



## Installation of microseismic monitoring networks in geothermal fields

Süleyman Tunç<sup>1\*</sup>, Burcu Selek<sup>2</sup>, Begüm Koca<sup>3</sup>, Ünal Salih Selek<sup>4</sup>, Kadir Balcı<sup>5</sup>, Ali Yıldırım<sup>5</sup>, Bülent Kaypak<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Sentez Earth and Structure Eng. Limited., Dragos Park Plaza, Maltepe, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden

<sup>3</sup>Department of Geophysical Engineering, Ankara University, Türkiye

<sup>4</sup>Mikroseismic Ltd. Sti., Hacettepe Teknokent, 06530, Ankara, Türkiye

<sup>5</sup>MASPO Energy San. and Tic. A.Ş., 45600, Manisa, Türkiye

### Highlights:

- Geothermal sites
- Microseismic events on geothermal sites
- Installation of microseismic monitoring networks

### Keywords:

- Passive Seismic
- Microseismic Monitoring
- Noise Analysis
- Geothermal Systems

### Article Info:

Research Article

Received: 05.01.2022

Accepted: 26.05.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1050313

### Correspondence:

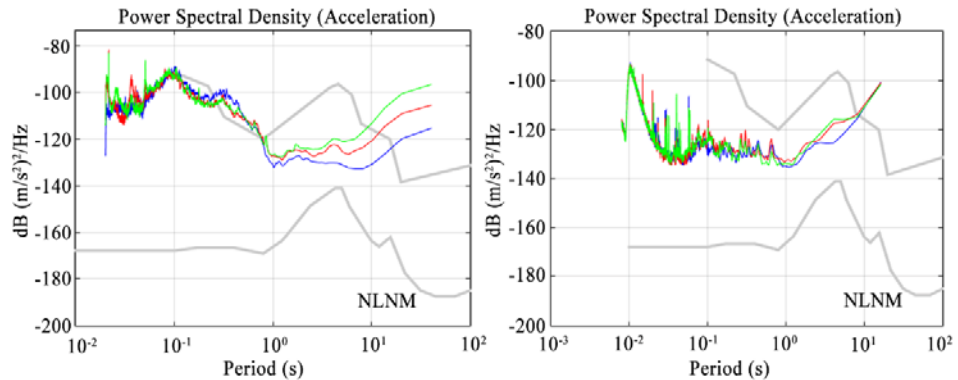
Author: Süleyman Tunç

e-mail: stunc@syy.com.tr

phone: +90 530 400 9794

### Graphical/Tabular Abstract

This study includes how the optimum microseismic monitoring network should be installed, the installation studies and the noise analysis of the station locations in the selected geothermal field. In the noise analysis (Figure A), the background noise was determined from both on the surface and through the well and the results were compared for station location. So, the noise level in the well is very low compared to the surface and this is at a suitable level for microseismic monitoring networks.



**Figure A.** The results of the noise analysis for microseismic monitoring in selected stations using surface broad band seismometer (left) and using well-type short period seismometer (right)

### Purpose:

How the optimum microseismic monitoring network should be installed for induced seismicity studies in selected geothermal area. So, noise analysis results are given in borehole and surface locations using different type of seismometers in selected locations.

### Theory and Methods:

In induced seismicity analysis, high frequency, low energy and small amplitude microseismic events are obtained within continuous passive seismic records. Noise analysis important step of the network installation before the data analysis and determining microseismic events. So, the background noise at the locations are compared from borehole and surface stations in same points.

### Results:

According to compared results, the noise level in the well is very low compared to the surface and this is at suitable level to obtain microseismic events clearly. So, borehole seismic sensors can be preferred in microseismic monitoring networks in induced seismicity studies.

### Conclusion:

Reservoir management is crucial subject for geothermal studies. So, microseismic monitoring method provides continues results about the geothermal reservoir and these results are used in the reservoir management. In fact, microseismic monitoring method is generally standard in abroad but there are no detailed studies in our country. This study is the first study to monitor microseismic activities using borehole seismometers. The study includes network installations and optimum array design also. Noise level must be low level to obtain microseismic events clearly. It can be provided using borehole seismometers in induced seismicity studies.



## Jeotermal sahalarda mikrosismik izleme ağlarının kurulumu

Süleyman Tunç<sup>1\*</sup>, Burcu Selek<sup>2</sup>, Begüm Koca<sup>3</sup>, Ünal Salih Selek<sup>4</sup>, Kadir Balcı<sup>5</sup>, Ali Yıldırım<sup>5</sup>, Bülent Kaypak<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Sentez Yer ve Yapı Müh. Tic. Ltd. Şti., Dragos Park Plaza, 34846, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Uppsala Üniversitesi, Yer Bilimleri Bölümü, Geocentrum, Villavägen 16, 752 36 Uppsala, İsveç

<sup>3</sup>Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>Hacettepe Teknokent, Mikrosismik Ltd. Şti., 06530, Ankara, Türkiye

<sup>5</sup>MASPO Enerji San. ve Tic. A.Ş., 45600, Manisa, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Jeotermal sahalarda
- Jeotermal sahalarda mikrosismik olaylar
- Mikrosismik olayları izleme ağlarının kurulumu

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.01.2022

Kabul: 26.05.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1050313

### Anahtar Kelimeler:

Pasif sismik,  
mikrosismik izleme,  
gürültü analizi,  
jeotermal sistemler

### ÖZ

Bu çalışma, Türkiye’de hali hazırda elektrik üretimi yapan jeotermal bir sahada, üretim ve re-enjeksiyon kuyuları sebebiyle oluşacak uyarılmış sismisiteyi izlemek üzere sahaya kurulması planlanan mikrosismik ağın özelliklerini ve kurulum aşamalarını kapsamaktadır. Çalışmada uygulaması yapılan bu ve benzer jeotermal sahalarda, optimum mikrosismik izleme ağı kurulumunun nasıl olması gerektiği, kurulum çalışmaları ve istasyon konumlarına ilişkin gürültü analizleri ile ilgili sonuçlar verilmiştir. 7 adet kuyu tipi sismometre 65 metre derinliğinde açılmış kuyulara yerleştirilerek, sahaya ilişkin mikrosismik kayıtlar elde edilmiştir. Arazi ekipmanlarının başında SARA-SS10BHV marka üç-bileşenli (3C) kuyu tipi kısa periyotlu hız sismometreleri gelmekte olup, analog veri 24-bit SL06 marka kayıtlar ile sayısallaştırılmıştır. Veri analizlerinde pasif sismik kayıtlar içerisinde yüksek frekanslı, düşük enerjili ve küçük genlikli mikrosismik olaylar ile ilgilenilmiştir. Bu nedenle ağ kurulumunun en önemli basamağını gürültü analizleri oluşturmuştur. Gürültü analizi çalışmalarında, mikrosismik ağ istasyonlarının yerleştirileceği konumlarda arka alan gürültüsü hem yüzey hem de kuyu içerisinden yapılan ölçümlerle belirlenmiş ve sonuçlar birbirleri karşılaştırılmıştır. Bunu sonuçlara göre kuyu içerisindeki gürültü seviyesinin yüzeye oranla çok düştüğü ve bunun mikrosismik izleme ağları için uygun bir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

## Installation of microseismic monitoring networks in geothermal fields

### HIGHLIGHTS

- Geothermal sites
- Microseismic events on geothermal sites
- Installation of microseismic monitoring networks

### Article Info

Research Article

Received: 05.01.2022

Accepted: 26.05.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1050313

### Keywords:

Passive seismic,  
microseismic monitoring,  
noise analysis,  
geothermal systems

### ABSTRACT

This study includes the properties and installation stages of the microseismic network planned to be installed in a geothermal field in Turkey, which is currently producing electricity, in order to monitor the induced seismicity that will occur due to production and re-injection wells. The results of how the optimum microseismic monitoring network should be installed, the installation studies and the noise analysis of the station locations are given for this and similar geothermal fields. 7 borehole type seismometers were placed in wells drilled 65 meters deep and microseismic records of the field were obtained. The leading field equipment is SARA-SS10BHV three-component (3C) borehole type short-period velocity seismometers, and the analog data were digitized with 24-bit SL06 brand recorders. In data analysis, high frequency, low energy and small amplitude microseismic events were dealt within passive seismic records. Therefore, noise analysis is the most important step of the network installation. In the noise analysis studies, the background noise at the locations where the microseismic network stations will be deployed was determined by measurements from both on the surface and through the well, and then the results were compared with each other. According to the results, it has been determined that the noise level in the well is very low compared to the surface and this is at a suitable level for microseismic monitoring networks.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*stunc@syy.com.tr, burcu.selek@mikrosismik.com, begum.koca@eng.ankara.edu.tr, unal.selek@mikrosismik.com, kbalci@maspo.com.tr, ali.yildirim@maspo.com.tr, bulent.kaypak@eng.ankara.edu.tr / Tel: +90 530 400 9794

## 1. Giriş (Introduction)

Jeotermal, ısıyı Dünya'nın içinden yüzeyine aktaran herhangi bir sistemi ifade eder. Susuz sıcak kayalar, jeotermal yapılarıdır [1]. Hidrotermal, ise jeotermalin bir alt kümesidir ve ısı transferinin, sıvı veya buhar halindeki suyu (bu nedenle "hidro" denilmektedir) içerdiği anlamına gelir [1]. Örneğin, kaplıcalar ve gayzerler hidrotermal özelliğe sahip sıcak sularlardır. Bunun yanı sıra jeotermal ve hidrotermal terimleri başka yayınlarda farklı şekillerde kullanılabilir.

