



Preliminary Results of Detection and Interpretation of Precursory Magnetic Signals Preceding February 06, 2023 Pazarcik Earthquake Using ESA Swarm Satellite Data

Ilkin Ozsoz¹

¹ General Directorate of Mineral Research and Exploration, Marine Research Department, 06530 Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5907-4176

Keywords

LAIC, Swarm satellite constellation, Precursory earthquake anomalies, Magnetic method, Cumulative number of anomalous tracks

Highlights

- * Lithosphere-Asthenosphere and Ionosphere coupling (LAIC)
- * Time-varying magnetic field data
- * Detection of preparation phase of main shock

Aim

The aim of the article is to examine the time dependent magnetic anomaly changes in the region affected by the 3 major earthquakes ($M_w=6.7$, $M_w=7.5$ and $M_w=7.8$) that occurred on February 6, 2023 and to discuss the preliminary results

Location

Kahramanmaras-Turkey

Methods

Magnetic Swarm Anomaly Detection by Spline Analysis (MASS)

Results

Cumulative number of anomalous tracks plot indicated significant anomaly variations for Y, Z and F components of the magnetic field before the main shock

Supporting Institutions

The author(s) declared that this study has used no support data from other institutions

Financial Disclosure

The author(s) declared that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 01.03.2023

Revised: 05.05.2023

Accepted: 15.05.2023

Printed: 30.06.2023

DOI

10.46464/tdad.1258315



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

Corresponding Author

Ilkin Ozsoz

Email: ilkin.ozsoz@mta.gov.tr

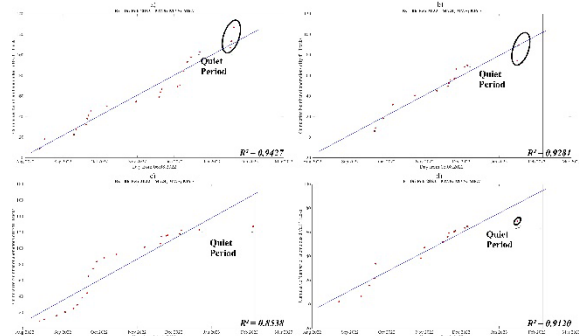


Figure
Cumulative number of anomalous tracks. a) X component, b) Y component, c) Z component and d) F component of the magnetic field. Vertical line indicates day of the earthquake. Linear model is shown by blue line

How to cite:

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>



Swarm Uydu Verileri Kullanılarak 06 Şubat 2023 Pazarcık Depreminden Önceki Öncül Manyetik Sinyallerin Tespiti ve Yorumlanmasına Ait İlk Sonuçlar

İlkin Özsoz¹

¹ Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Deniz Araştırmaları Dairesi, 06530 Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5907-4176

ÖZET

06 Şubat 2023'de meydana gelen $M_w=6.7$, $M_w=7.5$ ve $M_w=7.8$ büyüklüğündeki depremler öncesi Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimi (LAIC) nedeniyle ölçülen manyetik anomalilerde sapmalar meydana gelmiştir. Bu sapmalar ana şokun hazırlık aşamasına ait önemli bilgileri içermektedir. Bu nedenle Dobrovolsky Dairesi içerisindeki Swarm uydularına ait 06 Ağustos 2022 ile 09 Şubat 2023 tarihleri arasındaki manyetik anomaliler dış kaynaklı manyetik etkileri (güneş rüzgarları, manyetik fırtınalar ve atmosferik elektrik akımları) kapsamayacak şekilde filtrelenmiştir. Bir sonraki aşamada verinin zamana göre 1'inci türevi alınmış ardından uzun dalga boylu trend veriden giderilmiştir. Filtrelenen verideki anomali bölgelerini belirlemek için kayan karelerinin ortalama karekökü (RMS) penceresi uygulanmıştır. Son olarak da kümülatif manyetik anomali değişim grafiği çizdirilmiştir. Bu grafik kapsamında depremden önce manyetik alanın X bileşeni için önemli bir anomali değişimi saptanamamış iken Y, Z ve F bileşenlerinde depremin hazırlık aşamasına ait kendisini tekrarlamayan anomaliler tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

LAIC, Swarm uydu görevi, Öncü deprem anomalileri, Manyetik yöntem, Kümülatif manyetik anomali sayısı

Öne Çıkanlar

- * Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimi (LAIC)
- * Zamana bağlı değişen manyetik alan verileri
- * Ana şok hazırlık aşamasının tespit edilmesi

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.03.2023
Düzeltilme: 05.05.2023
Kabul: 15.05.2023
Basım: 30.06.2023

DOI

10.46464/tdad.1258315

Sorumlu yazar

İlkin Özsoz
Eposta:
ilkin.ozsoz@mta.gov.tr

Preliminary Results of Detection and Interpretation of Precursory Magnetic Signals Preceding February 06, 2023 Pazarcik Earthquake Using ESA Swarm Satellite Data

Ilkin Ozsoz¹

¹ General Directorate of Mineral Research and Exploration, Marine Research Department, 06530 Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5907-4176

ABSTRACT

On February 06, 2023, there were three earthquakes with magnitudes of $M_w=6.7$, $M_w=7.5$, and $M_w=7.8$, which caused deviations in the magnetic anomalies measured due to Lithosphere-Asthenosphere and Ionosphere Coupling (LAIC) prior to the earthquakes. These deviations contain important information related to the preparation phase of the main shock. Therefore, magnetic anomalies from Swarm satellites within the Dobrovolsky Circle between August 06, 2022, and February 09, 2023, were filtered out to exclude external magnetic effects (solar winds, magnetic storms, and atmospheric electric currents). In the next stage, the first derivative of the data was taken with respect to time and the long wavelength trend was removed from the data. The root-mean-square (RMS) window of moving squares was applied to identify anomaly regions in the filtered data. Finally, a cumulative magnetic anomaly change graph was plotted. According to this graph, a significant anomaly change was not detected in the X component of the magnetic field before the earthquake, while repeating anomalies related to the preparation phase of the earthquake were identified in the Y, Z, and F components.

Keywords

LAIC, Swarm satellite constellation, Precursory earthquake anomalies, Magnetic method, Cumulative number of anomalous tracks

Highlights

- * Lithosphere-Asthenosphere and Ionosphere coupling (LAIC)
- * Time-varying magnetic field data
- * Detection of preparation phase of main shock

Manuscript

Research Article

Received: 01.03.2023
Revised: 05.05.2023
Accepted: 15.05.2023
Printed: 30.06.2023

DOI

10.46464/tdad.1258315

Corresponding Author

Ilkin Ozsoz
Email:
ilkin.ozsoz@mta.gov.tr

1. GİRİŞ

Öncül deprem çalışmalarının ana hedefi, sismik aktivitenin zamana bağımlılık davranışını ortaya koymaktır. Yaygın olarak kullanılan istatistiksel deprem tahmin modelleri sismik aktiviteye ve artçı şokların karakteristiğine ışık tutmaktadır. Ayrıca, bir bölgenin tarihsel depremselliği, uzun vadede deprem beklenen bölgeleri istatistiksel olarak tahmin etmeye yardımcı olabilir. Deprem tahmin modelleri ve tarihsel depremlerin incelenmesi uzun vadede depremselliğin belirlenmesinde yardımcı olsa da son dönemlerde Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimini (Pulinets ve diğ. 1994) temel alan öncül deprem analizi çalışmaları oldukça popüler olmuştur. Öncül deprem analizi çalışmaları da tıpkı istatistiksel deprem modelleri gibi kısa vadeli depremselliğin tahmini konusunda başarılı sonuçlar üretememektedir. Her ne kadar öncül deprem analizi sonuçları kısa vadede tatmin edici sonuçlar üretemese de, deprem kayıplarını azaltmak için önemli bir potansiyele sahiptir.

Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimi ilk olarak (Pulinets ve diğ. 1994) tarafından tanımlanmıştır. Bu çalışmada deprem öncesi iyonosferik etkiler incelenmiş ve herhangi bir anomalinin var olup olmadığını araştırılmıştır. Bu araştırmadan sonra çoğu güncel çalışmalar olmak üzere Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimini baz alan bir çok çalışma yapılmıştır (Sorokin ve diğ. 2001, Freund 2011, Pulinets ve diğ. 2015, Akhoondzadeh ve diğ. 2018, De Santis ve diğ. 2019, Marchetti ve diğ. 2020, Ozsoz ve Pamukcu 2021, Özsoz, 2022). Sorokin ve diğ. (2001) yaptığı çalışmada büyük bir depremden önce yeryüzündeki ve iyonosferdeki elektrik potansiyelinin değiştiğini önermiştir. Freund (2011), Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimini radyoaktif gaz emisyonu ve metalik iyonlar açısından modellemiştir. De Santis ve diğ. (2019) büyüklüğü 6.1 ve üzeri 12 adet deprem için yaptığı istatistiksel analizler ile uydudan ölçülen manyetik ve elektron yoğunluğu verilerinde deprem öncesi anomaliler tespit etmiştir. Marchetti ve diğ. (2020), yaptığı çalışmada Amatrice-Norcia (Orta İtalya) depreminden 40 gün önce uydu manyetik verilerin kümülatif anomali dağılımında değişiklik tespit etmiştir. Ozsoz ve Pamukcu (2021) 30 Ekim 2020 Samos depremi için yaptığı çalışmada zamana bağlı toplanan uydu manyetik verilerin kümülatif anomali dağılımının depremden yaklaşık 1 ay önce karakteristiğinin değiştiğini ve "S" şeklinde bir dağılım oluşturduğunu göstermiştir. Özsoz (2022) Elazığ-Sivrice depreminden yaklaşık 50 gün önce uydu manyetik verilerinin kümülatif anomali dağılım trendinin değiştiğini ve grafiğin genelinde "S" şeklinde bir dağılımın oluştuğunu tespit etmiştir.

6 Şubat 2023 UTC 01:17:35'de Türkiye'nin güney-orta kısmında Türkiye-Suriye sınırı civarında $M_w=7.8$ büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Depremden yalnızca 11 dakika sonra $M_w=6.7$ büyüklüğünde artçı şok meydana gelmiştir. Meydana gelen $M_w=7.8$ büyüklüğündeki depremden yaklaşık 9 saat sonra (UTC 10:24:49) 95 km kuzeyde $M_w=7.5$ olan bir deprem daha meydana gelmiştir. Bahsedilen depremlerden $M_w=7.8$ olan deprem yerin 17.9 km altında meydana gelmiş olup süresi 115.2 saniyedir. Büyüklüğü $M_w=7.5$ olan deprem yerin 10 km altında meydana gelmiş olup süresi 51 saniye olarak ölçülmüştür. Son olarak büyüklüğü $M_w=6.7$ olan artçı şok yerin 14.5 km altında meydana gelmiş ve süresi 13.2 saniye olarak ölçülmüştür. Ana şoku meydana getiren deprem KD-GB uzanımlı düşey atım bileşeni bulunan sol yönlü-doğrultu atımlı fay tarafından veya KB-GD uzanımlı sağ yönlü-doğrultu atımlı fay tarafından tetiklenmiştir. Depremin lokasyonu ve mekanizması Doğu Anadolu Fay Zonu veya Ölü Deniz Transform Fay Zonu üzerinde gerçekleşmiş olduğuna dair bulgular sunmaktadır. Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca Batı'ya doğru ekstrüzyon gözlenirken Ölü Deniz Transform Fay Zonu boyunca ise Kuzey'e doğru ekstrüzyon gözlenir. Yapılan modelleme çalışmaları sonucunda $M_w=7.8$ büyüklüğünde meydana gelen bir depremin yaklaşık olarak 190 km uzunlukta ve 25 km genişlikte bir kırık düzlemine sahip olması beklenirken 06 Şubat 2023'de meydana gelen $M_w=7.8$ olan deprem için üretilen ilksel modellerde kırık düzlemi 100 km uzunluğunda 70 km genişliğinde belirlenmiştir. Yapılan modellemeler göstermektedir ki bu deprem tipik bir 7.8 büyüklüğünde olan depreme göre doğrultu boyunca beklenenden daha kısa ve dalım eksenini boyunca daha derine uzanmaktadır. Aynı şekilde $M_w=7.5$ büyüklüğünde bir depremin 120 km uzunlukta ve 18 km genişlikte bir kırık düzlemi oluşturması beklenirken

yapılan ilksel modellemeler ile 50 km uzunluk ve 30 km genişliğe sahip bir kırık düzlemine sahip olduğu görülmektedir. Yapılan modellemeler sonucunda depremin doğrultu boyunca beklenenden çok daha kompakt olduğu belirlenmiştir (U.S.G.S. 2023a; 2023b).

