

Geomagnetic Field Perturbations Observed During the 10 August 2025 Mw 6.1 Sındırgı (Balıkesir) Earthquake

Elif Çiftçi ¹ , Özlem Hacıoğlu ²

¹ Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Department of Geophysics, 34684 İstanbul, Türkiye

² Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, 61080 Trabzon, Türkiye

Keywords

Western Anatolia, Sındırgı earthquake, Coseismic geomagnetic perturbations, Geomagnetic field, Instrumental response

Highlights

- * Coseismic geomagnetic perturbations detected during the Mw 6.1 Sındırgı earthquake
- * Geomagnetic peaks temporally coincide with P-S arrivals and peak acceleration
- * Signals indicate an instrumental response rather than crustal EM generation

Aim

To investigate the co-seismic geomagnetic perturbations associated with the Mw 6.1 Balıkesir-Sındırgı earthquake on 10 August 2025

Location

This study was implemented in the Western Anatolia region of Türkiye

Methods

The relationship between IZN geomagnetic data and seismic records was analyzed using time-domain, envelope, and spectral analysis methods

Results

Geomagnetic fluctuations matched seismic wave arrivals and energy envelopes, indicating an instrumental sensor response to strong ground motion rather than crustal electromagnetic generation

Supporting Institutions

The authors declared that this study has used support data from Boğaziçi University-KOERI and AFAD

Financial Disclosure:

The authors 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

How to cite

Çiftçi E., Hacıoğlu Ö., 2026. Geomagnetic Field Perturbations Observed During the 10 August 2025 Mw 6.1 Sındırgı (Balıkesir) Earthquake, Türk Deprem Araştırma Dergisi, 8(2), 307-316, DOI:10.46464/tdad.1900505.

Manuscript

Research Article

Received: 02.03.2026

Revised: 12.04.2026

Accepted: 20.04.2026

Printed: 31.08.2026

DOI

10.46464/tdad.1900505



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

Corresponding Author

Elif Çiftçi

Email: elif.tolak@bogazici.edu.tr

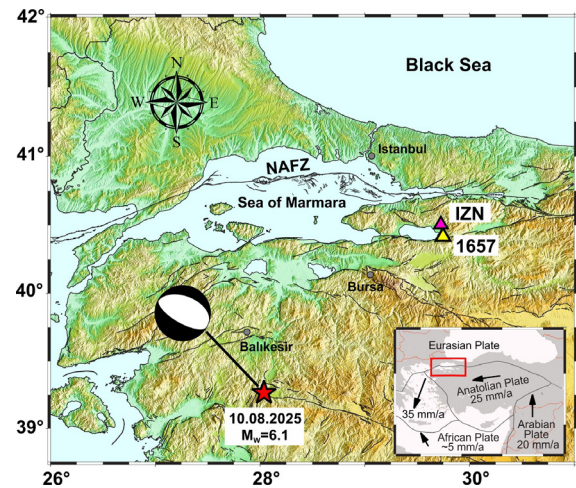


Figure
Map showing the tectonic framework of northwestern Türkiye

10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı (Balıkesir) Depremi Sırasında Gözlenen Jeomanyetik Alan Değişimleri

Elif Çiftçi ¹ , Özlem Hacıoğlu ² 

¹ Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı, 34684 İstanbul, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, 61080 Trabzon, Türkiye

ÖZET

Batı Anadolu, aktif normal faylarla karakterize edilen genişlemeli bir tektonik rejime sahiptir. Bu çalışmada, 10 Ağustos 2025 tarihinde Balıkesir-Sındırgı yakınlarında meydana gelen Mw 6.1 büyüklüğündeki depremin eş-sismik jeomanyetik etkileri incelenmiştir. İznik (IZN) jeomanyetik gözlemevine ait 1 saniyelik H, D ve Z bileşenleri ile AFAD 1657 istasyonunun ivme kayıtları birlikte analiz edilmiştir. Ana şok sırasında tüm jeomanyetik bileşenlerde kısa süreli anomaliler belirlenmiştir. Genlik zarfı analizleri, enerji yoğunlaşmasının ilk yaklaşık 60 saniye içinde gerçekleştiğini göstermektedir. Manyetik piklerin, P ve S dalga varışları ile maksimum ivme değerleriyle zamansal uyumlu olduğu saptanmıştır. Kp, Hp30 ve SYM-H indeksleri jeomanyetik fırtına olmadığını göstermektedir. Sonuçlar, sinyallerin kabuksal elektromanyetik üretimden çok aletsel kaynaklı olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler

Batı Anadolu, Sındırgı depremi, Eş-sismik jeomanyetik değişim, Jeomanyetik alan, Aletsel yanıt

Öne Çıkanlar

- * Mw 6.1 Sındırgı depremi sırasında eş-sismik jeomanyetik değişimler kaydedildi
- * Jeomanyetik pikler P-S dalga varışları ve maksimum ivme ile zamansal olarak çıktı
- * Sinyaller kabuksal EM üretimden ziyade aletsel bir yanıtı işaret etti

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.03.2026

Düzeltilme: 12.04.2026

Kabul: 20.04.2026

Basım: 31.08.2026

DOI

10.46464/tdad.1900505

Sorumlu yazar

Elif Çiftçi

E-posta:

elif.tolak@bogazici.edu.tr

Geomagnetic Field Perturbations Observed During the 10 August 2025 Mw 6.1 Sındırgı (Balıkesir) Earthquake

Elif Çiftçi ¹ , Özlem Hacıoğlu ² 

¹ Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Department of Geophysics, 34684 İstanbul, Türkiye

² Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, 61080 Trabzon, Türkiye

ABSTRACT

Western Anatolia is characterized by an extensional tectonic regime dominated by active normal fault systems. In this study, the co-seismic geomagnetic effects of the Mw 6.1 earthquake that occurred near Balıkesir-Sındırgı on 10 August 2025 were investigated. One-second resolution H, D, and Z components from the İznik (IZN) geomagnetic observatory were analyzed together with acceleration records from the AFAD 1657 station. During the main shock, transient anomalies were identified in all geomagnetic components. Envelope analyses indicate that the maximum energy concentration occurred within the first approximately 60 seconds. The magnetic peaks were found to be temporally consistent with the arrivals of P and S waves and the peak ground acceleration values. The Kp, Hp30, and SYM-H indices indicate the absence of a geomagnetic storm. The results suggest that the observed signals reflect an instrumental response to strong ground motion rather than crustal electromagnetic generation.

