

YERALTINI “GÖRMEK”

Dağları, ovaları, ormanları, denizleri ve akarsularıyla yeryüzü, çoğunu ayrıntılı bir biçimde görebildiğimiz çeşitli güzelliklerle dolu. Ama ya yeraltı? Yeraltının nasıl olduğunu göremiyoruz. Oysa, gezegenimizin jeolojik tarihinin büyük bir bölümü, göremediğimiz, dokunamadığımız, ulaşamadığımız, hatta örnek bile toplayamadığımız yeraltındaki kayalarda saklı. Yerbilimciler, yeryüzünün milyonlarca yıl boyunca nasıl bir değişim geçirdiğini anlayabilmek için genellikle açık arazilerdeki ya da dağlık bölgelerdeki kayaları inceliyor, örnek topluyorlar. Yeraltının yapısına ilişkin bilgileriye yerin altındaki madenlerden ya da yerin derinliklerine yapılan sondajlardan edinebiliyorlar. Ne var ki madenler ve sondajlar, genellikle yüzeye yakın bölümlere ilişkin veri sağlayabiliyor; daha derin alanlar bir sır olarak kalıyor. İşte bu nedenle, yerbilimciler, yeraltını "görebilmelerini" sağlayan bir yöntem gereksinim duyarlar...

Bu yöntem, deprembilimcilerin (sismolog) çalışmaları örnek alınarak geliştirilmiş. Depremler, bir depremin merkez üssünü belirlemek için, yarattığı deprem dalgalarının (sismik dalgalar) hareketini baz alırlar. Enerji dalgalarına da benzetebileceğimiz deprem dalgalarının bir bölümü, yüzeyden, tıpkı bir çakıltaşının göle fırlatılmasıyla gölde oluşan su dalgaları gibi hareket eder. Deprem dalgalarının bir bölümüyse yerin altından her yöne doğru, tıpkı havadaki ses dalgaları gibi yol alır. Bunlar, yeraltındaki kayaların özelliğine bağlı olarak farklı hızlarda ilerlerler, hatta farklı kayalar arasındaki geçişlerde farklı biçimde geri yansıtılır ya da kırılmaya uğrarlar; bu özellikleriyle de yeraltındaki kayalar katmanlarının birbirleriyle olan ilişkilerine ve ne tür kayaların bulunduğuyla ilişkin ayrıntılı bilgi verirler.

Yerbilimciler, depremler sırasında farklı tipte deprem dalgalarının yayıldığını yirminci yüzyılın başında farketmişler. Bunların yeraltında nasıl ilerlediklerini saptayabilmiş ve yeraltında farklı yollar izleyen deprem dalgalarının

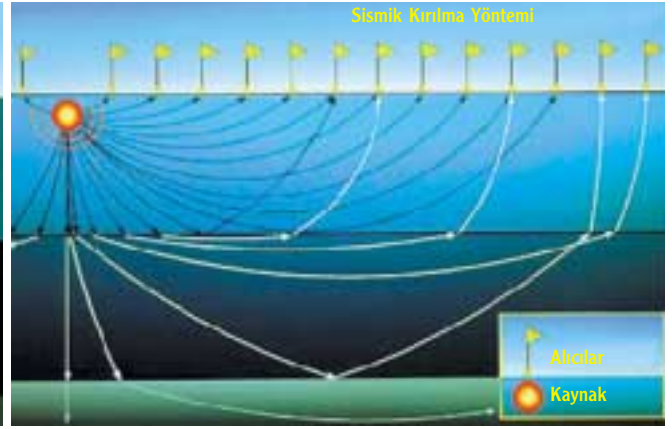
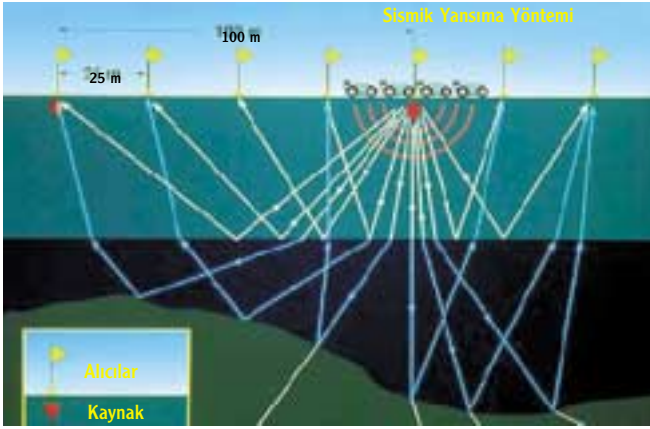
ne kadar sürede sismometreye ulaştıklarını kaydetmişler. Dünyanın iç yapısının nasıl olduğunu merak eden bu araştırmacılar, deprem dalgalarının verdiği titreşimlerden (sinyallerden) yararlanarak bu yolla dünyanın merkezindeki çekirdekle manto katmanları arasındaki sınırı belirleyebildiler.

