

Borehole Seismometer Network: Example of GONAF Project

Recai Feyiz Kartal ¹, Filiz Tuba Kadirioglu ¹, Tugbay Kilic ¹

¹ Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Earthquake Department, 06800 Ankara, Türkiye

Keywords

Borehole Seismometer Network, Microseismic earthquake activity, GONAF Project

Highlights

- * Borehole Seismometer Earthquake Observation Network
- * GONAF Project
- * Microseismic earthquake activity

Aim

Installation and objectives of borehole earthquake observation stations

Location

The Eastern Sea of Marmara

Methods

Borehole station installation and data evaluation

Results

Minus magnitude events calculated based on the signal quality of the borehole stations

Supporting Institutions

Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD)

Financial Disclosure:

The authors declared that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest:

The authors have no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 18.03.2025

Revised: 15.05.2025

Accepted: 15.05.2025

Printed: 30.08.2025

DOI

10.46464/tdad.1660221



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

Corresponding Author

Recai Feyiz Kartal

Email: rfkartal@gmail.com

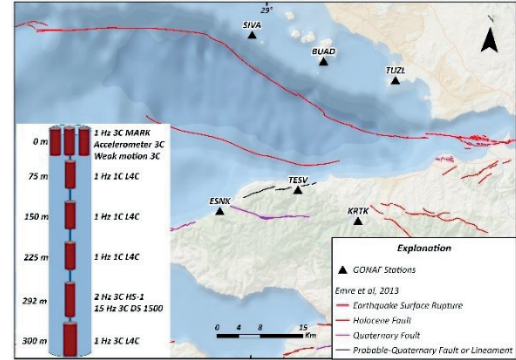


Figure
Distribution of the borehole stations within the scope of GONAF Project

How to cite:

Kartal R.F., Kadirioglu F.T., Kilic T., 2025. Borehole Seismometer Network: Example of GONAF Project, Turk Deprem Arastirma Dergisi 7(2), 335-345, DOI:10.46464/tdad.1660221.

Derin Kuyu Sismometre Ağı: GONAF Projesi Örneği

Recai Feyiz Kartal ¹, Filiz Tuba Kadirioglu ¹, Tuğbay Kılıç ¹

¹ Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi, 06800 Ankara, Türkiye

ÖZET

Dünyadaki en önemli afetlerden biri olan depremler nedeniyle büyük oranlarda can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Bu nedenle, depremlerin tahmin edilmesi, deprem nedeni ile oluşabilecek can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi gibi birçok disiplinde çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Deprem aktivitelerinin gözlenmesi amacıyla kullanılan geniş bant veya kısa periyot sismometrelerin fay segmentleri boyunca yerleştirilmesi ile kaydedilen depremlerin büyüklük eşiği düşürülmüştür. Bunun yanı sıra sondaj kuyularına yerleştirilen derin kuyu (borehole) sismometreleri ile yüzey gürültülerinden uzaklaşmış, böylece sismik aktivite değerlendirme hassasiyeti artırılmıştır. Bu kapsamda AFAD Başkanlığı ve Almanya Yerbilimleri Araştırma Merkezi (GFZ) arasında 2011 yılında başlatılan GONAF (Geophysical Borehole Observatory at the North Anatolian Fault) Projesi, Türkiye'de ilk, dünyada ikinci derin kuyu sismometre ağı olarak Marmara Denizinin doğusunda kurulan 7 adet derin kuyu istasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Tüm istasyonlarının kurulumunun tamamlandığı 2016 yılından bu yana Marmara Bölgesi için 10.000'in üzerinde deprem kaydedilirken GONAF Projesinin çalışma hedefi olan Marmara Denizi'nin doğusunda büyüklükleri eksi (-) 0.2 ile 2.0 arasında değişen yaklaşık 3.000 adet mikro deprem kaydedilmiş ve değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışma ile hassas sismolojik gözlemlerin temelini oluşturan derin kuyu sismometre ağı kurulumu hakkında bilgi verilmiş, GONAF Projesindeki uygulamalardan örnekler gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Derin Kuyu Sismometre Ağı, Mikrosismik deprem aktivitesi, GONAF Projesi

Öne Çıkanlar

- * Derin Kuyu Deprem Gözlem Ağı
- * GONAF Projesi
- * Mikrosismik deprem aktivitesi

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.03.2025
Düzeltilme: 15.05.2025
Kabul: 15.05.2025
Basım: 30.08.2025

DOI

10.46464/tdad.1660221

Sorumlu yazar

Recai Feyiz Kartal
E-posta:
rfkartal@gmail.com

Borehole Seismometer Network: Example of GONAF Project

Recai Feyiz Kartal ¹, Filiz Tuba Kadirioglu ¹, Tuğbay Kılıç ¹

¹ Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Earthquake Department, 06800 Ankara, Türkiye

ABSTRACT

One of the most significant disasters in the world, earthquakes cause substantial loss of life and property. Therefore, studies have been conducted and have been continuing across various disciplines to earthquake forecasting and minimize the potential loss of life and property caused by them. The deployment of broadband or short-period seismometers along fault segments for monitoring earthquake activity has decreased the magnitude threshold of detectable earthquakes. In addition, the use of deep borehole seismometers installed in drill holes has helped to reduce surface noise, thereby increasing the sensitivity and accuracy of seismic activity assessments. In this context, the GONAF (Geophysical Borehole Observatory at the North Anatolian Fault) Project, initiated in 2011 through a collaboration between the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD) and the German Research Centre for Geosciences (GFZ), is being carried out with the installation of seven deep borehole stations in the eastern Marmara Sea region. It represents the first deep borehole seismometer network in Türkiye and the second of its kind in the world. Since the completion of all station installations in 2016, over 10,000 earthquakes have been recorded across the entire Marmara Region. Within the primary focus area of the GONAF Project, the Eastern Marmara Sea, approximately 3,000 micro-earthquakes, with magnitudes ranging from -0.2 to 2.0, have been recorded and analyzed. This study provides information about the installation of the deep borehole seismometer network, which forms the foundation of precise seismological observations, and presents examples from the applications within the GONAF Project.

Keywords

Borehole Seismometer Network, Microseismic earthquake activity, GONAF Project

Highlights

- * Borehole Seismometer Earthquake Observation Network
- * GONAF Project
- * Microseismic earthquake activity

Manuscript

Research Article

Received: 18.03.2025
Revised: 15.05.2025
Accepted: 15.05.2025
Printed: 30.08.2025

DOI

10.46464/tdad.1660221

Corresponding Author

Recai Feyiz Kartal
Email:
rfkartal@gmail.com

1. GİRİŞ

Derin kuyu gözlemleri ilk olarak açık denizlerdeki petrol ve gaz kuyularında uygulanmıştır. Uluslararası Okyanus Sondaj Programı (International Ocean Drilling Program-IODP), okyanus ortası sondaj kuyularına kalıcı operasyon için sensörler yerleştirerek, bilime dayalı deniz altı kuyu tamamlama işlemlerini optimize etmiştir (Davis ve Becker 2007). Dünyada ilk Derin Kuyu Sismometre Ağı (DKSA), San Andreas Fayının sismojenik derinliğinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal süreçleri doğrudan incelemek amacı ile Kaliforniya yakınlarındaki Parkfield bölgesinde kurulmuştur (Ellsworth ve diğ. 2007, Zoback ve diğ. 2010).