Keywords

Western Anatolia, Sındırgı earthquake, Coseismic geomagnetic perturbations, Geomagnetic field, Instrumental response

Highlights

- * Coseismic geomagnetic perturbations detected during the Mw 6.1 Sındırgı earthquake
- * Geomagnetic peaks temporally coincide with P-S arrivals and peak acceleration
- * Signals indicate an instrumental response rather than crustal EM generation

Manuscript

Research Article

Received: 02.03.2026

Revised: 12.04.2026

Accepted: 20.04.2026

Printed: 31.08.2026

DOI

10.46464/tdad.1900505

Corresponding Author

Elif Çiftçi

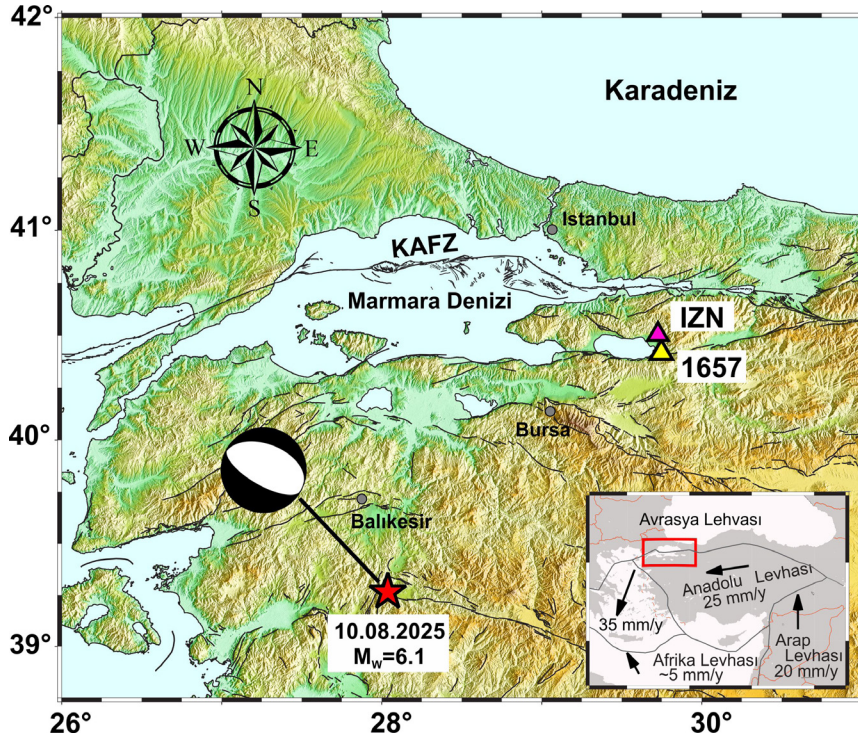
Email:

elif.tolak@bogazici.edu.tr

1. GİRİŞ

Batı Anadolu, genişlemeli tektonik rejim etkisi altında gelişen çok sayıda aktif fay zone ile karakterize edilen Türkiye'nin en önemli sismotektonik bölgelerinden biridir. Bölgedeki deformasyon KD-GB ve KB-GD doğrultulu normal fay sistemleri boyunca gelişmekte olup, graben yapıları ile bunları kesen transfer faylar ile birlikte bölgeye özgü karmaşık bir tektonik yapı meydana getirmektedir (Emre ve diğ. 2018). Bölge, tarihsel ve aletsel dönem boyunca önemli büyüklükte

depremler üretmiş olup, yüksek deprem tehlikesi altında bulunan önemli bir alanı temsil etmektedir (Soysal ve diğ. 1981, Bekler ve diğ. 2026). Nitekim, 10 Ağustos 2025 tarihinde Balıkesir ili Sındırgı ilçesinde meydana gelen Mw 6.1 büyüklüğündeki deprem, Batı Anadolu genişleme rejimi içinde gelişen aktif faylanmanın güncel bir örneğini sunmakta (Büyüksaraç ve diğ. 2025, Kutoğlu ve diğ. 2026) ve odak mekanizması çözümüne göre normal faylanma karakteri göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1: Kuzeybatı Türkiye'nin tektonik çerçevesini ve fay izlerini (siyah çizgiler) (Emre ve diğ. 2013) gösteren harita (10 Ağustos 2025 tarihli Mw 6.1 büyüklüğündeki Sındırgı (Balıkesir) depreminin merkez üssü kırmızı yıldız ile sunulmuştur. Odak mekanizması çözümü AFAD'dan alınmıştır. İzmit (IZN) jeomanyetik gözlemevi (mor üçgen) ve AFAD 1657 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonu (sarı üçgen) harita üzerinde işaretlenmiştir. Sağ alttaki iç harita kuzeybatı Türkiye'nin (kırmızı dikdörtgen) daha geniş tektonik bağlamdaki konumunu göstermektedir.)

Figure 1: Map showing the tectonic framework of northwestern Türkiye and fault traces (black lines) (Emre et al. 2013) (The epicenter of the 10 August 2025 Mw 6.1 Sındırgı (Balıkesir) earthquake is indicated by a red star. The focal mechanism solution was obtained from AFAD. The İzmit (IZN) geomagnetic observatory (magenta triangle) and the AFAD strong-motion station 1657 (yellow triangle) are marked on the map. The inset map shows the location of northwestern Türkiye (red rectangle) within the broader tectonic setting.)

Depremlerin yalnızca mekanik kırılma süreçlerinden ibaret olmadığı, bunun yanı sıra farklı jeofiziksel süreçlerle birlikte ya da onlarla etkileşim içinde gelişebileceği literatürde uzun süredir tartışılmaktadır (Eleman 1965, Guglielmi 1992, Johnston 1997, Hayakawa ve diğ. 1999, Koshevaya ve diğ. 2001, Ujihara ve diğ. 2004, Gao ve diğ. 2014; 2020). Bu bağlamda özellikle eş-sismik elektromanyetik bozunumlar ve geçici manyetik alan anomalileri üzerine yoğunlaşan çalışmalar, güçlü yer hareketleriyle zamansal olarak çıkan kısa süreli jeomanyetik değişimlerin kaydedilebildiğini ortaya koymuştur (Iyemori ve diğ. 1996, Matsushima ve diğ. 2002, Nenovski 2015). Bu tür anomaliler piezomanyetik etki, elektrokinetik süreçler veya iletken kabuk ortamında

gelişen hareket kaynaklı elektromanyetik indüksiyon gibi mekanizmalarla açıklanmaktadır (Huang 2002, Johnston ve diğ. 2006, Gao ve Hu 2010, Hu ve Gao 2011, Gao ve diğ. 2014, Ren ve diğ. 2015, Zhao ve diğ. 2021; 2024). Bu mekanizmalar arasında, sismik titreşimler ile ortamın mevcut jeomanyetik alanı arasındaki etkileşim sonucu iletken kabuk malzemesinin manyetik alan çizgilerini keserek geçici manyetik sinyaller üretmesini ifade eden "sismik dinamo etkisi" özellikle dikkat çekmektedir (Johnston 1997, Matsushima ve diğ. 2002, Ujihara ve diğ. 2004). Bununla birlikte, eş-sismik manyetik sinyallerin yorumlanmasındaki temel sorun, tektonik kökenli gerçek elektromanyetik süreçler ile aletsel etkilerin ayırt edilmesidir. Kritik değerlendirmeler, bildirilen bazı eş-sismik