Günümüzde yerbilimciler, yeraltının yapısını öğrenmek, maden yataklarının varlığını belirlemek, genellikle de doğal

gaz ve petrol yataklarını aramak amacıyla, yapay sarsıntı yaratarak deprem dalgaları oluşturuyorlar. Sismometre gibi çalışan alıcılar aracılığıyla da dalgaların ne zaman, nereye ulaştıklarına ilişkin veri topluyorlar. Daha sonra, topladıkları verileri değerlendirerek pek çok ipucu elde ediyorlar, hatta yüzeye yakın kayalar katmanlarının haritasını çıkarabiliyorlar. Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki ve bilgisayar yazılımlarındaki önemli gelişmeler, bu tür çalışmaların yapılmasına olanak sağlıyor. Jeofizikğin bir dalı olan araştırma sismolojisi, petrol yataklarının, jeotermal kaynakların, yeraltı suyunun, arkeolojik kalıntıların bulunması, mühendislik çalışmaları için jeolojik bilgi toplanması amacıyla yapay olarak oluşturulmuş deprem dalgalarından yararlanıyor. Ayrıca fizik ve jeoloji kurallarının gözönünde bulundurulmasıyla yeraltındaki kayalar tiplerinin yapısı ve dağılımına ilişkin veriler sağlanıyor.

Karada yapılan sismik ölçümlerde, bir "titreşim aracı" yapay deprem dalgaları yaratır. Bunların titreşimleri alıcılara (jeofon) ulaşır ve elektriksel atımlara dönüştürülür. Birbirlerine kablolar ya da uydusu sistemiyle bağlı olan alıcılardaki bu veriler, bir "kayıt aracı" tarafından kaydedilir ve işlenir.





Sismik dalgalar, oluştukları patlama anından, titreşimleri bir sismometre tarafından kâğıda dökülene kadar, yeraltındaki farklı kayaç katmanları arasındaki sınırlarda ya yansımayla uğrarlar (soldaki resim) ya da farklı katmanlara geçişlerde kırılmaya uğrayarak ilerlerler.

Deprem Dalgalarının Sağladıkları

Araştırma sismolojisi yöntemi, dünyanın içinden geçen ve özellikleri yukarıda açıklanan deprem dalgalarının (karışıklığa yer vermemek için yazının bundan sonraki bölümünde "sismik dalgalar" tanımlaması kullanılacaktır) ölçümüne dayanıyor. Sismik dalgaların oluşturulması için yer sarsıntısına yol açan patlayıcılar ya da başka enerji kaynakları kullanılıyor. Dalgaların yol açtığı yer titreşimlerini kaydetmek içinse, yönleri genellikle sarsıntının yaratıldığı kaynağa doğru düz doğrultuda dizilmiş olan sismometrelerden ya da jeofon adı verilen alıcılardan yararlanılıyor. Çalışma sırasında önce, yapay olarak yaratılan sarsıntıyla oluşan sismik dalgaların yayılması sağlanıyor. Yayılan dalgaların yol açtığı titreşimler jeofonlara ulaşıyor. Jeofonlar, dalga hareketlerini elektriksel atımlara dönüştürüyor. Bunlardan elde edilen veriler, genellikle sayısal olarak bilgisayarda işlenmek üzere, manyetik bantlara kaydediliyor. Bu veriler elde edildikten sonra jeofizikçiler, sismik dalgaların oluşumuyla bunların titreşimlerinin jeofonlara ulaşması arasında geçen süreyi ölçüyorlar.

