

## **Mikrosismik İzleme Yöntemleri** *Microseismic Monitoring Methods*

Bülent Kaypak<sup>1\*</sup>, G. Gülsev Uyar Aldaş<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Müh. Bölümü, Ankara*

\* *Sorumlu Yazar: kaypak@eng.ankara.edu.tr*

### **Özet**

Mikrosismik izleme yöntemleri, Yer, Yapı ve Malzeme Bilimlerinde, uygulanan gerilme kuvvetleri altındaki bir ortamın deformasyon sınırlarını ve büyüklüğünü belirlemede kullanılan önemli bir araç haline gelmiştir. Günümüzde çok farklı kullanım amaç ve alanları olan bu yöntem, kullandığı bir çok analiz tekniğini sismoloji biliminden ödünç almıştır. Sismolojiden farkı, kaynak olarak deprem yerine insan kaynaklı uyarılmış sismik olayları kullanmasıdır. Bir kuvvet etkisi ile elastik dalga yayılması muhtemel her alan için bu yöntemler, süreci izlemek amacı ile kullanılabilir. Yerbilimleri olarak, petrol ve doğal gaz, jeotermal, maden ve yeraltı depolama sahalarında, Yapı ve Malzeme Bilimi olarak ise yeraltı ve yerüstü mühendislik yapıları, ulaşım araçları, depolama ortamları ile laboratuvar test malzemeleri gibi birçok alanda uygulamaları bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar açısından yöntemin uygulamadaki basitliği, ekonomik olması ve ortama dair farklı bilgiler sunması en önemli avantajlarıdır.

*Anahtar Kelimeler: Mikrosismik, pasif sismik, izleme yöntemleri*

### **Abstract**

Microseismic monitoring methods have become an important tool used in determining of deformation limits and sizes of a medium under applied stresses in earth, structure and material sciences. Today, this method having many different purposes and fields of use has borrowed a number of analysis techniques from seismology. Only difference from seismology is that it uses man-made induced seismic events as source instead of earthquake. For each possible field of elastic wave propagation with effect of a force these methods may be used for monitoring the process. There are many application areas of this method both in Earth Sciences, such as petroleum and natural gas, geothermal, mining and underground storage areas, and also in Construction and Materials Sciences, such as surface and underground engineering structures, transport vehicles, storage media, and the laboratory test materials. In terms of the results obtained, simplicity in the application, to be economic, and providing different information about region are its most important advantages.

*Key words: Microseismic, passive seismic, monitoring methods*

## **1. Giriş**

Sismoloji, deprem verilerini kullanarak yerkürenin derinliklerine ait önemli bilgiler veren bir bilim dalıdır. Özellikle 1900 yılından sonra aletsel sismolojinin gelişimi ile birlikte yerkürenin iç yapısına ilişkin ve özellikle depremlerin oluşum mekanizmasının anlaşılmasına yönelik birçok bilinmeyene ışık tutulmuştur. Sismoloji ile ilgili yapılan bütün çalışmalar, yöntemler ve elde edilen bulgular çoğunlukla bilimsel bir çerçevede yer almaktadır. Ancak, günümüzde yer, yapı ve malzeme bilimleri ile ilgili sektörel yelpazenin genişlemesi, sismolojik yöntemlerin ilgili sektörlerdeki problemlere çözüm aramak amacıyla de kullanılabileceğini göstermiştir. Uygulamalı sismoloji alanında kullanım alanı giderek artan bu yöntemlerden biri de “mikrosismik izleme yöntemi” dir.