jeomanyetik anomalilerin sensör hareketi, sensörün zemine mekanik bağlılığı veya yetersiz doğrulama gibi etkenlerden kaynaklanabileceğini göstermiştir (Masci ve Thomas 2016). Güçlü yer hareketleri sırasında sensör yer değiştirmesi, titreşim kaynaklı alet tepkileri veya ivme etkisiyle oluşan mekanik zorlanmalar, yapay (alet kaynaklı) jeomanyetik değişimlerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Sensörlerin sismik titreşimlere olan bu yüksek duyarlılığı yalnızca jeomanyetik ölçümlerle sınırlı kalmayıp, gravite çalışmalarında da kendini göstermektedir. Modern gravimetreler yalnızca statik veya yavaş değişen kütleçekim ivmesini değil, aynı zamanda sismik dalgaların yarattığı düşey ivmelenmeleri de kaydedebilen son derece hassas cihazlardır. Örneğin, şiddetli depremlerin ardından yerküreyi dolaşan düşük frekanslı yüzey dalgaları ve yerkürenin serbest salınımları, geniş bantlı gravimetreler tarafından yüksek hassasiyetle kayıt altına alınabilmektedir (Aydın 2024). Bu çalışmada, 10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı depremi (Şekil 1), eş-sismik jeomanyetik alan değişimlerinin incelenmesi için uygun bir örnek olay olarak ele alınmıştır. KRDAE (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü) İznik (IZN) jeomanyetik gözlemine ait 1 saniye örnekleme aralıklı (1 Hz) H, D ve Z bileşenleri ile deprem bölgesine yakın AFAD (T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) 1657 kuvvetli yer hareketi istasyonuna ait ivme kayıtları birlikte analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, ana şok sırasında kaydedilen geçici jeomanyetik değişimlerin zamanlama, dalga formu benzerliği ve genlik özelliklerini değerlendirerek bu sinyallerin kabuksal elektromanyetik üretim mekanizmalarıyla mı, yoksa kuvvetli

yer hareketine bağlı aletsel etkilerden mi kaynaklandığını belirlemektir. Sismik ve jeomanyetik veri setlerinin birlikte analizi, hareket kaynaklı jeomanyetik değişimlerin karakterize edilmesine yönelik ölçütlerin ortaya konmasına katkı sağlamakta ve ayrıca Batı Anadolu gibi aktif tektonik bölgelerde eş-sismik manyetik gözlemlerin yorumlanmasına ilişkin sınırlamaları daha açık biçimde ortaya koymaktadır.

2. VERİ ve YÖNTEM

Bu çalışmada, 10 Ağustos 2025 tarihinde Balıkesir ili Sındırgı ilçesi merkez üssünde (39.2403°K, 28.0587°D), yerel saat ile 19:53'te ve 7.7 km odak derinliğinde meydana gelen Mw 6.1 büyüklüğündeki depreme ait eş-sismik jeomanyetik alan bozulmaları incelenmiştir (Şekil 1). Depremin odak parametreleri (oluş zamanı, derinliği, aletsel büyüklüğü ve merkez üssü koordinatları) KRDAE katalog verilerinden alınmıştır.

Geçici jeomanyetik anomalilerin belirlenmesi ve karakterize edilmesi amacıyla, KRDAE bünyesinde işletilen İznik (IZN) jeomanyetik gözlemine ait 1 saniye örnekleme aralıklı (1 Hz) jeomanyetik alan verileri kullanılmıştır. Ayrıca, merkez üssüne yaklaşık 194.84 km uzaklıkta bulunan ve AFAD tarafından işletilen 1657 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonuna ait ivme kayıtları değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan gözlemsel ağa ait ayrıntılara Tablo 1'de yer verilmiştir. IZN gözlemevi ile 1657 istasyonunun göreceli yakın konumu ve veri setlerinin zaman eşlemesi, yer hareketi ile jeomanyetik alan değişimleri arasındaki zamansal ilişkinin güvenilir biçimde karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

Tablo 1: Bu çalışmada kullanılan sismik ve jeomanyetik istasyonların kodları, sensör tipleri (SM: kuvvetli yer hareketi ivmeölçeri; VM: jeomanyetik varyometre), coğrafi koordinatlar, istasyon yükseklikleri ve 10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı depreminin merkez üssüne olan uzaklıkları verilmiştir

Table 1: The table lists the station codes of the seismic and geomagnetic stations used in this study, along with their sensor types (SM: strong-motion accelerometer; VM: geomagnetic variometer), geographic coordinates, station elevations, and epicentral distances from the 10 August 2025 Mw 6.1 Sındırgı earthquake

İstasyon	Sensör	Enlem (°K)	Boylam (°D)	Yükseklik (m)	Merkez üssü uzaklığı (km)
1657 (AFAD)	SM	40.442714	29.716899	89	194.84
IZN (KRDAE)	VM	40.498383	29.725217	271	199.60

IZN gözlemevindeki jeomanyetik ölçümler, Danish Meteorological Institute (DMI) üretimi üç eksenli Fluxgate manyetometre (FGE) sistemi ve askılı tip üç eksenli sensör ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde manyetik alanın H (yatay/kuzey), D (yatay/doğu sapma) ve Z (düşey) bileşenleri 1 saniyelik aralıklarla kaydedilmiştir. Veri toplama sistemi 24-bit analog-dijital (A/D) dönüştürücü ile çalışmakta olup yaklaşık 0.0006 mV gerilim duyarlılığına sahiptir. 24-bit dönüştürücünün yerleşik filtreleme özelliği kullanılarak 50 Hz şebeke gürültüsü bastırılmış sinyal kalitesi artırılmıştır.

Sismik dalga formları 100 Hz örnekleme frekansı ile kaydedilmiş, karşılaştırmalı analizlerde jeomanyetik veri ile uyumlu olması amacıyla 1 Hz örnekleme aralığına yeniden örneklenmiştir. 1657 kodlu istasyonda P ve S fazları sırasıyla 16:54:31.48 ve 16:54:49.53 UT (evrensel zaman) zamanlarında

belirlenmiş ve jeomanyetik alan verileri ile karşılaştırılmıştır. IZN istasyonunda kaydedilen ilk manyetik sapma, P dalgası varış zamanı ile zamansal olarak uyumlu olup, 1 Hz örnekleme çözünürlüğü içinde bu fazı izleyen zaman aralığında gözlenmektedir. Jeomanyetik verilerin 1 Hz örnekleme aralığı alt-saniye çözünürlüğüne izin vermemektedir. Ancak, buna rağmen jeomanyetik bozulmalar ile sismik faz başlangıçları arasında tutarlı bir zamansal çakışma gözlenmiştir.

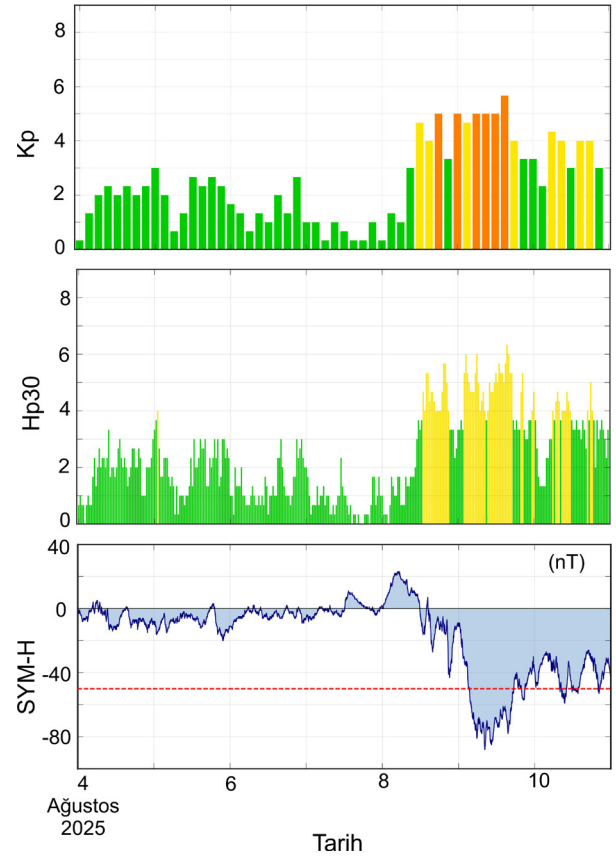
Yer hareketinin genlik zarfı ile manyetik alan bileşenlerindeki değişimler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Jeomanyetik değişimler H, D ve Z bileşenlerinde ani, kısa süreli ve yüksek frekanslı sapmalar şeklinde ortaya çıkmakta olup, güçlü yer ivmesinin maksimuma ulaştığı zaman aralığı ile çakışmaktadır. Dalga şekli morfolojisi ve zamansal korelasyon önceki çalışmalarla uyumlu biçimde değerlendirilmiştir (Iyemori ve diğ. 1996, Matsushima ve diğ. 2002).