Titreşimlerin değişik jeofonlara ulaşma sürelerinden ve dalgaların yayılma hızından yola çıkan jeofizikçiler, sismik dalgaların izledikleri yolları da bulabiliyorlar. Dalgalar iki farklı şekilde yol izliyor: dalganın önce yerin derinliklerine doğru yol alıp bir noktada yüzeye

geri yansıtıldığı "yansıtılmış yol" (burada dikey bir yol izlenir); bir de, izlenen yolun büyük bir bölümünün iki kayaç katmanı arasından geçtiği ve neredeyse yatay olduğu, "kırılmaya uğramış yol". Dalgaların izlediği her iki yol biçimi, yerin altında yol aldıkları süre, kayaçların fiziksel özellikleri ve kayaç katmanlarının derinliklerine bağlı. Bu sayede jeofizikçiler, yerin yapısını ayrıntılı bir biçimde öğrenmiş oluyorlar.

Sismik araştırma yöntemi, buraya kadar anlatılan biçimiyle basitmiş gibi görünse de, aslında oldukça karmaşık. Jeofizikçiler, bu yöntem sayesinde yüzey altının üç boyutlu görüntüsünü ya da daha açık bir deyişle, belirli bir bölgenin milyonlarca yıllık evrimini tüm ayrıntılarıyla gösteren bir jeolojik harita oluşturabiliyorlar. Özellikle petrol ve doğalgaz aramalarında bu tür haritaların hazırlanması, jeofizikçilere büyük yarar sağlıyor.

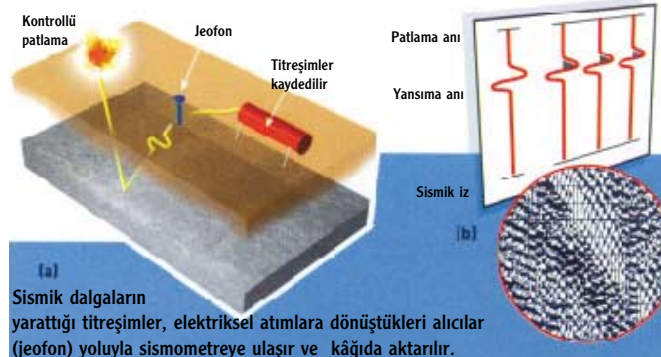
Petrol ve doğalgaz, yeraltının derin kısımlarında, gözenekli ve geçirgen kayaçların bulunduğu yerlerde birikir. Bu tür kayaçların tanecikleri arasında, suyun ya da başka sıvıların geçebileceği, çok küçük boşluklar vardır.

Hidrokarbonlar, plankton artıkları gibi çeşitli organik maddeler bakımın-

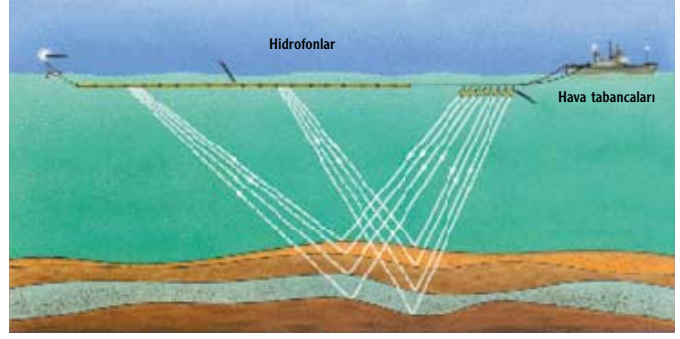
dan zengin çamurlu tortullar çökeliş, basınç altında sıkıştığında oluşur. Bunun sonucunda, su sıkışıp kaldığı gözeneklerden dışarı sızar ve çamur yavaş yavaş kayaya dönüşmeye başlar. Isı ve basınç, organik artıkları hidrokarbon moleküllerine dönüştürür. Bu moleküller, yavaş yavaş kayacın içindeki küçük gözeneklerden dışarı sızar. Üstteki tortulların ağırlığı, oluşan doğalgaz ya da petrolün geçirgen olmayan bir katmana rastlayana dek yükselmesine yol açar.