Mikrosismik, jeolojik veya mühendislik yapı ve malzemeleri içerisinde, doğal veya insan kaynaklı etkilere bağlı olarak meydana gelen gerilme değişimlerinin neden olduğu kontrolsüz oluşan küçük ölçekli sismik olaylara denilmektedir. Bu olayların kısa veya uzun dönemli gözlenerek analiz edilmesini kapsayan yöntemlere ise Mikrosismik İzleme Yöntemleri adı verilmektedir. Bir küresel deprem izleme yönteminden ayrılan yönü, araştırma alanının küçüklüğü ve incelenecek sismik olayların boyutlarındaki ölçek farklılığıdır. Bu yöntemler, deprem gibi doğal tektonik nedenlere bağlı olarak oluşan sismik olaylar dışında, çoğunlukla insan kaynaklı etkilerle gerilme farklılığının yaratıldığı her türlü ortam içerisindeki küçük ölçekli kırıkların izlenmesini ve analiz edilmesini kapsamaktadır. Dolayısıyla ile bu tür yöntemlerin uygulama alanı boyutları birkaç km mertebelerinden, mm mertebelerine kadar olabilmektedir. Bu alanlar çoğunlukla jeolojik ortam veya mühendislik yapı ve malzemeleri ile ilişkili olmaktadır. Jeolojik yapıya ilişkin araştırma alanları maden, jeotermal, petrol ve doğalgaz gibi ekonomik değeri olan yeraltı kaynaklarının bulunduğu sahalar olurken, mühendislik yapı ve malzemeye ilişkin araştırma alanlarını ise baraj sahaları, çok katlı devasa yapılar, hızlı tren hatları, ulaşım amaçlı tüneller, köprüler, heyelan bölgeleri, petrol depolama tankları, boru hatları, uçak ve gemi gövdeleri ile laboratuvar ortamındaki deneysel numuneler oluşturmaktadır.

Mikrosismik İzleme Yöntemleri, günümüzde artan bir eğilim içerisinde bir çok maden, jeotermal, petrol ve doğalgaz sahalarında başarıyla uygulanmaktadır. Bu tür sahalarda gerilme farklılığından kaynaklanan mikro kırıklar tespit edilerek araştırma alanı içerisindeki deformasyon sınırları kolayca belirlenmekte ve haritalanmaktadır. Mikrosismik İzleme Yöntemleri ile ilgili ilk çalışmalar 1940 yıllara kadar gitse de, teknolojiye paralel olarak

yöntemin gelişimi ile birlikte son yıllarda daha başarılı sonuçlar alınmaktadır. Senfaute ve ark. (2000), Potvin ve Hudyma (2001), Beck ve Brady (2002), Couffin ve ark. (2003), Iannacchione ve ark. (2003), Hardy (2003), Bennani ve Homand (2004), Filimonov ve ark. (2005), Iannacchione ve ark. (2005), McKinnon (2006), Li ve ark. (2007), Kelin ve ark. (2008), Contrucci ve ark. (2009), Ge ve ark., (2009), ve Trifu ve Shumila (2010) gibi araştırmacılar mikrosismik izleme yöntemlerini madencilik alanında uygulamışlardır. Petrol ve doğal gaz sektöründe daha çok “pasif sismik yöntemler” olarak bilinen mikrosismik izleme yöntemleri, son on yıldır dünyanın farklı bölgelerinde başarıyla kullanılmaktadır. Daha çok rezervuarın jeomekanik davranışını belirlemeye yönelik bu yöntem, Maxwell ve Urbancic (2001), Sze (2005), Tan ve ark. (2006), Sarkar ve Toksöz (2008), Maxwell ve ark., (2008, 2010), Duncan ve Eisner (2010), Eisner ve ark. (2010), Reshetnikov ve ark. (2010) gibi araştırmacılar tarafından uygulanmıştır. Petrol ve doğal gaz sahalarına benzer şekilde, rezervuar özelliklerinin belirlenmesine yönelik kullanılan mikrosismik yöntemler jeotermal alanlarda da uygulanmaktadır. Gunasekera ve ark., (2003), Mossop ve Segall (2004), Baria ve ark. (2005, 2006), Chiarabba ve Moretti (2006), Majer ve ark. (2007), De Matteis ve diğ. (2008), Bollinger ve ark. (2010), Kenedi ve ark. (2010) mikrosismik izleme yöntemlerini jeotermal sahalarda uygulayan diğer araştırmacılarıdır.

