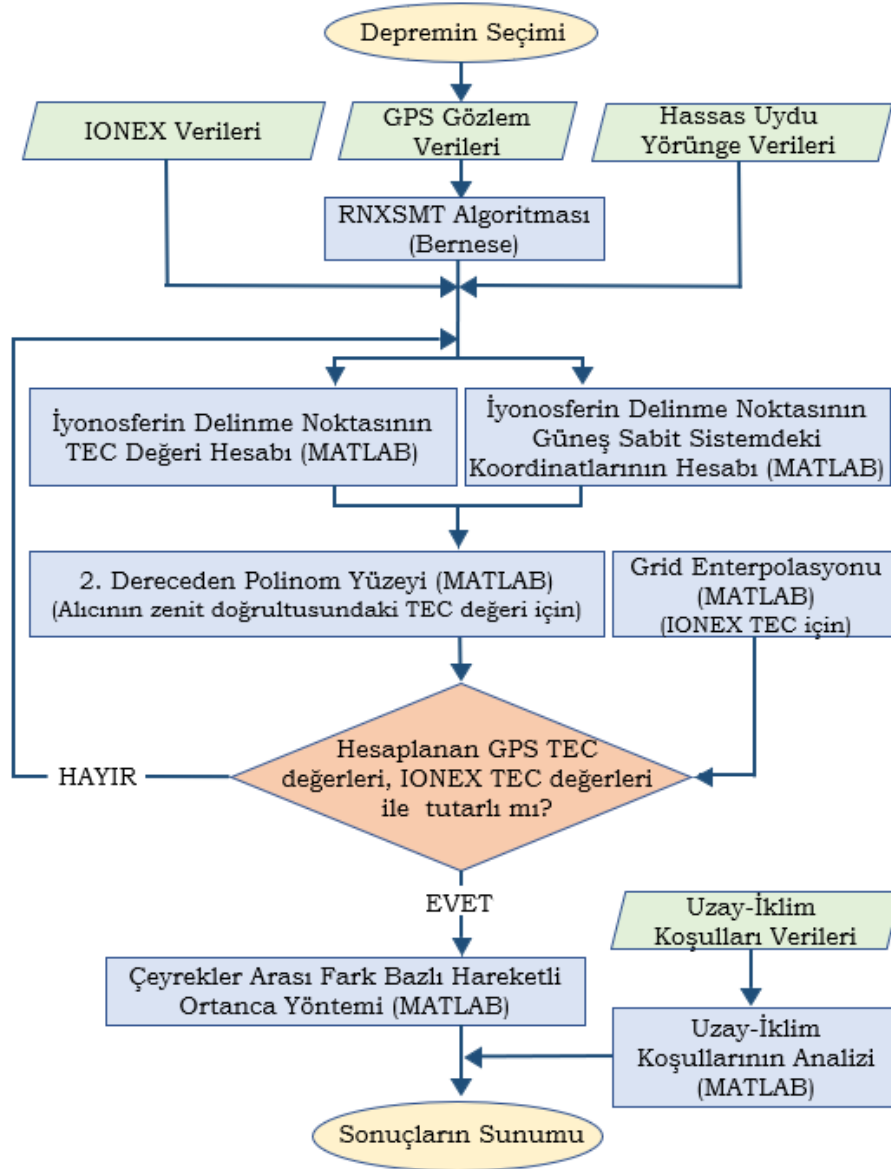
Korsunova ve ark. (2018): Çalışmada moment büyüklükleri 6.5'ten büyük olan 1968-2004 yılları arasında Japonya'da meydana gelen 32 depremin kısa dönem (1-3 gün) öncüleri 4 adet yer bazlı iyonosonda (vertical ionospheric sounding) istasyonu verileri kullanılarak iyonosferin E ve F2 tabakaları için incelenmiş, istasyonlar ve ilgili depremlerin merkez üsleri arasında mesafeler yüzlerce kilometre olmasına rağmen iyonosferik anomalilerin aynı gün içinde görüldüğü tespit edilmiştir.

Şentürk ve Çepni (2018): Bu çalışmada, CODE-GIM'den elde edilen toplam elektron içeriğı verileri kullanılarak 2016 yılında orta enlem bölgesinde meydana gelen büyüklüğü 7'den büyük 6 adet deprem incelenmiş, çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar yöntemi ile TEC anomalileri kestirilmiştir. Anomalilerin sismik kaynaklı olup olmadıklarının belirlenebilmesi için ilgili günler için iyonküre iklim koşulları araştırılmış ve dikkate alınmıştır. 6 depremin 5'inde deprem öncesi iyonosferik anomalilerin olduğu ve anomalilerin sismik kaynaklı olabileceğı tespit edilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında, seçilen deprem bölgesindeki IGS istasyonlarına ait GPS gözlem verileri (RINEX 2.11 formatlı), hassas uydu yörünge verileri, iyonosfer bilgisi verileri kullanılmaktadır ve bu veriler NASA CDDIS (National Aeronautics and Space Administration-Crustal Dynamics Data Information System) merkezine ait internet sayfasından üyelik kaydı oluşturularak ücretsiz olarak indirilmiştir (URL-1). Yine iyonosfer verisi için Bern Üniversitesi CODE Analiz Merkezi tarafından yayınlanan iyonosfer dosyaları indirilmiş ve karşılaştırma amaçlı olarak çalışmada değerlendirilmiştir (URL-2). Uzay iklim koşullarının incelenmesi için solar aktivite indisi (F10.7) ve güneş lekesi sayısı verileri, jeomanyetik alan (B), jeomanyetik fırtına (Kp) ve jeomanyetik aktivite indisi (Dst) verileri NASA SPDF (National Aeronautics and Space Administration-Space Physics Data Facility)'ye ait internet sayfasından indirilmiştir (URL-3). Çalışmaya ait kodlar MATLAB R2018a yazılımında yazılmış, görseller ise MATLAB R2018a, Wessel ve ark. (2019) tarafından geliştirilen GMT 6 (Generic Mapping Tools 6), QGIS 3.22.8 ve Autodesk firmasına ait AutoCAD 2021 ortamında oluşturulmuştur. Deprem bölgelerindeki fay hatları verileri USGS (United States Geological Survey) araştırma kurumunun internet sitesinden indirilmiştir (URL-13). Ek olarak Jin ve ark. (2012) tarafından, alıcı ve uydulara ait DCB (Differential Code Biases) çözümleri için geliştirilen MATLAB tabanlı M.DCB yazılımından (URL-4) ve Bern Üniversitesi Astronomi Enstitüsü tarafından GNSS çözümlenmeleri için geliştirilen akademik bir yazılım olan Bernese GNSS Yazılımından (Versiyon 5.2) (URL-5) yararlanılmıştır.

Bu bölümün devamında çalışmaya ait teorik bilgiler ve kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Kullanılan veriler ve işlem adımları, iş akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



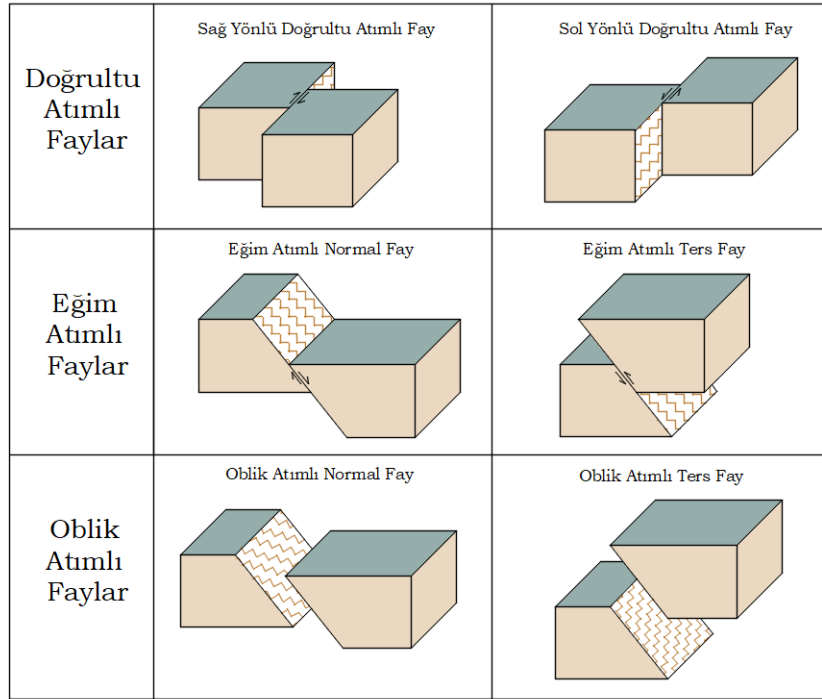
Şekil 3.1. İş akış şeması

### 3.1. Deprem

“Yerkabuğu içindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yeryüzeyini sarsma olayına *deprem* denir”. Yerkürenin üst kısmında bulunan yaklaşık 70-100 km kalınlığındaki katmana *litosfer* ya da *taş küre* denir. Litosfer ile Dünya'nın çekirdeği arasında kalan katman *manto* olarak adlandırılır. Üst mantoda oluşan kuvvetler ve konveksiyon akımları sebebiyle taş kabuk parçalanarak levhalara bölünmektedir. Konveksiyon akımları yükseldikçe taşkürede strese neden olur ve oluşan gerilmelere dayanamayan zayıf

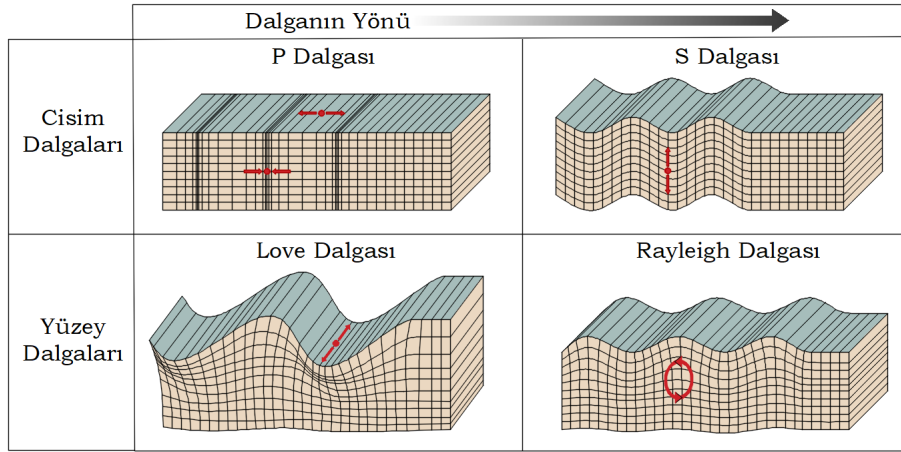
bölgeler kırılarak levhaları meydana getirir (KOERI, 2022). Yer levhaları arasında sıkıştırmalı rejim ile, çekme tektonik rejimi ile ya da özgün doğrultu atımlı rejimler ile oluşan yer değiştirmelerin meydana geldiği kırıklar ise *fay* olarak adlandırılır. Fayları atım türlerine göre 3 sınıfa ayırmak mümkündür (Şekil 3.2). Buna göre;

- *Doğrultu atımlı faylar*: Bu fay türünde hareket, fayın doğrultusu boyunca ve yataydır.
- *Eğim atımlı faylar*: Bu fay türünde hareket, fayın eğim doğrultusunda oluşur.
- *Oblik atımlı faylar*: Bu fay türünde hareket, fayın yatay doğrultusu ve eğim doğrultusunun bileşkesi olacak şekilde oluşur.



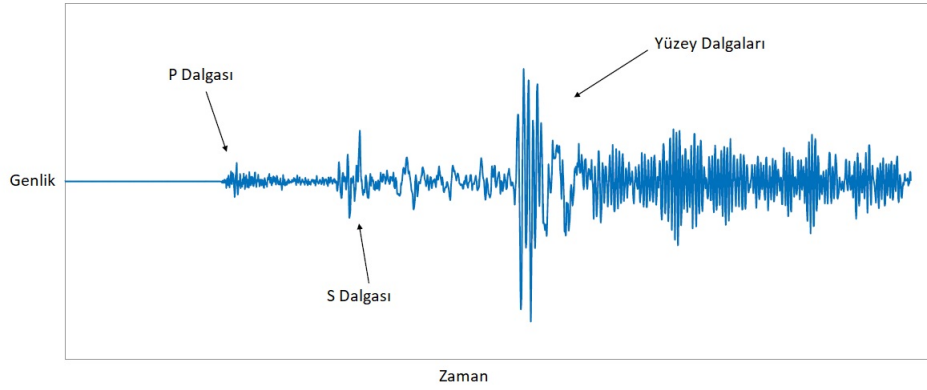
**Şekil 3.2.** Fay tipleri

Faylardaki kırılmaların meydana gelmesi ile depremin odak noktasından sismik dalgalar yayılır. Bu dalgalar cisim dalgaları olarak adlandırılan P ve S dalgaları ve yüzey dalgaları olarak adlandırılan Love ve Rayleigh dalgalarıdır (Şekil 3.3). Cisim dalgaları odak noktasından başlayarak yerin altı da dahil olmak üzere tüm yönlere doğru ilerlerler. Yüzey dalgaları ise hemen hemen yeryüzüne paralel olacak şekilde ilerlerler. Yüzey dalgaları da yerin içerisinde belirli bir derinliğe kadar ulaşabilir ama doğrudan yer merkezine doğru yayılamazlar. Oluştuktan sonra en yıkıcı etkiye sahip olan dalga Love dalgasıdır.



**Şekil 3.3.** Sismik dalgalar

Deprem dalgalarının sismometrelere ulaşma sırası P dalgası, S dalgası ve yüzey dalgaları şeklindedir (Şekil 3.4). Cisim dalgaları ile yüzey dalgaları arasında dakika mertebesinde bir zaman aralığı oluşabilir ve bu durum önlem alınabilmesi adına uyarı niteliği taşımaktadır.



**Şekil 3.4.** Sismogram görüntüsü (Hohensinn (2019)'dan uyarlanmıştır.)

Depremin karadaki hazırlık alanının belirlenmesi adına Dobrovolsky ve ark. (1979) tarafından önerilen gerinim yarıçapı (3.1) eşitliğinde verilmiştir.

$$\rho = 10^{0.43 \cdot M} \quad (3.1)$$

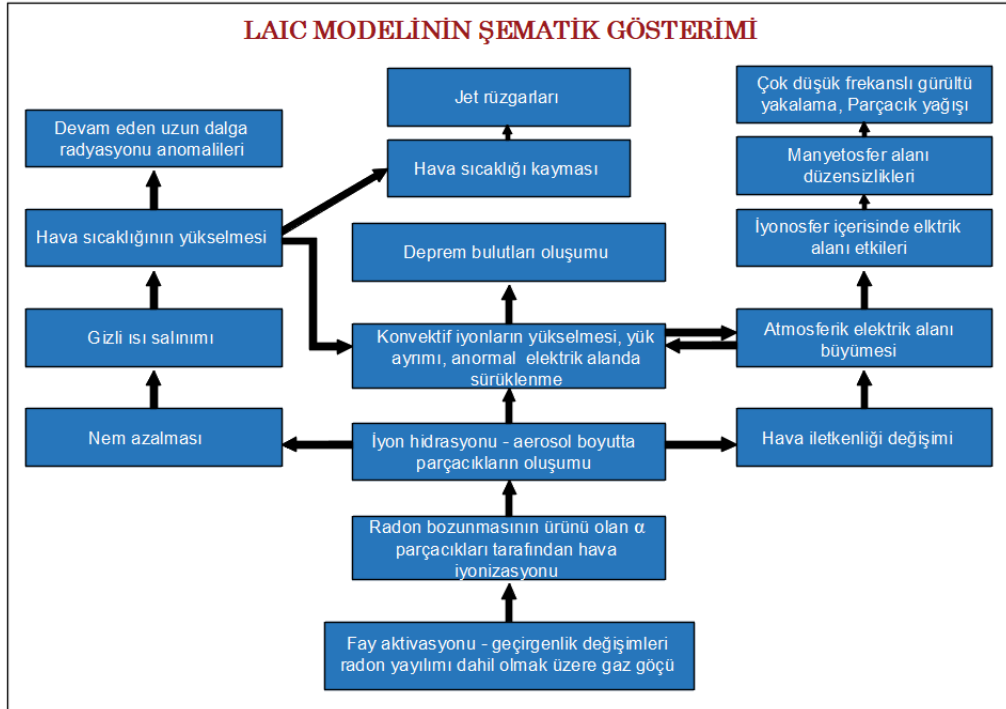
$\rho$  : Depremin hazırlık alanının yarıçapı (km)

$M$  : Depremin moment büyüklüğü (Mw)



### 3.1.1. Depremi oluşum s¼reci

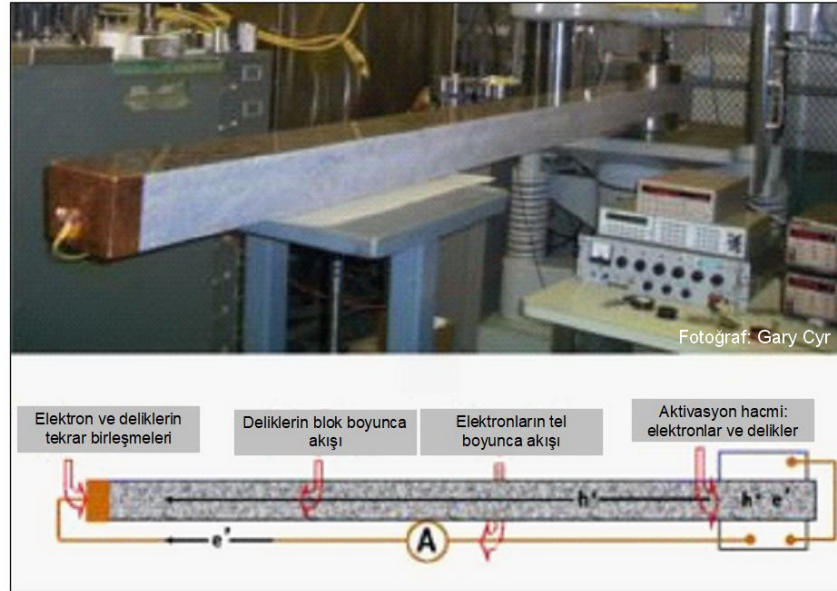
Faylarda meydana gelen tektonik aktiviteler yer kabuklarının sıkışmasına neden olmaktadır. Sıkışan yer kabukları piezoelektrik alan ¼retimine ve sert metallerin akışkanlığına sebep olup yery¼z¼ne radon gazı, hafif gazlar (hidrojen, helyum vb.), y¼ksek metal i¼erikli mikron altı aerosoller ve iyonların fışkırmasını sağlar. Bu akış atmosferin iletkenliğini artırır. Atmosferik t¼rb¼lanslar, termosferik r¼zgarlar, iyon ivmelenmeleri fışkıran aerosol ve metalik iyonların iyonosfere kadar taşınmasına neden olur (Pulinets ve ark., 1994). Bu s¼recin daha iyi anlaşılabilmesi adına Pulinets ve Ouzounov (2010) tarafından geliştirilen Litosfer-Atmosfer-İyonosfer İlişkisi (LAIC) modeline ait şematik g¼sterim şekil 3.5'te verilmiştir.



**şekil 3.5.** LAIC modelinin şematik g¼sterimi (Pulinets ve Ouzounov (2010)'dan uyarlanmıştır.)

T¼m magmatik ve y¼ksek dereceli metamorfik kayaçlar, bileşen minerallerinde elektriksel olarak aktif olmayan, hareketsiz, oksijen atomları arasındaki bağ olan peroksi bağlarında kusurlar i¼erirler. Bu kayaçlar gerildiklerinde (sıkıştığında) peroksi kusurları aktive olur, sonucunda elektronlar ve kusurlu elektronlar olarak adlandırılan pozitif delikler ortaya ¼ıkar. Oluşan pozitif delikler stresli kaya

hacminden dışarı akar ve daha az stresli kayaların içine ve çevrelerine doğru 100 metre/saniye başlangıç hızlarında kilometrelerce, hatta muhtemelen yüzlerce kilometre boyunca yayılabilirler. Pozitif deliklerin akması bölgede manyetik alanlar meydana getiren elektrik akımlarını oluşturur. Sıkışan yer kabuklarından piezoelektrik üretiminin incelenmesi adına Freund ve ark. (2005) tarafından yapılan deneyde magmatik bir kayaç türü olan granit bir bloğun Şekil 3.6'da da görüldüğü üzere bir ucuna pistonlar yardımı ile basınç uygulanmıştır. Granit bloğun stres uygulanan ucundan serbest halde duran diğer ucuna doğru kuvvetli bir akım oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum yer kabuklarındaki sıkışmalar için düşünüldüğünde daha kapsamlı ve yoğun etkiler meydana gelecektir.



**Şekil 3.6.** Granit blok deneyi (Jacobs (2011)'den uyarlanmıştır.)

Yer kabuğundaki elektrik akımları sonucunda;

- Çok düşük frekanslı (ULF: Ultra Low Frequency) dalgalar tek kutuplu darbeler (sadece pozitif genliğe sahip ya da sadece negatif genliğe sahip) ya da dalga dizileri şeklinde ortaya çıkabilir.
- Pozitif delikler yer altı sularına ulaştıklarında  $H_2O$ 'yu  $H_2O_2$ 'ye oksitleyerek halk arasında bilinen oksijenli suyun oluşmasına neden olur ve yeraltı suyunun kimyasını etkiler.
- Pozitif delikler topraktan geçtiğinde CO üreten organik maddeyi de oksitler ve radon salınımına neden olur. Havadan yaklaşık 8 kat daha ağır

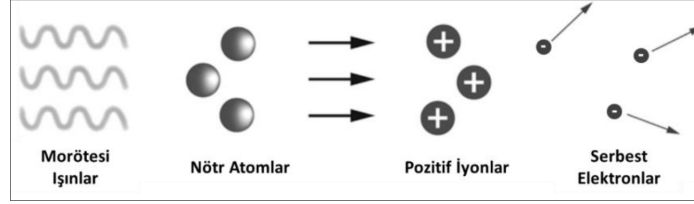
ve radyoaktif bir soygaz olan radon gazı renksiz, kokusuz ve tatsızdır. Akciğer kanseri oluşumunda radon gazı, 2013 tarihli Türkiye Halk Sağlığı Kurumu'nca yayımlanan raporda sigaradan sonra gelen en önemli etken olarak gösterilmekte ve akciğer kanserlerinin %3-15'inin radon sebepli olduğu belirtilmektedir (Gültekin ve Hacıkamiloğlu, 2013).

- Pozitif delikler yeryüzüne ulaştığında, topoğrafik yüksekliklere ulaşırlar, yer-hava arayüzünde birikirler ve peroksi durumuna geri dönmek için yeniden birleşirler. Rekombinasyon olarak adlandırılan bu birleşme ekzotermiktir. Fazla enerji kızılötesi fotonlar olarak yayılırlar. Bu durum termal kızılötesi spektrum aralığında gözlenebilen anomalilere neden olabilecek yapıda bir süreçtir.
- Yer-hava arayüzüne ulaşan pozitif delik miktarı arttıkça yüzeydeki elektrik (E) alanları, havadaki moleküller ile alan iyonizasyonu (FI: Field-Ionize) sürecine girer ve pozitif uçuşan iyonlar üretir.
- Uçuşan pozitif iyonlar, belirgin bir fizyolojik etkiye sahiptir ve bazı hayvan davranışlarında deprem öncesinde değişikliklere yol açar.
- Havadaki pozitif iyonlar stratosferik yüksekliklere çıkar. Yükselen pozitif hava iyonları iyonosferik plazmayı polarize ederek elektronların aşağıya doğru çekilmesine ve TEC değerlerinde anomalilere sebep olur.
- Pozitif hava iyonları, mezosfer boyunca yükselmeye devam ettikçe, iyonosfere 20-30 metre/saniye'lik dikey hızlarda ulaşan sütunlu hücreler halinde organize olurlar. Yükselen iyon hücreleri, elektrik alanında gökyüzünden uydular ile yer yüzünden çok düşük frekanslı (VLF: Very Low Frequency) radyo frekans gözlem aletleri ile ölçülebilen bir tümseklige sebep olur.
- Litosferden gelen artan sayıda pozitif delikler, yayın bantlarında 500 MHz genişliğinde radyo gürültüsüne, ani ozon oluşumuna ve uçuşan negatif iyonlara sebep olur (URL-6).

### 3.2. İyonosfer

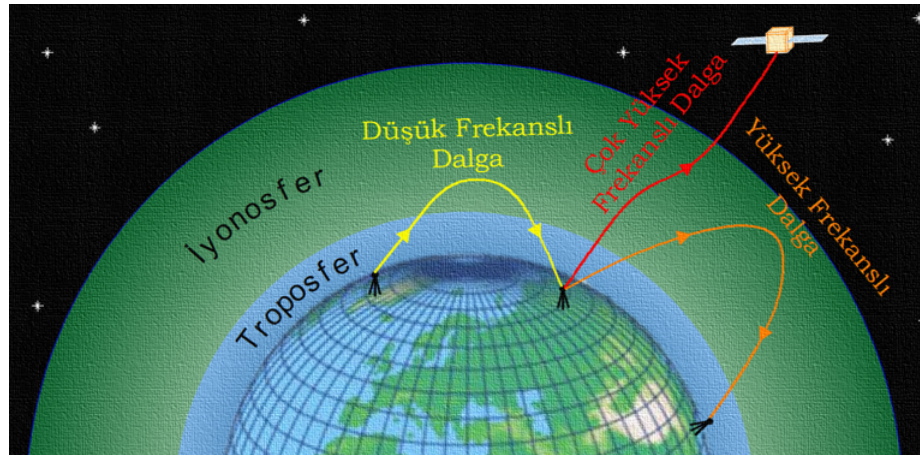
İyonosfer, üst atmosfer bölgesinde yer alan, içerisinde bulunan gaz halindeki moleküllerin ve atomların çoğunlukla Güneş'ten gelen mor ötesi ve X ışınları tarafından foto-iyonizasyona uğrayarak pozitif yüklü iyonların ve serbest elektron-

ların oluştuğu iletken bir tabakadır. İyonlaşma miktarı, Güneş radyasyonu ile ilişkili olduğundan öğlen saatlerinde maksimuma çıkar, Güneş'in batmasıyla iyonlar ve elektronlar tekrar birleşerek nötr atom ve molekül durumuna geri gelirler (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Fotoiyonizasyon (Ulukavak, 2016)

İyonosfer yeryüzünden yaklaşık 70-3000 km arasında yükseklikte bulunur (Kahveci ve Yıldız, 2021) ve radyo sinyallerini yansıtma özelliği sayesinde sivil ve askeri kısa dalga uygulamalarında uzak bölgeler arasında haberleşmenin gerçekleştirilmesini sağlar. İyonosfer tabakasını aşabilen minimum frekansa *plazma frekansı* ya da *kritik frekans* denir (IONOLAB, 2022). İyonosferin katmanlarına göre plazma frekansları sırası ile foD, foE, foF1 ve foF2 ile gösterilir. Uydu sinyalleri gibi frekansı iyonosferin katmanlarının kritik frekanslarından daha fazla olan güçlü sinyaller, iyonosfer tabakasından geçebilir ancak atmosferik kırılma, yavaşlama/hızlanma gibi etkilere maruz kalırlar (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. İyonosferde sinyal ilerlemesi

İyonosferdeki iyonlaşma miktarı çoğunlukla solar etkilerden kaynaklanır ve iyonlaşma oranı, yüksekliğe ve solar zenit açısına bağlı olarak değişim gösterir. Bu oran, (3.2) eşitliği ile verilen Chapman fonksiyonu ile hesaplanabilir (Schaer, 1999). Chapman teorisi iyonosfer incelemelerinde referans modeli olarak kullanılan

güvenilir bir kaynaktır ve bu fonksiyon ile elde edilen diyagram Chapman profili olarak adlandırılır (Şekil 3.9).

$$q_{iyon}(H, \chi) = q_0 \cdot e^{(1 - z_{iyon} - \sec \chi e^{-z_{iyon}})} \quad \text{ve} \quad z_{iyon} = \frac{H - H_0}{\Delta H} \quad (3.2)$$

$q_{iyon}(H, \chi)$  : İyon üretimi oranı

$H$  : Yükseklik

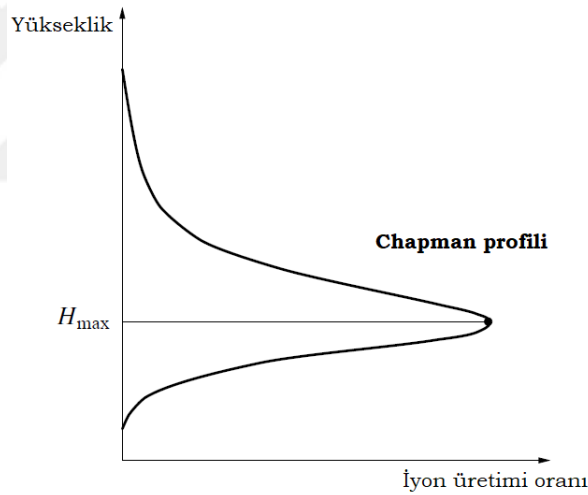
$\chi$  : Solar zenit açısı

$q_0$  :  $z_{iyon}=0$  iken iyon üretimi

$z_{iyon}$  : Ölçeklenmiş yükseklik

$H_0$  :  $\chi=0$  iken maksimum iyon üretimindeki referans yüksekliği

$\Delta H$  : Ölçek yüksekliği



**Şekil 3.9.** Chapman profili (Dach ve ark. (2015)'ten uyarlanmıştır.)

İyonosferdeki iyonlaşma düzeyi, toplam elektron içeriğine (TEC) bakılarak da incelenebilir. TEC değeri, sinyal yolu boyunca hesaplanan, taban alanı  $1 \text{ m}^2$  olan silindirdeki toplam serbest elektron miktarıdır. Birimi TECU (Total Electron Content Unit) olarak ifade edilir ve  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elektron/m}^2$ 'dir. TEC değerinin matematiksel gösterimi  $l$  sinyal yolu ve  $N_e$  elektron yoğunluğu olmak üzere (3.3) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$TEC = \int_{a_{h1c1}}^{u_{ydu}} N_e dl \quad (3.3)$$

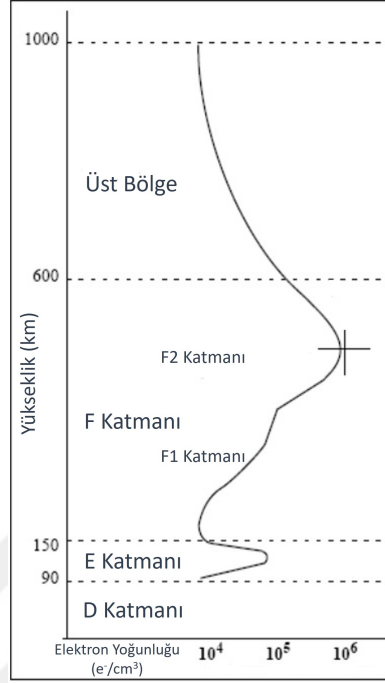
Günümüzde iyonosferdeki iyonlaşma düzeyinin incelenmesi adına geliştirilen yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları iyonosondalarla inceleme, evre uyumsuz geri saçılım radarı ile inceleme, uydu gözlemleri ve GNSS sinyalleri ile incelemedir.

- İyonosondalar ile inceleme yönteminde yeryüzünden iyonosfere farklı frekanslarda sinyaller gönderilir. Geri gelen sinyaller ile gönderilen sinyaller arasındaki zaman ölçülür. İyonosferin kırılma indisi, ölçülen yüksekliğin gerçek yükseklikten fazla gözükmemesine neden olur. Sinyalin frekansı kritik frekansa yaklaştıkça sonsuz yükseklik ölçülür. İyonogramlar, ölçülen sinyal frekansları ile ölçülen yükseklikler arasında ilişki kurarlar (IONOLAB, 2022).
- Evre uyumsuz geri saçılım radarı kullanılan en güçlü yer tabanlı yöntemdir. İyonosfere sinyal gönderilir ve geri gelen sinyal incelenir. Yansıyan sinyalin gücü, iyonosferde karşılaştığı elektronların saçtıkları enerji miktarları bilindiğinden iyonosferdeki elektron yoğunluğunu belirtir.
- Uydu gözlemleri, özellikle olası sismik kaynaklı fenomenleri belirlemek adına tasarlanan, iyonosferin plazmasını belirleme ekipmanları taşıyan uydularca yapılır. Bu tür ekipmanlar iyonosferdeki elektron yoğunluğu ( $N_e$ ), elektron ısı ( $T_e$ ) gibi parametreleri ölçebilir. Bu tür uydulara örnek olarak Fransa'ya ait DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emission Transmitted from Earthquake Regions) uydusu, Çin'e ait CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) ve ESA (European Space Agency)'ya ait Swarm uydu takımı örnek verilebilir (Xie ve ark., 2021).
- GNSS sinyalleri iyonosferden geçerken yavaşlama/hızlanma etkisine maruz kalırlar. İyonosfer, konum belirleme uygulamalarında her ne kadar hata kaynağı olarak gözükmese de oluşan gecikme ve hızlanma etkileri iyonosferdeki TEC miktarlarının hesaplanması ve global modellerin oluşturulması adına önemli bir avantaj sağlamaktadır.

### 3.2.1. İyonosferin katmanları

Güneş ışınları iyonosfer tabakasının tüm yüksekliklerine aynı miktarda etki etmemektedir ve iyonosferin farklı yüksekliklerinde farklı yoğunlukta nötr molekül

ve atomlar bulunmaktadır. Bu iki durum; iyonosfer içerisinde iyonlaşma miktarı değişimi, dolayısıyla içerdiği serbest elektron miktarı açısından sınırları keskin bir şekilde belli olmayan 3 katman oluşturur (Şekil 3.10).



**Şekil 3.10.** İyonosfer katmanları-elektron yoğunluğu değişimi (Canyılmaz ve ark. (2016)'dan uyarlanmıştır.)

İyonosferin en alt kısmında yer alan D katmanı iyonlaşmanın en az olduğu bölgedir. Yeryüzünden yüksekliği yaklaşık 60-90 km arasındadır. Gündüz vakti Güneş'ten ulaşan yüksek enerjili X ışınları ile bu katmanda iyonlaşma meydana gelir. Gece ise elektronlar atom ve moleküllere tutunarak D katmanının kaybolmasına sebep olur. Bu katmanın GPS sinyalleri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı kabul edilir.

E katmanı, yeryüzünden yaklaşık 90-150 km yükseklikte bulunur ve sinyaller üzerinde kırınım etkisi yapar. D katmanına göre zayıflatma etkisi çok daha azdır (Başçiftçi, 2017). Bu katmanda iyonlaşma düşük enerjili X ışınları ile meydana gelir. Bu katmandaki elektron yoğunluğu D katmanındaki gibi geceleri tamamen yok olmayıp zayıf da olsa iyonizasyon devam etmektedir. E katmanı içerisinde farklı fiziksel süreçler sebebiyle oluşan, düzensiz E (Sporadic E) tabakası olarak adlandırılan ve elektron yoğunluğu F katmanının elektron yoğunluğuna yakın değerlerde olan bir tabaka yer alır. Bu tabaka sayesinde 100-150 MHz frekanslı

sinyaller iyonosferden yansıyabilir ve 1000 km'den fazla yol katedebilir (IONOLAB, 2022; Şentürk, 2018).

Yeryüzünden yaklaşık 150 km ve üzeri F katmanı olarak adlandırılır. Bu tabakada Güneş'ten gelen yüksek enerjili mor ötesi ışınlar ile iyonlaşma gerçekleşir. Bu katman güneş radyasyonu etkisi ile F1 ve F2 olmak üzere iki katmana ayrılır. F2 katmanı üst iyonosfer bölgesi, F2 katmanının altında yer alan F1, E ve D katmanları alt iyonosfer bölgesi olarak adlandırılır (Schaer, 1999). F1 katmanı yaklaşık 140-200 km yükseklikte bulunan Güneş ışınlarının geliş açısına bağlı olarak iyonlaşma miktarının değiştiği katmandır. Geceleri F2 katmanı ile birleşir. İyonosferde maksimum elektron yoğunluğu F2 katmanında oluşur. Bu katmanda iyonlaşma, Güneş ışınlarının geliş açısından bağımsızdır ve günün 24 saati mevcuttur. F2 katmanı, GPS sinyalleri üzerindeki etkisi nedeniyle büyük bir hata kaynağı olmaktadır.

### 3.2.2. İyonosferi etkileyen koşullar

İyonosferdeki TEC miktarı zamansal, konumsal ve uzay-iklim koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

#### 3.2.2.1. Zamansal koşullar

Zamansal koşullar günlük değişimler, mevsimsel değişimler ve dönemsel değişimler olmak üzere üç maddede incelenebilir.

- *Günlük değişimler:* Dünya'nın kendi etrafında dönmesi ile oluşan değişimlerdir. İyonosferdeki TEC miktarları, Güneş ışınlarının atom ve molekülleri parçalaması nedeni ile öğlen saatlerinde artışa geçer, Güneş'in batması ile elektronlar ve iyonlar tekrar birleşerek TEC miktarlarında düşüşe neden olur. Gece saatlerinde D katmanı yok olur ve F1, F2 katmanı ile birleşir.
- *Mevsimsel değişimler:* Dünya'nın dönme ekseninin ekliptik eksenine göre  $23^{\circ}27'$  eğik olması ve Güneş etrafında dönmesi sonucu mevsimler oluşur. İyonosferdeki D, E ve F1 katmanlarının TEC değerleri, ilgili mevsimlerin

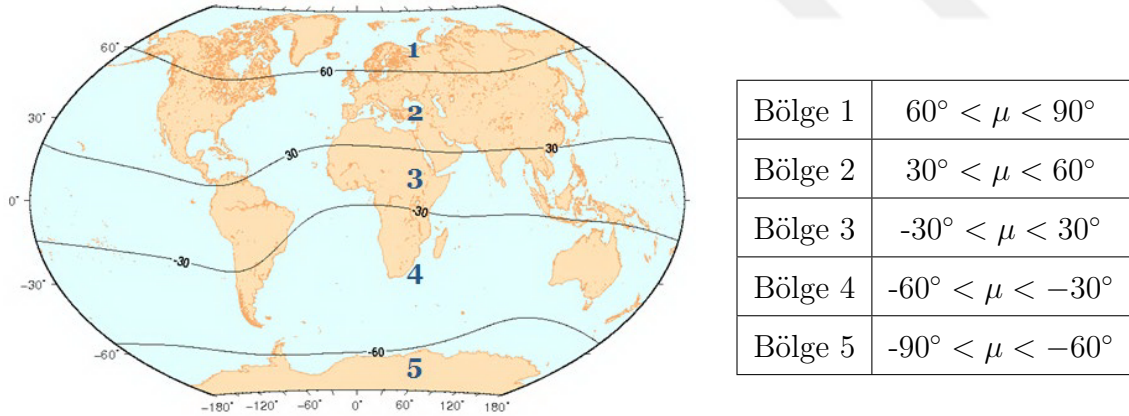


Güneş radyasyonunu alma miktarı ile doğru orantılı olarak artar. Yaz mevsiminde bu katmanlardaki TEC miktarı maksimum seviyeye çıkar. F2 katmanında ise kış aylarındaki iyonizasyon miktarı yaz aylarına kıyasla daha yüksek seviyededir.