Aletsel ve tarihsel dönemlerde Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde birçok yıkıcı deprem gerçekleşmiştir. Bu depremler; 1789 (M=7.2), 1874 (M=7.1), 1875 (M=6.7), 2010 (M_w=6.0) ve 2011'de (M_w=5.4) meydana gelen Palu depremleri; 2020 Sivrice Depremi (M_w=6.8); 1795 Pazarcık Depremi (M=7.0); 1893 Erkenek Depremi (M=7.1) ve 1872 Amanos Depremi (M=7.2) olarak sıralanabilir (Guvercin ve diğ. 2022).

Makalenin amacı, 6 Şubat 2023'de meydana gelen 3 büyük depremin (M_w=6.7, M_w=7.5 ve M_w=7.8) etki ettiği bölgedeki zamana bağlı manyetik anomali değişimlerini incelemek ve ilksel sonuçları ve yorumları paylaşmaktır. Bunun yapılabilmesi için Swarm uydularından elde edilen zamana bağlı manyetik bileşenler (X, Y, Z ve F), dış kaynaklı manyetik etkiden arındırılmıştır. Daha sonra türev, uzun dalga boylu bileşen etkisini giderme ve kayan RMS filtresi yardımı ile kümülatif anomali sayısı grafiği elde edilmiştir. Kümülatif anomali sayısı grafiğinde deprem öncesi, deprem sırasında ve hemen sonrasında oluşan değişimler yorumlanmıştır. Ayrıca uygulanan filtrelerin etkisini test etmek için çalışma alanındaki Swarm uydularına ait yörüngeler rastgele seçilmiştir. Daha sonra da tekli yörünge analizi teknikleri ile değerlendirilmiştir.

2. TEKTONİK ORTAM

Doğu Anadolu Fayı, Anadolu Levhası'nın güney sınırı, Bitlis-Zagros Kıvrım Kuşağı ve bindirmesi ile Kafkas Bindirmesi boyunca uzanır. Avrasya ve Arap Levhası arasındaki göreceli hareketi üzerinde barındırır (Şengör ve diğ. 1985). Yapılan jeolojik ve jeodezik çalışmalar sonucu Doğu Anadolu Fayı ve ona paralel bölütlerin kayma oranları tespit edilmiştir. Kayma oranları Karlıova civarında yaklaşık 10 mm/yıl iken Türkoğlu civarında 4 mm/yıl a kadar düşmektedir (Mahmouda ve diğ. 2013). Batı'da bulunan paralel segmentlerde ise kayma oranları 2.5 mm/yıl ile 1 mm/yıl arasında değişmektedir (Duman ve Emre, 2013).

Doğu Anadolu Fayı'nda yapılan odak mekanizması çözümlerinde sol yanal doğrultu atım bileşeni dominant olsa da normal ve bindirme bileşenli odak mekanizması çözümleri de mevcuttur. Ancak doğrultu atım olmayan fay bileşenlerine ait odak mekanizması çözümlerinin azlığı nedeniyle ana fay ile düşey atım bileşeni arasındaki ilişki tam olarak anlaşılammıştır (Guvercin ve diğ. 2022).

Doğu Anadolu Fayı, Orta-Geç Miyosen'de Avrasya ve Arap levhasının çarpışmasının son aşamasının bir sonucu olarak gelişmiştir (Sengor ve Yilmaz 1981). Bindirme ve ters faylanmalı paleotektonik dönemden doğrultu atım faylanmalı neotektonik döneme geçişin zamanlaması hakkında farklı görüşler mevcuttur. Sengor ve diğ. (1985) ters ve bindirme faylanmanın dominant olduğu paleotektonik dönemden doğrultu atım bileşeninin dominant olduğu neotektonik döneme geçişi Geç Serravalian olarak tanımlamıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda Doğu Anadolu Fayı'nın Geç Miyosen-Erken Pliyosen döneminde evrimleştiği ileri sürülmüştür (Faccenna ve diğ. 2006). Yapılan jeodezik ve jeolojik çalışmalar göstermektedir ki Doğu Anadolu Fayı boyunca sol yanal doğrultu atım bileşeninin Geç Pliyosen'den (3 My) daha önce başlamamıştır (Westaway ve Arger 2001). Doğu Anadolu Fayı Orta Miyosen ile Erken Pliyosen arasında birkaç kez tektonik terslenmeye maruz kalmış bu durum tektonik rejiminde ve deformasyon şeklinde değişikliğe yol açmıştır (Kocycigit ve diğ. 2001).

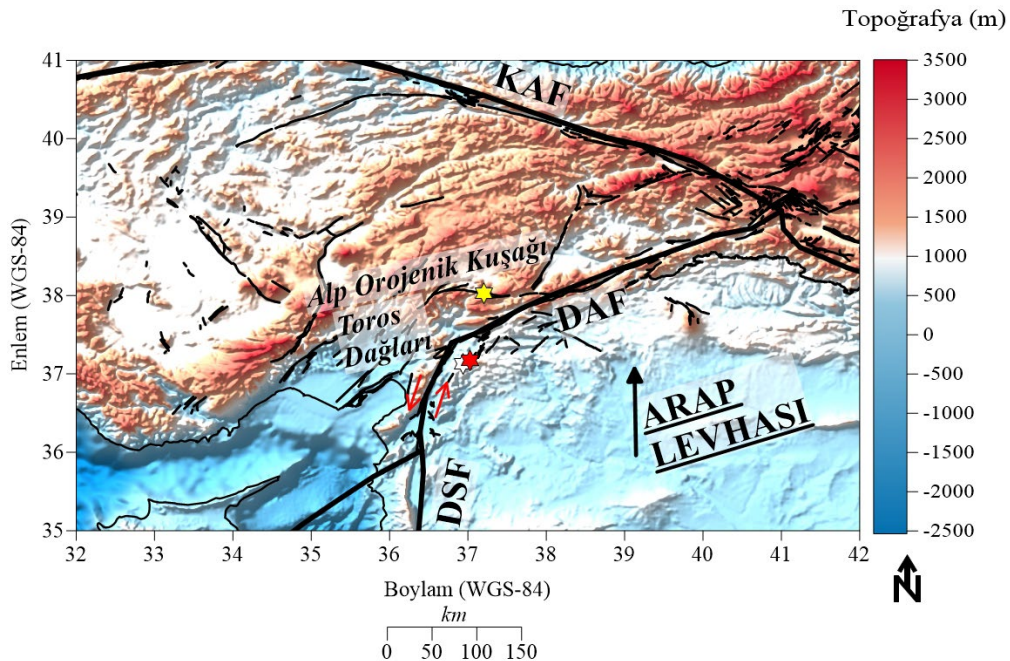
Doğu Anadolu Fayı, Doğu'da Karlıova baseni ile sınırlanmış iken Batı sınırı hakkında tartışmalar devam etmektedir. Doğu Anadolu Fayı'nın devamlılığı konusunda üç farklı görüş mevcuttur. İlk görüşe göre Doğu Anadolu Fayı Kıbrıs Yayı'na kadar devam etmektedir (McKenzie 1972). İkinci görüş Doğu Anadolu Fayı'nın Ölü Deniz Fayı ile Kahramanmaraş üçlü kesişim noktasında birleştiğini savunmaktadır (Jackson ve McKenzie 1984). Son görüşe göre

Doğu Anadolu Fayı ile Ölü Deniz Fayı Hatay-Adana-Kilikya Baseni'nde kesişmektedir (Arpat ve Şaroğlu 1972).

Ölüdeniz Fayı, Kızıl Deniz'in Kuzey'inden Toros Dağları'na kadar yaklaşık 1000 km uzunluğunda bir alana uzanmaktadır. Bölge, Geç Proterozoic Pan Afrika orojenisi ile şekillenmiştir. Daha sonra, Kambriyen ile Erken Senozoyik dönemde sığ denizel ve karasal kökenli sedimanlar depolanmıştır. Kambriyen ile Erken Senozoyik dönem Akdeniz'in kıtasal kenarının şekillenmesi, Erken Kratase intra-volkanik süreç ve sıkışma rejimini işaret eden faylanma (Geç Kratase'den Erken Miyosen'e kadar) gibi ana tektonik olayları içermektedir (Ben-Avraham ve diğ. 2008).

Günümüzde Ölü Deniz Fayı civarındaki bölgeler jeolojik olarak birbirlerine göre çok belirgin farklılıklar göstermektedir. Bunun nedeni orijinal pozisyonu farklı olan alanların Ölü Deniz Transform Fayı etrafında bir araya gelmesi ile açıklanabilir. Quennell (1958), yaptığı çalışmada yaklaşık 105 km'lik bir sol-yanal atım mesafesi hesaplamıştır. Bu bulgu, bölgede farklı jeolojik özelliğe sahip alanların nasıl bir araya geldiğine dair bir açıklama sunabilmektedir. Daha sonra Levha kinematiklerinin incelenmesi sonucunda Ölü Deniz Transformu'na paralel yatay hareket yaklaşık 100 km olarak hesaplanmıştır (Le Pichon ve Gaulier 1988). Bu çalışmalar sonucunda son 5 milyon yıl için ortalama kayma miktarı 5-7 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Ölü Deniz Fayı sismik olarak aktiftir ve fay üzerinde birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Salamon ve diğ. 1996).

Ölü Deniz Fayı rejyonel ölçekli magmatik aktivite ve yükselme ile beraber gelişmiştir. Yükselme, transform fayının her iki tarafı için 10-20 km uzaklığa kadar etkin olmuştur. Bölgede topoğrafya oldukça değişkendir ve sıklıkla deniz seviyesinden itibaren 0.7-1.5 km civarındadır. Magmatik aktivite ise transform fayının Doğu'sunda meydana gelmiş olup ağırlıklı olarak rejyonel ölçekli bazaltik volkanizma şeklinde tanımlanmıştır (Giannerini ve diğ. 1988).