3. BULGULAR ve TARTIŞMALAR

Sismik dalga yayılımı ile eş zamanlı gözlenen geçici jeomanyetik değişimlerin bütüncül olarak değerlendirilmesi, deprem kaynaklı jeofiziksel süreçlerin temel fiziksel mekanizmalarının anlaşılmasına katkı sunmaktadır. Bu kapsamda, 10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı (Balıkesir) depremine ait manyetik ve sismik veriler; özellikle manyetik alan bozulmalarının zamanlaması, dalga şekli morfolojisi ve zamansal tutarlılığı açısından incelenmiştir.

IZN jeomanyetik gözlemine ait manyetometre verilerinin, depremin merkez üssüne görece yakın konumlu 1657 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonuna ait sismik kayıtlarla birlikte değerlendirilmesi, iyi tanımlanmış gözlemsel koşullar altında eş-sismik elektromanyetik sinyallerin araştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu istasyonların görece olarak yakın seçilmesinin temel amacı, sismik dalga varışları ile jeomanyetik alan değişimleri arasındaki zamansal ilişkinin doğrudan ve güvenilir biçimde karşılaştırılabilmesini sağlamaktır. Daha uzak istasyonların kullanılması durumunda, sismik dalgaların yayılım süresine ve ortam özelliklerine bağlı gecikmeler artacağından, jeomanyetik ve sismik sinyaller arasındaki doğrudan zamansal korelasyonun belirlenmesi daha belirsiz hale gelebilecektir. Bu çerçevede, sismik faz varışları ile zamansal olarak örtüşen kısa süreli jeomanyetik anomaliler belirlenmiş ve bu anomalilerin güçlü yer hareketi ile olan zamansal ve dalga şekli (morfolojik) tutarlılığı analiz edilmiştir.

10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı depremi öncesi jeomanyetik ortam koşullarını ortaya koymak amacıyla Kp, Hp30 ve SYM-H jeomanyetik indisleri incelenmiştir (Şekil 2). Orta enlemlerde jeomanyetik olarak sakin koşullar genellikle $K_p \leq 3$, SYM-H değerlerinin -50 nT'nin üzerinde seyretmesi ve Hp30 indeksinin düşük-orta seviyelerde değişim göstermesi ile tanımlanmaktadır. Burada belirtilen -50 nT değeri jeomanyetik fırtına koşullarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir eşik değeri temsil etmektedir. Bu çerçevede, depremden önceki günlerde (4-9 Ağustos 2025) Kp indeks değerlerinin çoğunlukla 3 ve altında olduğu ve düşük jeomanyetik aktivite koşullarının hâkim olduğu görülmüştür. Hp30 indeksi de deprem öncesi dönemde düşük-orta seviyelerde değişim göstermiş ve belirgin bir jeomanyetik fırtına karakteri sergilememiştir. Benzer şekilde, SYM-H indisinin büyük ölçüde -50 nT eşığının üzerinde kalması güçlü bir jeomanyetik fırtına koşuluna işaret etmemektedir. Şekil 2'de 7.5-8.5 günleri arasında gözlenen pozitif yönlü sapmaların kısa süreli ve düşük genlikli (yaklaşık 0 ila +20 nT aralığında) olduğu ve arka plan varyasyonları kapsamında değerlendirilmektedir. Buna karşılık, 9 Ağustos itibarıyla SYM-H değerlerinde belirgin bir negatif sapma geliştiği ve 10 Ağustos civarında yaklaşık -80 nT seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum kısa süreli orta şiddette bir jeomanyetik aktiviteyi işaret etmekle birlikte, deprem öncesi dönemin genel olarak sakin karakterini değiştirmemektedir. Bu bulgular, deprem öncesi dönemde küresel ölçekte sakin jeomanyetik koşulların geçerli olduğunu göstermekte ve eş-sismik olarak gözlenen kısa süreli manyetik değişimlerin dış kaynaklı uzay hava etkilerinden ziyade yerel (sismik) süreçlerle ilişkili olabileceğini desteklemektedir.

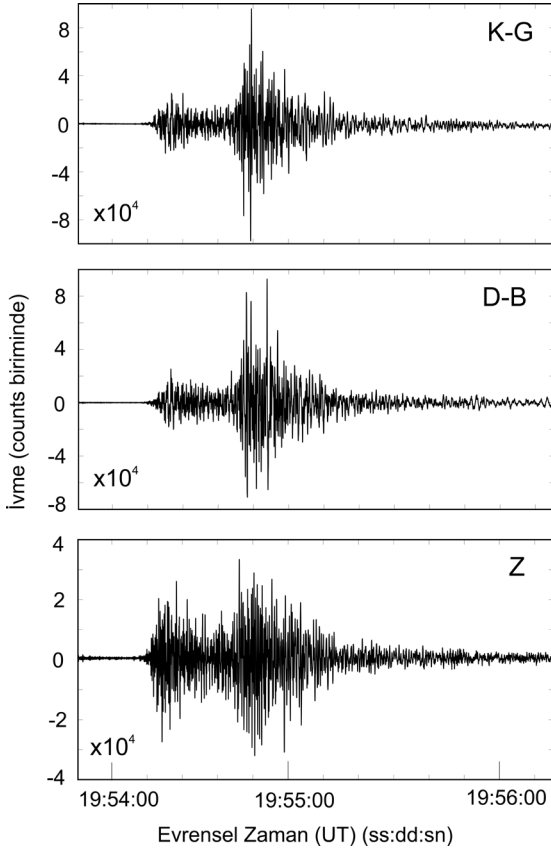


Şekil 2: 4-11 Ağustos 2025 tarihleri arasında Kp, Hp30 ve SYM-H jeomanyetik indislerinin zamansal değişimi

Figure 2: Temporal variations of the Kp, Hp30, and SYM-H geomagnetic indices between 4-11 August 2025

