



Investigation of Ionosphere Anomalies due to Earthquakes

Osman Batur Celik ¹ and Bahadır Aktug ¹

¹ Ankara University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, 06830 Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0003-0813-1219, 0000-0002-7995-4477

Keywords

Ionosphere, Earthquake, GPS, VTEC, Earthquake precursor

Highlights

- * Analysis of pre-earthquake ionospheric changes
- * Use of high-precision GPS data
- * Natural Disaster Research

Aim

The aim of this study is to investigate the potential relationship between earthquakes and ionospheric anomalies

Location

Türkiye

Methods

High-precision GPS data analysis and modeling techniques based on the Single Layer Ionosphere Model were employed to calculate Total Electron Content and Slant Total Electron Content values

Results

The study revealed a potential relationship between pre-earthquake crustal deformation and ionospheric changes, providing insights into earthquake prediction. Further research and the development of comprehensive models are essential to harness the full potential of ionospheric changes as precursors to earthquakes

Supporting Institutions

The author(s) declared that this study has used no support data from other institutions : AFAD, MTA, TUSAGA

Financial Disclosure

Financial support was received within the scope of the project numbered UDAP-Ç-19-32

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare

How to cite:

Celik O.B., Aktug B., 2024. Investigation of Ionosphere Anomalies due to Earthquakes, Turk Deprem Arastirma Dergisi 6(2), 329-348, <https://doi.org/10.46464/tdad.1461932>.

Manuscript

Research Article

Received: 03.04.2024

Revised: 05.08.2024

Accepted: 19.08.2024

Printed: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1461932



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Osman Batur Celik

Email: obcelik@ankara.edu.tr

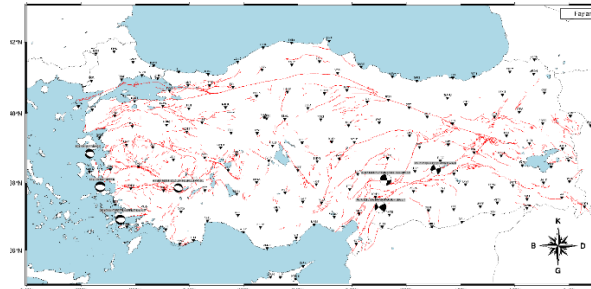


Figure
Map of earthquakes used in the study



Deprem Kaynaklı Olabilecek İyonosfer Anomalilerinin Araştırılması

Osman Batur Çelik¹ ve Bahadır Aktuğ¹

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 06830 Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0003-0813-1219, 0000-0002-7995-4477

ÖZET

Bu çalışmada, depremlerle ilişkili iyonosferik anomaliler incelenmiş ve 2017-2023 yılları arasında gerçekleşmiş $M_w \geq 6$ büyüklüğündeki depremler ele alınmıştır. Deprem verileri AFAD ve KRDAE kataloglarından, iyonosfer verileri ise TUSAGA-Aktif, NASA ve IGS gibi veri servislerinden temin edilmiştir. Toplam Elektron İçeriği (TEİ) yöntemi ile depremler öncesi ve sonrası 14 günlük periyotlarda iyonosferik değişiklikler analiz edilmiştir. 1964 Alaska depreminden sonra ortaya atılan Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) modeli, depremler öncesinde iyonosferde gözlemlenen değişikliklerin deprem tahmini için kullanılabilirliğini öne sürmektedir. Bu model doğrultusunda yapılan çalışmada, depremler öncesi iyonosferde çeşitli yükselişler ve alçalışlar gözlemlenmiştir. Ancak, bu anomalilerin depremlerle doğrudan bir ilişkisinin olup olmadığı kesin olarak belirlenememiştir. Bulgular, iyonosferik anomalilerin deprem tahmininde potansiyel bir gösterge olarak kullanılabilirliğini işaret etmekle birlikte, daha fazla veri ve analiz gerekliliğini ortaya koymaktadır. Deprem öncesi iyonosferde gözlemlenen bu değişikliklerin daha iyi anlaşılması ve kesin sonuçlara varılması için ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar kelimeler

İyonosfer, Deprem, KKS, VTEC, Deprem tahmini

Öne Çıkanlar

- * İyonosferdeki deprem öncesi değişikliklerin analizi
- * Yüksek hassasiyetli KKS verilerinin kullanımı
- * Doğal Afet Araştırmaları

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.04.2024
Düzeltilme: 05.08.2024
Kabul: 19.08.2024
Basım: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1461932

Sorumlu yazar

Osman Batur Çelik
Eposta: obcelik@ankara.edu.tr

Investigation of Ionosphere Anomalies due to Earthquakes

Osman Batur Celik¹ and Bahadır Aktug¹

¹ Ankara University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, 06830 Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0003-0813-1219, 0000-0002-7995-4477

ABSTRACT

In this study, ionospheric anomalies associated with earthquakes are analyzed and earthquakes with a magnitude of $M_w \geq 6$ between 2017 and 2023 are considered. Earthquake data were obtained from AFAD and KOERI catalogs, while ionospheric data were obtained from data services such as TUSAGA-Aktif, NASA and IGS. Ionospheric changes in 14-day periods before and after the earthquakes were analyzed with the Total Electron Content (TEC) method. After the 1964 Alaska earthquake, the Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model suggests that changes observed in the ionosphere before earthquakes can be used for earthquake prediction. In the study conducted in line with this model, various rises and falls in the ionosphere were observed before earthquakes. However, it could not be determined whether these anomalies are directly related to earthquakes. The findings suggest that ionospheric anomalies can be used as a potential indicator for earthquake prediction, but more data and analysis are needed. Further research is needed to better understand these changes observed in the ionosphere before earthquakes and to draw definitive conclusions.

Keywords

Ionosphere, Earthquake, GPS, VTEC, Earthquake Precursor

Highlights

- * Analysis of pre-earthquake ionospheric changes
- * Use of high-precision GPS data
- * Natural Disaster Research

Manuscript

Research Article

Received: 03.04.2024
Revised: 05.08.2024
Accepted: 19.08.2024
Printed: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1461932

Corresponding Author

Osman Batur Celik
Email: obcelik@ankara.edu.tr

Şekil 1'de bulunan LAIC modelini maddeler halinde açıklanırsa:

- Depremlerin ana kaynağı, tektonik plakaların hareketi ve tektonik aktivitedir.
- Fay hatlarının hareketi, yer kabuğunda gaz göçünü artırır.
- Radon gazı da dahil olmak üzere farklı gazlar aktif fay hatlarından salınır.
- Radon gazı, atmosferik gazları iyonlaştırarak su damlacıklarının oluşumunu tetikler.
- Bu iyonlaşma ve su damlacıklarının oluşması gizli ısı açığa çıkarır.
- Gizli ısı miktarı, oluşan iyon kaynaklı parçacıkların büyüklüğüne bağlıdır.
- Deprem hazırlık bölgelerinde 600-1000nm büyüklüğünde parçacıklar gözlemlenebilmektedir.
- Bu sürece iyon-kaynaklı çekirdeklenme (IIN) adı verilir.
- Su buharının yoğunlaşması, gizli ısı açığa çıkmasıyla birlikte gerçekleşir.
- Deneysel veriler ve teorik tahminler, IIN sonucu açığa çıkan gizli ısının, deprem öncesi gözlenen termal anomalilerin kaynağı olduğunu göstermektedir.
- Uydular kullanılarak deprem öncesi gizli ısı akısı anormallikleri izlenebilir.
- Radon gazı tarafından iyonlaşan hava, yatay ve düşey hava akımlarına neden olur.
- Yatay ve düşey hava akımlarının birleşimi, küçük ölçekli helezonik hava hareketleri ve aktif fay hatlarının yakınında helezonik girdap hücrelerinin oluşmasına yol açar.
- Büyük iyon kümelerinin oluşumu, atmosferin sınır tabakasının iletkenliğini ve aktif fay hatları üzerindeki küresel elektrik devresinin yerel parametrelerini değiştirir.
- İyonosfer potansiyeli üzerindeki değişimler, deprem hazırlık bölgelerinde iyonosferik anomalilerin ana kaynağıdır.
- Bu anomaliler, yer tabanlı ve uydu araçları tarafından iyonosferin tüm katmanlarında ve manyetosferde tespit edilebilir.

Sonraki yıllarda literatüre kazandırılan çalışmalar göstermiştir ki LAIC modeli göz önünde bulundurularak atmosfer-iyonosfer-litosfer ilişkisi, deprem öncesi, sırası ve sonrasında meydana gelen iyonosferik anomalilerin daha iyi anlaşılmasını sağlamış ve bu anomalilerin deprem tahmininde potansiyel bir öncü gösterge olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, depremlerin neden olduğu fiziksel ve kimyasal değişimlerin, iyonosferdeki toplam elektron içeriği (TEİ) ve diğer parametreler üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde inceleyerek, deprem tahmini konusunda umut vadeden yeni yaklaşımlar sunmaktadır. Yapılan çalışmalardan bazıları şöyledir:

Rolland ve diğ. (2011) yılında yaptıkları çalışmada, 2011 Tohoku depremi sonrası meydana gelen tsunaminin oluşturduğu yerçekimi dalgalarının üç boyutlu (3B) sayısal modellenmesi ve Hawaii'de okyanus üzerinde gözlemlenen hava parlamaları incelenmiştir. Çalışma, hava parlamaları ile sentetik ve gerçek verilerin uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, tsunamilerin atmosfer-iyonosfer gözlemleri ile tespit edilmesinin ne kadar yararlı olabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, tsunamilerin oluşturduğu şok-akustik dalgaların süpersonik hızla yayıldığı ve bu dalgaların yerden iyonosfere kadar mevcut olan tüm elektronları etkilediği belirtilmiştir.