Şekil 1: Basitleştirilmiş tektonik ve diri fay haritası (Yıldızların lokasyonu $M_w=7.8$ (Kırmızı), $M_w=7.5$ (Sarı) ve $M_w=6.7$ (Beyaz)'lik depremlerin episantrlarını göstermektedir. DAF: Doğu Anadolu Fayı, DSF: Ölü Deniz Fayı, KAF: Kuzey Anadolu Fayı)

Figure 1: Simplified tectonic and active fault map (Location of the stars indicate the epicentre of the earthquakes whose magnitude is $M_w=7.8$ (Red), $M_w=7.5$ (Yellow) and $M_w=6.7$ (White). DAF: East Anatolian Fault, DSF: Dead Sea Fault, KAF: North Anatolian Fault.)

Ölü Deniz Fayı'nın doğrultusu boyunca önemli yapısal farklılıklar bulunmaktadır. Yapısal olarak Ölü Deniz Fayı Kuzey ve Güney segment olarak ikiye ayrılabilir (yaklaşık 33.16° K Enlemi). Güney segmenti, altlarında derin basenlerin olduğu süreklilik gösteren vadilerden oluşmaktadır (Garfunkel 1981). Kuzey segmenti ise yapısal olarak Güney'den oldukça farklıdır. Kuzey segmenti K-G uzanımlı değişken karakterli faylar içermektedir. Kuzey segmentinin iki tarafı da transform fayın gelişimi sırasında önemli ölçüde deforme olmuştur (Ben-Avraham ve diğ. 2008).

Şekil 1'de bölgenin genel tektonik yapısı ve diri fayları gösterilmiştir. 6 Şubat 2023'te meydana gelen 3 depremin lokasyonu ($M_w=7.8$, $M_w=7.5$ ve $M_w=6.7$ olan depremler) da harita üzerine işlenmiştir. Diri fay haritası için Emre ve diğ. (2013) kullanılmıştır. Tektonik ana hatlar ise Ben-Avraham ve diğ. (2008)'den kullanılmıştır.

3. VERİ

Swarm uydu görevi 22 Kasım 2013 tarihinde Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından başlatılmıştır. Görevin ana amacı Dünya'nın manyetik alanına ait dinamikleri ve ona etki eden faktörleri araştırmak olarak belirlenmiştir (Friis-Christensen ve diğ. 2008). İkincil amacı ise zamana bağlı gravite ölçümlerinin yapılması ve GRACE ile GRACE-FO uydularının arasındaki veri boşluğunun tamamlanmasıdır (Dahle ve diğ. 2020). Swarm uydu görevi içerisinde üç adet birbirinin aynısı uydu bulunmaktadır. Bu uydular Swarm A, B ve C olarak isimlendirilmektedir. Swarm A ve C uyduları yaklaşık 470 km yükseklikten 87.4° inklinasyon açısı ile veri toplar iken Swarm B uydusu 87.8° inklinasyon açısı ile 520 km yükseklikten veri toplamaktadır. Swarm A ve C uyduları arasındaki yatay uzaklık 50-200 km arasında değişmektedir. Swarm B uydusu Swarm A ve C uydularına göre farklı bir uydu periyoduna sahiptir. Ayrıca, Swarm B uydusunda Swarm A ve C uydularına göre yaklaşık 25°/yıl yörünge kayması gözlenmektedir (Sieg ve Diekmann 2016).

Swarm uyduları araştırma görevini gerçekleştirebilmek için birçok bilimsel ekipman ile donatılmıştır. Bunlar; skaler ve vektörel manyetometre, elektrik alan ekipmanı, ivme ölçer ve yıldız kameraları olarak özetlenebilir. Swarm uyduları konumlarının ve yörüngelerinin doğru saptanabilmesi için RUAG çift frekanslı, yüksek doğruluklu ve 8 kanallı GPS alıcılarına sahiptir. Bu GPS alıcıları sayesinde hem spesifik bir Swarm uydusunun yörüngesi belirlenebilir hem de uydu çiftinin yörüngeleri belirlenebilmektedir. Swarm uyduları fırlatıldıktan sonra GPS alıcılarının performansını arttırmak için bazı modifikasyonlar da yapılmıştır (Jin ve diğ. 2022).

Çalışma kapsamında Swarm uydularına ait veriler 06 Ağustos 2022 ile 09 Şubat 2023 arasında 15.80° ve 58.33° K enlemleri ile 5.22° ile 63.48° D boylamları için <https://vires.services/> sitesinden indirilmiştir. İndirilen veriler arasında Swarm A, B ve C uydularına ait vektörel (X, Y ve Z) ve toplam alan (F) manyetik ölçümleri, bu ölçümlere ait belirsizlik miktarları, uydu yörünge numaraları, uydu potansiyeli (V_s) ve seçilen alan için IGRF-13 (International Geomagnetic Reference Field 13) modeli bulunmaktadır.

İndirilen veri, dış kaynaklı manyetik alan etkisinden arındırılması için Dst ve Kp endeksleri ile filtrelenmiştir. F10.7 endeksi sessiz jeomanyetik zamana ait verileri de filtrelediği için bu çalışmada kullanılmamıştır. Basit olarak Dst verisi uzayın jeomanyetik fırtınalar açısından hava durumunu ölçen bir parametredir ve birimi nanoTesla ("nT") dır. Kp verisi ise jeomanyetik alanın yatay bileşenindeki bozulmaları gösterir ve 0-9 arasında değişir. Kp endeksi 1 değerini alıyor ise jeomanyetik açıdan sessiz, 5 değerinin üzerine çıkar ise jeomanyetik fırtınayı işaret etmektedir. Kp endeksi birimsizdir. F10.7 verisi, koronal plasmanın manyetik alan içerisinde kapanmasından kaynaklı oluşan 10.7 cm dalga boyu güneş kaynaklı emisyonları göstermektedir. Güneş Akı Birimi SFU ile gösterilir ve $1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ olarak verilir.

Uydu potansiyeli (V_s) verilerinin kullanılmasının sebebi, uzay aracının yükü yere iletmek için bağımsız bir yöntemi olmadığından, ortamdaki plazma ve yüzey emisyonu ile etkileşimler

nedeniyle doğal olarak yük biriktirir. Bu yük, uzay aracını çevreleyen bir plazma kılıfı şeklini alan bir elektrik alanı üretir. Bu kılıftan geçen yüklü parçacıklar hem enerji hem de yön olarak değişime uğrar ve böylece ölçülen bilimsel parametreleri etkiler (Barrie ve diğ. 2019).

4. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında kullanılan yöntem şeması, “*Spline Analizi ile Swarm Manyetik Anomali Belirleme (MASS)*” temel alınarak yapılmıştır. MASS yöntemi, De Santis ve diğ. (2019) tarafından önerilmiştir. MASS yöntemi için zamana bağlı manyetik veriler kullanıldığı için ana depremden 6 ay öncesi ve 1 ay sonrasını kapsayacak veriler kullanılmalıdır. Bu çalışma ilksel sonuçlara odaklandığı için depremden 1 ay sonrasını içeren veriseti bulunmamaktadır. 06 Ağustos 2022 ile 09 Şubat 2023 arasındaki veri seti ile çalışılmıştır. Yöntem şeması 6 aşamaya bölünebilir:

İlk aşamada sismik aktivitenin kapsadığı alan ile manyetik anomali arasında bir ilişki kurmak için Dobrovolsky ve diğ. (1979)'un önerdiği Dobrovolsky Dairesi hesaplanır. Dobrovolsky Dairesi Eşitlik 1 ile hesaplanabilir:

$$R_{DB} = 10^{0.43M} \quad (1)$$

Bu formülünde R_{DB} Dobrovolsky Dairesinin yarı-çapını gösterir iken M depremin büyüklüğünü göstermektedir. Dobrovolsky Dairesi büyüklüğü $M_w=7.8$ olan deprem için 2259.44 km olarak hesaplanmıştır ve Dobrovolsky Dairesi içinde 1250 adet uydu yörüngesi bulunmaktadır. Büyüklüğü $M_w=7.5$ ve $M_w=6.7$ olan depremler için ayrı Dobrovolsky Dairesi hesaplanmamıştır. Bunun nedeni $M_w=7.8$ olan depreme ait Dobrovolsky Dairesi diğer depremlere etki alanlarını da kapsamaktadır.

İkinci aşamada, ilgili tarih aralığı ve ilgili çalışma alanı için manyetik veriler, jeomanyetik endeksler ile filtrelenerek <https://vires.services/> sitesinden indirilir. Bu çalışma kapsamında Kp, Dst ve F10.7 jeomanyetik endeksleri kullanılmıştır. Filtreleme aşamasında Dst endeksi için $-10 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq 10 \text{ nT}$, Kp endeksi için $Kp < 5$ ve F10.7 endeksi için $F10.7 \leq 110 \text{ SFU}$ seçilmiştir. Ancak Fitzmaurice ve diğ. (2017)'nin yaptığı çalışmada F10.7 endeksinin sessiz jeomanyetik zamanlarda dahi 110 SFU üzerinde olduğu gözlemlendiği için veri kaybını önlemek amacıyla F10.7 endeksine ait filtre bu çalışmada dikkate alınmamıştır.

İndirilen manyetik veriler ile birlikte Swarm uydularının konumları (enlem, boylam ve yükseklik bilgileri), yörünge bilgileri (yörünge numarası ve yönü) ve jeomanyetik alan modelleri (bu çalışma için IGRF-13) de indirilir. Daha sonra yer manyetik alanın etkisi, ilgili yüksekliğe ait IGRF-13 modelini kullanarak ölçülen manyetik veriden elimine edilir.

Üçüncü aşamada toplam manyetik alan bileşeni (F) eksik ise vektörel bileşenler (X, Y ve Z) kullanılarak 2 no'lu Eşitlik ile hesaplanır. Daha sonra, coğrafi enlem ve boylam, jeomanyetik enlem ve boylama dönüştürülür.

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2)$$

Dördüncü aşamada manyetik alanın X, Y, Z ve F bileşenlerinin zamana bağlı 1'inci türevi alınır ve dX, dY, dZ ve dF elde edilir. Daha sonra dX, dY, dZ ve dF içerisindeki uzun dalga boylu bileşenlerin filtrelenmesi gerekmektedir. Bu işlem için spline interpolasyon yöntemi kullanılır. dX, dY, dZ ve dF bileşenleri daha geniş bir örnekleme aralığı ile yeniden interpolate edilir ve i_dX , i_dY , i_dZ ve i_dF elde edilir. Daha sonra $dX-i_dX$, $dY-i_dY$, $dZ-i_dZ$ ve $dF-i_dF$ işlemleri yapılarak dt_dX , dt_dY , dt_dZ ve dt_dF elde edilir. Elde edilen veriler uzun dalga boylu bileşenlerinden ve dış kaynaklı manyetik alandan arındırılmış rezidüel değişimleri gösteren manyetik alan bileşenleridir.

Beşinci aşamada filtrelenen manyetik alan bileşenleri (dt_dX, dt_dY, dt_dZ ve dt_dF), 1250 adet uydu yörüngesi arasından deprem tarihine yakın (06 Şubat 2023) rastgele birkaç yörüngenin seçilmesi ile analiz edilir. Bu aşamaya “*tekli uydu yörünge analizi*” ismi verilmektedir. Bu analiz, seçilen yörüngelerdeki filtrelenenmiş manyetik alan bileşenlerinin, coğrafi veya jeomanyetik enleme karşı çizdirilmesi olarak tanımlanabilir. Tekli uydu yörünge analizi uygulanan filtrelerin veriye olan etkisini incelemek ve veride olağan dışı bir durumun olup olmadığını teyit etmek için yapılan bir çalışmadır. Seçilen yörüngelerde anomali olup olmadığı sübjektif olarak kontrol edilir.