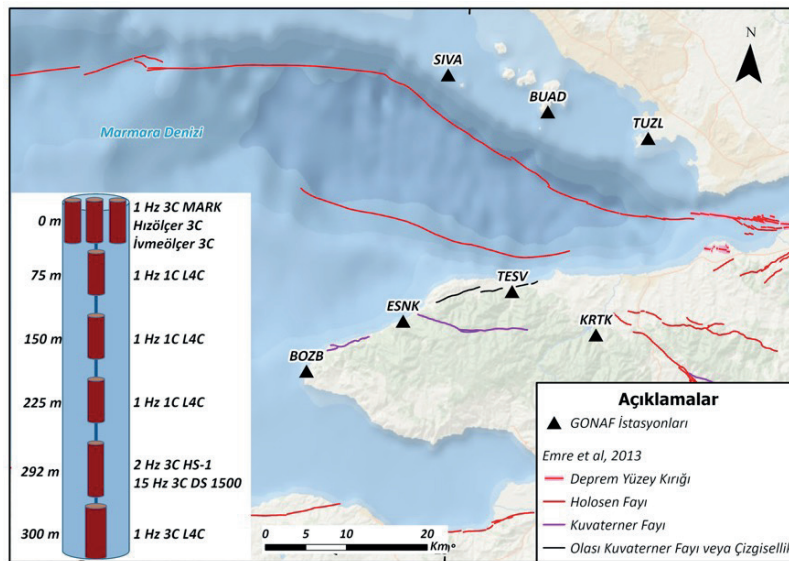
Dünyada ikinci, ülkemizde ise ilk olan DKSA çalışmaları 2011 yılında GONAF (Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault) Projesi ile başlamıştır (GONAF 2025). Projenin amacı, Kuzey Anadolu Fayının Marmara Denizi içerisindeki adalar segmentinde, beklenen Marmara depremi öncesi ve sırasında meydana gelecek fiziksel süreçleri incelemek; aynı zamanda büyüklük algılama ölçeğinin düşürülmesi ile yüksek çözünürlüklü mikrosismik etkinliğin gözlenmesidir (Kılıç ve diğ. 2020). Bu kapsamda Marmara Denizi'nin doğusunda Kuzey Anadolu Fayı'nın adalar segmentini daha hassas bir şekilde gözlemlemek için İstanbul ili Tuzla, Büyükada ve Sivriada'ya 3 adet, fayın tam karşısına Yalova ili Kurtköy, Teşvikiye, Esenköy ve Bozburun ilçelerine 4 adet olmak üzere toplam 7 adet 300'er metre derinliğinde derin kuyu istasyonu kurulmuştur. Her bir kuyuya farklı derinliklerde 6'şar adet sensör yerleştirilmiştir (292'nci metrede 2 sensör bir arada bulunmaktadır). Ayrıca istasyonların bazılarında yüzeye 1 adet Mark sensör, 1 adet hız ölçer ve 1 adet ivme ölçer cihazı konuşlandırılmıştır (Şekil 1). Bu istasyonlardan gelen veriler AFAD merkez ve Almanya'daki proje ortakları tarafından sürekli olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi içerisindeki parçasının tamamını gözlemek için, Marmara Denizi'nin orta ve batı tarafına üç adet derin kuyu istasyon kurulması planlanmıştır. 2024 yılında bu istasyonlardan bir tanesi Balıkesir ili Erdek ilçesine kurulmuş ve mevcut derin kuyu sismometre ağı ile bütünleştirilmiştir. 2025 yılında ise

başka bir istasyonun, Tekirdağ ili Marmaraaereğlisi ilçesinde seçilen noktaya kurulması çalışmaları başlatılmıştır.

Ülkemizdeki derin kuyu deprem gözlem ağı kurulumu çalışmaları ise GONAF projesinden edinilen tecrübeler ışığında 2015 yılında başlamıştır. AFAD, Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Deprem Dairesi Başkanlığı bünyesinde başlatılan ve derin kuyu deprem gözlem istasyonlarının ülke geneline yaygınlaştırılmasını hedefleyen bu çalışmada, istasyonlar yerel ağ olarak değil, Türkiye geneline yayılacak noktalarda teşekkül edecek şekilde planlanmıştır.

Derin kuyu deprem gözlem istasyonları, yüzeyden belirli metre derinlikte konuşlandırıldığı için, çevresel gürültülerden etkilenmemektedir. Bu istasyonların arasındaki mesafe 20 km'den az olduğunda DKSA olarak isimlendirilmektedir. DKSA ile aletsel büyüklüğü 1.0 ve daha küçük depremlerin parametreleri (enlem, boylam, derinlik, aletsel büyüklük) kolayca hesaplanabilmektedir.

DKSA kurulumlarında asgari olarak, (1) Derin kuyu yerleştirme sistemi, (2) ölçüm sensörleri, (3) sensör sabitleme sistemi ve (4) veri kayıt sistemi gerekir. DKSA kurulumu öncesinde ofis çalışması oldukça önemli bir aşamadır. Çünkü DKSA gerek sondaj açılması ve gerekse kullanılacak sismik sensörler açısından yüzey istasyonlarına göre daha maliyetlidir. Bu nedenle projenin amacına göre sondaj yerinin seçilmesi en önemli aşamalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde iki temel DKSA tasarımı mevcuttur ve her ikisi de kuyu içerisine yerleştirilen sensörler sayesinde uzun süreli gözlem sağlayacak olgunluğa erişmiştir. Bunlar, (1) sensörün, ortası delik metal bir boruya sabitlenerek kuyu içerisine indirilmesi ve kuyunun çimentolanması, (2) kuyu içerisine muhafaza borusunun yerleştirilmesi, muhafaza borusu ile kuyu cidarının çimentolanması, muhafaza borusu içerisinde sensörün sabitlenmesi şeklindedir. Her iki durumda da yüzeye iletişim, cihazın bulunduğu derinlikten yüzeye kadar uzanan bağlantı kabloları ile sağlanır. Günümüzde daha çok ikinci yöntem kullanılmakla birlikte, projenin amacına göre birinci yöntem de tercih edilebilir.



Şekil 1: GONAF Projesi kapsamında kurulan derin kuyu istasyonların dağılımı (Kılıç ve diğ. 2020)
Figure 1: Distribution of the borehole stations installed within the scope of GONAF Project (Kılıç et al. 2020)

2. YÖNTEM

Sondaj, en basit ifade ile toprak ve kaya zemin içinde özel delgi makinaları kullanılarak delik açma işlemidir. Dolayısıyla yer kabuğu içerisinde bulunan maden kaynaklarının aranmasında kullanılan bir maden arama tekniği olmasının yanında, açılan bu deliklere farklı yöntemler ile yerleştirilen sismometreler sayesinde, sismik gözlemler de yapılabilmektedir. Yer kabuğunda delik açmak için döner (rotary) ya da darbeli delik açma teknikleri kullanılabilir.