Astafyeva ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Japonya'daki Küresel Konumlama Sistemi (KKS) ağı GEONET'den elde edilen 1 Hz KKS ölçümleri kullanılarak, büyük ($M_w=9.0$) Tohoku Depremi'nin jeolojik hattı üzerindeki atmosferde bulunan toplam elektron içeriği (TEİ) ölçümleri aracılığıyla depremin iyonosfer üzerindeki etkisi hakkında bilgi edinilmiştir. 11 Mart 2011 depremi durumunda, ilk iyonosferik bozulmalar Honshu'nun doğusundaki tsunaminin varışından 17 dakika önce kaydedilmiştir. TEİ'deki bozulmanın ilk varışı, depremin 140 km doğusundaki odakta 464 saniye sonra kaydedilmiştir. Bir sonraki 45 saniye içinde, iyonosferik noktaların dağılımı, ko-sismik kabuk kırılması alanıyla eşleşen dikdörtgen bir alanı görüntülemiştir. Bu kaynak bölgesinden ko-sismik iyonosferik bozulma, daha sonra 1.3-1.5 km/s hızıyla yayılmıştır. Bu hız değerleri, daha önce akustik dalgalar için rapor edilen değerlerin %30-40'ından daha yüksektir. Muhtemelen süpersonik hızla yayılan şok-akustik dalgaların gözlemlendiği ve bu dalgaların yerden iyonosfere kadar mevcut olan tüm elektronları havaya uçurmuş olduğu düşünülmektedir. Bu bulgular, jeolojik olarak aktif bölgelerin gerçek zamanlı KKS izlemesinin ko-sismik kabuk değişikliklerinin parametreleri

hakkında bilgi verebileceğini ve daha sonra kısa vadeli tsunami uyarıları için kullanılabileceğini göstermektedir.

Jin ve diğ. (2014) yılında yaptıkları çalışma, 2011 Tohoku depremi sonrasında gözlenen sismo-iyonosferik bozulmaların desenini ve evrimini incelemektedir. Bu çalışma, KKS gözlemlerinden elde edilen verilerle yapılmış ve özellikle depremin ardından ionosferde oluşan bozulmaların zamanla nasıl değiştiğini ortaya koymuştur. Çalışmada, büyük bir depremin ardından ionosferde meydana gelen yoğunluk dalgalanmalarının, deprem sonrası dönemde belirgin bir şekilde gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu dalgalanmaların, depremle tetiklenen atmosferik dalgalar ve ionosferdeki plazma hareketleriyle ilişkili olduğu vurgulanmıştır.

İnyurt ve diğ. (2020), Türkiye’de 24 Ocak 2020 tarihinde meydana gelen $M_w=6.8$ Elâzığ depremini incelemiştir. Çalışmada, deprem öncesi, anı ve sonrasını kapsayan 60 günlük Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (KKUS) verileri analiz edilmiştir. Ayrıca, deprem kaynaklı ionosferik anomalilerin daha iyi değerlendirilmesi için K_p , Dst ve $F10.7cm$ değerleri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, depremden önceki bir haftalık süreçte, iki farklı günde toplam elektron içeriğinde (TEİ) belirgin anomaliler olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, ionosferik değişimlerin deprem tahmininde potansiyel bir gösterge olabileceğini ortaya koymaktadır.

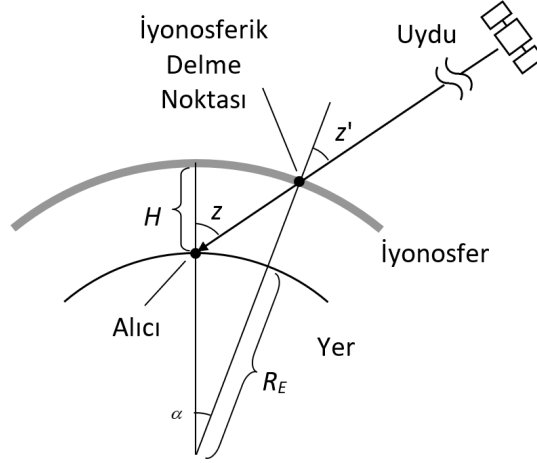
Literatürdeki örneklerle benzer olarak bu çalışmada, deprem öncesi ve sonrası ionosferde meydana gelen değişimlerin analizi yapılmıştır. Özellikle 2017-2023 yılları arasında meydana gelen ve büyüklüğü $M_w \geq 6$ olan depremler belirlenmiş ardından depremler içerisinde seçilmiş olanlar incelenmiştir. Türkiye Ulusal Sabit KKUS İstasyonlarından elde edilen çift frekanslı KKUS verileri kullanılmıştır. Deprem odaklarına en yakın KKUS istasyonlarından elde edilen çift frekanslı KKUS ölçümleri kullanılarak ionosferik gecikmeler ve Toplam Elektron İçeriği (TEİ) belirlenmiştir. Bu veriler, farklı zaman periyotları için analiz edilerek depremlerle olabilecek potansiyel ilişkiler değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

İyonosfer yapısı gereği sürekli aktif halde iyonizasyonun gerçekleştiği bir atmosfer bölgesidir. İyonosferdeki değişimin gözlenmesi ve ölçümü Toplam Elektron İçeriği (TEİ) – Total Electron Content (TEC) olarak adlandırılmaktadır ve TEİ 1 metre yarı çaplı silindir içerisinde bulunan serbest haldeki elektron sayısına karşılık gelmektedir, silindir içerisinde kalan Toplam Elektron İçeriği Birimi (TEİB) – Total Electron Content Unit (TECU) olarak adlandırılmaktadır. Toplam Elektron İçeriği (TEİ), KKUS sinyallerinin ionosferden geçerken maruz kaldığı faz gecikmesi kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplama için kullanılan temel formüller (Eşitlik 1) ve yöntemler aşağıda açıklanmıştır:

$$10^{16} \frac{\text{elektron}}{m^2} = 1 \text{ TEİB (TECU)} \quad (1)$$

İyonosferdeki Toplam Elektron İçeriği hesaplanırken yörüngede bulunan uydulardan yararlanılmaktadır. Uydular yeryüzündeki alıcılar ile iletişim kurarken iki farklı kanalda ve iki farklı frekans kullanılmaktadırlar. Bu frekanslar sırasıyla **L1 ($f_1 = 1575,42 \text{ MHz}$)** ve **L2 ($f_2 = 1227,60 \text{ MHz}$)** dir. Atmosferde serbest halde bulunan elektronların farklı frekanslar üzerinde farklı oranda gecikmeye sebep olduğu bilinmektedir. Uydularda bulunan atomik saat yardımıyla uydu ve yeryüzündeki alıcı arasındaki iletişimde meydana gelen sinyal gecikmesi hesaplanabilmektedir. Bu İyonosferik gecikme sahte mesafe (pseudorange) ve faz gecikmesinin geometriden arındırılmış birleşimi ile elde edilmektedir ve hesaplama yapılırken Tek Katman İyonosfer Modeli (Single Layer Ionosphere Model- SLIM) kullanılmaktadır.



Şekil 2: Tek Katman İyonosfer Modeli
Figure 2: Single Layer Ionosphere Model

Modelde bulunan değişkenler (Şekil 2) sırasıyla H: Ortalama iyonosfer kalınlığı, z: zenit açısı, R: Dünyanın yarıçapıdır.

Çift frekanslı KKUS ölçümleri yardımıyla L (faz) ve P (kod) değerleri kullanılarak TEİ aşağıdaki şekilde (Eşitlik 2, 3, 4, 5) hesaplanır (Jin ve diğ. 2015).

$$L_{1,j}^i = \rho_{0,j}^i - d_{ion,1,j}^i + d_{trop,j}^i + c(\tau^i - \tau_j) + \lambda_1(b_1^i - b_{1,j}^i) + \lambda_1 N_{1,j}^i + \varepsilon_{L,1,j}^i \quad (2)$$

$$L_{2,j}^i = \rho_{0,j}^i - d_{ion,2,j}^i + d_{trop,j}^i + c(\tau^i - \tau_j) + \lambda_2(b_2^i - b_{2,j}^i) + \lambda_2 N_{2,j}^i + \varepsilon_{L,2,j}^i \quad (3)$$

$$P_{1,j}^i = \rho_{0,j}^i + d_{ion,1,j}^i + d_{trop,j}^i + c(\tau^i - \tau_j) + c(d_1^i - d_{1,j}^i) + \varepsilon_{P,1,j}^i \quad (4)$$

$$P_{2,j}^i = \rho_{0,j}^i + d_{ion,2,j}^i + d_{trop,j}^i + c(\tau^i - \tau_j) + c(d_2^i - d_{2,j}^i) + \varepsilon_{P,2,j}^i \quad (5)$$

Denklemlerde bulunan değerler sırasıyla,

- L taşıyıcı faz ölçümü,
- P kod ölçümü,
- ρ KKUS uydusu ile alıcı arasındaki gerçek mesafe,
- d_{ion} iyonosferik gecikme,
- d_{trop} troposferik gecikme,
- c vakum ortamında ışık hızı,
- τ uydu ve alıcının saat hatası,
- b alıcı ve uydu faz donanım gecikmesi,
- d alıcı ve uydu kod donanım gecikmesi,
- N taşıyıcı fazın belirsizliği,
- ε KKUS ölçümlerinden kalan değerlerdir.

Toplam Elektron İçeriği (TEİ) ve Eğik Toplam Elektron İçeriği (STEC) (Eşitlik 6), iyonosferdeki elektron yoğunluğunu ve bu yoğunluğun zamana ve mekâna bağlı değişimlerini analiz etmek için kullanılan önemli parametrelerdir. ETEİ, KKUS sinyallerinin iyonosferden geçerken uğradığı faz gecikmesi kullanılarak hesaplanır ve doğru TEİ (VTEC) değerleri, eğim faktörü ile düzeltilerek elde edilir. Bu hesaplamalar, iyonosferik anomalilerin tespiti ve analizi için temel araçlardır.

$$\begin{aligned} \text{STEC} &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 - L_2 + \lambda_1(N_1 + b_1) - \lambda_2(N_2 + b_2) + \varepsilon_L) \\ \text{STEC} &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.28(f_2^2 - f_1^2)} (P_1 - P_2 - (d_1 - d_2) + \varepsilon_P) \end{aligned} \quad (6)$$

Bu denklemde (Eşitlik 6),

- f taşıyıcı faz frekansını,
- uydu (i) ve alıcı (j) donanımındaki faz (b) ve kod (d) frekanslar arası biaslerini temsil eder,
- $d_1 = d_1^i - d_{1,j}$, $d_2 = d_2^i - d_{2,j}$, $b_1 = b_1^i - b_{1,j}$, $b_2 = b_2^i - b_{2,j}$ değerleri, ilgili biaslere karşılık gelir,
- L taşıyıcı faz ve P sahte uzunluk (pseudorange) gözlemlerini temsil eder,
- λ , sinyal dalga boyunu simgeler,
- N belirsizliktir.