Son aşamada 1250 adet yörüngedeki dt_dX, dt_dY, dt_dZ ve dt_dF bileşenlerindeki manyetik anomaliler kayan RMS penceresi ile nicel olarak tespit edilir. Bu işlemin yapılabilmesi için RMS penceresinin boyutu ve manyetik anomali tanımlama katsayısı (k_t) belirlenmelidir. Bu çalışma için RMS penceresinin boyu 9 ve k_t parametresi (minimum 1 ve maksimum 3) 3 olarak belirlenmiştir. Kayan RMS penceresi ile manyetik anomali tayini için öncelikle herhangi bir manyetik alan bileşenine ait tek bir yörünge üzerindeki bütün verinin RMS'i ($DATA_{RMS}$) ile yörünge içerisinde seçilen pencere içerisindeki verinin RMS'i ($PENCERE_{RMS}$) karşılaştırılır. Eğer $PENCERE_{RMS} > DATA_{RMS} * k_t$ ise bu bir anomali olarak nitelendirilir. Yöntemin uygulaması 3 no'lu Eşitlik'te formülize edilmiştir:

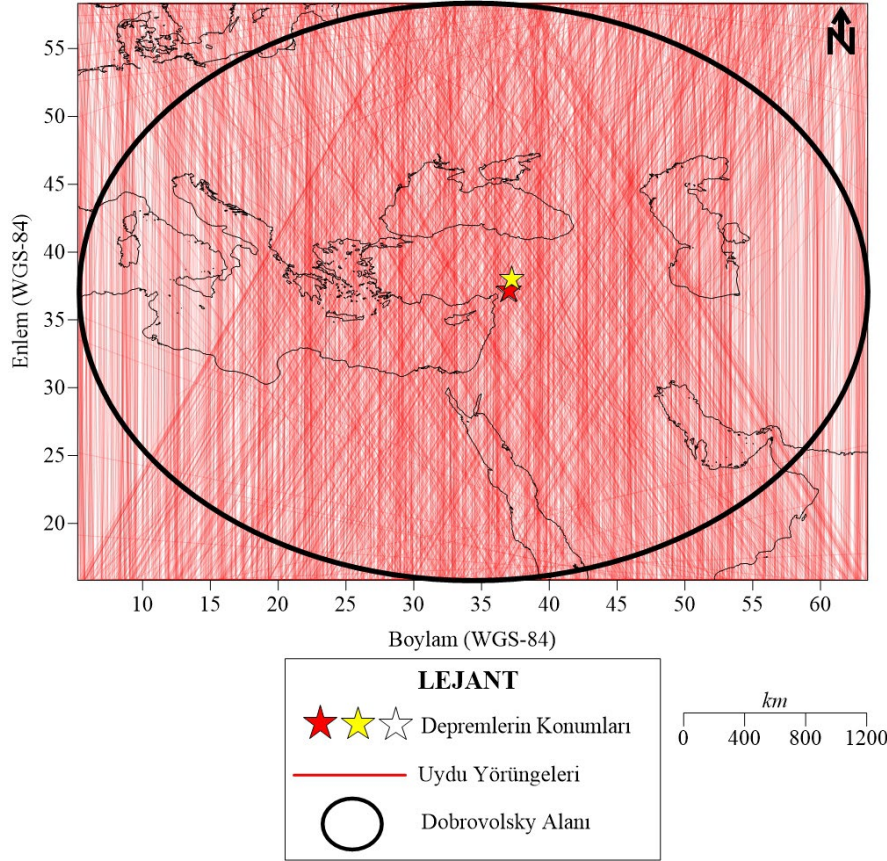
Yörünge boyunca bir manyetik alan bileşenine (dt_dX veya dt_dY veya dt_dZ veya dt_dF) ait pencerenin kapsadığı her x veri seti için;

$$Manyetik\ Anomali\ Sayısı = \begin{cases} 1, & PENCERE_{RMS} > DATA_{RMS} * k_t \\ 0, & PENCERE_{RMS} \leq DATA_{RMS} * k_t \end{cases} \quad (3)$$

Bu formül tek bir yörünge üzerindeki manyetik alan bileşenine uygulandıktan sonra o yörüngeye ait manyetik anomali sayısı kayıt edilir. Daha sonra aynı manyetik alan bileşenine ait kalan 1249 yörünge için de (3) no'lu Eşitlik uygulanır ve kalan 1249 yörünge için de her bir yörüngeye ait manyetik anomali sayısı kayıt edilir. Seçilen manyetik alan bileşeninin 1250 adet yörüngeye ait manyetik anomali sayısı kümülatif olarak çizdirilir. Ortaya çıkan grafik kümülatif olarak çizdirildiği için artan bir trende sahip olacaktır. Buna “kümülatif manyetik anomali sayısı grafiği” denmektedir. Daha sonra diğer manyetik alan bileşenleri için de aynı işlemler yapılır. Bu işlemlerin sonucunda 4 adet (dt_dX, dt_dY, dt_dZ ve dt_dF için) kümülatif manyetik anomali sayısı grafiği elde edilecektir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma alanı içerisinde kalan uydu yörüngelerinin tespit edilebilmesi için 2259.44 km'lik yarıçapa sahip Dobrovolsky Dairesi çizdirilmiştir. Bu alan içerisinde kalan uydu yörüngeleri (1250 adet) “*tekli uydu yörünge analizi*” aşamasında ve “*kümülatif manyetik anomali sayısı grafiği*” aşamasında kullanılmıştır. Şekil 2'de Dobrovolsky Dairesi ve içerisinde kalan uydu yörüngeleri gösterilmiştir.



Şekil 2: Dobrovolsky Alanı ($r=2259.44$ km) ve içerisinde kalan uydu yörüngeleri (1250 adet)
 Figure 2: Dobrovolsky Area ($r=2259.44$ km) and satellite trajectories (1250 units) within Dobrovolsky Area

5.1) Tekli Yörünge Analizi Bulguları

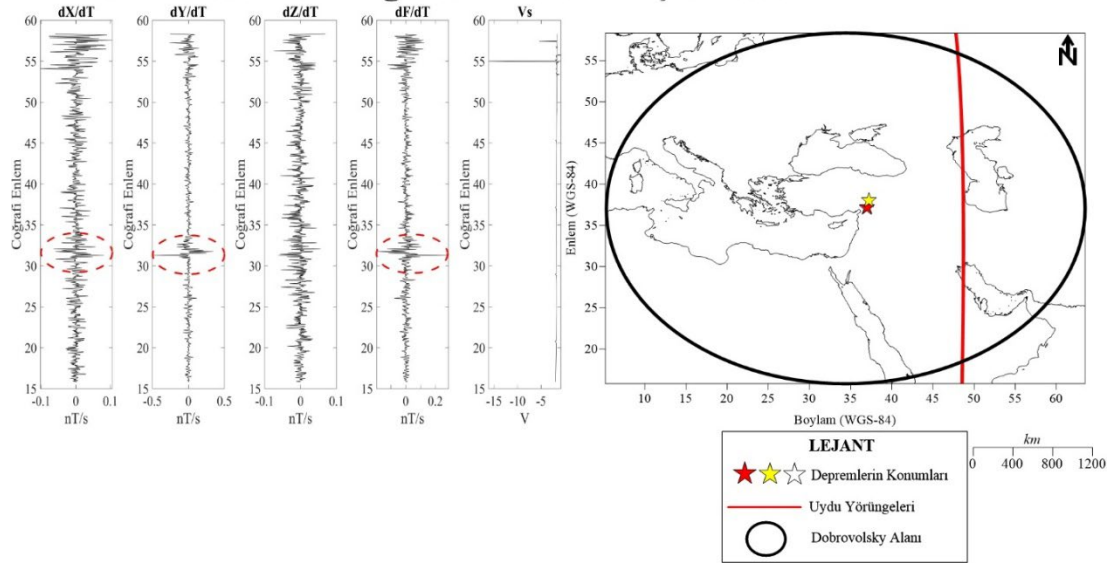
Dobrovolsky Dairesi içerisinde kalan 1250 adet yörüngeden, deprem tarihine (06 Şubat 2023 civarı) yakın yörüngelerden 6 tanesi tekli yörünge analizi aşamasında kullanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere tekli yörünge analizi sonuçları nihai sonucu göstermemektedir. Yalnızca uygulanan filtrelerin veriye olan etkisini incelemek için uygulanan bir sağlama yöntemidir. Tekli yörünge analizi için her bir Swarm uydusundan (Swarm A, Swarm B ve Swarm C) ikişer adet rastgele yörünge seçilmiş ve seçilen yörüngelerdeki anomaliler subjektif olarak yorumlanmıştır. Tekli analiz sonuçlarını yorumlama aşamasında, manyetik alanın F bileşeninde gözlenen trendden sapmalar X, Y ve Z bileşenlerinin bileşkelerini içereceği için bağımsız bir değişken olarak değerlendirilmemelidir.

Ayrıca De Santis ve diğ. (2019) ve Özsoz (2022) uzay aracı potansiyelinin ana şokun hazırlık aşamasında öncül bir anomali oluşturabileceğini göstermiştir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında da "tekli uydu yörünge analizi" sonuçları uydu potansiyeli (Vs) ile birlikte sunulmuştur. Buna ek olarak uydu potansiyelinde meydana gelen anormal değişimler ile de uzay aracının etrafındaki plasma kılıfının ölçümleri nasıl etkilediği incelenebilecektir.

5.1.1.) Swarm A Uydusu 51737 ve 51746 Numaralı Yörüngeler İçin Elde Edilen Bulgular

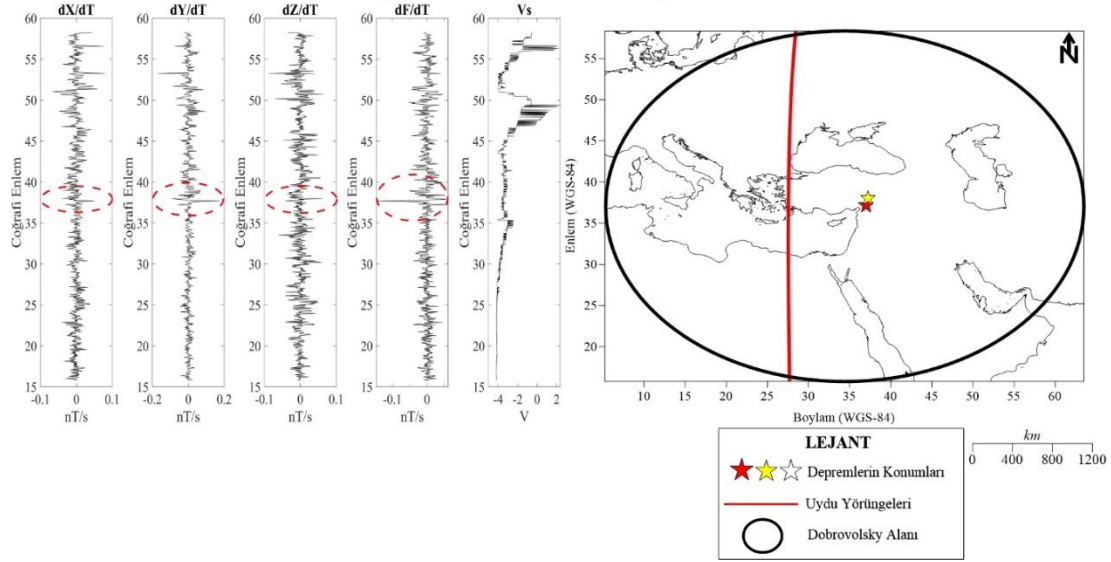
Şekil 3 ve 4'te Swarm A uydusuna ait 51737 ve 51746 numaralı yörüngelerin tekli yörünge analizi sonuçları gösterilmiştir.