Petrol ve doğalgaz aramalarında yaygın olarak, sismik dalgaların yaklaşık dikey bir yol izleyip belli bir derinlikte geri yansıtıldığı bir yöntem izleniyor. Buna yansıma sismolojisi deniyor. Bu yöntemde, titreşimlerin kaynağıyla alıcı birbirlerine yakın konumdadır. Alıcıya ulaşan titreşimler, yeraltına yaklaşık dikey doğrultuda indikten sonra bir katmandan yansıtılarak yeniden yüzeye ulaşan titreşimleridir. Bu yöntemle yapılan araştırmaların en basiti, bir sarsıntı kaynağından belirli sayıda sismik dalganın gönderilmesini ve bunların geri yansıtılmasından dolayı oluşan titreşimlerin yüzeyde alıcılar tarafından toplanmasını içeriyor. Bu tür sismik araştırmalarda, belirli aralıklarla dizilmiş yüzlerce, hatta binlerce alıcı kullanılır.

Jeofizikçiler, karada yürüttükleri çalışmalarda, sismik dalgalar oluşturmak amacıyla ya fazla derin olmayan bir sondaj deliğinde kontrollü bir patlama yaratırlar, ya da titreşim yaratan bir kamyondan yararlanırlar. "Vibroiseis" adı verilen kamyonun kullanıldığı yöntemde, kamyonun bir parçası olan büyük bir metal blok kamyo-



Sismik dalgaların yarattığı titreşimler, elektriksel atımlara dönüştükleri alıcılar (jeofon) yoluyla sismometreye ulaşır ve kâğıda aktarılır.



Gemilerin farklı yönlerde doğru daha rahat hareket etmesi nedeniyle, sismik araştırmaların denizlerde yapılması daha kolaydır, ayrıca jeofizikçiler, karada yaptıkları çalışmalardan daha fazla veri elde ederler. Gemilere bağlı bulunan "hava tabancalarının" oluşturduğu güçlü dalgalar deniz tabanına çarparak burada sismik dalgalar yaratırlar. Bunlar, katman yüzeylerinden yansyarak, titreşimleri gemi tarafından sürüklenen, basınç değişimlerine duyarlı alıcılara (hidrofonlara) ulaşır.

nun yükünü taşıyacak biçimde yere indirilir. Daha sonra, kamyon, uygun sismik dalgalar oluşturacak biçimde birkaç saniye boyunca titreşimlerin oluşmasını sağlar.

Yüzeye ulaşan titreşimlerin kaydedilmesinde, yalnızca dikey dalga hareketlerini algılayan jeofonlardan başka, bir de genişbant sismometreleri kullanılabilir. Bunlar, daha geniş bir frekans aralığını algılayabildikleri için çok daha fazla veri sağlıyorlar. Hatta, bu veriler sayesinde, yeryüzündeki değişimler, yani bir bölgenin jeolojik tarihi üçboyutlu görüntüler oluşturularak bulunabilir. Bu tür çalışmalarda, çoğu kez, yüzlerce, hatta binlerce sismometre kullanılıyor.

Denizlerde yürüttükleri çalışmalarda jeofizikçiler, yapay sismik dalgalar yaratmak için ya patlayıcılardan yararlanırlar ya da denizin derinliklerine doğru büyük miktarlarda hava kabarcıkları püskürten, böylece güçlü bir basınç dalgasının oluşmasına yol açan bir aygıt kullanırlar. Basınç dalgası, deniz tabanına ulaştığında bir sismik dalganın meydana gelmesine neden olur. Deniz tabanından geri yansıtılan titreşimler, araştırma gemisinin sürüklediği, basınç değişimlerine karşı duyarlı olan ve hidrofon adı verilen basit sismometreler tarafından algılanır.