## **2. Mikrosismik Olayların Kökeni**

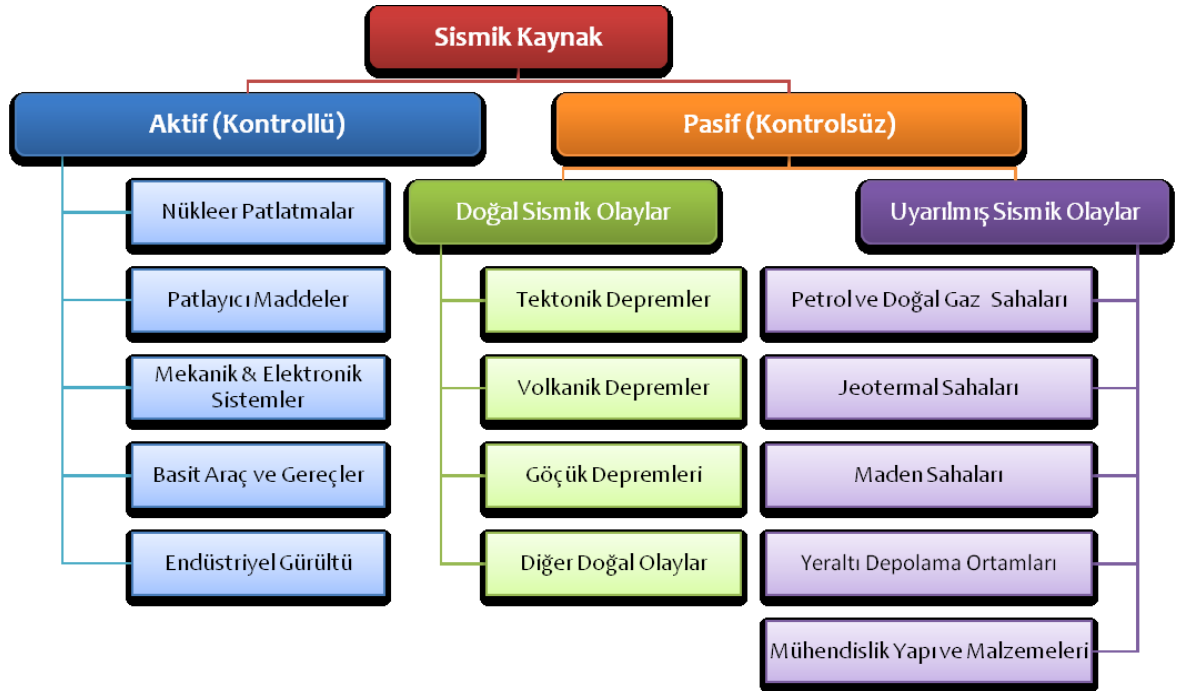
Bir çok elastik katı malzeme gerilme kuvvetleri altında deformasyona uğrarken, aynı zamanda içerisinde çatlak ve kırık sistemleri gelişir ve buna bağlı olarak da elastik (sismik) dalga yayılımı gerçekleşir. Deformasyonun ve sismik dalga yayılımının boyutu, malzeme özelliklerine bağlı olduğu kadar gerilme kuvvetlerinin büyüğüne de bire bir bağlıdır. Araştırma boyutu ve niteliklerinin farklılığı, meydana gelen bu elastik dalga yayılım olayının farklı disiplinler tarafından farklı terimlerle anılmasına yol açmıştır. Bu terimlerden bazıları şunlardır (Hardy, 2003):

- Mikrodeprem etkinliği (Microearthquake activity),
- Mikrosismik etkinlik (Microseismic activity),
- Pasif sismik etkinlik (Passive seismic activity),
- Ses yayılımı (Acoustic emission),
- Sismik ses etkinliği (Seismic-acoustic activity),
- Düşük seviyeli gürültü (Subaudible noise)

- Elastik şok (Elastic shock),
- Elastik yayılım (Elastic radiation)

Boyutları ne olursa olsun bir elastik dalga, Şekil 1'de gösterildiği gibi aktif (kontrollü) veya pasif (kontROLSÜZ) olmak üzere iki farklı sismik kaynaktan yayılabilmektedir. Aktif sismik kaynaklar genellikle yeri, zamanı ve büyüklüğü insan tarafından kontrol edilebilen kaynaklardır. Çeşitli kimyasal patlayıcılar, mekanik sistemler veya basit araçlar bu tür kaynak kapsamına girmektedir.

