



## Ganos Fayı Güncel Deprem Etkinliğinin Değerlendirilmesi: MONGAN Sismik Ağ Yapısı ve Veri Kalitesi

### *Evaluation of Current Earthquake Activity on the Ganos Fault: MONGAN Seismic Array Structure and Data Quality*

EŞREF YALÇINKAYA<sup>1\*</sup>, MARCO BOHNHOFF<sup>2,3</sup>, ETHEM GÖRGÜN<sup>1</sup>, HAKAN ALP<sup>1</sup>, STEPHAN BENTZ<sup>2</sup>, ALİ PINAR<sup>4</sup>, FATİH ALVER<sup>5</sup>, ÖMER KILIÇARSLAN<sup>5</sup>, BURÇİN DİDEM TAMTAŞ<sup>1</sup>, BURÇAK GÖRGÜN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Geomechanics and Scientific Drilling, Helmholtz-Centre Potsdam, GFZ German Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

<sup>3</sup> Institute of Geological Sciences, Free University Berlin, Berlin, Germany

<sup>4</sup> Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

<sup>5</sup> Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 23 Ekim (*October*) 2020 Kabul (*accepted*): 24 Kasım (*November*) 2021

#### ÖZ

1912 yılında iki büyük depremle kırılan Ganos Fayı'nın güncel depremselliği ve gerilme dağılımı fay boyunca önemli farklılıklar gösterir. Kırığın kara ve Saros kesimi asismik (deprem üretmeyen) bir davranış sergilerken, Marmara Denizi içindeki kısmı oldukça yoğun bir deprem etkinliğine sahiptir. Fayın geometrik ve fiziksel özelliklerindeki farklılıklar, fay boyunca değişen gerilme koşullarının bu tür davranış farklılıkları oluşturabileceği açıktır. MONGAN sismik gözlem ağı Ganos Fayı'nın kara parçası üzerinde toplam 40 istasyondan oluşan ve yaklaşık 3 yıl süreyle veri toplamış bir ağıdır. Elde edilen verinin hem fayın fiziksel özelliklerine ilişkin, hem de oluşan depremsellik ile ilgili katkı üretmesi beklenmektedir. Birbirinin devamı olan iki eşlenik makaleden oluşan çalışmanın birinci bölümünde sismik ağın yapısı ve veri kalitesi üzerinde durulmaktadır. İkinci bölüm ise daha çok ilksel veri analizlerinden ve sismolojik değerlendirmelerden oluşmaktadır (Yalçinkaya vd. 2022). İki farklı tip sensör ve kayıtçının kullanıldığı çalışmada 4,5 Hz Geophone sensör ve CUBE kayıtçılarının, 1 Hz Mark sensör ve EDL kayıtçılara oranla çok daha yüksek veri toplama verimliliği sağladığı tespit edilmiştir. Her iki sensörün 0,3 Hz frekanslara kadar yer titreşimlerine duyarlı oldukları, daha düşük frekanslarda alet içsel gürültülerinin hakim olmaya başladığı görülmüştür. İstasyonlarda gözlenen gürültü seviyelerinin negatif büyüklüğe kadar depremleri yakalamaya imkan verebileceği hesaplanmıştır.

Ganos Fayı'nın iki malzemeli yapısının hem yakın yüzey etkileri açısından, hem de dönüşmüş dalga fazları, fay zonu dalgaları gibi kayıtlar üzerinde önemli etkiler oluşturacağı görülmektedir. Fayın daha genç ve gevşek birimlerden oluşan güney bloğunda yer alan istasyonlar, daha yaşlı ve sıkı kuzey blok üzerinde yer alan istasyonlara göre çok daha uzun kayıt sürelerine, çok daha büyük dalga genlikleri sergilemektedirler. İstasyonlardaki H/V analizlerinden elde edilen zemin rezonans frekansları iki bloklu yapıyı açık olarak ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Ganos, Mikro Deprem, Deprem Gözlem Ağı, İki Malzemeli Fay Yapısı

### ABSTRACT

*The current seismicity and stress distribution of the Ganos Fault, which was ruptured by two major earthquakes in 1912, show significant differences along the fault. While the land and Saros part of the fault exhibit an astatic (non-earthquake producing) behavior, the part in the Marmara Sea has a very intense earthquake activity. It is clear that the differences in the geometric and physical properties of the fault and the changing stress conditions along the fault can create such behavioral differences. MONGAN seismic observation array consists of a total of 40 stations on the land of the Ganos Fault and has collected data for about 3 years. It is expected that the obtained data will contribute both to the physical properties of the fault and to the seismicity that occurs. In the first part of the study, which consists of two contiguous articles, which are the continuation of each other, the distribution of the seismic array and the data quality are emphasized. The second part consists mostly of primary data analysis and seismological evaluations (Yalçınkaya et al. 2022). In the study where two different types of sensors and recorders were used, it was determined that 4,5 Hz Geophone sensor and CUBE recorder provided much higher data collection efficiency than 1 Hz Mark sensor and EDL recorder. It has been observed that both sensors are sensitive to ground vibrations up to 0,3 Hz frequencies, and instrument internal noises begin to dominate at lower frequencies. It has been calculated that the noise levels observed at the stations can allow to detect earthquakes up to negative magnitudes. It is seen that the bi-material structure of the Ganos Fault will have significant effects both in terms of near surface effects and on records such as transformed wave phases and fault zone waves. The stations located in the southern block of the fault, which consists of younger and looser units, exhibit much longer recording times and much larger wave amplitudes than the stations located on the older and stiffer northern block. The ground resonance frequencies obtained from the H/V analyzes at the stations clearly reveal the two-block structure.*

**Keywords:** Ganos, Micro Earthquake, Earthquake Observation Array, Bi-material Fault Structure

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1015302>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: eyalcin@iuc.edu.tr

### GİRİŞ

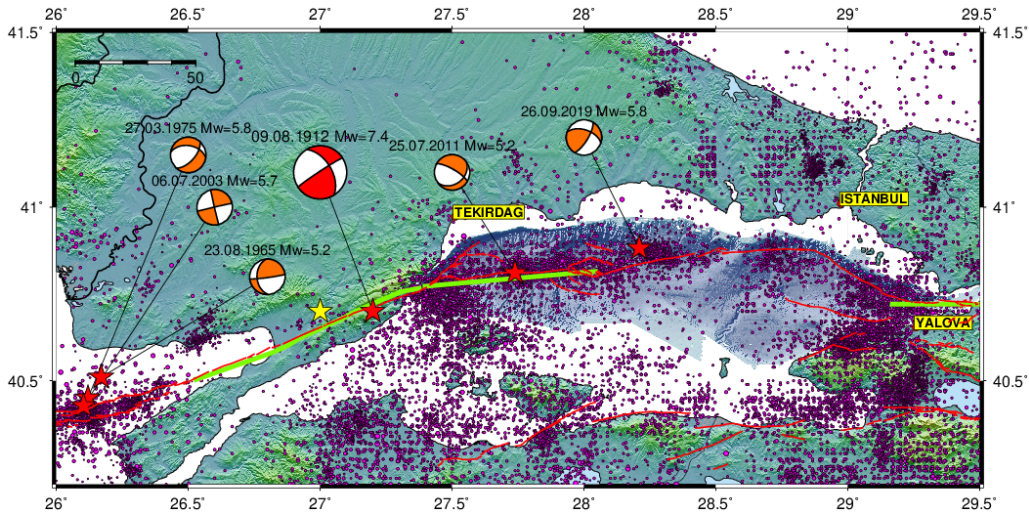
Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) batı ucunda, Tekirdağ ile Saros Körfezi arasında yer alan Ganos Fayı (GF), en son 1912 yılında büyüklükleri 7,4 (9 Ağustos 1912 Mürefte) ve 6,8 (13 Eylül 1912 Saros) olan iki depremle kırılmıştır (Şekil 1). Depremlerin Saros Körfezi'nden itibaren karada 45 km ve Marmara Denizi içindeki uzantısıyla birlikte toplam 140km uzunluğunda çok segmentli bir yüzey faylanması oluşturduğu düşünülmektedir (Rockwell vd., 2001; Altunel vd., 2004; Armijo vd., 2005, Uçarkuş vd., 2011;

Aksoy, 2021). Deprem kırığı, 1999 İzmit M7,4 ve Düzce M7,2 depremlerinde gelişen yüzey kırıkları ile benzer geometrik özellikler sergiler (Aksoy vd., 2010). Karadaki parçası üzerinde yapılan çalışmalar depremde oluşan atımların 5,5 m'ye eriştiğini göstermektedir (Aksoy vd., 2010).

KAFZ'nin Marmara Bölgesi içindeki ortalama yıllık kayma miktarı 20 mm kabul edildiğinde, bu depremden günümüze kadar geçen yaklaşık 100 yıllık süre içinde GF üzerinde 2 m'lik bir kaymanın biriktiği tahmin edilebilir. Paleosismoloji çalışmaları GF üzerinde büyük

deprem oluşumlarının ortalama 323 yıllık bir döngüye sahip olduğunu göstermektedir (Meghraoui vd., 2012). Günümüzde GF üzerinde yapılan tartışmalar, devam eden levha hareketlerinin ne kadarının GF üzerinde gerilme birikimine dönüştüğü, ne kadarının akma gösterdiği ve fay düzlemi boyunca bu paylaşımın nasıl dağıldığı şeklindedir. Motagh vd. (2007) interferometri ve GPS ölçümlerinden GF'nin kilitleme derinliğini 8-17 km olarak belirlemişlerdir. Ergintav vd. (2014)

değerlendirdikleri GPS ölçümleri ile GF'yi, 20 mm yıllık atıma sahip saf doğrultu atımlı ve kilitlemiş bir fay olarak nitelendirmişlerdir. de Michele vd. (2017) yaptıkları interferometri çalışmasında GF üzerinde farklı kesimlerde farklı davranış biçimlerine dikkat çekmişler, GF'nin batı kesimlerinde sığ yüzey hareketleri gözlenirken özellikle doğu tarafında hiç yüzey hareketi gözlenmediği, yüzeyden itibaren tüm fay düzleminin kilitlemiş ve gerilme biriktirdiğini vurgulamışlardır.



**Şekil 1.** Çalışma bölgesi ve çevresinin aletsel dönem depremselliği ve ana yapısal unsurlar. Yeşil kalın çizgi 1912 ve 1999 depremleri kırığını temsil eder. Fay boyunca oluşan önemli depremler ve kaynak mekanizma çözümleri gösterilmiştir. Sarı yıldız 13 Eylül 1912 depremi lokasyonunu gösterir.

**Figure 1.** Instrumental period seismicity of the study area and its surroundings and main structural elements. The green thick line represents the 1912 and 1999 earthquakes rupture. Significant earthquakes along the fault and source mechanism solutions are shown. The yellow star indicates the location of the September 13, 1912 earthquake.