Swarm A - Yörünge No: 51737 - 03 Şubat 2023



Şekil 3: Swarm A-51737 numaralı yörüngeye ait tekli yörünge analizi sonuçları
Figure 3: Single track analysis results for Swarm A-Orbit Number: 51737

Swarm A - Yörünge No: 51746 - 03 Şubat 2023



Şekil 4: Swarm A-51746 numaralı yörüngeye ait tekli yörünge analizi sonuçları
Figure 4: Single track analysis results for Swarm A-Orbit Number: 51746

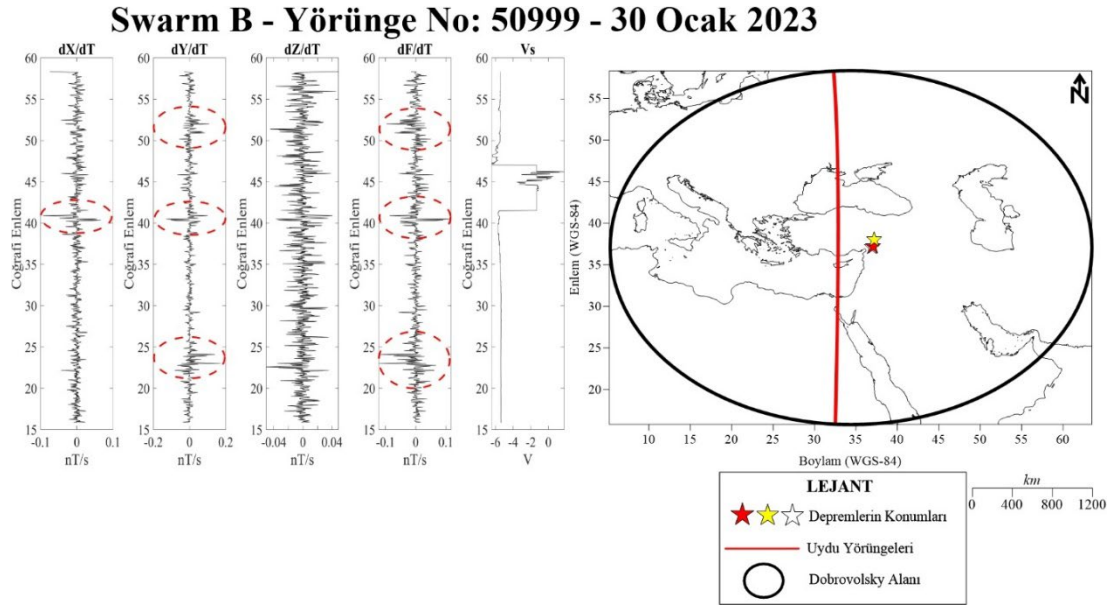
Şekil 3'te Swarm A-51737 numaralı yörünge 3 Şubat 2023 tarihinde $M_w=7.8$ olan depremin boylamsal lokasyonunun (37.032°) yaklaşık 10° doğusundan geçmektedir. Bu yörünge boyunca manyetik alanının X ve Y bileşenlerinin zamana göre türevlerinde $30^\circ-35^\circ$ enlemleri arasında ölçülen manyetik alan bileşeni trendlerinde önemli değişimler gözlenmiştir. Bu değişimler Dobrovolsky Alanı içerisinde yer almaktadır.

Şekil 4'te ise Swarm A-51746 numaralı yörünge 3 Şubat 2023 tarihinde $M_w=7.8$ olan depremin boylamsal lokasyonunun (37.1736°) yaklaşık 9.5° batısından geçmektedir. Bu yörüngede manyetik alanın bütün bileşenlerinin zamana göre türevlerinde bir sapma gözlenmiştir. Bu sapma $35^\circ-40^\circ$ enlemleri arasında gözlenmiştir. Ayrıca, manyetik alanda oluşan bu sapmalar,

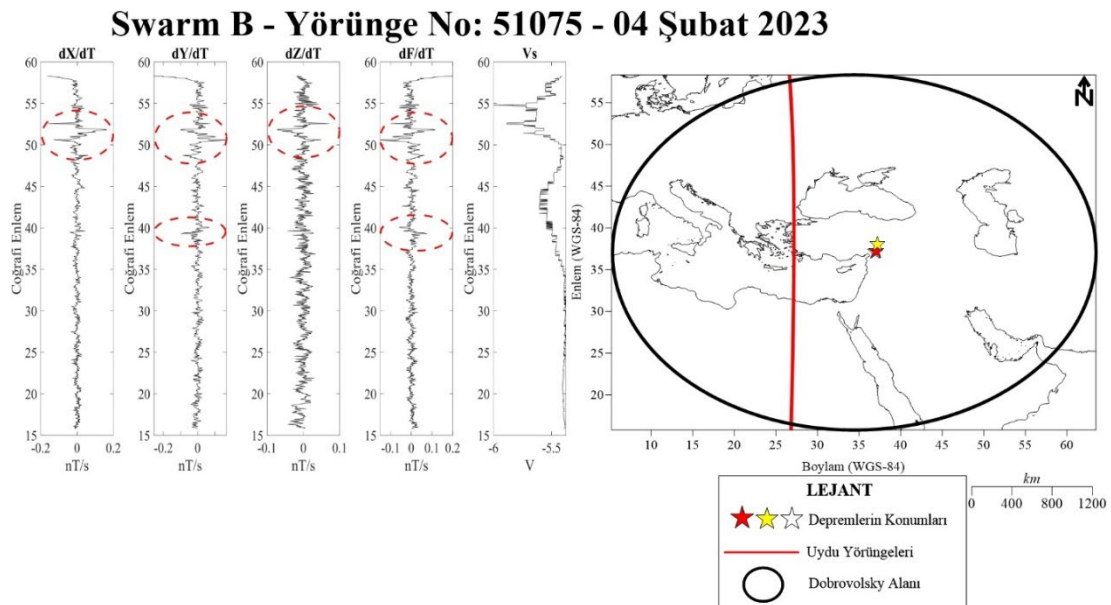
deprem lokasyonunun enlemine (37.174°) oldukça yakın bir noktadadır. Ancak tekli yörünge analizi ile nihai yorum yapmak bilimsel kriterlere uygun olmamaktadır. Bunun nedeni, yorumun subjektif olması ve tek bir bulgudan veya tek bir yörüngeden tümevarım yapılmasıdır. Nihai yorum Kümülatif manyetik anomali sayısı analizi aşamasında yapılacaktır.

5.1.2.) Swarm B Uydusu 50999 ve 51075 Numaralı Yörüngeler İçin Elde Edilen Bulgular

Şekil 5 ve 6'da Swarm B uydusuna ait 50999 ve 51075 numaralı yörüngelerin tekli yörünge analizi sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5: Swarm B-50999 numaralı yörüngeye ait tekli yörünge analizi sonuçları
Figure 5: Single track analysis results for Swarm B-Orbit Number: 50999



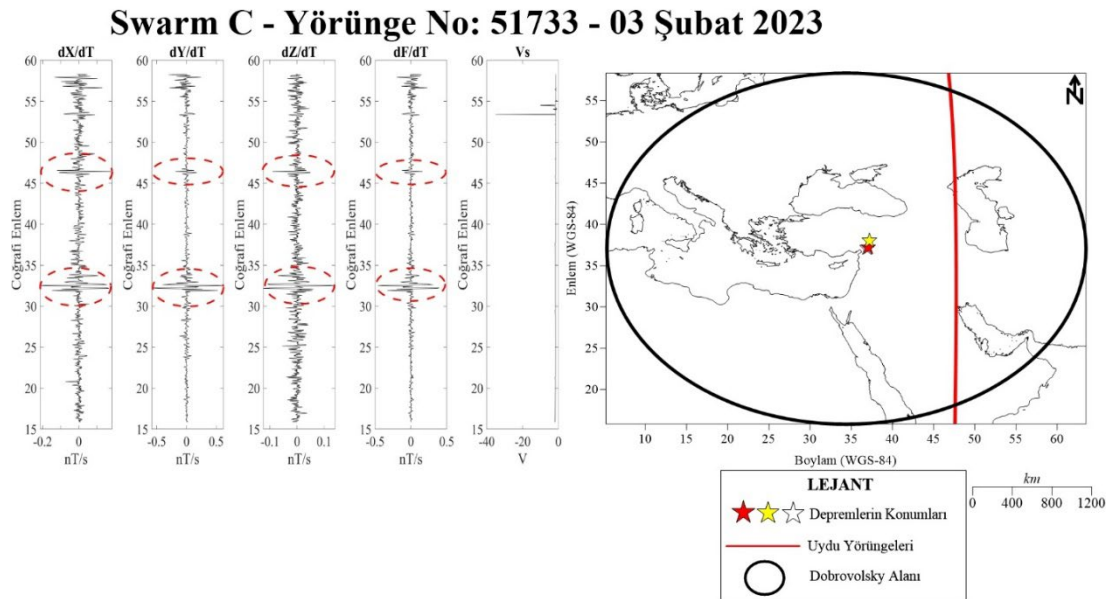
Şekil 6: Swarm B-51075 numaralı yörüngeye ait tekli yörünge analizi sonuçları
Figure 6: Single track analysis results for Swarm B-Orbit Number: 51075

Şekil 5'te Swarm B-50999 numaralı yörünge 30 Ocak 2023 tarihinde $M_w=7.8$ olan depremin boylamsal lokasyonunun (37.032°) yaklaşık 5° batısından geçmektedir. Bu yörünge boyunca manyetik alanının X bileşeninin zamana göre türevinde $38^\circ-41^\circ$ enlemleri arasında önemli sapmalar meydana gelirken, dY/dT bileşeninde 3 önemli sapma gözlenmiştir. Kuzey'den, Güney'e doğru, ilk sapma yaklaşık $50^\circ-55^\circ$ enlemleri arasında; ikinci sapma $38^\circ-41^\circ$ enlemleri arasında ve son sapma da $20^\circ-25^\circ$ enlemleri arasında gözlemlenmiştir. $50^\circ-55^\circ$ enlemleri arasında kalan sapmalar Dobrovolsky Alanı sınırlarına oldukça yakın olduğu için dikkatli yorumlanmalıdır. Ayrıca uydu potansiyeli (Vs), yaklaşık 45° enleminde kısa bir süreliğine $-5.5V$ 'dan $0 V$ 'a veya elektrostatik dengeye ulaşmıştır. dZ/dT bileşeni gürültülüdür ve içerisindeki anomali gösteren alanları gözle tespit etmek oldukça güçtür. Subjektif olarak değerlendirilirse, Swarm B-50999 numaralı yörünge depremden yaklaşık 1 hafta önce neredeyse bütün ölçülen parametrelerde depremin hazırlık aşamasına tepki vermiştir.