Pasif sismik kaynaklar ise tamamiyle kontrol dışı gelişen kaynak türleridir. Bunların yeri, zamanı ve büyüklüğü kesinlikle önceden bilinmemektedir. Pasif sismik kaynaklar, tektonik, volkanik veya yeraltı göçükleri gibi doğal etkenlere bağlı olarak meydana gelen sismik olaylar (depremler) olabileceği gibi, insan kaynaklı nedenlere bağlı olarak oluşan yarı doğal uyarılmış sismik olaylar şeklinde de gözlenebilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Sismik Olaylar

Aletsel büyüklükleri çok küçük olan ( $M < 3.0$ ) ve mikrosismik olarak adlandırılan bu uyarılmış olaylar, mekanizmaları açısından depremlere benzerken, oluşum şekilleri açısından depremlerden ayrılmaktadır. Çünkü ortam, yapı ya da malzeme denge durumunda ve gerilme değişimi yaratacak kuvvetlerin etkisinden uzakta iken bu tür mikrosismik olaylar

oluşmayacaktır. Ancak, ne zaman ki ortam, yapı veya malzeme gerilme kuvvetlerinin etkisi ile zorlanırsa, o zaman mikrosismik etkinlik gözlenmeye başlanacaktır. Mikrosismik olayların oluşum nedenleri değişik uygulama alanları için farklı olmaktadır. Örneğin kapalı veya açık maden ocaklarında yapılan kazı çalışmaları, patlatmalar veya çalışan iş makinaları, maden sahasında gerilme farklılığı yaratarak mikrosismik etkinliğe yol açabilmektedir. Buna karşın petrol ve doğal gaz sahalarında ise hidrolik yolla çatlak oluşturma, sıvı enjeksiyonu veya akışkan çekimi gibi rezervuara ilişkin uygulamalar, mikrosismik olaylara neden olmaktadır. Benzer şekilde jeotermal sahalarda da yine rezervuara yönelik akışkan hareketleri (enjeksiyon ve reenjeksiyon) küçük ölçekli sismik etkinliğe yol açmaktadır. Bu olayların sayısı, büyüklüğü, zamansal ve uzamsal dağılımı, üretimle doğrudan ilişkili olan rezervuar kayaçlarının tepkisinin bir ölçüsüdür.

### **3. Mikrosismik İzleme Yöntemlerin Uygulama Alanları**

Bugüne kadar yapılan çalışmalar, uygulama alanlarına göre mikrosismik izleme yöntemlerinin iki ana sınıfa ayrılabilceğini göstermiştir (Şekil 2). Bunlar; jeolojik alanlar ve mühendislik yapı veya malzemelerini kapsayan alanlardır. Şekil 2’de gösterildiği gibi bu iki uygulama alanı da kendi içerisinde iki alt gruba ayrılmaktadır. Jeolojik alanlar, doğal ve yarı-doğal olarak; mühendislik yapı ve malzeme alanları, ise yapı ve labortavuar ortamı olarak sınıflandırılabilir. Herbir ortam için yapılan mikrosismik gözlem çalışmalarının amaçları ve uygulama şekilleri birbirinden farklıdır.

Doğal jeolojik alanlarda yapılan mikrosismik izleme yöntemleri daha çok tektonik hareketlere ve volkanik etkilere bağlı oluşan mikrodepremlerin gözlenmesi amaçlıdır. Bölgenin yerel depremselliğini, fay karakterini veya volkanik etkinliği belirlemeye yöneliktir. Doğal ortam içerisinde bulunan ve ekonomik değeri olan yeraltı kaynaklarının insan müdahalesi ile çıkartıldığı ve bu etkiyle mikrosismik olayların meydana geldiği sahalarda ise yarı-doğal jeolojik alanlar olarak adlandırılır. Petrol ve doğalgaz sahaları, kapalı ya da açık maden ocakları, jeotermal sahalarda, yeraltı depolama ortamları bu tür alanlara örnek olarak verilebilir. Bu tür sahalarda mikrosismik izleme yöntemlerinin uygulanmasındaki temel amaç, yeraltı kaynaklarının verimliliğini arttırmak ve karşılaşılması olası riskleri belirleyerek önlem almaya yönelik çalışmalar yapmaktır. Barajlar, köprüler, tüneller, şevler, ağır sanayi işletmeleri, rüzgar santralleri, demiryolu hatları, petrol/gaz depoları, uçak ve gemi gövdeleri, boru hatları gibi mühendislik yapıları ise mikrosismik izleme yöntemlerinin uygulandığı diğer alanlardır. Bu tür alanlarda yöntemin uygulama amacı ise hem yapının yakın çevresinde hem de kendi

içerisinde yaratmış olduğu mikro ölçekli çatlak ve kırık sistemlerinin belirlenmesidir. Laboratuvar ortamları, mirosismik izleme (ses yayılımı) yöntemlerinin uygulandığı en küçük alanlardır. Bir deneysel yapı malzemesinin gerilme kuvvetleri altında dayanıklılığını test etmek amacı ile bu tür izleme yöntemleri kullanılmaktadır.