Araştırma sismolojisinde, karada ya da denizde yapılan ölçümler sırasında alıcılara ulaşan ilk sinyal, yeryüzeyinden ya da deniz tabanından doğrudan alıcılara yansıtılan titreşimlerdir. Bunun ardından kaydedilen sinyal, yeraltındaki yapının ilk değişime uğradığı sınırdan (örneğin, kiltaşından kumtaşına geçiş gibi) yansıtılan titreşimdir. Bunu, daha derin katmanlar izler. Sismik dalgaların, farklı tipteki kayaç katmanlarından ne kadar hızlı ve ne kadar süre-

de geçtiklerini hesaplayabilen jeofizikçiler, böylece sismik dalgaların yol aldığı mesafeleri saptayabiliyor ve yeraltındaki kayaç katmanlarının bir modelini oluşturabiliyorlar.

Jeofizikçiler, bu tür modellerin, yeryüzündeki birçok bölge için yapılmış olması nedeniyle şanslılar. Modeller, sismik araştırmaların gerçekleştirildiği noktalarda uygulanan sondajlar yardımıyla geliştirilmiş. Sondajlar sayesinde tespit edilen kayaç katmanlarının özelliklerine bakarak bunların sismik dalgaları nasıl etkileyebileceği ve hangi katmanların güçlü yansıtıcılar olduğu belirlenebiliyor. Daha sonra bu bilgiler, sismik araştırmada elde edilen bulgularla karşılaştırılıyor.

Ölçümlerden elde edilen sayısal verilerin yorumlanması, birçok sayıyla boğuşmak anlamına gelir. Sismik araştırmaların çoğu iki-boyutlu düzlemler boyunca gerçekleştiriliyor. Düzlemler boyunca toplanan verilerden, jeolojik kesitlere benzetebileceğimiz sismik profiller oluşturuluyor. Sismik yansıma profillerinin çoğu 6 km'lik bir derinliği kapsıyor, çünkü petrol ve doğalgaz genellikle bu derinliklerde yer alıyor.



Sismik profillerin kesinliği, sismik dalgaların dalgaboyuna bağlı. Ancak dalgaboyu ne olursa olsun, dörtte birinden daha küçük ayrıntıları yakalamak olanak dışı. Yeraltından geçen sismik dalgaların dalgaboyu genellikle 500 metre dolayında. Bu nedenle araştırma amaçlı ölçümlerde 200 metre dolayındaki bir kesinlik sınırı değerlidir. Ölçümlerin yüzeye yakın yapıldığı, ya da alıcıların birbirlerine yakın konumda olacak şekilde yerleştirildiği durumlarda daha fazla ayrıntı yakalanabilir.

Dünyanın Manto Katmanına Doğru

Sismik ölçümler, özellikle de dünyanın ulaşılması olanaksız derinliklerinin araştırılmasında önemli gelişmelere yol açtı. Jeofizikçiler, sismik dalgaların yardımıyla manto katmanıyla çekirdek arasındaki geçişi ortaya koyabildiler. Bu işlem, olağan ölçümlere oranla çok daha fazla enerji ve ekipman gerektiriyor. Örneğin, dünyanın en derin kısımlarına ulaşabilecek sismik dalgaların yaratılması için, aynı anda, dört titreşim aracının 30 saniye kadar çalıştırmak gerekebilir. Ancak bugüne kadar yapılan derin sismik yansıma uygulamalarının çoğu denizlerde gerçekleştirildi. 1980'li yıllarda, bir grup İngiliz araştırmacının İngiltere açıklarında yürüttükleri çalışma sırasında yerkabuğuyla manto katmanı arasındaki sınır belirlenmiş, burada fayların oluştuğu saptanmıştı.