Denklem, iki farklı frekansta (f_1 ve f_2) elde edilen taşıyıcı faz ve sahte uzunluk gözlemlerini ifade eder. Frekanslar arası farklar, sistemdeki donanım özelliklerinden kaynaklanan hataları düzelten sabitlerle (bias değerleri) giderilir. Bu düzeltmeler, doğru konum belirleme ve zaman senkronizasyonu gibi uygulamalarda hayati öneme sahiptir. Belirli bir uydu-alıcı çifti için frekanslar arası biaslar, gözlemlenen değerlerin sistem tarafından sağlanan referans değerlerine göre nasıl ayarlandığını gösterir. Bu düzeltmeler, KKUS (Küresel Konumlama Uydu Sistemleri- Global Navigation Satellite System-GNSS) sistemlerinde yaygın olarak kullanılan matematiksel modellerin önemli bir parçasıdır.

Elde edilen Eğik Toplam Elektron İçeriği (STEC) değerlerinin ardından Dikey Toplam Elektron İçeriği (VTEC) hesaplanabilir. VTEC, iyonosferdeki elektron yoğunluğunun zenit (dikey) yönünde bir noktadaki değişimini ölçer. STEC, sinyalin yerden uyduya doğru eğik bir yol izlediği dikkate alınarak hesaplandığından, bu eğik yoldaki toplam elektron içeriği VTEC'e dönüştürülmelidir.

VTEC değerleri çift frekanslı GNSS ölçümleri ile aşağıdaki formül (Eşitlik 7) kullanılarak hesaplanabilir:

$$VTEC = STEC * \cos\left(\arcsin\left(\frac{R \sin z}{R+H}\right)\right) \quad (7)$$

Burada:

- R : Yerin yarıçapı (6378 km),
- H : İyonosferik tabakanın yüksekliği (300 km),
- z : Sinyalin zenit açısıdır.

Bu formül, sinyalin yer yüzeyinden iyonosfere olan eğimini dikkate alarak STEC'yi dikey yöne (zenit) dönüştürür. Bu şekilde elde edilen VTEC değerleri, iyonosferdeki elektron yoğunluğunun daha doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Bu değerler, depremlerin atmosferik etkilerini anlamak ve analiz etmek için kritik öneme sahiptir ve deprem öncesi atmosferik değişimlerin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanır.

3. VERİ

Araştırmanın yöntemlerini ve veri analizi tekniklerini ayrıntılı bir şekilde açıklamak üzere, ilk olarak veri toplama ve işleme adımları üzerinde durulmuştur. Bu bağlamda, Python (Van Rossum ve Boer (1991) başta olmak üzere, JavaScript, batch ve bash betikleri kullanılarak otomatik veri elde etme işlemleri gerçekleştirilmiştir. TUSAGA-Aktif (TUSAGA-Aktif 2023) istasyonlarından elde edilen veriler, IONOLAB-TEC (Sezen ve diğ. 2013) yazılımının kullanımı

için gereken CODE EPH (AIUB 2023a), IGS SP3 (IGS 2023), CODE DCB (AIUB 2023b) ve IONEX (NASA 2023) dosyaları ile birleştirilmiştir. Bu dosyalar, ilgili yayın bağlantılarından edinilmiştir (Tablo 3) ve günlere ait veriler bu şekilde toplanmıştır. Daha sonra, elde edilen veriler IONOLAB-TEC (Sezen ve diğ. 2013) yazılımına uygun hale getirilmiş ve program aracılığıyla çalışma günlerine ait Slant Total Electron Content (STEC) ve sonrasında Vertical Total Electron Content (VTEC) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin görselleştirilmesi için ise Python kütüphaneleri, özellikle PyGMT (Uieda ve diğ. 2022) ve Matplotlib (Hunter 2007) kullanılmıştır. Bu adımlar ve araçlar, depremlerin incelenmesi sürecinde kullanılan sistematik yöntemleri ve elde edilen veri analizi sonuçlarını görselleştirerek anlamamıza katkı sağlamıştır.

Bu çalışmada kullanılan depremler 2017-2023 yılları arasında gerçekleşmiş moment magnitüdü altıdan büyük depremler arasından seçilmiş olup Tablo 1 de gösterilmiştir, ayrıca her bir depreme ait 1 gün ve deprem öncesi 7, deprem sonrası 8 olacak şekilde 15 günlük dönemler belirlenmiştir. Depremlerin belirlenmesinin ardından odak merkezine yakın TUSAGA-Aktif (TUSAGA-Aktif 2023) istasyonları seçilmiştir.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan depremler
Table 1: Used earthquakes in the study

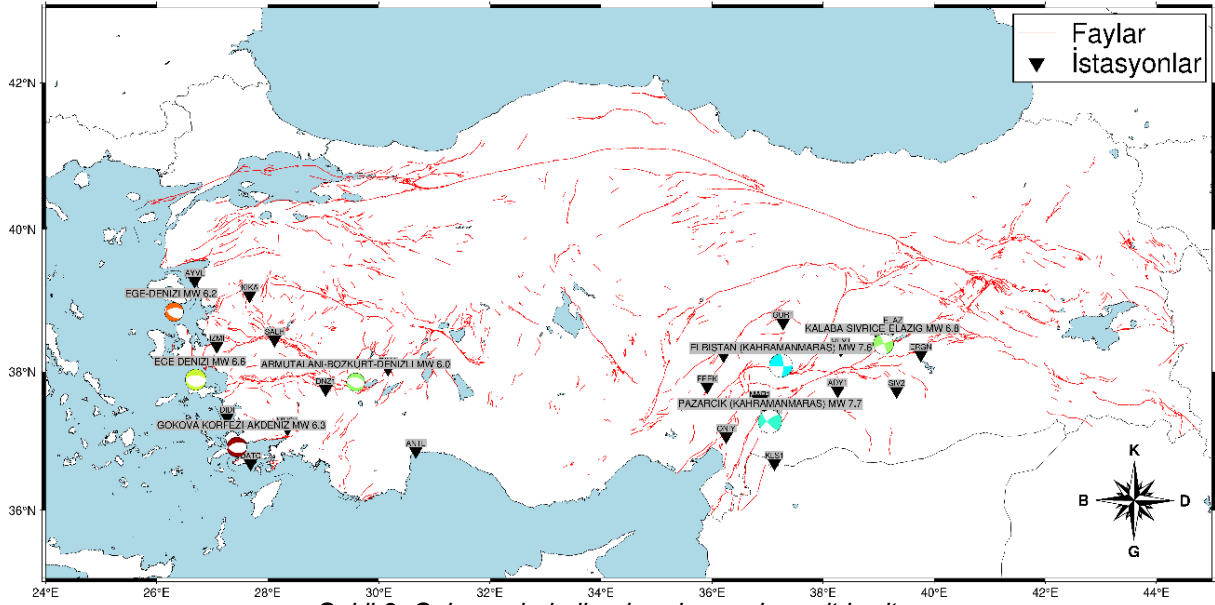
| Depremin Tarihi | Depremin Saati (UTC) | Enlem (°) | Boylam (°) | Derinlik (km) | Magnitüt (M _w) | Depremin Lokasyonu | Kullanılan İstasyonlar |
|-----------------|----------------------|-----------|------------|---------------|----------------------------|----------------------------|--|
| 20.07.2017 | 22:31:12 | 36.974 | 27.523 | 7.80 | 7 | Gökova Körfezi-Akdeniz | DATC, DIDI, MUG1 |
| 12.06.2017 | 12:28:37 | 38.851 | 26.256 | 6.96 | 6.2 | Ege-Denizi | AYVL, IZMI, KIKA, SALH |
| 08.08.2019 | 11:25:30 | 37.851 | 29.584 | 10.92 | 6.0 | Armutalani-Bozkurt-Denizli | ANTL, DINA, DNZ1, MUG1 |
| 30.10.2020 | 11:51:24 | 37.888 | 26.777 | 16.54 | 6.6 | Ege Denizi | DIDI, IZMI, MUG1, SALH |
| 24.01.2020 | 17:55:11 | 38.359 | 39.063 | 8.06 | 6.8 | Kalaba-Sivrice-Elâziğ | ERGN, SIV2, ARPK, ELAZ, ADY1 |
| 06.02.2023 | 01:17:32 | 37.288 | 37.043 | 8.6 | 7.7 | Pazarcık-Kahramanmaraş | FEEK, TUF1, GUR1, MLY1, ADYI, ONIY, ANTE, KLIS, MAR1 |
| 06.02.2023 | 10:24:47 | 38.089 | 37.239 | 7.0 | 7.6 | Elbistan-Kahramanmaraş | FEEK, TUF1, GUR1, MLY1, ADYI, ONIY ANTE, KLIS, MAR1 |

Odak mekanizması çözümleri, AFAD'ın çevrim içi hizmetlerinden alınmıştır (AFAD 2023a). Şekillerde kullanılan fay bilgileri ise MTA'nın gerçekleştirdiği çalışmadan derlenmiştir (Emre ve diğ. 2013). TUSAGA-Aktif istasyonlarının koordinatları resmî sitesinden elde edilmiştir (TUSAGA-Aktif 2023). Seçilen depremlerin odak mekanizması bilgileri, Tablo 2'de sunulan verilere dayanarak PyGMT (Uieda ve diğ. 2022) kullanılarak görselleştirilmiş ve Şekil 3 oluşturulmuştur.