Derin kuyu deprem gözlem istasyonu kurulum maliyeti, yüzey (zayıf yer hareketi) istasyon kurulum maliyetinden daha fazladır. Maliyeti etkileyen faktörler;

- Kuyu açma işlemleri
- Kuyu içinde muhafaza ve diğer işlemler için kullanılacak ekipmanlar
- Kuyuda kullanılacak sensor sayısı ve tipi (örneğin 100 metre derinliğinde açılacak bir kuyuya farklı amaçlar için birden fazla sensor yerleştirilebilir)
- Konteyner gibi üst yapı ekipmanları
- Veri iletişimi için kullanılacak sistemler (şehir şebeke elektriği, güneş paneli veya her ikisi)
- Lojistik diğer giderler olarak özetlenebilir.

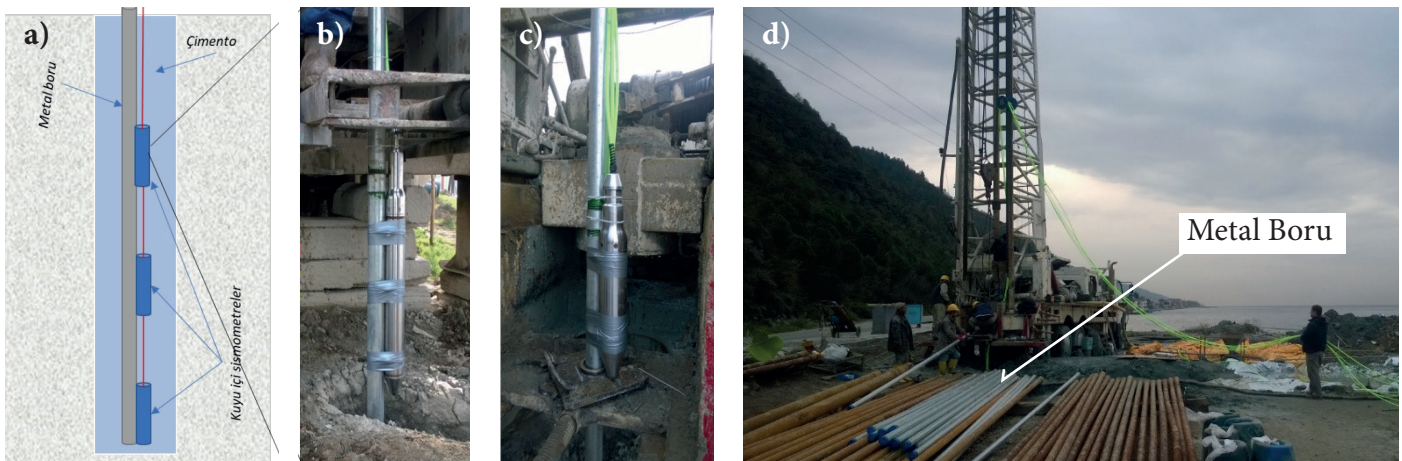
Yüzey istasyonu kurulumunda ise derin kuyu istasyonundan farklı olarak sondaj ve kuyu ile ilgili maliyetler bulunmamaktadır. Günümüz ekonomik koşullarında net rakamlarla maliyet hesabı yapmak çok mümkün olmamakla birlikte yüzey istasyonu kurulum maliyetine X dersek, derin kuyu deprem gözlem istasyonu kurulum maliyeti ortalama 2X olarak tahmin edilebilir. Yüksek maliyet oranına rağmen elde edilecek sinyal kalitesi zayıf yer hareketi istasyonlarına göre çevresel gürültülerden uzak ve daha temizdir. Bu nedenle sismik ağ kurulumunda her iki ağ yapısının artıları ve eksileri iyi analiz edilmeli, proje asıl amaca göre tasarlanmalıdır.

Derin kuyu deprem gözlem istasyonlarının, özellikle sismik boşluk olarak belirlenen alanlarda uzun süreli hassas gözlem yapılması amacıyla kurulması daha doğru bir yöntemdir. Örneğin, Türkiye ana karası gibi bulunduğu tektonik konum nedeniyle deprem potansiyeli yüksek olan bölgelerde yapılacak deprem gözlemleri için derin kuyu sismometre ağı tercih edilmeli, derin kuyu istasyonu kurulması uygun olmayan yerler için yüzey istasyonları kullanılmalıdır. Diğer bir değişle kullanım amacına göre örneğin; mikrosismik aktivitenin gözlenmesi, bölgesel gürültü tabanlı tomografi çalışmaları gibi detaylı analizlerde derin kuyu deprem gözlem istasyonlarının kullanılması daha uygunken, afet yönetimi, hızlı değerlendirme ve karar alma süreçleri için yüzey istasyonları daha yaygın olarak önerilmektedir.

Derin Kuyu Deprem Gözlem İstasyonu kurulumunda iki farklı yöntem tercih edilir. (1) Sensör ile birlikte kuyunun betonlanması, (2) kuyu içerisine yerleştirilen muhafaza borusu ile kuyu cidarı arasının betonlanması, sensörün muhafaza borusu içerisinde istenilen derinlikte sabitlenmesi.

2.1) Sensör ile Birlikte Kuyunun Betonlanması

Bu yöntemde öncelikle projenin amacına göre kullanılacak sensör ve kuyu derinliği belirlenir. Ancak, derin kuyu deprem gözlem istasyonu için kullanılacak derinliğin en az 100 m olması gerekir. Buna karşılık bu yöntem için derinliğin en az 300 m olması önerilir. Çünkü bu yöntemde kullanılan sensörler kuyu içerisinde betonlanarak zemin ile bütünleştirilir. Böylece herhangi bir sensör arızası durumunda arızalı sensöre müdahale edilemez. Bu nedenle, kuyu tabanından yüzeye doğru, biri birinin yedeği olacak şekilde belirli aralıklarla birden fazla sensör yerleştirilir. Böylece, bir kuyuda farklı derinliklerde birden fazla sensör yer alır (Şekil 2).



Şekil 2: Birden fazla sensörün kuyu içerisindeki konumu ve saha uygulaması a) Kuyu kesiti, b-c) Farklı sensörlerin kuyu içerisine yerleştirilmesi, d) Saha çalışması

Figure 2: Location of multiple sensors in the well and field application a) Well cross section, b-c) Installation of different sensors into the well. d) Field work

Genellikle derin kuyu sismometrelerin çalışma eğim açıları $\pm 10^\circ$ 'dir. Ancak bazı derin kuyu sismometrelerin çalışma eğim açıları daha düşük olduğundan, açılacak sondaj kuyusu için eğim değerinin (tabandan yüzeye kadar) 3° 'den fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Bunu sağlayabilmek için, hazırlanacak teknik şartnamede, kuyu delinirken döner (rotary) yöntem ile sabitleyici kullanılması istenmeli, aynı zamanda kuyu eğiminin en fazla 3° olması gerektiği belirtilmelidir.