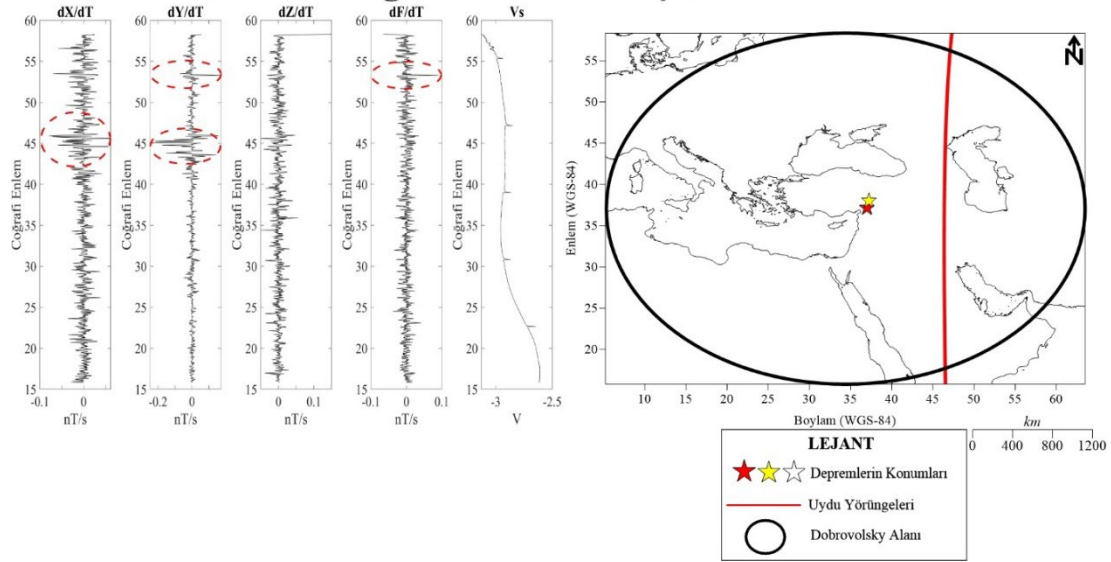
Şekil 6'da Swarm B-51075 numaralı yörünge 04 Şubat 2023 tarihinde $M_w=7.8$ olan depremin boylamsal lokasyonunun (37.032°) yaklaşık 11° batısından geçmektedir. Bu yörünge boyunca manyetik alanın bütün bileşenlerinin zamana göre türevlerinde $50^\circ-55^\circ$ enlemleri arasında sapmalar meydana gelmiştir. Bu alanda meydana gelen sapmalar Dobrovolsky Alanı'nın Kuzey sınırına çok yakındır ve ana şokun hazırlık aşamasına ait bir anomali olarak nitelendirilmeyebilir. dT/dY bileşeninde $36^\circ-40^\circ$ enlemleri arasında gözlenen sapma ise deprem lokasyonunun enlemine (37.174°) oldukça yakın bir noktadadır. Uydu potansiyelinde (Vs) ise 35° enleminden sonra maksimum $-0.5V$ sapmalar meydana gelmiştir. Bu sapma miktarları çok küçük olduğu için ana şokun hazırlık aşamasına ait bir ilişkisi olmadığı düşünülmektedir.

5.1.3.) Swarm C Uydusu 51733 ve 51787 Numaralı Yörüngeler İçin Elde Edilen Bulgular

Şekil 7 ve 8'de Swarm C uydusuna ait 51733 ve 51787 numaralı yörüngelerin tekli yörünge analizi sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 7: Swarm C-51733 numaralı yörüngeye ait tekli yörünge analizi sonuçları.
Figure 7: Single track analysis results for Swarm C-Orbit Number: 51733.

Swarm C - Yörünge No: 51787 - 06 Şubat 2023

Şekil 8: Swarm C-51787 numaralı yörüngeye ait tekli yörünge analizi sonuçları.
Figure 8: Single track analysis results for Swarm C-Orbit Number: 51787.

Şekil 7’de Swarm C-51733 numaralı yörünge 03 Şubat 2023 tarihinde $M_w=7.8$ olan depremin boylamsal lokasyonunun (37.032°) yaklaşık 11° doğusundan geçmektedir. Bu yörünge boyunca manyetik alanının tüm bileşenlerinin zamana göre 1’inci türevlerinde 45° - 50° enlemleri arasında ve 30° - 35° enlemleri arasında çok belirgin anomaliler gözlemlenmiştir. Uydu potansiyeli (Vs) 50° - 55° enlemleri arasında çok büyük bir sapma (yaklaşık $-38V$ kadar) gösterdiği için yorumlanabilir değildir.

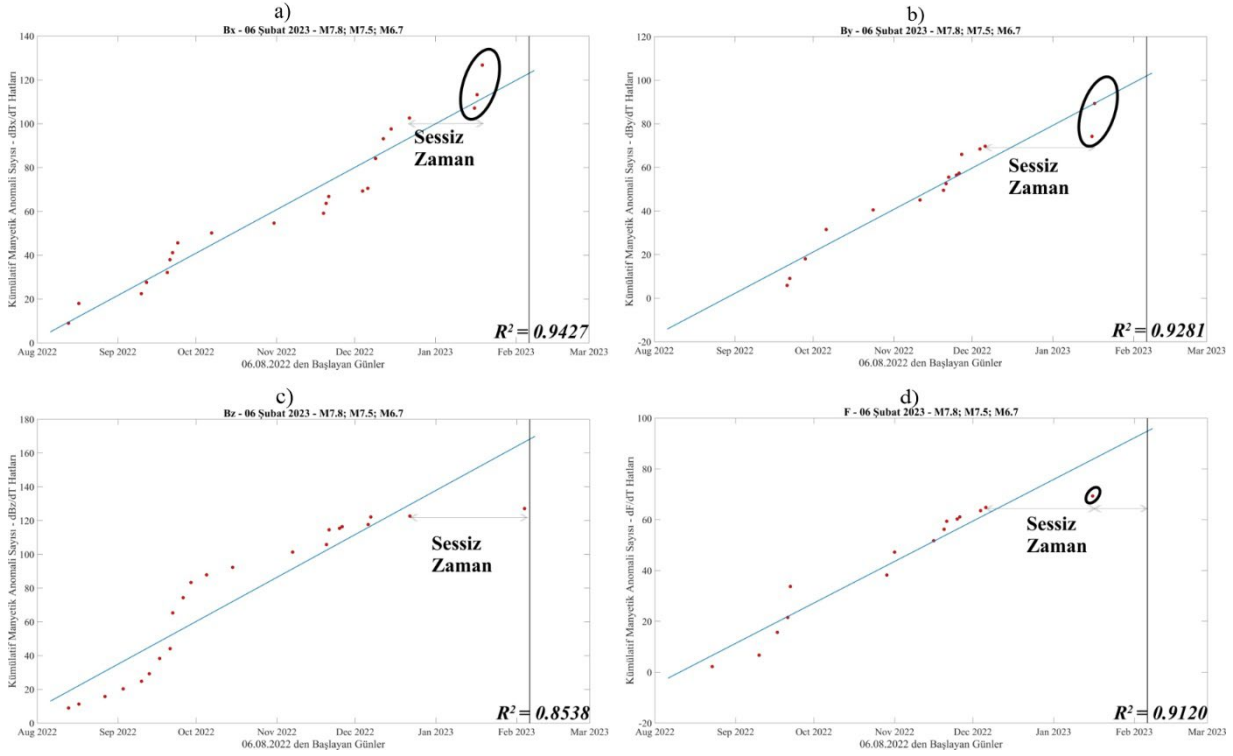
Şekil 8’de Swarm C-51787 numaralı yörünge deprem gününde (06 Şubat 2023) $M_w=7.8$ olan depremin boylamsal lokasyonunun (37.032°) yaklaşık 10° doğusundan geçmektedir. Bu yörünge boyunca en belirgin anomaliler dT/dY bileşeninde 50° - 55° enlemleri arasında ve 45° enlemi civarında gözlemlenmiştir. dX/dT bileşeni çok gürültülü olmasında karşın 45° civarında subjektif olarak yorumlanan bir anomali mevcuttur. Uydu potansiyeli (Vs) verisinde ise önemli bir sapma gözlemlenmemiştir.

5.1) Kümülatif Manyetik Anomali Sayısı Bulguları

Seçilen rastgele yörünge numaralarında yapılan tekli yörünge analizi sonuçları göstermektedir ki veriye uygulanan filtreleme işlemleri sonucu veride olağan dışı bir durum ile karşılaşılmamıştır. Seçilen yörüngelerde subjektif olarak anomali tayini yapılabilmektedir ve anomali gösteren bölgeler genellikle belirgin bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Bu nedenle kümülatif manyetik anomali sayısı analizinde kullanılacak olan 1 ve 3 arasında değişen manyetik anomali tanımlama katsayısı (k_i) 3 olarak seçilmiştir. Bu seçimle beraber otomatik anomali tayini daha sıkı koşullar için yapılacaktır. Bir başka deyişle, yalnızca en belirgin sapmalar, anomali olarak nitelendirilecektir.

Kümülatif manyetik anomali sayısı grafikleri daha önce de bahsedildiği gibi manyetik alanın X, Y, Z ve F bileşenleri için tüm yörüngeler hesaba katılarak üretilmektedir. Kümülatif anomali sayısı ile yapılan birçok çalışmada manyetik alanının Y bileşeni depremin hazırlık aşamasına en çok cevap veren bileşen olarak öne çıkmaktadır ve depremin hazırlık aşaması ile deprem sonrası dönemde “S” şeklide bir trend izlemektedir (De Santis ve diğ. 2019, Marchetti ve diğ. 2020, Ozsoz ve Pamukcu 2021, Özsoz 2022). Ancak bu çalışmada ilksel sonuçlar irdelendiği ve deprem sonrası dönem verileri bulunmadığı için, sonuçlarda “S” şeklindeki trendin tamamlanması beklenmeyecektir.

Bütün manyetik alan bileşenlerine (X, Y, Z ve F) ait Dobrovolsky Alanı içerisinde kalan tüm yörüngelerin (1250 adet) analiz edilmesi sonucu elde edilen kümülatif anomali sayısı grafiği Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Kümülatif manyetik anomali sayısı grafikleri (Manyetik alanının a) X bileşeni, b) Y bileşeni, c) Z bileşeni ve d) F bileşeni. Düşey çizgi deprem gününü göstermektedir. Lineer model mavi çizgi ile gösterilmektedir.)

Figure 9: Cumulative number of anomalous tracks a) X component, b) Y component, c) Z component and d) F component of the magnetic field. Vertical line indicates day of the earthquake. Lineer model is shown by blue line.)

Şekil 9'da her bir manyetik alan bileşenine ait kümülatif anomali sayısı depremden 6 ay öncesi ve 3 gün sonrasını kapsayan bir periyod için gösterilmiştir. Zamana bağlı manyetik alan ölçümlerinde, eğer dış kaynaklı manyetik alan etkisi filtrelenir ise aynı noktadan farklı zamanlarda alınan manyetik verilerin normal koşullarda yaklaşık aynı miktarda sapmalar meydana getirmesi beklenmektedir. Bu aynı miktardaki sapmalar kümülatif olarak çizdirildiğinde ise doğrusal artan bir trende oturması beklenmektedir. Ancak Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimi nedeniyle, depremin hazırlık aşamasında aynı noktadan farklı zamanlarda alınan veride lineer modelden uzaklaşmaların gözlemlenmesi beklenmektedir.