Ulusal gözlem ağlarından (Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü-KRDAE ve Afet Acil Durum Yönetim Başkanlığı-AFAD) elde edilen deprem dağılımları GF üzerinde oluşan depremselliğin Marmara Denizi içinde

göre yok denecek kadar az olduğuna dikkat çekmektedir (Şekil 1). Özellikle 1912 depreminin Saros Körfezi içinden Orta Marmara Çukuru'na kadar bir kırılma ürettiği düşünülürse, aletsel dönem deprem etkinliğinin Marmara Denizi içinde

kalan kısmın diğer kısımlara göre çok farklılık göstermesi dikkat çekicidir. Kara ve Saros Körfezi içindeki kısımda deprem sayısının azlığı birçok araştırmacı tarafından sismik boşluk veya asismik (deprem üretmeyen) kilitlemiş fay olarak adlandırılmıştır (Tüysüz vd., 1998; Karabulut vd., 2006; Schmittbuhl vd., 2016; Bohnhoff vd., 2016; Aksoy, 2021). Janssen vd. (2009) 8 adet deprem istasyonundan oluşan yerel bir sismik ağ ile 75 günlük kısa süreli yaptıkları çalışmada, GF'nin kara parçası üzerinde, büyüklükleri 2,5'ten küçük olan bir sismik etkinliğe vurgu yapmışlardır. Çalışma süresi içinde ulusal ağ tarafından bölgede yakalanan deprem sayısı sadece 11 iken, yerel ağ tarafından yakalanan deprem sayısı 115'tir. Küçük ölçekli kırılma deformasyonlarının belirlenmesinde yoğun ağların katkısına dikkat çekilmiş ve incelenen fay parçası için tamamen kilitlemiş-asismik değil, küçük depremlerle aktiviteye sahip, kısmi akma olduğu belirtilmiştir. Öztürk vd. (2015) GF'nin Marmara Denizi içindeki kısmında meydana gelen deprenselliği ve kaynak mekanizmalarını incelemiş, elde ettiği sonuçlarda oluşan depremlerde ters faylanma ve normal faylanma mekanizmalarına çok sık rastlanıldığından ve elde edilen çözümlerin genel KAFZ yapısına ve geometrisine bağlı olarak olağan özellikler gösterdiğinden bahsetmişlerdir.

Fay zonu boyunca biriken gerilmeler ve oluşan deprensellik ilişkilerinin fay zonunun fiziksel ve mekanik özellikleriyle yakından bağlantılı olduğu açıktır. Karaş vd. (2017) GF üzerinde yaptıkları özdirenç çalışmasında fay zonunu, yüzey kesiminde oldukça iletken bir özellik gösteren, bunun karşılığında zayıf ve deforme olmuş, sıvı içeriği yüksek bir fay yapısı olarak tanımlamışlardır. Fay zonu boyunca ofiyolitik temele kadar bu özellikler asimetrik bir karakter göstermekte, fayın kuzeyinde güneye göre elektrik özdirenç daha yüksek bir birim, derine doğru ise nispeten direnci yüksek, mekanik özellikleri daha güçlü temel yapıya geçilmektedir. Temel yapının akışkan içeriğinin düşük olması GF boyunca

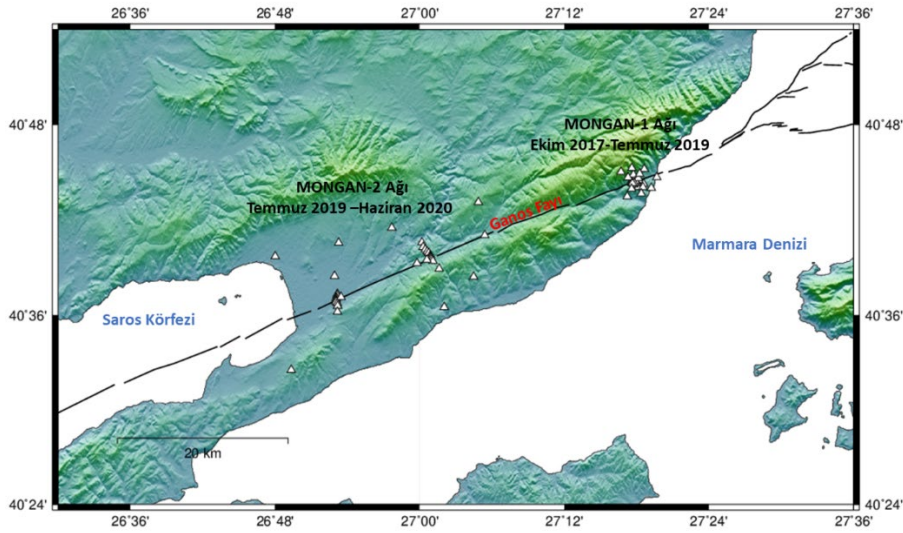
deprem aktivitesinin kısır olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Janssen vd. (2009) ve Karaş vd. (2017) çalışmalarında, GF zonunun oldukça geniş bir ezilmiş zona sahip olduğu belirtilmiştir.

Ganos Fayı kuzeyde Eosen yaşlı birimlerle güneyde Miyosen yaşlı birimleri birbirinden ayıran, farklı litolojik ve fiziksel özelliklere sahip iki malzemeli (bimateryal) bir yapının ara yüzeyini oluşturur. Bu tür iki malzemeli fay yapılarında oluşan kırılmalar, hem sismolojik açıdan hem de olası hasarın değerlendirilmesi açısından büyük öneme sahiptirler. İki malzemeli fay yapısı, fay zonu boyunca gelişen; asimetrik ezilme zonu, çatlak yoğunluğu, sıvı ve gözenek içeriği, asimetrik sismik dalga hızları ve dalga sönümü anlamı taşır (Andrews, 2005; Ben-Zion ve Shi, 2005). Bu yapı üzerinde meydana gelen kırılmalarda ortaya çıkan dalga genliklerinde ve buna bağlı hasar dağılımında farklılıklar meydana gelir. İki malzemeli ara yüz boyunca kayma ve normal gerilme arasındaki etkileşim, sürtünmeyi dinamik olarak azaltabilir ve kırılma yayılımı için mekanik olarak tercih edilen yüzeyler oluşturur (Ben-Zion, 2001; Brietzke ve Ben-Zion, 2006). İki malzemeli bir ara yüzün varlığının diğer olası sonuçları; çok yüksek kayma hızları ve yırtılma cephesinin ilerlemesi (Ben-Zion, 2001; Ampuero ve Ben-Zion, 2008), fay üzerindeki artçı şokların asimetrik dağılımları (Rubin ve Gillard, 2000; Zaliapin ve Ben-Zion, 2011) ve fay boyunca asimetrik jeodezik alanların oluşmasıdır (Le Pichon vd., 2005; Wdowski vd., 2007). Tüm bu nedenlerden dolayı fay zonları boyunca iki malzemeli yapıları mümkün olan en yüksek çözünürlükte keşfetmek önemlidir (Allam vd., 2014; Qiu vd., 2017). KAFZ boyunca Düzce (Ben-Zion vd., 2003), Mudurnu (Bulut vd., 2012) ve Karadere (Najdahmadi vd., 2016) segmentlerinde iki malzemeli fay yapıları sismolojik çalışmalarla ortaya çıkarılmıştır.

2018 yılında Tübitak-Almanya BMBF ikili işbirliğiyle oluşturulan bir proje kapsamında Ganos Fayı'nın kara segmenti üzerinde toplam 40 adet

istasyondan oluşan bir deprem izleme ağı (MONGAN-Monitoring Ganos Fault) kurulmuştur (Şekil 2). Ağın amacı ulusal gözlem ağlarından (KRDAE ve AFAD) elde edilen sonuçlara göre asismik davranış sergileyen Ganos Fayı'nın olası mikro sismik etkinliğini gözlemleyebilmek ve iki malzemeli fay yapısını fay zonu dalgaları analizleriyle inceleyebilmektir. Gözlem ağı iki aşamalı çalıştırılmış olup, birinci aşamada istasyonlar fayın doğu ucunda (MONGAN-1), dar

bir alan içinde 2 yıl süreli çalıştırılmış, ikinci aşamada ise istasyonlar fayın batı kesimine kaydırılmış (MONGAN-2) ve daha geniş bir alana yayılarak yaklaşık 1 yıl süreyle kayıt toplanmıştır. Bu makalede öncelikle MONGAN-1 ağı temel alınarak; kurulan ağların özellikleri, veri toplama ve veri kalitesi konularından bahsedilecek, eşlenik ikinci makalede ise (Yalçinkaya vd., 2022) ilksel sismolojik analizler üzerinde durulacaktır.



**Şekil 2.** Bölgesel topografik harita üzerine işlenmiş Ganos Fayı (siyah çizgi) ve MONGAN-1, MONGAN-2 sismik ağların konumları (beyaz üçgenler istasyon lokasyonlarını gösterir).

**Figure 2.** Locations of Ganos Fault (black line) and MONGAN-1, MONGAN-2 seismic networks (white triangles show station locations) on the regional topographic map.

### MONGAN SİSMİK AĞLARIN ÖZELLİKLERİ

MONGAN deprem izleme ağı proje süresi içinde iki aşamalı planlanan bir ağıdır (Şekil 2). Ağın birinci aşamasında istasyonlar, Ganos Fayı'nın doğu kesiminde Güzelköy civarında konumlandırılmışlardır (MONGAN-1). MONGAN-1 ağı 2017 yılı Ekim ayında faaliyete geçirilmiş ve 2019 yılı Temmuz ayına kadar arazide kalmıştır. İkinci aşamada ise, istasyonlar Ganos Fayı'nın

batı kesimine kaydırılmış (MONGAN-2) ve Temmuz 2019-Haziran 2020 tarihleri arasında kayıt toplamışlardır.

MONGAN-1 çok yakın aralıklarla fay zonu üzerine konumlandırılan bir ağıdır (Şekil 3). Bu ağın hedefi daha çok fay zonu dalgalarını keşfetmeye yöneliktir. Bu dalgalar; fay zonu baş dalgaları (FZBD), fay zonu kapanlanmış dalgalar (FZKD) ve fay zonu yansımış dalgalar (FZYD) olup, fay zonu



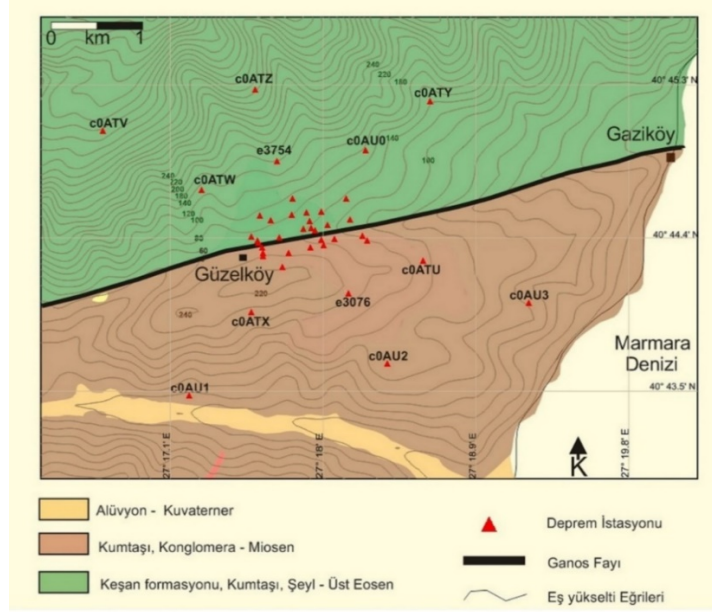
boyunca iki malzemeli yapı nedeniyle ortaya çıkan hız farklılıklarının etkilerini taşırlar (Allam vd., 2014; Ben-Zion 1989). Bu dalgalarla ilgili ilk analizler eşlenik makalede bulunabilir (Yalçınkaya vd., 2022). Ağ için seçilen lokasyon 1912 depremi gözlemlerinde en yüksek atımın ölçüldüğü (5.5 m) Güzelköy'dür. Yapılan paleosismolojik kazı çalışmaları ve depremin doğada bıraktığı ötelenme izleriyle, fay zonu arazide rahatlıkla takip edilebilmektedir (Aksoy, 2021; Altunel vd., 2000, 2004). Bu lokasyonda istasyon yerleri fayı birkaç noktada kesecek şekilde, faya dik ve paralel olarak bir yıldız şeklinde tasarlanmıştır. İstasyonlar arasında en uzak mesafe ~4 km, en yakın mesafe ise 25 m civarındadır. Fay üzerinde istasyon arası mesafeler kısa tutulurken, faydan uzaklaştıkça mesafeler artmaktadır. İstasyonların bir kısmı doğrudan fay zonu üzerinde kalırken, yarısı daha yaşlı ve sert kaya birimlerden oluşan kuzey blok üzerinde, diğer yarısı ise daha genç ve gevşek birimlerden oluşan güney blok üzerindedir. Bölgede topografya güneye doğru deniz seviyesine inerken, kuzeye doğru Ganos Dağı boyunca yükselir. Ağ kapsamında en düşük ve en yüksek istasyonlar arasındaki kot farkı yaklaşık 500 m'dir.