Kuyu, istenilen derinliğe indikten sonra, içerisinde herhangi bir kırıntı döküntü kalmaması için 2-3 saat boyunca bentonit çamuru ile sirkülasyon yapılmalıdır. Bu işlem tamamlandıktan sonra sensörlerin kuyu içerisine indirilmesi aşamasına geçilmelidir. Kuyu içerisine yerleştirilecek olan derin kuyu sensörler, birbirine eklenebilen 6 cm çaplı 6-8 m uzunluğundaki çelik borulara sabitlenerek kuyu içerisine indirilir (Şekil 2).

Cihazların tamamı kuyu içerisine indirildikten sonraki adım, kuyunun tabandan yüzeye doğru olacak şekilde betonlanmasıdır (çimento + su karışımı ile doldurulması). Kuyudaki bentonit çamuru temizlenmediği için çimentolama yapılırken iki yöntem uygulanır.

1. Kuyu tabanına çelik borular yardımı ile temiz su gönderilerek, kuyudaki bentonit çamurunun temizlenmesi,
2. Bentonit çamuru temizlenmeden kuyunun çimentolanması.

Birinci yöntemin riski yüksektir çünkü; bentonit çamuru, kuyu cidarındaki malzemenin kuyu içerisine dökülmesini önlemektedir. Dolayısıyla kuyunun temiz su ile yıkanması, dökülme riskini artırır. Bu durumda çimentolama işlemi sağlıklı yapılamaz. Eğer bu yöntem tercih edilecek ise, betonun sahada hazır halde bulunması gerekir. Temiz su ile kuyunun yıkanmasının ardından hiç vakit kaybetmeden çimentolama işlemine başlanmalıdır.

İkinci yöntem daha çok tercih edilir. Kuyudaki bentonit çamuru yoğunluğu genellikle 1.10 gr/cm^3 'ten az olur. Bu yoğunluğun üstündeki değerler daha çok artezyen ile karşılaşıldığında ya da kuyu kaçaklarında tercih edilir. Şekil 2'deki görselde ikinci yöntem kullanılmıştır. Sismik sensörler, yukarıda bahsedildiği gibi kuyu içerisine yerleştirildikten sonra, yoğunluğu 1.80 gr/cm^3 olan çimento şerbeti, çelik boru içerisinden pompa yardımı ile kuyu tabanına gönderilmiş, çimento şerbeti daha yoğun olduğu için, bentonit çamurunu yüzeye iterken aynı zamanda kuyunun çimentolanması sağlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3: Bentonit çamuru ile dolu kuyunun çimento şerbeti ile doldurulması, çimentonun yüzeye çıkması
Figure 3: Filling the well filled with bentonite mud with cement grout, bringing the cement to the surface

2.2) Kuyu İçerisine Yerleştirilen Muhafaza Borusu (casing) ile Kuyu Cidarı Arasının Betonlanması, Sensörün Muhafaza Borusu İçerisinde İstenilen Derinlikte Sabitlenmesi

Bu yöntem son yıllarda daha çok tercih edilir olmuştur. Yöntemin uygulanmasında yukarıda bahsedilen delik açma tekniklerinden her ikisi de (rotary ya da darbeli) kullanılabilir. Ancak, çimentolama için iki farklı teknik tercih edilebilir. Çalışmanın bu bölümünde, rotary ya da darbeli yöntem ile açılan kuyu içerisine muhafaza borusunun yerleştirilmesi ve kuyunun çimentolanması işlemi anlatılacaktır.

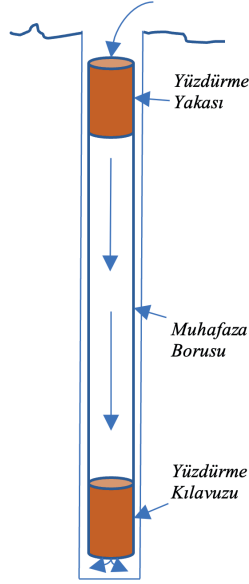
Delme işlemi rotary yöntemi ile yapıldıysa, kuyu içerisinde bentonit çamuru bulunacaktır. Böyle bir sondaj kuyusunun

çimentolanması, (1) muhafaza borusu ile, (2) muhafaza borusuna sabitlenerek kuyu içerisine indirilen, 5-6 cm çaplı plastik borunun kullanılması ile yapılır.

2.2.1) Muhafaza Borusu ile Çimentolama

Kuyuya muhafaza borusu ile birlikte indirilen malzeme ve yardımcı ekipmanlar, boru inişinin rahat yapılmasını, kuyu içerisinde düzgün pozisyon alınmasını, çimentonun sorunsuz basılmasını sağlamak gibi işlevleri yerine getirirler. Kuyuya indirilecek ilk borunun alt ucuna yüzdürme klavuzu, üst ucuna yüzdürme yakası ekipmanı eklenir (Şekil 4). Her iki ekipman, içerisinde bulunan güvenlik vanası (check valve) sistemi, dışarıdan boru içine akışkan girmesini engellemektedir. Bununla birlikte muhafaza borusunun

kuyu içerisinde merkezlenerek çimento şerbetinin boruyu çepçevre sarmasını sağlayacak merkezleyiciler (centralizer), kuyu derinliğine göre belirli borulara bağlanır (Şekil 5). Bütün bu ekipmanlara ek olarak çimentolama esnasında çimentoyu boru içerisinde itecek ve aynı zamanda öteleme çamuru ile çimentoyu birbirinden ayıracak alt ve üst tapalar kullanılır.



Şekil 4: Yüzdürme Kılavuzu ve Yüzdürme Yakası ekipmanlarının kuyuya indirilen ilk boruya eklenmesi

Figure 4: Attaching the Guide Shoe and Float Collar equipment to the first pipe lowered into the well

Yüzdürme yakası ekipmanı kuyuya indirilen ilk muhafaza borusunun üst kısmına bağlandığı için, öteleme tapasının bu noktaya ulaşması, kuyu cidarı ile muhafaza borusu arasında kalan boşluğun çimento şerbeti ile dolması anlamına gelir. Zaten öteleme işlemi sırasında yüzeye önce bentonit çamuru ve devamında çimentonun çıktığı görülür. Çimento çıkışı görüldükten bir süre sonra işlem sonlandırılır. 24 saat bekledikten sonra muhafaza borusu içerisindeki öteleme çamurunun temizlenmesi, kuyu testleri gibi işlemlere başlanır.