Tablo 2: Çalışmada kullanılan depremler
Table 2: Used earthquakes in the study

| Depremin Tarihi | Depremin Saati (UTC) | Enlem (°) | Boylam (°) | Derinlik (km) | Magnitüt (M _w) | Fay Türü | Strike | Dip | Rake | Odak Mekanizması Çözümü |
|-----------------|----------------------|-----------|------------|---------------|----------------------------|-----------------|--------|-----|------|-------------------------|
| 20.07.2017 | 22:31:12 | 36.9740 | 27.5230 | 7.80 | 7 | Ters | 275 | 38 | -80 | |
| 12.06.2017 | 12:28:37 | 38.8511 | 26.2565 | 6.96 | 6.2 | Doğrultu Atımlı | 114 | 43 | -78 | |
| 08.08.2019 | 11:25:30 | 37.8510 | 29.5840 | 10.92 | 6.0 | Ters | 283 | 46 | -91 | |
| 30.10.2020 | 11:51:24 | 37.8881 | 26.7770 | 16.54 | 6.6 | Normal | 95 | 43 | -87 | |
| 24.01.2020 | 17:55:11 | 38.3593 | 39.0630 | 8.06 | 6.8 | Doğrultu Atımlı | 248 | 76 | 1 | |
| 06.02.2023 | 01:17:32 | 37.288 | 37.043 | 8.6 | 7.7 | Doğrultu Atımlı | 233 | 74 | 18 | |
| 06.02.2023 | 10:24:47 | 38.089 | 37.239 | 7.0 | 7.6 | Doğrultu Atımlı | 358 | 73 | 174 | |

Çalışmada Kullanılan Depremler



Şekil 3: Çalışmada kullanılan depremlere ait harita
Figure 3: Map of the earthquakes used in the study

Her bir KKUS istasyonuna ait RINEX (Receiver INdependent EXchange) formatlı dosyalar, ayrıca bu istasyonlar ile kullanılmak üzere SP3 (Standard Product 3), IONEX (IONosphere-map EXchange) ve Yörünge Bilgileri (Broadcast Ephemeris) verileri, SOPAC/CSR (Scripps Orbit and Permanent Array Center/California Spatial Reference Center) elde edilmiştir (IONEX Working Group 1998). Verilerin elde edildiği adresler ve formatlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Çalışmada kullanılan verilerin kaynakları
Table 3: Sources of the data used in the study

| KKUS Veri Formatı | Veri URL |
|--------------------------|---|
| TUSAGA İstasyon Verileri | https://www.tusaga-aktif.gov.tr/ |
| CODE EPH Dosyaları | ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/ |
| IGS SP3 Dosyaları | ftp://gssc.esa.int/gnss/products/ |
| CODE DCB Dosyaları | ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/ |
| IONEX Dosyaları | https://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/ |

Çalışmada kullanılacak olan depremlerin belirlenmesinin ardından, verilerin indirilmesi, hazırlanması ve görselleştirilmesi için Python komutları kullanılmıştır. Süreci açıklamamız gerekirse:

- Deprem odağına en yakın olan TUSAGA-Aktif (TUSAGA-Aktif 2023) KKUS istasyonları, detaylı görsel incelemeler ve harita analizleri kullanılarak tespit edilmiştir. Bu aşamada, deprem bölgesine coğrafi olarak en yakın istasyonların seçimi yapılmıştır,
- Belirlenen TUSAGA-Aktif (TUSAGA-Aktif 2023) istasyonlarına ait KKUS verileri, deprem gününü ve deprem öncesindeki 7 günü ile deprem sonrası 8 günü kapsayacak şekilde indirilmiştir. Bu veri seti, toplamda 15 günlük bir periyodu içermekte ve depremin öncesi, anı ve sonrası dönemleri kapsamaktadır,
- IONOLAB-TEC (Sezen ve diğ. 2013) yazılımında kullanılmak üzere geriye kalan verilerin depreme ait belirlenen günlere göre Tablo 3'te yer alan adreslerden indirilmesi,
- İndirilen tüm veriler, IONOLAB-TEC (Sezen ve diğ. 2013) yazılımının analiz gereksinimlerine uygun şekilde gerekli dizinlere taşınmıştır. Bu adımda, verilerin doğru formatta ve düzenli bir şekilde hazırlanması sağlanmıştır, böylece yazılımın verileri etkili bir şekilde işlemesi mümkün kılınmıştır,

- Analiz sonuçları, PyGMT ve matplotlib kütüphaneleri kullanılarak görselleştirilmiştir. Bu görselleştirme aşaması, elde edilen verilerin daha anlaşılır ve yorumlanabilir hale getirilmesi için kritik öneme sahiptir. Grafikler ve haritalar, analiz sonuçlarının bilimsel toplulukla paylaşılması ve yorumlanması için hazırlanmıştır.

Veriler IONOLAB-TEC (Sezen ve diğ. 2013) yazılımıyla kullanılmak üzere hazırlanmasının ardından verilerin analizi gerçekleştirilmiştir. IONOLAB-TEC, KKS ve GLONASS gibi KKUS sistemlerinden elde edilen çift frekanslı sinyalleri kullanarak TEC hesaplamaları yapar. Yazılım, L1 ve L2 frekansları gibi farklı frekanslarda alınan KKUS sinyallerini analiz ederek STEC (Slant Total Electron Content) hesaplar. Bu ölçümler, sinyallerin iyonosferdeki yolculukları sırasında maruz kaldıkları gecikmelerden kaynaklanan değişimleri içerir. Elde edilen STEC değerleri, sinyallerin eğim açısına göre düzeltilir ve böylece Dikey Toplam Elektron İçeriği (VTEC) hesaplanır. Bu düzeltme, iyonosferdeki elektron yoğunluğunun doğru bir şekilde belirlenmesi için önemlidir. Yazılım, çeşitli matematiksel modeller ve düzeltme faktörleri kullanarak KKUS verilerindeki donanımsal ve çevresel hataları minimize eder. Bu sayede elde edilen TEC değerleri daha güvenilir hale gelir.

Yazılım, deprem öncesi ve sonrası dönemlerde iyonosferdeki değişimleri izleyerek, deprem tahminine yönelik araştırmalara katkıda bulunur. Bu analizler, depremle ilişkili iyonosferik anomalilerin belirlenmesine yardımcı olur ve elde edilen sonuçlar bulgular bölümünde yer almaktadır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışmamız kapsamında elde edilen verilerin analiz sonuçları sunulmaktadır. Öncelikle, depremler öncesi ve sonrasında gözlemlenen iyonosferik değişimler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler, belirlenen deprem olayları için Toplam Elektron İçeriği (TEİ) analizleriyle değerlendirilmiştir. İyonosferik anomali belirleme yöntemleri kullanılarak, deprem öncesi ve sonrası dönemdeki TEİ değişiklikleri analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan veriler hem uydu bazlı gözlemlerden hem de yer tabanlı KKUS istasyonlarından toplanmıştır. Bulgular, deprem öncesi ve sonrasındaki iyonosferik anomalilerin varlığını ve bu anomalilerin depremlerin tahmininde kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, depremlerin iyonosfer üzerindeki etkilerini anlamamıza ve bu etkinin potansiyelini değerlendirmemize yardımcı olmuştur. Elde edilen TEİ değerlerine ek olarak çalışma bölgelerine ait haritalar görselleştirilmiştir. Depremlere ait saatler belirtilirken UTC zaman dilimi kullanılmıştır. Çalışmada bulunan depremler içerisinde bu bölümde yalnızca iki büyük depremden bahsedilmiştir, bu depremlere ilişkin bulgular detaylandırılmaktadır. Diğer depremlere makalenin kapsamını gereksiz yere uzatmamak için bu bölümde yer verilmemiştir.

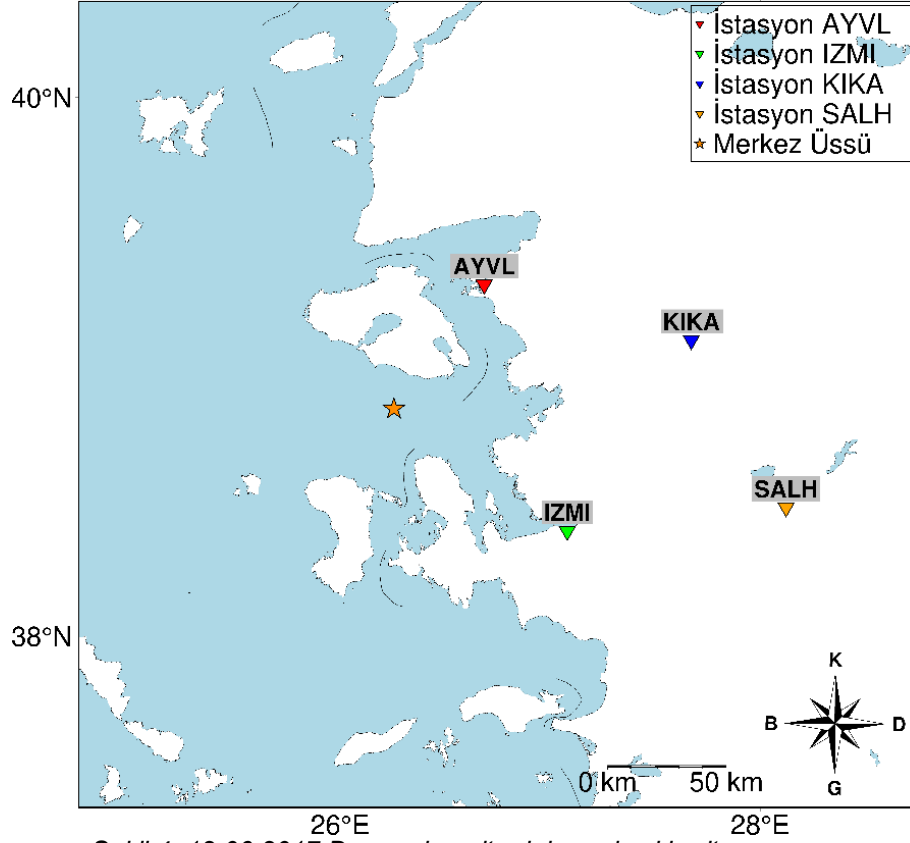
4.1) 12.06.2017 Ege Denizi Depremi

12.06.2017 tarihinde yerel saat ile 15:28:37'de Midilli Adası'nın güneyinde, büyüklüğü $M_w=6.2$ (KRDAE 2023) ve derinliği ~16 km olan bir deprem meydana gelmiştir, raporda merkez üssüne en yakın yerleşim yerinin ~23 km uzaklıkta İzmir'e bağlı Karaburun ilçesinin Hasseki Köyü olduğu belirtilmiştir (DEÜ 2017). Depremin odak merkezine yakın olan dört TUSAGA-Aktif istasyonu Şekil 4'te harita üzerinde gösterilmiştir. İstasyonların deprem merkez üssüne olan uzaklıkları sırasıyla:

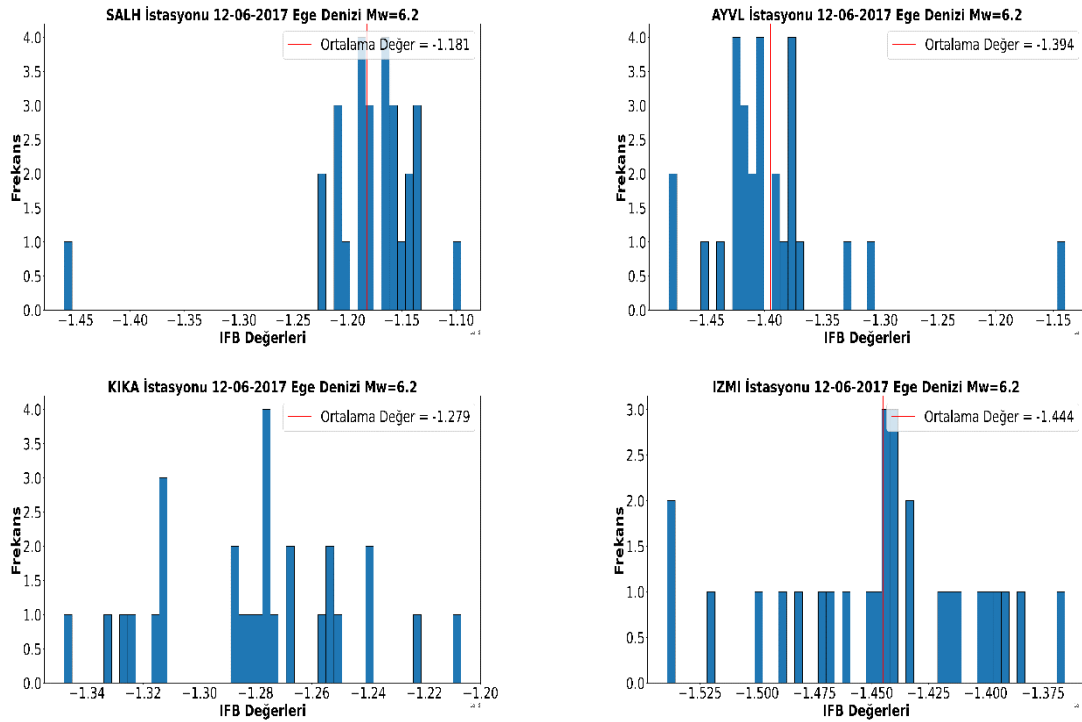
- AYVL istasyonu ~ 63,2 km,
- IZMI istasyonu ~ 87,8 km,
- KİKA istasyonu ~ 125,6 km
- SALH istasyonu ~ 167.17 km.

şeklindedir. Deprem sonrası yalnızca hafif hasar meydana gelmiş herhangi bir can kaybı yaşanmamıştır.

2017-06-12 12:28:37(UTC) Ege Denizi Mw=6.2 Merkez Üssü

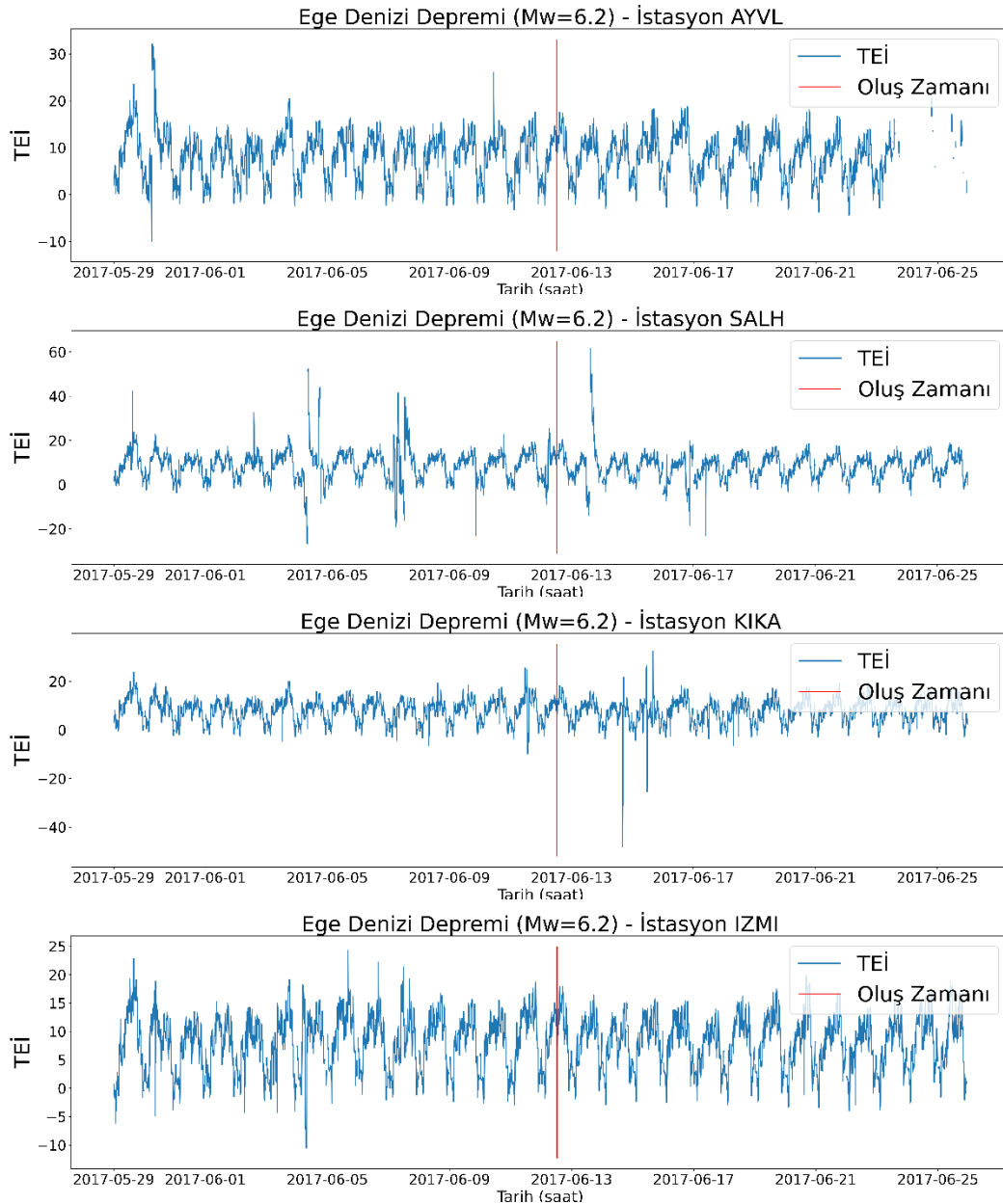


Şekil 4: 12.06.2017 Depremine ait odak merkezi haritası
Figure 4: 12.06.2017 Earthquake epicenter map



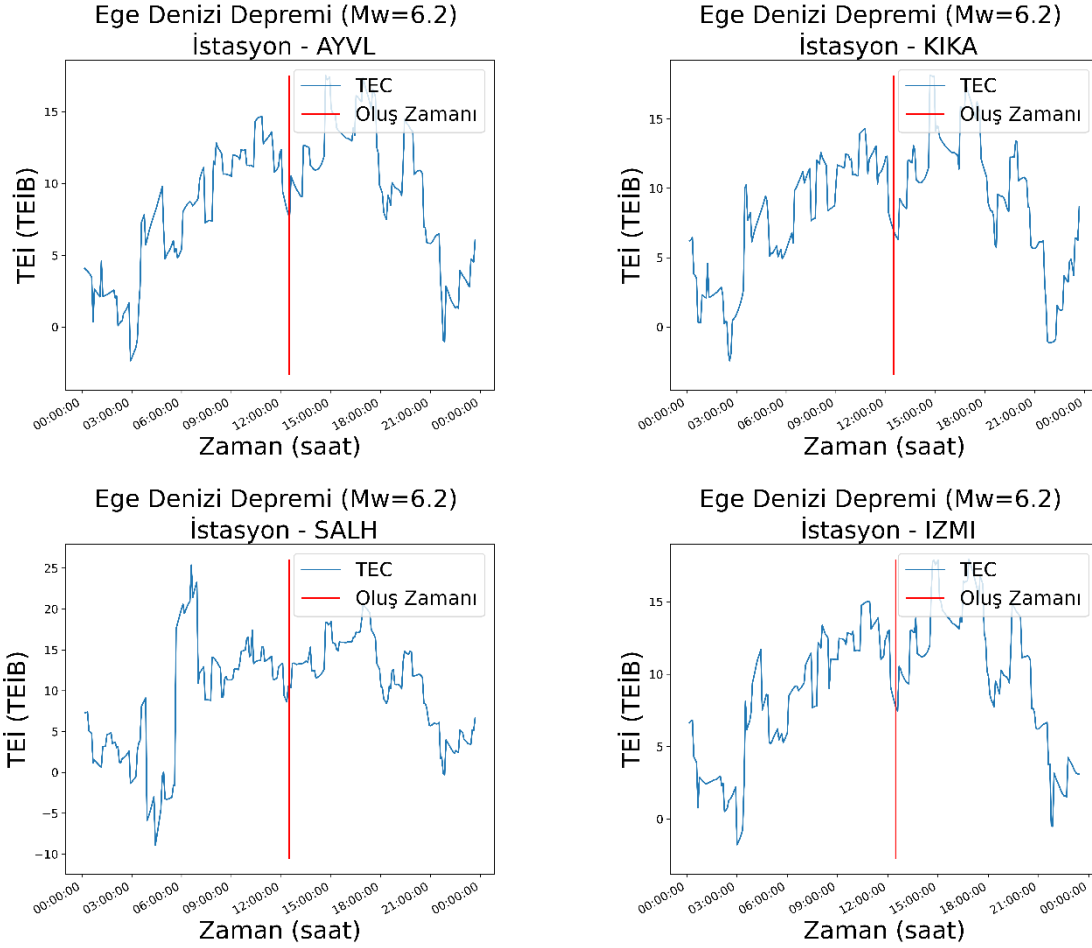
Şekil 5: 12.06.2017 Depremine ait istasyonların IFB değerleri
Figure 5: 12.06.2017 Earthquake IFB graph

TEİ değeri hesaplamalarında IFB değerleri (Şekil 5) göz önünde bulundurularak yapılmıştır.