- *Dönemsel değişimler:* Bu değişimler Güneş'in 11 yıllık manyetik alan değişimi döngüsü sonucu ortaya çıkan değişimlerdir. Döngü başlangıcı ve sonunda Güneş'in etkisi ile oluşan iyonizasyon miktarı minimum, döngü ortalarında ise maksimum seviyededir.

### 3.2.2.2. Konumsal koşullar

İyonosferik etkilerin genel karakteristik özelliklerine, şiddetine bağlı olarak ve jeomanyetik alan ilişkileri de göz önüne alınarak Dünya için 5 bölge tanımlanmıştır. MODIP (Modified Dip Latitude) ( $\mu$ ) bölgeleri olarak adlandırılan bu bölgeler Şekil 3.11'de gösterilmiştir. 3. bölge ekvatorial bölge, 2. ve 4. bölgeler orta enlem bölgeleri, 1. ve 5. bölgeler yüksek enlem bölgeleridir.



Şekil 3.11. MODIP bölgeleri (EC (2016)'dan uyarlanmıştır.)

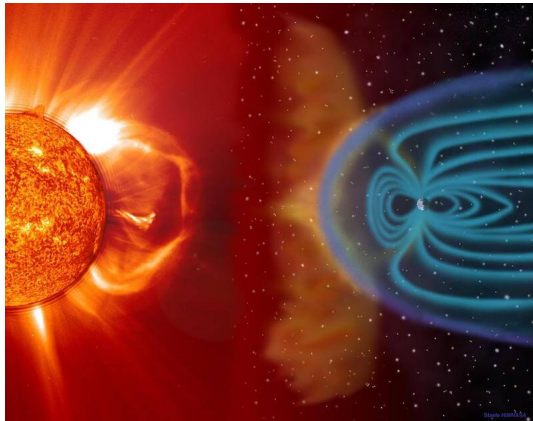
- *Ekvatorial bölge:* Yoğun Güneş ışınlarını alan bölge olduğundan dolayı iyonizasyonun en fazla olduğu bölgedir. Güneş radyasyonu ve yerin manyetik alan etkisi ile elektronlar bu bölge üzerinde hareket ederler. Bu durum ekvatorial bölgede iyonosferik anomalilere neden olur.
- *Orta enlem bölgeleri:* Bu bölge, yatay manyetik alan etkisinden ekvatorial bölge kadar etkilenmez ve bölgede ekvatorial ve yüksek enlem bölgelerine göre daha az iyonizasyon meydana gelir. İyonosferin incelenmesi adına

istasyonların en çok kurulduğu ve ölçümlerin yapıldığı bölgedir. Bölgedeki iyonlaşma, Güneş'ten gelen mor ötesi ve X ışınları ile oluşur.

- *Yüksek enlem bölgeleri:* Auroral ve kutup bölgelerini kapsamaktadır. Diğer bölgelere göre daha az iyonlaşmanın olduğu ancak kısa süreli değişimlerin sık yaşandığı bölgedir. Bölgede iyonizasyon, hem güneş radyasyonu etkisiyle hem de parçacıkların birbirleriyle çarpışmaları sonucunda oluşur. Bu bölgedeki jeomanyetik alan çizgilerinin neredeyse dik olması, yüklü parçacıkları E katmanına doğru iter ve atmosferdeki nötr haldeki atom ve moleküllerle çarpışan bu parçacıklar elektron kopmalarına sebep olur. Bu durum aurora bölgelerini oluşturur (IONOLAB, 2022). Farklı atomların iyonize olmaları, aurora bölgelerinde farklı renklerde ışımaların olmasına neden olmaktadır.

### 3.2.2.3. Uzay iklim koşulları

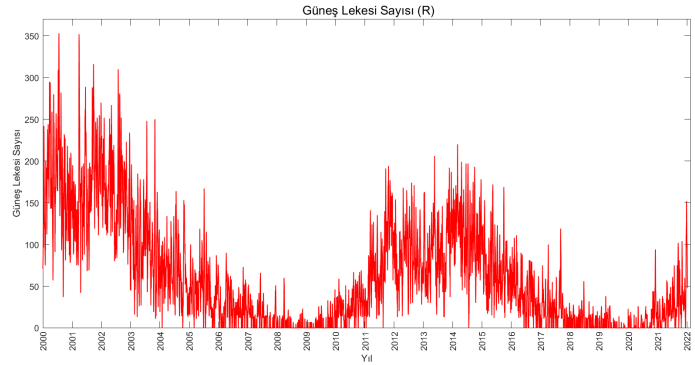
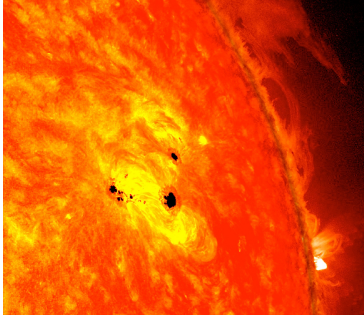
Güneş yüzeyindeki aktiviteler Dünya'nın manyetik alanı dahil olmak üzere tüm solar sistemi etkileyerek uzay iklim koşullarını oluşturur (NASA Space Place, 2022). Uzay iklim koşullarındaki hareketlilik, iyonosferdeki değişimlerin ana kaynağı olarak nitelendirilir. Bu sebeple iyonosferik anomalilerin deprem kaynaklı olup olmadığının araştırılması için Güneş aktivitelerinin etkilerini gösteren indislere bakılmalıdır. Güneş aktiviteleri kapsamında güneş lekelerinin sayısı (R), koronal delikler, güneş patlamaları ve koronal kütle atımları incelenebilir.



**Şekil 3.12.** Uzay iklim (NASA Space Place, 2022)

Güneş lekeleri, manyetik alanın Güneş'in belirli bölgelerinde yoğunlaşmasıyla

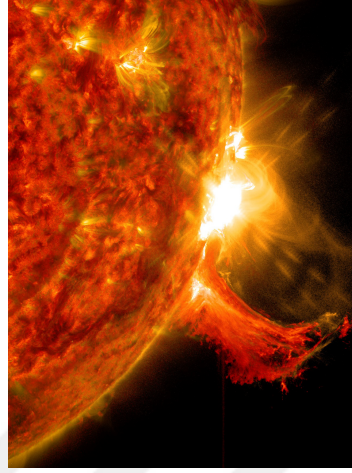
birbirlerinin manyetik kutupları olacak şekilde çiftler halinde oluşan lekelerdir (Şekil 3.13). Güneş'in yüzey sıcaklığının yaklaşık  $5500^{\circ}\text{C}$  olması, Güneş lekesi sıcaklıklarının ise  $2700^{\circ}\text{C}$ - $4200^{\circ}\text{C}$  arasında olması, Güneş yüzeyine nispeten bu lekelerin karanlık gözükmesine neden olmaktadır. Çoğu koronal kütle atımları ve püskürtüsü Güneş lekelerinin yoğun olduğu bölgelerde gerçekleşir. Güneş lekelerinin yoğunluğu, Güneş döngüsü ile ilişkilidir. Bu döngü, Güneş'in manyetik kutuplarının yer değiştirdiği 9 ila 14 yıl arasında gerçekleşen, ortalama olarak 11 yıllık bir süreçtir. Solar minumum zamanı yani Güneş lekesi sayısının minimum olduğu dönemde döngü başlar. Güneş lekesi sayısı zamanla artar, dolayısıyla Güneş akısında da artış meydana gelir ve döngü solar maksimuma ulaşır. Ardından Güneş lekesi sayısı azalmaya başlar ve döngü tekrar solar minimuma gelerek tamamlanmış olur.



**Şekil 3.13.** Güneş lekeleri (NASA GSFC, 2022) ve Güneş lekesi sayısının yıllara göre değişimi

Koronal delikler, tek manyetik kutbu Güneş üzerinde bulunan, manyetik alanın uzaya doğru yöneldiği ve uzaya akan Güneş parçacıkları sebebiyle nispeten karanlık gözüken alanlardır. Bu delikler, Güneş yüzeyinin herhangi bir bölgesinde ve herhangi bir zamanda gözükebilse de, Güneş'in kutup bölgelerinde daha yaygın ve kalıcı olarak görülürler. Bu yüzden yüksek enlemlerde hızlı Güneş rüzgarları oluşur. Güneş'ten uzay boşluğuna yayılan, içerisinde çoğunlukla proton ve elektronların bulunduğu plazma akışı olarak tanımlanan Güneş rüzgarlarının ekvatordaki hızı yaklaşık  $400 \text{ km/sn}$  iken, koronal deliklerden çıkan Güneş rüzgarları  $800 \text{ km/sn}$  hıza ulaşabilmektedir (NOAA SWPC, 2022). Yüksek hızdaki akımlar, Güneş'in çekim etkisinden kurtularak uzaya fışırır. Yüksek enerji içeren bu olaylar koronal kütle atımları olarak adlandırılır. Çoğunlukla bağımsız olaylar olsalar da Güneş patlamaları süreçlerinde de gözlemlenebilir. Koronal kütle atımları ve Güneş

patlamaları solar sistemimizde meydana gelen en güçlü patlamalardır. Güçlü manyetik alan çizgilerinin kopup tekrar birleşmeleri ile ortaya çıkan enerji Güneş patlamasına (püskürmesine) sebep olur ve bu patlamalar dakikalar ya da saatler boyunca sürebilir (KOERI, 2021).

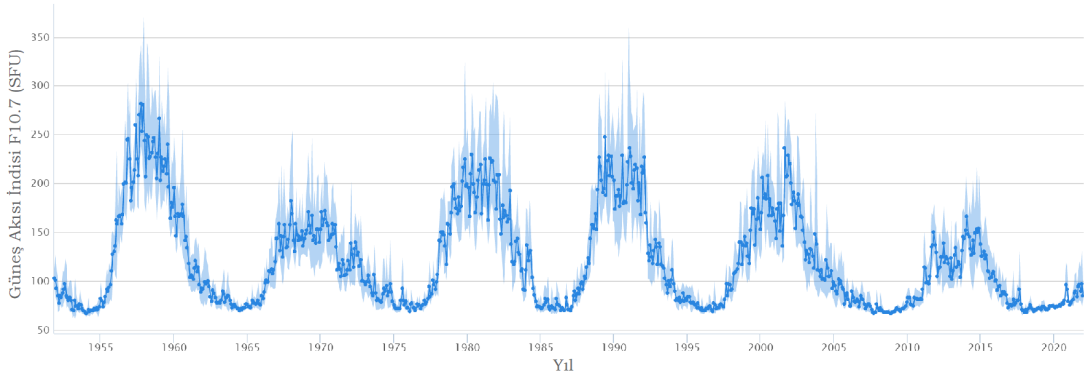


**Şekil 3.14.** 02.10.2014 tarihli güneş patlaması (NASA/SDO), sarı parlak kısım Güneş patlaması, altında ise uzaya fıskıran Güneş plazması görülmektedir (URL-10)

Güneş patlamalarının ardından Güneş'ten yayılan elektromanyetik enerji Dünya'nın manyetosfer tabakasına ulaşır ve Dünya'nın manyetik alanında değişimlere yol açar. Manyetik alandaki bu değişimler iyonosfer tabakasında da değişimlere sebep olur. Güneş'teki patlamanın şiddeti arttıkça Dünya'ya ulaşan parçacıkların enerjileri de güçlü olur ve iyonosferin en alt tabakası olan D tabakasında da yoğun iyonizasyon meydana gelir. Normal koşullar altında, haberleşme amaçlı gönderilen sinyalleri uzak bölgelere yansıtabilen iyonosfer tabakası, güçlü Güneş patlamalarının ardından gelen sinyalleri bozarak ya da tamamen absorbe ederek iletişimde kesikliklere yol açar. 1859 yılında gerçekleşen Carrington olayı, çok güçlü bir Güneş patlamasına örnektir ve Dünya üzerinde de güçlü etkileri olmuştur. Carrington olayında Güneş patlaması sonucu elektriksel cihazların kullanılamaz hale geldiği ve normalde kutup bölgelerinde gözükken aurora ışıklarının Japonya gibi daha düşük enlemlerde bulunan yerlerde dahil gözlemlendiği, bu ışıkların kan kırmızısı renkte ve altında gazete okunabilecek derecede parlak olduğu bildirilmiştir (Green ve Boardsen, 2005).

### 3.2.2.3.1. Solar aktivite indisi (F10.7)

Solar aktivite indisi, 10.7 cm dalga boyunda 2800 MHz frekanslı bant üzerindeki Güneş akısının miktarını ölçmek amacı ile kullanılır. F10.7 indisi, Güneş'ten yayılan morötesi ve X ışınlarının miktarlarını ölçmenin yanı sıra Güneş lekeleri sayıları ile de korelasyonlu olduğundan zamansal değişim grafiklerinde Güneş döngüsünün etkisi de görülebilir (Şekil 3.15). Güneş akısı, Güneş akısı birimi olan sfu (solar flux unit) ile ifade edilir. Solar minimum dönemlerinde Güneş akısı yaklaşık 50 sfu değerinde gözlenirken solar maksimum dönemlerinde 200 sfu değerlerinin üzerine çıkabilmektedir. 150 sfu değerinin altındaki Güneş akısı değerleri düşük solar aktivite, üstündeki değerler ise yüksek solar aktivite olarak değerlendirilir (Bruevich ve ark., 2014).

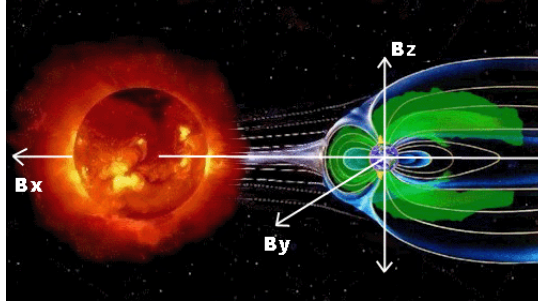


**Şekil 3.15.** Güneş akısı indisinin zamana bağlı değişimi (URL-7'den uyarlanmıştır.)

### 3.2.2.3.2. Jeomanyetik alan ve indisleri ( $B_x$ , $B_y$ , $B_z$ )

Jeomanyetik alan, yeri çevreleyen manyetik güç alanıdır. Dünya'nın çekirdeğindeki erimiş demir ve Dünya'nın dönüş hareketi jeomanyetik alanı oluşturan etkenlerdir. Bu manyetik alan Güneş fırtınalarından gelen yüksek enerjili parçacıkları yakalayarak Van Allen kuşaklarını oluşturur. Manyetik alan indüksiyonu ( $B$ ) ile gösterilir ve birimi Tesla (T) olup  $10^{-9}$  Tesla olan nanoTesla (nT) biriminde de ifade edilir. Jeomanyetik alandaki değişimlerin incelenmesi adına 3 boyutlu jeosentrik solar manyetosferik bir koordinat sistemi tanımlıdır. Bu sistemde  $B_x$  bileşeni ekliptik düzleminde Güneş'e doğrultulmuştur.  $B_z$  değeri ekliptik düzlemine diktir ve  $B_y$  bileşeni  $B_x$  ve  $B_z$  doğrultularına dik olacak şekilde

konumlandırılmıştır (Şekil 3.16). Manyetik alan aktivite şiddet düzeyleri ve indis değerleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.16.** Dünya'nın manyetik alan bileşenleri (Ulukavak, 2016)

**Çizelge 3.1.** Manyetik alan indisi ve aktivite şiddeti

Manyetik Aktivite Şiddeti	B İndisi (nT)
Zayıf	-3
Hafif	-5
Kuvvetli	-10

Jeomanyetik alanda oluşan değişimler, Güneş'ten kopup Dünya'nın manyetik alanına ulaşan parçacıkların etkisiyle oluşmaktadır. Ancak jeomanyetik alan değişimlerinin; güneş aktivitesi dışında, sismik ve volkanik aktivitelerin etkisiyle de oluştuğu gözlemlenmiş ve bu konuda çalışmalar yapılmıştır (Özsöz ve Pamukçu Ankaya, 2021; Schnepf ve ark., 2022). Deprem öncülü olarak iyonosferik anomalilerin incelenmesi çalışmalarında, uzay iklim koşullarının etkisi yorumlanırken manyetik alan değişimlerinin solar aktivite kaynaklı mı yoksa sismik kaynaklı mı olduğu incelenmelidir.

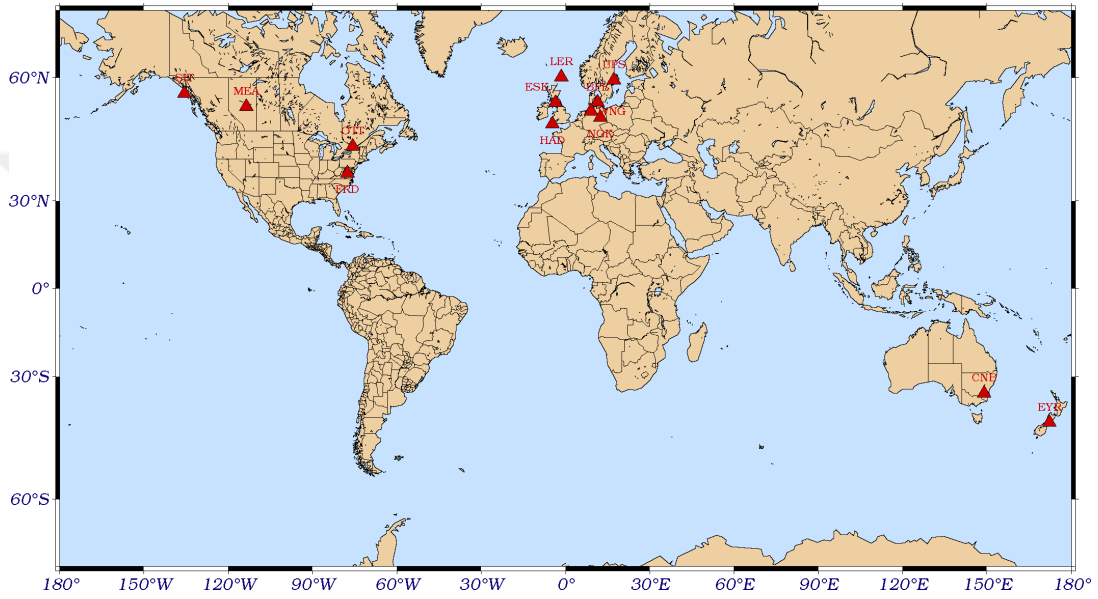
### 3.2.2.3.3. Jeomanyetik fırtına ( $K_p$ ) ve jeomanyetik aktivite indisi (Dst)

Jeomanyetik fırtına, Güneş'ten Dünya'nın jeomanyetik alanına ulaşan Güneş plazmasının yoğunluğuna bağlı olarak Dünya'nın manyetik alanında oluşturduğu geçici anomalilerdir. Jeomanyetik fırtınalar iyonosferdeki elektron yoğunluğunda değişimlere sebep olarak küresel elektrik alanının dengesinde, uzay aracı operasyonlarında, GPS sinyallerinde olumsuzluklara yol açabilmektedir. Dünya'nın manyetik alanında meydana gelen değişimlerin incelenmesi adına jeomanyetik fırtına indisi ( $K_p$ : Planetary K) ve jeomanyetik aktivite indisi (Dst: Disturbance storm



time) indisleri incelenebilir. Bu indisler, nanoTesla (nT) biriminde jeomanyetik fırtına ve aktivite değişimlerini gösterir.

Jeomanyetik alandaki bozulmaların belirlenmesinde kullanılan  $K_p$  indisi,  $44^\circ$  ve  $60^\circ$  kuzey ve güney enlemleri arasında bulunan toplam 13 manyetometre istasyonundan gözlemlenen veriler ile iki yatay manyetik alan bileşenindeki bozulma seviyelerinin ortalama değeri olarak elde edilir (URL-12). Manyetometre istasyon konumları Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17.  $K_p$  indisi gözlem istasyonları

$K_p$  jeomanyetik fırtına indisi günde 3 saat aralıklarla yayınlanmaktadır ve bu indisin değeri  $0 \leq K_p \leq 9$  arasındadır (Çizelge 3.2). Değerin yükselmesi fırtına şiddetinin arttığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.2.  $K_p$  indisi ve fırtına şiddeti

Fırtına Şiddeti	$K_p$ İndisi	nT
Sakin	1-3	$K_p < 40$
Orta	3-7	$40 < K_p < 200$
Güçlü	7-9	$200 < K_p$

Dst indisi, jeomanyetik fırtınanın derecesi hakkında bilgi veren bir parametredir. Manyetik ekvator üzerinde, iyonosferin E bölgesi etrafında dolaşan akım zincirindeki (ekvatorial elektrojet) değişimleri tanımlar. Bu indis, 1 saat çözünürlükle yayınlanır

ve 5 farklı ölçekte fırtına şiddeti derecesi şeklinde ifade edilir (Çizelge 3.3).

**Çizelge 3.3.** Dst indisi ve fırtına şiddeti

Fırtına Şiddeti	Dst İndisi (nT)
Sakin	Dst > -20
Zayıf	-20 > Dst > -50
Hafif	-50 > Dst > -100
Kuvvetli	-100 > Dst > -300
Çok Kuvvetli	-300 > Dst

### 3.3. GNSS

Küresel navigasyon uydu sistemi (GNSS: Global Navigation Satellite Systems), uydu-alıcı arasında elektromanyetik sinyaller ile veri akışı sağlayan ve geriden kestirme mantığı ile alıcının konumunu belirleyebilen bir teknolojidir. GNSS, kombine bir sistem olup ABD tarafından geliştirilen GPS, Rusya tarafından geliştirilen GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Avrupa Birliği tarafından geliştirilen Galileo, Çin tarafından geliştirilen Compass, Japonya tarafından geliştirilen QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), Hindistan tarafından geliştirilen IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) ve bu sistemlerin etki alanlarını güçlendirmek için oluşturulan SBAS (Satellite-based Augmentation Systems) sistemlerinden oluşur. Bu çalışmada GPS sistemine ait veriler kullanılmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı (USDOD) tarafından geliştirilen NAVSTAR/GPS (Navigation Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System), uydu sinyalleri yardımıyla kullanıcıların; tüm hava koşullarında, yer ve zaman farketmeksizin, global bir koordinat sisteminde ve yüksek doğrulukta konum ve hızlarını zamana bağlı olarak belirleyebilmelerini sağlayan bir sistemdir (Kahveci ve Yıldız, 2021).

GPS sinyalleri, stabilitesi yüksek atomik saatler tarafından üretilen ve temel frekans olarak adlandırılan 10.23 MHz'in 154 ve 120 tam katları ile çarpılarak elde edilmesiyle oluşturulan 1575.420 MHz L1 frekansı ve 1227.600 MHz L2 frekansını



kullanmaktadır. L1 ve L2 taşıyıcı dalgaları üzerine, C/A (Coarse/Acquisition) ve P (Precise/Protected) kodları ve navigasyon mesajı modüle edilir.

### 3.4. İyonosferin GNSS Sinyallerine Etkisi

GNSS sinyalleri gibi iyonosferin kritik frekansından çok daha yüksek frekanslı sinyaller iyonosfer tabakasından geçebilmektedir. Ancak iyonosferdeki elektron yoğunluğuna bağlı olarak sinyaller üzerinde yavaşlama/hızlanma ve kırılma etkileri oluşmaktadır. Bir ortamın kırılma indisi, (3.4) eşitliğinde gösterildiği üzere ışığın boşluktaki hızının, sinyalin o ortamdaki hızına oranıdır.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.4)$$

$c$  : Işığın boşluktaki hızı

$v$  : Işığın ortamdaki hızı

Yeryüzünden yaklaşık 40 km yüksekliğe uzanan, sinyal yayılımının sıcaklık ve su buharı içeriğine bağlı ve sinyal frekans büyüklüğünden bağımsız olarak gerçekleştiği troposfer tabakasinda kırılma indisi  $n > 1$  iken, sinyal frekansına bağımlı olarak etki eden iyonosfer tabakasinda kırılma indisi  $n < 1$ 'dir (Seeber, 2003; Schaer, 1999). İyonosfer için kırılma indisi Appleton-Hartree tarafından (3.5) eşitliğindeki gibi tanımlanmıştır.

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1-X-iZ)} \pm \left( \frac{Y_T^4}{4(1-X-iZ)^2} + Y_L^2 \right)^{1/2}} \quad (3.5)$$

$$X = \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2}, \quad Y_L = \frac{e B_L}{m_e \omega}, \quad Y_T = \frac{e B_T}{m_e \omega}, \quad Z = \frac{v}{\omega}$$

$N_e$  : Elektron yoğunluğu (el/m<sup>3</sup>)

$e$  : Elektron yükü (1.602x10<sup>-19</sup> Columb)

$m_e$  : Elektron kütlesi (9.107x10<sup>-31</sup> kg)

$\epsilon_0$  : Uzaydaki di-elektrik sabiti (8.854x10<sup>-12</sup> F/m)

$v$  : Elektron çarpışma frekansı

$\omega$  :  $2\pi f$  Radyal frekansı

$B$  : Dünyanın manyetik alanının akı yoğunluğu (Tesla)

$T, L$  : Ene ve boya ilişkin parametler

(3.5) eşitliğinde Dünya'nın manyetik alanına ilişkin ve elektron çarpışmaları ihmal edildiğinde;

$$n = 1 - \frac{X}{2(1 \pm Y_L)} \quad (3.6)$$

eşitliği oluşmaktadır (İnyurt, 2019). Dünya'nın manyetik alanına ilişkin boylamsal etkiler de yok sayılarak gerekli düzenlemeler yapıldığında  $f$  frekanslı faz ölçüsüne etki eden kırılma indisi  $A$  katsayısı  $40.3 \text{ m}^3/\text{sn}^2$  olmak üzere,

$$n_{\Phi} = 1 - \frac{A}{f^2} N_e \quad (3.7)$$

olarak elde edilir. Aynı hesaplamalar kod ölçüsü için tekrarlanırsa (3.8) eşitliği elde edilir.

$$n_P = 1 + \frac{A}{f^2} N_e \quad (3.8)$$

Hesaplanan kırılma indislerindeki 2. terimin işaretinin faz ölçüleri için '-' olması kırılma indisinin  $n < 1$  olduğunu ve sinyal iyonosferden geçerken hızının arttığını ifade eder (Kahveci, 1997). GPS gözlemlerinde kod ölçüleri faz sinyalleri hızında değil grup hızı olarak ilerlediğinden kırılma indisi  $n > 1$ 'dir (Schaer, 1999) ve iyonosferden geçerken sinyal yavaşlar. Alıcı ve uydu arasındaki iyonosferden kaynaklanan grup gecikmesi, faz ilerlemesi etkileri (3.9) eşitliğindeki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta \rho_a^u = \int_a^u (n_g - 1) dl \quad (3.9)$$

$l$  : Sinyalin iyonosferde aldığı yol

$n_g$  : Kırılma indisi

(3.7) ve (3.8) eşitlikleri (3.9) eşitliğinde yerine konulursa kod ve faz gözlemleri için iyonosferik etkiler hesaplanmış olur.

$$\Delta\rho_a^u = \frac{A}{f^2} \int_a^u N_e d\rho_a^u \quad (3.10)$$

Burada sinyal yolu boyunca ölçülen elektron yoğunluğu değeri toplam elektron içeriği (TEC) olarak ifade edilse;

$$\Delta\rho_a^u = \frac{A \cdot STEC}{f^2} \quad (3.11)$$

(3.11) eşitliği ile iyonosferik etki hesaplanmış olur. Buradaki STEC (Slant Total Electron Content) değeri sinyal yolu boyunca oluşan eğik toplam elektron içeriği olarak tanımlanır.

### 3.5. GPS Verileri ile TEC Değeri Belirleme

Konum belirleme amaçlı uygulamalarda, L1 ve L2 frekanslarının kullanılması ile iyonosferik etkiden bağımsız kombinasyon oluşturularak GPS için büyük bir hata kaynağı olarak görülen iyonosferik etki büyük oranda elimine edilebilir ve uydu-alıcı arasındaki mesafe hesaplanabilir. Meteorolojik çalışmalarda ise GPS sinyalleri üzerindeki gecikme ve hızlanma etkileri, iyonosferdeki TEC miktarlarının hesaplanabilmesi ve modellenebilmesi adına kaynak oluşturmaktadır.

Uydudan çıkan sinyalin ideal koşulda hiç bir etkiye maruz kalmadan alıcıya ulaşması arasındaki geçen zamanın ışık hızı ile çarpılması ile pseudorange ya da ham uydu-alıcı uzaklığı elde edilir.

$$\rho_a^u = c \cdot (t_a - t^u) = c \cdot \Delta t \quad (3.12)$$

Ancak gerçek koşullar altında GPS sinyalleri, saat hataları etkileri, atmosferik etkiler, sinyal yansıma (multipath) etkisi gibi etkilere maruz kalarak alıcıya ulaşır. Farklı frekanslarındaki kod gözlemleri için (3.13) ve (3.14) eşitlikleri yazılabilir. P1 ve P2 kod gözlemlerinin frekansları olarak sırası ile taşıyıcı faz gözlemleri olan L1

ve L2 sinyal frekansları hesaplamalarda kullanılır.

$$P_{1,a}^u = \rho_a^u + c \cdot (\Delta t_a - \Delta t^u) + I_{1,a}^u + T_{1,a}^u + c \cdot (\epsilon_1^u + \epsilon_{1,a}) + \alpha \quad (3.13)$$

$$P_{2,a}^u = \rho_a^u + c \cdot (\Delta t_a - \Delta t^u) + I_{2,a}^u + T_{2,a}^u + c \cdot (\epsilon_2^u + \epsilon_{2,a}) + \alpha \quad (3.14)$$

$P_{i,a}^u$  : Pseudo-range/Kod gözlemi

$\rho_a^u$  : Uydu-alıcı arasındaki gerçek uzaklık

$c$  : Işık hızı (299792458 m/sn)

$\Delta t_a$  : Alıcı saati hatası

$\Delta t^u$  : Uydu saati hatası

$I_{i,a}^u$  : İyonosferik gecikme

$T_{i,a}^u$  : Troposferik gecikme

$\epsilon_i^u + \epsilon_{i,a}$  : Uydu ve alıcı donanımsal gecikmeleri

$\alpha$  : Rastgele hatalar

Gözlem denklemleri aynı şekilde faz ölçüleri için de oluşturulabilir. Faz sinyali, sinyalin tam dalga sayısını ifade eder. Ancak alıcı sadece kendisine ulaştığı andaki sinyalin faz kesrini kayıt eder. Uydudan çıkan sinyalin kaç tam dalga sayısı ile alıcıya ulaştığı bilinmemektedir. Bu durum *taşıyıcı dalga faz belirsizliği* ya da kısaca *faz belirsizliği (ambiguity)* olarak adlandırılır (Kahveci ve Yıldız, 2021).

$$L_{1,a}^u = \rho_a^u + c \cdot (\Delta t_a - \Delta t^u) - I_{1,a}^u + T_{1,a}^u + \lambda B_{1,a}^u + \alpha \quad (3.15)$$

$$L_{2,a}^u = \rho_a^u + c \cdot (\Delta t_a - \Delta t^u) - I_{2,a}^u + T_{2,a}^u + \lambda B_{2,a}^u + \alpha \quad (3.16)$$

$L_{i,a}^u$  : Faz gözlemi

$\lambda$  : İlgili dalga boyu

$B_{i,a}^u$  : Başlangıç fazı belirsizliğini içeren sapma değeri

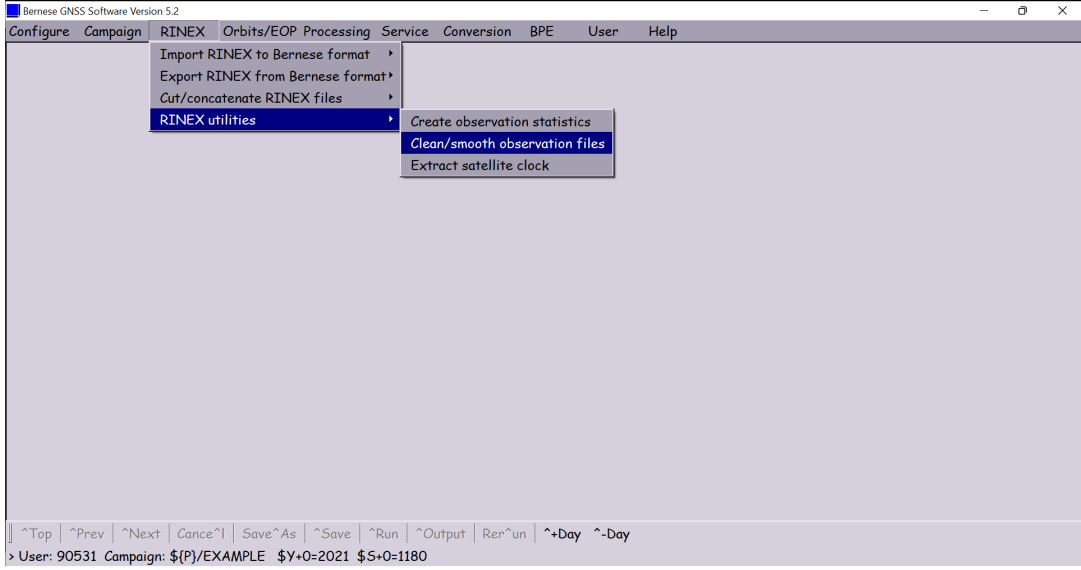
$\alpha$  : Rastgele hatalar

(3.15) ve (3.16) eşitliklerindeki  $\lambda B_{i,a}^u$  sapma değerleri  $i=1$  ve  $2$  için  $\lambda(N_{i,a}^u + \delta N_{i,a}^u) + c \cdot (\epsilon_i^u + \epsilon_{i,a})$  değerini temsil etmektedir.  $N$  değeri tamsayı,  $\delta N$  ise faz salınım etkisi

yüzünden oluşturulur (Schaer, 1999).

Hem kod ölçülerinde hem de faz ölçülerinde iyonosferik düzeltme mevcuttur. TEC değerleri sadece kod gözlemleri kullanılarak, sadece faz gözlemleri kullanılarak ya da ikisi beraber kullanılarak elde edilebilir. Sadece kod gözlemleri ile elde edilecek olan TEC değerlerinin doğruluğu, kod gözlemlerindeki sinyal yansıma ve gürültü oranının fazla olmasından dolayı düşük olacaktır. Sadece faz gözlemleri kullanılarak hesaplanan TEC değerlerinin doğruluğu, kod ölçmeleri ile elde edilen TEC değerlerinin doğruluğundan daha yüksektir. Ancak faz gözlemlerindeki taşıyıcı dalga faz belirsizliğinin doğru şekilde hesaplanabilmesinin zorluğundan dolayı bu yöntem tercih edilmemektedir. Son olarak doğruluğu faz gözlemleri ile elde edilen TEC değerlerinin doğruluğundan daha düşük olsa da kod gözlemlerinin faz gözlemleri kullanılarak yumuşatılması ile oluşturulan yumuşatılmış kod ölçmeleri ile TEC değeri hesaplaması kullanım pratikliği açısından tercih edilmektedir (Liu ve ark., 2005).

Bu çalışmada yumuşatılmış kod ölçmeleri kullanılarak TEC hesabı yapılmıştır. Yumuşatma işlemi için Bernese GNSS v5.2 yazılımından yararlanılmıştır. Bu yazılım Bern Üniversitesi Astronomi Enstitüsü tarafından geliştirilen bilimsel, yüksek doğruluklu, çoklu GNSS veri değerlendirme yazılımıdır. Programda yumuşatma algoritması olan RNXSMT modülü kullanılmıştır. RNXSMT modülünde, kod ve faz ölçmeleri arasındaki tutarlılık kontrol edilerek kod ölçmelerinin yumuşatılması sağlanır. RINEX gözlem dosyaları işlenerek çıktı dosyası yine RINEX tipinde oluşturulur, bu dosya aykırı değerlerden, faz kesikliklerinden (cycle slips) arındırılmış kod ölçmelerini içerir.



**Şekil 3.18.** Bernese 5.2 programı RNXSMT modülü

Yumuşatılmış kod ölçmeleri elde edildikten sonra, (3.17) eşitliği (3.13) ve (3.14) eşitliklerinde yerinde yazılır, ardından geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon oluşturularak TEC değerleri elde edilir. Kod farkları alınarak oluşturulan bu kombinasyonda, sinyal frekansından bağımsız olan, her iki kod ölçmesinde de aynı değere sahip olan değerler elimine edilmiş olur ve yumuşatılmış kod farkı denklemi (3.18) eşitliği ile elde edilir.

$$I_a^u = + \frac{40.3 \cdot STEC}{f^2} \quad (3.17)$$

$$P_{4a}^u = P_1 - P_2 = 40.3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) STEC_a^u + c(DCB^u + DCB_a) \quad (3.18)$$

$c$  : Işık hızı (299792458 m/sn)

$f_1, f_2$  : Sinyal frekansları (1575.420 MHz, 1227.600 MHz)

$DCB^u, DCB_a$  : Uydu ve alıcı diferansiyel kod farkları

(3.18) eşitliğindeki diferansiyel kod farkları değerleri, uydu ve alıcılardaki donanımsal kusurlar nedeniyle ortaya çıkan sistematik hatalardır. Farklı frekanstaki sinyallerin, radyo frekans yollarındaki farklı işleme sürelerinden kaynaklanır (Dach ve ark., 2015; Mylnikova ve ark., 2015). Hesaplamalarda DCB değerlerinin ihmal edilmesi uydularda 20 TECU'ya (7 ns) varan, alıcılarda 40 TECU'ya (14 ns) varan, kümülatif olarak 100 TECU'ya (35 ns) ulaşabilecek hatalara neden olabilir. Ayrıca,

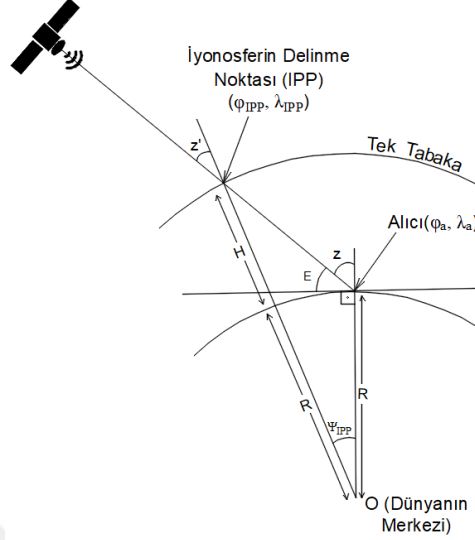
TEC değerlerinde negatif değerlerin bulunmasına yol açabilir (Ammar ve ark., 2018). TEC değerleri, fiziksel bir varlık olan elektronların miktarlarını belirttiğinden dolayı negatif değer alamaz. Uydu ve alıcı DCB değerleri ilgili analiz merkezine (IGS/CODE) ve gününe ait ionosfer dosyalarından (IONEX: Ionosphere Map Exchange) temin edilebilir. İyonosfer dosyalarında DCB'si bulunmayan alıcılar için M.DCB yazılımı kullanılarak DCB değerleri hesaplatılmıştır.