Şekil 9a'da manyetik alanın X bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiği neredeyse doğrusal olarak artış göstermektedir ($R^2=0.9427$). Depremden yaklaşık 45 gün önce başlayan (22 Aralık 2022) sessiz zamandan (anomali gözlenmeyen zaman) sonra 16 Ocak 2023'de doğrusal artıştan sapmalar meydana gelse bile bu tip bir değişim 17 Ağustos 2022 ile 24 Eylül 2022 tarihleri arasında da gözlemlenmiştir. Küçük sapmalar göz ardı edildiğinde manyetik alanın X bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğinde ana şokun hazırlık aşamasına dair bir öncül sinyal yorumlanamamıştır.

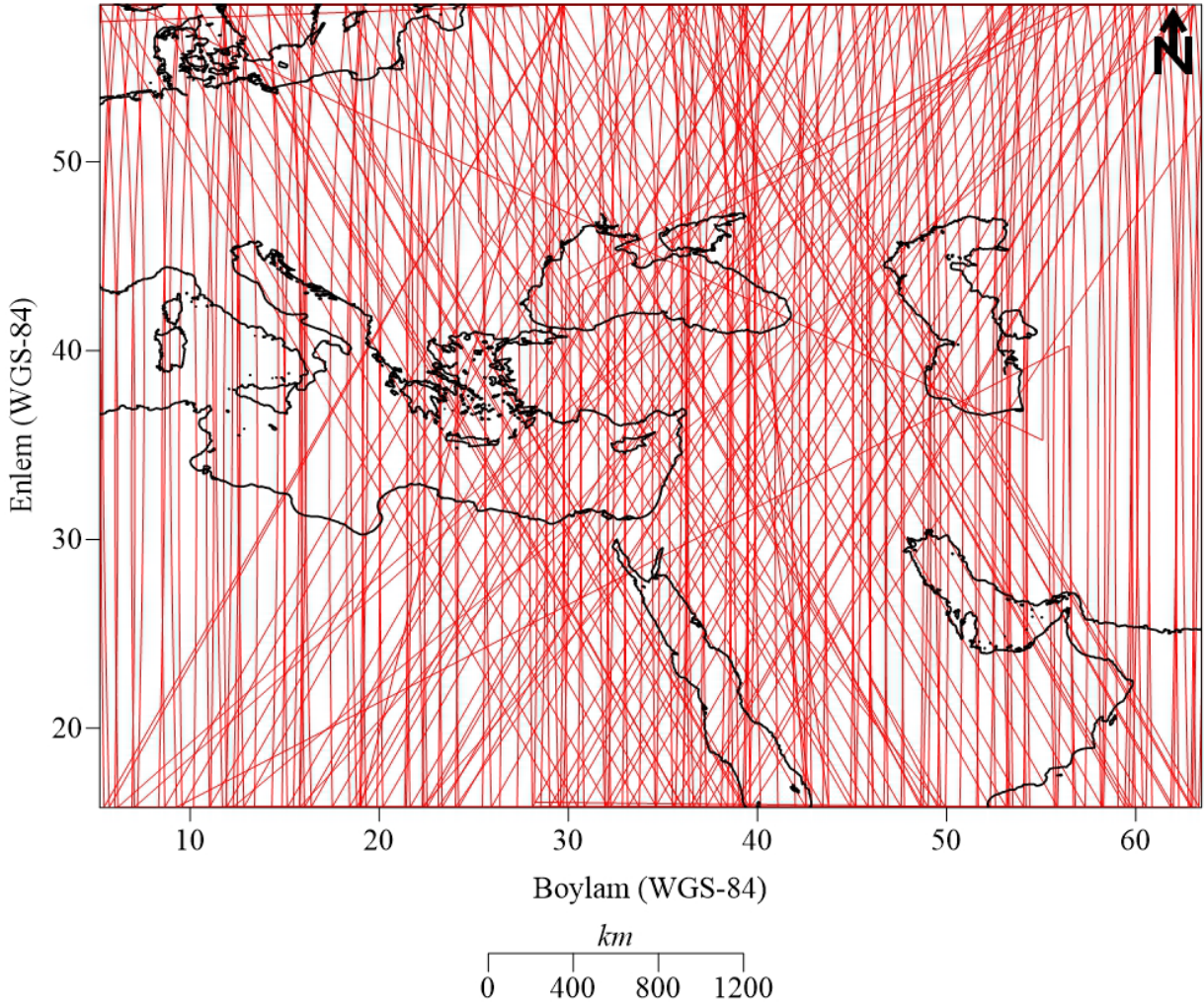
Şekil 9b'de manyetik alanın Y bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiği Aralık ayı başına kadar çok az bir sapma ile doğrusal trendi takip etmektedir. Aralık ayı başından (06 Aralık 2022) Ocak ayı ortasına (16 Ocak 2023) kadar yaklaşık 40 gün süren anomali açısından "sessiz zaman" dan sonra oluşan ilk kümülatif anomali değişimi (16 Ocak 2023) lineer modelden oldukça farklı bir konumda oluşmaktadır. Daha sonra 17 Ocak 2023 tarihinde lineer modelin tam üzerinde bir anomali değişimi saptanmıştır. Bu bileşende deprem tarihine yakın meydana gelen bu değişimler depremden önceki 6 ay boyunca hiç oluşmamış ve kendini tekrarlamayan değişimlerdir. Depremden önceki 6 aylık periyotta 40 gün süren bir sessiz zaman süresi de bulunmamaktadır. Bu nedenle manyetik alanın Y bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğinde depremden hemen önce meydana gelen ve kendini tekrarlamayan bu değişimler ana şokun hazırlık aşamasına dair bir öncül sinyal olarak yorumlanabilir.

Şekil 9c'de manyetik alanın Z bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiği doğrusal trendden en uzak dağılımı göstermektedir. Nitekim yapılan tekli yörünge analizlerinde ve daha önceki çalışmalarda da manyetik alanın Z bileşeninin gürültüye en duyarlı bileşen olduğu bilinmektedir. Ancak bu manyetik alan bileşeni depremin hazırlık aşamasına cevap verdiği durumlarda en belirgin sonucun gözlemlenebileceği bileşen olarak nitelendirilir. Bu çalışmada manyetik alanın Z bileşeninde sistematik olmayan, rastgele gürültü nedeniyle aynı yerde farklı zamanlarda ölçülen manyetik hatlarda anomali sayıları lineer modelden oldukça uzağa dağılmaktadır. Ancak 22 Aralık 2022 tarihinde başlayan ve 04 Şubat 2023 tarihine kadar süren 44 günlük anomali açısından sessiz zaman gözlemlenmiştir. 04 Şubat 2023'de meydana gelen kümülatif anomali sayısı değişimi lineer modeli takip etmemiştir. Ayrıca, manyetik alanın Z bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğine genel olarak bakıldığında öncül anomali tayini için önceki çalışmalarda da oluşan "S" şeklinde bir trendin oluştuğu da gözlenmektedir. Bu nedenle manyetik alanın Z bileşeninin ana şokun hazırlık aşamasına dair önemli sinyaller verdiği söylenebilir.

Şekil 9d'de manyetik alanın F bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiği, X, Y ve Z bileşenlerinin bileşkesi olduğu için bu bileşendeki değişimler genel hatları irdelemek için kullanılabilir. Manyetik alanın F bileşenine ait kümülatif anomali sayısı grafiğinde sessiz zaman 06 Aralık 2022 tarihinde başlamış ve 16 Ocak 2023 tarihine kadar sürmüştür ve bu tarihten sonra da kümülatif anomali sayısı grafiği değişmemiştir. Buna benzer bir sessiz zaman süresi 22 Eylül 2022 ile 29 Ekim 2022 arasında gözlemlenmiş ancak 29 Ekim 2022'den hemen sonra 1 Kasım 2022'de kümülatif anomali sayısı grafiğinde değişim meydana gelmiştir. 06 Aralık 2022-16 Ocak 2023 arasındaki sessiz zaman ile 22 Eylül 2022-29 Ekim 2022 arasındaki sessiz zaman birbirlerine benzeseler bile 16 Ocak 2023'den hemen sonra kümülatif anomali sayısının değişmemesi 06 Aralık 2022-16 Ocak 2023 ve sonrasında tekrarlanmayan bir trend olduğunu göstermektedir. Bu nedenle manyetik alanın F bileşeninin de ana şokun hazırlık aşamasına ait öncül sinyaller verdiği söylenebilir.

Genel hatları ile sessiz zaman periyodlarına bakılır ise tüm manyetik alan bileşenlerinde 22 Aralık 2022-16 Ocak 2023 tarihleri arasında herhangi bir anomali değişimi bulunmamaktadır. Her bir bileşene ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğinde bu periyodun sessiz zamana denk gelmesi Swarm uydularının veri toplama işlemini geçici bir arıza nedeniyle kestiği veya o tarihler arasında şiddetli bir manyetik fırtınanın olduğu ve bu periyodun veriden filtrelediği anlamına da gelebilmektedir. Böyle bir arıza veya manyetik fırtınanın olmadığını teyit edebilmek için veri işlem aşamasında kullanılan ve 22 Aralık 2022-16 Ocak 2023 tarihlerini kapsayan uydu yörüngelerinin var olup olmadığı araştırılmalıdır. Şekil 10'da 22 Aralık 2022-16 Ocak 2023 tarihlerini kapsayan periyod için uydu yörüngeleri verilmiştir.

22.12.2022-16.01.2023 Tarihleri Arasındaki Uydu Yörüngeleri



Şekil 10: 22 Aralık 2022-16 Ocak 2023 tarihleri arasındaki uydu yörüngeleri
Figure 10: Satellite trajectories between 22th December 2022 and 16th January 2023

Şekil 10'da da görüldüğü üzere 22 Aralık 2022-16 Ocak 2023 tarihleri arasında Swarm uydularında herhangi bir arıza meydana gelmemiş veya bu tarihleri kapsayan uzun bir manyetik fırtına yaşanmamıştır. Bu nedenle 22 Aralık 2022-16 Ocak 2023 tarihlerini kapsayan sessiz zaman dönemleri herhangi bir arıza veya manyetik fırtına kaynaklı değildir. Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşiminden kaynaklı kümülatif manyetik anomali sayısındaki değişimler ile ilişkilidir.