Gözlenen jeomanyetik bozulmaların güvenilir biçimde yorumlanabilmesi amacıyla, Şekil 3'te 1657 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilen üç bileşenli (D-B, K-G ve Z) ivme kayıtları sunulmaktadır. Ana şok sırasında yer hareketinin zamansal gelişimi gösterilmektedir. Kayıtlarda güçlü yer hareketi belirgin biçimde izlenmekte olup, maksimum genliklerin özellikle yatay bileşenlerde yoğunlaştığı görülmektedir. İvme zaman serilerinde P dalgası ile başlayan hareketin S dalgası ve devamındaki güçlü sarsıntı fazı boyunca genliklerin hızla arttığı ve yaklaşık 19:55:00 UT civarında en yüksek değerlere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu zaman aralığı, jeomanyetik bileşenlerde gözlenen kısa süreli sapmaların ortaya çıktığı dönemle çakışmakta ve yer hareketi ile manyetik değişimler arasındaki temel zamansal ilişkiye işaret etmektedir. Şekil 4'te, IZN istasyonunda kaydedilen H, D ve Z jeomanyetik bileşenlerin deprem anını kapsayan zaman aralığındaki değişimleri sunulmaktadır. Ana şok sırasında her üç bileşende de belirgin, kısa süreli ve ani karakterli sapmalar gözlenmektedir. Özellikle H ve D bileşenlerinde ani genlik artışları ve keskin pikler dikkat çekmekte, Z bileşeninde ise daha sınırlı ancak eş zamanlı dalgalanmalar izlenmektedir. Jeomanyetik verilerin 1 Hz örnekleme aralığı alt-saniye çözünürlüğe izin vermemekle birlikte, söz konusu anomalilerin güçlü yer hareketinin gerçekleştiği zaman dilimi (19:54-19:56) ile çakıştığı görülmektedir. Bu nedenle, manyetik ve sismik kayıtlar arasında alt-saniye mertebesinde

kesin bir zaman gecikmesinin belirlenmesi mümkün olmamakta, ancak mevcut zaman çözünürlüğü içinde belirgin bir sistematik gecikme gözlenmemektedir. Bununla birlikte, bu zamansal birliktelik tek başına manyetik sapmaların fiziksel kaynağını ortaya koymak için yeterli değildir; benzer dalga şekli özellikleri güçlü yer hareketine bağlı aletsel tepkilerden de kaynaklanabilmektedir. Ölçüm alanında yerel bir dalga hareketi hissedilmese dahi, binlerce kilometre uzakta meydana gelen şiddetli depremlerin ürettiği yüzey dalgaları, gravite ölçümlerinde kendini muntazam bir sinüzoidal dalga formu olarak gösterebilmektedir. Örneğin, 2021 yılında meydana gelen M 8.2 büyüklüğündeki Alaska depreminin yüzey dalgaları, Elazığ-Sivrice bölgesinde yapılan gravite ölçümleri sırasında aletsel kayıtlarda belirgin bir sinüzoidal formda tespit edilmiştir (Aydın 2024).

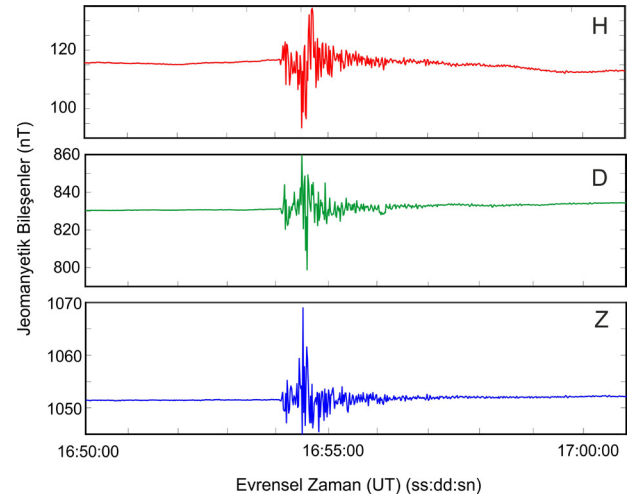


Şekil 3: 10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı depremi sırasında AFAD 1657 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilen üç bileşenli (D-B, K-G ve Z) ivme zaman serileri

Figure 3: Three-component (N-S, E-W, and Z) acceleration time series recorded at the AFAD strong-motion station 1657 during the 10 August 2025 Mw 6.1 Sındırgı earthquake

Literatürde, benzer nitelikteki gözlemlerin farklı depremler sırasında kaydedildiği ve ayrıntılı olarak değerlendirildiği bildirilmektedir. Örneğin, Matsushima ve diğ. (2002) 17 Ağustos 1999 Mw 7.4 İzmit (Kocaeli) depremi sırasında kaydedilen elektrik ve manyetik alan değişimlerini, iletken kabuk içinde sismik titreşimlere bağlı gelişen elektromanyetik indüksiyon mekanizmasıyla ilişkilendirmiştir. Benzer şekilde, Ujihara ve diğ. (2004) 26 Mayıs 2003 Miyagi (Japonya) Mw 7.1 depreminin artçıları sırasında elde edilen manyetotellürik verileri analiz ederek, sismik dalga yayılımına eşlik eden

elektrik ve manyetik alan dalgalanmalarını sismik dinamo etkisi çerçevesinde yorumlamıştır. Ancak söz konusu çalışmalarda, aletsel etkilerin olası katkılarını kontrol edebilmek ve ölçülen sinyallerin kabuksal kökenini daha güvenilir biçimde anlayabilmek amacıyla özel deneysel düzenekler ve çoklu sensör sistemleri kullanılmıştır. Buna karşılık, bu çalışmada yapılan değerlendirmeler 1 Hz örnekleme frekansına sahip tek bir jeomanyetik istasyon verisine dayanmaktadır ve dolayısıyla kabuksal elektromanyetik kaynaklar ile güçlü yer hareketine bağlı aletsel etkilerin kesin biçimde ayrıştırılmasına olanak sağlayacak bağımsız deney mekanizmaları mevcut değildir.



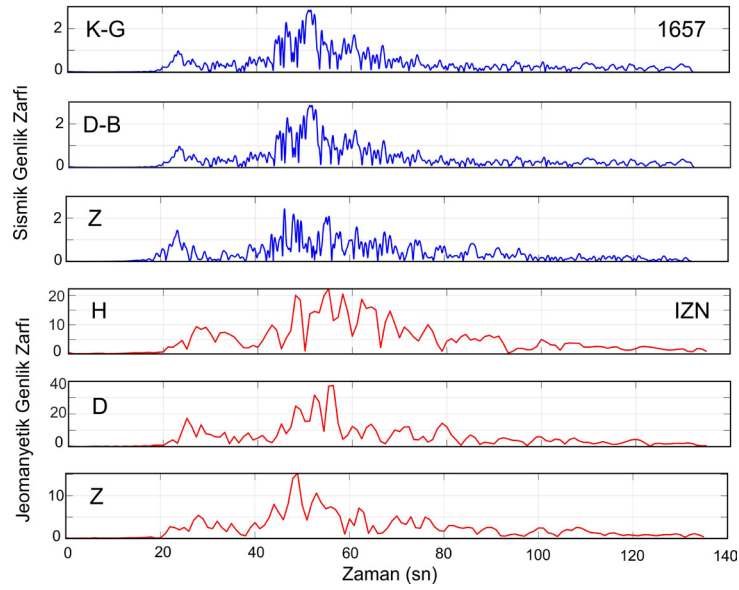
Şekil 4: İzmit (IZN) jeomanyetik gözlemevinde kaydedilen H, D ve Z bileşenlerinin 10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı depremi ana şokunu kapsayan 12 dakikalık zaman aralığındaki değişimi

Figure 4: Temporal variations of the H, D, and Z geomagnetic components recorded at the İzmit (IZN) geomagnetic observatory during the 12-minute time interval encompassing the main shock of the 10 August 2025 Mw 6.1 Sındırgı earthquake