(3.18) eşitliğinde STEC değeri yalnız bırakıldığında (3.19) eşitliği ile eğik toplam elektron içeriği değerine ulaşabiliriz. Hesaplanan STEC değeri, TECU biriminde gösterilmek istenirse  $10^{16}$  değerine bölünmelidir.

$$STEC_a^u = \frac{1}{40.3} \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) (P_{4a}^u - c(DCB^u + DCB_a)) \quad (3.19)$$

Bir istasyon için hesaplamalarda bulunan değerler, farklı uydular göz önünde bulundurulduğunda uydunun zenit açısına göre farklı eğik mesafeleri içeren STEC değerleridir. Değerlerin karşılaştırılabilir olması adına STEC değerleri izdüşüm/indirgeme fonksiyonu (mapping function) kullanılarak düşey, yani zenit doğrultusundaki TEC değerlerine dönüştürülür ve ionosferin delinme noktalarında düşey doğrultudaki TEC (VTEC: Vertical Total Electron Content) değerleri elde edilir. İyonosferin GPS verileri ile iki boyutlu olarak modellenebilmesi için tek tabaka modeli (SLM: Single Layer Model) geliştirilmiştir (Şekil 3.19). Bu modele göre ionosfer tabakası sonsuz incelikte bir H ortometrik yüksekliğindedir ve tüm serbest elektronları içermektedir. H yüksekliği, ilgili maksimum elektron yoğunluğu yüksekliğine göre 350, 400 ya da 450 km olarak alınır (Schaer, 1999). Nayir ve ark. tarafından yapılan çalışmada Ankara istasyonu için 10.10.2003 tarihli VTEC değerlerinin hesabında 300.0 km, 428.8 km ve 450.0 km olmak üzere 3 farklı yükseklik seçilmiş ve farklı yüksekliklerin VTEC değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda H=300.0 km alınarak hesaplanan VTEC ile H=428.8 km alınarak hesaplanan VTEC değeri arasında 0.52 TECU; H=428.8 km ve H=450.0 km alınarak hesaplanan VTEC değerleri arasındaki fark ise 0.08 TECU bulunarak farklı ionosfer yükseklikleri ile hesaplanan TEC değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada VTEC hesapları için, temin edilen ionosfer dosyalarındaki ionosfer tabakası yükseklik değeri olan 450.0 km

alınmıştır. Tek tabaka modelinde yeryuvarı R yarıçaplı bir küre kabul edildiğinden dolayı, iyonosfer dosyalarında ve GPS TEC hesaplarında jeodezik koordinatlar değil jeosentrik koordinatlar kullanılmaktadır.



Şekil 3.19. İyonosfer için tek tabaka modeli

İzdüşüm fonksiyonunun genel gösterimi (3.20) eşitliğinde verilmiştir. Bu fonksiyon, uydunun alıcı noktasındaki zenit açısına ( $z$ ) bağlıdır. İzdüşüm fonksiyonu ile  $STEC_a^u - VTEC_a^u$  değerleri arasında dönüşüm gerçekleştirilebilir.

$$M(z) = \frac{STEC_a^u(z)}{VTEC_a^u(0)} \quad (3.20)$$

(3.20) eşitliğinde  $VTEC_a^u$  değeri yalnız bırakılırsa;

$$VTEC_a^u(0) = \frac{STEC_a^u(z)}{M(z)} \quad (3.21)$$

olarak elde edilir.

IONEX dosyalarında kullanılan izdüşüm fonksiyonlarından biri dosyalarda 'COSZ' kısaltması ile gösterilen (3.22) eşitliğindeki fonksiyondur.

$$M(z) = \frac{1}{\cos z} \quad (3.22)$$

$VTEC$  ile  $STEC$  arasındaki dönüşümün tek tabaka modeline göre uygulanması için (3.23) eşitliği geliştirilmiştir. Bu eşitlik tek tabaka modeli izdüşüm fonksiyonu



olarak adlandırılır ve IONEX dosyalarında ‘SLM’ (Single Layer Model) kısaltması ile gösterilir.

$$M(z) = \frac{1}{\cos z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 z'}}, \quad z' = \sin^{-1} \left( \frac{R}{R + H} \sin(z) \right) \quad (3.23)$$

$R$  : Dünya'nın ortalama yarıçapı (6371.0 km)

$H$  : Tek tabaka iyonosfer katmanının (F2) yüksekliği

$z$  : Uydu ile alıcı arasındaki zenit açısı

$z'$  : Uydunun iyonosferin delinme noktasındaki (IPP) zenit açısı

Referans olarak alınan Chapman profiline daha uyumlu bir izdüşüm fonksiyonu oluşturmak adına (3.23) eşitliğine  $\alpha_{SLM}$  düzeltme parametresi eklenerek modifiye edilmiş tek tabaka modeli izdüşüm fonksiyonu (3.24) eşitliğinde gösterilmiştir. Bu fonksiyon IONEX dosyalarında ‘MSLM’ (Modified Single Layer Model) kısaltmasıyla gösterilir.

$$M(z) = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 z'}}, \quad z' = \sin^{-1} \left( \frac{R}{R + H} \sin(\alpha_{SLM} \cdot z) \right) \quad (3.24)$$

$\alpha_{SLM}$ : Tek tabaka modelinden gelen jeosentrik açı ( $\alpha_{SLM} = \Psi_{IPP} = z - z'$ )

Çalışmada doğruluk analizi için karşılaştırma yapılacak olan analiz merkezlerinin IONEX dosyalarındaki izdüşüm fonksiyonları, oluşturulan MATLAB yazılımına tanıtılarak VTEC hesabında o fonksiyon kullanılmıştır, IONEX dosyasında izdüşüm fonksiyonu kullanılmamışsa STEC değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca uydu yükseklik açısı  $10^\circ$  üzerindeki uydulara ait gözlem verileri hesaplara alınmıştır.

İzdüşüm fonksiyonu ve Bölüm 3.5.1'deki IPP noktalarının koordinatlarının hesabı için alıcı merkezli uydunun zenit açısının ve alıcıdan uyduya olan azimut değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla başlangıç noktası alıcı istasyonu olan lokal (yerel) bir koordinat sistemi kurularak uydunun zenit ve azimut açıları hesaplanmıştır.

### 3.5.1. Polinom yüzeyi oluşturma

Alicının zenit doğrultusunda iyonosferi deldiği noktadaki VTEC değerleri, alıcı ve uydu arasındaki sinyal yolu boyunca iyonosferin delinme noktalarına (IPP) ait koordinatlar ve VTEC değerleri kullanılarak oluşturulan 2. dereceden polinom yüzeyi ile bulunabilir. IPP noktalarının koordinatlarının  $(\varphi_{IPP}, \lambda_{IPP})$  hesabı (3.25) eşitliğinde verilmiştir (Sharma ve ark., 2019).

$$\begin{aligned}\varphi_{IPP} &= \sin^{-1}(\sin\varphi_a \cdot \cos\Psi_{IPP} + \cos\varphi_a \cdot \sin\Psi_{IPP} \cdot \cos(Az)) \\ \lambda_{IPP} &= \lambda^u + \sin^{-1}\left(\frac{\sin\Psi_{IPP} \cdot \sin(Az)}{\cos\varphi_{IPP}}\right)\end{aligned}\quad (3.25)$$

$\varphi_a$  : Alicının coğrafi enlemi

$\Psi_{IPP}$  : Tek tabaka modelindeki jeosentrik açı

$Az$  : Uydunun azimut açısı

$\lambda^u$  : Uydunun coğrafi boylamı

TEC değerleri çoğunlukla, Güneş aktiviteleri ve jeomanyetik alan değişimlerine bağlı olarak değişim gösterdiği için koordinatların, yer sabit koordinat sistemi yerine Güneş sabit koordinat sisteminde gösterilmesi tercih edilir (El-Gzawy, 2003). Yer sabit koordinat sistemi koordinatları ile Güneş sabit koordinat sistemi koordinatları arasındaki ilişki (3.26) eşitliğinde verilmiştir.

$$\varphi_{\text{Güneş sabit}} = \varphi_{\text{Yer sabit}} \quad (3.26)$$

$$\lambda_{\text{Güneş sabit}} = \lambda_{\text{Yer sabit}} - \lambda_0$$

(3.26) eşitliğindeki  $\lambda_0$  ortalama Güneş boylamını temsil etmektedir. Ortalama Güneş boylamının hesabı (3.27) eşitliğinde verilmiştir (Reda ve Andreas, 2008).  $(0^\circ \leq \lambda_0 \leq 360^\circ)$  olmak üzere;

$$\lambda_0 = 280.4664567 + 360007.6982779 \cdot JME + 0.03032028 \cdot JME^2 + \frac{JME^3}{49931} - \frac{JME^4}{15300} - \frac{JME^5}{2000000} \quad (3.27)$$

JME değeri Jülyen efemeris milenyumu olup ilgili eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Jülyen efemeris milenyumu (*JME: Julian Ephemeris Millennium*): Jülyen

efemeris yüzyılıının kaç milenyuma (1000 yıl) denk geldiğini belirtir.

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (3.28)$$

Jülyen efemeris yüzyılı (*JCE: Julian Ephemeris Century*): J2000 başlangıç gününden itibaren geçen Jülyen efemeris gününün kaç yüzyıla (100 yıl) denk geldiğini belirtir. J2000, 1 Ocak 2000 12:00:00 tarih ve saati için kullanılan bir terim olup, bu tarihte ekliptik düzlemi ile ekvator düzlemi çakışık kabul edilerek ECI (Earth Centered Inertial) ve ECEF (Earth Centered Earth Fixed) koordinat sistemleri arasında dönüşüm sağlanmaktadır.

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (3.29)$$

Jülyen efemeris günü (*JDE: Julian Ephemeris Day*): Yersel dinamik zaman ölçeğindeki zamanın Jülyen gününe karşılık gelir.

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (3.30)$$

$$\Delta T = TT - UT \quad (3.31)$$

*TT (Terrestrial Time)*: Yersel zaman ya da yersel dinamik zaman olarak adlandırılır. Uluslararası Astronomi Birliği (IAU: International Astronomical Union) tarafından tanımlanan ve Dünya'dan yapılan astronomik gözlemlerin zaman ölçümleri için kullanılan bir standarttır.

*UT (Universal Time)*: Evrensel zaman Dünya'nın dönüşünü baz alan, gece yarısının 0 sayıldığı ortalama Güneş günüdür. Bazen UT1 olarak da anılır.

Jülyen günü (*JD: Julian Day*): Milattan önce 1 Ocak 4712, 12:00:00 UT'den itibaren geçen Güneş günü sayısıdır.

$$JD = \text{int}(365.25 \cdot y) + \text{int}(30.6001 \cdot (m + 1)) + D + \frac{UT}{24} + 1720981.5 \quad (3.32)$$

$M > 2$  için  $y = Y$  ve  $m = M$

$M \leq 2$  için  $y = Y - 1$  ve  $m = M + 12$

$Y$  : Yıl  $M$  : Ay  $D$  : Gün

Tüm bu bilgiler ışığında, polinom yüzey denklemi (3.33) eşitliği ile tanımlanır.

$$VTEC(\varphi_{IPP}, \lambda_{IPP}) = a_0 + a_1\varphi_{IPP} + a_2\lambda_{IPP} + a_3\varphi_{IPP}^2 + a_4\varphi_{IPP}\lambda_{IPP} + a_5\lambda_{IPP}^2 \quad (3.33)$$

Denklemdaki polinomal yüzey katsayıları ( $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ ), uydu alıcı sinyalinin iyonosferi deldiği noktaların Güneş sabit koordinat sistemindeki konumları ( $\varphi_{IPP}, \lambda_{IPP}$ ) ve VTEC değerleri ile En Küçük Kareler (EKK) ile dengeleme yöntemine göre hesaplanabilir.  $\underline{A}$  katsayılar matrisi,  $\underline{l}$  ölçü vektörü,  $\underline{x}$  bilinmeyenler vektörü ve işlem adımları (3.34) eşitliğinde verilmiştir.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & \varphi_1 & \lambda_1 & \varphi_1^2 & \varphi_1\lambda_1 & \lambda_1^2 \\ 1 & \varphi_2 & \lambda_2 & \varphi_2^2 & \varphi_2\lambda_2 & \lambda_2^2 \\ 1 & \varphi_3 & \lambda_3 & \varphi_3^2 & \varphi_3\lambda_3 & \lambda_3^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \varphi_n & \lambda_n & \varphi_n^2 & \varphi_n\lambda_n & \lambda_n^2 \end{bmatrix} \quad \underline{l} = \begin{bmatrix} VTEC_1 \\ VTEC_2 \\ VTEC_3 \\ \vdots \\ VTEC_n \end{bmatrix} \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\underline{N} = \underline{A}^T \underline{A}, \quad \underline{n} = \underline{A}^T \underline{l}, \quad \underline{x} = \underline{N}^{-1} \underline{n}, \quad \underline{V} = \underline{A} \underline{x} - \underline{l}, \quad m_0 = \sqrt{\frac{\underline{V}^T \underline{V}}{n - u}}$$

Polinomal yüzey katsayıları her epok için hesaplanmıştır.  $\underline{A}$  ve  $\underline{l}$  matrislerindeki 1,2,...n'ye kadar giden alt indisler sırası ile ilgili epoktaki uydu sırasını göstermektedir. Epoktaki uydu sayısına göre  $\underline{A}$  ve  $\underline{l}$  matrislerinin satır sayıları değişmektedir. Polinomal yüzey katsayıları belirlendikten sonra alıcı istasyonun Güneş sabit koordinat sistemindeki koordinatları, polinom yüzeyi denklemine yerleştirilerek alıcının zenit doğrultusundaki VTEC değeri hesaplanır. Gözlem dosyasındaki eksik epoklara ait TEC değerleri ilgili IONEX dosyasından alınmıştır.

### 3.5.2. İyonosfer dosyası ile TEC değerlerinin güvenilirlik analizi

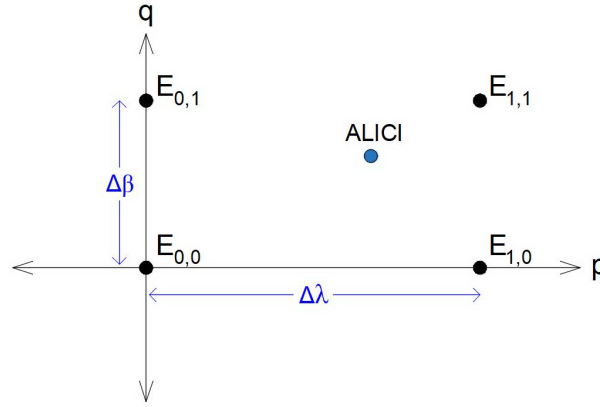
Hesaplanan alıcının zenit doğrultusundaki TEC değerlerinin güvenilirliğinin kontrolü için, ilgili günün global iyonosfer haritası (GIM: Global Ionosphere Map) olarak adlandırılan iyonosfer dosyasındaki alıcı konumdaki TEC değerleri ile

karşılaştırma işlemi yapılabilir. Bu çalışmada IGS ve CODE olmak üzere iki farklı analiz merkezine ait iyonosfer dosyaları değerlendirilmiştir. Her iki analiz merkezinin dosya formatı neredeyse aynıdır. IONEX dosyalarında, enlem değeri  $+87.5^\circ$ 'den  $-87.5^\circ$ 'ye  $2.5^\circ$  aralıklarla, boylam değeri  $-180^\circ$ 'den  $+180^\circ$ 'ye  $5^\circ$  aralık olacak şekilde tüm dünyayı kapsayan küresel bir grid sistemi oluşturulmuş ve grid noktalarındaki TEC değerleri ve karesel ortalama hataları verilmiştir. Uydu yükseklik açısı alt sınırı, kullanılmış ise indirgeme fonksiyonu, nanosaniye biriminde uydu ve alıcılara ait DCB değerleri ve sapmaları, üstel değer (exponent) gibi bilgiler açıklama (header) kısmında yer almaktadır. Dosyaların devamında TEC değerleri, sonrasında ise TEC değerlerine ait karesel ortalama hata değerleri vardır. TEC değerleri ve hataları,  $10^{\text{üstel değer}}$  değerine bölünerek verilmiştir. Yani  $10^{\text{üstel değer}}$  ile çarpıldığında TECU biriminde TEC değeri elde edilebilir. Eğer dosyada indirgeme fonksiyonu kullanılmışsa değerler VTEC, kullanılmamışsa STEC değerleridir.

IGS analiz merkezine ait iyonosfer dosyası CODE analiz merkezi dahil olmak üzere ESA, JPL (Jet Propulsion Laboratory), UPC (Polytechnic University of Catalonia) gibi farklı analiz merkezlerinden de veri olarak kombine bir model verisi oluşturup yayınlamaktadır. Açıklama kısmında hangi analiz merkezlerinin verilerinden yararlandığı bilgisi bulunmaktadır. Günlük yayınlanan bu dosyaların zamansal çözünürlüğü 2 saattir.

CODE merkezine ait dosyalardaki TEC değerleri, IGS ve diğer kuruluşlara ait GNSS istasyonlarından yapılan gözlemler kullanılarak ve küresel harmonik fonksiyonlar çalıştırılarak üretilir. Bu analiz merkezine ait dosyaların zamansal çözünürlüğü ise 2014 yılına kadar 2 saat, sonrasındaki yıllar için 1 saattir.

Alıcının koordinatları ile iyonosfer dosyalarındaki grid noktalarının koordinatları farklı olabilmektedir. Bu yüzden GPS verileri ile hesaplanan alıcı zenit doğrultusundaki TEC değerinin, konum bilgisine bağlı olarak iyonosfer dosyalarındaki karşılığının bulunabilmesi adına iyonosfer format tanımı dosyasında grid enterpolasyonu yöntemi önerilmiştir (Schaer ve ark., 2015).



**Şekil 3.20.** Grid enterpolasyonu (Schaer ve ark. (2015)'ten uyarlanmıştır.)

$0 \leq p < 1$   $\Delta\lambda$ : Griddeki boylam genişliği,

$0 \leq q < 1$   $\Delta\beta$ : Griddeki enlem genişliği,

$$p = \frac{\lambda_a - \lambda_0}{\Delta\lambda} \quad \text{ve} \quad q = \frac{\beta_a - \beta_0}{\Delta\beta} \quad (3.35)$$

Alıcı noktasının enlemi  $\beta_a$ , boylamı  $\lambda_a$  ve  $E_{0,0}$  grid noktasının enlemi  $\beta_0$ , boylamı  $\lambda_0$  olmak üzere grid enterpolasyonu denklemi (3.36) eşitliğinde verilmiştir.  $E_{i,j}$  olarak gösterilen değerler grid noktalarındaki ilgili TEC değerleridir.

$$E(\lambda_0 + p.\Delta\lambda, \beta_0 + q.\Delta\beta) = (1-p)(1-q).E_{0,0} + p.(1-q).E_{1,0} + q.(1-p).E_{0,1} + p.q.E_{1,1} \quad (3.36)$$

GPS verilerinden hesaplanan istasyonun zenit doğrultusundaki TEC değerleri ile her iki analiz merkezinin iyonosfer dosyalarında alıcı konumuna karşılık gelen TEC değerleri günlük grafikler çizdirilerek karşılaştırılır ve değerlendirilir. IGS ve CODE analiz merkezlerine ait iyonosfer dosyalarında farklı indirgeme fonksiyonlarının kullanımı, alıcı ve uydu DCB değerlerinde farklılıklar olması TEC değerlerinde de farklılıklara neden olmaktadır.

### 3.6. TEC Değişimlerinin Deprem Öncülü Olarak Analiz Edilmesi

Kullanılabilirliği kabul edilen TEC değerleri ile deprem öncesi ve sonrasına ait zaman serileri oluşturulup anomalilerin tespit edilmesi için çeyrekler arası fark bazlı hareketli ortanca yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle göre deprem öncesi anomalilerin oluşmadığı düşünülen bir zaman dilimi baz alınarak, kayan pencere

yöntemi ile sonraki günlere ait TEC değerleri için alt sınır (LB: Lower Bound), üst sınır (UB: Upper Bound) ve medyan (M) değerleri, (3.37) eşitliği ile hesaplanır ve trend grafikleri oluşturulur. Trend grafikleri ve hesaplanan TEC değerlerinin değişimleri karşılaştırılarak alt sınır değerlerinden az olan TEC değerleri ve üst sınır değerlerinden çok olan TEC değerleri anomali olarak kabul edilir. Uygulamada hesaplanan VTEC değerlerinin, normal dağılım eğrisi davranışında ve  $1.34 \sigma$  güven aralığında olduğu kabul edilir.

$$LB = M - 1.5(M - LQ) \quad UB = M + 1.5(UQ - M) \quad (3.37)$$

$LB$  : Alt Sınır

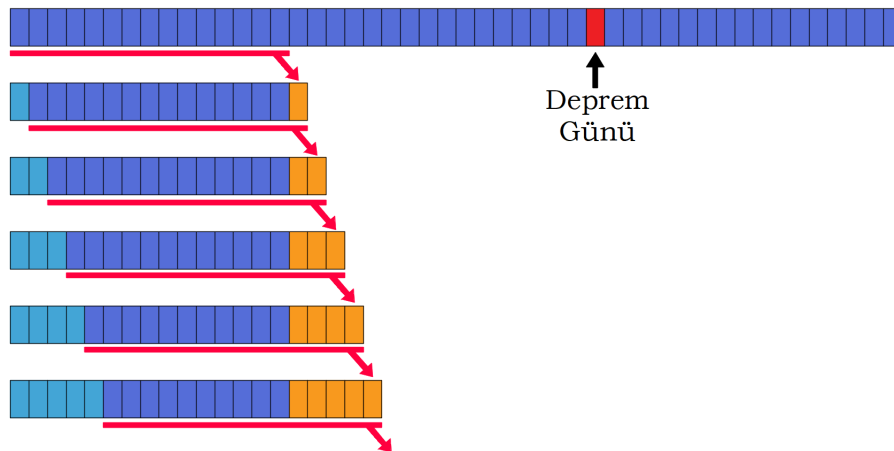
$UB$  : Üst Sınır

$M$  : Medyan değeri

$LQ$  : Alt çeyrek değeri (Lower Quartile)

$UQ$  : Üst çeyrek değeri (Upper Quartile)

Bu çalışmada kayan pencere zaman dilimi, deprem tarihinin 31 gün öncesinden başlamak üzere deprem tarihine doğru 15 günlük aralık olarak alınmıştır. İlk 15 günün verileri kullanılarak 16. günün sınır değerleri ve medyan TEC değerleri hesaplanmıştır. Ardından 2. ve 16. günler arasındaki veriler kullanılarak 17. günün değerleri hesap edilmiştir. Bu süreç depremden sonraki günler için de aynı şekilde devam ettirilmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. 15 günlük zaman dilimli kayan pencere yöntemi

Analizlerin tamamlanması adına anomalilerin oluştuğu günler için uzay iklim koşullarını gösteren indisler incelenmelidir. Bu amaçla, oluşan anomaliler ile uzay iklim koşulları arasında korelasyon hesabı yapılmıştır. -1 ile +1 arasında yer alan Pearson korelasyon katsayısı ( $R$ ), iki rastgele değişken olan A ile B arasındaki ilişkiyi temsil eder. Katsayı pozitif ise değişkenler arasında doğru orantı olduğu, negatif ise ters orantı olduğu anlaşılır. Korelasyon katsayısının +1 ya da -1'e yaklaşması bu değişkenlerin birbirlerini güçlü bir şekilde etkileyebileceklerini temsil eder. Eğer katsayı 0 ise değişkenler arasında herhangi bir ilişkinin olmadığı anlaşılır.

$$R(A, B) = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \sigma_B} \quad (3.38)$$

$R(A, B)$  : Korelasyon katsayısı

$cov(A, B)$  : A ve B'nin kovaryansları

$\sigma_A, \sigma_B$  : A ve B'nin standart sapmaları



## 4. UYGULAMA

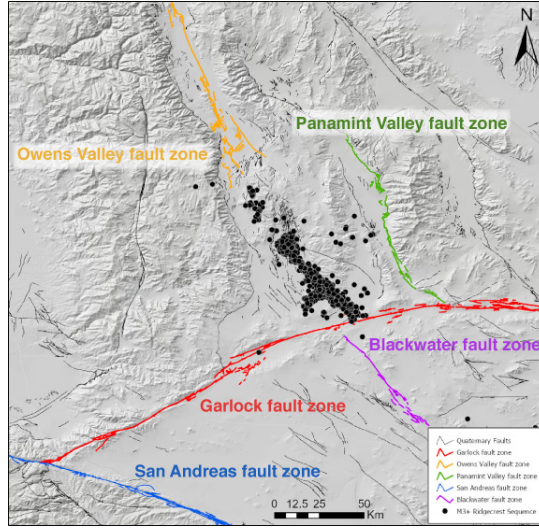
Tez çalışması kapsamında incelenen depremler hakkında bilgi ve uygulamalar bu bölümde verilmiştir. Uygulamada, deprem tarihlerinden önceki 31. günden başlanarak deprem sonrası 16. güne kadar istasyon gözlem dosyaları, hassas efemeris dosyaları, iyonosfer dosyaları ve uzay iklim koşullarına ait indis verileri kullanılmıştır. İnceleme amacı ile Dobrovolsky deprem etki alanı dışında kalan istasyonlardan da örnek istasyonlar seçilmiş, hesaplamalara katılmış ve yorumlanmıştır.

### 4.1. Kuzey Kaliforniya Deprem Dizisi (2019)

Amerika Birleşik Devletleri, Kaliforniya-Ridgecrest'de bölgesinde 04.07.2019 tarihli 17:33:49 UTC'de ve 06.07.2019 tarihli 03:19:53 UTC'de, moment büyüklükleri sırası ile 6.4 Mw ve 7.1 Mw olan iki deprem meydana gelmiştir (Çizelge 4.1). Pasifik Plakasının, Kuzey Amerika Plakasına göre kuzey batıya doğru kayması San Andreas Fay Bölgesi ve yakın komşu bölgelerinde aktif tektonik hareketliliklerin oluşmasına neden olmakta ve çok sayıda fay zonu bölgesi oluşturmaktadır (Şekil 4.1). 7.1 büyüklüğündeki depremin olması, 6.4 büyüklüğündeki depremin öncü şok olduğunu göstermektedir. Orta enlem bölgesinde meydana gelen bu depremler birbirlerine çok yakın merkezli oluşmuş olup her iki deprem fayı da doğrultu atımlı mekanizmalara sahiptir (Wald ve Collett, 2021). Doğu Kaliforniya Makaslama Bölgesi olarak bilinen bu bölgenin kuzeyinde ve güneyinde KKB-GGD doğrultulu Owens Fayı ve Blackwater Fayı bulunmaktadır. Owens Fayına paralel uzanan ve doğusunda yer alan Panamint fayı bulunmaktadır. Ayrıca bölgede, KKD-GGB doğrultusunda Owens Fayını kesen Garlock Fayı bulunmaktadır. 6.4 büyüklüğündeki deprem şoku, Owens Fayı ile Garlock Fayı kesişiminde meydana gelmiştir. 7.1 büyüklüğündeki deprem ise Owens fayı üzerinde oluşmuştur.

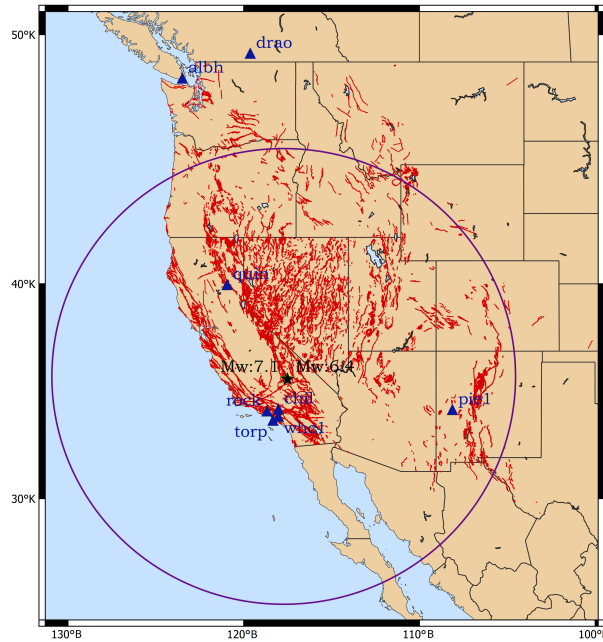
**Çizelge 4.1.** 2019 Kuzey Kaliforniya deprem dizisi

Depremin Tarihi	Depremin Büyüklüğü (Mw)	Depremin Konumu	Depremin Derinliği (km)
04.07.2019	6.4	35.705°K ve 117.504°B	10.5
06.07.2019	7.1	35.770°K ve 117.599°B	8.0



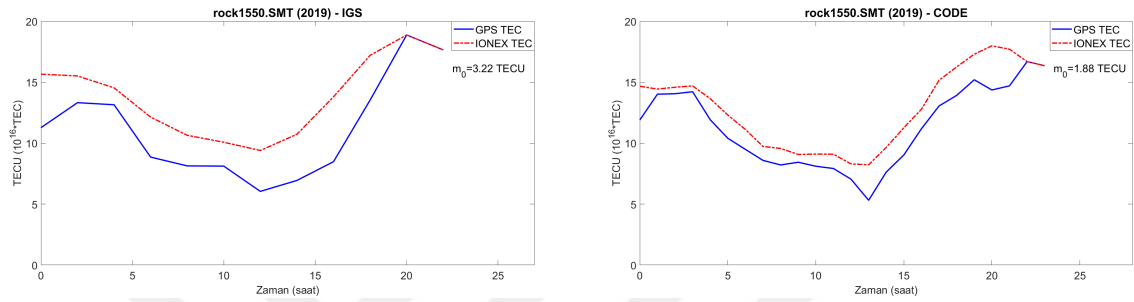
Şekil 4.1. Doğu Kaliforniya makaslama bölgesi (URL-8)

04.07.2019 tarihli 6.4 büyüklüğündeki depremin öncül etkilerinin incelenebilmesi adına bu depremin tarihi baz alınarak indirilen ilk gözlem verisi 03.06.2019 tarihine ait olacak şekilde istasyon verileri indirilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. Dobrovolsky formülüne göre depremin etki alanı 564.937 km'dir. Ancak 2 gün sonra oluşan depremin büyüklüğü daha fazla olduğundan etki alanı hesabı için 06.07.2019 tarihli deprem seçilmiştir ve etki alanı 1129.796 km olarak ele alınmıştır. Kullanılan IGS istasyonları, bölgedeki fay hatları ve Dobrovolsky etki alanı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

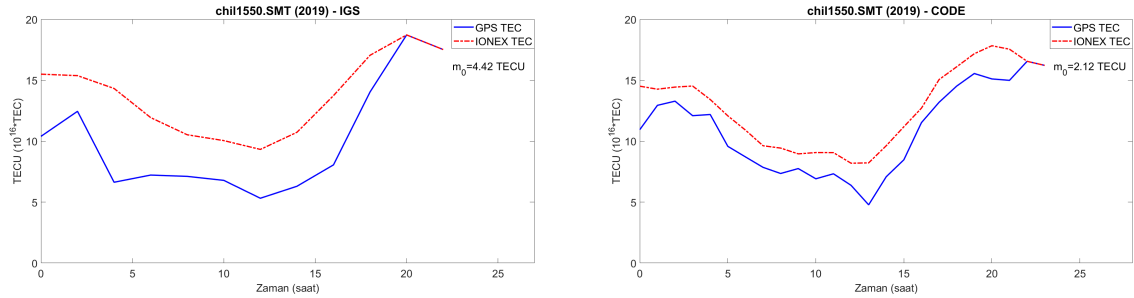


Şekil 4.2. Kaliforniya deprem dizisi için kullanılan IGS istasyonları

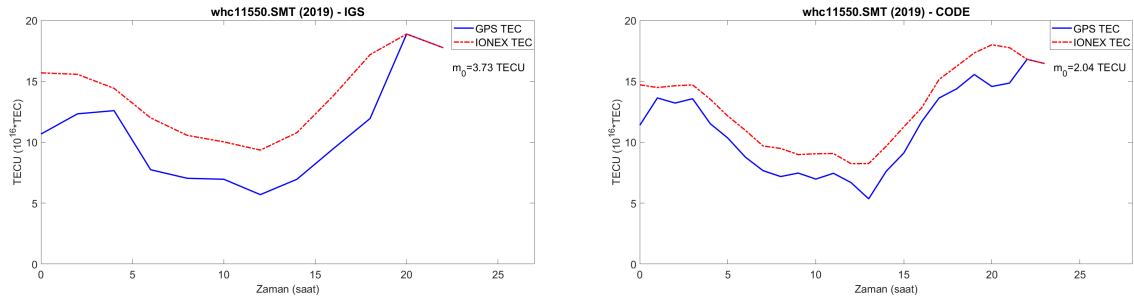
Öncelikle yumuşatılmış kod gözlemleri kullanılarak hesaplanan TEC değerleri IGS ve CODE analiz merkezlerine ait IONEX dosyalarındaki değerler ile karşılaştırılmıştır. Örnek olarak seçilen 155. GPS gününe ait her bir istasyon için oluşturulan grafikler Şekil 4.3 - 4.10 aralığında, standart sapma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. IGS iyonosfer dosyasındaki verilere izdüşüm fonksiyonu uygulandığından VTEC, CODE iyonosfer dosyasında ise uygulanmadığından STEC değerleri bulunmaktadır. Karşılaştırmalar bu doğrultuda yapılmıştır.



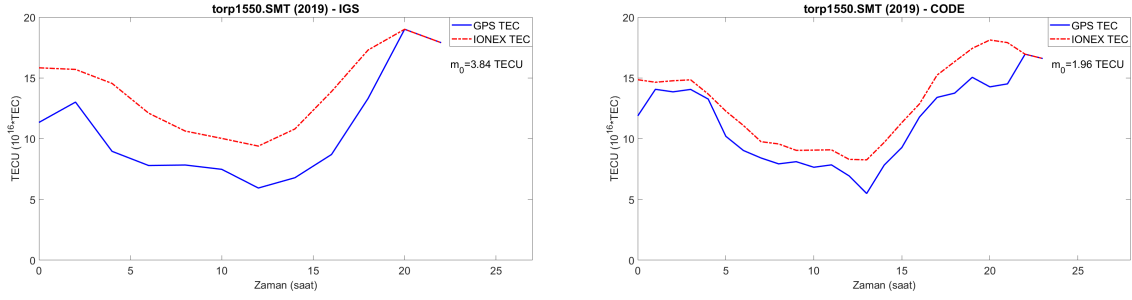
**Şekil 4.3.** rock istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



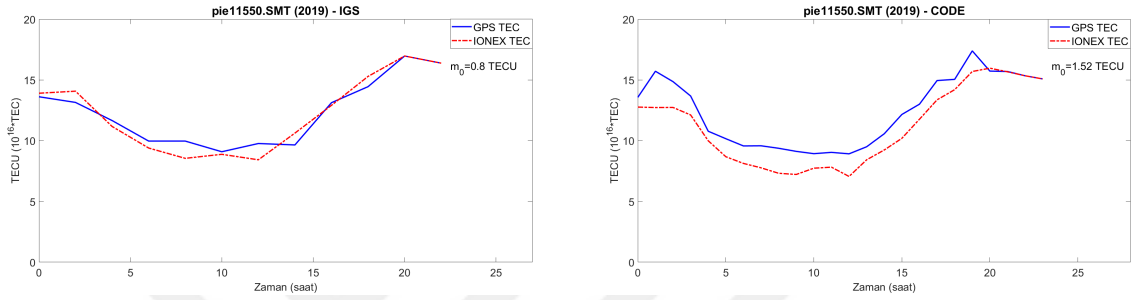
**Şekil 4.4.** chil istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



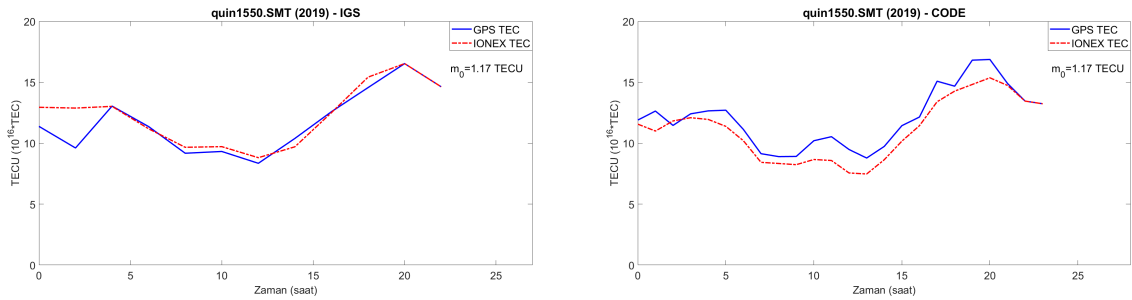
**Şekil 4.5.** whc1 istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



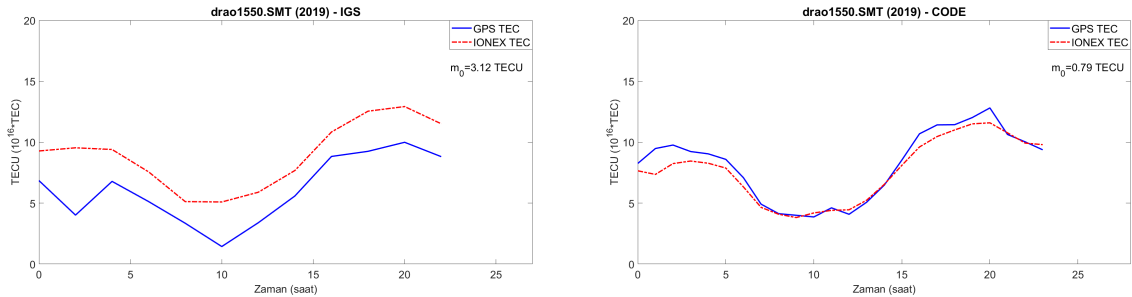
**Şekil 4.6.** torp istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



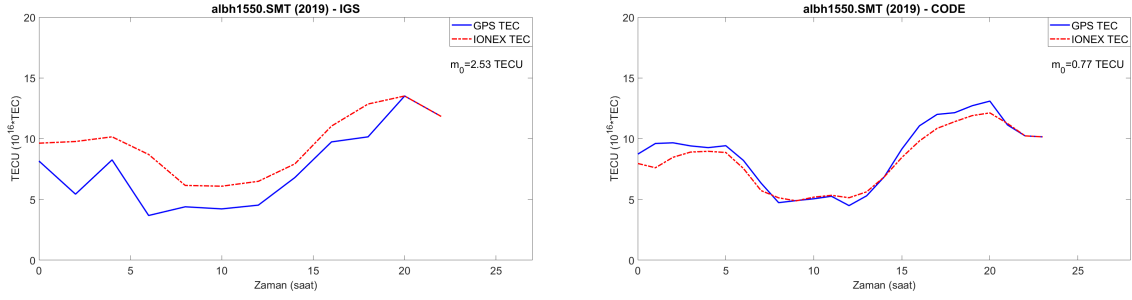
**Şekil 4.7.** pie1 istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.8.** quin istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması

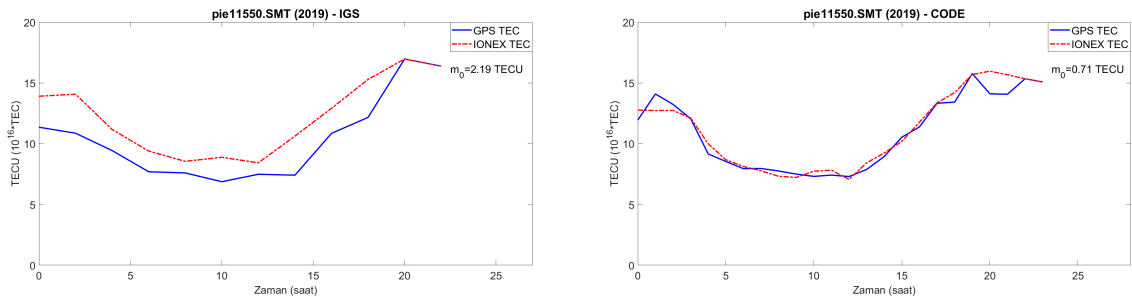


**Şekil 4.9.** drao istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.10.** albh istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması

Grafikler incelendiğinde chil, rock, whc1 ve torp istasyonlarına ait GPS TEC değerleri ile, IGS IONEX TEC değerleri arasında sistematik bir şekilde sabit kayma miktarlarının bulunduğu görülmektedir. Bunun nedeni bu istasyonlara ait DCB değerlerinin IGS IONEX dosyalarında bulunmamasıdır. Eksik DCB değerleri M\_DCB yazılımı yardımıyla oluşturulmuştur. Bu yazılımdan elde edilen DCB değerleri ile IONEX dosyalarındaki DCB değerlerinin karşılaştırılabilmesi amacı ile DCB değeri her iki IONEX dosyasında da var olan piel istasyonunun, yine 155. GPS gününe ait DCB değeri M\_DCB yazılımı ile de hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak elde edilen TEC değerleri, IONEX dosyalarındaki TEC değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafikler Şekil 4.11’de verilmiştir. IGS analiz merkezine ait DCB değerinin kullanılması ile hesaplanan GPS TEC değerlerinin IONEX TEC değerleri ile arasındaki  $m_0=0.8$  TECU iken, M\_DCB yazılımından elde edilen DCB değerinin kullanılması ile IONEX TEC değerlerinden uzaklaşmış ve  $m_0$  değeri 2.19 TECU’ya yükselmiştir. CODE analiz merkezi ile karşılaştırma sonucunda ise  $m_0$  değeri 1.52 TECU’dan 0.71 TECU’ya ulaşarak doğruluğunu arttırmıştır.