MONGAN-2 ağı Ganos Fayı'nın batı kesiminde Gölcük ile Kavaklı yerleşim yerleri arasında kurulmuştur (Şekil 4). Fay zonu iki ayrı lokasyonda istasyonlarla dik hatlar şeklinde kesilmiştir. Bu hatlardan birincisi Sofuköy civarında, diğeri ise fayın güncel alüvyon birimlerle örtülü olduğu Kavaklı'dadır. MONGAN-2'de istasyonlar yaklaşık 350 km<sup>2</sup>'lik bir alan içinde dağılır. En yakın istasyon mesafesi ~50 m iken, en uzak 30 km civarındadır. MONGAN-1'den farklı olarak MONGAN-2'de istasyonların daha geniş bir alana dağılmasının nedeni, fay zonu dalgaların gözlenmesinin yanı sıra, bölgede oluşan mikro depremselliğin izlenebilmesine yöneliktir. Konuyla

ilgili tartışmalar eşlenik ikinci makalede bulunabilir (Yalçınkaya vd., 2022).

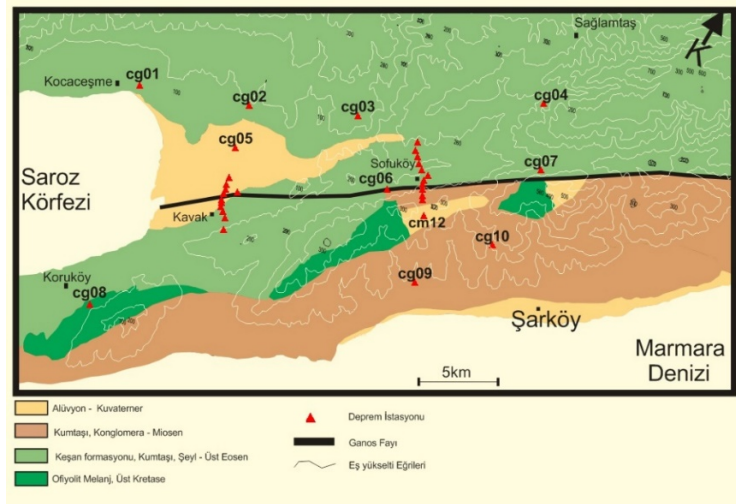
#### ALETSEL DONANIM

MONGAN deprem izleme ağları toplam 40 istasyondan oluşur. Proje süresi içinde aktif çalışan istasyon sayısı arızalanma, zarar görme, yer değiştirme gibi çeşitli nedenlerle farklılık gösterir. Proje amacına uygun olarak yakın ve küçük depremleri kaydedebilmek hedefiyle istasyonlarda üç bileşen kısa periyot cihazlar tercih edilmiş olup, 30 adet 1 Hz Mark L4C ve 10 adet 4,5 Hz Geophone sensörler kullanılmıştır (Şekil 5). Kayıtçı olarak EarthData EDL PR6-24 ve DATA-CUBE3 olmak üzere iki farklı cihaz mevcuttur. Genel olarak Mark sensörler EDL kayıtçılarla, Geophone sensörler ise CUBE kayıtçılarla eşleştirilmiştir. EDL kayıtçılar harici, CUBE kayıtçılar ise dahili GPS alıcılara sahiptirler. Kayıtçılarda 200 Hz örnekleme frekansları kullanılmakla birlikte, kurulum dosyalarında oluşan bazı hatalar nedeniyle dönem dönem 100 Hz veri kaydettikleri fark edilmiştir. EDL verileri saatlik MiniSEED dosyalar şeklinde kaydedilmekte iken, CUBE kayıtçılar kendilerine özgü CUBE formatında günlük dosyalar şeklinde verileri kaydeder. EDL kayıtçılarda veri depolama amacıyla 12 GB boyutunda değiştirilebilir hard diskler kullanılır. CUBE kayıtçılar ise 32 GB boyutunda dahili hard disklere sahiptirler. İstasyonlar offline çalışmaları nedeniyle hard diskleri dolmadan kaydedilen verinin boşaltılmasına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle yaklaşık her üç ayda bir istasyonlar gezilerek veriler indirilmiş ve istasyon bakımları yapılmıştır. İstasyonların güç beslemeleri 12 Volt 72 Amper aküler ve 100 Watt güneş panelleriyle sağlanmıştır. MONGAN-1 ve MONGAN-2 ağları istasyon künyeleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilir.



**Şekil 3.** MONGAN-1 ağı istasyon dağılımı (üçgenler) ve yüzey jeolojisi. Sadece ağın dış istasyonlarının kodları gösterilmiştir.

**Figure 3.** MONGAN-1 network station distribution (triangles) and surface geology. Only the codes of the external stations of the network are shown.



**Şekil 4.** MONGAN-2 ağı istasyon dağılımı (üçgenler) ve yüzey jeolojisi. Sadece ağın dış istasyonlarının kodları gösterilmiştir.

**Figure 4.** MONGAN-2 network station distribution (triangles) and surface geology. Only the codes of the external stations of the network are shown.



**Şekil 5.** İstasyonlarda kullanılan sensör (1 Hz Mark ve 4.5 Hz Geophone) ve kayıtçılar (EDL ve CUBE).  
**Figure 5.** Sensor (1 Hz Mark and 4.5 Hz Geophone) and recorders (EDL and CUBE) used in stations.

**Çizelge 1.** MONGAN-1 ağı istasyon bilgileri.

**Table 1.** MONGAN-1 network station information.

No	İstasyon Kod	Sensör	Kayıtçı (ayıtçı/Sensör Ser	Enlem(°)	Boylam(°)	Yükseklik(m)	Güç Desteği
1	e3067	Mark 1Hz	EDL e3067	40.74227	27.29383	234	Güneş Paneli+Akü
2	e3068	Mark 1Hz	EDL e3068	40.73988	27.29353	213	Güneş Paneli+Akü
3	e3069	Mark 1Hz	EDL e3069	40.74132	27.30046	192	Güneş Paneli+Akü
4	e3070	Mark 1Hz	EDL e3070	40.74261	27.29985	206	Güneş Paneli+Akü
5	e3071	Mark 1Hz	EDL e3071	40.74252	27.29843	214	Güneş Paneli+Akü
6	e3072	Mark 1Hz	EDL e3072	40.74221	27.29696	221	Güneş Paneli+Akü
7	e3073	Mark 1Hz	EDL e3073	40.74172	27.29877	206	Güneş Paneli+Akü
8	e3075	Mark 1Hz	EDL e3075	40.73984	27.29984	192	Güneş Paneli+Akü
9	e3076	Mark 1Hz	EDL e3076	40.73459	27.30248	211	Güneş Paneli+Akü
10	e3077	Mark 1Hz	EDL e3077	40.74031	27.30393	175	Güneş Paneli+Akü
11	e3078	Mark 1Hz	EDL e3078	40.74400	27.29706	235	Güneş Paneli+Akü
12	e3080	Mark 1Hz	EDL e3080	40.74102	27.29922	201	Güneş Paneli+Akü
13	e3081	Mark 1Hz	EDL e3081	40.73906	27.29403	209	Güneş Paneli+Akü
14	e3084	Mark 1Hz	EDL e3084	40.73712	27.29603	238	Güneş Paneli+Akü
15	e3085	Mark 1Hz	EDL e3085	40.73986	27.30117	193	Güneş Paneli+Akü
16	e3086	Mark 1Hz	EDL e3086	40.74021	27.29313	227	Güneş Paneli+Akü



## Yalçinkaya vd. /Yerbilimleri, 2022, 43 (1), 37-60

17	e3087	Mark 1Hz	EDL	e3087	40.74003	27.29575	206	Güneş Paneli+Akü
18	e3088	Mark 1Hz	EDL	e3088	40.73983	27.30439	183	Güneş Paneli+Akü
19	e3089	Mark 1Hz	EDL	e3089	40.73918	27.29883	205	Güneş Paneli+Akü
20	e3090	Mark 1Hz	EDL	e3090	40.73833	27.29422	211	Güneş Paneli+Akü
21	e3091	Mark 1Hz	EDL	e3091	40.73939	27.30009	206	Güneş Paneli+Akü
22	e3093	Mark 1Hz	EDL	e3093	40.74181	27.29493	233	Güneş Paneli+Akü
23	e3095	Mark 1Hz	EDL	e3095	40.74180	27.30269	182	Güneş Paneli+Akü
24	e3097	Mark 1Hz	EDL	e3097	40.74077	27.29928	196	Güneş Paneli+Akü
25	e3098	Mark 1Hz	EDL	e3098	40.73958	27.29372	213	Güneş Paneli+Akü
26	e3099	Mark 1Hz	EDL	e3099	40.74086	27.29815	199	Güneş Paneli+Akü
27	e3754	Mark 1Hz	EDL	e3754	40.74761	27.29553	301	Güneş Paneli+Akü
28	e3082	Mark 1Hz	EDL	e3082	40.74390	27.30236	198	Güneş Paneli+Akü
29	e3083	Mark 1Hz	EDL	e3083	40.73854	27.29663	203	Güneş Paneli+Akü
30	e3096	Mark 1Hz	EDL	e3096	40.73858	27.29419	212	Güneş Paneli+Akü
31	c0ATU	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATU	40.73781	27.30985	165	Akü
32	c0ATV	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATV	40.75051	27.27847	572	Akü
33	c0ATW	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATW	40.74473	27.28814	267	Akü
34	c0ATX	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATX	40.73273	27.29296	208	Akü
35	c0ATY	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATY	40.75341	27.31056	200	Akü
36	c0ATZ	Geoph 4.5Hz	Cube	c0ATZ	40.75458	27.29341	468	Akü
37	c0AU0	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU0	40.74858	27.30423	238	Akü
38	c0AU1	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU1	40.72463	27.28697	70	Akü
39	c0AU2	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU2	40.72775	27.30639	161	Akü
40	c0AU3	Geoph 4.5Hz	Cube	c0AU3	40.73362	27.32027	101	Akü

Çizelge 2. MONGAN-2 ağı istasyon bilgileri.

Table 2. MONGAN-2 network station information.