Bir hidrotermal sistemin oluşabilmesi için üç bileşenin birlikte bulunması gereklidir. Bunlar; su, ısı ve suyun yeraltındaki akışını sağlayan kayaçların geçirgenliğidir (Şekil 1). Jeolojik olarak bunlar, birbiriyle ilişkili üç sistem olarak kavramsallaştırılır. Meteorik su veya yağış, kar erimesi, nehirler ve göller gibi yeryüzünden bir jeotermal sisteme giren su, hidrotermal akışkanların önemli bir bölümünü oluşturur. Suyun yer içerisine karıştığı beslenme (şarj) alanı, su boşalım (deşarj) alanından (onlarca kilometreye kadar) uzakta olabilir. Bazı sular birkaç kilometre derinliğe ulaşır. Volkanlarla ilgili sistemler söz konusu olduğunda, ısı kaynağı ya magmadır ya da yeryüzündeki derinlikle birlikte normal sıcaklık artışından kaynaklanan ısıdır. Kayalardaki çatlaklar (Şekil 1) genellikle geçirgenlik yaratır, ancak bazı sistemlerde birbirine bağlı gözenekler veya büyük boşluk yapıları, sıvıların akmasına izin verir. Bölgesel ve/veya yerel ölçekteki sismik hareketlilikler, hidrotermal sistemlerde zaman zaman bu çatlakların açılmasına veya kapanmasına yol açabilmektedir [1].

Diğer taraftan, gözeneklilik ve geçirgenlik parametreleri rezervuar koşullarına uymayan fakat sıcaklık koşullarını sağlayan jeolojik yapılarda jeotermal enerji üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Kızgın Kuru Kaya (Hot Dry Rock-HDR) olarak bilinen bu sistemler hidrolik çatlama [3-5] gibi teknik yöntemlerle geliştirilmiş jeotermal sistemler (Enhanced Geothermal System-EGS) olarak adlandırılan jeotermal sistemlere dönüştürülebilmektedir [6, 7].

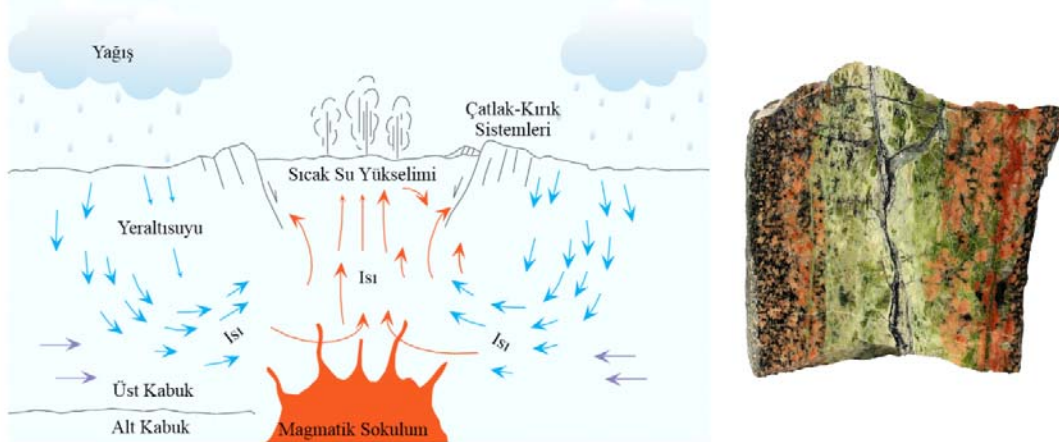
## 2. Jeotermal Sahalarda Mikrosismik İzleme (Microseismic Monitoring In Geothermal FIELDS)

Mikrosismik olaylar, doğal veya insan kaynaklı etkilerin jeolojik veya mühendislik yapı ve malzemeleri içerisinde neden olduğu gerilme değişimlerinin sonucu olarak kontrolsüz bir şekilde oluşan küçük ölçekli ( $-3.0 < M < 3.0$ ) sismik olaylardır [8]. Bir bölge veya ortam

içerisinde gözlenen mikrosismik olaylar, insan kaynaklı etkilere bağlı olarak bir zorlanma sonucu oluşuyor ise bunlar genellikle "uyarılmış mikrosismik olaylar" olarak adlandırılır. Bunlar, zamana bağlı olarak gerilme birikiminin kendiliğinden oluşmadığı ve dolayısı ile gelecekte de bir sismik olayın beklenmediği ortamlarda, sadece dış etkenlere bağlı olarak meydana gelen gerilme farklılıklarından kaynaklanan sismik olaylardır. Tıpkı depremler gibi, bir ortam içinde biriken elastik enerji kırılma ile birlikte aniden açığa çıkar ve bu enerji serbestleşmesi kaynağa yakın bölgelerde deformasyona yol açarken aynı zamanda sismik dalga olarak adlandırılan elastik dalgaların ortam içerisinde yayılmasını sağlar.

Mikrosismik izleme ise maden, jeotermal, petrol ve doğal gaz gibi birçok sahada sıklıkla kullanılmaktadır [8]. Jeotermal sahalarda mikrosismik olayların oluşmasına yol açan gerilme farklılıkları, yeraltında rezervuar niteliğindeki yapının akışkan yoluyla etkileşime geçmesi sonucu yer içerisindeki statik denge durumunun bozulması ile açıklanmaktadır. Mikrosismik olayların oluşumunda jeotermal faaliyetlerin yanı sıra yerel jeolojik ve tektonik yapı, yer içi basınç ve sıcaklığındaki değişimler gibi diğer faktörler de önemli roller oynamaktadır. Jeotermal bir sahada, mikrosismik verilerin kaydedilmesi ve konumlandırılması suretiyle yeraltındaki çatlak ve kırıklara dair yorumlar yapılabilmekte böylece suyun ilerlemesi, yeraltına basılan suyun hareketine dair sonuçlar elde edilebilmektedir. Suyun hangi derinliklere, hangi yöne ve kuyu ekseninden veya kuyu tabanından itibaren ne kadar uzaklığa gidebildiği bilinmek istenir. Mikrosismik olayların büyüklüğünün belirlenmesi ile çatlak boyutu hakkında fikir elde edilir. S/G oranı yüksek mikrosismik veriler için odak mekanizma çözümlerinin yapılması ile ise gerilme bileşenleri tayin edilir. Çalışma sahasında mikrosismik verilerin sayıca artması ile uygulanabilen sismik tomografi çalışmaları ile rezervuarın güncel durumu belirlenir, rezervuar ait 3-boyutlu (3-B) ve 4-boyutlu (4-B) haritalamalar yapılabilmektedir. Mikrosismik izlemenin ana amacı, rezervuarın iyileştirilmesi, geliştirilmesi ve yönetimi olarak sınıflandırılabilir.

Mikrosismik izleme yöntemlerinin ülkemizde jeotermal sahalarda detaylı bir şekilde yapılan uygulamaları maalesef oldukça sınırlıdır. Fakat dünyada yapılan uygulamalar oldukça çeşitlidir ve araştırmaya yönelik standart uygulamalar arasında yer almaktadır. Simiyu [9] çalışmasında, 1996'dan başlayarak jeotermal bir sahada network kurulması ile mikro depremler kaydedilmiştir. Kaydedilen depremlerin çoğunluğunun jeotermal sahanın merkezinde, açılan



**Şekil 1.** Hidrotermal sistemin şematik gösterimi ve hidrotermal sistemde akışkanın hareketine izin veren granit içerisindeki çatlak kırık yapısı [2].

(Schematic visualization of hydrothermal systems and fracture structure in the granite that allows the movement of the fluid in the hydrothermal system)

kuyulara yakın mesafede ve sıcaklığın yüksek olduğu bir konumda kaydedildiği gözlemlenmiştir. Sahadan uzaklaştıkça, sıcaklığın düştüğü alanlarda daha az sayıda deprem kaydedildiği görülmüştür. Düşük sıcaklıktaki alanda kaydedilen depremler yüksek büyüklükte ve daha derindedir. Çalışmanın vardığı bu sonuçla, kaydedilen mikrosismik olayların sayısı ve onların büyüklüğünün kayacın sıcaklığı ile ilişkili olduğu görülmüştür. Bu şekilde rezervuar sınırları belirlenebilmiştir. Asanuma vd. [10] çalışmasında; Avustralya Cooper Baseni jeotermal sahasında çalışmışlardır. 4 adet yüzey istasyonu ve 4 adet kuyu tipi istasyonu ile sismik network kurularak 3 hafta süreyle granit temele 20000 m<sup>3</sup> su enjeksiyonu sırasında oluşan yaklaşık 32000 sismik uyarılma izlenmiştir. Paramono ve Colombo [11] çalışmasında, Endonezya’da bir jeotermal sahada yapısal unsurları belirlemek, sıvı akışını takip etmek ve rezervuar sınırlarını belirlemek amaçlı olarak belli zaman aralıklarında enjeksiyon sırasında rezervuar dinleme yapılmıştır. Moment tensor analizi ve 3B sismik tomografi yöntemleri uygulanmıştır. Silitonga vd. [12] çalışmasında, Endonezya’ jeotermal bir sahada mikrosismik izleme ile çatlak uzanımının belirlenmesinde poisson oranı değişimine bakılmıştır. Charley vd. [13] çalışmasında Fransa’daki bir jeotermal sahada mikrosismik izleme yapılarak kaydedilen sismik olayların kullanılmasıyla sahanın Vp hız yapısı sismik tomografi yöntemi ile belirlenmiştir. Gritto ve Yoo [14] çalışmasında, California’nın kuzeyinde 1.6 GW elektrik üretme kapasitesine sahip dünyanın en büyük jeotermal rezervuarı olan Geysers rezervuarı için mikrosismik görüntüleme ile rezervuarın 4-B ile Vp/Vs oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Okamoto vd. [15] çalışmasında, Japonya’da bulunan jeotermal bir sahaya su enjeksiyonu yapılarak rezervuarın içinde suyun akışı mikro sismik yöntemlerle izlenmiştir. Kaydedilen sismik olaylar odak mekanizması çözümü yapılmış ve gerilme bileşenleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada, jeotermal kaynak kullanarak elektrik üretim yapılan bir sahada, sıcak suyun rezervuardan çekilimi (üretimi) ve re-enjeksiyon yöntemi ile yer içerisine geri basılması işlemleri sonucu rezervuar dolaylarında meydana gelen zorlanmış (induced) sismik olayların izlenmesi ve analiz edilmesi için söz konusu sahaya kuyu tipi sensörlerden oluşan bir sismik ağın kurulduğundaki aşamaların ve yöntemsel uygulamaların verilmesi amaçlanmıştır.