**Şekil 4.11.** piel istasyonu DCB değeri değiştirilerek hesaplanan TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması

**Çizelge 4.2.** Günlük GPS TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait karşılaştırmaların standart sapma ( $m_0$ ) değerleri (birim: TECU)

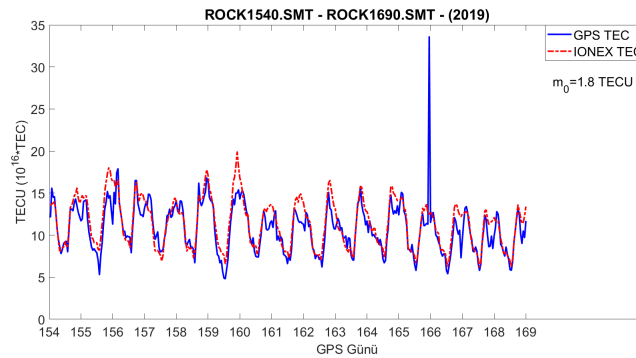
İstasyon	IGS	CODE
rock	3.22	1.88
chil	4.42	2.12
whc1	3.73	2.04
torp	3.84	1.96
pie1	0.80	1.52
quin	1.17	1.17
drao	3.12	0.79
albh	2.53	0.77

Günlük IONEX TEC ve GPS TEC karşılaştırma grafikleri ve standart sapmaları incelendiğinde hesaplanan TEC değerlerinin, IONEX TEC grafiklerinin trendlerini yakaladığı ve kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Yalnızca pie1 istasyonu için IGS analiz merkezine ait karşılaştırmaların standart sapma değerinin CODE analiz merkezine ait karşılaştırmaların standart sapma değerinden daha küçük olduğu; quin istasyonunun da ise IGS ve CODE analiz merkezlerine ait karşılaştırmaların standart sapma değerlerinin aynı olduğu görülmüştür. CODE analiz merkezine ait IONEX dosyası verileri ile hesaplanan günlük TEC değerleri arasındaki  $m_0$  değerleri çoğunlukla daha küçük olduğundan işlemlere CODE analiz merkezine ait veriler baz alınarak devam edilmiştir. İşlenen 48 günlük verilerden en düşük, en yüksek ve medyan standart sapma değerleri tüm istasyonlar için bulunmuş ve Çizelge 4.3'te verilmiştir.

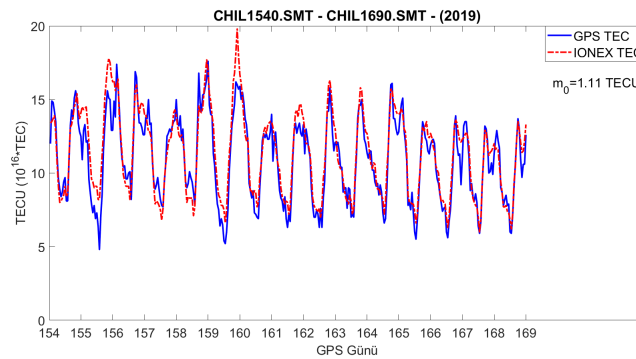
**Çizelge 4.3.** Standart sapmaların maksimum, minimum ve medyan değerleri (birim: TECU)

İstasyon	Maksimum $m_0$ Değeri	Minimum $m_0$ Değeri	Medyan $m_0$ Değeri
rock	4.50	0.80	1.25
chil	2.79	0.58	0.92
whc1	2.90	0.63	0.94
torp	2.42	0.78	1.32
pie1	1.87	0.85	1.27
quin	5.63	0.98	1.22
drao	11.21	0.52	0.78
albh	5.05	0.53	0.77

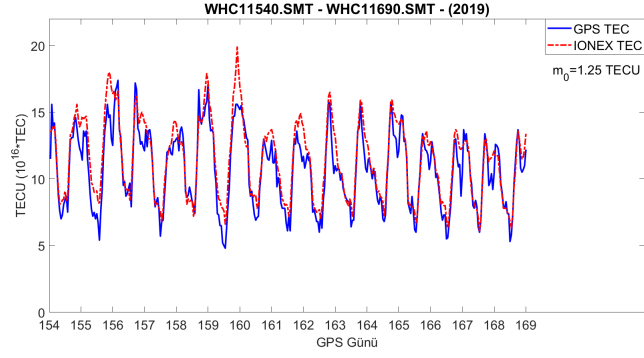
Anomalilerin tespiti için çeyrekler arası fark bazlı hareketli ortanca yöntemi uygulanmıştır. Yöntemde, baz alınan ilk 15 günlük veriye bağlı olarak sınır değerler belirleneceği için bu ilk 15 güne ait  $m_0$  değerleri hesaplanmış ve grafikleri oluşturulmuştur.



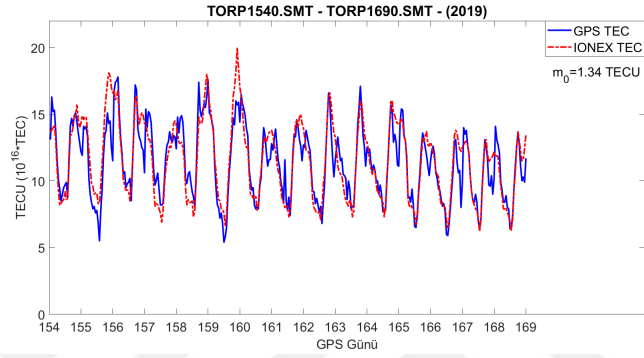
**Şekil 4.12.** rock istasyonu 15 günlük grafik



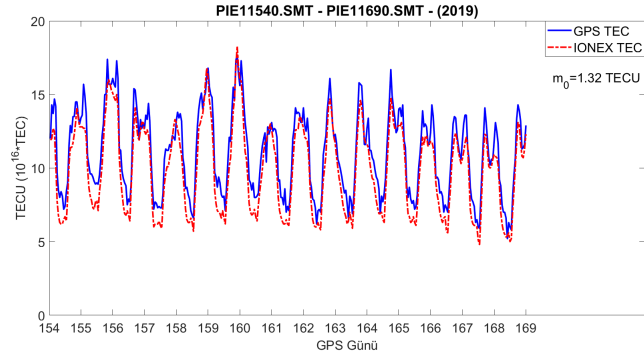
**Şekil 4.13.** chil istasyonu 15 günlük grafik



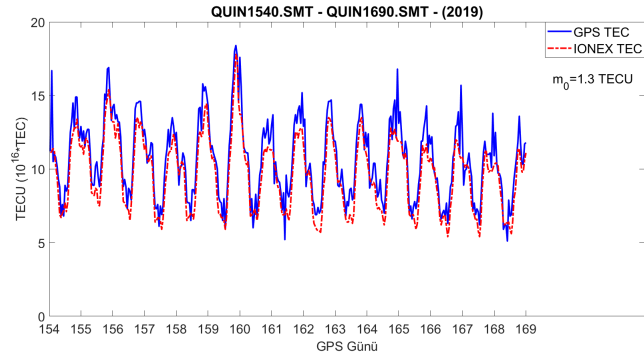
Şekil 4.14. whc1 istasyonu 15 günlük grafik



Şekil 4.15. torp istasyonu 15 günlük grafik

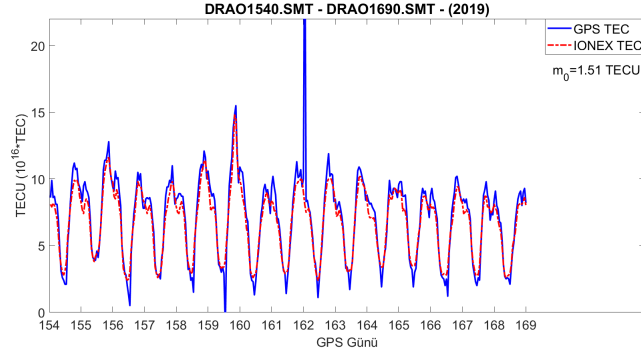


Şekil 4.16. pie1 istasyonu 15 günlük grafik

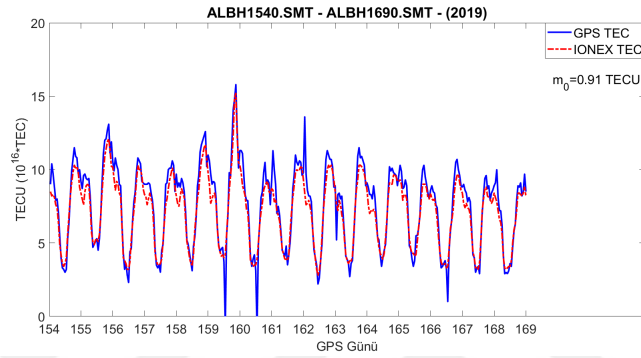


Şekil 4.17. quin istasyonu 15 günlük grafik



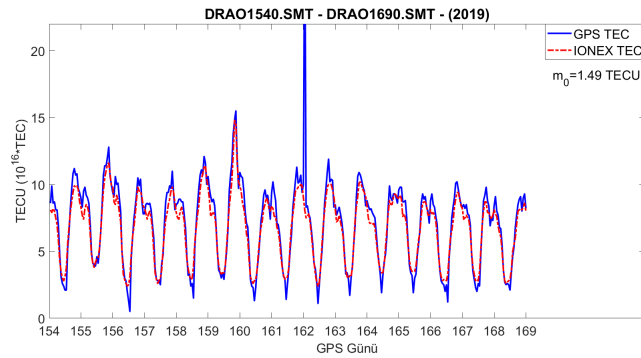


Şekil 4.18. drao istasyonu 15 günlük grafik

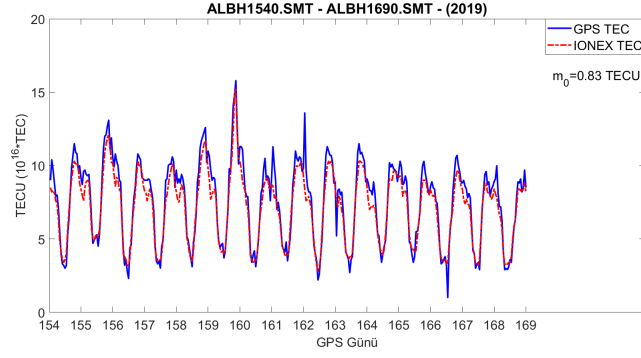


Şekil 4.19. albh istasyonu 15 günlük grafik

drao istasyonunda 159. GPS gününde ve albh istasyonunda 159. ve 160. GPS günlerinde hesaplanan TEC değerleri 0'ın altında çıkmaktadır. Ancak TEC değerleri negatif değer alamayacağından dolayı bu değerler yerine, IONEX dosyasındaki ilgili epoktaki değerler alınmıştır. Oluşturulan yeni grafikler Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.

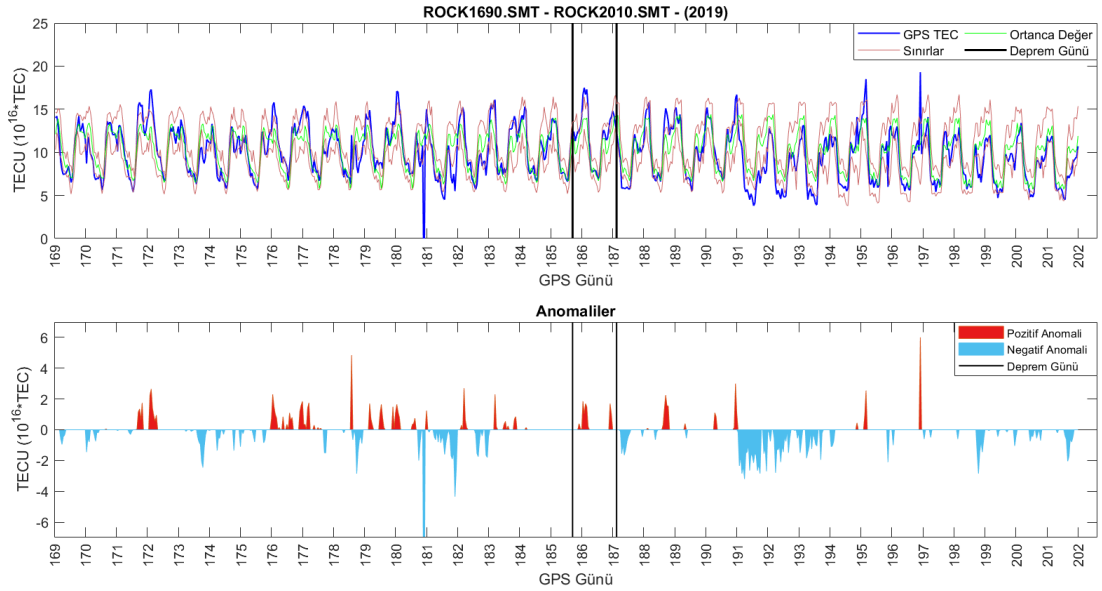


Şekil 4.20. drao istasyonu 15 günlük grafik

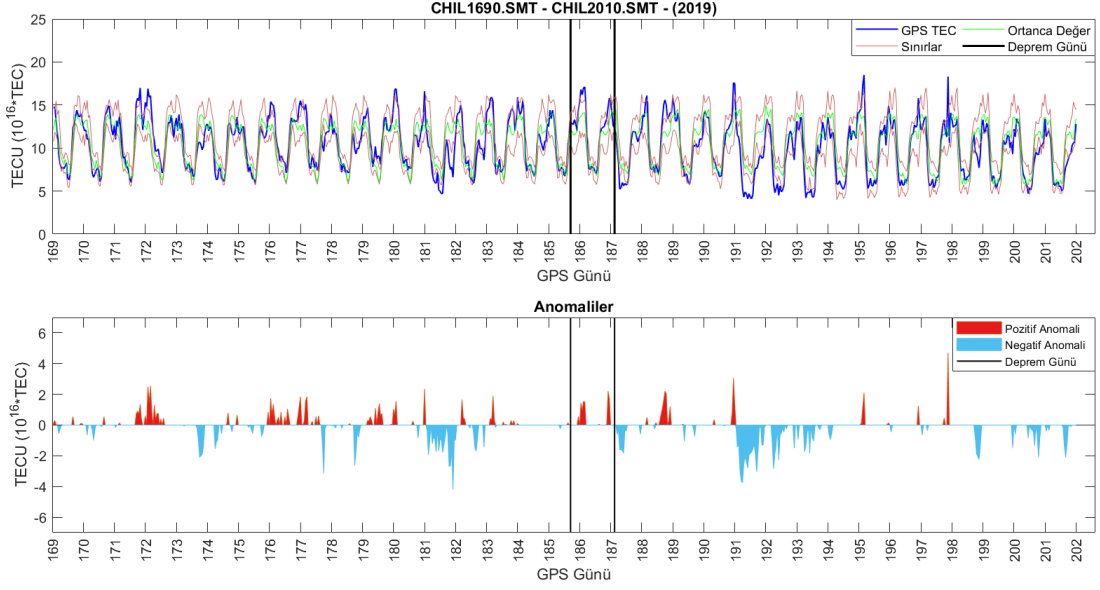


Şekil 4.21. albh istasyonu 15 günlük grafik

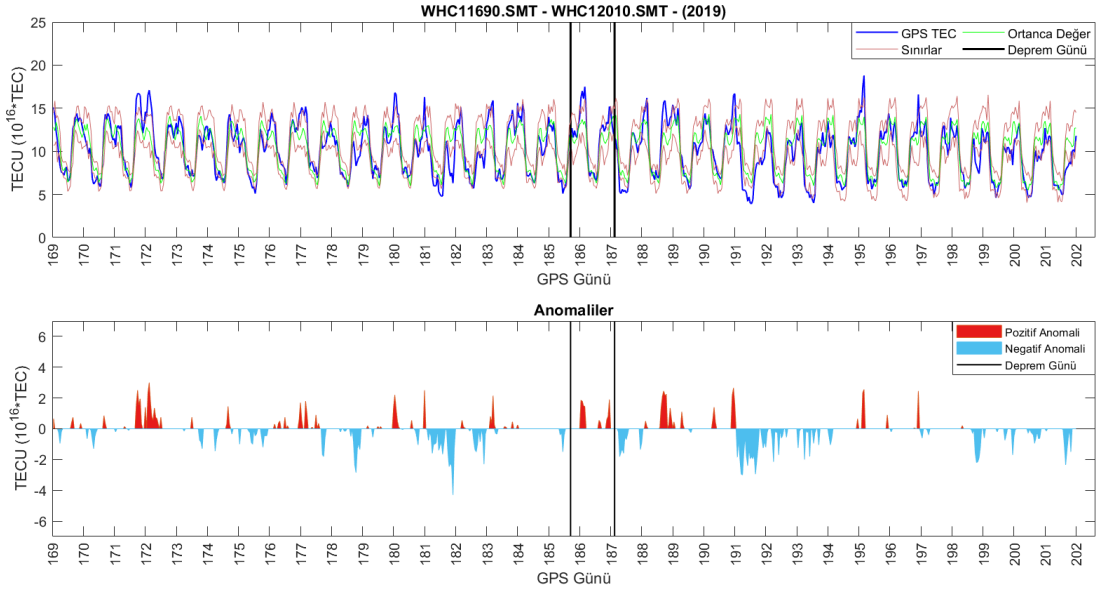
Kullanılan istasyonlara ait depremden önceki ve sonraki 16 günü içeren sınır değerleri ve anomali grafikleri Şekil 4.22 - 4.29 aralığında verilmiştir. GPS ölçmelerinden elde edilen STEC değerleri, CODE IONEX dosyalarında önerilen modifiye edilmiş tek tabaka modeli (MSLM) izdüşüm fonksiyonu uygulanarak VTEC değerlerine dönüştürülmüştür. Üst sınır değerlerini aşan GPS VTEC değerleri pozitif anomali, alt sınır değerlerini aşan değerler ise negatif anomali olarak gösterilmiştir.



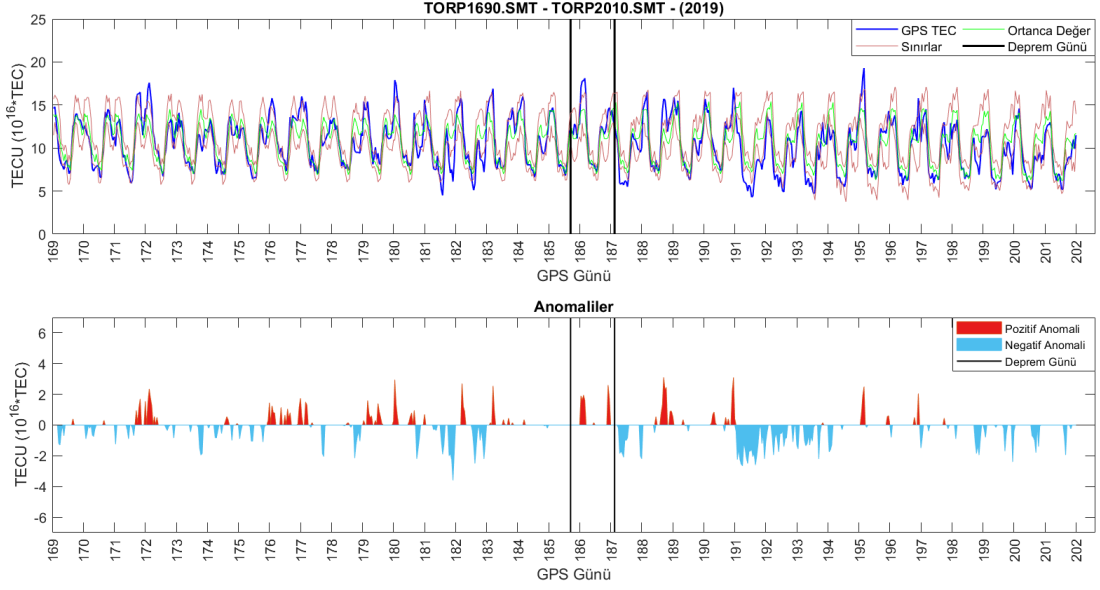
Şekil 4.22. rock istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



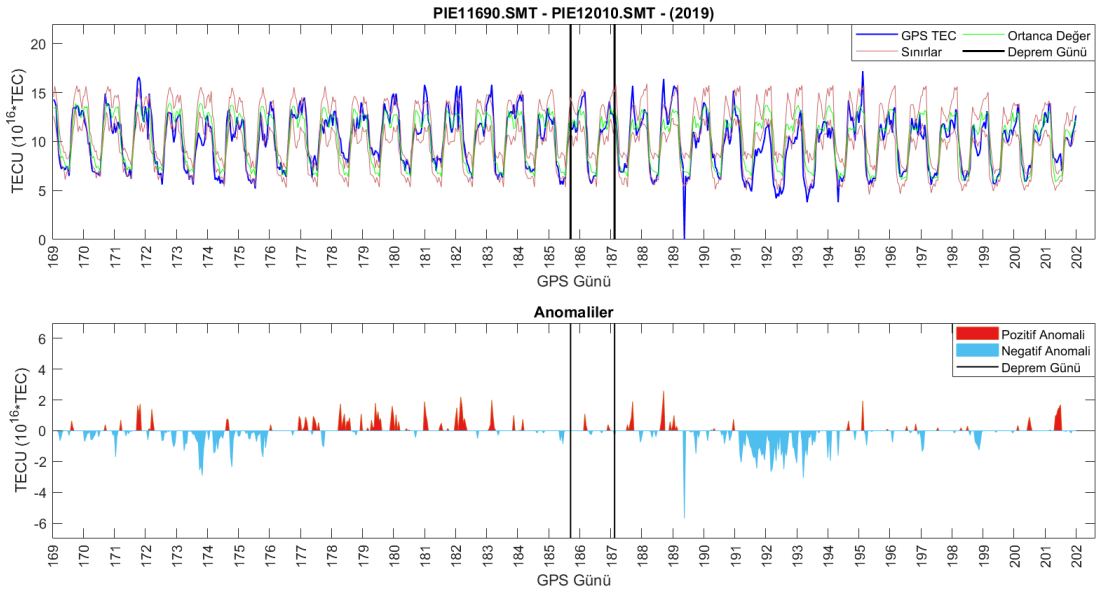
Şekil 4.23. chil istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



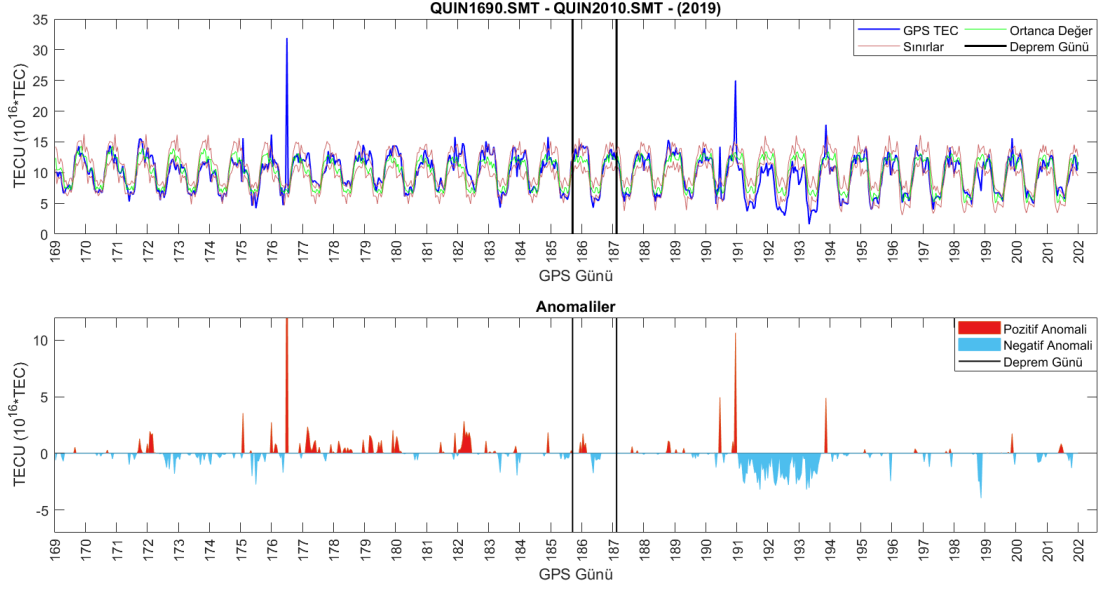
Şekil 4.24. whc1 istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



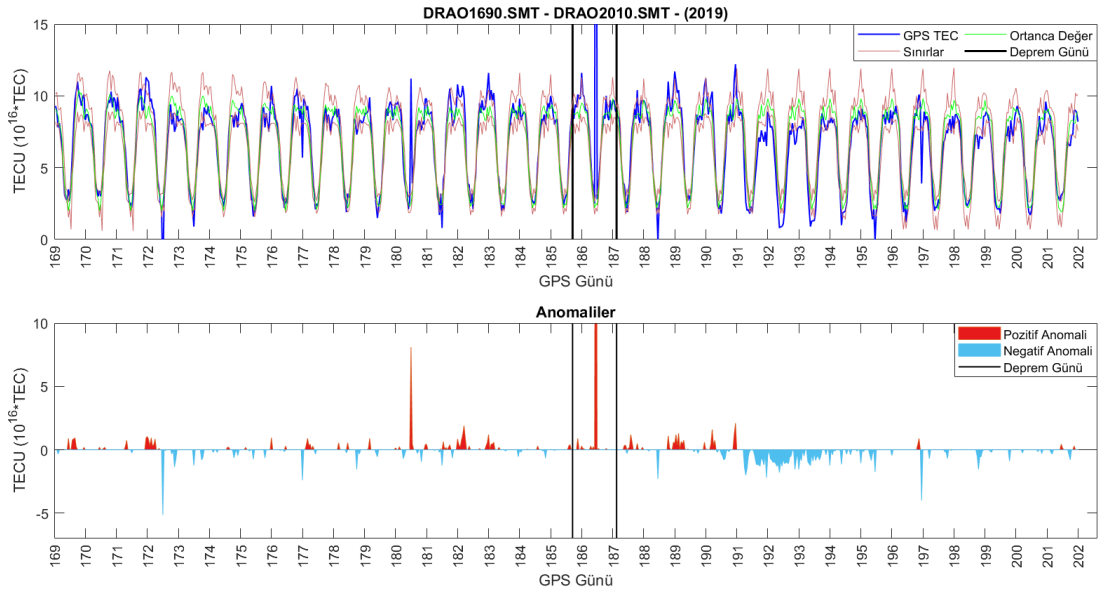
Şekil 4.25. torp istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



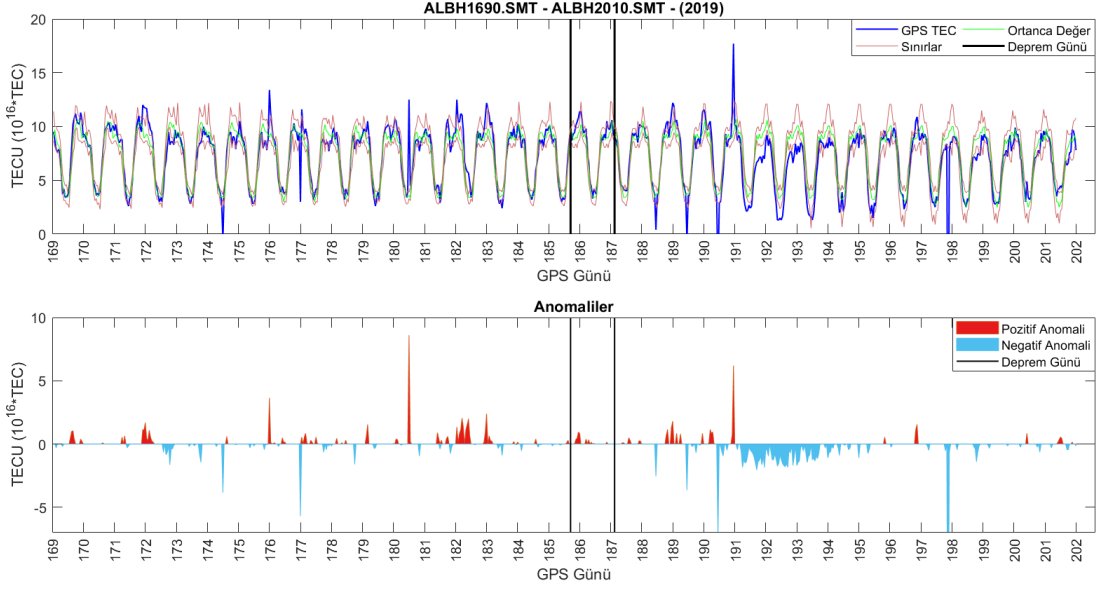
Şekil 4.26. pie1 istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



Şekil 4.27. quin istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



Şekil 4.28. drao istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği

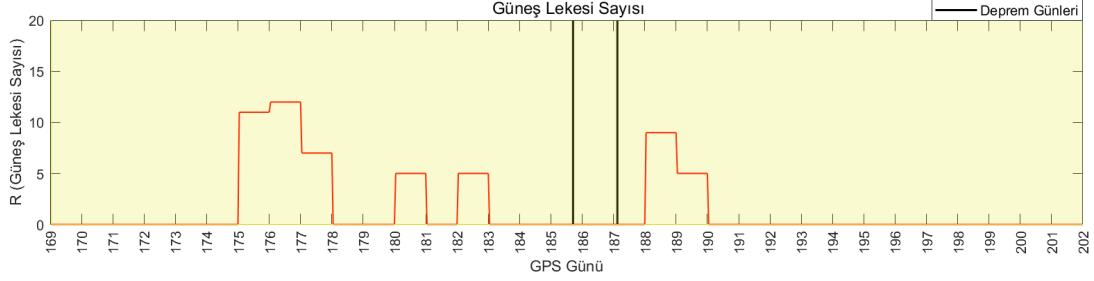


**Şekil 4.29.** albh istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği

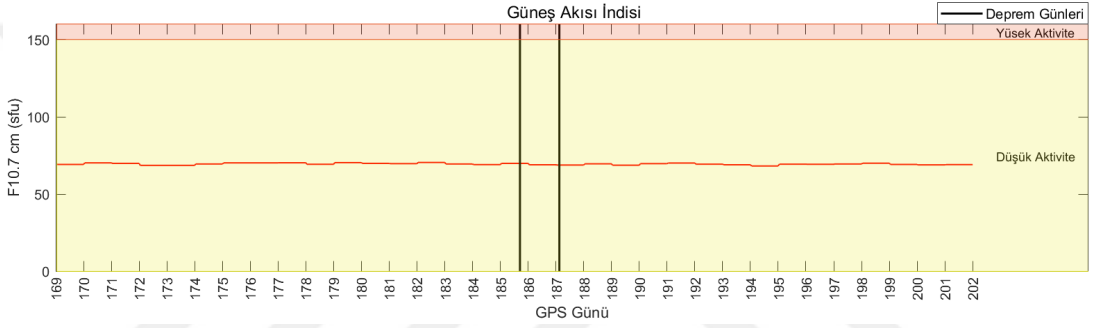
İstasyonlara ait VTEC anomali grafikleri incelendiğinde deprem merkezine yakın olan rock, chil, whc1 ve torp istasyonlarında 171. GPS gününün sonlarına doğru oluşan ve 172. GPS gününü de kapsayan pozitif anomaliler, 176. ve 177. GPS günlerindeki pozitif anomaliler 179-181. GPS günlerinde ara ara oluşan pozitif anomaliler ve 181. GPS gününde yoğun bir şekilde görülen negatif anomaliler dikkat çekmektedir. Anomali miktarları az da olsa aynı yönlü anomalilerin tüm istasyonlarda gözükmesi tutarlılık sağlamıştır. piel istasyonuna ait grafiği incelendiğinde 172-176. GPS günleri arasındaki negatif anomaliler ve deprem günlerine kadar oluşan pozitif anomaliler dikkat çekmektedir. Aynı şekilde quin istasyonunda da 172. ile 176. GPS günleri arasında küçük miktarlarda ama sürekli oluşan negatif anomaliler, sonraki günlerde ise oluşan pozitif anomaliler görülmektedir. Deprem etki alanı dışında kalan albh ve drao istasyonlarının grafikleri incelendiğinde 172. ve 182. GPS günlerinde oluşan süreklilik gösteren pozitif anomaliler dikkat çekmektedir. İki deprem arasında tüm istasyonlarda pozitif anomalilerin oluştuğu, depremden sonraki günlerde ise tüm istasyonlarda gözlemlenen 191. GPS gününe kadar oluşan pozitif anomaliler ve hemen ardından oluşan 195. GPS gününe kadar olan ve süreklilik gösteren negatif anomaliler dikkat çekmektedir.

Görülen anomalilerin uzay iklim koşulları etkisi altında oluşup oluşmadığının

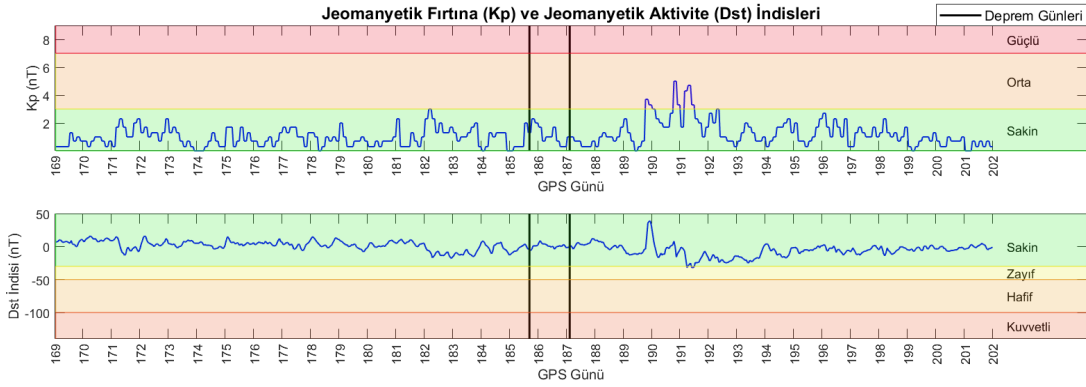
incelenmesi adına ilgili günlere ait Güneş lekesi sayısı, Güneş akısı indisi, jeomanyetik fırtına ve aktivite indislerine ait grafikler elde edilmiş ve Şekil 4.30 - 4.33'te verilmiştir.