Şekil 2. Mikrosismik izleme yöntemlerinin uygulama alanları

#### 4. Mikrosismik İzleme Yöntemlerinde Kullanılan Ekipman

Bu yöntemler bir tür dinleme ve izleme yöntemi olduğundan herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaz. Elastik dalgayı yaratan kaynak, doğal olarak veya uyarılarak kendiliğinden yer, yapı veya malzeme içerisinde oluşmaktadır. Geriye kalan, ortam içerisinde oluşan mikrosismik olayları algılamak ve kaydetmektir. Mikrosismik çalışmalarda uygun sensör ve kayıtçıların kullanılması sağlıklı ve doğru bir izleme yapmak için önemlidir. Uygulama alanlarına göre algılayıcıların teknik özellikleri, boyutları ve sayıları değişkenlik gösterebilir. Sensör seçiminde göz önünde tutulması gereken en önemli nokta, sensör frekans aralığının hedef sinyal frekansına uyumluluğu ve sensörlerin tepki frekans özellikleridir.

Mikrosismik izleme yöntemlerinde incelenen sinyallerin frekans aralığı 0.1 Hz'den 500 KHz'e kadar değişkenlik göstermektedir. Bu sinyallerin frekansı özellikleri, kaynak biçimi ve kaynak alıcı arası uzaklığa göre değişkenlik göstermektedir.

Genellikle jeolojik alanlarda yapılan mikrosismik izleme çalışmalarında frekans aralığı 0.1 –

500 Hz olan sensörler kullanılmaktadır. Bunların üç-bileşenli ve yüksek duyarlılıkta olması veri kalitesi ve çeşitliliği açısından önemlidir. Bu sensörler tüm alanı kapsayacak şekilde yüzeye, kuyu içine ve/veya maden galerilerine yerleştirilmektedir. Tüm sistem kısa veya uzun dönemli çalışacak şekilde ve istenirse gerçek-zamanlı veri aktarımı yapabilecek şekilde kurulmaktadır. Sensörler isteğe bağlı olarak merkezi kayıtçı birimi ile kablolu veya kablosuz iletişim kurabilecek şekilde yerleştirilebilir.

Mühendislik yapı ve malzemelerinin mikrosismik özelliklerinin araştırılmasında ise daha yüksek frekanslı sensörler kullanılmaktadır. Frekans bandının üst sınırı 1 MHz kadar çıkabilmektedir. Burada sensör seçimi incelenecek hasar tipine ve uygulama şekline bağlıdır. Aynı şekilde sensör sayısı da yine uygulama şekline ve inceleme alanının genişliğine göre değişmektedir.

## **5. Mikrosismik İzleme Yöntemlerinde Analizler**

Herhangi bir araştırma alanında (maden sahaları, petrol, doğal gaz, jeotermal alanları, mühendislik yapı veya malzemeleri gibi) mikrosismik olayların analizi ile son derece önemli bilgilere ulaşılmaktadır. Örneğin mikrosismik olayların uzamsal ortamdaki dağılımı, konumlarının zamana bağlı olarak değişimi, büyüklük ve sıklık ilişkisi (Gutenberg-Richter ilişkisi), bu olaylara ait odak mekanizması çözümlerinden etkin gerilme ve basıç yönlerinin tayini, araştırma alanı ve yakın çevresinin 3-B tomografik sismik hız yapısı ve buna bağlı olarak kayaçların litolojik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, yapı ve malzeme içerisindeki zayıflık zonlarının tespiti vb. gibi bulgular ortaya konulmaktadır. Bu tür bilgilerin anlık gözlemleri ve parametrik değişimlerin tespiti olası risklere karşı önlemlerin alınmasında son derece önemli olmaktadır.