Şekil 6: 12.06.2017 Depremine ait 15 günlük TEİ grafikleri
Figure 6: 15-day TEC graph for 12.06.2017 Earthquake

Şekil 6'da görüldüğü gibi 15 günlük zaman diliminde meydana gelen ani yükseliş ve alçalışlar ile beraber bazı günlerde veri üzerinde kopukluklar meydana gelmiştir. Bu kopmaların kesin sebebi bilinmemekle beraber, atmosferik koşullar sebebiyle olabileceği düşünülmektedir. Gözlemlenen kopmalar ile meydana gelen değişimler doğrudan deprem ile ilişkilendirilememiştir.



Şekil 7: 12.06.2017 Depremine ait 1 günlük TEİ grafikleri
Figure 7: 1-day TEC graph for 12.06.2017 Earthquake

Deprem gününe ait veriler incelendiğinde (Şekil 7) 03:00-06:00 arasında normal iyonosfer değişimlerinin dışında ani bir yükseliş görüldüğü ancak bu değişimin deprem ile doğrudan ilişkisi kurulamamıştır. Değişimin atmosferik koşullar sebebiyle olabileceği ve jeomanyetik fırtına, güneş aktivitesi gibi harici gözlemlerin detaylı incelenmesi sonucu bu anomalinin kaynağının daha net bir şekilde belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

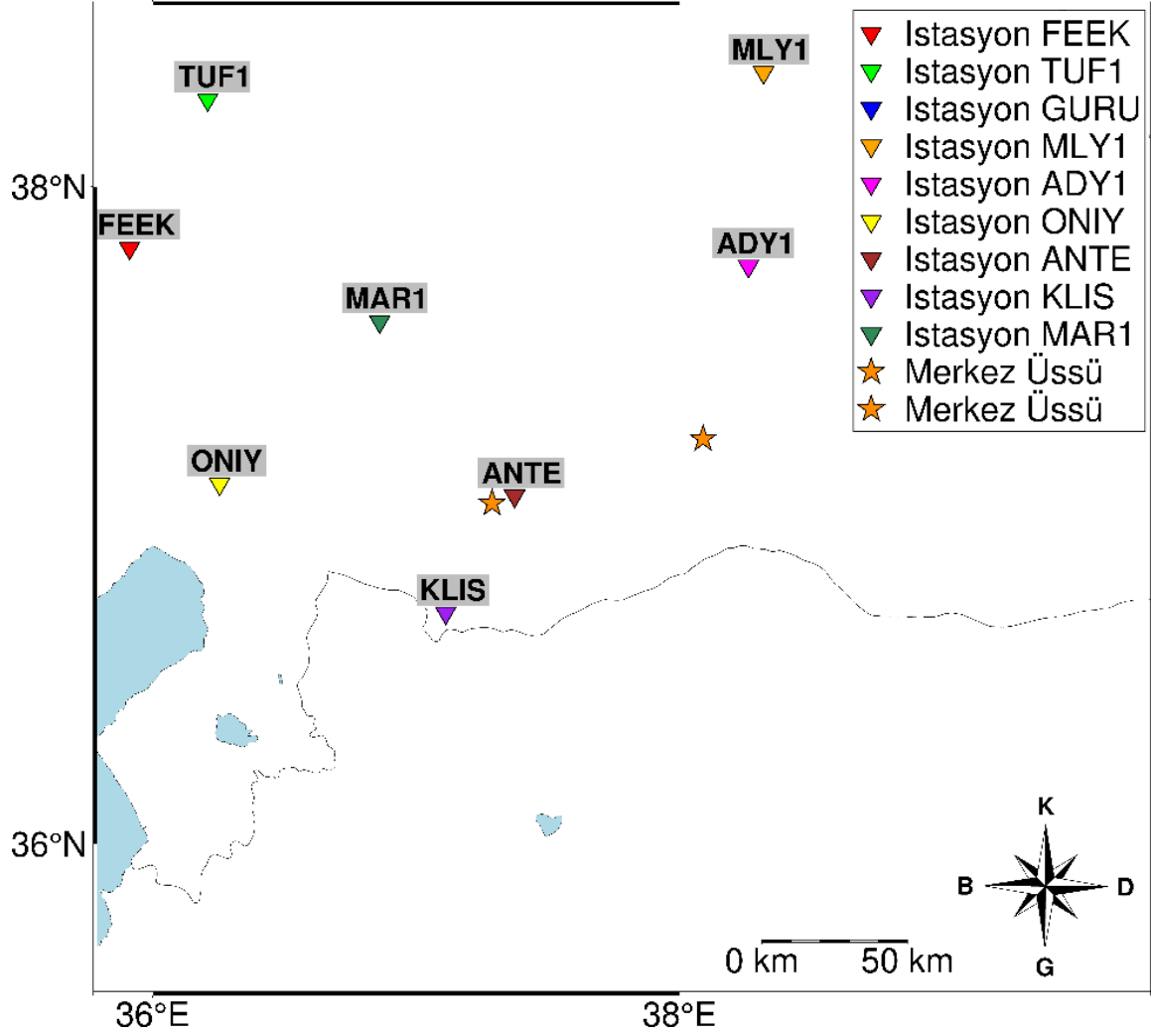
4.2) 06.02.2023 Kahramanmaraş Depremleri

06.02.2023 günü, Türkiye saati ile 04:17'de ve 13:24'te merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan $M_w = 7.7$ ve $M_w = 7.6$ büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir. $7.7 M_w$ büyüklüğündeki deprem yerin 8.6 ~km derinliğinde meydana gelirken, $7.6 M_w$ büyüklüğündeki deprem yerin 7 ~km derinliğinde meydana gelmiştir (AFAD 2023b). İstasyonların deprem merkez üssüne olan uzaklıkları sırasıyla:

- Deprem 1'e FEEK ~ 148,7 km
- Deprem 1'e TUF1 ~ 165,4 km
- Deprem 1'e GURU ~ 186,1 km
- Deprem 1'e MLY1 ~ 170,5 km
- Deprem 1'e ADY1 ~ 117,2 km
- Deprem 1'e ONIY ~ 91,98 km
- Deprem 1'e ANTE ~ 7.980 km
- Deprem 1'e KLIS ~ 40,33 km
- Deprem 1'e MAR1 ~ 71,88 km
- Deprem 2'ye FEEK ~ 202,3 km
- Deprem 2'ye TUF1 ~ 200,5 km
- Deprem 2'ye GURU ~ 178,0 km
- Deprem 2'ye MLY1 ~ 124,2 km
- Deprem 2'ye ADY1 ~ 59,93 km
- Deprem 2'ye ONIY ~ 163,3 km
- Deprem 2'ye ANTE ~ 66,28 km
- Deprem 2'ye KLIS ~ 104,9 km
- Deprem 2'ye MAR1 ~ 115,3 km

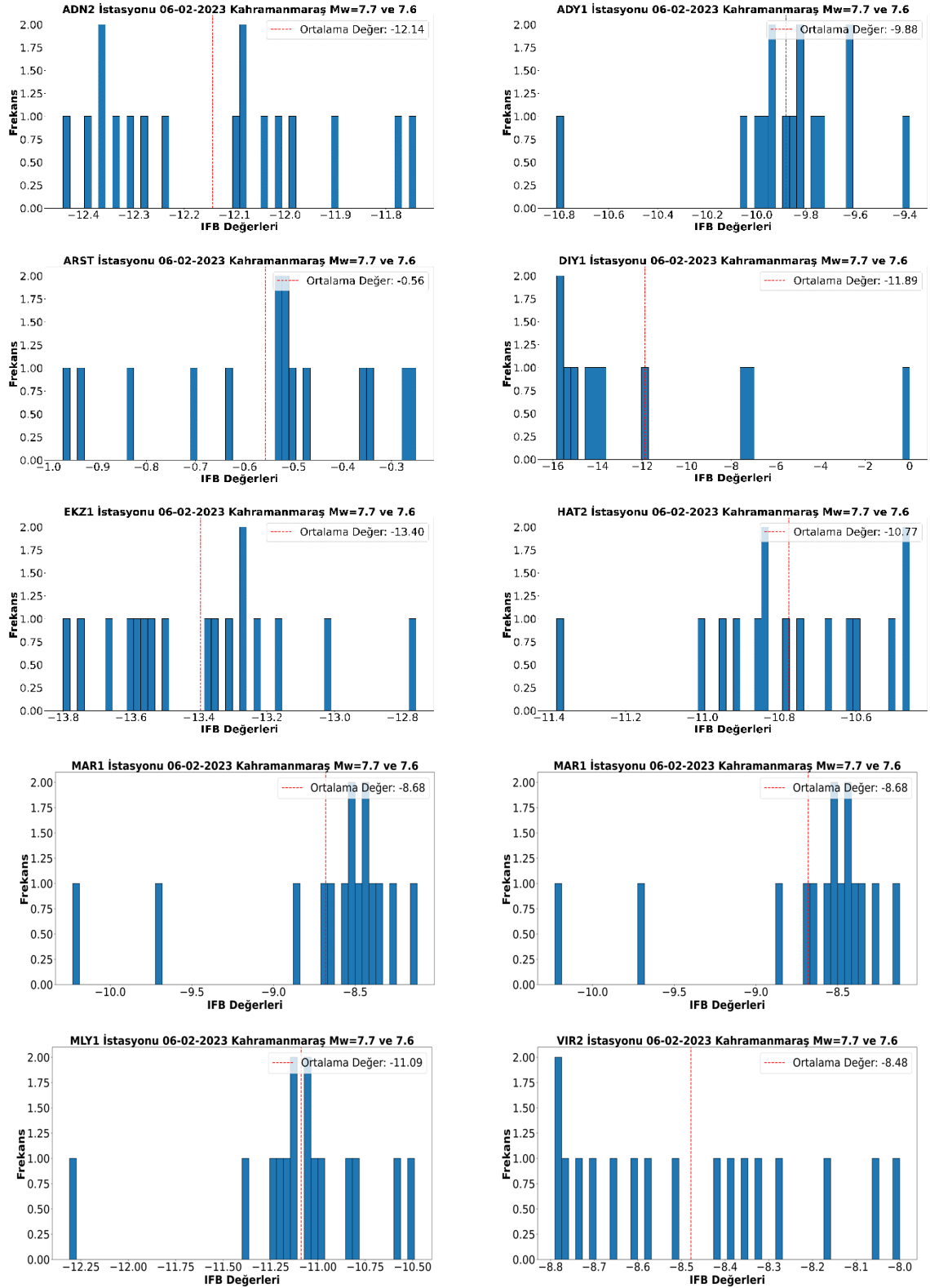
şeklindedir. İstasyonların konumları Şekil 8'deki gibidir. Deprem Türkiye Cumhuriyeti tarihinde meydana gelen en yıkıcı ve en ölümcül depremlerden biri olmuştur.