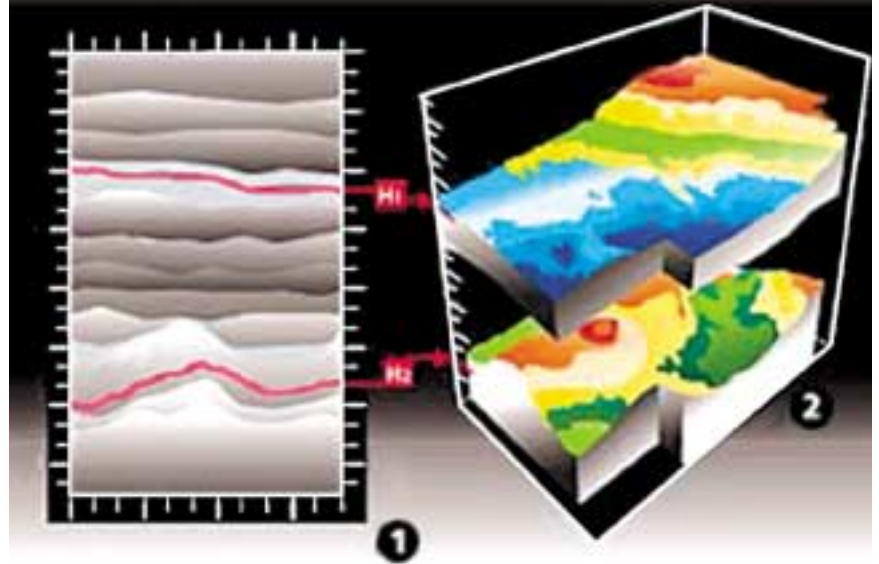
Derin sismik ölçümlerde, deprem oluşumundan sonra yeraltından geçen deprem dalgalarının kullanıldığı tomografi teknikleri uygulanır. Jeofizikçiler, sismometrelerini iyi veri elde edebilecekleri noktalara yerleştirirler. Elde edilen veriler, referans oluşturabilecek

bir modelle karşılaştırılır ve olağandışı bir durumun olup olmadığı saptanır. Derin sismik tomografilere model referans alınır, çünkü bu model, yer kabuğundan çekirdeğe, dünyanın farklı katmanlarının sismik hızlarına ilişkin en doğru bilgiyi verir. Bu teknik sayesinde, modelden farklı sismik hızlar gösteren bölgeler saptanabiliyor.

Sismik tomografinin en önemli bulgusu, okyanus levhasının kıta levhasının altına kaydığı dalma-batma bölgelerinde levhanın neredeyse çekirdeğe ulaşana dek, ayrı bir kayaç kütleleri olarak kaldığını göstermesiydi. Dalma-batma bölgesinde yerin derinliklerine doğru kayan levhanın bileşiminin, çevresini saran manto katmanının bileşiminden farklı olması nedeniyle sismik hızları da farklılık göstermişti.

Araştırma sismolojisi, çeşitli doğal rezervlerin arandığı araştırmalarda, ağırlıklı olarak, okyanusların kıyılara yakın bölgelerindeki yüzeye yakın tortul kayaç katmanlarının dizilimlerini ve konumlarını (stratigrafisini) inceler (örneğin, petrol ve doğalgaz, daha çok iki kıtanın tıpkı Kızıldeniz'de olduğu gibi, birbirinden ayrılmaya başladığı yerlerde oluşur ve birikir). Stratigrafi, yer bilimlerinin, yer katmanlarının hangi jeolojik tarihlerde ve hangi sırada oluştuklarını araştıran bir kolu. Sismik stratigrafiye, yer bilimcilerine, üst üste yığılmış farklı kayaç katmanlarının oluşturduğu bir "kayaç grubunun" ne tür ve hangi yapılaraya sahip kayaçlardan meydana geldiğini ve bunların hangi sırada çökelindiklerini saptama olanağı veriyor. Böylece yer bilimciler, bölgenin jeolojik tarihine ilişkin yorum yapabiliyorlar.