Noistasyon Kc	Sensör	Kayıtçı/Kayıtçı/Sensör Seri	Enlem(°)	Boylam(°)	Yükseklik(m)	Güç Desteği	
1	em01	Mark 1Hz	EDL 3089/1348	40.67629	27.00305	130	Güneş Paneli+Akü
2	cm02	Mark 1Hz	Cube 18/1334	40.67153	27.0048	162	Güneş Paneli+Akü
3	em03	Mark 1Hz	EDL 3081/1342	40.66881	27.00771	175	Güneş Paneli+Akü
4	cm04	Mark 1Hz	Cube 21/1355A	40.66666	27.01037	193	Güneş Paneli+Akü
5	em05	Mark 1Hz	EDL 3095/1339A	40.66517	27.01243	203	Güneş Paneli+Akü
6	cm06	Mark 1Hz	Cube 17/1332	40.66275	27.01491	194	Güneş Paneli+Akü
7	em07	Mark 1Hz	EDL 3067/1351A	40.66114	27.01488	189	Güneş Paneli+Akü
8	cm08	Mark 1Hz	Cube 14/1330	40.66029	27.01508	173	Güneş Paneli+Akü

9	em09	Mark 1Hz	EDL 3754/1351	40.65951	27.01601	153	Güneş Paneli+Akü
10	em10	Mark 1Hz	EDL 3099/1330A	40.65811	27.01703	131	Güneş Paneli+Akü
11	em11	Mark 1Hz	EDL 3087/1346A	40.65667	27.01828	139	Güneş Paneli+Akü
12	cm12	Mark 1Hz	Cube 16/1332	40.64859	27.02695	262	Güneş Paneli+Akü
13	em13	Mark 1Hz	EDL 3078/1333A	40.65803	27.00996	183	Güneş Paneli+Akü
14	em14	Mark 1Hz	EDL 3077	40.62216	26.88627	6	Güneş Paneli+Akü
15	em15	Mark 1Hz	EDL 3076/1340	40.62067	26.88567	6	Güneş Paneli+Akü
16	em16	Mark 1Hz	EDL 3090/1349	40.61831	26.88492	8	Güneş Paneli+Akü
17	em17	Mark 1Hz	EDL 3070/1337A	40.61698	26.88449	7	Güneş Paneli+Akü
18	em18	Mark 1Hz	EDL 3071/1333	40.6154	26.88424	7	Güneş Paneli+Akü
19	em19	Mark 1Hz	EDL 3068/1334A	40.61481	26.88385	5	Güneş Paneli+Akü
20	em20	Mark 1Hz	EDL 3075	40.61361	26.88441	5	Güneş Paneli+Akü
21	em21	Mark 1Hz	EDL 3069/335A	40.61232	26.88607	8	Güneş Paneli+Akü
22	em22	Mark 1Hz	EDL 3084/1334	40.60949	26.88655	18	Güneş Paneli+Akü
23	em23	Mark 1Hz	EDL 3097/1353	40.60326	26.88631	80	Güneş Paneli+Akü
24	em24	Mark 1Hz	EDL 3091/1349A	40.61876	26.89132	7	Güneş Paneli+Akü
25	cg01	Geoph 4.5Hz	Cube ,TY	40.66156	26.80024	12	Güneş Paneli+Akü
26	cg02	Geoph 4.5Hz	Cube ,TZ	40.67593	26.88802	62	Güneş Paneli+Akü
27	cg03	Geoph 4.5Hz	Cube ,U2/4205	40.69171	26.96135	96	Güneş Paneli+Akü
28	cg04	Geoph 4.5Hz	Cube ,TX/4204	40.71862	27.08115	326	Güneş Paneli+Akü
29	cg05	Geoph 4.5Hz	Cube ,U1	40.64097	26.88232	8	Güneş Paneli+Akü
30	cg06	Geoph 4.5Hz	Cube ,TV/4206	40.65443	26.99629	120	Güneş Paneli+Akü
31	cg07	Geoph 4.5Hz	Cube ,U0/4209	40.68389	27.09006	132	Güneş Paneli+Akü
32	cg08	Geoph 4.5Hz	Cube ,TU	40.54195	26.82237	123	Güneş Paneli+Akü
33	cg09	Geoph 4.5Hz	Cube ,U3	40.60812	27.03396	80	Güneş Paneli+Akü
34	cg10	Geoph 4.5Hz	Cube ,TW/4201	40.64018	27.07465	199	Güneş Paneli+Akü

## İSTASYON KURULUMU

Belirlenen lokasyonlarda Mark sensörler yüzeyden 50 cm derinliğinde açılan çukurlar içerisine, tabanda 5 cm kalınlığında beton atılarak, üzerine mermerden su yalıtımı yapılmış kutular içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 6). Geophone sensörler ise 50 cm çukur içerisine doğrudan toprağa saplanarak yerleştirilmiştir. Sensörlerin etrafları toprak örtüsüyle sıkılaştırılarak yerle temasları iyileştirilmiştir. Fakat bazı istasyonlarda kış koşullarında etraflarındaki dolgu malzemenin

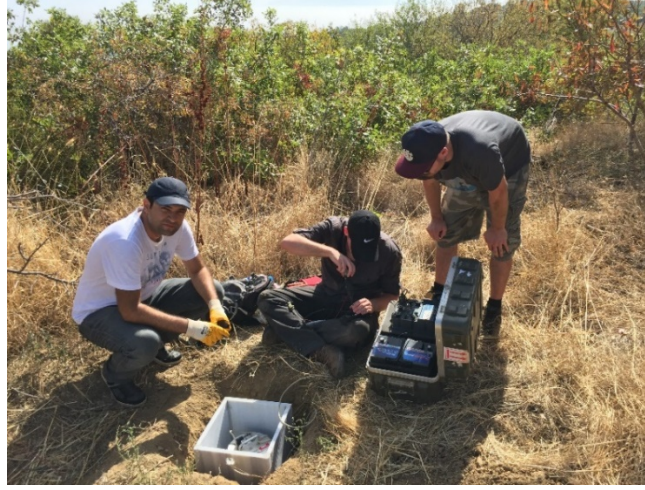
gevşediği ve düzeçlerinde bozulmalar olduğu gözlenmiştir. Bazı istasyonlarda ise yapılan yalıtımların yetersiz kaldığı ve mermer kaidelerin içlerinin su dolduğu fark edilmiştir. Benzer durumların toplanan kayıtlarda etkiler oluşturabileceği beklenmekle birlikte, istasyon bazında tam bir değerlendirme henüz yapılamamıştır. Sismometrelerin kuzey okları kurulum sırasında pusula yardımıyla manyetik kuzeye yönlendirilmiş, ancak kayıtlarda tanecik hareketleriyle ilgili bazı ön değerlendirmelerde bu

hızalamanın sapmalar içerebileceği gözlenmiştir. Tüm istasyonlar çevre güvenliği alınarak ve istasyon künyeleri oluşturularak kayıt almaya hazır hale getirilmişlerdir.

### VERİ TASNİFİ

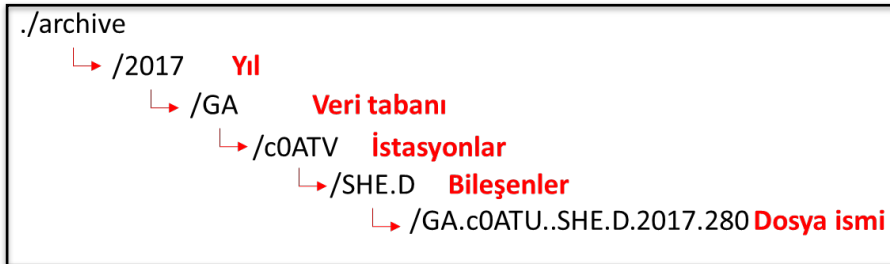
Araziden EDL ve CUBE kayıtçılardan iki ayrı formatta indirilen ham veriler ortak bir veri arşivi oluşturmak amacıyla bazı formatsal değişikliklere tabi tutulur. Verilerin arşivlenmesi konusunda dosya yapılarının SeisComP Data Structure (SDS) arşivleme mantığına uygun olarak saklanmasına

karar verilmiştir. Bu arşivleme yönteminde en üst klasör yıl olmak üzere sırasıyla alt klasörler; veri tabanı ismi, istasyon adı, bileşen isimleri ve en son olarak ta günlük MiniSEED formatında dosyalar şeklinde yer alır (Şekil 7). Kayıtçılardan \*.pri0, \*.pri1 ve \*.pri2 uzantılarıyla gelen veri dosyaları sırasıyla Z, NS, EW bileşen uzantılarına çevrilerek saklanır. MiniSEED formatında 200 Hz örnekleme aralığına sahip bir günlük tek bileşen dosya boyutu yaklaşık 30 MB olup, 40 istasyon 3 bileşen bir günlük veri boyutu 3.6 GB, bir yıllık ise 1.3 TB veri hacmine ulaşır.



**Şekil 6.** 1 Hz sensör ve EDL kayıtçılardan arazi kurulumu.

**Figure 6.** Field setup of 1 Hz sensor and EDL recorders.



**Şekil 7.** Veri depolamada kullanılan dosyalama yapısı.

**Figure 7.** File structure used in data storage.

### İSTASYONLARIN KAYIT PERFORMANSLARI

İstasyonların kayıt performanslarını belirleyen iki önemli unsur, oluşan veri kaybı ve elde edilen veri kalitesidir. Veri kayıpları genel olarak güç ünitelerinde yaşanan sıkıntılardan kaynaklanabildiği gibi, kayıtçı veya sensörlerde oluşabilecek arızalar da kayıplara neden olabilir. Güç ünitelerinde yaşanan sıkıntılar genellikle nemli ve kapalı bir ortamda bulunan akülerdeki performans kayıpları, dış etkenlerle oluşan bağlantı kopuklukları, güneş panellerinde yaşanan arızalar şeklinde sıralanabilir. Bu tip arızalar her üç ayda bir yapılan istasyon bakım gezilerinde ortaya çıkabilmekte ve müdahale edilebilmektedir. Genel olarak Geophone-CUBE istasyonların çalışma performanslarının oldukça iyi olduğu, arızalanma olasılıklarının son derece düşük olduğu gözlenmiştir. Buna karşın Mark-EDL istasyonlar oldukça problem oluşturdukları izlenmiştir. EDL kayıtçılar sensörlerden gelen sinyalleri belirli zaman aralıklarıyla kendi depolama ünitelerinden harici disklere atarlar. Harici disklerin takılmasında veya veri atımı sırasında ortaya çıkan bazı sorunlar nedeniyle, verilerin hard disklere yazılmasında problemler yaşandığı gözlenmiştir. Ayrıca disklere atılan verilerde bazı durumlarda formatsal hatalar ve GPS hataları olduğu da gözlemlerimiz arasındadır. Bazı istasyonlarda ilk günlerden itibaren EDL'in çalışmadığı veya sensörlerin bileşenlerinde sürekli bir gürültü izi olduğu gözlenmiştir. Bu istasyonlar için olanaklar dahilinde EDL ve sensör değişikliği yoluna gidilmiş, fakat istasyonlarda önemli veri kayıpları ortaya çıkmıştır.