### 3. Mikrosismik İzleme Ağının Kurulumu (Installation of Microseismic Monitoring Network)

#### 3.1. Çalışma Sahası (The Study Area)

Çalışmanın yapıldığı jeotermal saha, Türkiye’nin önemli jeotermal alanlarından biri olan Gediz Grabeni’nde bulunmaktadır. Gediz Grabeni’nin yer aldığı bölge Neojen ve Kuvaterner boyunca dolgulanma, tektonik ve jeomorfoloji bakımından karmaşık bir evrim geçirmiştir. Gediz Grabeni stratigrafik, petrografik ve tektonik açıdan pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir [16-22]. Bölgedeki jeotermal kaynaklar, yüksek sıcaklık ve basınçtaki metamorfik kayalardan oluşmaktadır ve tektonizma ile şekillenmiştir. Çalışma sahasında iki adet jeotermal elektrik üretim santrali (10 MWth ve 30 MWth) bulunmaktadır. Santrallerin sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla derinlikleri 2250 ile 3668 metre arasında değişen 8 adet üretim kuyusu açılmış diğer taraftan kullanılan atık suyun yer içerisine pompalandığı derinlikleri 2102 ve 3176 metre arasında değişen 7 adet re-enjeksiyon kuyusu açılmıştır, (yayınlanmamış MASPO şirket raporları).

#### 3.2. Ağ Tasarım Çalışmaları (Network Design Studies)

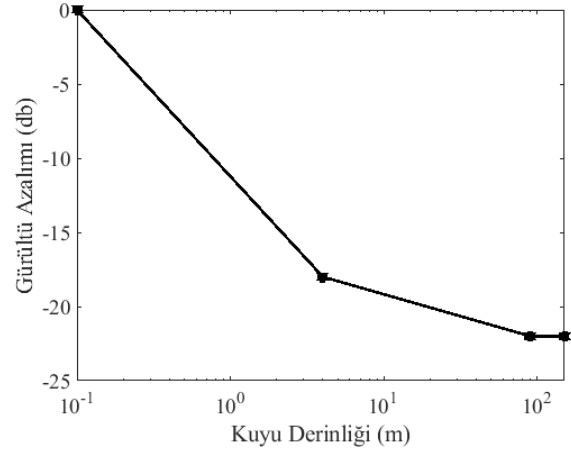
Çalışma sahasında üretim ve enjeksiyon kuyusu faaliyetlerine bağlı olarak bu bölgede meydana gelebilecek mikrosismik etkinliği izlemek amacıyla öncelikle harita üzerinde sismik algılayıcıların yerleşim

planlaması yapılmıştır. Bunun için sahada halihazırda çalışan kuyu bilgilerinin (kuyuların niteliği, üretim veya re-enjeksiyon), faaliyete alınma tarihleri, derinlikleri, yönlü olup olmadıkları, kuyu başı ve taban koordinatları gibi) bilinmesi oldukça önemlidir. Mevcut kuyu bilgilerine dayanarak saha için en ideal mikrosismik ağ tasarım planı oluşturulmaya çalışılmıştır. İstasyon konumlarının tamamı, üretim ve re-enjeksiyon kuyularına yakın olması nedeniyle kalın Kuvaterner yaşlı çökel birimler içerisinde yer almaktadır. Maden Tetkik Arama (MTA)’nın yapmış olduğu çalışmalara göre kalınlıkları 600 m’ye varan bu birimler çakıllı, killi seriler ile Holosen yaşlı oldukça gevşek tutturulmuş taraça, alüvyon yelpazesi ve alüvyonal katmanlardan oluşmaktadır.

Çalışma sahası ruhsat sınırını da gözeterek toplam 7 adet sismik algılayıcı; enjeksiyon kuyularını çevreleyerek, olayların ağ içinde kalabilmesini sağlamak ve azimutal boşluklara neden olmamak için dairesel bir dizilime yakın olacak şekilde planlanmıştır. Önce harita düzleminde yapılan ağ tasarımı sonrası belirlenen mikrosismik istasyon konumlarına gidilerek, arazi koşullarının kurulum için uygunluk derecesi belirlenmiş ve istasyon yerleşim hazırlıklarına başlanmıştır. Nihai belirlenen her konum için yüzey sensörleri kullanılarak arka plan gürültüsünü belirlemek amacıyla gürültü analizi yapılmıştır.

#### 3.3. İstasyon Kuyularının Hazırlanması (Preparation of Station Wells)

Mikrosismik izleme ağının yerleşim planı çalışmaları sonucunda belirlenen istasyon konumlarında yaklaşık 65 m derinliğinde kuyu açılması için sondaj çalışmaları yapılmıştır. Şekil 2’de 30 saniyelik periyoda sahip kuyu tipi sensörün derinliğe göre gürültü azalımı ilişkisi verilmiştir. Bu ilişkiye göre gürültü seviyesinin 90 m ve daha altındaki derinliklerde aynı kaldığı görülmektedir. Fakat bölgede yer altında bulunan yüksek basınçlı karbondioksit gazlarının varlığı nedeni güvenli seviyede kalmak için derinlikler 65 m’ye çekilmiştir.



**Şekil 2.** Derinliğin bir fonksiyonu olarak yatay doğrultulu gürültülerin sönümlenmesi, (Trnkoczy vd. [23]’den değiştirilmiştir). (Horizontal noise attenuation as a function of depth (Modified from Trnkoczy et al, [23]))

Sondaj kuyuları 8,5 inç genişliğinde delinerek, tabanı tapa ile kapatılmış 7 inç çapında metal boru ile 65 m derinliğe kadar borulanmıştır. Metal borular, su kaçağı ve iç yüzünde çapak oluşmayacak şekilde özenli bir şekilde kaynak yapılarak birbirlerine birleştirilmiştir. Borulama işlemlerinin ardından metal boru ile kuyu kenarı arası betonlanmış ve boru içi derinlikleri yaklaşık 62 m olarak kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3).



### 3.4. Algılayıcıların Yerleştirilmesi (Installation of the Sensors)

Hazırlanan mikrosismik gözlem noktalarına yerleştirilmek üzere SARA şirketi [24] tarafından üretilen (SS10BHV model) 1-50 Hz frekans aralığına sahip üç-bileşenli kuyu tipi sismik algılayıcılar kullanılmıştır. Bu algılayıcıların alet tepki fonksiyonu ve kalibrasyon bilgileri Şekil 4'de verilmiştir. Yaklaşık 2,8 kg ağırlığa sahip bu cihazların doğal frekansı 1,0 Hz olup, duyarlılık (sensitivity) değerleri 400 V/m/sn dir. Kuyu tipi bu algılayıcıların, düşeyde 8°'ye kadar, yatayda ise  $\pm 3^\circ$ 'lik bir eğim açısı aralığında çalışma toleransı bulunmaktadır.

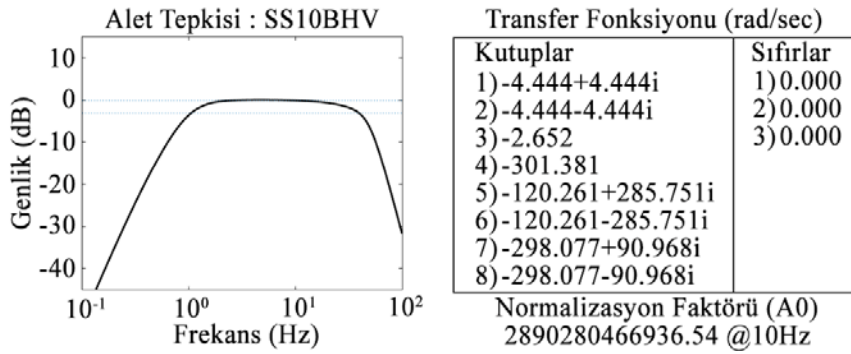
Verilerin sayısallaştırılması için 24 bit, 10-1500 Hz aralığında örnekleme kapasitesine sahip SL06 model sismik kayıtcı kullanılmıştır, (Şekil 5). Veri aktarımı için Ethernet ve RS232 bağlantı yoluna sahip bu sayısallaştırıcılar, zaman senkronizasyonu için gerçek zamanlı GPS antenleri kullanılmaktadır. Mikrosismik izleme ağının merkezi birime gerçek zamanlı veri aktarımı yapabilmesi için tüm sistem, elektrik şebekesinden bağımsız, güneş enerjisiyle beslenecek ve 4.5G modem ile çalışacak şekilde planlanmıştır.