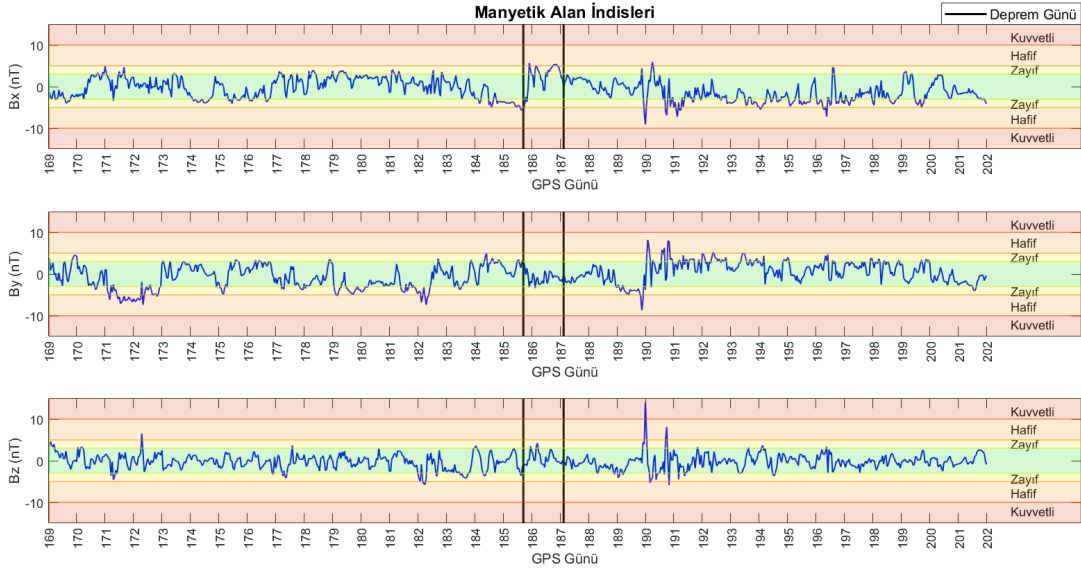
Şekil 4.30. Güneş lekesi sayısı (R)



Şekil 4.31. Güneş akısı indisi (F10.7)



Şekil 4.32. Jeomanyetik fırtına (Kp) ve Jeomanyetik Aktivite İndisi (Dst)



**Şekil 4.33.** Jeomanyetik Alan İndisleri (Bx, By, Bz)

Uzay iklim koşullarına ait grafikler incelendiğinde Güneş lekesi sayısında bazı günlerde artış olduğu gözlenmiştir. Ancak 2019 yılı Güneş döngüsünün solar minimumunda olduğu göz önüne alınırsa Güneş lekeli sayısı Güneş akısında herhangi bir yüksek aktiviteye sebebiyet verebilecek miktara ulaşmamıştır. Jeomanyetik fırtına indisi incelendiğinde ise deprem öncesi günler için herhangi bir fırtına gözlenmemiştir. Deprem sonrası 190-192. GPS günleri arasında orta şiddete kadar yükselen bir fırtına oluşmuştur. Bu etki jeomanyetik alan indislerinde de (Bx, By, Bz) görülmektedir. Solar aktivite indisi olan Güneş akısında yüksek aktiviteye rastlanmadığından jeomanyetik fırtına şiddetindeki yükselmenin deprem kaynaklı olabileceği değerlendirilebilir. Jeomanyetik aktivite indisi (Dst) için ise deprem öncesi ve sonrasında herhangi bir hareketlilik yoktur, tüm günler için sakin aktivitede kaldığı gözlenmiştir. Solar aktivite indisi ile diğer indisler arasındaki ve uzay iklim koşulları ile TEC anomalilerinin arasındaki ilişkilerin incelenebilmesi için bu değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmış olup Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Güneş akısı ile diğer indisler arasındaki korelasyonlar

R(F10.7, R)	R(F10.7, Kp)	R(F10.7, Dst)	R(F10.7, Bx)	R(F10.7, By)	R(F10.7, Bz)
0.41	0.12	0.01	0.09	-0.04	-0.11



**Çizelge 4.5.** Uzak iklim koşulları ile GPS TEC anomalileri arasındaki korelasyonlar

İstasyon	Güneş Akısı F10.7	Jeomanyetik Fırtına Kp	Jeomanyetik Aktivite Dst	Jeomanyetik Alan		
				Bx	By	Bz
rock	-0.02	-0.07	0.14	0.07	-0.13	0.02
chil	-0.01	-0.11	0.22	0.09	-0.17	0.04
whc1	-0.09	-0.04	0.15	0.10	-0.18	0.01
torp	0.00	-0.06	0.20	0.12	-0.20	0.00
pie1	0.08	-0.07	0.21	0.21	-0.29	-0.06
quin	0.08	-0.03	0.21	0.12	-0.15	-0.04
drao	-0.01	-0.01	0.06	0.04	-0.04	-0.05
albh	0.05	-0.01	0.13	0.11	-0.13	-0.13

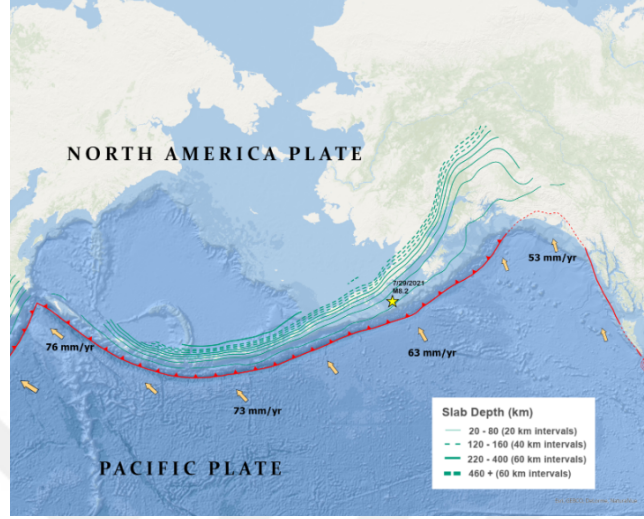
Güneş akısı ile diğer indisler arasındaki korelasyonlar incelendiğinde Güneş akısı ile Güneş lekeli sayısı arasında 0.41 korelasyon değeri ile orta seviyelerde pozitif bir ilişki, manyetik fırtına Kp indisi ile arasında 0.12 değeri ile ise düşük pozitif bir ilişkinin olduğu ve manyetik alan bileşeni olan Bz ile arasında ise -0.11 değeri ile yine az miktarda negatif bir ilişkinin olduğu gözlenmiştir. Anomaliler ile incelenen indisler arasındaki korelasyon değerleri incelendiğinde anomalilerin, jeomanyetik aktivite indisi Dst ve jeomanyetik alan indislerinden By bileşeni ile diğer indislere göre daha yüksek korelasyonda olduğu görülmektedir. Dst ve By indisleri ile Güneş akısı arasındaki korelasyonlar yok denecek kadar düşüktür. Bu yüzden anomaliler ile bu indisler arasındaki ilişkinin Güneş akısından bağımsız olduğu düşünülmektedir. Ayrıca anomaliler ile Güneş akısı indisi arasında tüm istasyon verilerinde çok düşük korelasyon olduğu, bu nedenle oluşan anomalilerin uzay iklim koşullarından kaynaklı anomaliler olmadığı ve deprem öncülleri olarak değerlendirilebileceği söylenebilir.

#### 4.2. Chignik/Alaska Depremi (2021)

Alaska Chignik, Perryville bölgesinin güneydoğusunda 29.07.2021 tarihli, 06:15:49 UTC'de moment büyüklüğü 8.2 Mw olan bir deprem meydana gelmiştir (Çizelge 4.6). Pasifik ve Kuzey Amerika levhaları arasındaki dalma zonu arayüzünde veya yakınında bindirme faylanması bir sonucu olarak oluşmuştur. Pasifik levhası 63 mm/yıl hızında Kuzey Amerika'nın altına kuzeybatıya doğru dalar. Alaska-Aleutian dalma bölgesinde büyük depremler yaygındır (Şekil 4.34).

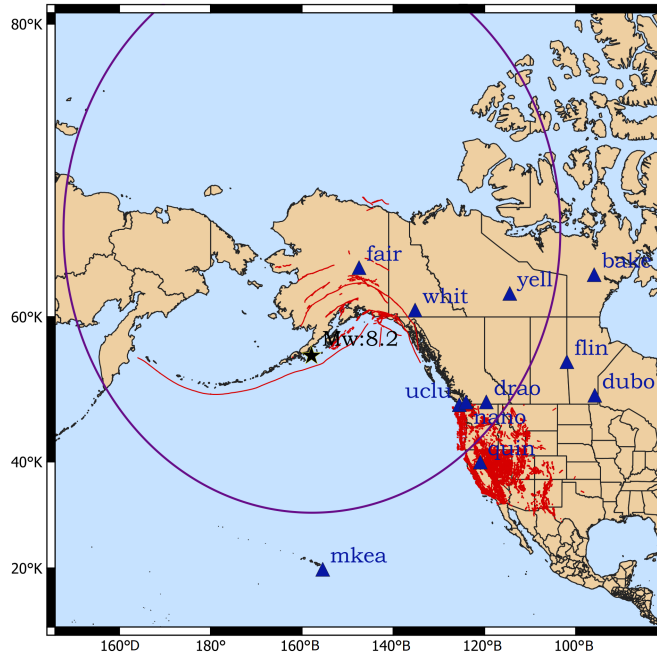
Çizelge 4.6. 2021 Chignik/Alaska depremi

Depremin Tarihi	Depremin Büyüklüğü (Mw)	Depremin Konumu	Depremin Derinliği (km)
29.07.2021	8.2	55.474°K ve 157.917°B	32.2



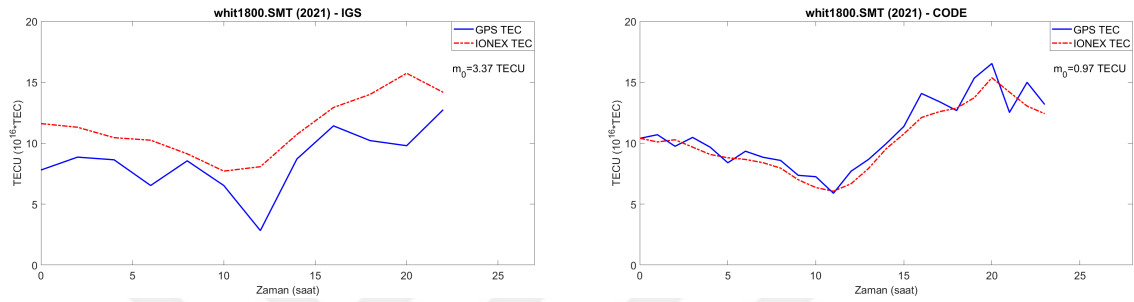
Şekil 4.34. Chignik/Alaska depremi bölgesi (URL-9)

Dobrovolsky formülüne göre depremin etki alanı 3357.376 km<sup>2</sup>'dir. Kullanılan IGS istasyonları, bölgedeki fay hatları ve Dobrovolsky etki alanı Şekil 4.35'te gösterilmiştir.

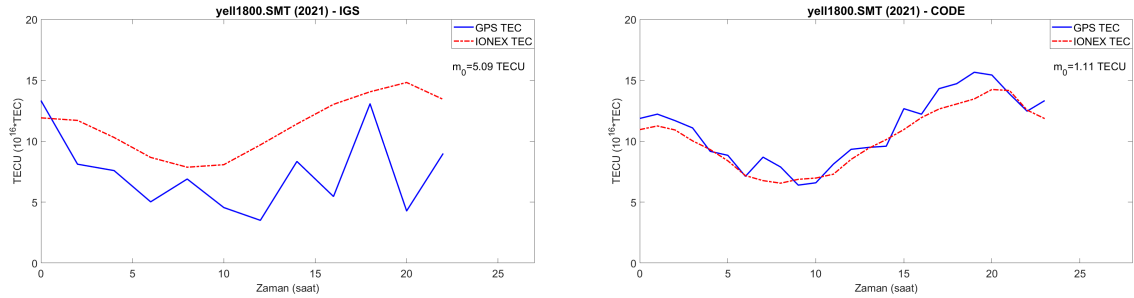


Şekil 4.35. Alaska depremi için kullanılan IGS istasyonları

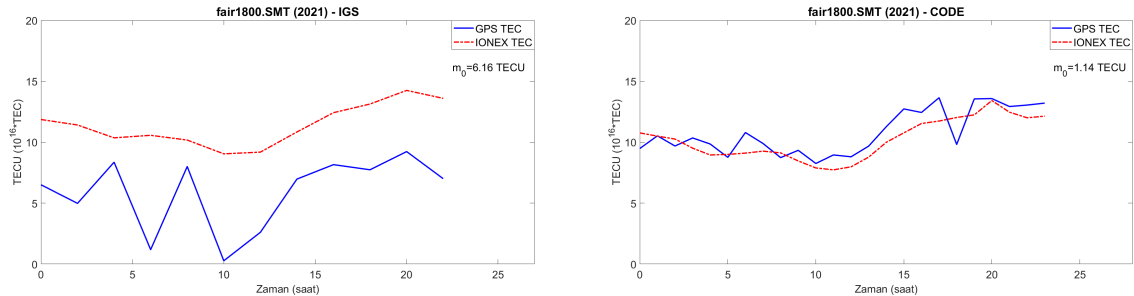
Öncelikle yumuşatılmış kod gözlemleri kullanılarak hesaplanan TEC değerleri IGS ve CODE analiz merkezlerine ait IONEX dosyalarındaki değerleri ile karşılaştırılmıştır. Örnek olarak seçilen 180. GPS gününe ait her bir istasyon için oluşturulan grafikler Şekil 4.36 - 4.46 aralığında, standart sapma değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. IGS iyonosfer dosyasındaki verilere izdüşüm fonksiyonu uygulandığından VTEC, CODE iyonosfer dosyasında ise uygulanmadığından STEC değerleri bulunmaktadır. Karşılaştırmalar bu doğrultuda yapılmıştır.



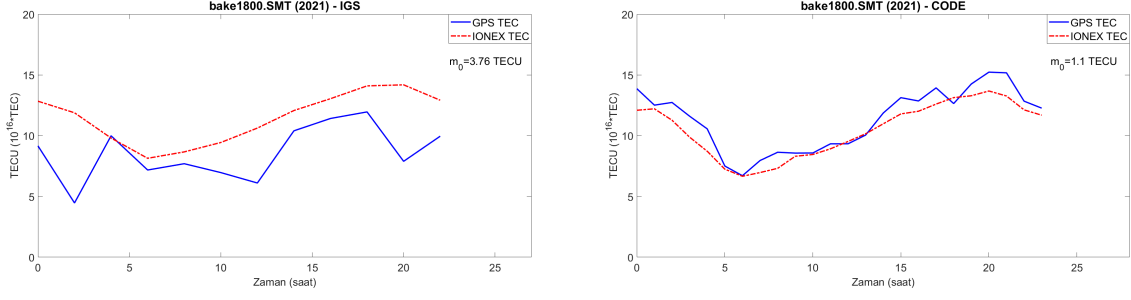
**Şekil 4.36.** whit istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



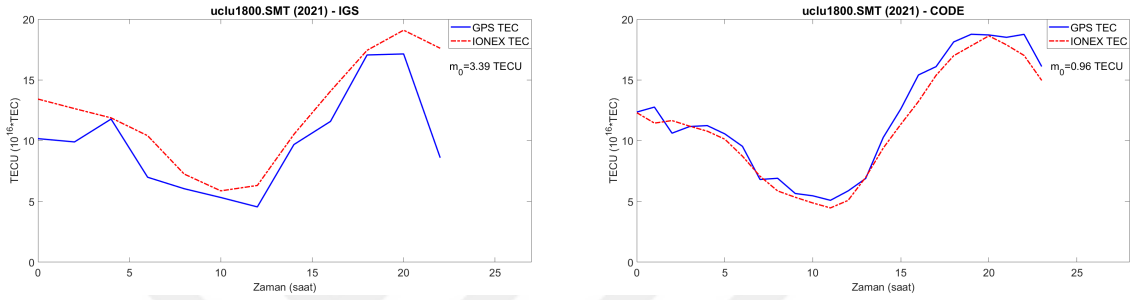
**Şekil 4.37.** yell istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



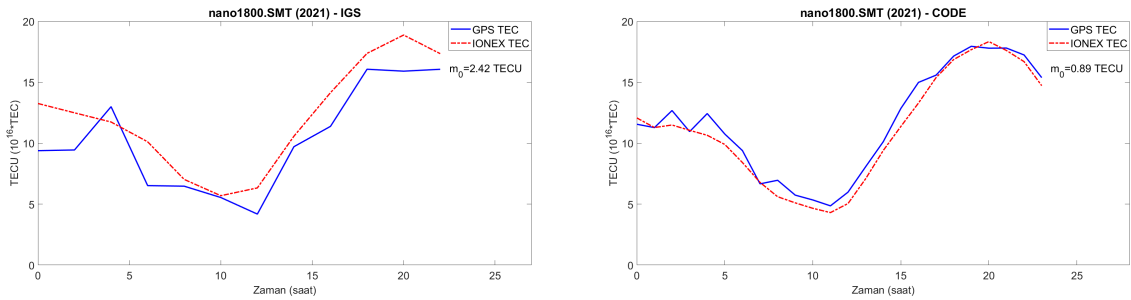
**Şekil 4.38.** fair istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



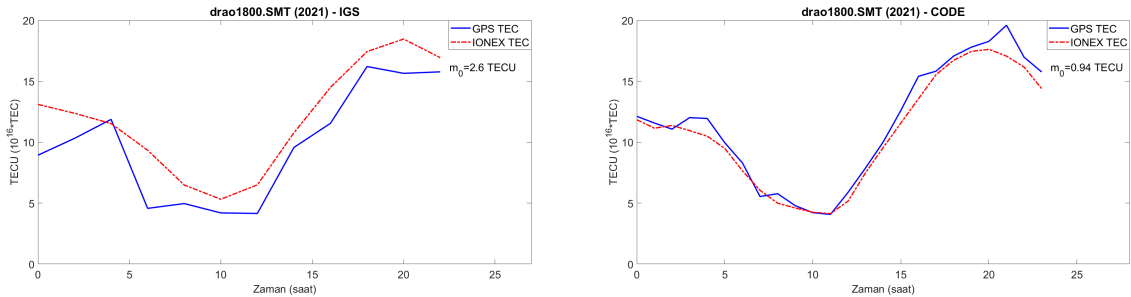
**Şekil 4.39.** bake istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



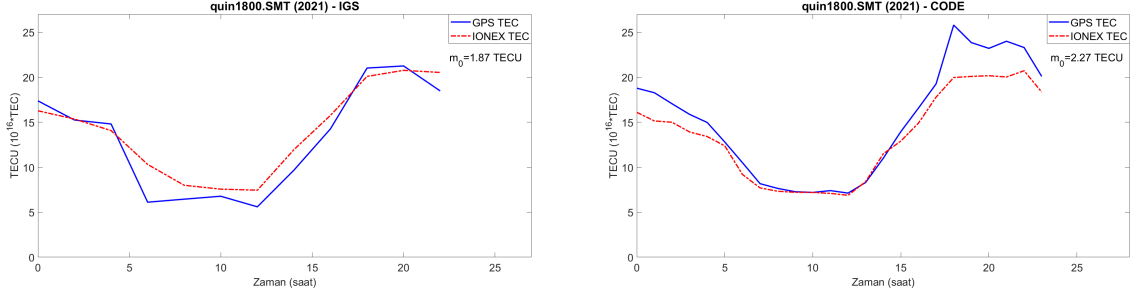
**Şekil 4.40.** uclu istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



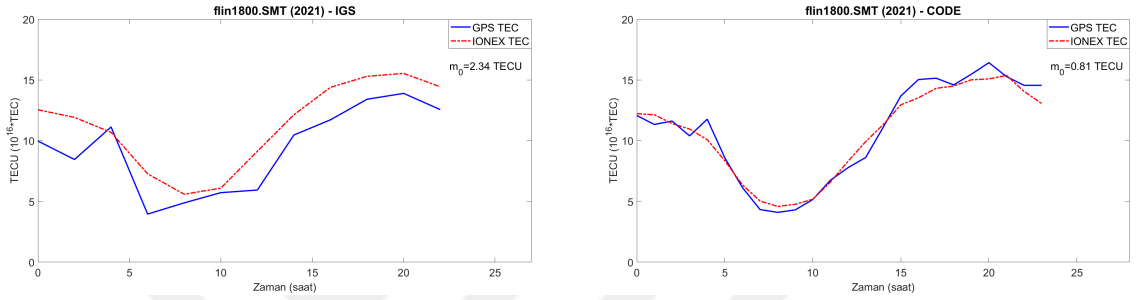
**Şekil 4.41.** nano istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



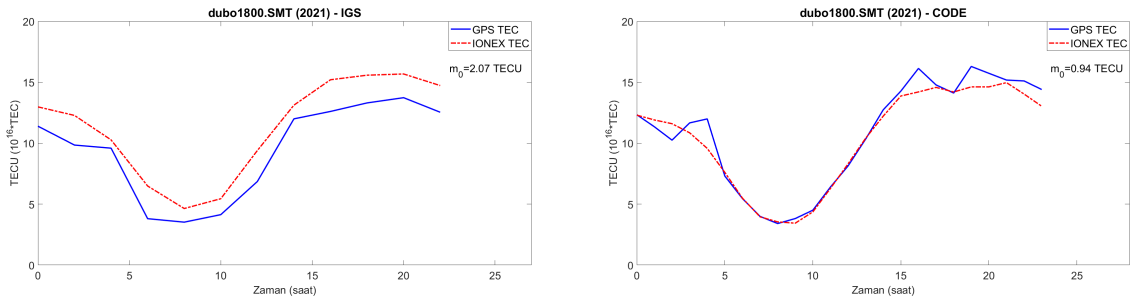
**Şekil 4.42.** drao istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



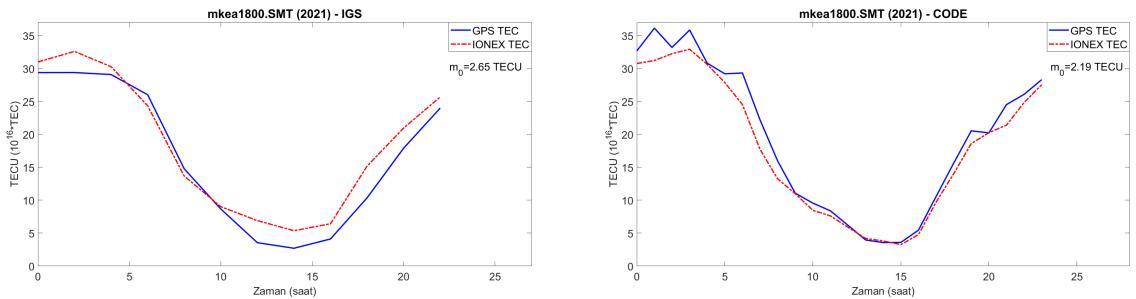
**Şekil 4.43.** quin istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.44.** flin istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.45.** dubo istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.46.** mkea istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması

**Çizelge 4.7.** Günlük GPS TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait karşılaştırmaların standart sapma ( $m_0$ ) değerleri (birim: TECU)

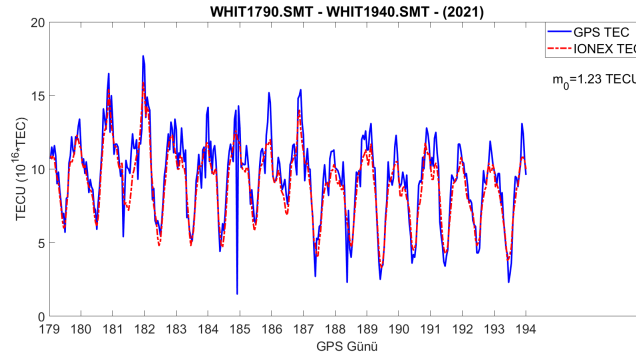
İstasyon	IGS	CODE
whit	3.37	0.97
yell	5.09	1.11
fair	6.16	1.14
bake	3.76	1.10
uclu	3.39	0.96
nano	2.42	0.89
drao	2.26	0.94
quin	1.87	2.27
flin	2.34	0.81
dubo	2.07	0.94
mkea	2.65	2.19

Günlük IONEX TEC ve GPS TEC karşılaştırma grafikleri incelendiğinde hesaplanan TEC değerlerinin, IONEX TEC grafiklerinin trendlerini yakaladığı ve kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Yalnızca quin istasyonu için IGS analiz merkezine ait karşılaştırmanın standart sapma değerinin CODE analiz merkezine ait karşılaştırmanın standart sapma değerinden daha küçük olduğu görülmüştür. CODE analiz merkezine ait IONEX dosyası verileri ile hesaplanan günlük TEC değerleri arasındaki  $m_0$  değerleri çoğunlukla daha küçük olduğundan işlemlere CODE analiz merkezine ait veriler baz alınarak devam edilmiştir. İşlenen 48 günlük verilerden en düşük, en yüksek ve medyan standart sapma değerleri tüm istasyonlar için bulunmuş ve Çizelge 4.8’de verilmiştir.

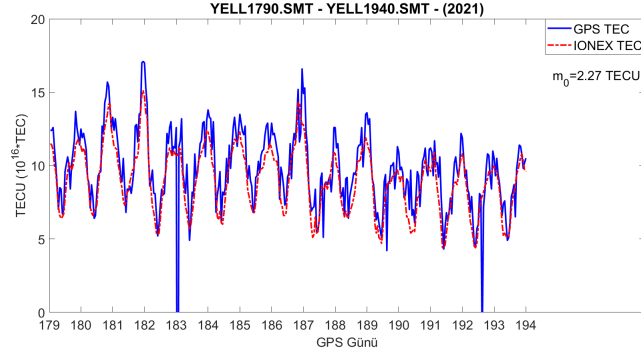
**Çizelge 4.8.** Standart sapmaların maksimum, minimum ve medyan değerleri (birim: TECU)

İstasyon	Maksimum $m_0$ Değeri	Minimum $m_0$ Değeri	Medyan $m_0$ Değeri
whit	3.64	0.71	1.04
yell	7.12	0.83	1.25
fair	2.34	0.84	1.13
bake	2.20	0.79	1.31
uclu	1.20	0.58	0.82
nano	1.20	0.67	0.89
drao	7.05	0.58	0.84
quin	2.27	1.32	1.73
flin	1.31	0.56	0.81
dubo	1.54	0.50	0.80
mkea	3.17	1.74	2.41

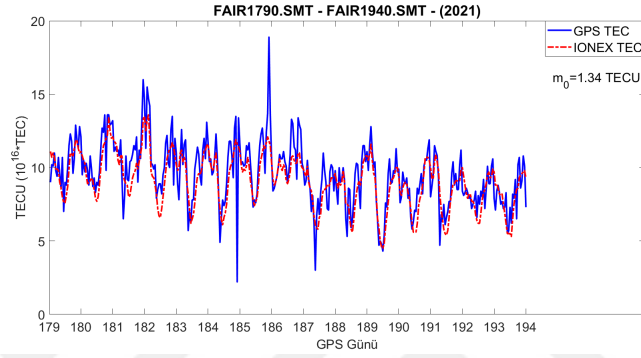
Anomalilerin tespiti için çeyrekler arası fark bazlı hareketli ortanca yöntemi uygulanmıştır. Yöntemde, baz alınan ilk 15 günlük veriye bağlı olarak sınır değerler belirleneceği için bu ilk 15 güne ait  $m_0$  değerleri hesaplanmış ve grafikleri Şekil 4.47 - 4.57'de verilmiştir.



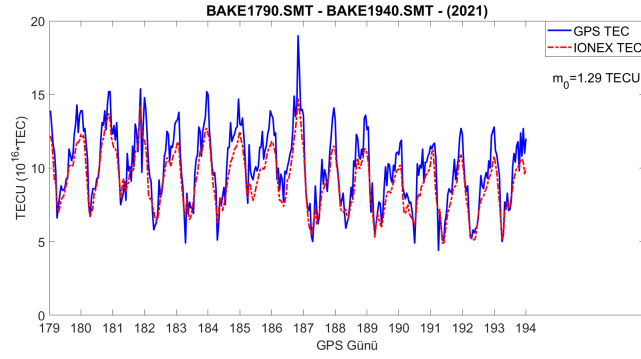
**Şekil 4.47.** whit istasyonu 15 günlük grafik



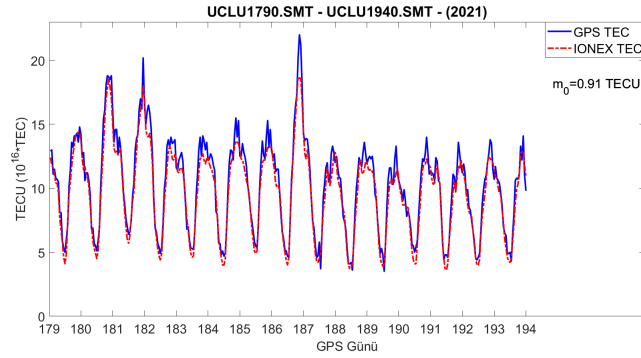
Şekil 4.48. yell istasyonu 15 günlük grafik



Şekil 4.49. fair istasyonu 15 günlük grafik

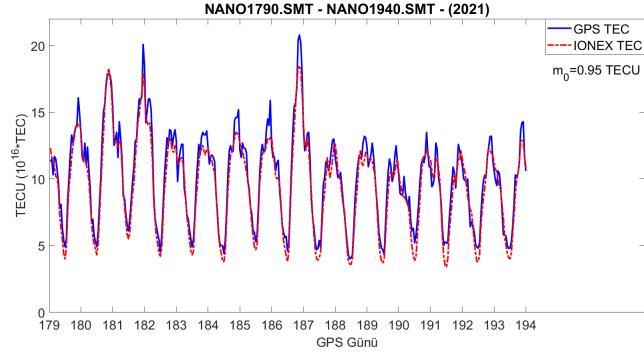


Şekil 4.50. bake istasyonu 15 günlük grafik

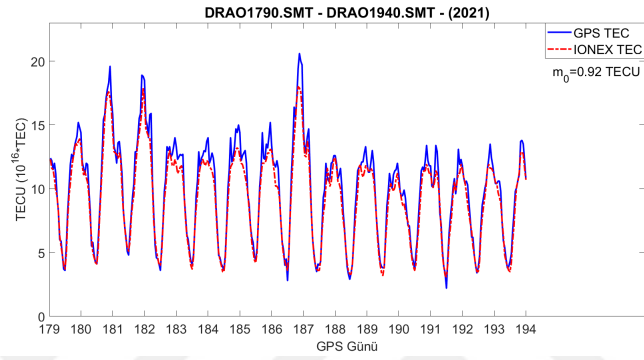


Şekil 4.51. uclu istasyonu 15 günlük grafik

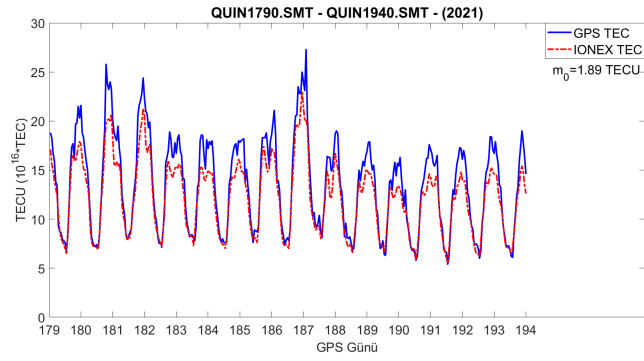




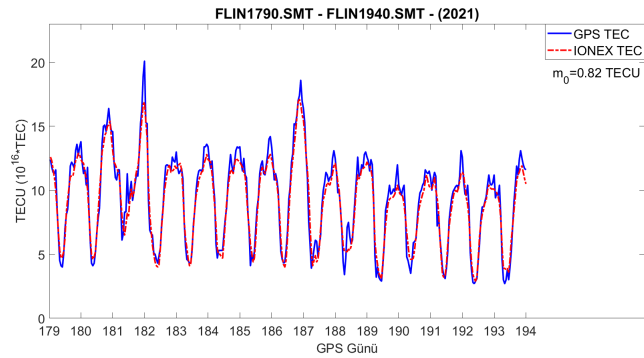
Şekil 4.52. nano istasyonu 15 günlük grafik



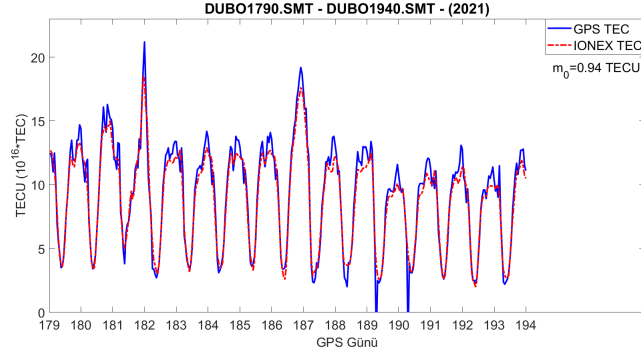
Şekil 4.53. drao istasyonu 15 günlük grafik



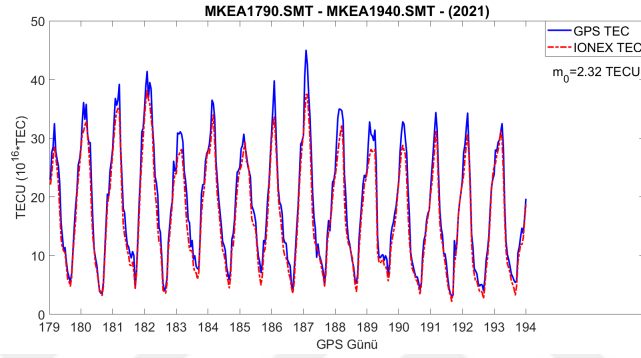
Şekil 4.54. quin istasyonu 15 günlük grafik



Şekil 4.55. flin istasyonu 15 günlük grafik

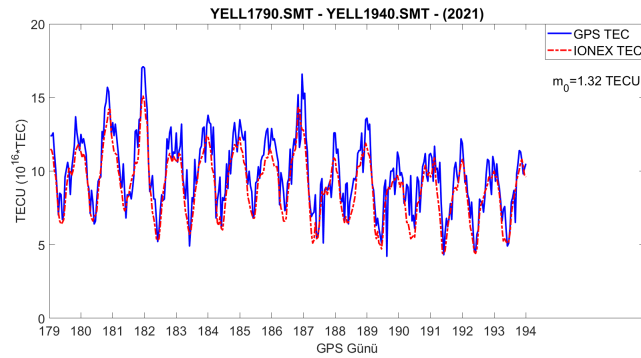


Şekil 4.56. dubo istasyonu 15 günlük grafik

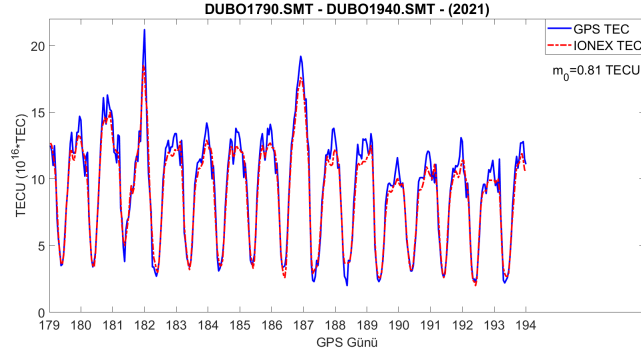


Şekil 4.57. mkea istasyonu 15 günlük grafik

yell istasyonunda 183. ve 192. GPS günlerinde ve dubo istasyonunda 189. ve 190. GPS günlerinde hesaplanan TEC değerleri sıfırın altında çıkmaktadır. Ancak TEC değerleri negatif değer alamayacağından bu değerler yerine, IONEX dosyasındaki ilgili epoktaki değerler alınmıştır. Oluşturulan yeni grafikler Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da verilmiştir.