MONGAN-1 ve MONGAN-2 istasyonların veri toplama performansları Şekil 8'de görülebilir. Şekilde yatay eksen zamanı, dikey eksen ise istasyonları göstermekte olup, renkli çizgiler kaydın varlığını, boşluklar ise veri kayıplarını ifade etmektedir. Görüldüğü gibi bazı istasyonlarda (MONGAN-1: e3084, e3083, e3076, e3073, e3072, e3071, MONGAN-2: em07, em14, em17, em18, em21, em22) kayıt toplama süreleri oldukça

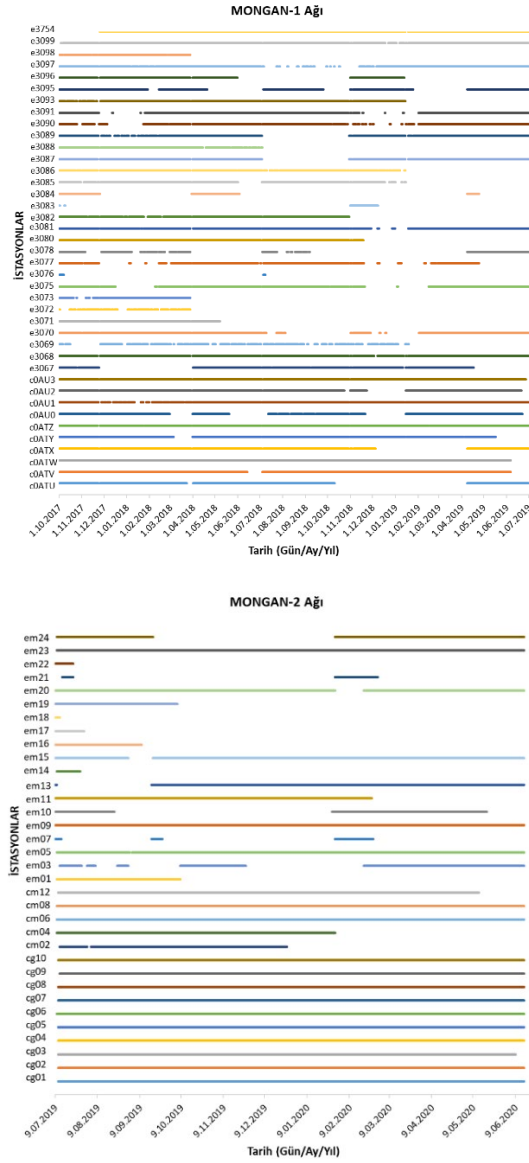
düşük kalmıştır. Kötü performans sergileyen istasyonların tamamı EDL kayıtçılar oluşturur ve çoğunlukla kalıcı EDL arızasına sahiptirler. Ne yazık ki proje kapsamında fazladan EDL olmaması nedeniyle bu tip istasyonlarda EDL değişimine gidilememiştir. Akü performanslarının da bazı istasyonlarda önemli sorunlar oluşturduğu, bakım sonrası dahi kısa süre içinde akülerin boşaldığı ve veri kayıplarına yol açtıkları gözlenmiştir.

### İSTASYONLARIN ÇEVRESEL GÜRÜLTÜ İÇERİKLERİ

Veri kalitesini belirleyen en önemli unsur istasyonlardaki çevresel gürültü karakterleridir. İstasyonların yüzeye oldukça yakın, sığ çukurlar içine yerleştirilmeleri nedeniyle çevresel gürültülerden önemli şekilde etkilenecekleri açıktır. Ancak lokasyonların daha çok kırsal alanlarda seçilmesi nedeniyle, kültürel gürültünün (>1 Hz) nispeten az olacağı düşünülmüştür. Bölgede olası gürültü kaynakları; istasyonların deniz kıyısına yakın olması nedeniyle dalga gürültüsü, gemi-tekne trafiği, tarım alanları içinde olunması nedeniyle çiftçilik faaliyetleri, yer yer taş ocağı, otoyol çalışmaları ve bazı noktalarda rüzgar santrali etkileri olarak sıralanabilir.

Kaynaklar arasında ayırım yapmadan, genel olarak istasyonlardaki gürültü altyapısını görebilmek amacıyla, her bir istasyonda olasılıksal güç yoğunluk spektrumları (PSD) hesaplanmıştır (Mc Namara ve Buland, 2004). İlk aşamada PSD grafikleri birer saatlik kayan pencereler kullanılarak, toplam 1 aylık süre için SEISAN yazılımı (Havskov ve Ottemoller, 1999) kullanarak hesaplanmıştır. Şekil 9 her iki ağ için de örnek istasyonlarda dikey bileşenler için hesaplanan PSD grafiklerini gösterir. Aynı zamanda istasyonların gürültü seviyelerini, genel gürültü seviyeleriyle karşılaştırmak amacıyla Peterson (1993) NLNM (new low noise model) ve NHNM (new high noise model) eğrileriyle birlikte verilir. Görüldüğü gibi istasyonların büyük çoğunluğunda

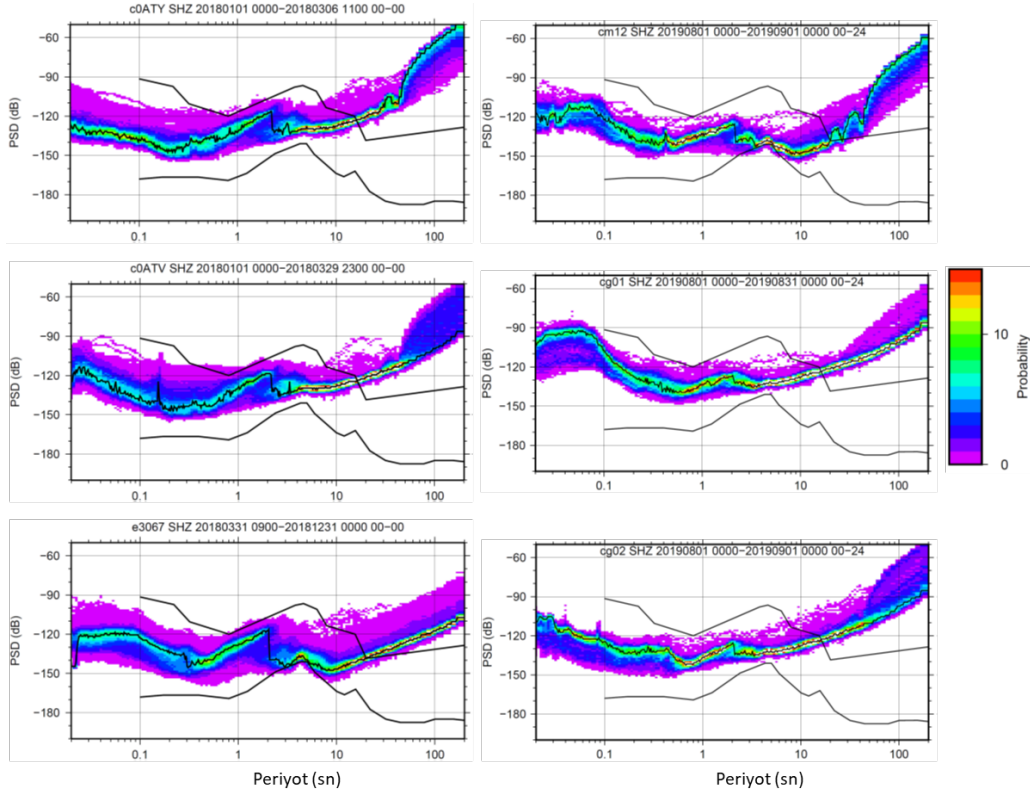
Yalçinkaya vd. /Yerbilimleri, 2022, 43 (1), 37-60



**Şekil 8.** MONGAN-1 (üst resim) ve MONGAN-2 (alt resim) ağları istasyon kayıt performansları. Yatay çizgilerdeki kesiklikler veri kayıplarını temsil eder.

**Figure 8.** Station recording performances of MONGAN-1 (top image) and MONGAN-2 (bottom image) networks. The dashes in the horizontal lines represent data losses.





**Şekil 9.** MONGAN-1 (sol grafikler) ve MONGAN-2 (sağ grafikler) ağı kapsamında çalıştırılan örnek istasyonlarda bir ay süreli veri kullanılarak hesaplanan düşey bileşen PSD grafikleri.

**Figure 9.** Vertical component PSD graphs calculated using one month data at sample stations operated within the MONGAN-1 (left graphs) and MONGAN-2 (right graphs) network.

çevresel gürültüler, yaklaşık 20 sn'nin altındaki periyotlarda NLNM-NHNM eğrilerinin arasında kalır. NLNM-NHNM aralığı, genel bir sismolojik gözlem istasyonunun performansı açısından kabul edilebilir aralıktır. PSD eğrileri yaklaşık 3-10 sn'nin üzerindeki periyotlarda lineer bir artış gösterir ki, aletlerin içsel gürültülerinin kayıtlarda hakim olmaya başladığını ifade eder.

PSD eğrileri yaklaşık 2 sn periyotlarda 20-30 dB'e varan ani sıçramalar gösterirler. Bu sıçramaların aletsel kaynaklı olduğuna dair açık bir kanıt yoktur. Geophone ve Mark sensörlerin doğal periyotlarının birbirinden farkı olmasına karşın,

sıçramalar her iki sensör tipinde aynı periyotlarda izlenir. Sadece sıçrama miktarları istasyonlar arasında değişiklik gösterir. 1 sn'den daha büyük periyotlu gürültü kaynakları genel olarak okyanus kaynaklı dalga hareketleri ve atmosferdeki basınç, sıcaklık değişimi kaynaklıdır ve bunlar mikroseism olarak adlandırılırlar. Okyanus kaynaklı dalgaların hakim periyotlarının birincisi 4-8 sn, ikincisi ise 10-16 sn civarındadır (McNamara ve Buland, 2004). MONGAN istasyonlarında 2sn civarında görülen bu değişimlerin nispeten bir iç deniz olan Marmara ve Akdeniz kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Benzer gürültü karakterleri Sevim vd. (2018)

tarafından Ege Bölgesi deprem istasyonlarında da gözlenmiştir.

Sismolojik verilerin kalitesini belirleyen bir diğer etken, analizlerde kayıtların hangi genlik ve frekans aralığında kullanılabileceğidir. Kullanılabilecek en düşük genliği genel olarak, yukarıda tartıştığımız, istasyonların sahip olduğu çevresel gürültü genlikleri belirler (belirli frekans aralığı cihaz içi gürültüler bunlardan daha düşük genliklidir). Eğer bir depremin oluşturduğu titreşimin genliği çevresel gürültü genliğinin üzerindeyse (genellikle en az üç katı, S/N>3) bu deprem ayırt edilebilir ve analiz edilebilir anlamı taşır. Aksi durumda deprem sinyali gürültü içinde kalır ve bir olay olarak analiz edilmesi mümkün olmaz. Bu nedenle özellikle mikro deprem izlemelerinde istasyonlar mümkün olduğunca çevresel gürültünün az olduğu lokasyonlarda ve açılan kuyu içine konumlandırılmaya çalışılır. Fakat kısa süreli ağ çalışmalarında bu genellikle mümkün olmaz.