Şekil 5. Mikrosismik gözlem istasyonlarında kullanılan kuyu tipi algılayıcı (sol panel) ve sayısallaştırıcı (sağ panel). (Borehole seismic sensor (left side) and digitizer (right side) used in microseismic monitoring )



Şekil 3. Mikrosismik gözlem istasyon kuyusunun şematik gösterimi (sol panel) ve kuyularının hazırlanması (orta ve sağ panel). (Schematic visualization of microseismic observation station well (left side) and preparing the wells (middle and right side))



Şekil 4. Sensör tepki fonksiyonu ve kutup ve sıfır değerleri (Sensor response function and pole-zero values)



**Şekil 6.** Kuyu içi durumunu belirlemek amacıyla yapılan kamera çekimlerine ait görüntüler. Kuyu ortası (sol panel) ve kuyu tabanına (sağ panel) ait örnekler.

(Camera images to determine the inside of the well. The examples of the middle of the well (left side) and the bottom of the well (right side))

İstasyonların kurulması dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Kamera ile kuyu kontrolü
- Eğim ölçer ile kuyu eğiminin tespiti
- Algılayıcının kuyuya indirilmesi
- İstasyon koruma betonunun yerleştirilerek, sistemin hazır hale getirilmesi

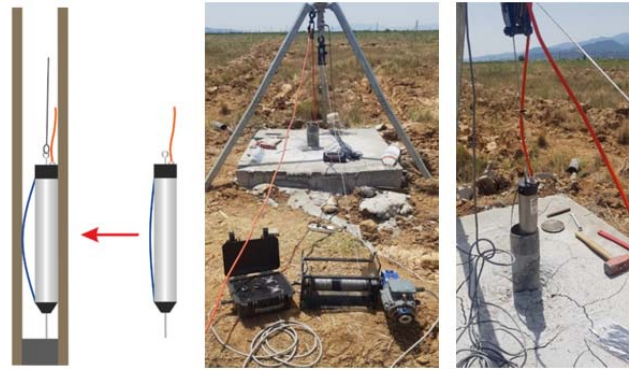
Kamera ile kuyu kontrolü, ayarlanabilir LED aydınlatmalı bir IP kameranın kuyu içine indirilmesi ile yapılmıştır, (Şekil 6). Bu işlem, kuyuların borulama ve betonlama işlemi sonrasında boruların iç kısmını görüntülemek, kuyu tabanında ve kaynak noktalarında su sızıntısı veya çapak olup olmadığını belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Daha sonra kuyu tipi eğim ölçer ile her 10 m’de bir eğim ölçülmüştür (Şekil 7). 7 adet kuyuda eğimler en fazla kuzey-güney yönlü  $3^\circ$  ve doğu-batı yönlü  $2^\circ$  olarak ölçülmüştür. Ölçülen eğim değerleri algılayıcının sınır değeri olan  $3^\circ$ ’den daha yüksek olmaması nedeniyle kuyular istasyon kurulumu için uygun kabul edilmiştir. Tüm kuyulara ait eğim değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Sensörlerin kuyu tabanında dik durmasını sağlayacak çelik yay donanımı ile derinlik kontrolleri yapılarak sensör ve veri aktarım kablosu çelik kablo yardımıyla kuyu içerisine yerleştirilmiştir, (Şekil 8). Algılayıcıları kuyu tabanına kontrollü indirebilmek için kuyu içi ekipmanın ağırlığı sürekli olarak ölçülmüştür. Bu sayede algılayıcının kuyuya sıkışma veya herhangi bir çöküntüye takılma durumu kontrol edilmiştir.



**Şekil 7.** Kuyu eğimini belirlemek amacıyla yapılan tiltmetre ölçümlerinden görüntüler.  
(Images of tiltmeter measurements to determine the slope of the well.)



**Şekil 8.** Algılayıcının kuyu tabanındaki yerleşik konumu (sol panel). Orta ve sağ panellerde algılayıcının kuyu içerisine yerleştirilme anındaki görüntüler.

(Location of the sensor at the bottom of the well (left side) and the images of installation of the sensor (middle and right side))

Sensör kuyu tabanına indirildikten sonra kuyu başı hazırlanarak, sensöre bağlı çelik halat, kuyunun ağzına sabitlenen bir saplamaya bağlanmıştır. Kuyunun başına açılan çentikten sensör kablosu çıkarılarak, kuyunun kapağı kapatılmıştır, (Şekil 9).

Son olarak, kuyu dışına yerleştirilecek sismometre kayıtçısı ve güç ekipmanlarının korunması ve dış ortamdan etkilenmemesi için kuyu başına  $1 \times 1 \times 0.5$  m ebatlarında betonla yapılmış hazır bir kabin yerleştirilmiştir. Kabin yerleştirildikten sonra istasyon içi hazırlanmıştır. Kapağın üzerine güneş panelleri monte edilmiş, kabloları koruma betonunun içine çekilmiştir, (Şekil 9). Ayrıca ısı yalıtımı sağlamak amacıyla kapak tarafında strafor köpük kullanılmıştır.

### 3.5. Algılayıcıların Yönlendirme Açılarının Belirlenmesi (Determining the Orientation Angles of the Sensors)

Üç bileşenli kuyu tipi sismik algılayıcıların veri kaydına başlamadan önce yatay bileşenlerden birinin, ki bu K-G doğrultulu bileşen olmaktadır, coğrafik kuzeye yönlendirilerek yerleştirilmesi gerekmektedir. Böylece harita düzlemine göre konumu ve yönü belirlenmiş olmaktadır. Eğer bu yönlendirme yapılmamışsa, en azından coğrafi kuzeyden ne kadarlık bir sapma açısına sahip olduğu bilinmelidir. Bu açı değeri kullanılarak, gerekli bağımlılar yardımıyla yatay bileşenlerdeki verinin coğrafik yönlere yönlendirilmesi matematiksel olarak yapılabilir.

Bu yönlendirme işlemi yüzey sismometreleri için kolay iken kuyu içi olanlarda biraz daha zordur. Algılayıcı kuyu içerisine inerken ister





**Şekil 9.** Kuyu başı ve sensör kablosu (üst sol); kuyu başına beton kabinin yerleştirilmesi (üst sağ); kabin içi ekipman (alt sol); istasyona elektrik sağlayan güneş paneli (alt sağ) (Wellhead and sensor cable (above-left), installation the cabin at the well head (above-right), equipments in the cabin (below-left), solar panel for the station which is provided power ( below-right) )

istememez dönerek ilerlemektedir. Bu da yatay bileşenlerin rastgele bir şekilde yönelmesine neden olmaktadır. Eğer bu yönlendirmeyi kuyu içerisinde fiziksel olarak yapabilecek bir ekipman yoksa alternatif yöntemlerle kuzeyden ne kadarlık bir açı ile sapma gösterdiğini hesap etmek mümkündür. Bunun için ya ağırlık düşürme, patlama gibi konumu belli bir yapay sismik kaynak kullanılmalı ya da istasyona yakın bir noktada meydana gelmiş, genlikleri belirgin, temiz bir deprem kaydı kullanılmalıdır.

Çalışma yapılan sahada algılayıcıları kuyu içerisinde fiziksel olarak kuzeye yönlendiren bir sistem olmadığından, alternatif olarak her bir algılayıcının sapma açısı hesaplanmıştır. Bunun için aşağıda bilgileri yazılı, 19.07.2021 tarihinde Armutlu-Aydın'da meydana gelen M=3.9 büyüklüğündeki depremin mikrosismik izleme ağı tarafından kaydedilen verisi kullanılmıştır (Şekil 10).

Tarih	Saat	Enlem	Boylam	Derinlik	Büyükük	Yer
19.07.2021	13:13:00	37.8223	27.9672	6.7 km	M=3.9	Armutlu-Aydın

Kuyu içerisindeki algılayıcıların, coğrafik kuzeyden ne kadarlık bir açı ile sapma gösterdiklerini hesaplayabilmek için, seçilen depremin her bir istasyondaki P- ve S- fazlarının varış zamanları ve P fazının ilk geliş genlik değerleri okunmuştur.

Şekil 10'dan okunan P dalgasının genlikleri, Şekil 11'de gösterilen  $\tan \varphi_1 = A_D / A_K$  ve eğer düşey bileşenin ilk hareketi aşağıya ise  $\varphi = \varphi_1$ , yukarı ise bu durumda da  $\varphi = \varphi_1 + 180 = \varphi_2$ . yöntem uygulanarak, geliş açıları ve bu açıların var olan deprem konumu ile arasındaki açı hesaplanmıştır [25].