Uygulanan kümülatif anomali sayısı yönteminin en önemli limitasyonu ana şokun hazırlık aşamasına ait oluşan anomalinin zamanındaki belirsizliktir. Bu belirsizlik ana şokun 2 ay öncesinden başlayarak 2 hafta öncesine kadar uzanabilmektedir. Bu nedenle yöntemin doğası hala araştırılmakta ve bu belirsizlik minimuma indirgenmeye çalışılmaktadır. Bir diğer limitasyon ise yöntem yalnızca $M \geq 6.0$ depremlerde sonuçlar üretirken $M \geq 7.0$ depremlerde belirgin sonuçlar üretmektedir. Swarm uydularının 2013 yılında fırlatıldığı düşünülür ise uygulanan yöntemin geçerliliğini henüz ispat etmek için yeteri kadar gözlemin olmadığı ve yöntemin şu an geliştirme aşamasında olduğu söylenebilir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 6 Şubat 2023'de meydana gelen 3 büyük depremin ($M_w=6.7$, $M_w=7.5$ ve $M_w=7.8$ olan depremler) etki ettiği bölgedeki Litosfer-Astenosfer ve İyonosfer etkileşimi incelenmiş ve ilksel sonuçlar sunulmuştur. Yapılan çalışmada 06 Ağustos 2022 ile 09 Şubat 2023 tarihleri arasında Dobrovolsky Alanı (2259.44 km yarıçaplı) içerisinde kalan dış kaynaklı etkileri filtrelenmiş manyetik alan verilerindeki (1250 yörünge) değişimler kullanılmış ve bu manyetik alan değişimleri tekli yörünge ve kümülatif manyetik anomali analizleri ile yorumlanmıştır. Tekli yörünge analizi kullanılan fitrelerin veriye olan etkisini subjektif olarak incelemek için yapılmıştır ve nihai yorum bu aşamada yapılmamıştır. Daha sonra kümülatif manyetik anomali analizleri tüm yörüngeleri hesaba katarak uygulanmış ve bulgular sunulmuştur.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Tekli yörünge analizi aşamasında rastgele seçilen Swarm A- 51737 ve 51746, Swarm B- 50999 ve 51075, Swarm C- 51733 ve 51787 yörüngelerinde filtreleme aşamasına ait herhangi bir problem gözlemlenmemiş ve yörünge boyunca oluşan anomaliler bütün manyetik alan bileşenlerinde gözlenmiştir.
- Kümülatif manyetik anomali sayısı bulgularında manyetik alanın X bileşeni 19 Ocak 2023, Y bileşeni 17 Ocak 2023, Z bileşeni 04 Şubat 2023 ve F bileşeni ise 16 Ocak 2023 tarihlerinde ana şok öncesi anomali vermiştir.
- Manyetik alanın X bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğinde depremin hazırlık aşamasına ait belirgin bir anomali değişimleri tespit edilememiştir.
- Manyetik alanın Y bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğinde 40 gün süren sessiz zamandan sonra kendini tekrarlamayan anomali değişimleri tespit edilmiştir. Depremin hazırlık aşamasına ait öncül bir sinyal olarak yorumlanmıştır.
- Manyetik alanın Z bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğinde daha önceki çalışmalarda da ortaya çıkan "S" şeklinde bir dağılım ortaya çıkmıştır ve ana şokun hazırlık aşamasına ait güçlü bir sinyal olarak yorumlanmıştır.
- Manyetik alanın F bileşenine ait kümülatif manyetik anomali sayısı grafiğinde 06 Aralık 2022-16 Ocak 2023 arasındaki sessiz zaman ve 16 Ocak 2023'de doğrusal modelden önemli bir sapma ile ortaya çıkan anomali değişimi kendini tekrarlamadığı için ana şokun hazırlık aşamasına ait bilgiler sunduğu düşünülmektedir.
- Uygulanan yöntemin en önemli handikapı depremin hazırlık aşamasını gösteren anomali değişiminin ortaya çıkacağı zamandaki belirsizliktir. Bu zaman ana şoktan 2 hafta veya 2 ay öncesine kadar uzanan zaman diliminde ortaya çıkabilmektedir. Bu belirsizlik bu konuda yapılan çalışmaların artması ve elde edilen bulguların artması ile minimuma indirilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılabilmesi için gerekli verileri sağlayan ESA'ya (Avrupa Uzay Ajansı) teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Akhoondzadeh M., De Santis A., Marchetti D., Piscini A., Cianchini G., 2018. Multi precursors analysis associated with the powerful Ecuador (Mw= 7.8) earthquake of 16 April 2016 using Swarm satellites data in conjunction with other multi-platform satellite and ground data, *Advances in Space Research* 61(1), 248–263, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.014>

Arpat E., Şaroğlu F., 1972. Doğu anadolu fayi ile ilgili bazı gözlemler ve düşünceler, *MTA Dergisi*, 78, 44–50.

Barrie A.C., Cipriani F., Escoubet C.P., Toledo-Redondo S., Nakamura R., Torkar K., Sternovsky Z., Elkington S., Gershman D., Giles B., Schiff C., 2019. Characterizing spacecraft potential effects on measured particle trajectories, *Physics of Plasmas*, 26(10), <https://doi.org/10.1063/1.5119344>

Ben-Avraham Z., Garfunkel Z., Lazar M., 2008. Geology and evolution of the Southern Dead Sea fault with emphasis on subsurface structure, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 357–387, <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124201>

Dahle C., Arnold D., Bezdek A., Doornbos E., Ellmer M., Guo J., Dahle C., Zhang Y., Jäggi A., Klokocník J., Krauss S., Mao X., Mayer-Gürr T., Meyer U., Sebera J., Shum C.K., Zhang C., 2020. Description of the multi-approach gravity field models from Swarm GPS data, *Earth System Science Data*, 12(2), 1385–1417, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1385-2020>

De Santis A., Marchetti D., Spogli L., Cianchini G., Javier Pavón-Carrasco F., De Franceschi G., Di Giovambattista R., Perrone L., Qamili E., Cesaroni C., Santis Anna De Ippolito A., Piscini A., Campuzano S.A., Sabbagh D., Amoroso L., Carbone M., Santoro F., Abbattista C., Drimaco D., 2019. Magnetic field and electron density data analysis from Swarm Satellites searching for ionospheric effects by great earthquakes: 12 case studies from 2014 to 2016, *Atmosphere*, 10(7), <https://doi.org/10.3390/atmos10070371>

Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I., 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure and Applied Geophysics*, 117(5), 1025–1044, <https://doi.org/10.1007/BF00876083>

Duman T.Y., Emre O., 2013. The east anatolian fault: Geometry, segmentation and jog characteristics, *Geological Society Special Publication*, 372(1), 495–529, <https://doi.org/10.1144/SP372.14>

Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş. ve 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. ISBN: 978-605-5310-56-1

Faccenna C., Bellier O., Martinod J., Piromallo C., Regard V., 2006. Slab detachment beneath eastern Anatolia: A possible cause for the formation of the North Anatolian fault, *Earth and Planetary Science Letters*, 242(1), 85–97, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.046>

Fitzmaurice A., Kuznetsova M., Shim J.S. and Uritsky V., 2017. Impact of solar activity on the ionosphere/thermosphere during geomagnetic quiet time for CTIPe and TIE-GCM. arXiv. 1701.06525.

- Freund F., 2011. Pre-earthquake signals: Underlying physical processes, *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4), 383–400, <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2010.03.009>
- Friis-Christensen E., Lühr H., Knudsen D., Haagmans R., 2008. Swarm - An Earth Observation Mission investigating Geospace, *Advances in Space Research*, 41(1), 210–216, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.10.008>
- Garfunkel Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics, *Tectonophysics*, 80(1-4), 81–108, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90143-8)
- Giannerini G., Campredon R., Feraud G., Abou Zakhem B., 1988. Deformations intraplaques et volcanisme associe; exemple de la bordure NW de la plaque Arabique au Cenozoique, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 4(6), 937–947, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.iv.6.937>
- Guvercin S.E., Karabulut H., Konca A.O., Dogan U., Ergintav S., 2022. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault, *Geophysical Journal International*, 230(1), 50–69, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac045>
- Jackson J., McKenzie D., 1984. Active tectonics of the Alpine–Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 77(1), 185–264, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x>
- Jin B., Chen S., Li M., Dong Q., Zhao L., 2022. Precise orbit determination and baseline consistency assessment for Swarm constellation, *Advances in Space Research*, 71(6), 2938–2953, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.045>
- Kocyigit A., Yilmaz A., Adamia S., Kuloshvili S., 2001. Neotectonics of east anatolian plateau (turkey) and lesser caucasus: Implication for transition from thrusting to strike-slip faulting, *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 177–195, <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432443>
- Le Pichon X., Gaulier J.M., 1988. The rotation of Arabia and the Levant fault system, *Tectonophysics*, 153(1-4), 271–294, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90020-0)
- Mahmouda Y., Masson F., Meghraoui M., Cakir Z., Alchalbi A., Yavasoglu H., Yonlu O., Daoud M., Ergintav S., Inan S., 2013. Kinematic study at the junction of the east anatolian fault and the dead sea fault from GPS measurements, *Journal of Geodynamics*, 67, 30–39, <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.05.006>
- Marchetti D., De Santis A., D’Arcangelo S., Poggio F., Jin S., Piscini A., Campuzano S.A., 2020. Magnetic Field and Electron Density Anomalies from Swarm Satellites Preceding the Major Earthquakes of the 2016–2017 Amatrice-Norcia (Central Italy) Seismic Sequence, *Pure and Applied Geophysics*, 177(1), 305–319, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02138-y>
- McKenzie D., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30(2), 109–185, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>
- Ozsoz I., Pamukcu O.A., 2021. Detection and interpretation of precursory magnetic signals preceding october 30, 2020 Samos earthquake, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(S1), 748–757, <https://doi.org/10.3906/YER-2107-9>

Özsöz İ., 2022. Detection of Precursory Anomalies of 24 January 2020 Elazığ-Sivrice Earthquake Mw=6.7, 74. Geological Congress of Turkey, 11-15 April 2022, Ankara-TURKEY, Erişim adresi: <http://tjk.jmo.org.tr/index.php?kod=149>

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.A., Ouzounov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V., 2015. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system, *Geomagnetism and Aeronomy*, 55(4), 521–538, <https://doi.org/10.1134/S0016793215040131>

Quennell A.M., 1958. The structural and geomorphic evolution of the dead sea rift, *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 114(1-4), 1–24, <https://doi.org/10.1144/gsjgs.114.1.0001>

Salamon A., Hofstetter A., Garfunkel Z., Ron H., 1996. Seismicity of the eastern Mediterranean region: Perspective from the Sinai subplate, *Tectonophysics*, 263(1-4), 293–305, [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00030-3)

Sengor A.M.C., Gorur N., Saroglu F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*, 227–264, <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0227>

Sengor A.M.C., Yilmaz Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach, *Tectonophysics*, 75(3-4), 181–241, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)

Sieg D., Diekmann F., 2016. Options for the further orbit evolution of the Swarm mission, European Space Agency (Special Publication), SP-740, 278.

Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K., 2001. Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63(16), 1681–1691, [https://doi.org/10.1016/s1364-6826\(01\)00047-5](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(01)00047-5)

U.S.G.S., 2023a. M7.8-Central Turkey, accessed February 08, 2023. U.S. Geological Survey Earthquake Hazard Program.

Erişim adresi:URL <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive>

U.S.G.S., 2023b. M7.5-4 km SSE of Ekinözü, Turkey, accessed February 08, 2023, U.S. Geological Survey Earthquake Hazards Program,

Erişim adresi: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jlqa/executive>

Westaway R., Arger J., 2001. Kinematics of the malatya–ovacik fault zone, *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 103–131, <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432438>

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*) Çalışma kapsamında kullanılan manyetik alan verileri ve Swarm uydularına ait konum ve yörünge bilgileri Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından sağlanmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Bu çalışma kapsamında çıkar çatışması/ilışkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

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