Bu tür çalışmaların ilk aşamasını veri toplama işlemleri oluşturur. Sensörlerden gelen verinin belirli bir düzen içerisinde anlık (gerçek zamanlı) olarak kaydedilmesi gerekmektedir. İstasyonlardan anlık olarak gelen veriler çoğunlukla otomatik analiz edilse de bu verinin uzman kişilerce gözden geçirilmesi her zaman önemlidir. Ancak, zaman zaman istasyonların bulunduğu ortam koşulları nedeni ile kaydedilen veri hayli gürültülü bir durumda olabilir. İçerisinde bir mikrosismik olay olduğu düşünülen kayıt uygun bir süzgeç operatörü ile süzgeçlenerek, sinyalin baskın duruma getirilmesi gerekir.

Mikrosismik yöntemlerin ikinci aşamasını ise analiz çalışmaları oluşturmaktadır. Bu

çalışmalarda mikrosismik olaylara ait şu tür analizler yapılabilmektedir:

- a) *Konum belirleme:* Mikrosismik izleme yöntemlerinin ilk analiz adımını, inceleme alanı içerisinde oluşan mikrosismik olaylarının konumlarının belirlenmesi oluşturmaktadır. Uygun algoritmalar yardımı ile hesaplanan koordinatlar, ortam içerisindeki gerilme değişimlerinin meydana geldiği bölgeleri vermektedir. Böylece, zayıflık zonlarını işaret eden çatlak-kırık sistemleri belirlenebilmektedir.
- b) *Büyüklik hesaplama:* Her bir sismik olayın Richter ölçeğine göre büyüklüğünün hesaplanmasıdır. Büyüklik, ortam içerisindeki enerji boşalımının da bir göstergesidir. Risk belirleme de kullanılacak olan önemli parametrelerden biridir. Genellikle mikrosismik olayların büyüklükleri  $-3 < M < 3$  arasında yer alır.
- c) *Odak mekanizması çözümleri:* Bu analiz çalışması, depremlere ait odak mekanizması (fay düzlemi) çözümlerinde kullanılan yöntemlerle yapılmaktadır. Böylece, mikrosismik olayın meydana geldiği kırık-çatlak sistemin kaynak parametreleri hesaplanarak çatlak-kırık sisteminin doğrultusu, eğimi, eğim açısı ve faylanma türü belirlenebilmektedir. Basınç (P) ve çekme (T) eksenlerinin doğrultuları kolayca tespit edilebilmektedir.
- d) *Anizotropi ve S-dalgası ayrışması:* Ortam içerisindeki heterojenlikten kaynaklanan elastik dalga yayılımındaki farklılıkların belirlenmesine yönelik analiz türüdür. Bu analiz yönteminde de etkin faktörler ortam içerisindeki çatlak-kırık sistemlerinin doğrultuları, sıklık dereceleri ve açıklık miktarlarıdır. Bu faktörler, ayrıca, S- dalgasının bileşenlerine ayrılmasına neden olarak önemli bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır.
- e) *Olasılık ve risk hesapları:* Sismolojide olduğu gibi, araştırma alanındaki mikrosismik olayların sayısı ve büyüklükleri gözününe alınarak Gutenberg-Richter bağıntısına göre bölge veya ortam için risk belirleme çalışmaları yapılabilmektedir. Ayrıca magnitüd-frekans ilişkisinden ortama ait, bir sismisite parametresi olan, b- değeri hesaplanabilecektir.
- f) *Gerilme analizi:* Çok sayıda fay düzlemi parametresinin kullanımı ile ortam içerisindeki etkin gerilme yönleri, yapılacak olan gerilme analizi ile belirlenebilecektir. Bu bilgi özellikle yarı-doğal jeolojik alanlarda yapılan mikrosismik izleme yöntemleri için oldukça önemlidir.
- g) *Tomografik görüntüleme:* Çok sayıda alıcının (>6) kullanıldığı ortamlar için uygulanabilen bir analiz türüdür. Böylece, ortam içerisine ait sismik hızlar 3-B olarak tespit edilebilecek ve ortamın yapısal ve mekanik özellikleri belirlenebilecektir.