Yer hareketi ile jeomanyetik alan değişimleri arasındaki ilişkinin nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla zarf (envelope) analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te üst panelde 1657 istasyonuna ait sismik bileşenlerin (K-G, D-B, Z), alt panellerde ise IZN istasyonunda kaydedilen jeomanyetik H, D ve Z bileşenlerinin genlik zarfları birlikte sunulmaktadır. Sismik zarf eğrilerinde genlik artışının yaklaşık 20. saniyeden itibaren başladığı, 30-60. saniyeler arasında belirginleştiği ve 45-55. saniyeler civarında maksimum değerlere ulaştığı görülmekte; aynı zamansal evrim jeomanyetik bileşenlerin zarf fonksiyonlarında da eş zamanlı olarak izlenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 5'te görüldüğü üzere, her iki veri setinde yükselim, tepe ve sönüm evreleri arasında belirgin bir zamansal uyum bulunmaktadır. Jeomanyetik verinin 1 Hz örnekleme frekansı dikkate alındığında ayırt edilebilir bir zaman gecikmesi gözlenmemekte, bu durum jeomanyetik verideki genlik değişimlerinin güçlü yer hareketinin zamansal evrimiyle doğrudan ilişkili olabileceğine işaret etmektedir. Zarf eğrilerinde gözlenen belirgin zamansal uyum ve genlik korelasyonu, jeomanyetik değişimler ile yer ivmesi arasındaki dinamik bağın yüksek olasılıkla mekanik kökenli olduğunu düşündürmektedir. Bu durum, söz konusu sinyallerin kabuksal elektromanyetik üretimden ziyade yer hareketine duyarlı aletsel tepkiyi yansıttığı yönündeki yorumu

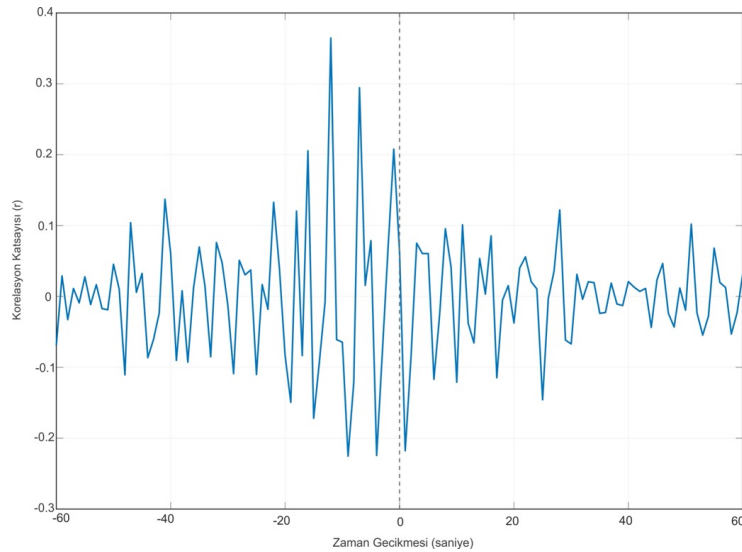
güçlendirmektedir. Bununla birlikte, piezoelektrik süreçler ya da sensör/indüksiyon bobini yönelim değişimine bağlı olarak ortaya çıkabilecek görünür manyetik sapmalar gibi alternatif mekanizmaların (Gao ve diğ. 2021) katkısı mevcut veri seti temelinde kesin biçimde değerlendirilememektedir. Ayrıca H, D ve Z bileşenleri arasında anlamlı bir faz ya da zaman gecikmesinin gözlenmemesi, kaydedilen manyetik değişimlerin bileşenlere özgü bağımsız kaynaklardan ziyade, sismik uyarıma karşı sistematik ve eşzamanlı bir sensör yanıtını temsil ettiğini düşündürmektedir. Zaman alanında gözlenen bu belirgin uyumun nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla, sismik ve jeomanyetik veriler arasında çapraz ilişki analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Elde edilen sonuçlar, yaklaşık -12 saniyelik zaman gecikmesinde maksimum ~0.36

seviyesinde bir korelasyon katsayısına işaret etmektedir. Bu gecikme, istasyonların merkez üssüne olan göreceli uzaklık farkları ve veri setleri arasındaki zaman senkronizasyonuna bağlı olarak sismik dalga yayılım süresini yansıtmaktadır. Gözlenen çapraz ilişki değeri, iki veri seti arasında zayıf-orta düzeyde bir ilişkiye işaret etmekte olup, tek başına güçlü bir doğrulama sunmamaktadır. Bununla birlikte, ilişki fonksiyonunda belirgin bir pik gözlenmesi, jeomanyetik kayıtlardaki yüksek frekanslı anomalilerin sismik dalgaların geçişiyle zamansal olarak ilişkili olduğunu desteklemektedir. Bu bulgu, zarf analizlerinde ortaya konan eşzamanlılık ile birlikte değerlendirildiğinde, gözlenen manyetik değişimlerin büyük ölçüde güçlü yer hareketine bağlı aletsel bir yanıtı temsil ettiği yönündeki yorumu nicel olarak desteklemektedir.



Şekil 5: Sismik ivme ve jeomanyetik alan bileşenlerinin genlik zarflarının (envelope) karşılaştırılması

Figure 5: Comparison of the amplitude envelopes of seismic acceleration and geomagnetic field components

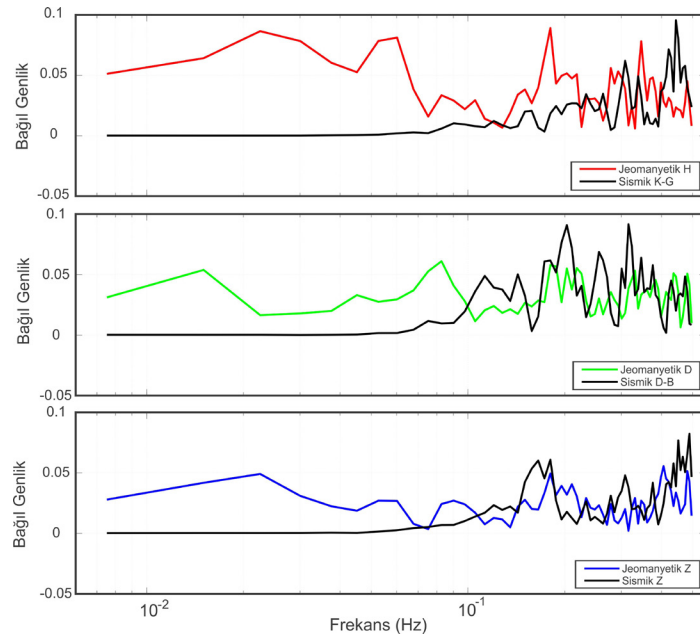


Şekil 6: Sismik ivme (Z) ile jeomanyetik alan (Z) bileşeni arasındaki çapraz ilişki fonksiyonu

Figure 6: Cross-correlation between vertical seismic acceleration (Z) and geomagnetic field (Z component)