Şekil 5: Merkezleyicinin muhafaza borusuna bağlanması
Figure 5: Connection of the centralizer to the casing tube

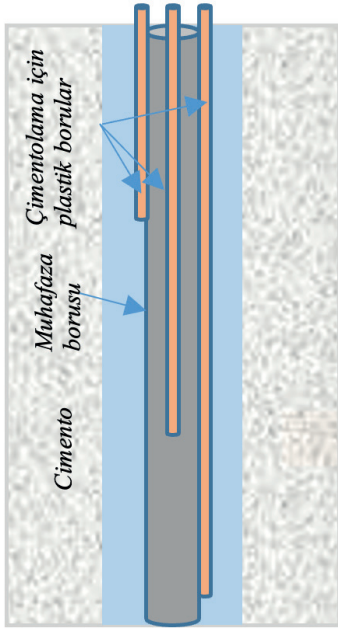


Şekil 6: a) Alt ve üst tapa, b) Çimentolama başlığı
Figure 6: a) Lower and upper plug, b) Cementing head

2.2.2) Muhafaza Borusuna Sabitlenerek Kuyu İçerisine İndirilen Plastik Boru ile Çimentolama

Birinci yöntemde, yapılan testler nedeni ile muhafaza borusu tabanında dalgıç pompanın ulaşamayacağı yükseklikte (50 cm) su kalabilmektedir. Dolayısı ile bazı projelerde muhafaza

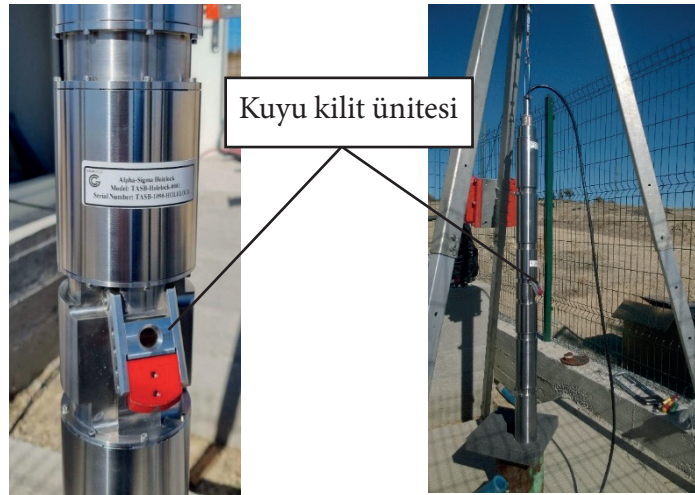
borusunun tamamen kuru olması istenir. Böyle durumlarda çimentolama işlemi için muhafaza borusuna birleştirilen, çapı yaklaşık 5-6 cm olan plastik borular kullanılır. Uçları farklı derinliklerde sonlandırılan plastik borular, muhafaza borusuna sabitlenir (Şekil 7).



Şekil 7: Muhafaza borusu ile kuyu cidarı arasındaki boşluğun, yüzeyden indirilen plastik borular kullanılarak çimentolanması
Figure 7: Cementing the space between the casing and the well wall using plastic pipes lowered from the surface

Darbeli yöntem ile açılan kuyularda, kuyu cidarındaki malzeme serbest durumda olduğu için, zaman zaman kuyu içerisine dökülebilmektedir. Dökülmenin hangi derinlikte ve ne miktarda olduğunu kestirmek mümkün değildir. Bu nedenle, çimentolama için birden fazla plastik boru kullanılır ve bu boruların uçları farklı derinliklerde sabitlenir. Böylece, çimentolama esnasında bir tıkanma söz konusu olduğunda diğer boru/borular kullanılır.

Çimentolama işlemi tamamlandıktan sonra cihazların muhafaza borusu içerisinde konumlandırılması yapılır. Derin kuyu sismometreler dünyada birkaç firma tarafından üretilmektedir. Firmalar farklı olsa da cihazların bazı özellikleri ortak paydada toplanmaktadır. Proje amacı ve bütçesi göz önünde bulundurularak bu cihazlardan biri tercih edilebilir. Seçilen cihazın boru içerisine indirilmesinde özel üretilmiş vinçler kullanılır. Bununla birlikte, cihazların istenen derinlikte sabitlenmesini sağlayan kuyu kilit üniteleri bulunmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8: Derin kuyu sensörlerde bulunan kuyu kilit ünitesi
Figure 8: Holelock unit in borehole sensors

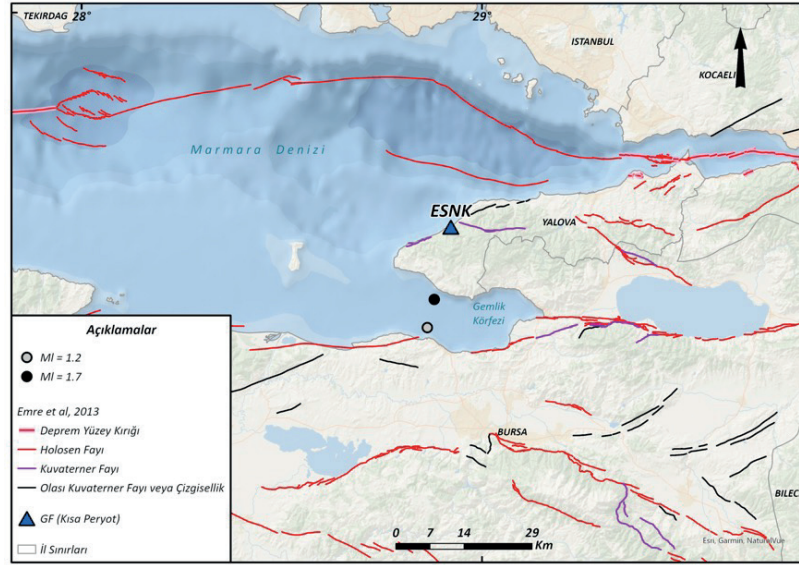
3. DERİN KUYU DEPREM GÖZLEM İSTASYONLARININ AVANTAJLARI, DEZAVANTAJLARI

3.1) Avantajlar

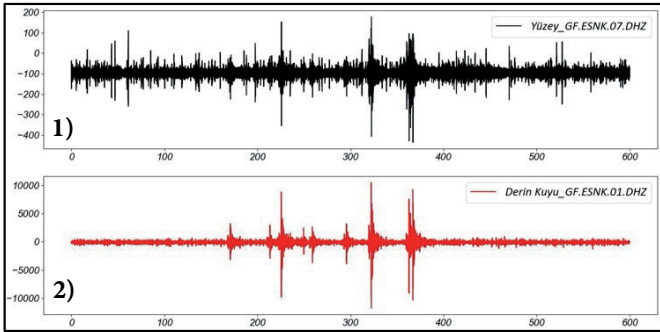
Derin kuyu sismometrelerin frekans tepkisi 0.00833 Hz (120 sn)-150 Hz aralığındadır. Başka bir deyişle, bu sismometreler ile mikro depremlerden ($M < 1.0$) makro depremlere ($M > 4.0$) kadar bütün yer hareketi hassas bir şekilde kaydedilebilir. Bu sismometreler aynı zamanda, çevresel gürültülerden daha az etkilenirler. Kaydedilen sinyaller ile farklı araştırmalar yapılabilir. Aktif bir fay çevresine konuşlandırılan derin

kuyu istasyonlar sayesinde, fayda meydana gelen büyük deprem öncesindeki mikrosismik aktivite detaylı bir şekilde incelenebilmektedir. Sinyal gürültü oranı (SNR), derin kuyu istasyonlarda daha küçük depremlerin tespit edilmesini kolaylaştırırken, yüzey istasyonlarında özellikle düşük genlikli sinyaller gürültü içerisinde kaybolabilirler (Şekil 9). Öte yandan mikrosismik aktivitenin ayrıntılı bir şekilde takip edilebilmesi ile çalışılan bölgede varsa deprem kümeleri belirgin bir şekilde ortaya çıkabilir, ayrıca depremlerin dış merkez dağılımlarına bakılarak aktiviteye neden olan fayın özelliklerine ait öngörüler elde edilebilir (Kılıç ve diğ. 2020) (Şekil 10a,b).