## 6. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, tüm dünyada kullanımı giderek yaygılaşan mikrosismik izleme yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bu yöntemlerin kullandığı kaynak türünün kökeninden yöntemde kullanılan analizlere kadar her aşama bir özet halinde anlatılmıştır. Mikrosismik yöntemler, sismoloji biliminin uygulamalı kısmında yer alan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Son yıllarda birçok alanda kullanım yeri bulmuş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle doğal ortamlardan laboratuvar ortamına kadar ekonomik öneme sahip mühendislik çalışmalarında, kritik bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Gerilme değişimlerine bağlı olarak yer, yapı ve malzeme içerisindeki kırık yapılarının gelişimini zaman süreci içerisinde gözleyerek, üretim, risk, dayanıklılık gibi parametreler açısından değerlendirmek, mikrosismik yöntemlerin en büyük avantajıdır. Bu yöntemlerin tüm dünyada artan bir oranda farklı alanlarda kullanılması, yöntemin sürekli olarak gelişimine yol açmaktadır. Her geçen gün yeni analiz yöntemlerinin eklenmesi farklı bilinmeyenlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu tür yöntemler geliştikçe, deprem oluşum mekanizmasının anlaşılmasına ve önceden kestirilmesine yönelik yeni bulguların ortaya çıkarılacağı da açıktır.

## Kaynaklar

Baria, R., Majer, E., Fehler, M., Toksoz, N., Bromley, C., Teza, D., 2006. International cooperation to address induced seismicity in geothermal systems. In: Proceedings of the 31st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, 3 pp.

Baria, R., Michelet, S., Baumgärtner, J., Dyer, B., Nicholls, J., Hettkamp, T., Teza, D., Soma, N., Asanuma, H., Garnish, J., Megel, T., 2005. Creation and mapping of 5000 m deep HDR/HFR reservoir to produce electricity. In: Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, Paper 1627, 8 pp.

Beck, D., and Brady, B., 2002. Evaluation and application of controlling parameters for seismic

Bennani, M. and Homand, F., 2004. Coverage formations at the level of areas in which there is a sudden collapse hazard, Geoderis R2004/002.

Bollinger, L., Nicolas M. and Marin, S., 2010. Hydrological triggering of the seismicity around a salt diapir in Castellane, France, Earth Planet. Sci. Lett., doi:10.1016/j.epsl.2009.11.051, 290, 20-29.

Chiarabba, C. and Moretti, M., 2006. An insight into the unrest phenomena at the Campi Flegrei caldera from Vp and Vp/Vs tomography, Terra Nova, 18, 6, 373-379.

Contrucci, I., Klein, E., Bigarre, P., Lizeur, A., Lomax, A., and Bennani, M., 2009, Management of Post-mining Large-scale Ground Failures: Blast Swarms Field Experiment for Calibration of Permanent Microseismic Early-warning Systems, *Pure Appl. Geophys.*, 167, 43-62, doi:10.1007/s00024-009-0005-4

Couffin, S., Bigarre, P., Bennani, M., Josien, J. P., 2003. Permanent Real Time Microseismic Monitoring of Abandoned Mines for Public Safety. *Fields Measurements in Geomechanics* (ed. Myrvoll), (Sweets & Zeitlinger, Lisse 2003) pp. 437–444.

De Matteis, R., Vanorio, T., Zollo, A., Ciuffi, S., Fiordelisi, A., and Spinelli, E., 2008. Three-dimensional tomography and rock properties of the Larderello-Travale geothermal area, Italy, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168, 37-48.

Duncan, P. and Eisner, L., 2010. Reservoir characterization using surface microseismic monitoring.

Eisner, L., Hulsey, B. J., Duncan, P., Jurick, D., Werner, H., and Keller, W., 2010. Comparison of surface and borehole locations of induced microseismicity. *Geophysical Prospecting*, doi: 10.1111/j.1365-2478.2010.00867.x

events in hard-rock mines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39, 633–642.

Filimonov, Y., Lavrov, A., and Shkuratnik, V., 2005. Technical Note: Effect of Confining Stress

Ge M., Mrugala, M. and Iannacchione, A.T., 2009. Microseismic Monitoring at a Limestone Mine. *Geotech. Geol. Eng.*, 27, 325–339, doi:10.1007/s10706-008-9234-z. *Geophysics*, 75, No. 5, pp. 75A139–75A146; doi:10.1190/1.3467760.

Gunasekera, R. C., Foulger, G. R., and Julian, B. R., 2003. Reservoir depletion at the Geysers geothermal area, California, shown by four-dimensional seismic tomography, *Journal of Geophysical Research*, 108 (B3), 2134, doi:10.1029/2001JB000638.