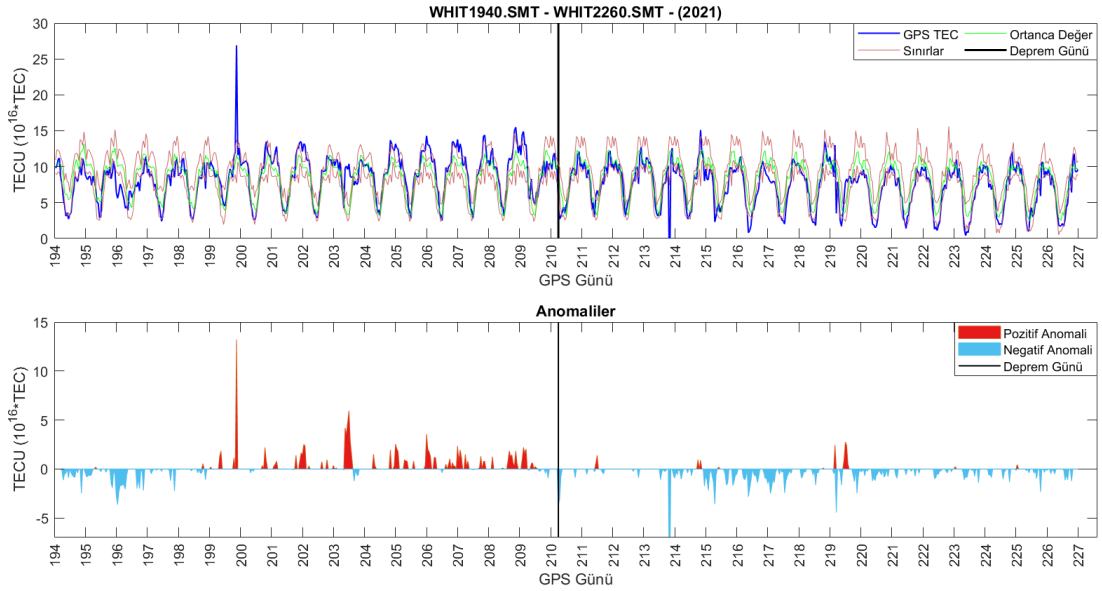


Şekil 4.58. yell istasyonu 15 günlük grafik

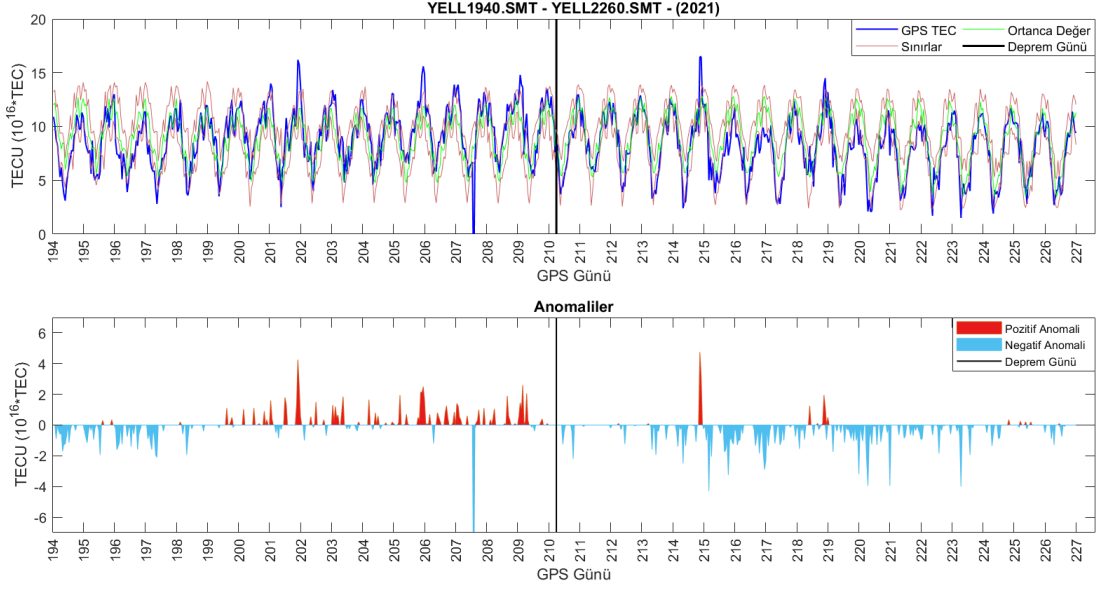


Şekil 4.59. dubo istasyonu 15 günlük grafik

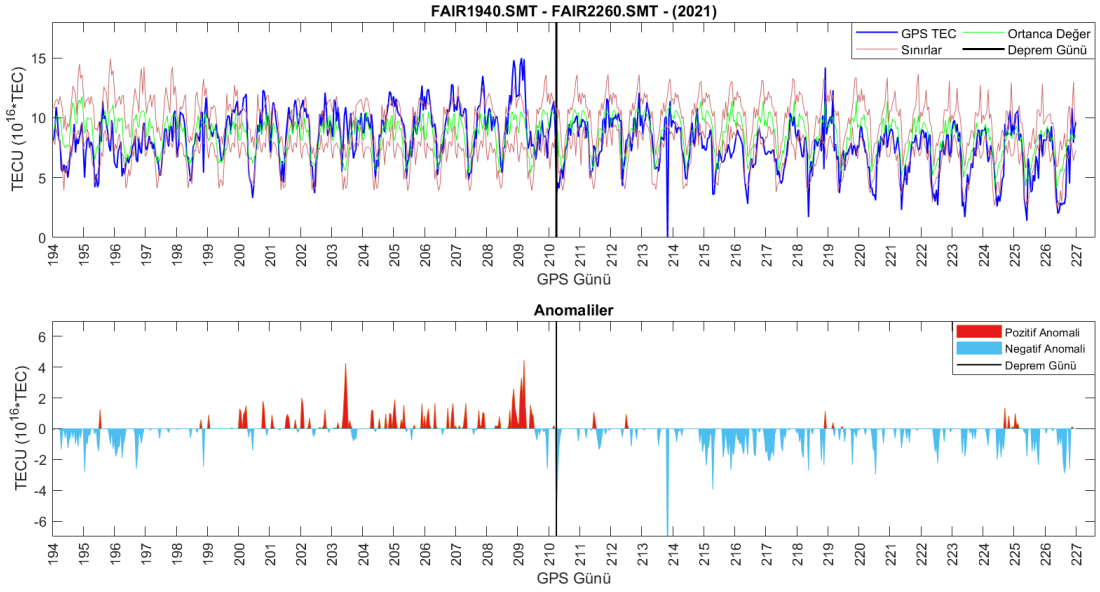
Kullanılan istasyonlara ait depremden önceki ve sonraki 16 günü içeren sınır değerleri ve anomali grafikleri Şekil 4.60 - 4.70'de verilmiştir. GPS ölçmelerinden elde edilen STEC değerleri, CODE IONEX dosyalarında önerilen modifiye edilmiş tek tabaka modeli (MSLM) izdüşüm fonksiyonu uygulanarak VTEC değerlerine dönüştürülmüştür. Üst sınır değerlerini aşan GPS VTEC değerleri pozitif anomali, alt sınır değerlerini aşan GPS VTEC değerleri ise negatif anomali olarak gösterilmiştir.



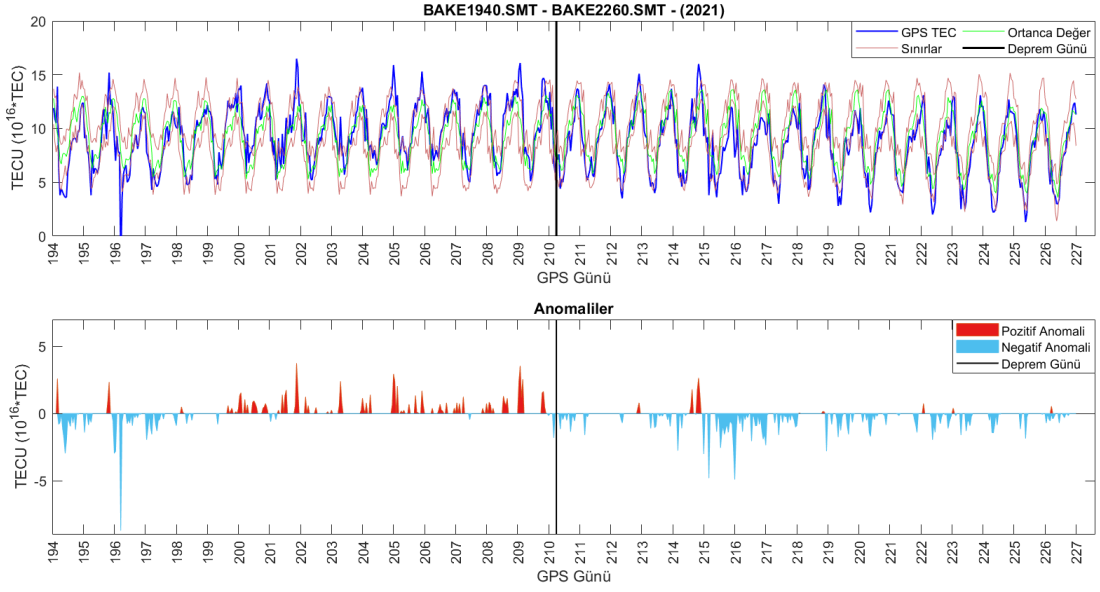
Şekil 4.60. whit istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



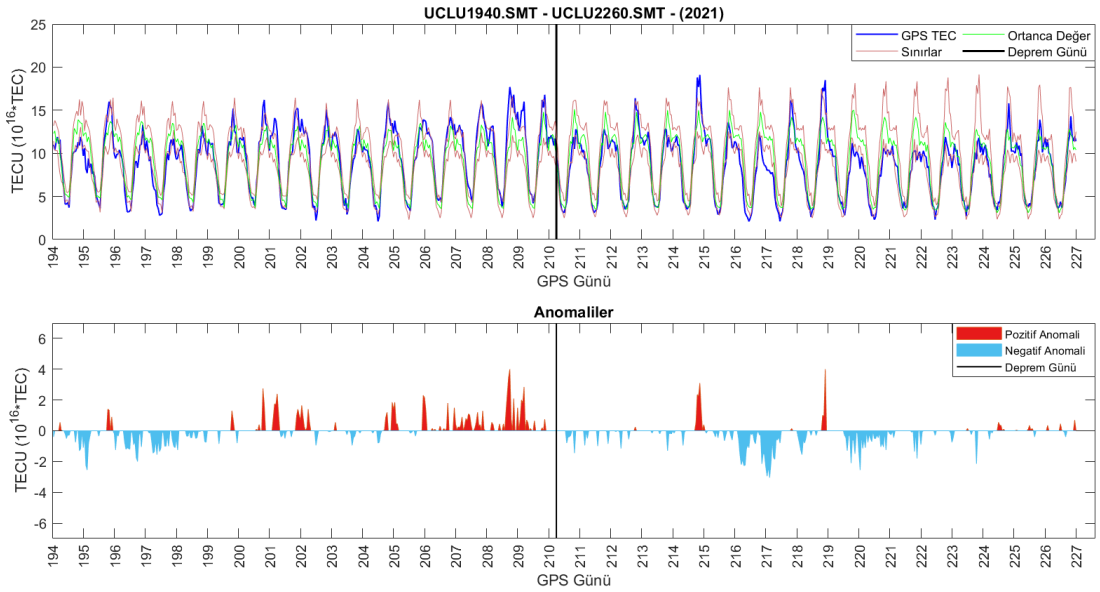
Şekil 4.61. yell istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



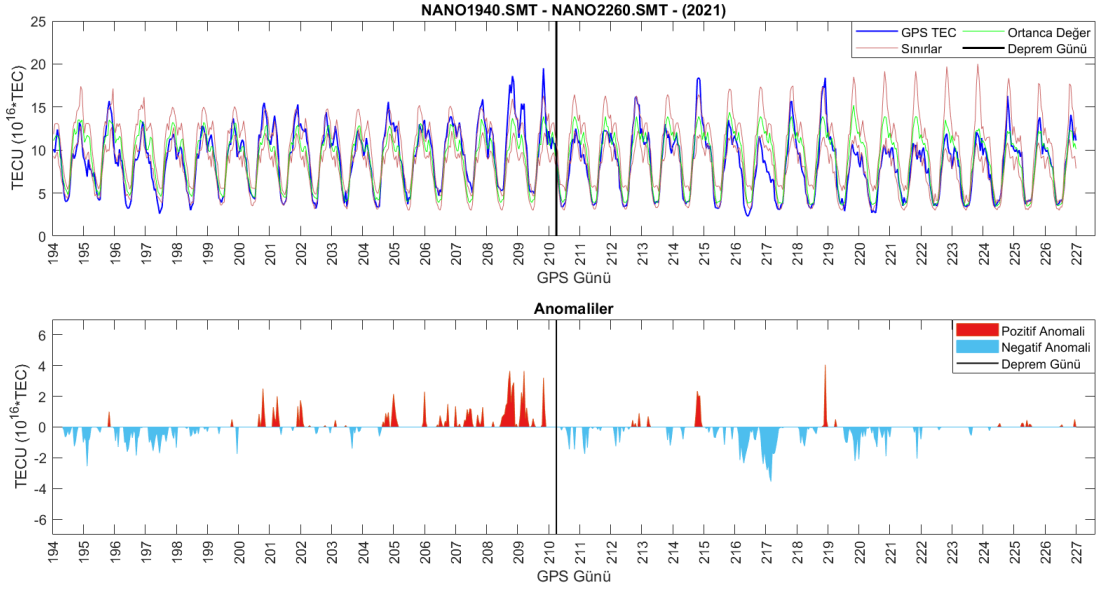
Şekil 4.62. fair istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



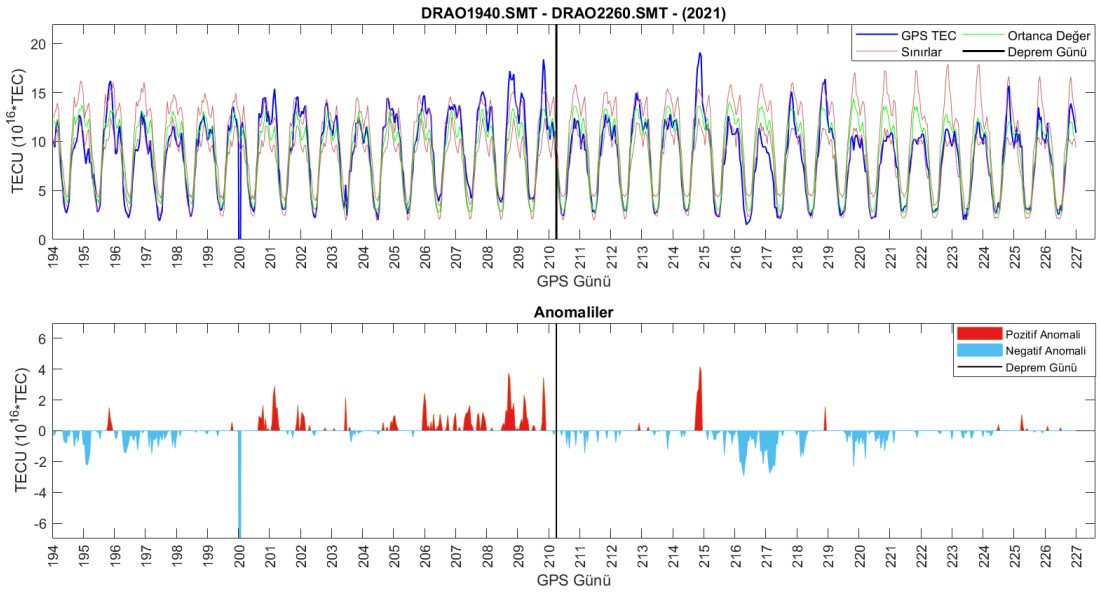
Şekil 4.63. bake istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



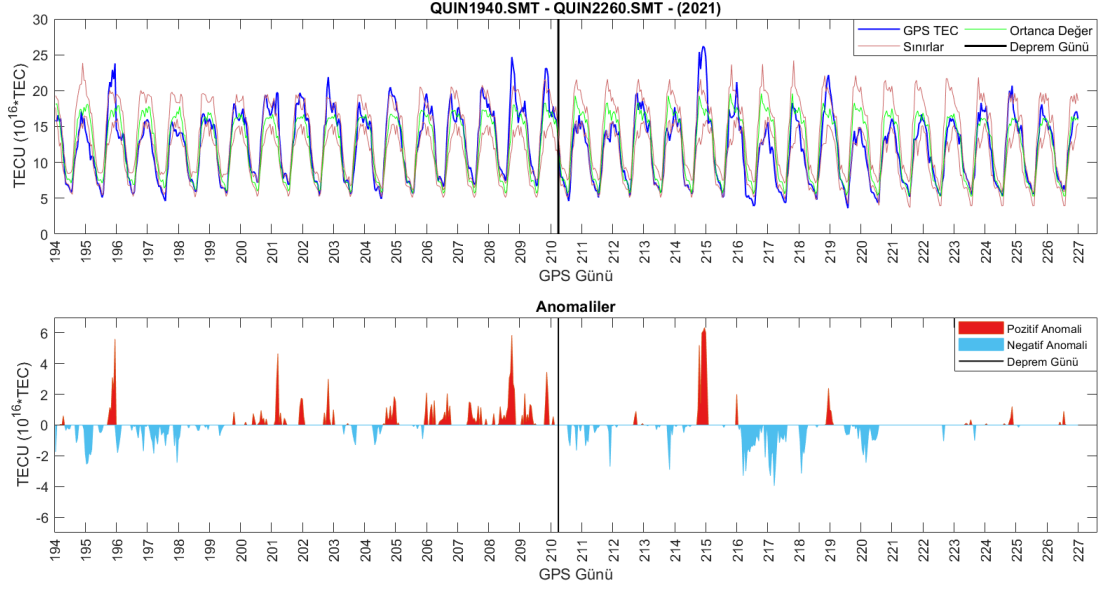
Şekil 4.64. uclu istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



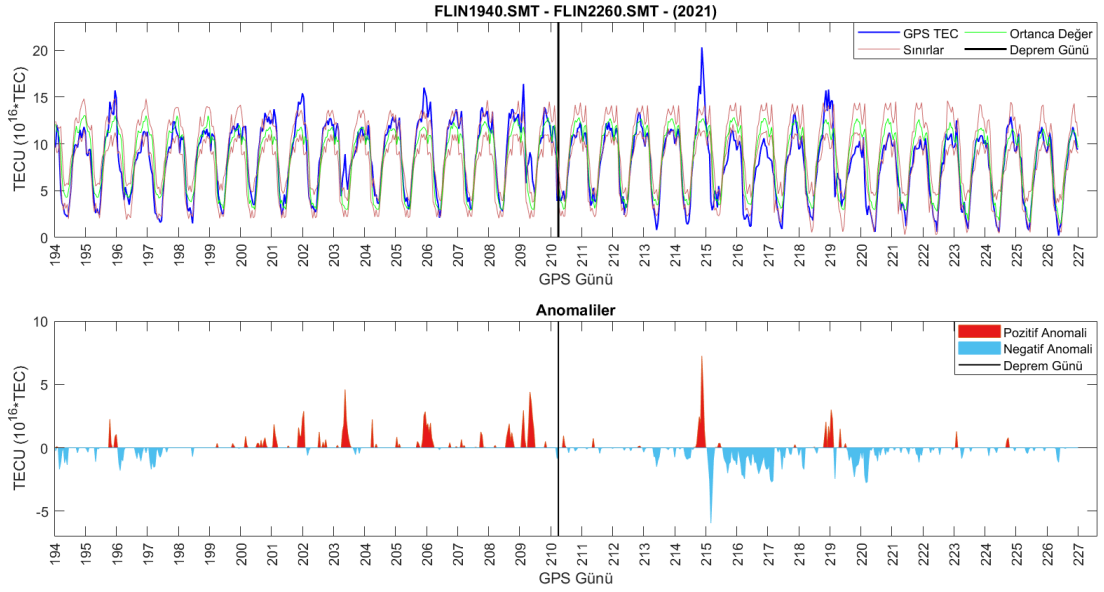
Şekil 4.65. nano istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



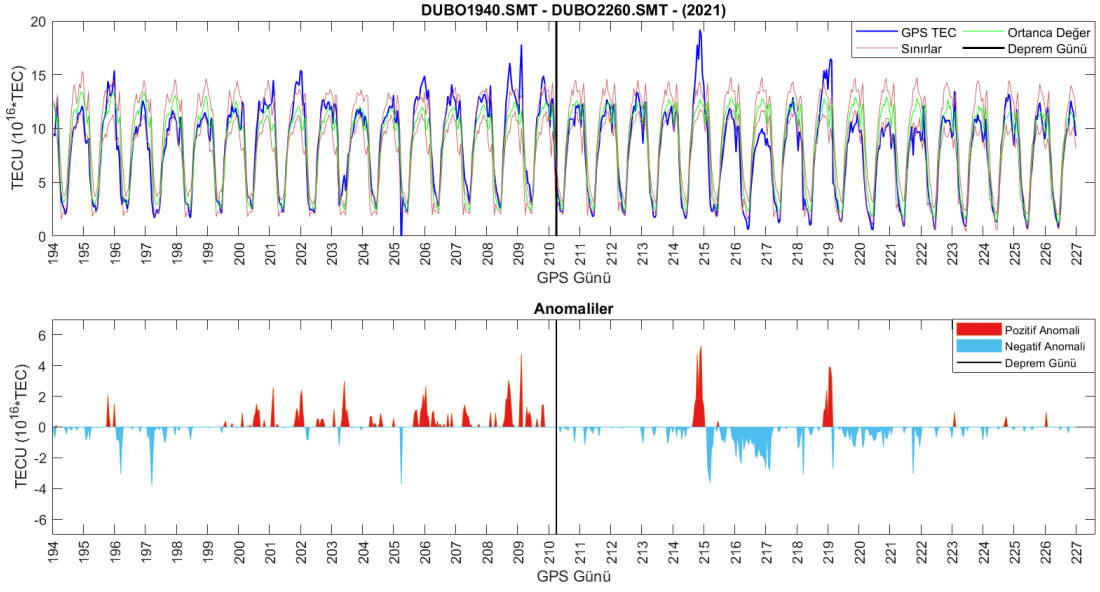
Şekil 4.66. drao istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



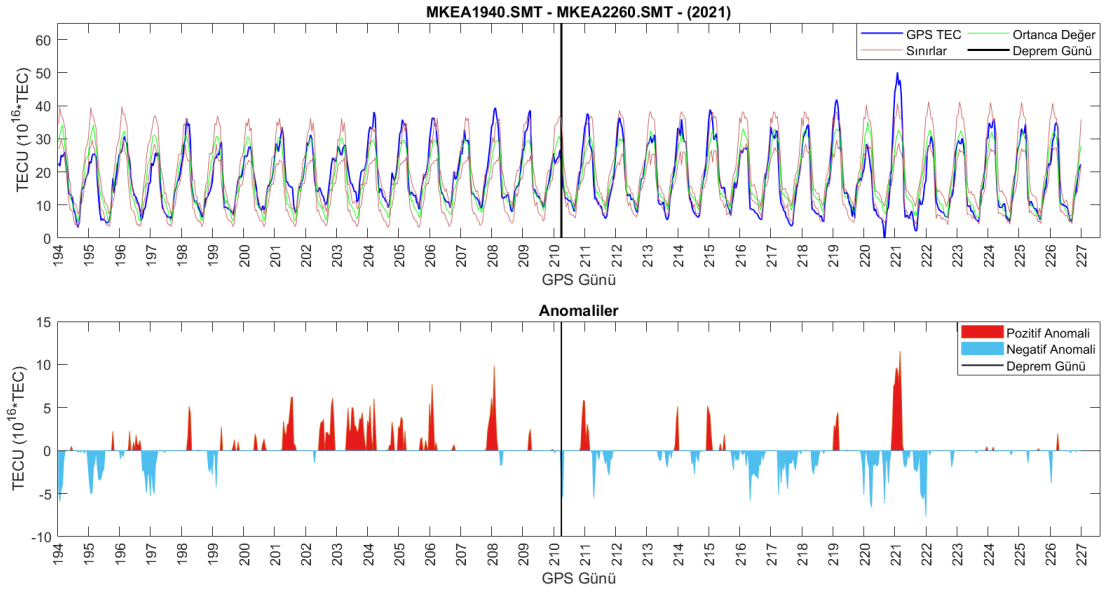
Şekil 4.67. quin istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



Şekil 4.68. flin istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



Şekil 4.69. dubo istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



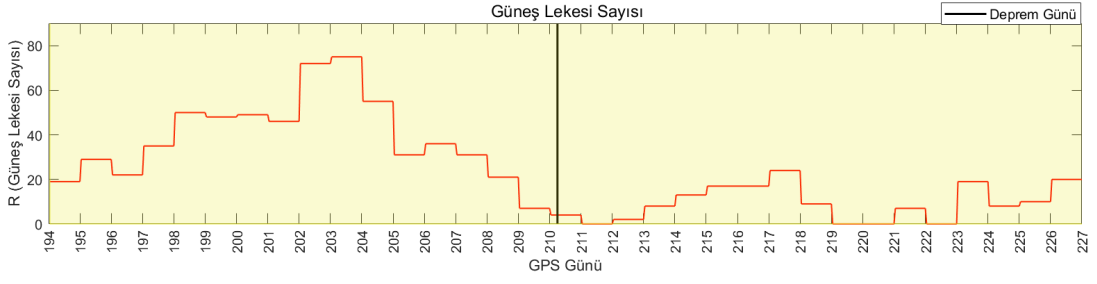
Şekil 4.70. mkea istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği

İstasyonlara ait VTEC anomali grafikleri incelendiğinde whit, yell ve fair istasyonlarına ait anomali grafiklerinin benzerlikleri göze çarpmaktadır. 194. GPS gününden başlayarak 199. GPS gününe kadar olan negatif anomaliler, devamında depremden önceki gün olan 209. GPS gününün ortalarına kadar olan pozitif anomaliler ve hemen ardından başlayarak deprem gününü de kapsayarak devam eden negatif anomaliler bulunmaktadır. Deprem hazırlık alanı dışında kalan baka istasyonu da bu üç istasyon ile benzer anomali grafiğine sahiptir. uclu, nano, drao

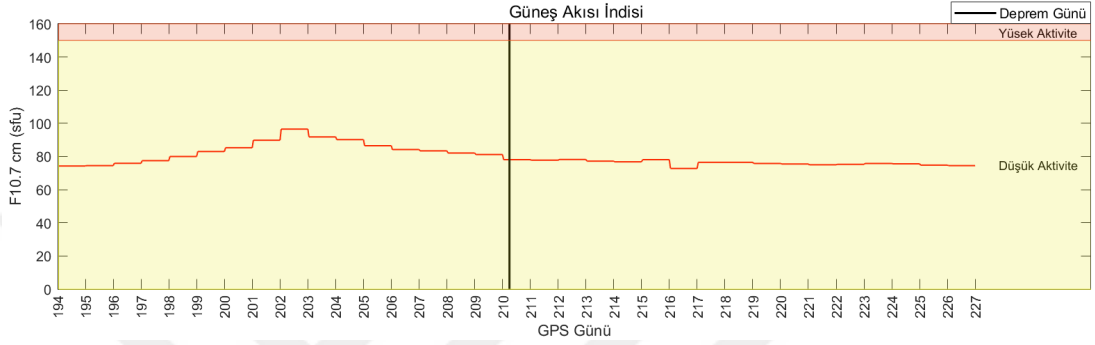


ve quin istasyonlarında 194. GPS gününden başlayarak 200. GPS gününe kadar ilerleyen negatif anomaliler, 195. GPS gününün sonlarına doğru oluşan kısa süresi pozitif anomaliler, 200-202. GPS günleri arasındaki pozitif anomaliler, 202-205. GPS günleri arasında ara ara oluşan küçük negatif anomaliler ve sonrasında deprem gününe kadar olan yoğun pozitif anomaliler görülmektedir. uclu, nano ve drao istasyonlarının aralarındaki mesafeler az olduğundan dolayı VTEC anomalilerinde gözlenen değerlerin yakın olması beklenen bir sonuçtur. Deprem hazırlık alanının hemen dışındaki quin istasyonu bu üç istasyona en yakın istasyonlardan biridir ve çok benzer anomalilere sahiptir. Deprem hazırlık alanının dışında kalan flin ve dubo istasyonlarında ise 194. GPS gününden başlayarak 199. GPS gününe kadar olan negatif anomaliler ardından deprem gününe kadar olan pozitif anomaliler görülmektedir ve 195. GPS gününün sonlarında oluşan pozitif anomaliler ile bu iki istasyona ait anomali grafikleri uclu, nano, drao ve quin istasyonlarına ait anomali grafiklerine benzemektedir. Son olarak yine deprem hazırlık alanı dışında olan ve pasifik okyanusundaki Hawaii Adaları'nda bulunan mkea istasyonunun grafiği incelendiğinde 50 TECU'ya varan GPS TEC değeri ve 12 TECU'ya varan anomali değerleri göze çarpmaktadır. Bu istasyonda 199. GPS gününe kadar ara ara gözlenen negatif anomaliler, devamında deprem gününe kadar oluşan yoğun pozitif anomaliler bulunmaktadır. Deprem gününe 2 gün kala 209. GPS günü başlangıcındaki kısa süreli pozitif anomali dışında anomali görülmemiştir. Deprem sonrasındaki günlerde ise bütün istasyon grafiklerinde çoğunlukla negatif anomalilerin bulunduğu görülmektedir. Neredeyse tüm istasyonlarda 214. ve 218. GPS günlerinin sonlarına doğru oluşan pozitif anomaliler dikkat çekmektedir. mkea istasyonunda deprem sonrasında oluşan anomaliler diğer istasyonlardaki anomalilerden farklılık göstermiş olup 214. ve 218. GPS günlerine ek olarak 210., 213. ve 220. GPS günlerinin sonlarında da pozitif anomalilerin varlığı görülmektedir.

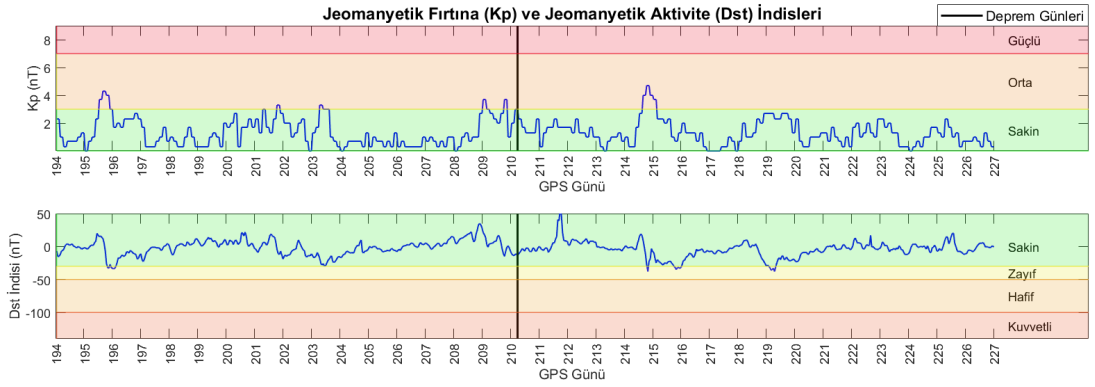
Görülen anomalilerin uzay iklim koşulları etkisi altında oluşup oluşmadığının incelenmesi adına ilgili günlere ait Güneş lekesi sayısı, Güneş akısı indisi, jeomanyetik fırtına ve aktivite indislerine ait grafikler elde edilmiş ve Şekil 4.71 - 4.74'te verilmiştir.



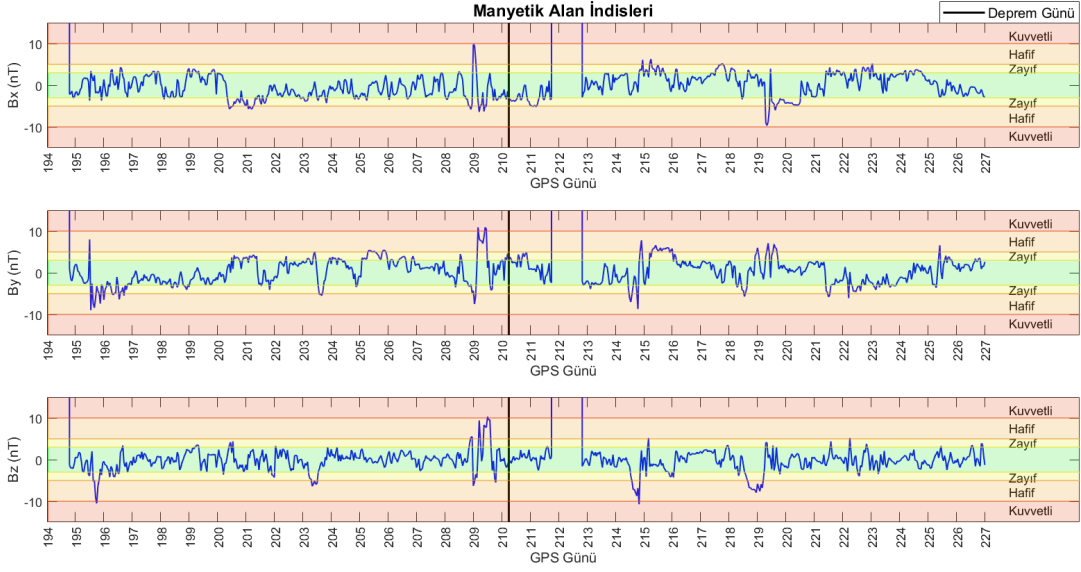
Şekil 4.71. Güneş lekeli sayısı (R)



Şekil 4.72. Güneş akısı indisi (F10.7)



Şekil 4.73. Jeomanyetik fırtına (Kp) ve Jeomanyetik Aktivite İndisi (Dst)



**Şekil 4.74.** Jeomanyetik Alan İndisleri (Bx, By, Bz)

Uzay iklim koşullarına ait grafikler incelendiğinde Güneş lekesi sayısında bazı günlerde artış olduğu gözlenmiştir. 2021 yılı Güneş döngüsünün solar minimum dönemine yakın olduğundan Güneş lekesi sayısı Güneş akısında herhangi bir yüksek aktiviteye sebebiyet verebilecek miktara ulaşmamıştır. Ancak 203. GPS gününe kadar yükselen bir trend izlemiş sonraki günlerde ise azalarak devam etmiştir. Jeomanyetik fırtına indisi incelendiğinde deprem öncesi 195. GPS gününde, 201. ve 203. GPS günlerinin küçük bir kısmında ve 209. GPS gününde orta şiddette olduğu görülmüştür. Deprem sonrası 214-215. GPS günleri arasında yine orta şiddete kadar yükselen bir fırtına oluşmuştur. Jeomanyetik aktivite indisi (Dst) için ise deprem öncesinde 196. GPS gününde, deprem sonrasında 214. ve 215. GPS günlerinin sonunda ve 219. GPS gününün başında çok kısa süreli zayıf aktiviteler gözlenmiştir. Jeomanyetik alan indisleri incelendiğinde 194., 212. GPS günlerine ait veri dosyasındaki değerlerin 999.9 olduğu yani bu epoktaki verilerin mevcut olmadığı anlaşılmıştır. By ve Bz bileşenlerinde 195. GPS gününde ani değişimlerin olduğu ve aktivite şiddetinin hafif aktivite seviyesine ulaştığı görülmüştür. Deprem meydana gelmesinin 1 gün öncesinde (209. GPS günü) Bx, By ve Bz bileşenlerinde ani değişimler oluşarak Bx ve Bz bileşenlerinde hafif aktivite, By bileşeninde ise kuvvetli aktivite seviyesine ulaştığı görülmektedir. Depremden sonraki günler incelendiğinde 214. GPS gününde By ve Bz bileşenlerinde; 218. GPS günü ortalarından ve 219. GPS günü ortalarına kadar Bz bileşeninde;

219. GPS gününde Bx ve By bileşenlerinde hafif seviyede jeomanyetik alan değişimleri olduğu görülmektedir. Jeomanyetik fırtına indisindeki ve jeomanyetik alan bileşenlerindeki değişimlerin, güneş akısı indisi düşük aktivitede olduğundan ve Güneş akısındaki değişim trendinin jeomanyetik değişim indislerdeki trendlerden farklı olması, jeomanyetik alandaki değişimlerin solar kaynaklı olmadığı sonucunu verir. Ancak Güneş akısındaki artış ile pozitif anomalilerde de artış yaşandığı söylenebilir. Solar aktivite indisi ile diğer indisler arasındaki ve uzay iklim koşulları ile TEC anomalilerinin arasındaki ilişkilerin incelenebilmesi için bu değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmış olup Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Güneş akısı ile diğer indisler arasındaki korelasyonlar

R(F10.7, R)	R(F10.7, Kp)	R(F10.7, Dst)	R(F10.7, Bx)	R(F10.7, By)	R(F10.7, Bz)
0.80	-0.01	0.04	-0.14	-0.13	-0.13

**Çizelge 4.10.** Uzay iklim koşulları ile GPS TEC anomalileri arasındaki korelasyonlar

İstasyon	Güneş Akısı F10.7	Jeomanyetik Fırtına Kp	Jeomanyetik Aktivite Dst	Jeomanyetik Alan		
				Bx	By	Bz
whit	0.29	0.02	0.11	-0.02	-0.01	-0.02
yell	0.25	0.13	0.13	-0.04	-0.03	-0.03
fair	0.31	0.06	0.16	-0.01	-0.01	-0.01
bake	0.29	0.12	0.19	-0.05	-0.05	-0.05
uclu	0.27	0.19	0.10	-0.01	-0.01	-0.01
nano	0.25	0.19	0.15	0.04	-0.04	-0.04
drao	0.11	0.10	0.04	-0.02	-0.01	-0.01
quin	0.19	0.27	0.02	-0.04	-0.04	-0.04
flin	0.26	0.24	0.08	-0.04	-0.04	-0.04
dubo	0.24	0.26	0.05	-0.01	-0.01	-0.01
mkea	0.34	0.05	-0.01	-0.08	-0.08	-0.08

Güneş akısı ile diğer indisler arasındaki korelasyonlar incelendiğinde Güneş akısı ile Güneş lekesi sayısı arasında 0.80 korelasyon değeri ile yüksek seviyelerde pozitif bir ilişki, manyetik alan bileşenleri olan Bx ile arasında -0.14 değeri, By ile arasında -0.13 ve Bz ile arasında -0.13 değeri ile az miktarda negatif ilişkilerin olduğu gözlenmiştir. Güneş akısının jeomanyetik fırtına ve jeomanyetik alan indisini

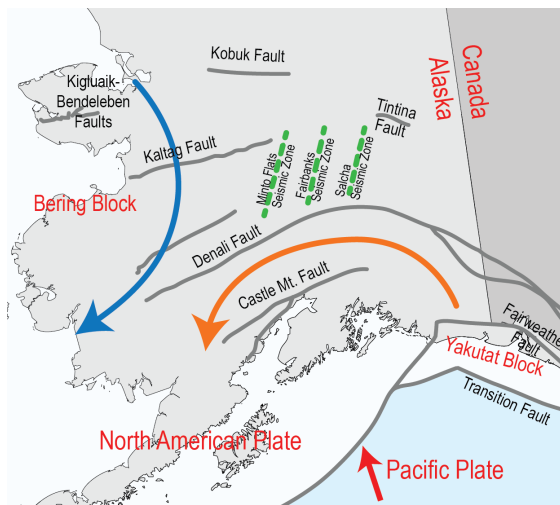
etkilemediği anlaşılmaktadır. Anomaliler ile incelenen indisler arasındaki korelasyon değerleri incelendiğinde anomalilerin, çoğu istasyon verileri için Güneş akısı indisi ile pozitif yönde korelasyonda olduğu söylenebilir. Güneş akısındaki yükseliş trendi ile pozitif anomalilerin oluşma günlerindeki benzerlik, anomali ve indis değişimi grafiklerinden de açık bir şekilde görülmektedir. Ancak Güneş akısı seviyesinin düşmesi ile birlikte deprem öncesi günlerde pozitif anomalilerin azalmadığı görülmüştür. Bu yüzden 205. GPS günü sonrasında oluşan anomalilerin solar aktivite kaynaklı oluşmadığı ve deprem öncülü olarak sayılabileceği düşünülebilir.

#### 4.3. Denali/Alaska Depremi (2002)

Alaska'da, Fairbanks bölgesinin güneyinde 03.11.2002 tarihli, 22:12:41 UTC'de moment büyüklüğü 7.9 Mw olan bir deprem meydana gelmiştir. Aynı fay hattı üzerinde, Nenana dağında depremden 10 gün öncesinde 23.10.2002 tarihli 6.7 Mw büyüklüğünde bir öncül şok gözlenmiştir (Çizelge 4.11). Depremin oluştuğu Denali fayı, doğrultu atımlı bir fay olup bölgede bulunan çok sayıda fay hattından biridir (Şekil 4.75).