Şekil 12'de coğrafik kuzeyden sapma açıları ile algılayıcıların referans olarak kullanılacak depreme olan uzaklıklarını hesaplamaya yönelik oluşturulan harita ve kayıtlar görülmektedir. Eş. 1 ve Eş. 2 kullanılarak yönlendirilmiş bileşenler hesaplanmış ve yapılan hesaplamaların doğruluğu Şekil 13'de gösterilmiştir. Her bir algılayıcının kuyu içerisindeki sabit durumunun coğrafik kuzeyle yapmış olduğu azimut açıları (sapma açıları) Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, sahaya kurulmuş olan mikrosismik izleme ağının ve bu ağ ile belirlenen mikrosismik olayların konumları Şekil 14'de görülmektedir.

$$\text{Düzeltilmiş } X = \text{STREAM}_{E2} * \cos(90^\circ) + \text{STREAM}_{N2} * \sin(90^\circ) \quad (1)$$

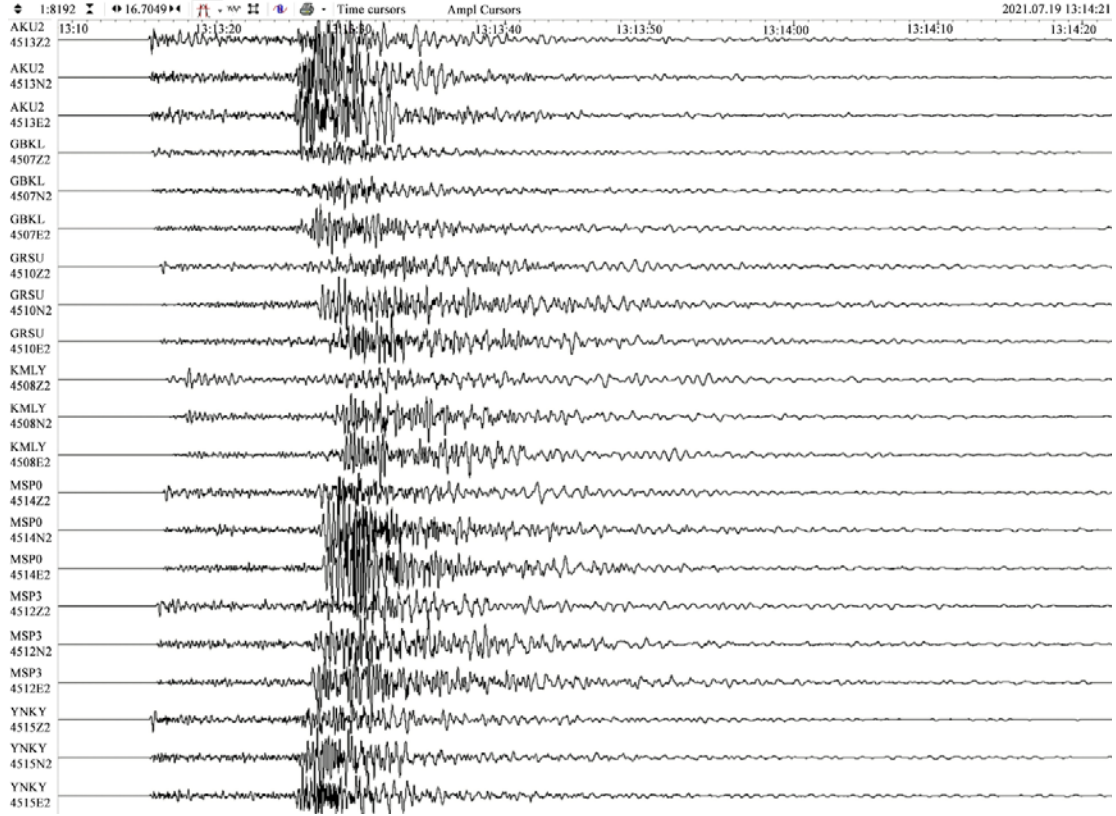
$$\text{Düzeltilmiş } Y = -1 * \text{STREAM}_{E2} * \sin(90^\circ) + \text{STREAM}_{N2} * \cos(90^\circ) \quad (2)$$

### 3.6. İstasyonların Gürültü Analizi (Noise Analysis of the Stations)

Genellikle bir bölgedeki sismik hareketliliği izlemek üzere kurulacak istasyon noktalarının arka alan gürültü seviyesinin önceden kontrol edilmesinin sonucunda istasyon yeri için gürültü seviyesi düşük uygun bir yer tespiti sağlanacaktır. Böylece bu gürültünün düşük olduğu yerlerde daha küçük sismik olayları gözlemlemek mümkün olacaktır. Mikrosismik izleme yöntemlerinde çoğunlukla kaydedilmek istenen veri, enerjileri düşük, yüksek frekanslı, küçük genlikli ve çok hızlı sönümlenen sismik olaylardır. Böylesine çok küçük boyutlardaki sismik etkinliği belirgin bir şekilde gözlemlemek oldukça önemlidir. Çünkü sahanın, doğal (rüzgar, deniz dalgası, doğal depremler, gel-git'ler, vb) ve kültürel (trafik, endüstriyel hareketler, yapay patlatmalar, vb) kaynaklı etkilere bağlı arka alan gürültüsü, sismogramlar üzerinde çoğunlukla olumsuz etki yaratmaktadır. Arka alan gürültüsünün çok fazla olması durumunda bu titreşimler genellikle sismik olayların üzerini örtük olarak sinyallerin ayırt edilmesini güçleştirir. Bu nedenle kayıt istasyonlarının yerleştirileceği konumların seçimi oldukça önemlidir.

Gürültü verilerinin analizi, Peterson modelleri baz alınarak yapılmıştır [26]. Elde edilen güç yoğunluğu gürültü modelleri, arka plan gürültüsü düşük istasyonlardaki verilerden elde edilen güç yoğunluğu spektrumları ile arka plan gürültüsü yüksek istasyonlardaki verilerden elde edilen güç yoğunluğu spektrumlarının üst üste çizdirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu modellere göre, dB (desibel) cinsinden NHNM (NewHighNoiseModel) ve NLNM (NewLowNoiseModel) olarak iki genlik sınırı belirlenmiştir. Bu sınırlar ilgili frekans (veya periyod) aralığındaki verinin gürültü seviyesini vermektedir. Eğer ölçülen verinin güç spektrumu yoğunluğu (PSD-power spectral density) bu bant içerisinde kalıyorsa bölgenin veya noktanın gürültüsüz olduğu, belirli frekanslarda NHNM sınırı aşıyorsa ise o frekans veya frekans bantı için bölge veya noktanın gürültülü olduğu söylenebilmektedir.

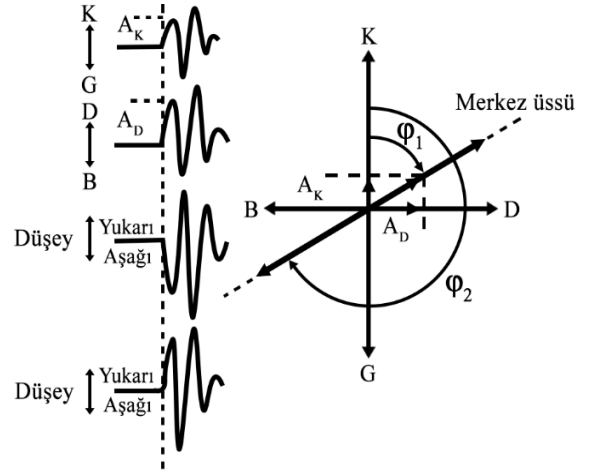
Bu kapsamda, çalışma sahasında mikrosismik izleme ağı için belirlenen istasyon konumlarında kurulum öncesi ve sonrası olmak üzere iki ayrı gürültü analizi yapılmıştır. Yüzeysel yapılan ölçümlerde, geniş-bantlı ve üç bileşenli Güralp CMG-6TD [27] sismometre kullanılmıştır. Her bir ölçü noktasında yaklaşık 30 dakikalık ölçüm yapılmıştır. Gündüz öğle saatlerinde başlayan ölçümler gece 22:00'de sona ermiştir. Mikrosismik izleme ağına ait ikinci gürültü analizi ise istasyonların kurulumundan sonraki herhangi bir zaman diliminde gerçekleştirilmiş ve gürültü kayıtları kuyu tipi algılayıcılar kullanılarak yine 30 dakikalık kayıtlar şeklinde kaydedilmiştir. İki ölçüm arasında iki temel farklılık bulunmaktadır.



**Şekil 10.** 19.07.2021 tarihinde Armutlu-Aydın’da meydana gelen M=3.9 büyüklüğündeki depreme ait üç bileşen veri kaydı (Three-component data records of the M=3.9 earthquake that occurred in Armutlu-Aydın on 19.07.2021.)