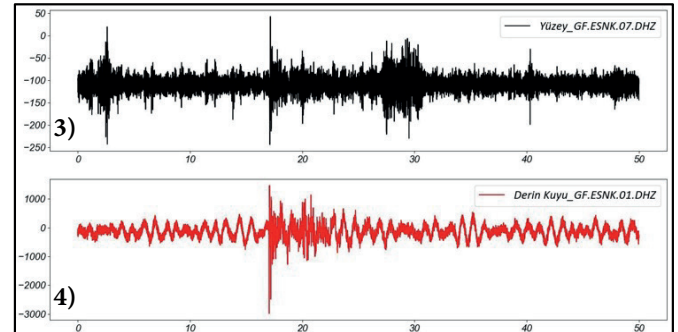
a)



b)

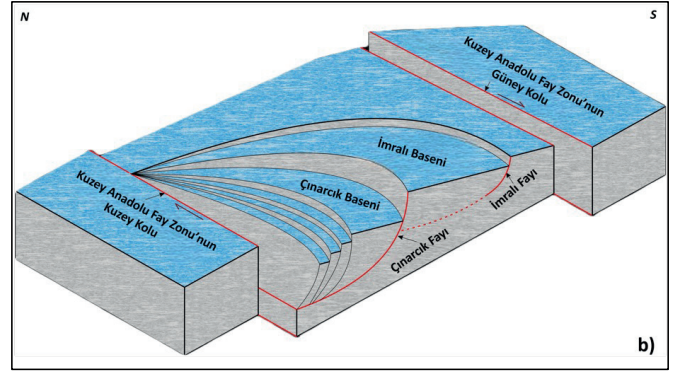
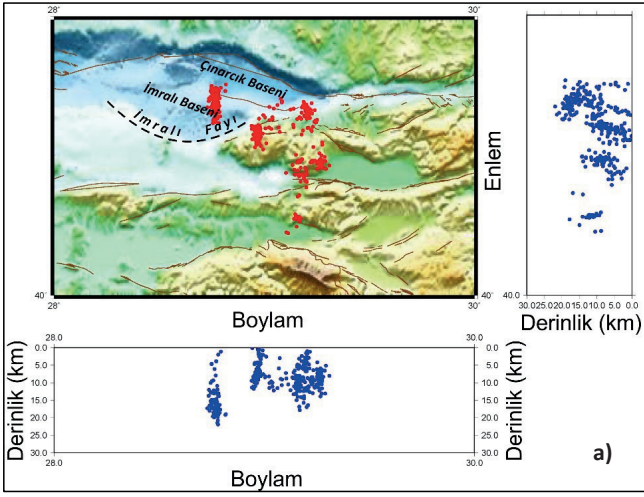


c)



Şekil 9: 04.01.2024 günü saat (UTC) 21:23 ve 01.03.2024 günü saat (UTC) 20:59'da merkez üssü Gemlik Körfezi olan ve aletsel büyüklüğü sırası ile lokal büyüklük Ml 1.7, Ml 1.2 olarak hesaplanan iki deprem için aynı lokasyondaki derin kuyu istasyonu ile geniş bant yüzey istasyonunda kaydedilen dalga formlarının karşılaştırılması; (a) Deprem dışmerkezi ve ESNK derin kuyu ve yüzey istasyonunun konumu. (b) Ml 1.7 depremi ve aynı zaman diliminde kaydedilen diğer depremlere ait dalga formları, (c) Ml 1.2 depremine ait dalga formu. 2. ve 4. sinyaller derin kuyu istasyonuna aitken, 1. ve 3. sinyaller geniş bant istasyona aittir (Diri Faylar Emre ve diğ. (2013)'ten, deprem lokasyonu AFAD Deprem Dairesi kataloğundan (AFAD 2025) alınmıştır.)

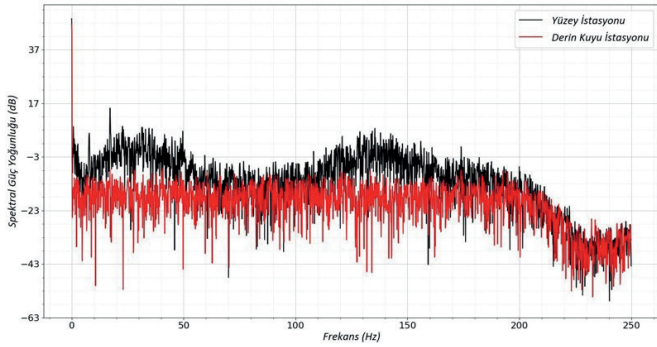
Figure 9: Comparison of waveforms recorded at the borehole station and broad-band surface station at the same location for two earthquakes with epicenters in Gemlik Bay at 21:23 on 04.01.2024 (UTC) and with local magnitudes Ml 1.7 and Ml 1.2, respectively. a) Earthquake epicenter and location of ESNK broad band and surface station. b) Waveforms of the Ml 1.7 earthquake and other earthquakes recorded in the same time period, c) Waveform of the Ml 1.2 earthquake. While the 2nd and 4th signals belong to the borehole station, the 1st and 3rd signals belong to the broadband station (Active Faults are taken from Emre et al. (2013), The epicenter information is taken from AFAD Earthquake Department catalogue (AFAD 2025).)



Şekil 10: a) 2016-2017 yılları arasında GONAF Projesi derin kuyu istasyonlarından alınan verilerin değerlendirilmesi ile Marmara Denizi'nin doğusunda gözlemlenen deprem kümeleri ve b) depremlere neden olan fay sistemlerinin modellenmesi (Kılıç ve diğ. 2020'den değiştirilmiştir).

Figure 10: Modeling of earthquake clusters (a) and fault systems (b) causing earthquakes observed in the east of the Marmara Sea by evaluating the data obtained from the borehole stations of the GONAF Project between 2016-2017 (Modified from Kılıç et.al. 2020).

Kuyu içi sensörlerin teknik özellikleri, proje amacına göre farklılıklar gösterebilmektedir. Proje yerel ölçekte mikrosismik aktiviteye yönelik bir çalışmayı gerektiriyorsa burada yüksek frekanslı (2 Hz, 4.5 Hz, 15 Hz) sensörler tercih edilir. Çünkü mikro depremlerin ($M < 4$) dalga boyu makro depremlerin ($M \geq 4$) dalga boyuna göre daha kısadır. Özellikle yüksek frekanslarda (1 Hz ve üzeri) yüzey istasyonları daha fazla gürültüye sahipken derin kuyularda bu bileşenler daha net gözlemlenebilir (Şekil 11).