Çevresel gürültü genliği aynı zamanda, bir sismik ağ tarafından kaydedilebilecek en küçük deprem büyüklüğüne de işaret eder. Şekil 9'da PSD grafiklerinde görüldüğü gibi 0,1-1 sn aralığında (1-10 Hz,  $f_c \approx 5$  Hz) ağ istasyonlarında çevresel gürültü ivme güç spektrumu genlikleri yaklaşık  $P_a = -150$  dB seviyesine kadar düşmektedir (Şekil 9 c0ATY istasyonu). Bu değer Bormann (1998) bağıntıları kullanılarak önce birim dönüşümü yapılır ve sonra yerdeğiştirme genliğine dönüştürülürse;

$$P_a [(m/sn^2)^2/Hz] = 10^{\frac{P_a[dB]}{10}}$$

$$P_a = 10^{-14} (m/sn^2)^2/Hz$$

$$P_d = \frac{P_a}{(2\pi f_c)^4} = \frac{10^{-14}}{974090,91}$$

$$= 1,027 * 10^{-21} (m^2)/Hz$$

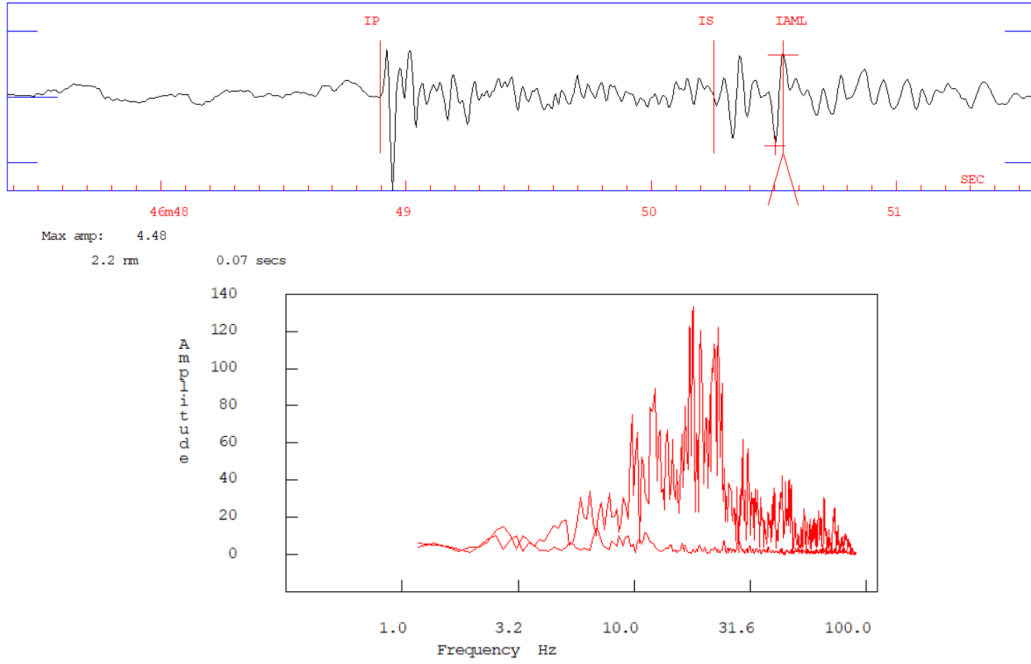
$$d_{RMS} = (P_d * f_c)^{1/2} = 0,072nm$$

elde edilir. Burada  $P_d$ : gürültü yerdeğiştirme güç spektrumu genliğini,  $f_c$ : merkez frekans değerini ve  $d_{RMS}$ : ortalama yerdeğiştirme genliğini temsil eder. Deprem sinyalinin gürültüden ayırt edilebilmesi açısından dalga genliğinin gürültü genliğinin en az 3 katı olması gerektiği düşünülürse (S/N>3), bu durumda ayırt edilebilir en küçük dalga genliği  $0,072nm * 3 = 0,216nm$  olur. Bunu P dalgası var sayar ve depremlerde P dalga ile S dalga genlikleri arasında yaklaşık P/S=0,2 oranı olduğunu varsayarsak, bu durumda yakalanabilir en düşük S dalga genliği 1.1 nm olacaktır. Yalçınkaya vd. (2022) çalışmasında yer alan magnitüd bağıntısı kullanılırsa ve ağ merkez olmak üzere 10, 20 ve 50 km yarıçaplı daireler içinde yakalanabilir en küçük deprem büyüklükleri sırasıyla ML-0,5 ,ML-0,2 ,ML0,2 olacak demektir.

2017.10.06 tarihli bir mikro depremin 10 km uzaklıkta c0ATY istasyonunda kaydedilen düşey bileşen kaydı ve sinyal-gürültü spektrumları Şekil 10'da gösterilmektedir. Yaklaşık 3-50 Hz arasında S/G oranları >3'tür. S dalgasında ölçülen en büyük genlik 2,2 nm olup, hesaplanan lokal büyüklük ML=-0,2'dir. Bu örnek ağ kapsamında negatif büyüklükte yakın depremlerin yakalanabileceğini gösterir. Yalçınkaya vd. (2022) çalışmasında görülebileceği gibi MONGAN ağı tarafından -0,7 büyüklüğüne kadar depremler yakalanabilmiştir.

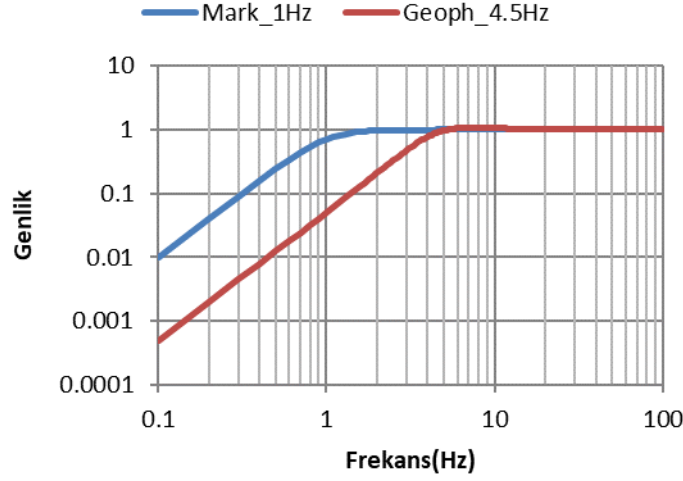
Kayıtlarda kullanılabilecek en yüksek frekans değerini Nyquist frekansı belirler. MONGAN ağı kayıtçıları genel olarak 200Hz örnekleme frekansına sahiptirler. Bu durumda kayıtlarda görülebilecek en yüksek frekans (Nyquist frekansı) 100 Hz olarak hesaplanır. En düşük frekans ise genel olarak sensör doğal frekansı olarak kabul edilir ve bu frekanstan daha düşük frekanslarda sensör hassasiyetinin üstel olarak azaldığı bilinir. Mark 1 Hz ve Geophone 4,5 Hz sensörlere ait genlik transfer fonksiyonları Şekil 11'de gösterilir.

Görüldüğü gibi Mark cihazlar 1 Hz'in altında, Geophone'lar ise 4,5 Hz'in altında frekans bağımlı olarak genlik tepkileri üstel olarak azalır. Teorik hesaplamalar her ne kadar sensör doğal frekansını kayıtlarda kullanılabilir alt sınır olarak belirlese de, birçok çalışmada kullanılan kazanç (gain) değerlerine bağlı olarak sensör frekansının çok daha aşağısına inilebileceği yönünde örnekler de mevcuttur (Reidisel vd., 1990; Rasmussen, 2019; Strollo vd., 2008; Ringler vd., 2018).



**Şekil 10.** 2017.10.06 tarihli bir depremin 10 km uzaklıkta c0ATY istasyonunda kaydedilen düşey bileşen kaydı (üstte) ve sinyal-gürültü spektrumları (altta). Kayıt üzerinde P (IP) ve S (IS) dalga varışlarıyla birlikte S dalgası genliği (IAML) okumaları gösterilmektedir. Sinyal spektrumu P ve S dalgalarını kapsar (yüksek genlikli eğri), gürültü spektrumu P dalgası varışı öncesi seçilen kayıttan hesaplanır (yaklaşık düz eğri).

**Figure 10.** Vertical component recording (above) and signal-to-noise spectra (below) of an earthquake of 2017.10.06 recorded at station c0ATY, 10 km away. The recording shows S wave amplitude (IAML) readings with P (IP) and S (IS) wave arrivals. The signal spectrum includes P and S waves (high amplitude curve), the noise spectrum is calculated from the recording selected before P wave arrival (approximate flat curve).



**Şekil 11.** Mark 1 Hz ve Geophone 4,5 Hz sensörlere ait genlik transfer fonksiyonları.

**Figure 11.** Amplitude transfer functions of Mark 1 Hz and Geophone 4.5 Hz sensors.

Şekil 12'de birbirine çok yakın konumda, farklı tip sensörlerin kullanıldığı iki istasyonda PSD grafiklerinden hesaplanan MOD (bir seride en çok tekrar eden değer) eğrileri karşılaştırılmaktadır. e3754 kodlu istasyonda 1 Hz Mark sensör ve EDL kayıtçı, c0ATZ kodlu istasyonda ise 4,5 Hz Geophone sensör ve CUBE kayıtçı bulunur. Görüldüğü gibi sismometrelerin benzer kayıt davranışları, sahip oldukları doğal frekanslarından çok daha düşük frekanslara kadar sürmektedir. Yaklaşık bu benzerlik 0,3-0,5 Hz'e (~2-3 sn) kadar devam eder ve c0ATZ istasyonunda 0,3 Hz'ten, e3754 istasyonunda ise 0,1 Hz'ten itibaren genlikler alet içi gürültüler nedeniyle lineer olarak artmaya başlar. Bu örnek her iki tip cihaz için kayıtların yaklaşık 0,3 Hz'e kadar kullanılabilmesine işaret eder.

#### **KAYITLARIN ZAMAN VE FREKANS ORTAMI ÖZELLİKLERİ**

Ağ içerisinde istasyonlar arasındaki mesafelerin çok küçük olması nedeniyle, kayıtlar üzerinde yerel zemin etkileri dışında kaynak ve ortam

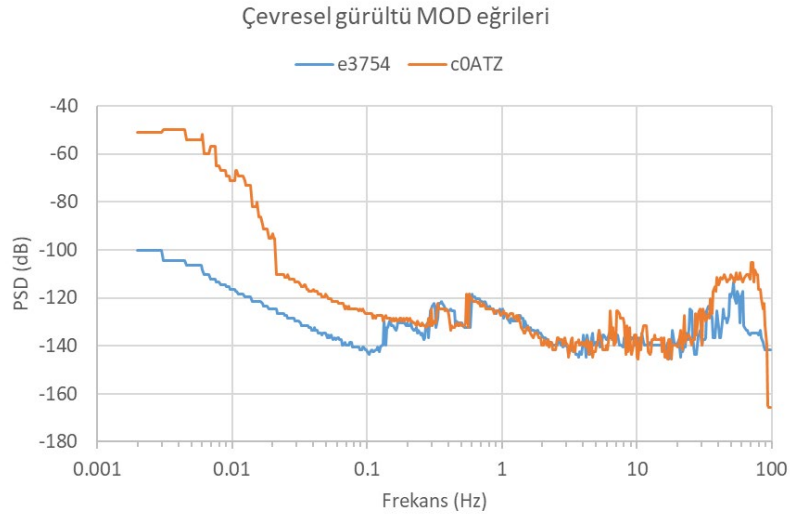
etkilerinin çok farklılık oluşturmayacağı düşünülebilir. Ancak sismik ağın iki malzemeli bir fay zonu boyunca konumlanması, özellikle yakın depremlerde dalgaların farklı fiziksel özelliklere sahip seyahat yollarını kullanmaları olasıdır. Örneğin; doğrudan sert blok veya gevşek blok içinde seyahat eden ya da doğrudan fay zonunu oluşturan ezilmiş birim içinde seyahat eden dalgaların farklı seyahat sürelerine ve sönümlenme dinamiklerine maruz kalacakları açıktır. Ayrıca, farklı hız kontrastlarına sahip ara yüzeylerden oluşan bu yer altı yapısı, istasyonlarda gözlenen dalga formları üzerinde farklı türde dönüşmüş dalga fazları (PS, SP, FZBD, FZKD vb.) üretebilecektir (Najdahmadi vd., 2018; Hrubcova vd. 2016).