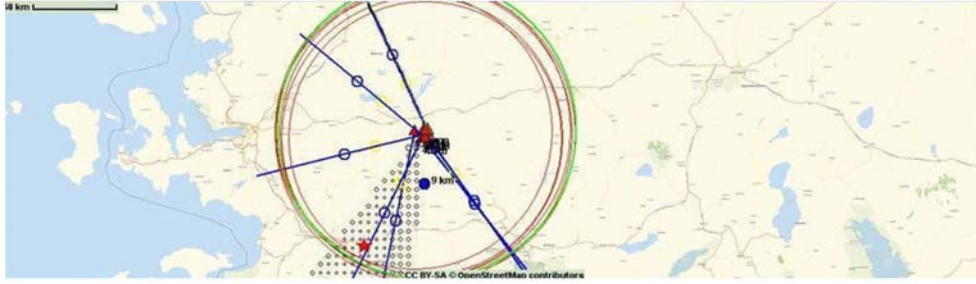
Biris ölçüm aletlerinin farklı olması, diğeri ise ölçüm derinlikleridir. Ancak bu farklılık, alet kalibrasyon bilgisinin veri üzerinden atılması ve gerçek arka alan gürültülerinin elde edilmesi ile giderilmiştir. Geriye derinlik farkı kalmıştır ki o da hangi seviyenin daha gürültülü veya gürültüsüz olduğu ayrımını verecektir. Şekil 15’de her bir istasyon noktasının hem yüzeyde hem de mevcut 62 m derinlikte gürültü analiz sonuçları görülmektedir. Her bir istasyon için ilk sütun yüzeyden yapılan ölçüm sonucunu, son sütun ise derinde kaydedilen arka alan gürültü analiz sonucunu göstermektedir. Mikrosismik izleme çalışmalarında amaç yüksek frekanslı, küçük genlikli olayları yakalamak olduğundan, elde edilen verinin 1 Hz ve üzeri frekans veya 1 sn ve altı periyot bandı ile ilgilenilmektedir. Tüm istasyon noktalarında yüzeyden yapılan gürültü analizi sonuçlarına göre 1 Hz ve üstü frekanslarda (1 sn ve altı periyotlarda) desibel (dB) cinsinden genliklerin NHNM sınırına yakın seyrettiği görülmektedir, (Şekil 15). Bu da istasyonların yüzey gürültülerinin çok fazla olduğunu göstermektedir. Kurulu kısa periyotlu algılayıcılar ile 62 metre derinden yapılan gürültü analizi sonuçları incelendiğinde ise yüzeye oranla gürültülerin en az 30 kat daha düşük olduğu hesaplanmıştır. Bu da algılayıcıların bulunduğu noktaların yüzeye göre gürültüleri önemli ölçüde bertaraf ettiği anlaşılmaktadır. İstasyonların gürültü seviyeleri kendi aralarında karşılaştırıldığında, GRSU ve MSP2 istasyonlarının diğerlerine oranla daha yüksek bir gürültü seviyesi olduğu tespit edilmiştir. Bunun da ana nedeni her iki istasyonun Manisa-Denizli karayoluna yakın bir nokta olduğudur. Ayrıca, GRSU istasyonunun bulunduğu nokta eski bir göl havzası niteliğinde çökel bir istif yapısının hâkim olduğu bir yapıya sahiptir. Bu da ister istemez genliklerin katlanarak büyümesine yol açmaktadır. Üretim sahasına, yerleşim yerlerine ve ulaşım hatlarına olan uzaklıklarından dolayı gürültü seviyesi en düşük istasyonlar KMLY ve YNKY’dir.

Şekil 15-21 Mikrosismik izleme ağına ait istasyonların, kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol taraf) ve kurulum sonrası kuyu içerisinden kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ taraf) sonuçları gösterilmektedir.

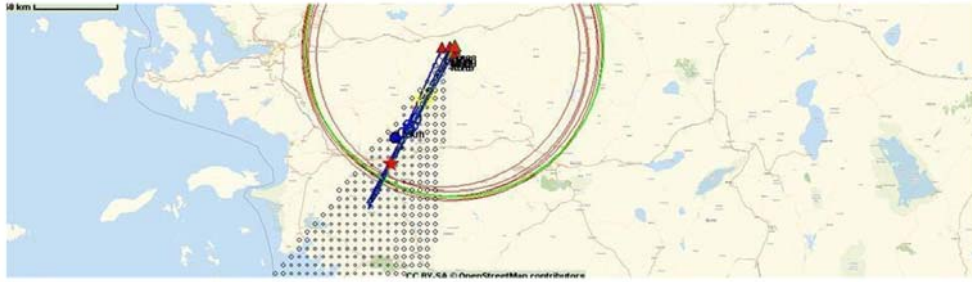


**Şekil 11.** Algılayıcıların kuzeye yönlendirilmesi amacıyla kullanılacak sapma açılarının hesabı için belirlenen 19.07.2021 günü saat 13:13:00 (UTM)’de meydana gelmiş Armutlu-Aydın depreminin sayısal kaydına ait P dalgasının ilk genliklerinden geliş açısı hesaplanması (Back azimuth yöntemi) (Calculation of the angle of incidence of the P wave from the first amplitudes of the record of the Armutlu-Aydın earthquake, which occurred at 13:13:00 (UTM) on 19.07.2021. (Back azimuth method))

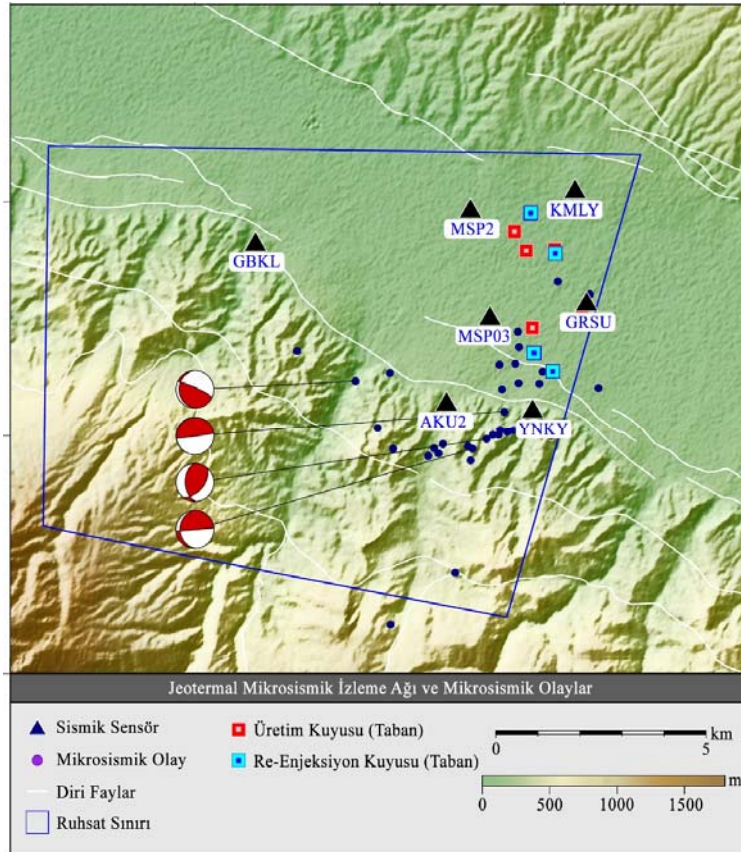




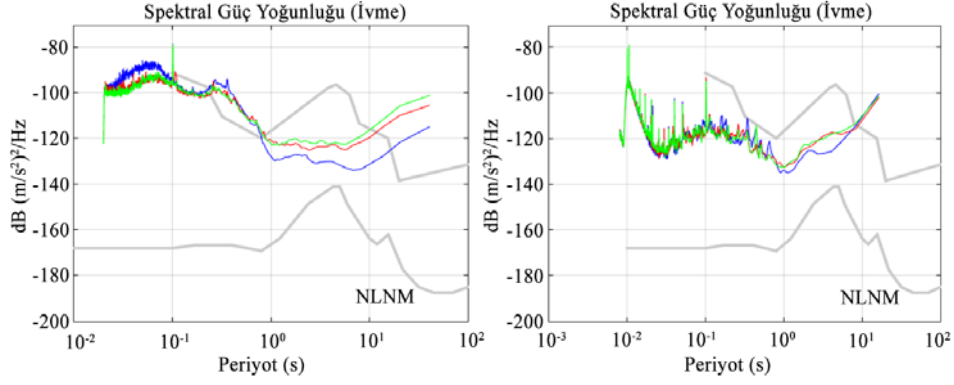
Şekil 12. Back Azimuth yöntemi ile hesaplanmış geliş açıları (Calculated arrival angles using back azimuth method.)



Şekil 13. Her bir algılayıcı için belirlenen sapma açısı ile koordinatlarının düzeltildikten sonra deprem konumu ile çakıştırılması. (Matching between determined deviation angle and the corrected earthquake location for each sensor.)