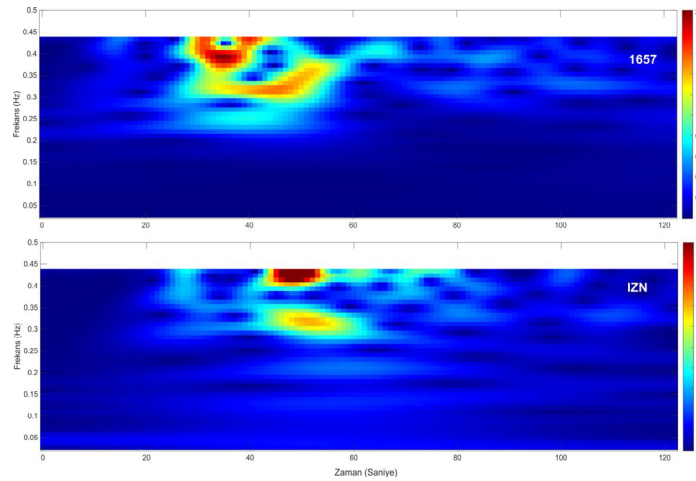
Yer hareketi ile manyetik değişimlerin frekans alanındaki ilişkisini değerlendirmek amacıyla manyetik ve sismik verilerin normalize edilmiş genlik spektrumları karşılaştırılmıştır (Şekil 7). Her üç bileşen için spektral enerji dağılımının özellikle 0.1-0.3 Hz frekans bandında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bant düzeyindeki benzerlik, manyetik ve sismik sinyaller arasında ortak bir frekans kontrolünün varlığına işaret etmektedir. Bununla birlikte, pik frekansların birebir çakışmaması ve ayrıntılı spektral yapının tam örtüşmemesi, iki veri seti arasında doğrudan ve lineer bir frekans aktarımından ziyade sınırlı bir bant uyumunun söz konusu olduğunu göstermektedir. Manyetik verinin 1 Hz örnekleme frekansına sahip olması nedeniyle analiz Nyquist sınırı (0.5 Hz) ile kısıtlıdır ve yüksek frekans içerikleri değerlendirilememektedir. Bu sınırlı bantta, gözlenen spektral benzerlik mekanik kökenli bir sensör yanıtı ile tutarlı olmakla birlikte, mevcut çözünürlük temelinde kabuksal elektromanyetik üretim mekanizmasını kesin biçimde ayırt

edecek düzeyde belirleyici değildir. Spektral benzerliğin zaman içindeki evrimini daha ayrıntılı incelemek amacıyla sismik ve jeomanyetik verilere Sürekli Dalgacık Dönüşümü analizi uygulanmıştır (Şekil 8). Elde edilen zaman-frekans dağılımları incelendiğinde, sismik enerjinin özellikle güçlü yer hareketinin gerçekleştiği 30-60 saniyelik zaman aralığında ve ~0.30-0.45 Hz frekans bandında yoğunlaştığı görülmektedir. Aynı zaman aralığında ve benzer frekans bandında jeomanyetik kayıtlarda da eşzamanlı enerji yoğunlaşmaları gözlenmektedir. Bununla birlikte, enerji dağılımının bant genişliği ve sürekliliğindeki farklılıklar, iki veri seti arasında doğrudan bir fiziksel üretim mekanizmasından ziyade, sismik titreşimlere bağlı bir sistem tepkisinin söz konusu olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, zaman ve frekans alanı analizleri ile birlikte değerlendirildiğinde, gözlenen manyetik değişimlerin büyük ölçüde güçlü yer hareketine duyarlı aletsel bir yanıtı temsil ettiği yorumunu desteklemektedir.



Şekil 7: Jeomanyetik ve sismik verilerin normalize edilmiş genlik spektrumlarının karşılaştırılması

Figure 7: Comparison of the normalized amplitude spectra of the geomagnetic and seismic data



Şekil 8: Sismik ivme (Z) ve jeomanyetik alan (Z) için Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Figure 8: Continuous Wavelet Transform (CWT) of seismic acceleration (Z) and geomagnetic field (Z component)

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 10 Ağustos 2025 Mw 6.1 Sındırgı (Balıkesir) depremi sırasında kaydedilen eş-sismik jeomanyetik alan değişimleri, İznik (IZN) jeomanyetik gözlemevi ile AFAD 1657 kuvvetli yer hareketi istasyonuna ait eş zamanlı kayıtlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Deprem öncesi dönemde Kp, Hp30 ve SYM-H indislerinin düşük seviyelerde seyretmesi, küresel ölçekte sakin jeomanyetik koşulların hâkim olduğunu göstermiş ve analiz edilen manyetik sapmaların güneş aktivitesi kaynaklı olmadığını ortaya koymuştur.

Ana şok sırasında H, D ve Z bileşenlerinde gözlenen kısa süreli ve ani manyetik değişimlerin, P ve S dalga varış zamanları ve maksimum yer ivmesi aralığıyla zamansal olarak çakıştığı belirlenmiştir. Zarf analizleri, sismik ve manyetik sinyallerin enerji evriminin özellikle ilk ~60 saniyede benzer bir gelişim sergilediğini ve yükselim-tepe-sönüm evreleri arasında belirgin bir eşzamanlılık bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca H, D ve Z bileşenleri arasında belirgin bir zaman gecikmesinin gözlenmemesi, kaydedilen manyetik değişimlerin eşzamanlı bir sistem tepkisi niteliği taşıdığını göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut örnekleme çözünürlüğü dikkate alındığında, bu gözlem tek başına aletsel ya da kabuksal elektromanyetik kaynaklar arasında kesin bir ayırım yapılmasına olanak sağlamamaktadır.

Frekans alanındaki karşılaştırmalar, manyetik ve sismik verilerin enerji yoğunluğunun 0.1-0.3 Hz bant aralığında kümелendiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, pik frekansların birebir örtüşmemesi ve ayrıntılı spektral yapının tam çakışmaması, iki veri seti arasında doğrudan lineer bir frekans aktarımı yerine bant düzeyinde bir uyuma işaret etmektedir. Manyetik verinin

1 Hz örnekleme frekansı ile sınırlı olması nedeniyle analiz Nyquist frekansı (0.5 Hz) ile kısıtlanmakta ve daha yüksek frekans içerikleri değerlendirilememektedir. Bu durum, kabuksal elektromanyetik üretim ile aletsel etkilerin spektral düzeyde kesin biçimde ayrıştırılmasını sınırlamaktadır.

Zaman alanı, zarf ve spektral analizlerin birlikte değerlendirilmesi, gözlenen manyetik sapmaların güçlü yer hareketinin zamansal ve bant düzeyindeki evrimiyle tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu bütüncül bulgular, söz konusu sinyallerin birincil kabuksal elektromanyetik üretim mekanizmalarından ziyade, güçlü yer hareketine duyarlı mekanik sensör yanıtı ile açıklanmasının daha olası olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yalnızca tek istasyondan elde edilen ve 1 Hz örnekleme frekansına sahip veri seti kullanıldığı için, piezoelektrik süreçler veya iletken kabuk içinde gelişebilecek zayıf elektromanyetik indüksiyon mekanizmalarının olası katkıları kesin olarak ayırt edilememektedir.