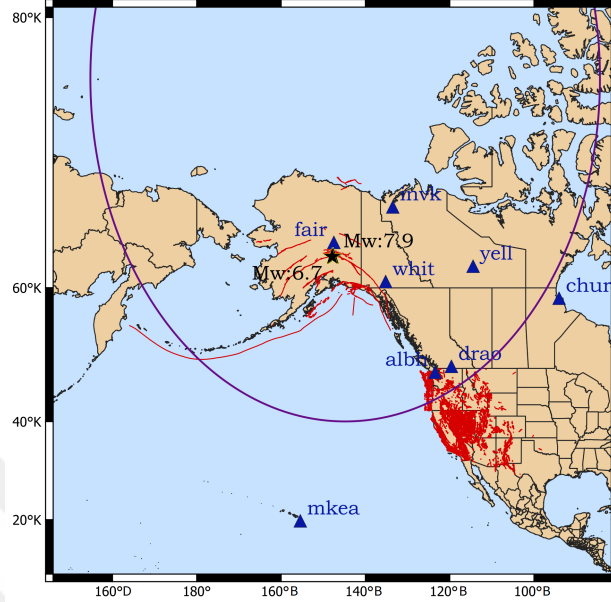
Çizelge 4.11. 2002 Denali/Alaska depremi

Depremin Tarihi	Depremin Büyüklüğü (Mw)	Depremin Konumu	Depremin Derinliği (km)
23.10.2002	6.7	63.50°K ve 147.90°B	4.2
03.11.2002	7.9	63.51°K ve 147.60°B	4.2



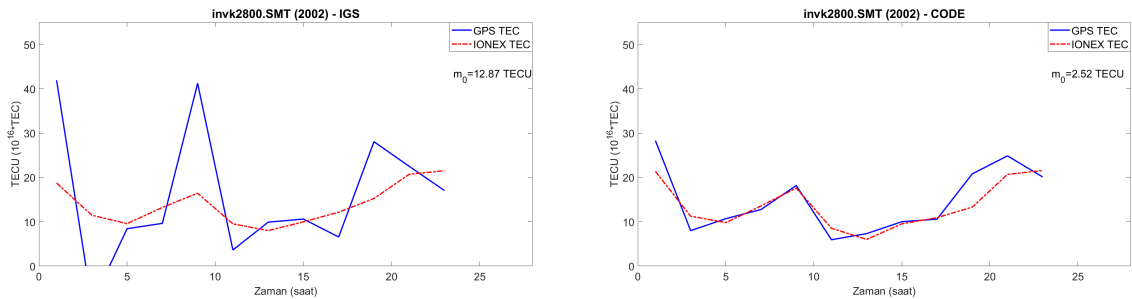
Şekil 4.75. Denali/Alaska depremi bölgesi (URL-11)

Dobrovolsky formülüne göre 7.9 moment büyüklüğündeki depremin hazırlık alanı 2494.595 km olarak hesaplanmıştır. Kullanılan istasyonlar, bölgedeki fay hatları ve depremin beklenen etki alanı Şekil 4.76'da gösterilmiştir.

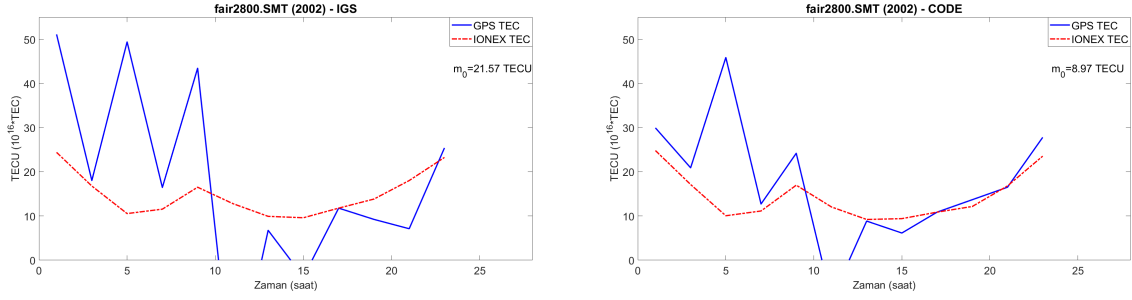


Şekil 4.76. Denali/Alaska depremi için kullanılan IGS istasyonları

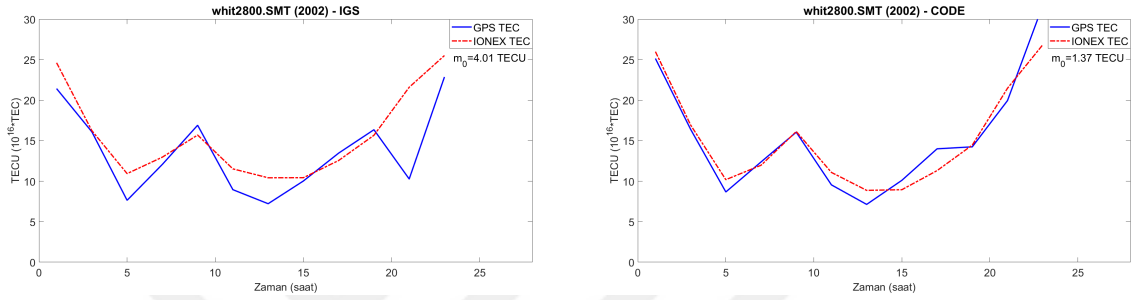
Öncelikle yumuşatılmış kod gözlemleri kullanılarak hesaplanan TEC değerleri IGS ve CODE analiz merkezlerine ait IONEX dosyalarındaki değerler ile karşılaştırılmıştır. Örnek olarak seçilen 280. GPS gününe ait her bir istasyon için oluşturulan grafikler Şekil 4.77-4.84 aralığında, standart sapma değerleri Çizelge 4.12'de verilmiştir. IGS iyonosfer dosyasındaki verilere izdüşüm fonksiyonu uygulandığından VTEC, CODE iyonosfer dosyasında ise uygulanmadığından STEC değerleri bulunmaktadır. Karşılaştırmalar bu doğrultuda yapılmıştır.



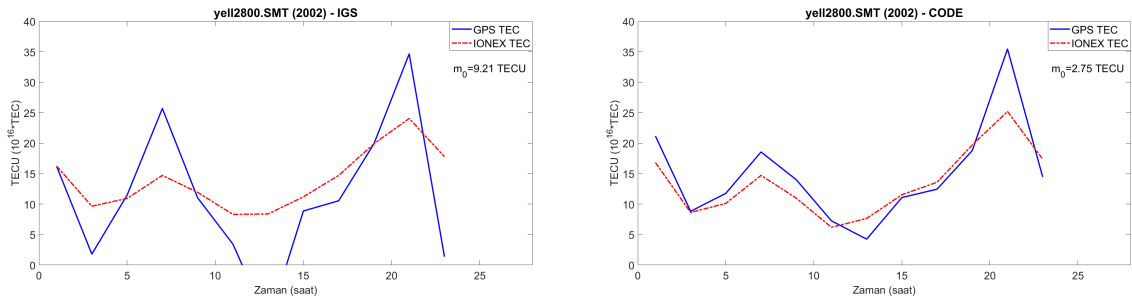
Şekil 4.77. invk istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



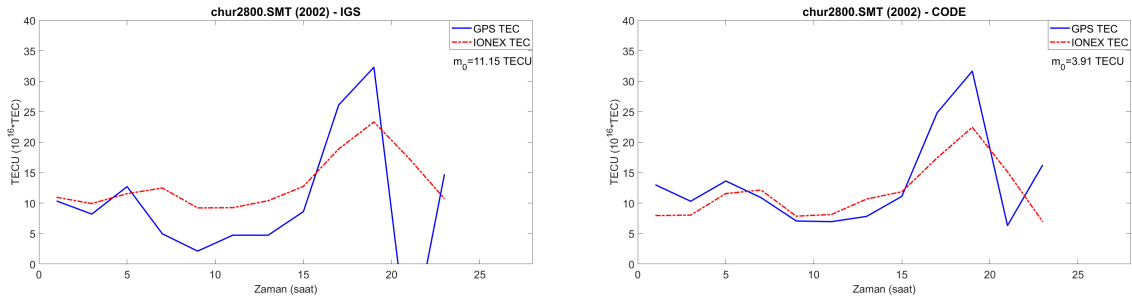
**Şekil 4.78.** fair istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



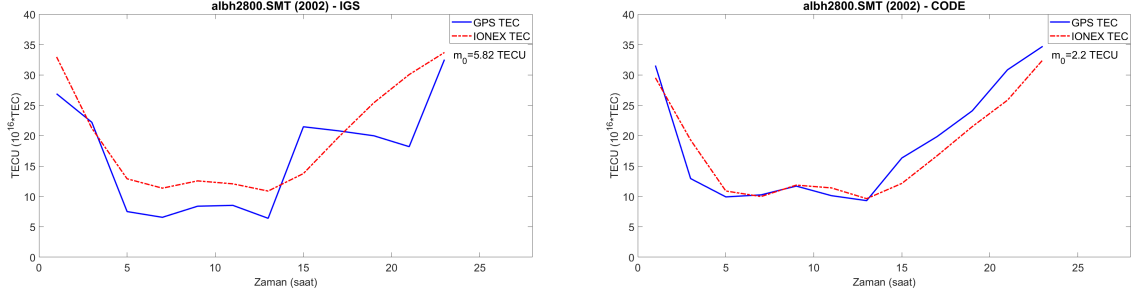
**Şekil 4.79.** whit istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



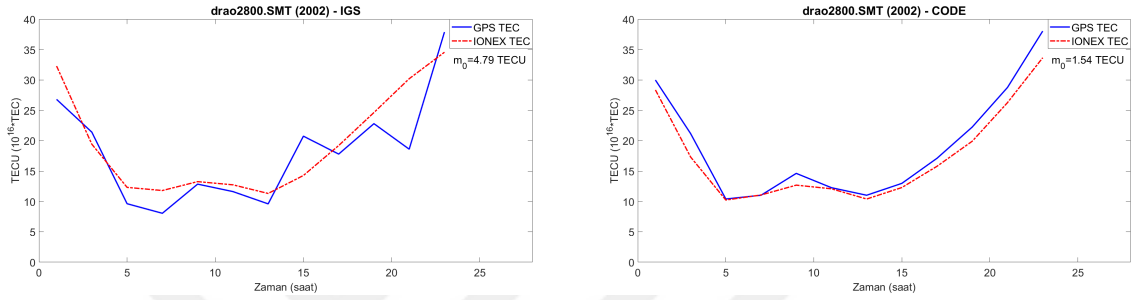
**Şekil 4.80.** yell istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



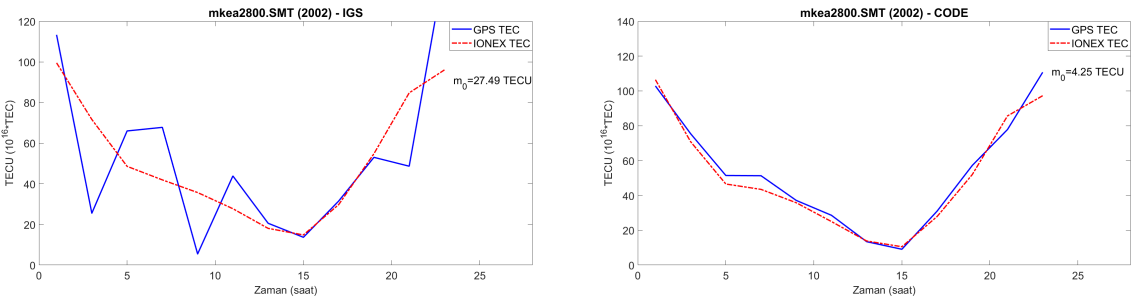
**Şekil 4.81.** chur istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.82.** albh istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.83.** drao istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Şekil 4.84.** mkea istasyonu TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait dosyaların karşılaştırılması



**Çizelge 4.12.** Günlük GPS TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezine ait karşılaştırmaların standart sapma ( $m_0$ ) değerleri (birim: TECU)

İstasyon	IGS	CODE
invk	12.87	2.52
fair	21.57	8.97
whit	4.01	1.37
yell	9.21	2.75
chur	11.15	3.91
albh	5.82	2.20
drao	4.79	1.54
mkea	27.49	4.25

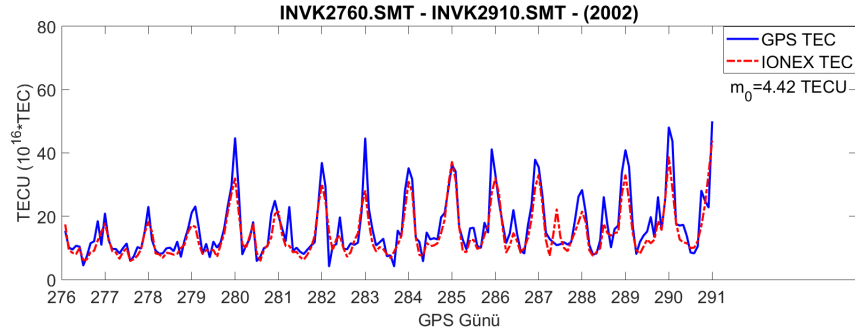
Günlük IONEX TEC ve GPS TEC karşılaştırma grafikleri incelendiğinde hesaplanan TEC değerlerinin, IONEX TEC grafiklerinin trendlerini çoğunlukla CODE analiz merkezleri ile karşılaştırma grafiklerinde yakaladığı görülmüştür. CODE analiz merkezine ait IONEX dosyası verileri ile hesaplanan günlük TEC değerleri arasındaki  $m_0$  değerleri tüm istasyonlarda daha küçük olduğundan işlemlere CODE analiz merkezine ait veriler baz alınarak devam edilmiştir. İşlenen 48 günlük verilerden en düşük, en yüksek ve medyan standart sapma değerleri tüm istasyonlar için bulunmuş ve Çizelge 4.13'te verilmiştir.

**Çizelge 4.13.** Standart sapmaların maksimum, minimum ve medyan değerleri (birim: TECU)

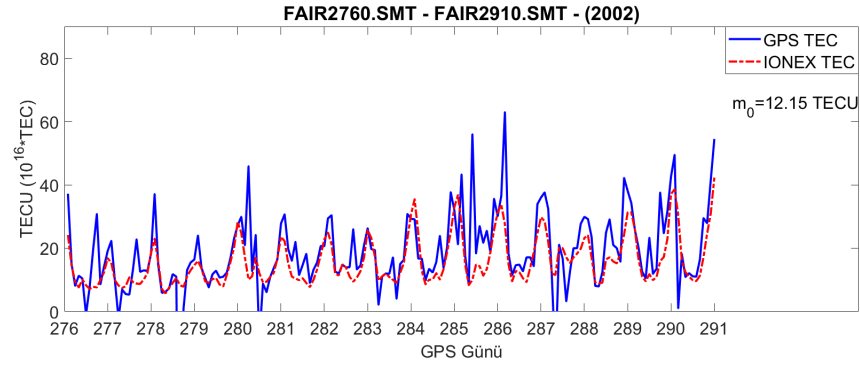
İstasyon	Maksimum $m_0$ Değeri	Minimum $m_0$ Değeri	Medyan $m_0$ Değeri
invk	7.87	1.32	3.38
fair	8.97	1.78	4.21
whit	6.83	1.37	2.89
yell	8.60	1.19	3.47
chur	5.81	1.23	3.21
albh	5.40	0.12	2.66
drao	7.99	0.96	2.07
mkea	17.62	2.53	6.50

Anomalilerin tespiti için çeyrekler arası fark bazlı hareketli ortanca yöntemi

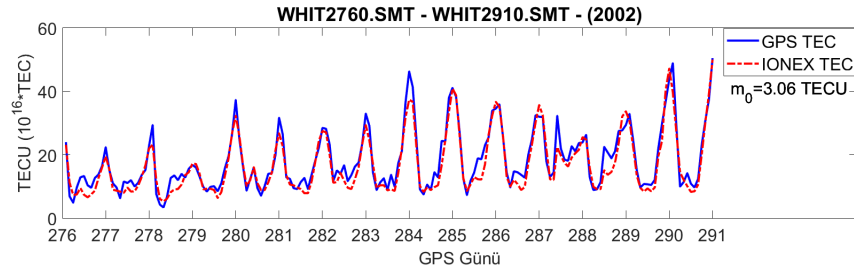
uygulanmıştır. Yöntemde, baz alınan ilk 15 günlük veriye bağlı olarak sınır değerler belirleneceği için bu ilk 15 güne ait  $m_0$  değerleri hesaplanmış ve grafikleri Şekil 4.85 - 4.92'te verilmiştir.



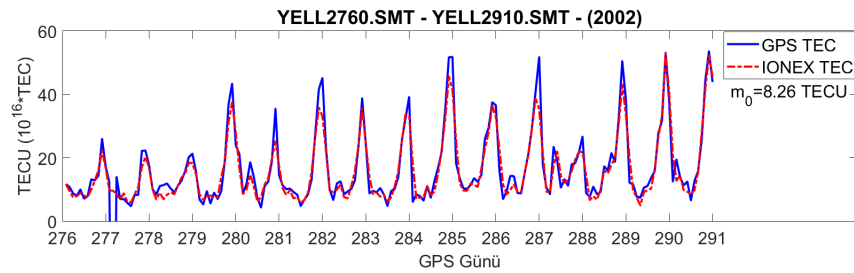
Şekil 4.85. invk istasyonu 15 günlük grafik



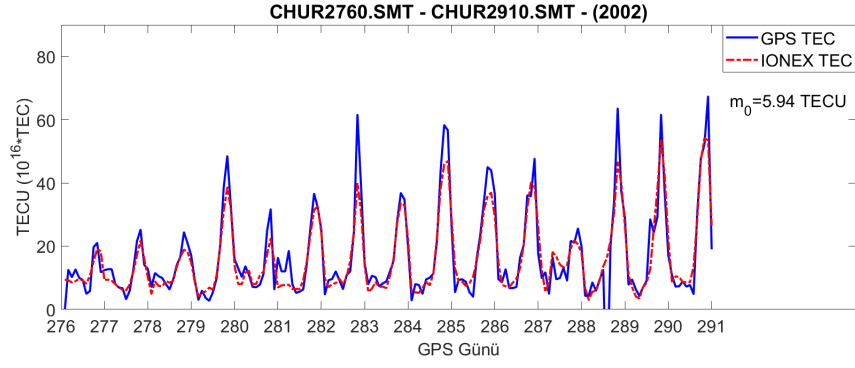
Şekil 4.86. fair istasyonu 15 günlük grafik



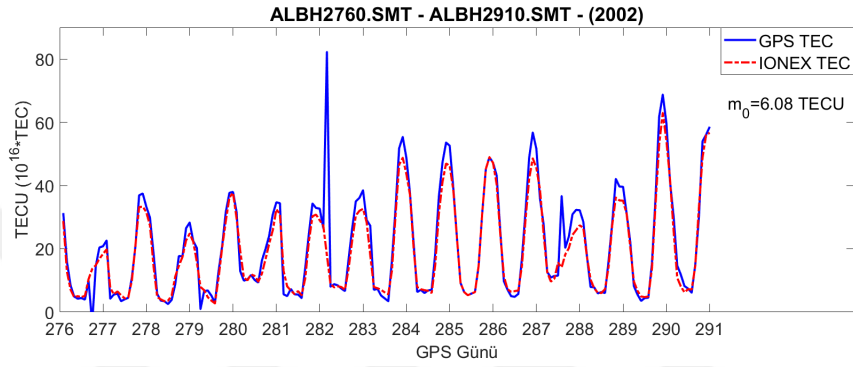
Şekil 4.87. whit istasyonu 15 günlük grafik



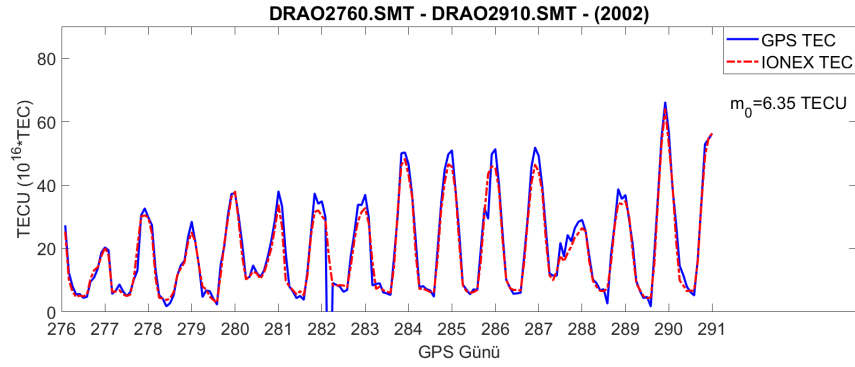
Şekil 4.88. yell istasyonu 15 günlük grafik



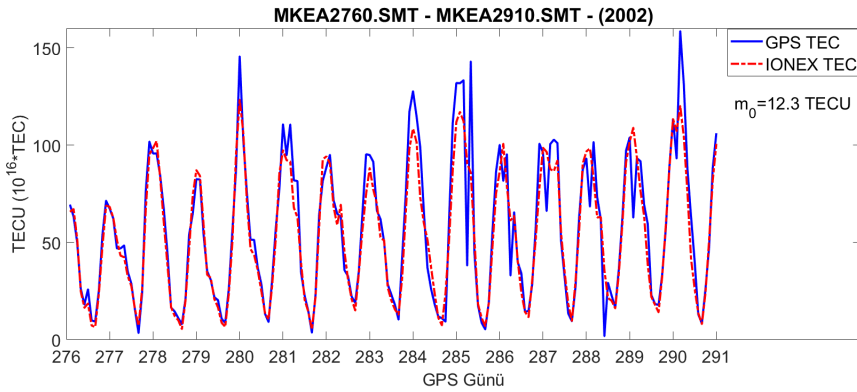
**Şekil 4.89.** chur istasyonu 15 günlük grafik



**Şekil 4.90.** albh istasyonu 15 günlük grafik

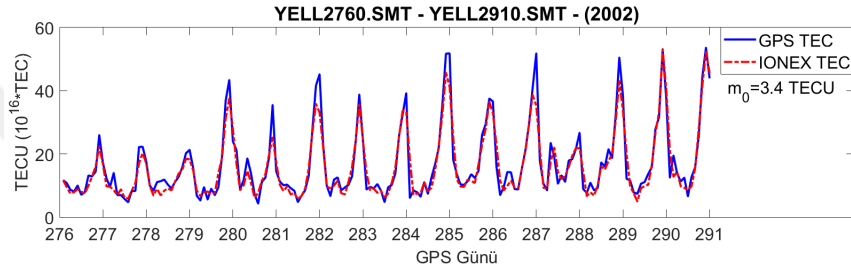


**Şekil 4.91.** drao istasyonu 15 günlük grafik

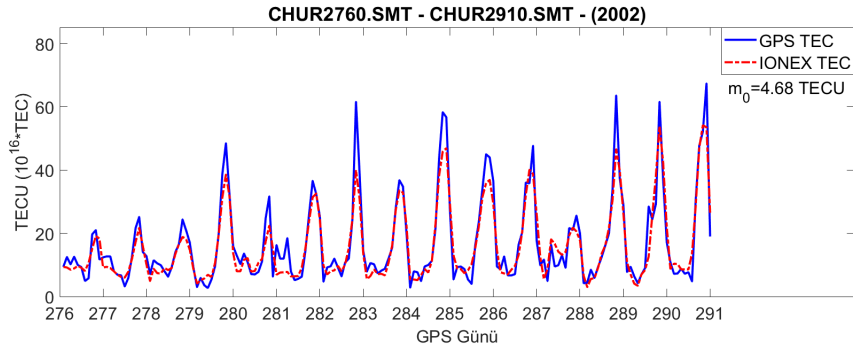


**Şekil 4.92.** mkea istasyonu 15 günlük grafik

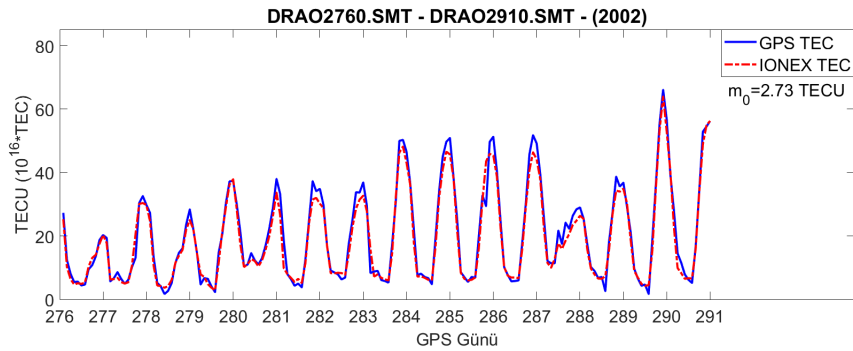
yell istasyonunda 277. GPS gününde, chur istasyonunda 276. ve 288. GPS günlerinde ve drao istasyonunda 282. GPS gününde hesaplanan TEC değerleri sıfırın altında çıkmaktadır. Ancak TEC değerleri negatif değer alamayacağından bu değerler yerine, IONEX dosyasındaki ilgili epoktaki değerler alınmıştır. Oluşturulan yeni grafikler Şekil 4.93-4.95 aralığında verilmiştir. fair istasyonunda 276, 277, 278, 280. ve 287. günlerde olmak üzere 15 gün içerisinde 5 günün değerlerinde negatif TEC değerleri bulunmaktadır. Sonraki günler için de hesaplanan TEC değerleri incelenmiş ve çok sayıda negatif değer oluştuğu görülmüştür. Bu yüzden fair istasyonu değerlendirilmelere eklenmemiştir. Negatif değerlerin görülebilmesi adına bu istasyona ait anomali grafiği Şekil 4.97'da verilmiştir.



Şekil 4.93. yell istasyonu 15 günlük grafik

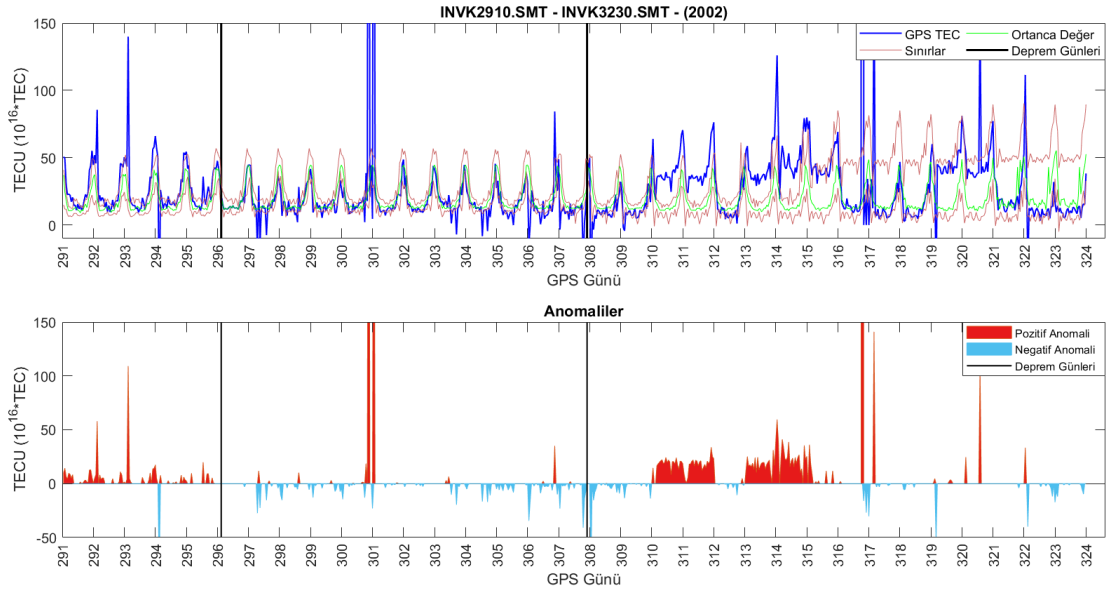


Şekil 4.94. chur istasyonu 15 günlük grafik

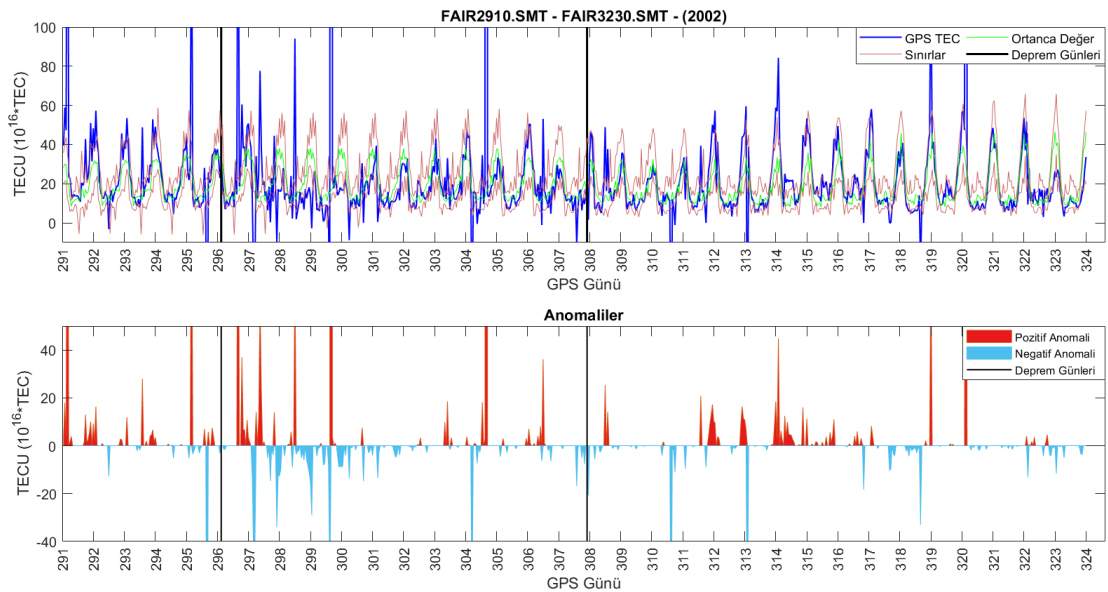


Şekil 4.95. drao istasyonu 15 günlük grafik

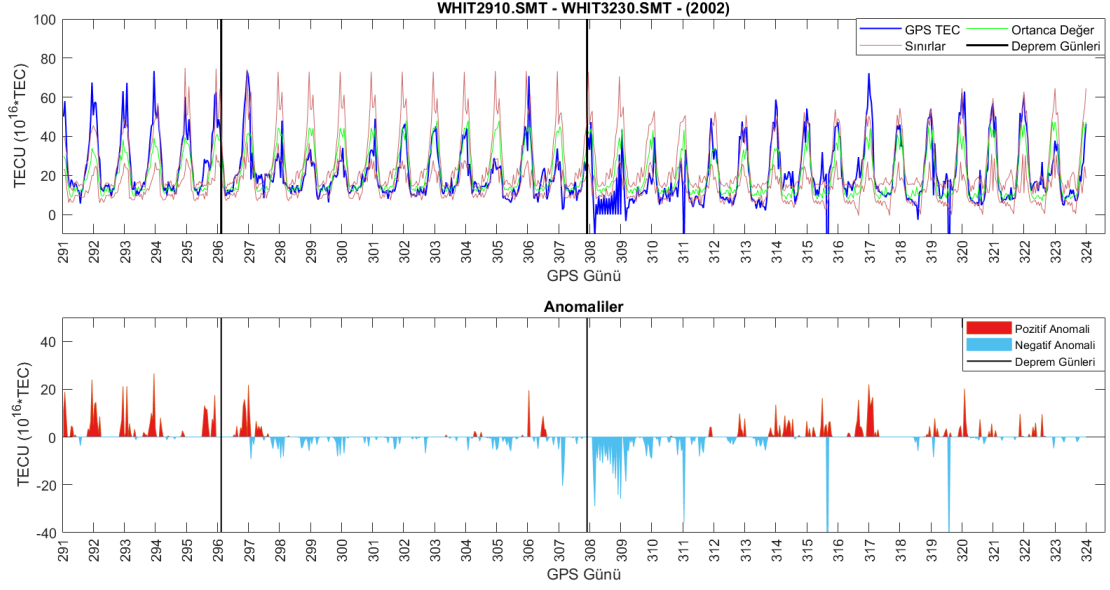
Kullanılan istasyonlara ait depremden önceki ve sonraki 16 günü içeren sınır değerleri ve anomali grafikleri Şekil 4.96 - 4.103 aralığında verilmiştir. GPS ölçmelerinden elde edilen STEC değerleri, CODE IONEX dosyalarında önerilen modifiye edilmiş tek tabaka modeli (MSLM) izdüşüm fonksiyonu uygulanarak VTEC değerlerine dönüştürülmüştür. Üst sınır değerlerini aşan GPS VTEC değerleri pozitif anomali, alt sınır değerlerini aşan değerler ise negatif anomali olarak gösterilmiştir.



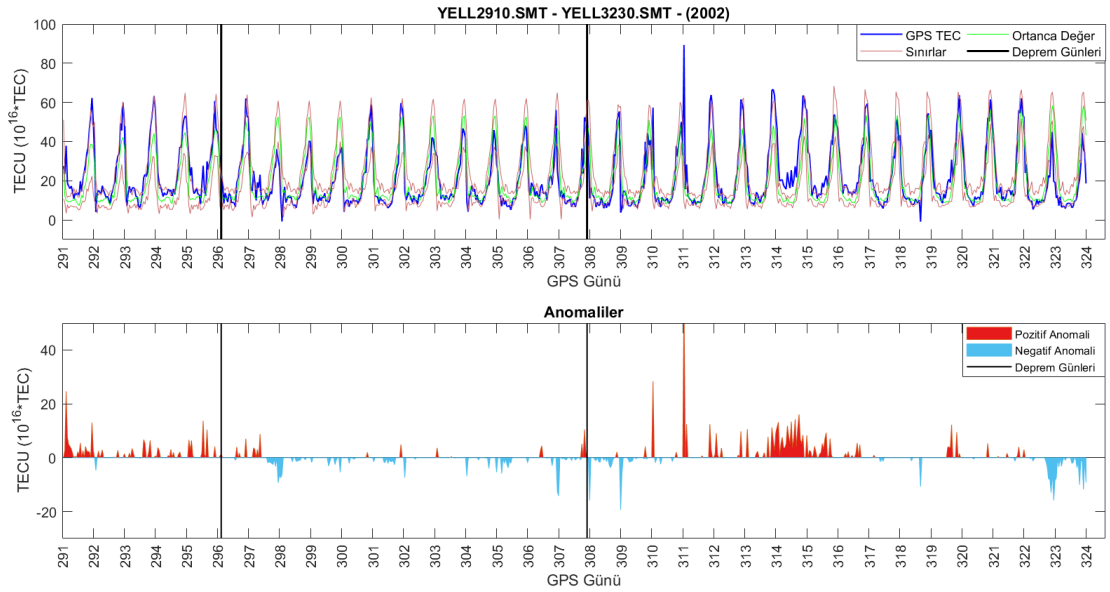
Şekil 4.96. invk istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



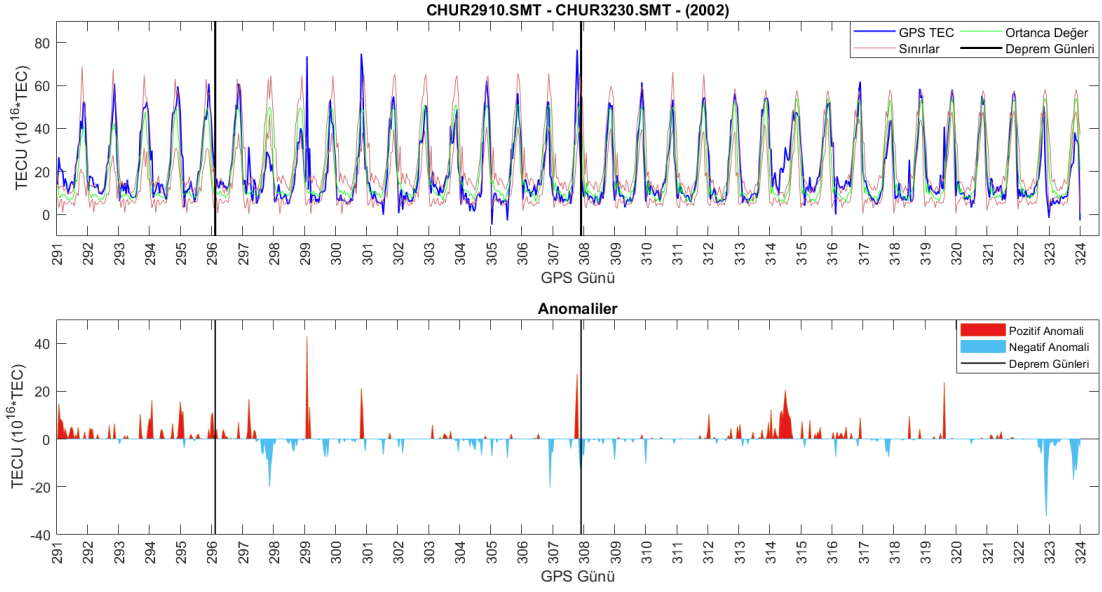
Şekil 4.97. fair istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



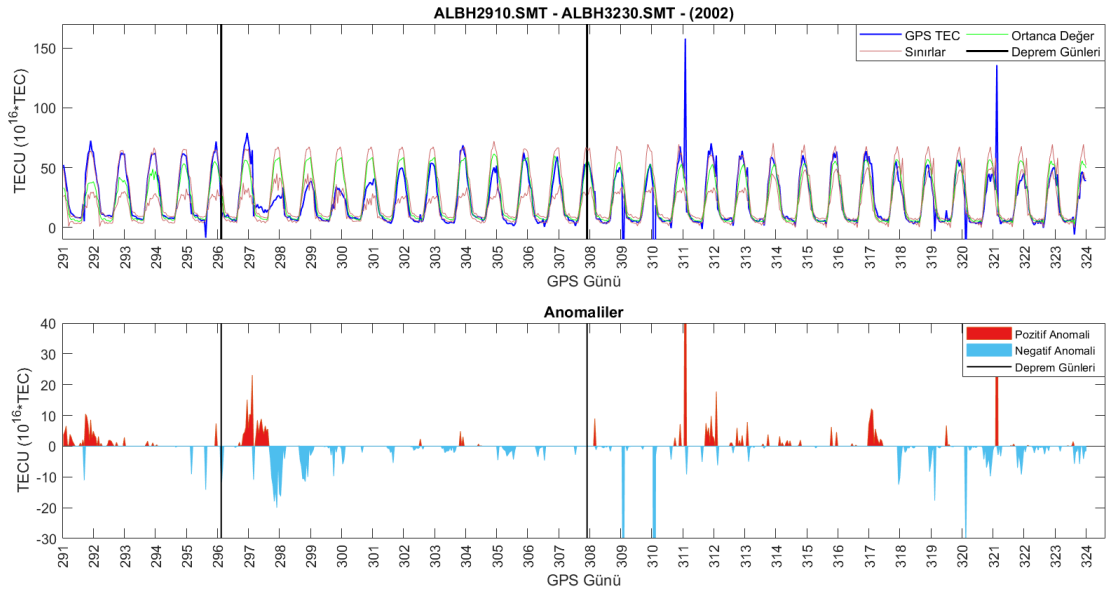
Şekil 4.98. whit istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