Hardy, H. R., 2003. Principles, Techniques, and Geotechnical Applications, vol. 1 ,in: Taylor, Francis, Editors , *Acoustic emission/ microseismic activity*, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands.

Iannacchione A. T., Marshall, T. E., Burke, L., Melville, R., and Litsenberger, J., 2003. Safer mine layouts for underground stone mines subjected to excessive levels of horizontal stress. *Min. Eng. (April)*, 25–31.

Iannacchione, A., Esterhuizen, G., Bajpayee, T., Swanson, P., and Chapman, M., 2005. Characteristics of mining-induced seismicity associated with roof falls and roof caving events. 40th U.S. Rock Mechanics Symposium, Anchorage, AK, American Rock Mechanics Association.

Kenedi, C. Shalev, E., Lucas, A., and Malin, P., 2010. Microseismicity and 3-D Mapping of an Active Geothermal Field, Kilauea Lower East Rift Zone, Puna, Hawaii. World Geothermal Council 2010, Bali, 25-30 April.

Klein, E., Nadim, C., Bigarre, P., and Dunner, C., 2008. Global monitoring strategy applied to ground failure hazards (10th Int. Symposium on Landslides & Engineering Slopes - Xi'an, China.

Li, T., Cai, M.F., and Cai, M., 2007. A review of mining-induced seismicity in China, *Internat. J. Rock Mech. Mining Sci.* 44 (8), 1149–1171.

Majer, E. L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Boomer, J., Smith, B., and Asanuma, H., 2007. Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics*, 36, 185-222.

Maxwell S., Rutledge, J., Jones, R., and Fehler, M., 2010. Petroleum Reservoir Characterization Using Downhole Microseismic Monitoring. *Geophysics*, 75 , No. 5, 75A129-75A137; doi:10.1190/1.3477966.

Maxwell, S. C., and Urbancic, T. I., 2001. The role of passive microseismic monitoring in the instrumented oil field: *The Leading Edge*, 20, 636-639.

Maxwell, S. C., Du, J., Shemeta, J., Zimmer, U., Boroumand, N., and Griffin, L., 2008. Passive seismic and surface deformation monitoring of steam injection. *First Break*, Vol 26, pp 53-59.

McKinnon, S. D., 2006. Triggering of Seismicity Remote from Active Mining Excavations, *Rock Mech. Rock Engng.* 39 (3), 255–279, doi:10.1007/s00603-005-0072-5.

Mossop A.P., and Segall, P., 2004. Induced seismicity in geothermal fields II – Correlation and interpretation at The Geysers. Submitted to *J. Geophys Res* July 2000.  
on Acoustic Emission in Ductile Rock. *Strain*, 41: 33-35.

Potvin, Y., and Hudyma, M., 2001. Seismic monitoring in highly mechanized hardrock mines in Canada and Australia. In: Van Aswegen, G., Ortlepp, D., Durrheim R. (eds), *The Fifth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 267–280.

Reshetnikov A., Kummerow J., Buske S., and Shapiro, S.A., 2010. Microseismic imaging from a single geophone: KTB. *SEG Expanded Abstracts* 29, 2070, doi:10.1190/1.3513252.

Sarkar, S. and Toksöz, N., 2008. Location of and Monitoring with Induced Earthquakes in Oil and Gas Fields. 70th EAGE Conference & Exhibition, Rome, Italy.

Senfaute, G., Abdul-Wahed, M. K., Piguet, J. P., and Josien, J. P., 2000. Qualification

of the microseismic monitoring technique applied to the risk of collapse or iron mines (Eurock 2000, Aachen 2000). pp. 597–602.

Sze, E. K-M., 2005. Induced seismicity analysis for reservoir characterization at a petroleum field in Oman, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Tan, J. F., Bland, H. C., and Stewart, R. R., 2006. Passive seismic reservoir monitoring techniques applied to heavy oil production: CREWES Research Report, 18, University of Calgary.

Trifu, C-I., and Shumila, V., 2010. Microseismic Monitoring of a Controlled Collapse in Field II at Ocnele Mari, Romania, *Pure and Applied Geophysics*, 167, 1-2, pp. 27-42, doi:10.1007/s00024-009-0013-4.