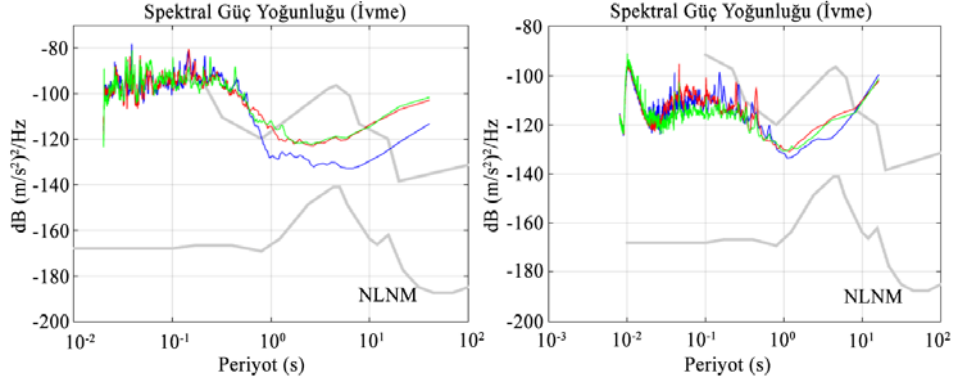
Şekil 14. Jeotermal sahadaki mikrosismik izleme ağına ait istasyonların (üçgenler), üretim ve re-enjeksiyon kuyularının (kareler), ve mikrosismik olayların (daireler) konumları. Ayrıca, bazı olaylara ait odak mekanizması çözümleri. (Locations of stations (triangles) of the microseismic monitoring network, production and re-injection wells (squares), and microseismic events (circles) in the geothermal field. Also, focal mechanism solutions for some events)



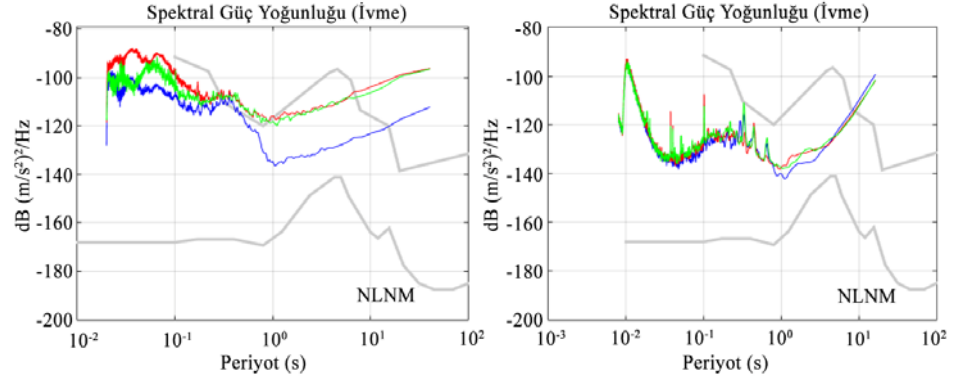
**Şekil 15.** MSP3 istasyonuna ait kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol) ve kurulum sonrası kuyu içerisinden kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ) sonuçları.  
(The results of the noise analysis for MSP3 station using surface broad band seismometer (left) and using borehole short period seismometer (right))

**Tablo 1.** Mikrosismik izleme ağı istasyonlarına ait bilgiler. (The informations of microseismic monitoring network stations.)

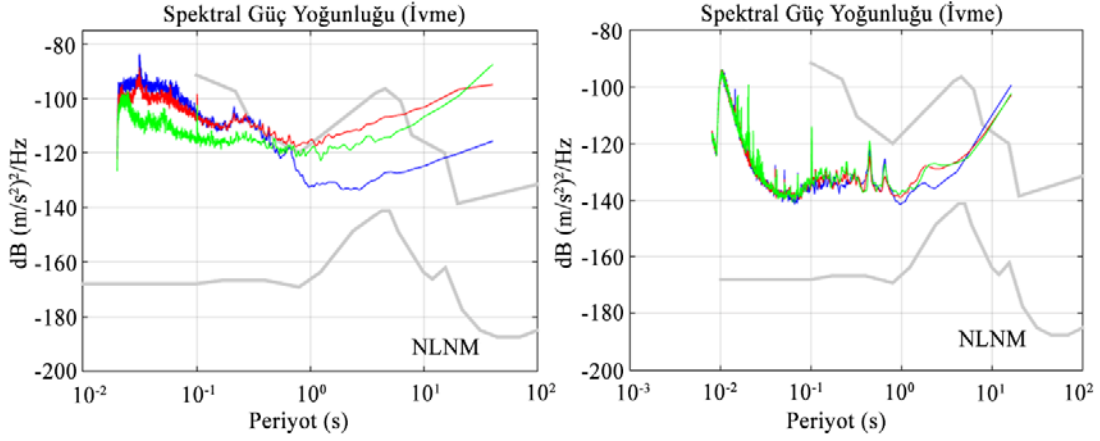
İstasyon Kodu	Seri No	Enlem	Boylam	Eğim Y	Eğim X	Azimut Sapma Açısı	Kuyu İçi Sıcaklık (°C)
MSP3	4512	38.425107	28.379932	1.9°	1.8°	1.5°	43,0
MSP2	4514	38.447955	28.374645	0.8°	0.7°	64.0°	38,4
GRSU	4510	38.428105	28.406108	1.7°	0.3°	-47.0°	39,4
YNKY	4515	38.405225	28.391487	3.0°	0.6°	-100.0°	45,5
KMLY	4508	38.452073	28.402977	0.2°	0.6°	-127.0°	43,4
GBKL	4507	38.440843	28.316397	0.3°	0.4°	12.0°	38,7
AKU2	4513	38.406790	28.368147	1.1°	2.0°	67.0°	34,7



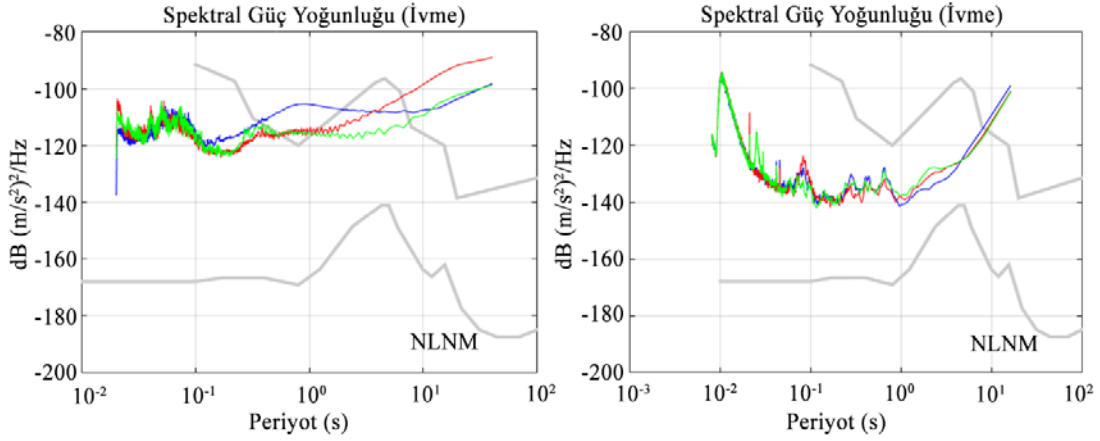
**Şekil 16.** GRSU istasyonuna ait kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol) ve kurulum sonrası kuyu içerisinden kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ) sonuçları.  
(The results of the noise analysis for GRSU station using surface broad band seismometer (left) and using borehole short period seismometer (right))



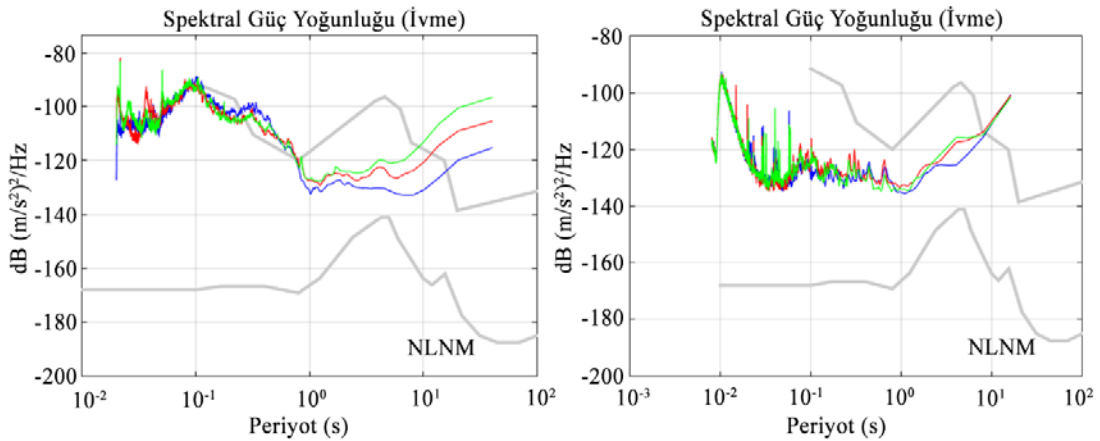
**Şekil 17.** YKNY istasyonuna ait kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol) ve kurulum sonrası kuyu içerisinden kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ) sonuçları.  
(The results of the noise analysis for YKNY station using surface broad band seismometer (left) and using borehole short period seismometer (right))



**Şekil 18.** AKU2 istasyonuna ait kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol) ve kurulum sonrası kuyu içerisinde kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ) sonuçları.  
(The results of the noise analysis for AKU2 station using surface broad band seismometer (left) and using borehole short period seismometer (right))

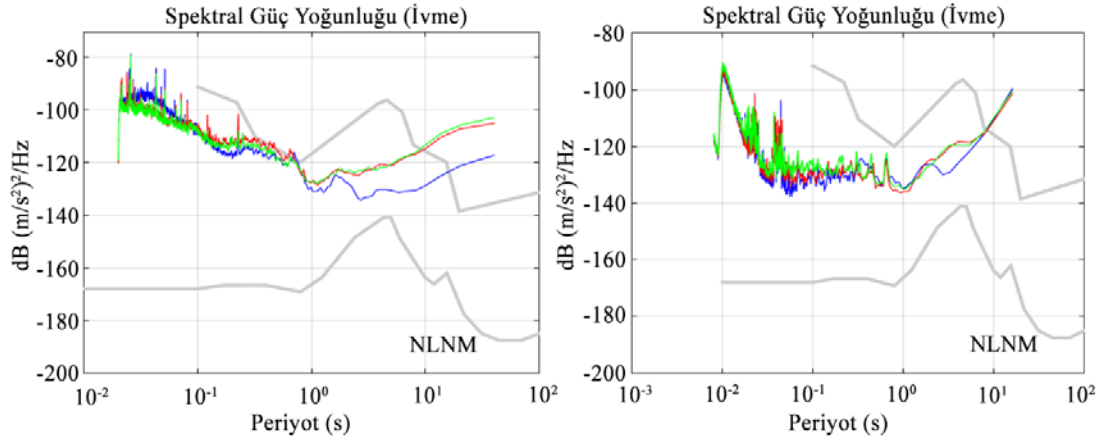


**Şekil 19.** GBKL istasyonuna ait kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol) ve kurulum sonrası kuyu içerisinde kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ) sonuçları.  
(The results of the noise analysis for GBKL station using surface broad band seismometer (left) and using borehole short period seismometer (right))



**Şekil 20.** MSP2 istasyonuna ait kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol) ve kurulum sonrası kuyu içerisinde kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ) sonuçları.  
(The results of the noise analysis for MSP2 station using surface broad band seismometer (left) and using borehole short period seismometer (right))





**Şekil 21.** KMLY istasyonuna ait kurulum öncesi yüzeyden genişbant sismometre ile yapılan gürültü analizi (sol) ve kurulum sonrası kuyu içerisinde kısa periyotlu sismometre ile yapılan gürültü analizi (sağ) sonuçları.