Şekil 11: AFAD tarafından işletilen derin kuyu ve yüzey istasyonlarının spektral güç yoğunluğu ve frekans ortamında karşılaştırılması (kırmızı çizgi: derin kuyu istasyonu, siyah çizgi: yüzey istasyonu)

Figure 11: The comparison of borehole and surface stations operated by AFAD in power spectral density and frequency domain (red line: borehole station, black line: surface station)

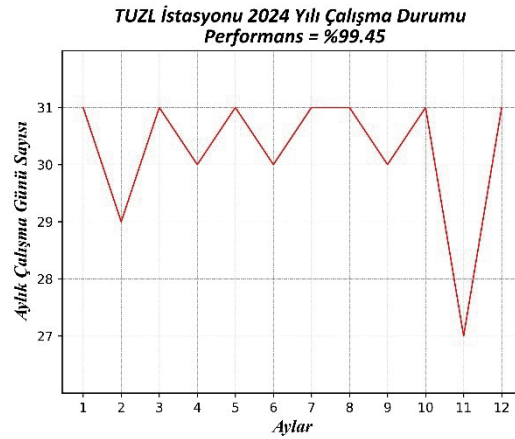
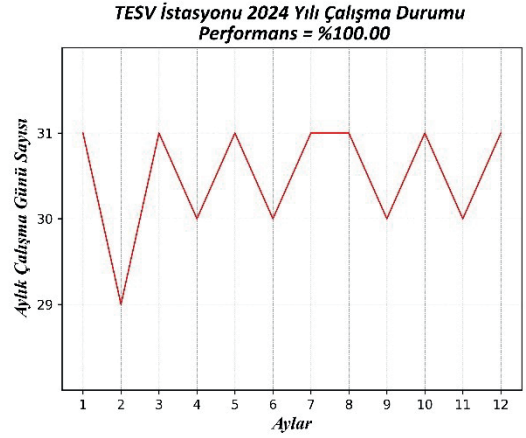
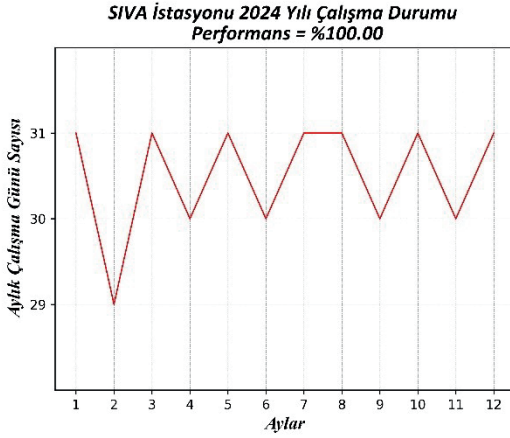
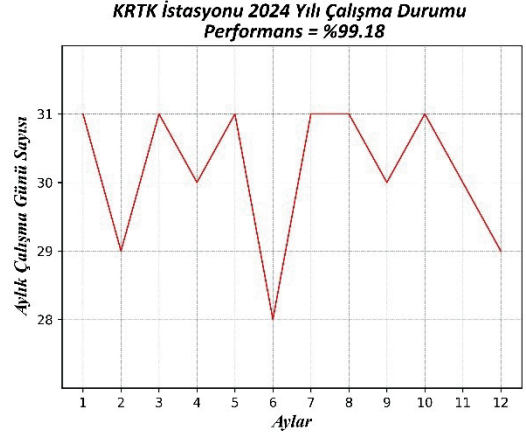
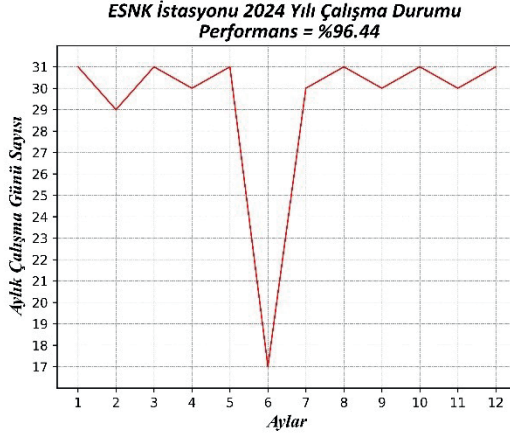
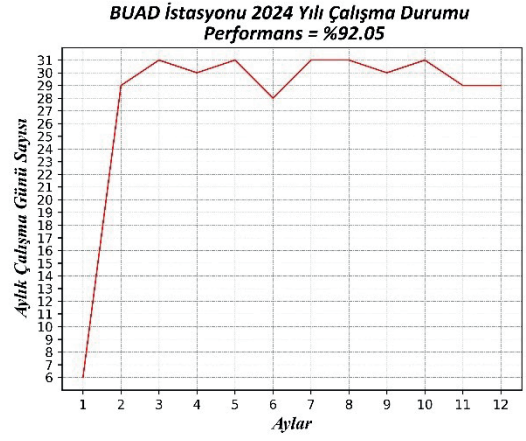
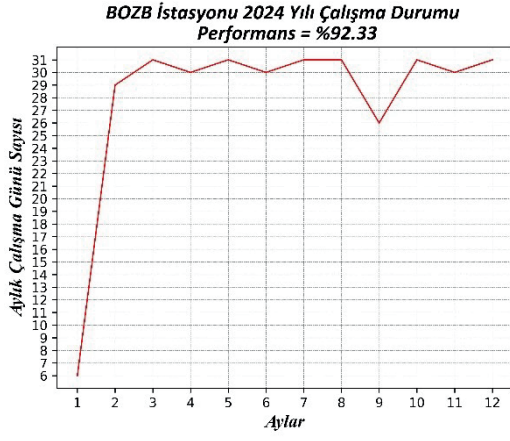
3.2) Dezavantajlar

Derin kuyu deprem gözlem istasyonları, gerek sondaj açılması gerekse kullanılan sismik sensörler bakımından yüzey istasyonlarına göre daha maliyetlidir. Aynı zamanda istasyon kurulum süresi daha uzundur. Kurulum esnasında daha

geniş çalışma alanına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle deprem gözlem istasyonu işleten üniversite ve kamu kurumlarının bu istasyonları hangi amaçla kullanacaklarını doğru bir şekilde tespit ederek söz konusu amaca uygun istasyonların kurulumunu gerçekleştirmeleri, hem elde edilecek verilerden istenilen faydanın sağlanması hem de kamu kaynaklarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi açısından önemlidir. GONAF Projesi örneğinde olduğu gibi derin kuyu sensörlerin yerleştirilmesinden sonra kuyunun tamamen çimentolanması durumlarında, arıza halinde sensörlere ulaşmak imkansız olduğundan bir kuyu içerisine yedekli olacak şekilde birden fazla sensor yerleştirilmesi tercih edilebilir. Öte yandan bazı derin kuyu deprem istasyonu kurulum projelerinde kuyu tamamen çimentolanmayıp, arıza durumunda sensöre ulaşılabilir. Ancak bu işlemler de oldukça masraflıdır.