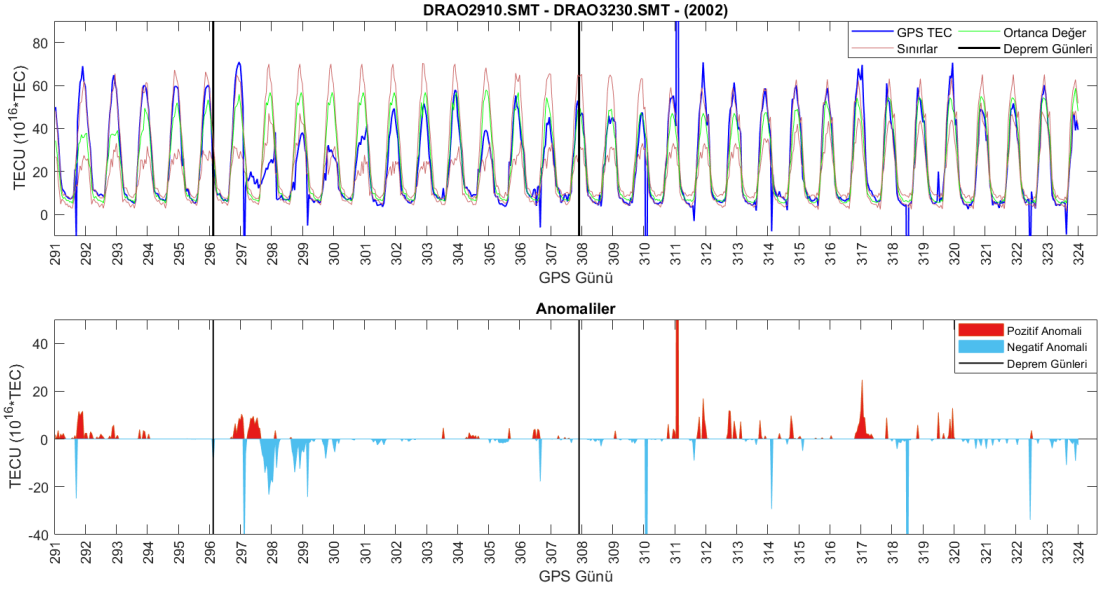
Şekil 4.99. yell istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



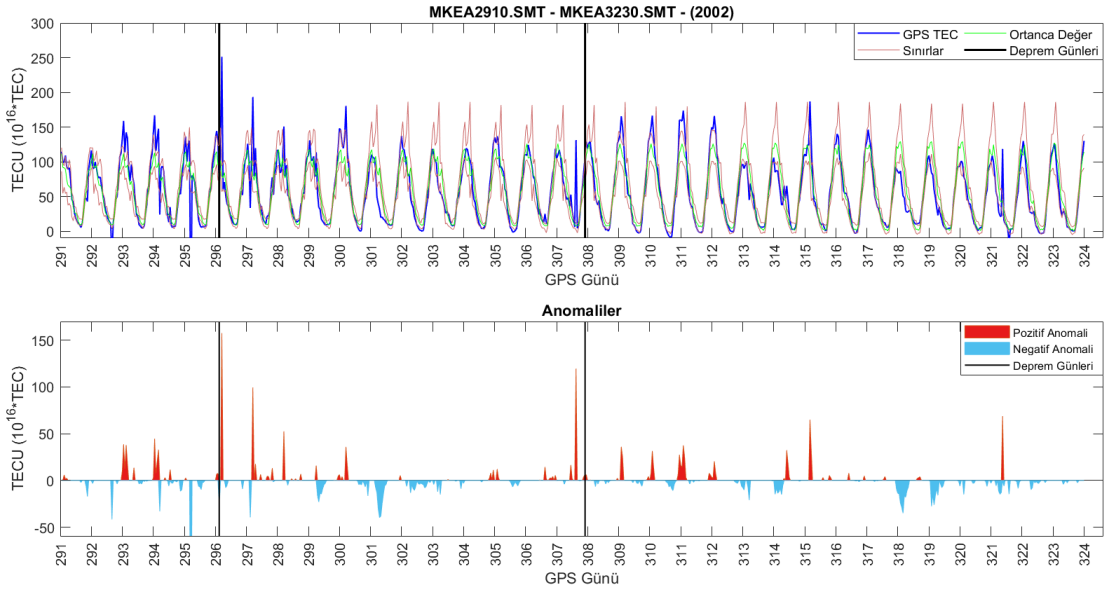
Şekil 4.100. chur istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



Şekil 4.101. albh istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



Şekil 4.102. drao istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği



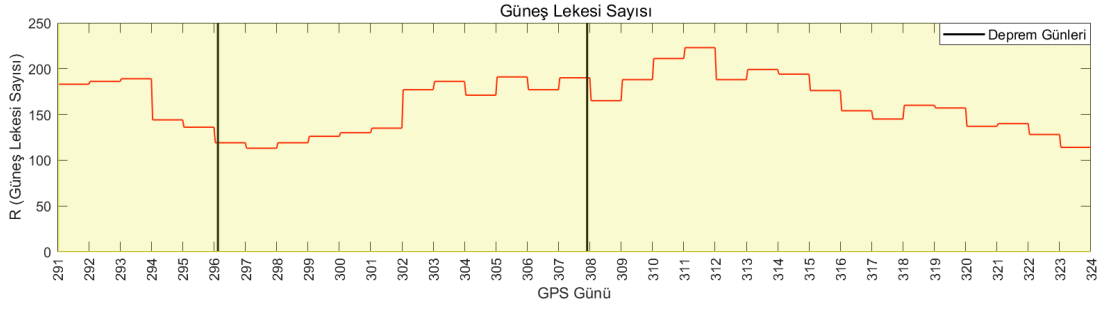
Şekil 4.103. mkea istasyonu sınır değerleri ve anomali grafiği

İstasyonlara ait VTEC anomali grafikleri incelendiğinde öncelikle yüksek TEC ve anomali miktarları göze çarpmaktadır. Deprem merkez üssüne en yakın istasyon olan fair istasyonunda çok sayıda negatif VTEC değerleri hesaplandığından dolayı anomali grafiği analizlere dahil edilmemiştir. invk istasyonunda 291-296. GPS günlerindeki pozitif anomaliler, devamında oluşan negatif anomaliler anomali trendini oluşturmaktadır. Depremden sonra 310-312. ve 313-315. GPS günlerinde görülen yoğun pozitif anomalilerin gözükmesinde, M\_DCB yazılımından o günlere

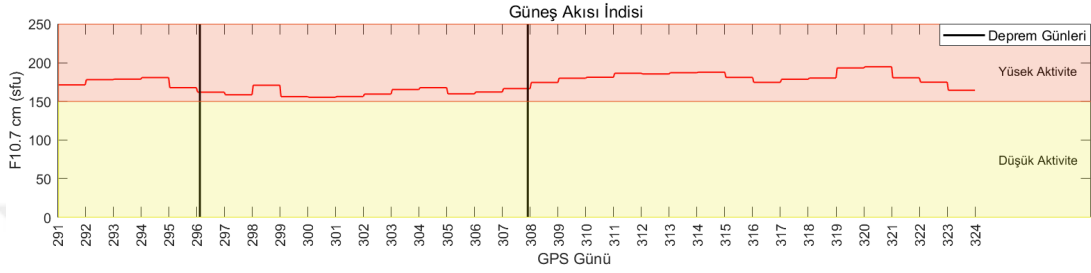


ait istasyon DCB değerlerinin sıfır bulunmasının da etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu istasyon için hesaplanan VTEC değerlerinde de fair istasyonunda olduğu gibi çok sayıda negatif değer olduğu görülmektedir. whit, yell ve deprem hazırlık alanı dışındaki chur istasyonuna ait anomali grafiklerinde deprem öncesinde öncül şoktan sonraki gün olan 297. GPS gününün ortalarına kadar olan pozitif anomaliler, sonrasında aralıklı bir şekilde devam eden negatif anomaliler dikkat çekmektedir. albh ve drao istasyonlarında gözlenen anomali grafikleri benzerdir. Konumlarının birbirlerine yakın olmaları da bu ilişkiyi oluşturmuştur. İki istasyon grafiğinde de deprem öncesinde 291-292. GPS günleri ve öncül şoktan dalgasının olduğu GPS günü 296'dan 298. GPS gününe kadar pozitif anomaliler oluşmuştur. 297. GPS günü sonlarından itibaren 300. GPS gününe kadar oluşmuş negatif anomaliler göze çarpmaktadır. Deprem hazırlık alanı dışında kalan mkea istasyonunda deprem öncesinde dağınık olarak hem pozitif hem negatif anomaliler görülmektedir. Bu istasyona ait hesaplanan GPS VTEC değerleri ve anomali değerleri diğer istasyonlara oranla çok daha fazladır. Deprem sonrasında ise whit istasyonunda depremin hemen sonrasında oluşan 312. GPS gününe kadar devam eden yoğun negatif anomaliler, 313-318. GPS günleri arasında görülen pozitif anomaliler göze çarpmaktadır. Aynı şekilde chur istasyonu grafiğinde 312-317. GPS günleri ve yell istasyonu grafiğinde 310-317. GPS günleri arasındaki oluşan pozitif anomalilerin miktarları ve her iki istasyonda da görülen 322 ve 323. GPS günlerindeki negatif anomaliler dikkat çekmektedir. Birbirlerine çok yakın olan albh ve drao istasyonlarında depremden sonra 311 ve 318. GPS günleri arasında oluşan pozitif anomaliler de benzerlik göstermiştir.

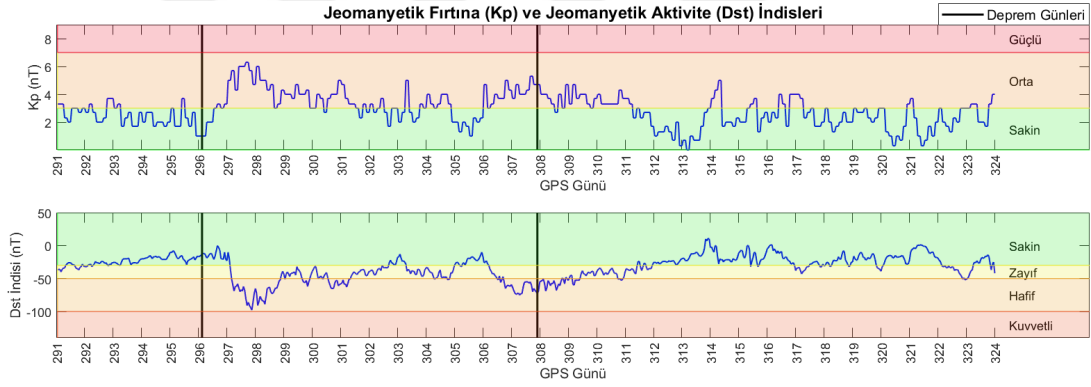
Görülen anomalilerin uzay iklim koşulları etkisi altında oluşup oluşmadığının incelenmesi adına ilgili günlere ait Güneş lekesi sayısı, Güneş akısı indisi, jeomanyetik fırtına ve aktivite indislerine ait grafikler elde edilmiş ve Şekil 4.104 - 4.107'de verilmiştir.



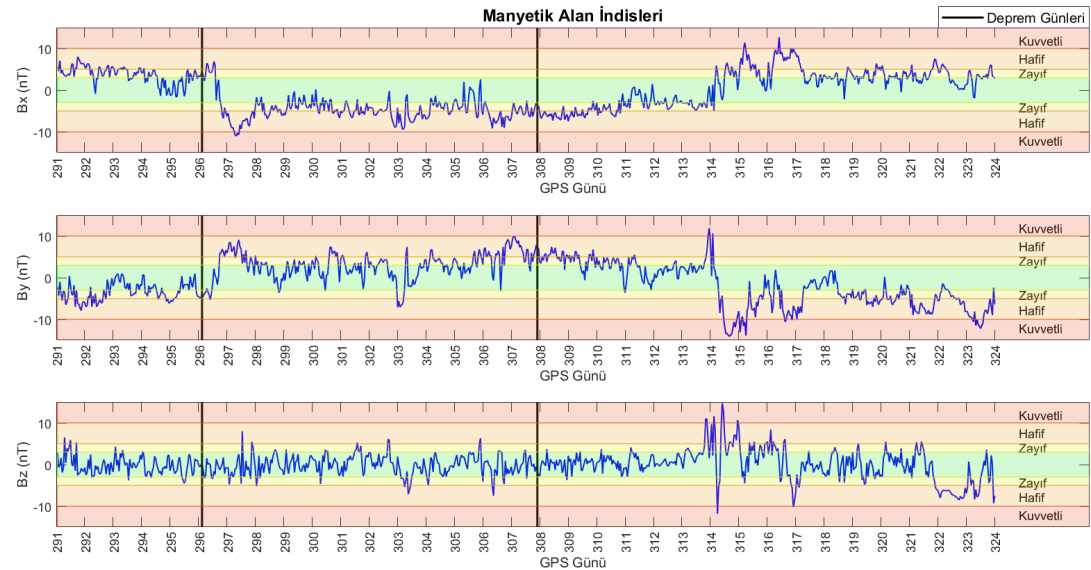
Şekil 4.104. Güneş lekesi sayısı (R)



Şekil 4.105. Güneş akısı indisi (F10.7)



Şekil 4.106. Jeomanyetik fırtına (Kp) ve Jeomanyetik Aktivite İndisi (Dst)



Şekil 4.107. Jeomanyetik Alan İndisleri (Bx, By, Bz)

Uzay iklim koşullarına ait grafikler incelendiğinde Güneş lekesi sayısı değerlerinin 100 ile 250 arasında değiştiği görülmektedir. Bölüm 3.2.2’te verilen Şekil 3.13’e tekrar bakılacak olursa 2002 yılının Güneş döngüsünün solar maksimumunda olduğu yıllardan biri olduğu ve bu dönemlerde Güneş lekesi sayılarının oldukça yüksek olduğu görülür. Dolayısıyla Güneş akısı indisi de sınır değeri aşarak incelenen tüm günlerde yüksek aktivitededir. Solar aktivitenin yoğunluğu, Dünya’ya ulaşan plazma miktarında da artışa neden olarak jeomanyetik alanda değişimleri tetiklemektedir. Jeomanyetik fırtına ve jeomanyetik aktivite indislerini incelendiğinde öncül şoktan hemen sonra 296. GPS gününden sonra oluşan hareketlilik göze çarpmaktadır. Her iki indiste de deprem gününe kadar ara ara aktivite şiddeti artarak sakin durumdan çıkmıştır. Depremden sonraki günlerde orta düzeyli jeomanyetik fırtına 312. GPS gününün başlarına kadar devam etmiştir. Devamındaki günlerde ise çoğunlukla sakin aktivite gözlenmiş olsa da ara ara yine orta dereceli fırtınaların oluşması devam etmiştir. Jeomanyetik aktivite indisinde ise indisin, depremden sonraki 4 gün içerisinde yavaşça sakin aktivite seviyesine ulaştığı, 317. GPS günü başlarında ve 322. GPS günü sonlarında zayıf aktivite seviyesinde olduğu görülmektedir. Jeomanyetik fırtına ve jeomanyetik aktivite indislerinde hareketlilik gösteren günler, manyetik alan indislerinde de açıkça gözükmemektedir. Bz bileşeninde manyetik alan değişiminin deprem öncesinde daha durağan olduğu görülse de Bx ve By bileşeni grafiklerinde öncül şok gününden sonra 296 ve 297. GPS günlerindeki ani değişimler göze çarpmaktadır. Bu bileşenler sakin, zayıf ve hafif aktivite seviyelerinde gidip gelmektedir. Deprem sonrasındaki günlerde ise üç bileşende de 314. GPS gününde oluşan ani değişimler görülmektedir. Bu değişim jeomanyetik fırtına indisinde olan ani yükselme ile de tutarlıdır. 314. GPS gününden sonraki indis değerleri düzensiz bir şekilde zayıf, sakin, hafif hatta kuvvetli aktivite seviyelerinde dolaşmaktadırlar. Solar aktivite indisi ile diğer indisler arasındaki ve uzay iklim koşulları ile TEC anomalilerinin arasındaki ilişkilerin incelenebilmesi için bu değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmış olup Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15’te verilmiştir.

**Çizelge 4.14.** Güneş akısı ile diğer indisler arasındaki korelasyonlar

$R(F10.7, R)$	$R(F10.7, Kp)$	$R(F10.7, Dst)$	$R(F10.7, Bx)$	$R(F10.7, By)$	$R(F10.7, Bz)$
0.39	-0.42	0.43	0.43	-0.36	0.14

**Çizelge 4.15.** Uzak iklim koşulları ile GPS TEC anomalileri arasındaki korelasyonlar

İstasyon	Güneş Akısı F10.7	Jeomanyetik Fırtına Kp	Jeomanyetik Aktivite Dst	Jeomanyetik Alan		
				Bx	By	Bz
invk	-0.06	0.03	-0.02	0.02	0.03	0.02
fair	0.03	0.04	-0.04	-0.02	0.03	-0.01
whit	0.02	-0.05	0.18	0.23	-0.15	0.01
yell	0.22	-0.09	0.20	0.12	-0.11	0.19
chur	0.11	-0.09	0.20	0.10	-0.10	0.17
albh	-0.02	-0.03	0.02	0.03	-0.04	-0.01
drao	0.06	0.00	0.02	0.01	-0.01	-0.04
mkea	0.01	0.05	-0.06	0.00	0.02	0.01

Güneş akısı ile diğer indisler arasındaki korelasyonlar incelendiğinde Güneş akısı ile Güneş lekesi sayısı arasında 0.39 korelasyon değeri, jeomanyetik aktivite indisi Dst arasında 0.43 korelasyon değeri, manyetik alan bileşeni Bx ile arasında 0.43 değeri ile orta seviyelerde ve manyetik alan bileşeni Bz ile arasında 0.14 değeri ile düşük seviyede pozitif bir ilişkinin olduğu, manyetik fırtına Kp indisi ile arasında -0.42 değeri, manyetik alan bileşeni By ile arasında -0.36 değeri ile orta seviyelerde negatif ilişkilerin olduğu gözlenmiştir. Anomaliler ile incelenen indisler arasındaki korelasyon değerleri incelendiğinde, whit istasyonu anomalileri ile jeomanyetik aktivite Dst indisi ile arasında 0.18, Bx indisi arasında 0.23 değerinde; yell istasyonu anomalileri ile Güneş akısı arasında 0.22, Dst indisi arasında 0.20 ve Bz indisi arasında 0.19 değerlerinde; chur istasyonu anomalileri ile Dst indisi arasında 0.20 değerinde korelasyon olduğu, diğer istasyon anomalileri ve indisleri arasındaki korelasyonların çok daha az olduğu görülmüştür. Bu değerlerden yola çıkarak solar maksimum döneminin, iyonosferdeki TEC değerlerinde yüksek miktarlarda artışa sebep olduğu ancak bu dönemin sistematik bir etki ile devam etmesinden dolayı anomali oluşmasında etkisinin olmadığı söylenebilir. Deprem öncesinde oluşan VTEC anomalileri ise öncül şok dalgasının etkisi ile meydana gelen anomaliler olarak yorumlanabilir. Bu durumda öncül şok dalgasından önce gözlemlenen çoğunlukla pozitif olan TEC anomalileri deprem öncülü olarak değerlendirilebilir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, deprem öncesinde iyonosferde meydana gelen anomalilerin deprem öncülü olarak ele alınabilirliği incelenmiştir. Deprem etki alanındaki ve dışındaki IGS istasyonlarına ait veriler, uydu efemeris verileri, iyonosfer verileri ve uzay iklim koşullarını gösteren indislere ait veriler kullanılmıştır. Faz gözlemleri ile yumuşatılmış kod ölçüleri kullanılarak elde edilen GPS TEC değerleri, IGS ve CODE olmak üzere iki analiz merkezine ait IONEX dosyalarındaki TEC değerleri ile karşılaştırılmış, doğrulukları incelenmiş ve hesaplanan GPS TEC değerlerinin kullanılabilir olduğu kabul edilmiştir. Ardından çeyrekler arası fark bazlı hareketli ortanca yöntemi için seçilen kayan pencere zaman dilimine (15 gün) ait doğruluk analizi yapılarak  $m_0$  değerleri bulunmuştur. Bu ilk 15 günün verileri temel alınarak oluşturulan sınır grafikleri anomali miktarlarının oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda hesaplanan GPS TEC değerleri sınır değerleri ile karşılaştırılmış ve anomali grafikleri oluşturulmuştur. İyonosferdeki TEC değişimlerinin ana kaynağı olan uzay iklim koşulları irdelenerek deprem öncesi ve sonrası günlerde yüksek aktivite olan günlerin olup olmadığı araştırılmıştır. Anomaliler ile uzay iklim koşulları arasındaki ilişkinin daha iyi tanımlanabilmesi açısından aralarındaki korelasyon katsayıları hesaplanarak yorumlanmıştır. Solar aktivite etkisinin olmadığı günlerde oluşan TEC anomalilerinin deprem öncülü olarak değerlendirilebileceği ortaya konmuştur.

Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre incelenen depremlere ait kullanılan istasyonları için hesaplanan TEC değerleri ile IGS ve CODE analiz merkezlerine ait IONEX dosyalarındaki değerlerin karşılaştırılmasında, neredeyse tüm istasyonlarda CODE analiz merkezine ait IONEX dosyasındaki değerler ile çok daha uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. 2019 yılında gerçekleşen Kaliforniya depremi için örnek alınan 155. GPS gününe ait istasyonlar için hesaplanan GPS-TEC değerleri ile CODE analiz merkezi IONEX dosyası TEC değerleri karşılaştırılmasında 0.77-2.12 TECU arasında değişen standart sapmalar bulunurken IGS IONEX dosya TEC değerleri karşılaştırılmasında standart sapmalar 0.80-4.42 TECU arasındadır. 2021 yılında gerçekleşen Chignik/Alaska depremi için örnek alınan 180. GPS gününe ait istasyonlar için hesaplanan GPS-TEC değerleri ile CODE analiz merkezi IONEX

dosyası TEC değerleri karşılaştırmasında 0.81-2.19 TECU arasında değişen standart sapmalar bulunurken IGS IONEX dosya TEC değerleri karşılaştırmasında standart sapmalar 1.87-6.16 TECU arasındadır. 2002 yılında gerçekleşen Denali/Alaska depremi için örnek alınan 280. GPS gününe ait istasyonlar için hesaplanan GPS-TEC değerleri ile CODE analiz merkezi IONEX dosyası TEC değerleri karşılaştırmasında 1.37-3.91 TECU arasında değişen standart sapmalar bulunurken IGS IONEX dosya TEC değerleri karşılaştırmasında standart sapmalar 4.01-21.57 TECU arasındadır. Bu yüzden VTEC anomalilerinin hesaplanmasında üç deprem için de CODE analiz merkezine ait iyonosfer dosyasındaki parametreler kullanılmıştır.

Anomali grafikleri ve anomalilerin uzay iklim koşulları ile arasındaki ilişkiler incelendiğinde solar minimum dönemlerinden biri olan 2019 yılındaki Kaliforniya depreminde, deprem öncesinde ve sonrasında çoğunlukla maksimum 4 TECU'ya ulaşan pozitif ve negatif anomaliler görülmüştür. Depremden önceki günlerde depremin merkez üssüne yakın olan ve deprem hazırlık alanı içerisinde kalan istasyonlarda süreklilikleri daha fazla olan anomaliler göze çarpmıştır. Oluşan anomaliler ile jeomanyetik aktivite indisi Dst ve jeomanyetik alan By bileşeni arasında 0.20'lere ulaşan korelasyon değerleri bulunmaktadır. Ancak Güneş akısı indisi (F10.7) ile jeomanyetik fırtına (Kp), jeomanyetik aktivite (Dst) ve jeomanyetik alan (B) indisleri arasındaki ilişki çok düşüktür ve deprem öncesinde F10.7, Kp ve Dst indisleri sakin aktivitede görülmektedir. Manyetik alan bileşenlerinde ise az sayıda hafif aktiviteye ulaşan günler görülmüştür. Ancak manyetik alan değişimlerinin sadece solar aktivite kaynaklı olmayabileceği, sismik etkiler ile de aktivite değerlerinde hareketliliklerin oluşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Buna göre oluşan anomalilerin uzay iklim koşullarından bağımsız gerçekleştiği ve deprem öncülü olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir. Yine solar minimum dönemlerinden biri olan 2021 yılında gerçekleşen Chignik/Alaska depreminde deprem öncesinde ve sonrasında çoğunlukla maksimum 5-6 TECU'ya ulaşan pozitif ve negatif anomaliler görülmüştür. Depremden önceki 10 gün boyunca oluşan pozitif anomaliler ve depremden 2 gün öncesinde anomali değerlerindeki yükseliş kullanılan bir çok istasyonda görülmüştür. Deprem öncesi dönemde F10.7 indisi düşük aktivitededir ancak yaklaşık 70 sfu değerinden 100 sfu değerlerine varan bir yükseliş

görülmektedir. Bu indis ile Kp ve Dst indisleri arasındaki ilişki yok denecek kadar az çıkmıştır ancak jeomanyetik alan bileşenleri ile arasında -0.13 ile -0.14 değerlerinde, VTEC anomalileri arasında ise 0.34'e varan korelasyonlar olduğu görülmüştür. F10.7 indisi ile anomali grafikleri karşılaştırıldığında indiste oluşan yükseliş ile anomalilerdeki değişimlerin aynı trendde ilerlediği görülmüştür. Ancak depremden önceki 2 gün boyunca görülen F10.7 indisindeki düşüş ile anomali değerlerinin ilerleyişi farklılık göstermiştir. Bu günlerde oluşan anomalilerdeki artışın, deprem öncülü olarak ele alınabileceği belirtilmiştir. Son olarak solar maksimum dönemlerden biri olan 2002 yılında gerçekleşen Denali/Alaska depreminde deprem öncesinde ve sonrasında çoğunlukla maksimum 20 TECU değerlerine varan pozitif ve negatif anomaliler görülmüştür. Bu deprem için hesaplanan TEC ve anomali değerleri diğer iki depremler için elde edilen değerlerden çok daha fazladır. Bunun sebebi, solar maksimum dönemlerinde oluşan Güneş patlamaları ve koronal kütle atım miktarlarının çok yüksek seviyelere ulaşmasıdır. Depremden önceki 9 gün boyunca oluşan negatif anomaliler ve ondan önceki günlerde oluşan pozitif anomaliler dikkat çekmektedir. F10.7 indisi ile Kp, Dst, B indisleri arasında diğer iki depremden görülen ilişkiden çok daha yüksek değerlerde korelasyon görülmüştür. Depremden 10 gün öncesinde meydana gelen öncül şok dalgası ile Kp indisinde orta seviyeye ulaşan jeomanyetik fırtına, Dst ve B indislerinde hafif aktivite seviyesine ulaşan ani değişimler görülmüştür. Güneş akısı ile anomali değerleri arasındaki korelasyon katsayıları ise oldukça düşüktür. Bu durum solar maksimum döneminin, TEC anomalilerinde etkisinin olmadığını gösterir. Öncül şoktan önce gözlenen anomalilerin deprem öncülü olarak değerlendirilebileceği, sonrasında gözlenen anomalilerin ise öncül şok etkisi ile oluştuğu söylenebilir.

Bu tez çalışması, modellenecek deprem tahmini sistemleri için iyonosferik anomalilerin girdi parametresi olarak kullanılması adına bir örnek oluşturmaktadır. Daha yüksek doğruluklu sonuçların elde edilebilmesi için faz gözlemleri ile TEC değerlerinin belirlenmesi, istasyon sayısının ve zamansal çözünürlüklerinin artırılması, yüksek doğruluk ve zamansal çözünürlükte DCB değerlerinin belirlenmesi, iyonosfer tabakasına en uygun enterpolasyon yöntemlerinin seçilerek uygulanması ve çok disiplinli çalışmalar ile kombine edilmiş, farklı öncüllerin gerçek zamanlı tespit edilebileceği modellerin oluşturulması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Ammar, M., Aquino, M, Vadakke Veettil, M and Andreotti, M., 2018, Estimation and analysis of multi-GNSS differential code biases using a hardware signal simulator, *GPS Solutions*, 22-32.
- Başçiftçi, F., 2017, GNSS Verileri Kullanılarak İyonosfer Modelinin Oluşturulması ve Global Modellerle Karşılaştırılması, Doktora, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Selçuk Üniversitesi.
- Bruevich, E. A., Bruevich, V. V. and Yakunina, G. V., 2014, Changed Relation between Solar 10.7-cm Radio Flux and some Activity Indices which describe the Radiation at Different Attitudes of Atmosphere during Cycles 21-23, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 35, 1-15.
- Canyılmaz, M., Akdoğan, T. ve Güzel, E., 2016, Ölçülen ve IRI Modeli ile Elde Edilen İyonküre Kritik Frekansının (foF2) Karşılaştırılması, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P. and Fridez, P., 2015, Bernese GNSS Software Version 5.2, *Astronomical Institute*, University of Bern.
- Dobrovolsky, I. P., Zubrov, S. I. and Miachkin, V. I., 1979, Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones, *Birkhäuser Verlag*, Basel, 117, 1025-1044.
- EC, 2016, European GNSS (Galileo) Open Service Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users, *European Commission*, 1.2.
- Freund, F. T., Takeuchi, A. and Lau, B. W.S., 2005, Cracking the Code of Pre-Earthquake Low Frequency EM Emissions.
- Green, J. L. and Boardsen, S., 2005, Duration and extent of the great auroral storm of 1859, *Advances In Space Research*, 38, 130-135.
- Gültekin, M. ve Hacıkamiloğlu, E., 2013, Radon Gazı, Granit ve Kanser, Kanser Değerlendirme Raporları, *Rapor No:13, Türkiye Halk Sağlığı Kurumu, Kanser Daire Başkanlığı*.
- El-Gzawy and M. L., 2003, Development of an Ionosphere Monitoring Technique Using GPS Measurements for High Latitude GPS Users, Master, *Calgary Üniversitesi*.
- Hohensinn, R. M., 2019, Detection of Hazardous Ground Movements with Instantaneous Velocity Estimates by GNSS, Doctorate, ETH Zurich.
- İnyurt, S., 2019, İyonosferik TEC Dalgalanmalarının (Manyetik Fırtına, Solar Aktivite ve Deprem Kaynaklı) Uydu Bazlı Konumlama Sistemleriyle Araştırılması, Doktora, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi.
- IONOLAB, 2022, İyonosfer Hakkında Bilgi [online], İyonosfer Araştırma Laboratuvarı, <http://www.ionolab.org/index.php?page=ionosphere&language=tr>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].



- Jacobs, G., 2011, Scientist Interview-Friedemann Freund-The Future of Forecasting Earthquakes <https://www.seti.org/scientist-interview-friedemann-freund-future-forecasting-earthquakes>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- Jyh-Woei, L., 2011, Use of principal component analysis in the identification of the spatial pattern of an ionospheric total electron content anomalies after China's May 12, 2008, M=7.9 Wenchuan earthquake, *Advances in Space Research*, 47, 1983-1989.
- Jin, R., Jin, S. and Feng, G., 2012, M.DCB: Matlab code for estimation GNSS satellite and receiver differential code biases, *GPS Solutions*, 16, 541-548.
- Kahveci, M., 1997, Türkiye Koşullarında Yapılan GPS Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması, Doktora, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kahveci, M. ve Yıldız, F., 2021, GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri: Teori-Uygulama, güncellenmiş 11. basım, *Nobel Yayıncılık*, Ankara.
- Kahveci, M. Tuşat, E. ve Doğanalp, S., 2021, Jeodezik Koordinat Sistemleri Teori ve Uygulama, 1. basım, *Nobel Yayıncılık*, Ankara.
- Karaboga, T., Canyılmaz, M. and Ozcan, O., 2018, Investigation of the relationship between ionospheric foF2 and earthquakes, *Advances in Space Research*.
- KOERI, 2022, Bizim Yıldızımız: Güneş, <http://www.koeri.boun.edu.tr/astronomy/bilgiler.htm>, [Ziyaret Tarihi: 01.12.2021].
- KOERI, 2022, Depremle İlgili Teknik Bilgiler, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/bilgi/depremnedir/index.htm>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- Korsunova, L. P., Legenka, A. D. and Hegai, V. V., 2018, Possible Short-Term Ionospheric Precursors of Strong Crustal Earthquakes, Problems of Geocosmos-2018, *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, 207-214.
- Leonard, R. S. and Barnes Jr., R. A., 1965, Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 70(5), 1250-1253.
- Liu, Z., Gao, Y. and Skone, S., 2005, A study of smoothed TEC precision inferred from GPS measurements, *Earth Planets Space*, 57, 999-1007.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chen, C. H., Liu, C. Y., Chen, C. Y., Nishihashi, M., Li, J. Z., Xia, Y. Q., Oyama, K. I., Hattori, K. ve Lin, C. H., 2009, Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 114, A04320.
- Mylnikova, A. A., Yasyukevich, Y. V., Kunitsyn, V. E. and Padokhin, A. M., 2015, Variability of GPS/GLONASS differential code biases, *Results in Physics*, 5, 9-10.

- NASA Goddard Space Flight Center, 2022, Sunspots and Solar Flares, <https://spaceplace.nasa.gov/solar-activity/en/>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- NASA Space Place, 2022, What Is Space Weather?, <https://spaceplace.nasa.gov/spaceweather/en/>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- Nastese, E., Oikonomou, C., Toma-Danilla, D. ve Haralambous, H., 2016, Investigation of ionospheric precursors of earthquakes in Romania using the Romanian GNSS/GPS network, *Romanian Journal of Physics*, 61(7-8), 1426-1436.
- Nayir, H., Arıkan, F., Erol, C. B. ve Arıkan, O., İONOLAB Tekniği ile İyonosferi Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, [http://repository.bilkent.edu.tr/bitstream/handle/11693/26933/Ionospheric%20total%20electron%20content%20estimation%20using%20IONOLAB%20method%20\[IONOLAB%20tekni%20i%20ile%20i%20yonosfer%20toplami%20elektron%20i%20%20E7erigi%20kestirimi\].pdf?sequence=1](http://repository.bilkent.edu.tr/bitstream/handle/11693/26933/Ionospheric%20total%20electron%20content%20estimation%20using%20IONOLAB%20method%20[IONOLAB%20tekni%20i%20ile%20i%20yonosfer%20toplami%20elektron%20i%20%20E7erigi%20kestirimi].pdf?sequence=1), [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- NOAA Space Weather Prediction Center, 2022, Solar Wind, <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-wind>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- Özsöz, İ. ve Pamukçu Ankaya, O., 2021, Detection and interpretation of precursory magnetic signals preceding October 30, 2020 Samos earthquake, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30, 748-757.
- Pulinets, S. A., Legen'ka A. D. and Alekseev, V. A., 1994, Edited by H. Kikuchi, Pre-earthquakes effects and their possible mechanisms, Dusty and Dirty Plasmas. Noise. and Chaos in Space and in the Laboratory, *Plenum Press*, Newyork, 545-557.
- Pulinets, S. A., Ouzounov, D., Ciraolo, L., Singh, R. Cervone, G., Leyva, A., Dunajacka, M., Karelin, A. V., Boyarchuk, K. A. and Kotsarenko, A., 2006, Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003, *Annales Geophysicae*, 24, 835-849.
- Pulinets, S. A. and Ouzounov, D., 2010, Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model- An unified concept for earthquake precursors validation, *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 371-382.
- Reda, I and Andreas, A., 2008, Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, Technical Report, *National Renewable Energy Laboratory*, Midwest Research Institute, Colorado.
- Saradjian, M. R. and Akhoondzadeh, M., 2011, Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1109-1119.
- Schaer, S., 1999, Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System, Doctorate, *Astronomisches Institut*, der Universität Bern.

- Schaer, S., Gurtner, W. and Feltens, J., 2015, IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1.1.
- Schnepf, N. R., Minami, T., Toh, H. and Nair, M. C., 2022, Magnetic Signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption, *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL098454.
- Seeber, G., 2003, Satellite Geodesy, *Walter de Gruyter*, Berlin-New York.
- Sharma, A. K., Gurav, O. B., Bose, A., Gaikwad, H. P., Chavan, G. A., Santra, A., Kamble, S. S. and Vhatkar, R. S., 2019, Potential of IRNSS/NavIC L5 signals for ionospheric studies, *Advances in Space Research*.
- Şentürk, E. ve Çepni, M. S., 2018, 2016 yılı 6 Mw  $\geq$  7.0 Depremin İyonküre Değişimlerinin İncelenmesi, *Geomatik Dergisi*, 3(1), 35-47.
- Şentürk, E., 2018, Türkiyedeki Depremlerin Sismik-İyonosferik Öncüllerinin GPS/GNSS Ölçüleriyle Zamansal, Mekansal, Spektral ve İstatistiksel Olarak İncelenmesi, Doktora, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli Üniversitesi.
- Ulukavak, M., 2016, Ekvatorial ve Orta Kuşak Depremleri ile İyonosferik TEC Anomalileri Arasındaki İlişkinin Araştırılması, Doktora, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- URL-1 <https://cdis.nasa.gov/index.html>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-2 <http://ftp.aiub.unibe.ch>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-3 <https://spdf.gsfc.nasa.gov/index.html>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-4 [https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/m\\_dcb.htm](https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/m_dcb.htm), [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-5 <http://www.bernese.unibe.ch>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-6 <https://www.geocosmo.net/science>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-7 [https://lasp.colorado.edu/lisird/data/cls\\_radio\\_flux\\_f107/](https://lasp.colorado.edu/lisird/data/cls_radio_flux_f107/), [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-8 <https://www.usgs.gov/media/images/2019-ridgecrest-california-earthquake-sequence>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-9 <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-ak2020-21.html>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-10 <https://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-releases-images-of-mid-level-solar-flare/>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- URL-11 [http://ds.iris.edu/aed2/c/alaska/popups/tectonics/tec\\_2\\_central.html](http://ds.iris.edu/aed2/c/alaska/popups/tectonics/tec_2_central.html) [Ziyaret Tarihi: 10.06.2022].
- URL-12 <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2022].

- URL-13 <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/faults>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2022].
- Wald, L. ve Collet, C., 2021, The 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence, USGS Response and Findings after the M6.4 on July 4 and M7.1 on July 6, 2019 in Searles Valley, Southern California, <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-ridgecrest.html>, [Ziyaret Tarihi: 01.05.2022].
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., and Tian, D., 2019, The Generic Mapping Tools version 6, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564.
- Xie, T., Chen, B., Wu, L., Dai, W., Kuang, C. and Miao, Z., 2021, Detection Seismo-Ionospheric Anomalies Possibly Associated With the 2019 Ridgecrest (California) Earthquakes by GNSS, CSES, and Swarm Observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(9), 1-27.