Bu çalışma, eş-sismik manyetik anomalilerin yorumlanmasında zamanlama benzerliğinin tek başına yeterli olmadığını; morfolojik, bant düzeyinde ve sensör dinamiği temelli çok yönlü değerlendirmelerin gerekli olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, aktif tektonik bölgelerde gerçekleştirilen jeomanyetik gözlemlerde güçlü yer hareketine bağlı aletsel etkilerin dikkatle analiz edilmesi gerektiğini vurgulamakta ve yüksek örnekleme frekanslı, çok istasyonlu ve mekanik olarak izole edilmiş sensör sistemleriyle yapılacak ileri çalışmaların, kabuksal elektromanyetik üretim mekanizmalarının güvenilir biçimde ortaya konabilmesi açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan deprem verileri, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından işletilen Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (TADAS) üzerinden temin edilmiştir. Jeomanyetik veriler ise Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) tarafından sağlanmıştır. Yazarlar, veri paylaşımı ve erişim konusundaki katkılarından dolayı ilgili kurumlara teşekkür ederler. Ayrıca Prof. Dr. Hayrullah Karabulut ve Doç. Dr. Cengiz Çelik'e değerli katkıları için teşekkürlerini sunarlar. Makalenin geliştirilmesine sağladıkları yapıcı değerlendirme ve görüşler için editöre ve anonim hakemlere teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

- Aydın N.G., 2024. Elazığ - Sivrice ve Gezin Civarının Yeraltı Yapısının Gravite Verileri Kullanılarak Modellenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Bekler F.N., Demirci A., Bekler T., 2026. Recent Earthquake Activities and Seismic Sources in Northwestern Türkiye, Eng. Proc., 125, 2.

- Büyüksaraç A., Avcil F., Alkan H., Işık E., Harirchian E., Özçelik A., 2025. Seismic Hazard Implications of the 2025 Balıkesir Earthquake of Mw 6.1 for Western Türkiye, GeoHazards, 6, 64.

- Eleman F., 1965. The response of magnetic instruments to earthquake waves, J. Geomag. Geoelectr., 18(1), 43-72.

- Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu F., 2013. 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, Ankara, Türkiye.
- Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Saroğlu F., Olgun S., Elmacı H., Çan T., 2018. Active fault database of Türkiye, Bull. Earthq. Eng., 16, 3229-3275.
- Gao Y., Chen X., Hu H., Wen J., Tang J., Fang G., 2014. Induced electromagnetic field by seismic waves in Earth's magnetic field, J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 5651-5685.
- Gao Y., Hu H., 2010. Seismoelectromagnetic waves radiated by a double couple source in a saturated porous medium, Geophysical Journal International, 181, 873-896.
- Gao Y., Jiang P., Xu Y., Jiang L., Cheng C-H., Zhao G., Tang J., Chen X., Han B., Chong J., Yao C., 2021. On magnetic disturbances induced by rotation of coil-type magnetometer driven by seismic waves, Geophysical Journal International, 226, 1948-1974.
- Gao Y., Zhao G., Chong J., Klemperer S.L., Han B., Jiang F., Wen J., Chen X., Zhan Y., Tang J., Xiao Q., Wan L., 2020. Coseismic electric and magnetic signals observed during 2017 Jiuzhaigou Mw 6.5 earthquake and explained by electrokinetics and magnetometer rotation, Geophysical Journal International, 223, 1130-1143.
- Guglielmi A., 1992. Elastomagnetic waves in a porous medium, Physica Scripta., 46, 433-434.
- Hayakawa M., Ito T., Smirnova N., 1999. Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993, Geophys. Res. Lett., 26, 2797-2800.
- Hu H., Gao Y., 2011. Electromagnetic field generated by a finite fault due to electrokinetic effect, J. Geophys. Res., 116, B08302.
- Huang Q., 2002. One possible generation mechanism of coseismic electric signals, Proc. Jpn. Acad. Ser. B, 78, 173-178.
- Iyemori T., Kamei T., Tanaka Y., Takeda M., Hashimoto T., Araki T., Okamoto T., Watanabe K., Sumitomo N., Oshiman N., 1996. Coseismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogokennanbu earthquake, J. Geomag. Geoelectr., 48, 1059-1070.
- Johnston M.J.S., 1997. Review of Electric and Magnetic Fields Accompanying Seismic and Volcanic Activity, Surveys in Geophysics, 18, 441-476.
- Johnston M.J.S., Sasai Y., Egbert G.D., Muller R.J., 2006. Seismomagnetic effects from the long-awaited 28 September 2004 M 6.0 Parkfield earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 96(4B), 206-220.
- Koshevaya S.V., Grimalsky V.V., Burlak G.N., Pérez Enríquez R., Kotsarenko A.N., 2001. Magnetic perturbations excited by seismic waves, Phys. Scr., 64, 172-176.
- Kutoğlu Ş.H., Softa M., Akgün E., Nas M., Topal S., 2026. Analyzing Fault Reactivation Behavior Using InSAR, Stress Inversion, and Field Observations During the 2025 Sındırgı Earthquake Sequence, Simav Fault Zone, Western Türkiye, Sensors, 26, 760.
- Masci F., Thomas J.N., 2016. Evidence of underground electric current generation during the 2009 L'Aquila earthquake: Real or instrumental?, Geophys. Res. Lett., 43, 6153-6161.
- Matsushima M., Honkura Y., Oshiman N., Barış Ş., Tunçer M.K., Tank S.B., Çelik C., Takahashi F., Nakanishi M., Yoshimura R., Pektaş R., Komut T., Tolak E., Ito A., Iio Y., Işıkara A.M., 2002. Seismoelectromagnetic effect associated with the İzmit earthquake and its aftershocks, Bull. Seismol. Soc. Am., 92, 350-360.
- Nenovski P., 2015. Experimental evidence of electrification processes during the 2009 L'Aquila earthquake main shock, Geophys. Res. Lett., 42, 7476-7482.
- Ren H., Wen J., Huang Q., Chen X., 2015. Electrokinetic effect combined with surface-charge assumption: a possible generation mechanism of coseismic EM signals, Geophys. J. Int., 200, 835-848.
- Soysal H., Sipahioğlu S., Kolçak D., Altınok Y., 1981. Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu, M.Ö. 2100-M.S. 1900, TÜBİTAK Proje No: TBAG 341, 87 s, İstanbul.
- Ujihara N., Honkura Y., Ogawa Y., 2004. Electric and magnetic field variations arising from the seismic dynamo effect for aftershocks of the M7.1 earthquake of 26 May 2003 off Miyagi Prefecture, NE Japan, Earth Planets Space, 56, 115-123.
- Zhao J., Gao Y., Cheng Q., Zhou G., Chen C-H., Zhang X., Sun Y., 2024. Numerical simulation of electromagnetic responses to an earthquake source due to the piezoelectric effect of '∞m' symmetry, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 129, e2023JB027756.
- Zhao J., Gao Y., Tang J., Klemperer S.L., Wen J., Chen C-H., Chong J., 2021. Electromagnetic field generated by an earthquake source due to motional induction in 3D stratified media, and application to 2008 Mw 6.1 Qingchuan earthquake, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2021JB022102.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Bu çalışmada kullanılan sismik veriler, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından işletilen 1657 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonundan temin edilmiştir. Jeomanyetik veriler ise Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) bünyesinde faaliyet gösteren İzmit (IZN) jeomanyetik gözlemeviden sağlanmıştır.

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

Bu çalışmada gerek yazarlar arasında gerekse herhangi bir kişi/kurum/kuruluş nezdinde çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

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