2023-02-06 Kahramanmaraş Depremleri Merkez Üssü

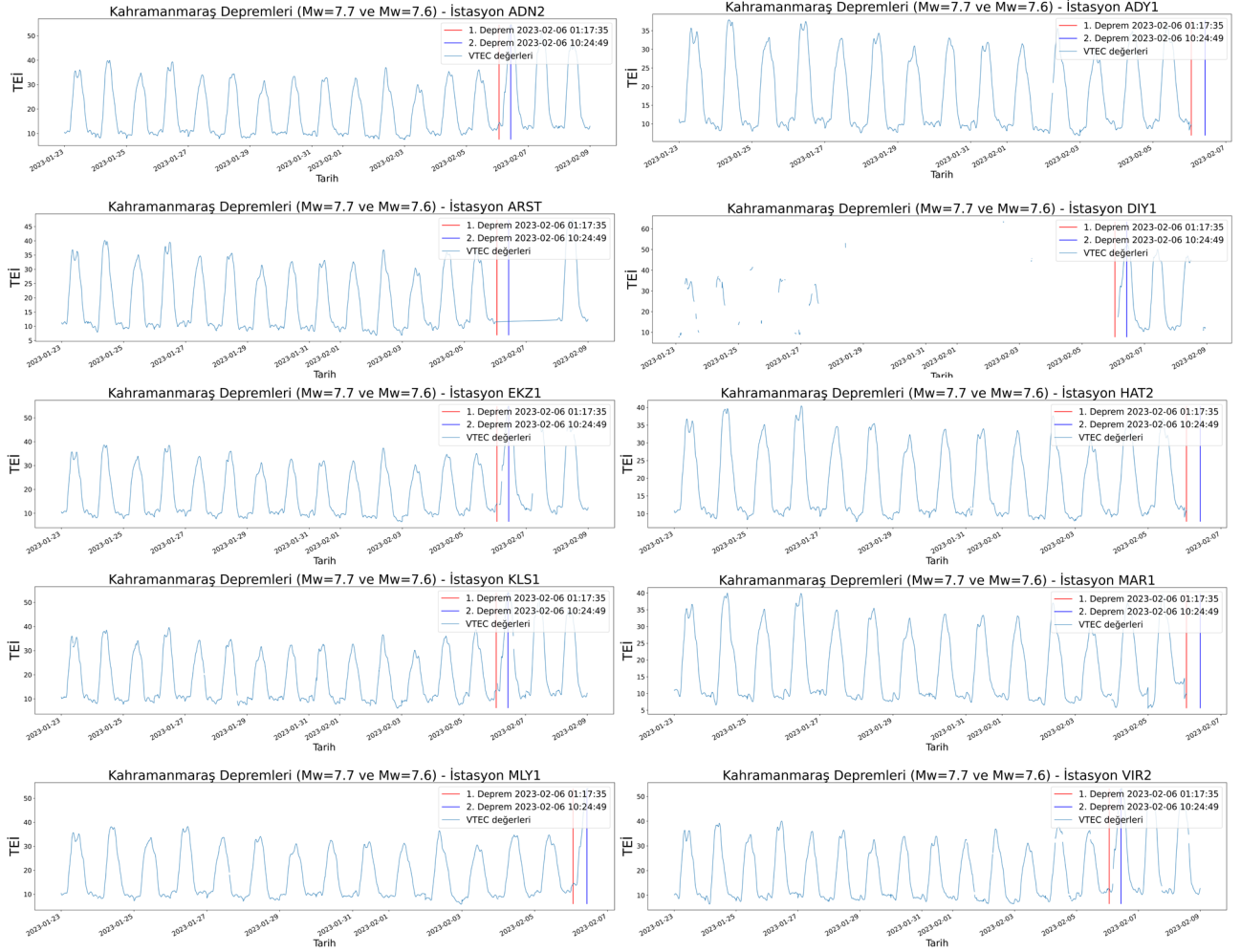


Şekil 8: 06.02.2023 Depremine ait odak merkezi haritası
Figure 8: 06.02.2023 Earthquake epicenter map

Her bir istasyona ait IFB ile ortalama değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Bu sistematik hatalar göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılmıştır.



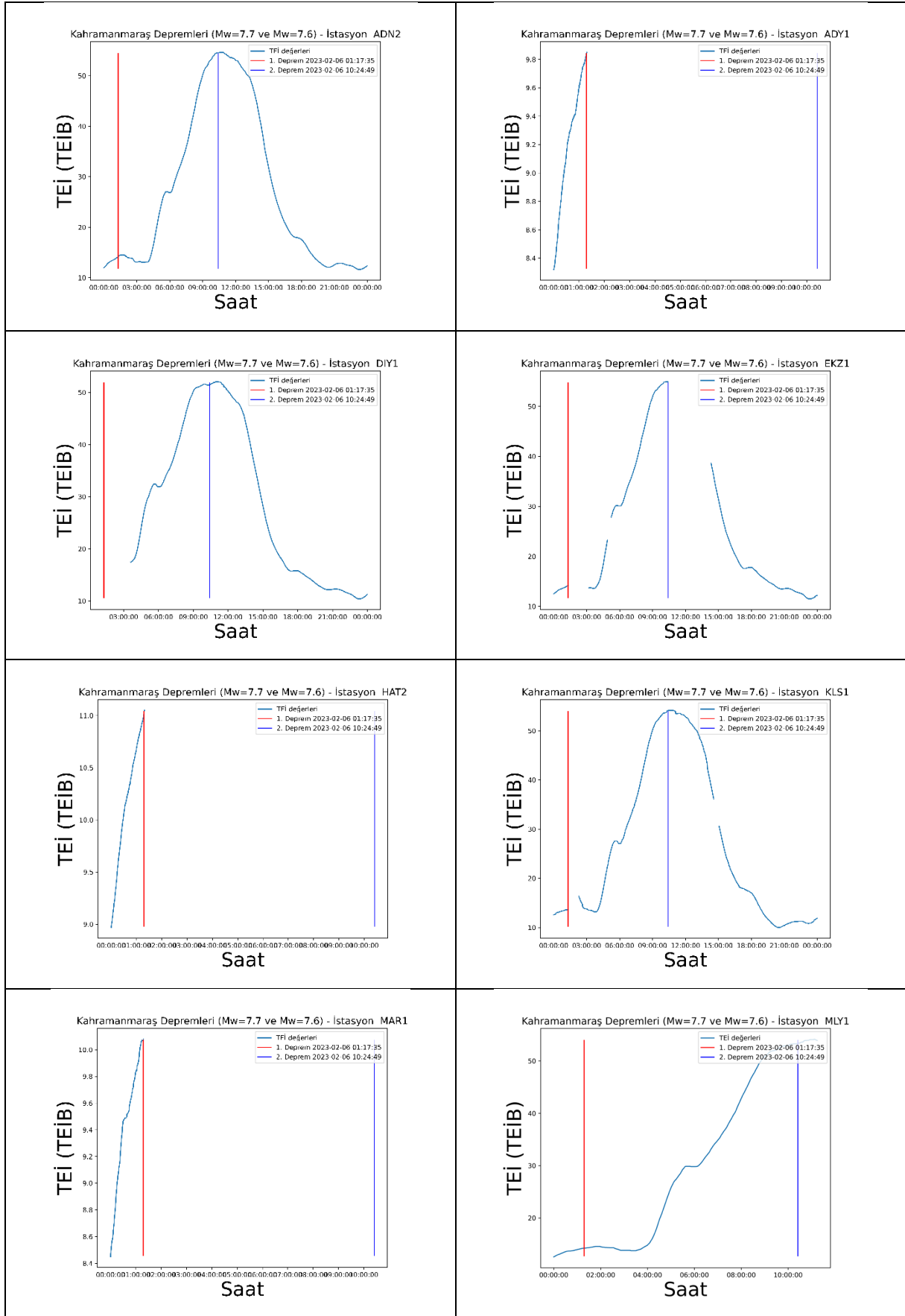
Şekil 9: 06.02.2023 Depremine ait istasyonların IFB değerleri
Figure 9: 06.02.2023 Earthquake IFB graph



Şekil 10: 06.02.2023 Depremine ait 15 günlük TEİ grafikleri IFB değerleri
Figure 10: 15-day TEC graph for 06.02.2023 Earthquake

Şekil 10'da görüldüğü gibi bazı günlerde verilerde kesikler bulunmaktadır bunlar uydu açısı sebebiyle verilerin alınmadığı, operasyonel sebepler yüzünden verilerin hatalı olduğu durumlarda çıkarılması gereken zamanlara aittir. TEİ değişimler genel olarak günlük bazda normal seyretmiştir. Deprem sonrası meydana gelen yıkım sebebiyle istasyonlarda veri akışı durmuştur. Meydana kopmalar sebebiyle o günlere ait TEİ değerleri hesaplanamamıştır.