Şekil 13'te 25 Ekim 2017 saat 11:05'te, büyüklüğü 3,4 olan ve ağın yaklaşık 15 km doğusunda meydana gelmiş bir depreme ait MONGAN-1 ağı düşey bileşen kayıtları gösterilmektedir. Dalga formlarının karşılaştırılabilmesi amacıyla alet etkileri giderilmiş ve 1-40 Hz band geçişli filtre

uygulanmıştır. Dalga formları istasyonlar altındaki olası düşey zemin kesitiyle birlikte kuzeyden güneye doğru bir hat üzerine iz düşürülmüş şekilde sıralanmışlardır. İstasyonlar arasındaki dalga formlarındaki büyük farklılıklar dikkat çekicidir. Kuzeyden güneye doğru dalga genlikleri belirgin bir şekilde artmakta ve kayıt süreleri uzamaktadır. P dalgalarının hemen devamında bazı olası dönüşmüş dalga fazları (PS, SP) sismogramlarda belirgindir (Şekil 13). Fay zonu üzerine düşen istasyonlarda ayırt edilebilir bir farklılaşma (genlik, süre, frekans içeriği ya da dalga fazları) bu aşamada görebilmek mümkün değildir. Kuzey-güney hat boyunca sismogramlarda genlik ve süre karakterini belirleyen büyük oranda lokal zemin etkileridir. Fakat özellikle düşey bileşenler üzerinde bu etkinin açık gözlenmesi dikkat çekicidir. Çünkü genelde beklenen zemin etkilerinin, yani genlik büyütme ve süre uzamalarının yatay

bileşenler üzerinde, yani SH dalgalarında gözlenmesi, bunun aksine düşey bileşen sismogramların birbirine benzer olmasıdır. Özellikle istasyonlar arası genlik farklarının magnitüd hesaplamalarını etkileyeceği açıktır.

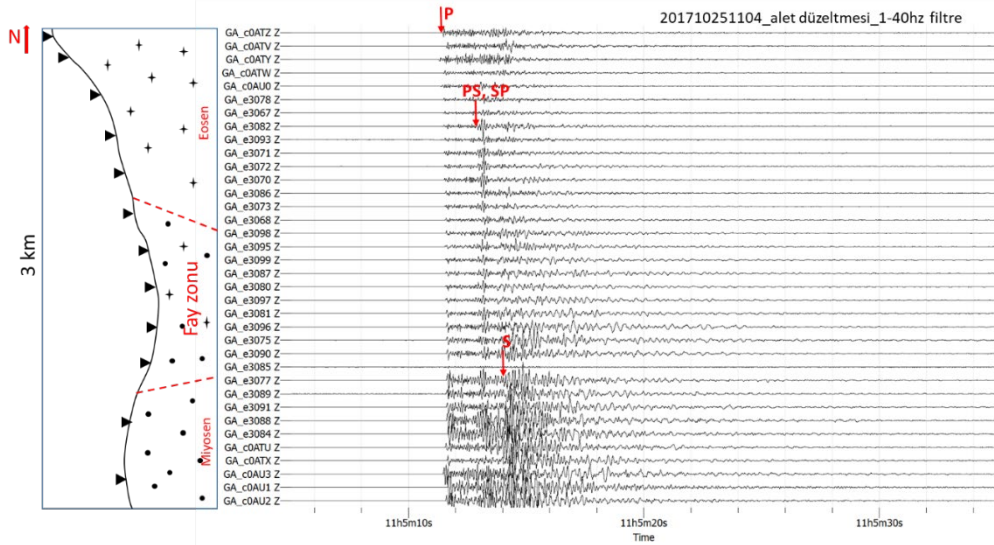
Çalışma kapsamında zemin etkilerini araştırmak amacıyla her bir istasyonda gürültü kaydından oluşan 24 saatlik bir veri Yatay/Düşey Spektral Oran (H/V) yöntemiyle (Nakamura, 1989) analiz edilmiştir. Yöntemin esası; ana kaya içinde hareketin yatay ve düşey bileşeninin eşit olduğu ve yatay bileşenin aksine düşey bileşenin yerel zemin koşullarından etkilenmediği varsayımına dayanır. Böylece hareketin yatay bileşeninin düşey bileşene oranı (frekans ortamında) zemin transfer fonksiyonunu verir. Yerel zemin koşullarının etkisini belirlemek için tek istasyon kaydının yeterli olması, yöntemi oldukça kullanışlı kılar.



**Şekil 12.** e3754 ve c0ATZ kodlu istasyonlarda 1 aylık veri kullanılarak hesaplanan en çok tekrarlanan (MOD) PSD eğrileri.

**Figure 12.** Most repeated (MOD) PSD curves calculated using 1-month data at stations coded e3754 and c0ATZ.



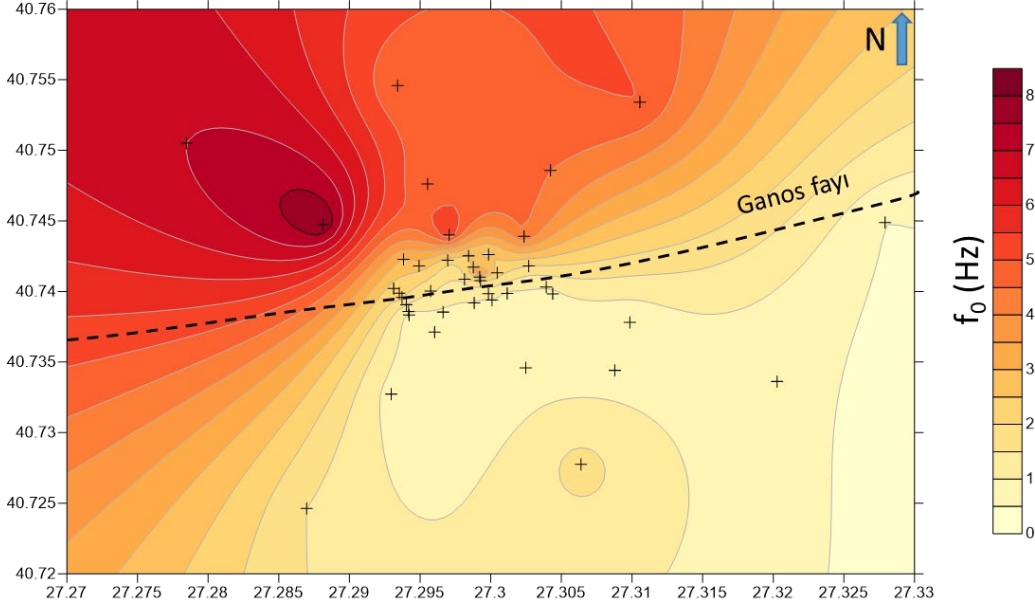


**Şekil 13.** 25 Ekim 2017 saat 11:05'te, büyüklüğü 3,4 olan ve ağın yaklaşık 15 km doğusunda meydana gelmiş depreme ait MONGAN-1 ağı düşey bileşen kayıtları. Kayıtlardan alet etkileri giderilmiş ve 1-40 Hz arası filtre uygulanmıştır. İstasyon kayıtları KG yönünde bir hat boyunca iz düşürülmüş ve hattın derinlik kesiti solda gösterilmektedir.

**Figure 13.** MONGAN-1 network vertical component records of the earthquake with magnitude 3,4 at 11:05 on 25 October 2017, approximately 15 km east of the network. Instrument effects were removed from the recordings and a filter between 1-40 Hz was applied. The station records are traced along a line in the NS direction and the depth section of the line is shown on the left.

Şekil 14'te H/V analizlerinden elde edilen zemin hakim (rezonans) frekansları ( $f_0$ ) haritalanmıştır. Görüldüğü gibi fayın kuzeyinde yer alan sert kaya blokta rezonans frekansları güneydekilere göre belirgin oranda daha yüksektir. Farklı fiziksel özelliklere sahip kuzey ve güney blok yapısı H/V

analizlerinde açık olarak ortaya çıkmaktadır. Güneye doğru zemin rezonans frekanslarının küçülmesi ana kaya üzerindeki düşük hızlı sediman örtü kalınlığının giderek arttığına işaret eder.



**Şekil 14.** 24 saatlik veri kullanılarak H/V yöntemiyle elde edilen zemin hakim frekans ( $f_0$ ) dağılımı. Artı sembolleri istasyon lokasyonlarını gösterir.

**Figure 14.** Ground dominant frequency ( $f_0$ ) distribution obtained by H/V method using 24-hour data. Plus symbols indicate station locations.

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geçici olarak tasarlanan sismik ağların kayıt performanslarının düşük kalmasının ve çevresel faktörlerden daha fazla etkilenmelerinin başlıca nedeni, istasyonların hızlı ve düşük maliyetle konumlandırma gereksinimidir. İstasyon yerlerinin mümkün olduğunca kültürel gürültüden uzak seçilme isteği, istasyonların güvenlik problemleriyle karşılaşma sorunu doğurur. İstasyonların online veri taşıma maliyetlerinin karşılanamaması, offline kayıt almaya yöneltir, fakat bu kez de arızalara hızlı müdahale edebilme şansı ortadan kalkar. Tüm bu koşullar altında MONGAN deprem izleme ağı, özellikle Mark 1 Hz sensör ve EDL kayıtcı istasyonlarında beklenenin altında bir kayıt performansı ile karşılaşmıştır. Buna karşın, Geophone 4,5 Hz ve CUBE kayıtcı

bulunan istasyonlar, kullanım kolaylığı, düşük arızalanma özelliği ve düşük enerji tüketimleriyle bu tür geçici ve lokal deprem izleme çalışmaları açısından son derece tatmin edici sonuçlar üretmişlerdir. Sensörlerin içsel gürültülerinin doğal frekanslarının çok daha aşağısında etkin olmaya başladıkları, 0,3-0,5 Hz'e kadar sağlıklı kayıt alabileceklerini göstermektedir. İstasyonlarda -150 dB seviyelerine kadar inen çevresel gürültü genlikleri, lokal mesafelerde negatif büyüklüğe kadar depremlerin yakalanabileceğinin işaretidir. Ganos Fayı'nın iki malzemeli fay yapısı, farklı bloklar üzerinde yer alan istasyon kayıtlarında açık olarak etkilerini göstermektedir. Fay zonu boyunca dönüşmüş fazlar, kayıt süreleri ve genlik farklılıkları, istasyonların zemin rezonans

frekansındaki değişimler fay zonunu oluşturan iki malzemeli bir yapının açık göstergeleridir.