3.3) İstasyonların Çalışma Performansı

Yüzey istasyonlarında olduğu gibi derin kuyu deprem gözlem istasyonu ağında da bütün istasyonları 7/24 çalışır durumda tutmak her zaman mümkün olamamaktadır. Çünkü atmosferik olaylar (yağmur, rüzgar, kar, yıldırım v.b.) zaman zaman istasyonlara zarar verebilmektedir. Örneğin ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde yıldırım olayları sıklıkla görülmektedir. Yıldırım nedeni ile zaman zaman modem, GPS anteni, sayısallaştırıcı hatta sensörün kendisi bile zarar görebilmektedir. Bununla birlikte yerelde yaşanan uzun süreli elektrik kesintileri de sinyal akışını engellemektedir. Bu nedenle istasyonların konuşlandırılacağı yerler seçilirken bütün bu etkenler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca yer seçimlerinde çevresel gürültüler, zeminin jeolojik durumu da göz önünde bulundurulmalı diğer kriterlerdir. Genel olarak değerlendirildiğinde GONAF Projesi kapsamında kurulan derin kuyu deprem gözlem istasyonlarının çalışma yüzdesi %92'in üzerindedir (Şekil 12).



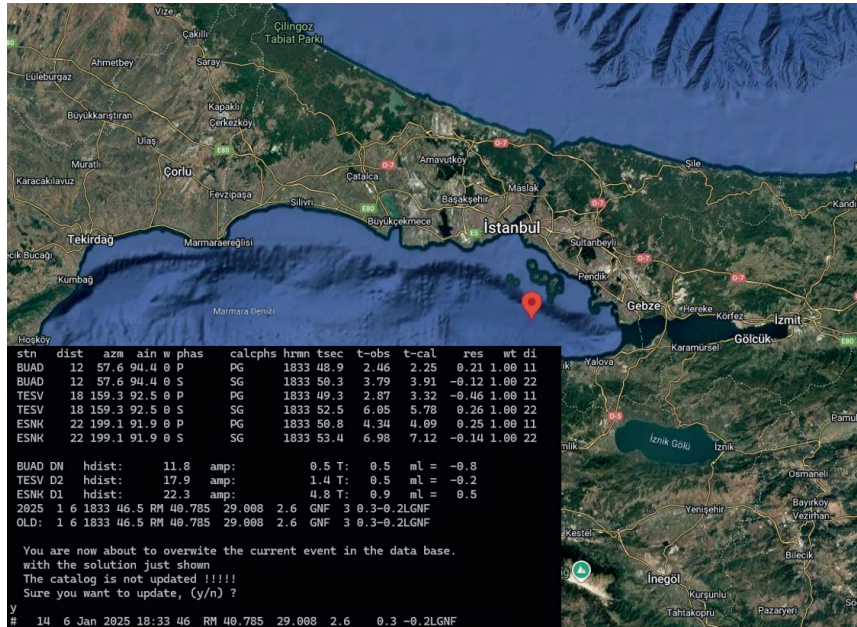
Şekil 12: GONAF Projesi kapsamında işletilen derin kuyu istasyonlarının yıllık çalışma performansı

Figure 12: Annual working performance of borehole stations operated within the scope of GONAF Project

4. SONUÇLAR

Ülkemiz bir deprem ülkesi olarak üç ana tektonik yapıya ev sahipliği yapmaktadır. Tarihsel ve aletsel dönemde deprem nedeni ile çok sayıda can kaybı yaşanmış, ekonomik kayıplar oldukça yüksek olmuştur. Deprem nedeni ile meydana gelecek can ve mal kayıplarını en aza indirebilmek için, deprem tekrarlanma periyodu dolmuş/dolacak aynı tektonik özellikli faylar üzerinde detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Depremlerin önceden tahmin edilmesi günümüz teknolojisine göre mümkün olmamakla birlikte, büyük depremlere kaynaklık eden fayların, deprem öncesindeki davranışını gözlemlemek, aynı özellikte başka bir yerdeki bir fayın üreteceği büyük deprem öncesindeki davranışına ışık tutacaktır. Bunu yaparken son teknoloji aletler kullanılmalıdır. Bu amaçla başlatılan GONAF projesi ile KAF'ın Marmara Denizi içerisinde geçen kuzey kolunun doğu kısmındaki sismik aktivite, derin kuyu sismometre ağı ile hassas bir şekilde takip edilmektedir. 2011 yılında başlatılan projede tüm istasyonların kurulumu ve faaliyete geçmesi

2016 yılında tamamlanmış olup 2016 yılından itibaren 7 adet derin kuyu istasyonundan Marmara Denizi'nin doğu kısmı için sürekli veriler alınmakta ve değerlendirilmektedir. Bu süreç içerisinde tüm Marmara'da 10.000'in üzerinde depremin parametreleri belirlenirken, GONAF Projesinin çalışma hedefi olan Marmara Denizi'nin doğusunda büyüklükleri eksi (-) 0.2 ile 2.0 arasında değişen yaklaşık 3.000 adet mikro deprem kaydedilmiş ve değerlendirilmiştir. Projenin ana hedeflerinden biri olan negatif büyüklüklü mikro depremlerin tespit edilmesi hedefine derin kuyu deprem gözlem istasyonları yardımı ile ulaşmak mümkün olmuştur (Şekil 13). Burada derin kuyu istasyonlarından elde edilen deprem sinyallerinin çevresel gürültülerden uzak ve yüksek çözünürlüklü olması yüzey istasyonlarında yakalanamayan olayların daha kolay tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Gözlemlenen mikrosismik aktivitenin oluşturduğu deprem kümeleri ve diğer sismolojik çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde söz konusu depremlere neden olay faylar hakkında da detaylı yorumlar yapılabilir.



Şekil 13: 06 Ocak 2025 18:33:06 depreminin GONAF istasyonları ile değerlendirilmesi ve elde edilen negatif yerel büyüklük

Figure 13: Evaluation of the January 06, 2025 18:33:06 earthquake with the GONAF stations and minus local magnitude that was obtained

KAYNAKLAR

AFAD, 2025. Deprem Kataloğu, T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara, Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>.

Davis E., Becker K., 2007. On the fidelity of "CORK" borehole hydrologic observatory pressure records, Sci Drill, 5, 54-59, <https://doi.org/10.2204/iodp.sd.5.09.2007>.

Ellsworth W., Malin P.E., Imanishi K., Roecker S.W., Nadeau R., Oye V., Thurber C.H., Waldhauser F., Boness N.N., Hickman S.H., Zoback M.D., 2007. Seismology inside the fault zone: applications to fault-zone properties and rupture Dynamics, Scientific Drilling Special Issue, 1:85-88.

Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun S., Şaroğlu F., 2013. Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel sayı serisi-30, Ankara-Türkiye.

GONAF, 2025. Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault (GONAF), Erişim adresi: <https://www.gonaf-network.org>.

Kılıç T., Kartal R.F., Kadirioğlu F.T., Bohnhoff M., Nurlu M., Acael D., Garzon P.M., Dresen G., Özşarac V., Malin P.E., 2020. Geophysical Borehole Observatory at the North Anatolian Fault in the Eastern Sea of Marmara (GONAF): initial results. J Seismol, 24, 375–395 (2020), <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09907-6>.

Zoback M.D., Hickman S., Ellsworth W., 2010. Scientific Drilling Into the San Andreas Fault Zone, American Geophysical Union, EOS, 91(22), 97-204.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Çalışma kapsamında kullanılan diri fay verileri MTA Genel Müdürlüğü Türkiye Diri Fay Haritası; sismolojik veriler T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)'dan temin edilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Araştırma kapsamında herhangi bir kurumla ve/veya kişiyle çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (Author Contributions)

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