Son olarak deprem gününe ait verileri incelediğimizde deprem merkez üssüne yakın KKUS istasyonlarından deprem anından itibaren veri alınmadığı gözlenmiştir. Bu durum, deprem sırasında ve sonrasında meydana gelen altyapı hasarları veya enerji kesintileri nedeniyle oluşmuş olabilir. Deprem anında yaşanan şiddetli sarsıntılar, veri toplama cihazlarının çalışmasını engelleyerek ya da tamamen durdurarak önemli ölçüde veri kaybına neden olmuştur. Bu sebeple bu istasyonlarda TEİ değerleri hesaplanamamıştır. Bu veri kaybı, çalışmamızın sonuçlarını ve depremle ilişkili iyonosferik değişimlerin analizini sınırlamıştır.



Şekil 11: 06.02.2023 Depremine ait 1 günlük TEİ grafikleri IFB değerleri
 Figure 11: 1-day TEC graph for 06.02.2023 Earthquake

5. SONUÇLAR

Deprem öncesi kabuk deformasyonu ve iyonosferdeki değişimler arasındaki ilişkiyi inceleyen bilimsel çalışmalar, deprem tahminine yönelik umut vadeden bir çerçeveye sunmuştur. Gerçekleştirilen bu çalışmada, 2017-2023 yılları arasında gerçekleşen ve büyüklüğü $M_w \geq 6$ olan depremler öncesi ve sonrası iyonosferde meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan KKUS verileri, Türkiye Ulusal Sabit KKUS İstasyonlarından elde edilmiş ve iyonosferdeki Toplam Elektron İçeriği (TEİ) değerleri hesaplanarak incelenmiştir. Bulgular, depremler öncesinde iyonosferde belirgin değişimler olduğunu, ancak bu değişimlerin deprem tahmininde doğrudan ve güvenilir bir gösterge olarak kullanılmasının sınırlı olduğunu göstermektedir.

Analizlerde, iyonosferik TEİ değerlerini hesaplamak için KKS verileri işlenmiş ve IONOLAB-TEC yazılımı kullanılmıştır. Bu analizde, TEİ değişimlerini zamansal olarak haritalamak ve olası anomalileri belirlemek için Python ve GMT araçları kullanılmıştır. Verilerin işlenmesi ve görselleştirilmesi için ise GMT 6.5 (Generic Mapping Tools) yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, harita tabanlı veri görselleştirmesi yaparak, mekânsal ilişkilerin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır.

Çalışmamızda gözlemlenen iyonosferik anormallikler, diğer bazı çalışmaların bulgularıyla örtüşmekle birlikte, bu anomalilerin zamanlaması ve belirginliği literatürdeki bulgularla tam olarak örtüşmemektedir. Örneğin, bazı çalışmalarda depremlerden hemen önce belirgin iyonosferik değişiklikler rapor edilirken (Astafyeva ve diğ. 2011), bu çalışmada böyle bir değişiklik istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Bu farklılıklar, kullanılan veri seti, analiz yöntemleri veya çalışılan depremlerin jeofiziksel özelliklerinden kaynaklanabilir.

Oszoz (2023) çalışmasında Swarm uydu verileri kullanılarak 6 Şubat 2023 Pazarcık depremi öncesinde gözlemlenen manyetik anomalilerin tespiti ve yorumlanmasına dair ilk bulguları ele almaktadır. Çalışma, ESA'nın Swarm uyduları tarafından toplanan manyetik veriler üzerine odaklanmakta ve bu verilerdeki olası öncü manyetik sinyalleri incelemektedir. Bu çalışma, Pulnits ve diğ. (1994)'ün geliştirdiği LAIC modeline atıfta bulunarak, depremler öncesi iyonosferde belirli anomalilerin gözlemlenebileceğini önermektedir. Özellikle litosfer-astenosfer-iyonosfer etkileşimleri (LAIC) sonucu oluşan sapmaların, ana şokun hazırlık aşamasına dair önemli bilgiler içerdiği vurgulanmaktadır. Araştırmada, 06 Ağustos 2022 ile 09 Şubat 2023 tarihleri arasındaki veriler incelenmiş, dış kaynaklı manyetik etkilerden arındırılmış ve zaman içinde manyetik alan bileşenlerinin değişimi analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, Y, Z ve F bileşenlerinde depremin hazırlık aşamasına işaret eden anomali değişimleri tespit edilmiştir, ancak X bileşeninde belirgin bir değişiklik saptanmamıştır.

Bu durum, iyonosferik değişimlerin deprem tahmininde kesin bir gösterge olarak kullanılabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, iyonosferik anomaliler ve depremler arasındaki potansiyel ilişkileri daha kapsamlı bir şekilde değerlendirme çabalarına katkı sağlamaktadır. Ancak, elde edilen bulgular, depremlerin öngörülmesinde iyonosferik verilerin kullanımının henüz kesin bir çözüm sunmadığını göstermektedir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalar, daha geniş bir veri seti ile farklı coğrafi bölgelerde ve zaman periyotlarında iyonosferik değişimlerin depremlerle ilişkisini daha detaylı olarak incelemelidir. Ayrıca, farklı analiz yöntemleri geliştirilerek sonuçların genellenebilirliği ve güvenilirliği artırılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde maddi ve manevi destek sağlayan Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'na (AFAD) teşekkür ederiz. Ayrıca, veri temininde yardımcı olan Harita

Genel Müdürlüğü Jeodezi Dairesi Başkanlığı'na ve diğer katkıda bulunan kurumlara minnettarlığımızı sunarız. Bu destekler, çalışmamızın başarılı bir şekilde tamamlanmasına önemli katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

AFAD, 2023a. Deprem Kataloğu, AFAD Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Ankara, Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/>.

AFAD, 2023b. 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7 – Mw: 7.6 Depremleri Raporu. Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Deprem Dairesi Başkanlığı.

AIUB, 2023a. CODE EPH Dosyaları, Ankara, Erişim adresi: <ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>.

AIUB, 2023b. CODE DCB Dosyaları, Ankara, Erişim adresi: <ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>.

Astafyeva E., Lognonne P., Rolland L., 2011. First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, 38(22), 104-110.

Davies K., Baker D.M., 1965. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964, *J. Geophys. Res.*, 70(9), 2251–2253.

DEÜ, 2017. 12 Haziran 2017 (15:28 TSİ) Mw=6.2 İzmir Karaburun (Ege Denizi) Depremi Değerlendirme Raporu, Buca- İZMİR: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü.

Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye.

Hunter J.D., 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment, *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90-95.

IGS, 2023. SP3 Dosyaları, Ankara, Erişim adresi: <ftp://gssc.esa.int/gnss/products/>.

IONEX Working Group, 1998. IONEX: The IONosphere map Exchange Format Version 1. Proceedings of the IGS AC Workshop, Darmstadt, 9-11 February 1998, 233-247.

İnyurt S., Mekik Ç., Yıldırım Ö., 2020. Deprem Kaynaklı Olabilecek İyonosferik Değişimlerin Belirlenmesi üzerine yeni bir yaklaşım geliştirilmesi, *Geomatik*, 5(2), 127-133.

Jin S., Jin R., Li J.H., 2014. Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(9): 7914-7927.

Jin S., Occhipinti G., Jin R., 2015. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics, *Earth-Science Reviews*, 147, 54–64.

Köz İ., 2022. İyonosferik anomalilerin GNSS ile belirlenmesi ve deprem öncülü olarak incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi, 112 s.

KRDAE, 2023. Deprem veri tabanı, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2023. Ankara, Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>.

NASA, 2023. IONEX Dosyaları, Ankara, Erişim adresi: <https://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>.

Ozsoz I., 2023. Preliminary results of Detection and Interpretation of Precursory Magnetic Signals Preceding February 06, 2023 Pazarcik Earthquake using ESA Swarm Satellite Data, Turk Deprem Arastirma Dergisi 5(1), 48- 68, <https://doi.org/10.46464/tdad.1258315>.

Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Alekseev V.A., 1994. Pre-Earthquake Ionospheric Effects and their Possible Mechanisms, (In: Dusty and Dirty Plasmas, Noise, and Chaos in Space and in the Laboratory), *Springer US*, 545–557, https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1829-7_46.

Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K., 2022. Earthquake precursors in the atmosphere and ionosphere: New Concepts. Springer.

Rolland L.M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E.A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H., 2011. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planet Sp*, 63, 853–857 (2011). <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.020>.

Sezen U., Arıkan F., Arıkan O., Ugurlu O., Sadeghimorad A., 2011. Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC, *Space Weather*, 11, 297–305.

TUSAGA-Aktif, 2023. İstasyon Verisi, Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı-Aktif, Ankara, Erişim adresi: <https://www.tusaga-aktif.gov.tr/>.

Uieda L., Tian D., Leong W.J., Jones M., Schlitzer W., Grund M., Wessel P., 2022. PyGMT: A Python interface for the Generic Mapping Tools (Version 0.8.0).

Van Rossum G., De Boer J., 1991. Interactively testing remote servers using the Python programming language, *CWI Quarterly*, 4(4), 283–304.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Çalışma kapsamında kullanılan veriler sırasıyla; AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı (*Deprem verisi, Odak mekanizması çözümü*), Harita Genel Müdürlüğü Jeodezi Dairesi Başkanlığı (*Türkiye Ulusal Sabit Jeodezik İstasyon Ağı-TUSAGA verisi kullanımı*), MTA (*Türkiye Diri Fay verisi*), Bern Üniversitesi Astronomi ve Fizik Bilimleri Enstitüsü (*EPH, DCB verisi*), Uluslararası GNSS Servisi (*SP3 verisi*), NASA CDDIS (*IONEX verisi*).

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Araştırma kapsamında yer alan bilgilerde çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (Author Contributions)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): B.A.
- Literatür araştırması (*Literature research*): O.B.Ç.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): O.B.Ç., B.A.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): O.B.Ç., B.A.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): O.B.Ç.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): O.B.Ç., B.A.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): O.B.Ç., B.A.