#### KATKI BELİRTME

MONGAN ağın kurulması aşamasında katkılarında dolayı Patricia Martinez Garzon'a, Virgine Durand'a Amandine Amemoutou'ya, Felix Kastner'e teşekkür ederiz. Arazi çalışmalarına destek sağlayan AFAD Başkanlığına ve Deprem Dairesi Başkanı Dr. Murat NURLU'ya teşekkür ederiz. Bu çalışma TÜBİTAK 118R019 nolu proje tarafından desteklenmektedir. Şekil 1 ve Şekil 2 çiziminde GMT5 (Wessel vd., 2013) programı kullanılmıştır.

#### KAYNAKLAR

- Aksoy, M.E., 2021. The 9 August 1912 Mürefte-Şarköy earthquake of the North Anatolian fault. *Med. Geosc. Rev.*, 3, 95–114. <https://doi.org/10.1007/s42990-021-00050-z>
- Aksoy M.E., Meghraoui, M., Vallee, M., Cakir, Z., 2010. Rupture characteristics of the A.D. 1912 Murefte (Ganos) earthquake segment of the North Anatolian fault (western Turkey). *Geology*, 38, 991–994.
- Allam, A.A., Ben-Zion, Y., Peng, Z. 2014. Seismic imaging of a bimaterial interface along the Hayward Fault, CA, with Fault Zone Head Waves and direct P arrivals. *Pure and Applied Geophysics* 171(11), 2993-3011. doi:10.1007/s00024-014-0784-0
- Altunel, E., Barka, A., Akyüz, S. 2000. Slip distribution along the 1912 Mürefte-Şarköy earthquake, the North Anatolian Fault, Western Marmara. In: Barka A, Kozacı Ö, Akyüz S, Altunel E (eds) *The 1999 Izmit and Düzce earthquakes: preliminary results*. ITU Publications, Istanbul, pp 341–349.
- Altunel, E., Meghraoui, M., Akyüz, H.S., Dikbaş, A. 2004. Characteristics of the 1912 co-seismic rupture along the North Anatolian fault zone (Turkey): implications for the expected Marmara earthquake. *Terra Nova* 16, 198–204. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00552.x>
- Ampuero, J.-P., Ben-Zion, Y. 2008. Cracks, pulses and macroscopic asymmetry of dynamic rupture on a bimaterial interface with velocity-weakening friction. *Geophysical Journal International* 173(2), 674-692.
- Armijo, R. vd. 2005. Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul. *Geochem Geophys Geosystems* 6, Q06009. <https://doi.org/10.1029/2004GC000896>
- Andrews, D.J. 2005. Rupture dynamics with energy loss outside the slip zone. *J. Geophys. Res.* 110, B01307, doi:10.1029/2004JB003191.
- Ben-Zion, Y. 1989. The response of two joined quarter spaces to SH line sources located at the material discontinuity interface. *Geophys. J. Int.* 98, 213–222.
- Ben-Zion, Y. 2001. Dynamic ruptures in recent models of earthquake faults. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 49(9). 2209-2244.
- Ben-Zion, Y., Peng Z., Okaya, D., Seeber, L., Armbruster, J.G., Ozer, N., Michael, A.J., Baris, S., Aktar, M. 2003. A shallow fault-zone structure illuminated by trapped waves in the Karadere–Duzce branch of the North Anatolian Fault, western Turkey. *Geophysical Journal International* 152(3), 699-717.
- Ben-Zion, Y., Shi, Z. 2005. Dynamic rupture on a material interface with spontaneous generation of plastic strain in the bulk. *Earth and Planetary Science Letters* 236(1–2), 486-496. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.025.
- Bohnhoff, M., Martínez-Garzón, P., Bulut, F., Stierle, E., Ben-Zion, Y. 2016. Maximum earthquake magnitudes along different sections

- of the North Anatolian fault zone. *Tectonophysics* 674, 147–165. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.02.028>
- Bormann, P. 1998. Conversion and comparability of data presentations on seismic background noise. *Journal of Seismology* 2, 37–45. <https://doi.org/10.1023/A:1009780205669>
- Brietzke, G.B., Ben-Zion, Y. 2006. Examining tendencies of in-plane rupture to migrate to material interfaces. *Geophysical Journal International* 167(2). 807-819, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03137.x
- Bulut, F., Ben-Zion, Y., Bohnhoff, M. 2012. Evidence for a bimaterial interface along the Mudurnu segment of the North Anatolian Fault Zone from polarization analysis of P waves. *Earth and Planetary Science Letters* 327, 17-22.
- de Michele, M., Ergintav, S., Aochi, H., Raucoules, D. 2017. An L-band interferometric synthetic aperture radar study on the Ganos section of the north Anatolian fault zone between 2007 and 2011: Evidence for along strike segmentation and creep in a shallow fault patch. *PLoS ONE* 12(9): e0185422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185422>
- Ergintav, S. vd. 2014. Istanbul's earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap. *Geophys Res Lett* 41, 5783–5788. <https://doi.org/10.1002/2014G L060985>
- Havskov, J., Ottemoller, L. 1999. *SeisAn Earthquake Analysis Software*. *Seismological Research Letters*, 70(5), 532–534. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.5.532>
- Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Boušková, A., Bohnhoff, M. 2016. Shallow crustal discontinuities inferred from waveforms of microearthquakes: Method and application to KTB Drill Site and West Bohemia Swarm Area. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121, 881–902. <https://doi.org/10.1002/2015JB012548>
- Janssen, C., Bohnhoff, M., Vapnik, Y., Görgün, E., Bulut, F., Plessen, B., Pohl, D., Aktar, M., Okay, A.I., Dresen, G. 2009. Tectonic evolution of the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NW Turkey). *J. Struct. Geol.* 31(1), 11–28.
- Karabulut, H., Roumelioti, Z., Benetatos, C., Kömec, A., Özalaybey, S., Aktar, M., Kiratzi, A. 2006. A source study of the 6 July 2003 (Mw 5.7) earthquake sequence in the Gulf of Saros (Northern Aegean Sea): Seismological evidence for the western continuation of the Ganos fault. *Tectonophysics* 412, 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.09.009>
- Karaş M., Tank, B.S., Özaydın, S. 2017. Electrical conductivity of a locked fault: investigation of the Ganos segment of the North Anatolian Fault using three-dimensional magnetotellurics, *Earth, Planets and Space* 69, 107. DOI 10.1186/s40623-017-0695-2
- Le Pichon, X., Kreemer, C., Chamot-Rooke, N. 2005. Asymmetry in elastic properties and the evolution of large continental strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110, 1978– 2012.
- McNamara, D.E., Buland, R.P. 2004. Ambient noise levels in the Continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4), 1517–1527. <https://doi.org/10.1130/G3144 7.1>
- Meghraoui, M., Aksoy, M.E., Akyüz, H.S., Ferry, M., Dikbaş, A., Altunel, E. 2012. Paleoseismology of the North Anatolian Fault at Güzelköy (Ganos segment, Turkey): size and recurrence time of earthquake ruptures west of the Sea of Marmara. *Geochem Geophys Geosyst* 13, Q04005. <https://doi.org/10.1029/2011G C003960>

- Motagh, M., Hoffmann, J., Kampes, B., Baes, M., Zschau, J. 2007. Strain accumulation across the Gazikoy–Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 255, 432–444.
- Najdahmadi, B., Bohnhoff, M., Ben-Zion, Y. 2016. Bimaterial interfaces at the Karadere segment of the North Anatolian Fault, northwestern Turkey. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121. doi:10.1002/2015JB012601
- Najdahmadi, B., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bohnhoff, M. 2018. Imaging the Mudurnu segment of the North Anatolian Fault Zone from waveforms of small earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JB015198>
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research* 30, 25-33.
- Öztürk, Y.K., Özel, N.M., Özbakir, A.D. 2015. States of local stresses in the Sea of Marmara through the analysis of large numbers of small earthquakes. *Tectonophysics* 665, 37-57. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.09.027>
- Peterson, J. 1993. Observation and modeling of seismic background noise. *U.S. Geol. Surv. Tech. Rept.* 93-322, 1–95.
- Qiu, H., Ben-Zion, Y., Ross, Z., Share, P.E., Vernon, F. 2017. Internal structure of the San Jacinto fault zone at Jackass Flat from data recorded by a dense linear array. *Geophysical Journal International* 209(3), 1369-1388.
- Rasmussen, T. 2019. Comparison of 4.5 Hz geophones and a broadband seismometer in a real field deployment, Master Thesis, <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/90292>.
- Riedesel, M.A., Orcutt, J.A., Moore, R.D. 1990. Limits of sensitivity of inertial seismometers with velocity transducers and electronic amplifiers. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80(6A), 1725–1752.
- Ringler, A.T., Anthony, R.E., Karplus, M.S., Holland, A.A., Wilson, D.C. 2018. Laboratory tests of three Z-Land Fairfield Nodal 5-Hz, three-component sensors. *Seismological Research Letters* 89(5), 1601–1608. doi: <https://doi.org/10.1785/0220170236>
- Rockwell, T.K., Barka, A., Dawson, T., Akyüz, S., Thorup, K. 2001. Paleoseismology of the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolia fault, northwestern Turkey: comparison of the historical and paleoseismic records, implications of regional seismic hazard, and models of earthquake recurrence. *J. Seismol.* 5, 433–448. <https://doi.org/10.1023/A:1011435927983>
- Rubin, A.M., Gillard, D. (2000). Aftershock asymmetry/rupture directivity among central San Andreas fault microearthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105, 1978–2012.
- Sevim, F., Zor, E., Açıkgöz, C., Tarancıoğlu, A. 2018. Ambient noise levels and characterization in Aegean region, Turkey. *J. Seismol.* 22, 499–518 <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9720-y>
- Schmittbuhl, J., Karabulut, H., Lengliné, O., Bouchon, M. 2016. Seismicity distribution and locking depth along the Main Marmara Fault, Turkey. *Geochem Geophys Geosyst* 17(3), 954–965.
- Strollo, A., Parolai, S., Jäckel, K.H., Marzorati, S., Bindi, D. 2008. Suitability of short-period sensors for retrieving reliable H/V peaks for frequencies less than 1 Hz. *Bulletin of the Seismological Society of America* 98(2), 671–681. doi: 10.1785/0120070055.



- Tüysüz, O., Barka, A., Yiğitbaş, E. 1998. Geology of the Saros graben and its implications for the evolution of the North Anatolian fault in the Ganos-Saros region, northwest Turkey. *Tectonophysics* 292, 105–126.
- Uçarkuş, G., Çakır, Z., Armijo, R. 2011. Western termination of the Mw 7.4, 1999 Izmit earthquake rupture: Implications for the expected large earthquake in the Sea of Marmara. *Turkish J. Earth Sci.* 20, 379–394.
- Wdowinski, S., Smith-Konter, B., Bock, Y., Sandwell, D. 2007. Diffuse interseismic deformation across the Pacific–North America plate boundary. *Geology* 35(4), 311-314.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F. 2013. Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, 94(45), p. 409–410. doi:10.1002/2013EO450001.
- Yalçınkaya, E., Bohnhoff, M., Görgün, E., Alp, H., Bentz, S., Pınar, A., Alver, F., Kılıçarslan, Ö., Tamtaş, B.D., Görgün, B. 2022. Ganos Fayı güncel deprem etkinliğinin değerlendirilmesi: MONGAN ağı test analizleri. *MTA Dergisi*, sunuldu.
- Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. 2011. Asymmetric distribution of aftershocks on large faults in California. *Geophysical Journal International* 185(3), 1288-1304.