(The results of the noise analysis for KMLY station using surface broad band seismometer (left) and using borehole short period seismometer (right))

#### 4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Ülkemiz jeotermal kaynakları dünyadaki ülkeler arasında karşılaştırıldığında oldukça önemli bir rezerve sahiptir. Dolayısıyla gelecekte hidrokarbon enerji kaynaklarının rezervleri azalacağından, enerji endüstrisinin zamanla yenilenebilir enerji kaynakları üzerinden karşılanacağı düşünüldüğünde, jeotermal rezervuarların rezervuar yönetiminin sağlıklı ve bilinçli bir şekilde kullanımı önem arz etmektedir. Rezervuar yönetimi konusunda en etkili yöntem, rezervuarların sürekli olarak izlenebilmesini sağlayan mikrosismik izleme yöntemidir. Dünyada söz konusu bu yöntemin çok fazla uygulaması olması ve neredeyse standart uygulamalar haline gelmiş olmasına rağmen ülkemizde yeterince bilinmemekte ve uygulamalı örnekleri oldukça sınırlıdır.

Bu çalışma, ülkemizde jeotermal kaynak ile elektrik üretim yapılan bir sahada kuyu tipi algılayıcılar kullanılarak, anlık veri aktarımı yapılan ilk mikrosismik izleme çalışmasıdır. Bu sebeple istasyonların kurulumu ve ağ tasarımı açısından örnek bir çalışma niteliğindedir. Ağ tasarımından, veri aktarımına kadar bir mikrosismik izleme ağının kurulumundaki önemli hususlar verilmiştir. Özellikle, mikrosismik çalışmalarda küçük magnitüdü, yüksek frekans içeriğine sahip ve küçük genlikli mikrosismik olayların belirlenmesi ve bunlara ait bir veri-işlem tekniklerinin uygulanması nedeniyle verilerin içerdiği arka alan gürültüsünün olabildiğince en aza indirilmesi önemlidir. İstasyonların kurulumundan önce yüzeyde ve kurulumu yapıldıktan sonra kuyu tabanında yapılan ölçümlerden, çevresel gürültülerin etkisinin kuyu tipi kurulumla nasıl en aza indirildiği saptanmıştır. Ayrıca, algılayıcıların kuyu içerisine indirildikten sonra eğim açılarının ve kuzeyden olan sapma açılarının hesaplanarak, veri işlem aşamalarında uygulanacak düzeltme değerleri belirlenmiştir.

Mikrosismik ağın kurulmasıyla birlikte sahadan veriler elde edilmiş ve ilk günlere ait mikrosismik olayların konumları saptanmıştır. Bu olayların çoğunlukla sahadaki re-enjeksiyon kuyuları dolayında yer aldığı ve bunun da kuyulardan yer içine basılan suyun etkisinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca, bu olaylardan birkaçına ait odak mekanizması çözümleri de elde edilmiştir. Az sayıdaki çözümden sahaya ilişkin genel bir yorum yapmak güç olsa bu çözümler ağırlıklı olarak ters faylanma karakteri göstermektedir. Çalışmanın ilk aşamasına ait veriler sahanın modellenmesi açısından henüz yeterli düzeyde değildir. İlerleyen dönemlerde çok sayıda veri ile yapılacak analizlerle sahanın çok daha iyi modelleneceği düşünülmektedir

#### Kaynaklar (References)

1. Heasler, H. P., Jaworowski, C., and Foley, D., Geothermal systems and monitoring hydrothermal features. In R. Young, L. Norby (Eds.), Geological Monitoring,. Boulder: Geological Society of America Inc., 105-140, 2009.
2. WordPress & Atahualpa, <https://www.sandatlas.org/>, Erişim Tarihi December, 2021.
3. Brown S. R. and Bruhn R.L., Fluid permeability of deformable fracture networks, Journal of Geophysical Research, 103, 2489-2500, 1998.
4. Dusseault M.B., McLennan J. and Shu J., Massive multi-stage hydraulic fracturing for oil and gas recovery from low mobility reservoirs in China, Petroleum Drilling Techniques 39 (3), 6-16, 2011.
5. Maxwell S. C., Cipolla C., What Does Microseismicity Tell Us About Hydraulic Fracturing, ISBN:978-1-61399-147-3, 2014.
6. Kraft, T., Mai, P. M., Wiemer, S., Deichmann, N., Ripperger, J., Kästli, P., Bachmann, C., Fäh, D., Wössner, J., and Giardini, D., Enhanced Geothermal Systems: Mitigating Risk in Urban Areas, EOS Transactions American Geophysical Union, 90 (32), 273-280, 2009.
7. Breede K., Dzebisashvili K., Liu X., Falcone G., A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present, and future, Geothermal Energy, 2013
8. Kaypak, B., Aldaş, G. G. U., Mikrosismik izleme yöntemleri. MT Bilimsel, (1), 1-12,2012.
9. Simiyu, S. M., Status of geothermal exploration in Kenya and future plans for its development. Paper presented at the Proceedings world geothermal congress, 2010.
10. Asanuma, H., Izumi T., Niitsuma H., Jones R. and Baria R., Development of coherence collapsing method and its application to microseismicity collected at Soultz, Trans. Geothermal Resources Council, 27, 349-353, 2004
11. Paramono B. and Colombo D., Microearthquake Characteristics in Darajat Geothermal Field, Indonesia, Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
12. Silitonga T.H., Siahaan E.E., Suroso S., Proc. World Geothermal Congress (Antalya), 1-10, 2005.
13. Charléty, J., Cuenot N., Dorbath L., Dorbath C., Haessler H.& Frogneux M., Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forêts. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44, 1091–1105, 2005.
14. Gritto R., Yoo S.H., Seismic Imaging of Structural Features and Temporal Changes in a Geothermal Reservoir, SEG Denver Annual Meeting, 2014.
15. Okamoto K., Asanuma H., Okabe T., Abe Y. and Tsuzuki M., Estimation of water flow in geothermal field inferred from microseismic events, Proceedings of the 13th SEGJ International Symposium, Japan, 249-252,2018.
16. Erdoğan B. ve Güngör T., Menderes Masifi' in Kuzey Kanadının Stratigrafisi ve Tektonik Evrimi. TPJD Bül, 4, 9-34,1992.
17. Hetzel, R., The Alpine tectono-metamorphic evolution of the Menderes Massif, southwestern Turkey, Ph.D. thesis, Johannes Gutenberg Universität Mainz, 79 ,1995.

18. Emre T., Gediz grabeninin tektonik evrimi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 39,1996.
19. Seyitoğlu G. ve Scott B.C., The age of Alaşehir graben (west Turkey) and its tectonic implications. Geological Journal, 31, 1-11, 1996.
20. Dora O., Candan O., Dürr S., Oberhansli R., New evidence on the geotectonic evolution of the Menderes Massif. Proc International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region, İzmir-Güllük, Turkey, 53–72,1997
21. Seyitoğlu G., Anderson D., Nowell G., Scott B.C., The evolution from Miocene potassic to Quarternary sodic magmatism in Western Turkey: implication for enrichment processes in the lithospheric mantle. J Volcanol Geotherm Res, 76, 127–147, 1997.
22. Seyitoğlu G., Çemen İ., ve Tekeli İ., Extensional folding in the Alasehir (Gediz) Graben, western Turkey. J. Geol. Soc. London, 157, 1097–1100, 2000.
23. Trnkoczy, A., Bormann, P., Hanka, W., Holcomb L. G. and Nigbor, R. L., Chapter 7: Site Selection, Preparation and Installation of Seismic Stations, DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP\_r1\_ch7,2002.
24. Sara electronic instruments s.r.l, <https://www.sara.pg.it/>, Erişim Tarihi, Aralık 2021.
25. Tunç B., Tunç S., Çaka D., Practical local magnitude calculation for local networks, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 3-7 December, 2012.
26. Peterson J., Observations and modelling of seismic background noise. U.S. Department of Interior Geological Survey, Open-File Report 93-322, 1993.
27. Güralp Systems Ltd., <https://www.guralp.com/>, Erişim Tarihi, December,2021.