Yansıma yöntemiyle uygulanan sismoloji, doğalgaz ve petrol gibi doğal kaynakların aranması ve çıkarılmasında her ne kadar temel bir araç haline gelmişse de, petrol endüstrisi, derinlerdeki kayaçlara ilişkin daha fazla bilgi edinebilmek için bir başka yöntemden de yararlanıyor. "Kırılma sismolojisi" yönteminde kullanılan teknikler yansıma sismolojisi tekniklerine benziyor, ancak kırılma sismolojisinde kaynak ve alıcılar araştırılacak alanın derinliğine bağlı olarak birbirlerinden daha uzak konumda oluyorlar. Jeofizikçiler, bu yöntem sayesinde, yerin daha derinlerindeki katmanların yapısına ilişkin bilgiler elde edebiliyorlar. Yerin derinliklerine doğru yol alan bir sismik dalgası, farklı



Günümüzde, sismik araştırmalar sayesinde yeraltının üçboyutlu modelleri oluşturulabiliyor. Sismik dalgaların yarattığı titreşimlerin kaydedilmesinden elde edilen veriler, güçlü bilgisayarlar ve gelişmiş yazılımlar yardımıyla ikiboyutlu yeraltı kesitlerine dönüştürülüyor (1). Bunlar birleştirilerek sismik araştırmanın yapıldığı alanın üçboyutlu modeli elde edilebiliyor (2).

bir katmana ulaştığında "kritik açı"yla kırılarak, yoluna, bu katmanın içinden, üst katmana yakın olacak şekilde devam eder. Kritik açı, dalganın geçtiği her iki katmanın özelliklerine bağlıdır. Kırılma sismolojisi yöntemi, günümüzde çok önemli bir araştırma aracı olarak kabul ediliyor, çünkü bu yöntem, yaklaşık 2800 metre derinliğe sahip manto katmanına ulaşmaya olanak veriyor.

Kırılma sismolojisi, bundan başka, kayaçların doğasına ilişkin pek çok ipucu verir. Örneğin, tortul kayaçlar, bir sismik çalışmanın ortaya koyamayacağı şekilde ince tabakalıdır. Sismik dalgaların, ince tabakaların içinden geçerken farklı yönlerde dağılması, kayaçların özelliklerinin farklı olduğunu gösterir. Özellikle de petrolün iki kayaç tabakası arasında sıkışıp kalarak yayıldığı durumlarda bu yöntem önem kazanır.

Son yıllarda, bilgisayar ve yazılım teknolojisindeki gelişmeler, üçboyutlu sismik ölçümlerin yaygın olarak kullanılmasını sağladı. Modern ölçüm yöntemlerinde, deprem dalgaları birbiri ardına birkaç hatta gerçekleştirilir ve çok sayıda alıcı, yüzeye aynı anda, belirli bir düzen içinde yerleştirilir. Daha sonra da, bütün patlama noktalarını ve alıcıları içerecek şekilde sonuçlar işlenir. Bu yöntem, doğalgaz ve petrol rezervlerinin, çatallaşan fay hatları gibi karmaşık yapılar tarafından kontrol edildiği durumların anlaşılmasını sağlar.

Bu alandaki son teknolojik gelişmeler, yer bilimcilere yeni kolaylıklar sağlı-

yor. Yer bilimciler, üçboyutlu bölgesel haritalar sayesinde, çalıştıkları alanların farklı jeolojik zamanlardaki durumunu görebiliyorlar. Belirli bir jeolojik döneme ait olan her bir harita, yeraltının o dönemdeki durumunu gösterir. Üçboyutlu görüntüleme tekniği sayesinde, ekonomik değeri olan bir doğalgaz ya da petrol rezervinin biçimi ve boyutu görülebilir. Üçboyutlu sismik ölçümler, rezervlerin biçiminin gerçekçi görüntüsünü vermekle kalmıyor, yer bilimcilere petrol ya da doğalgazın dağılımı konusunda da fikir veriyor. Bundan başka, doğal kaynağın yeryüzüne çıkarılmasını önleyecek engellerin olup olmadığını yine bu tür teknikler gösteriyor. Doğal rezervi kesen faylar, kayaçların ufalanmasına yol açarken petrolün gözeneklerden geçmesini engelleyebiliyor. Bu da rezervin bir bölümünün kullanılamaması anlamına geliyor.

Güçlü bilgisayar teknolojileriyle destekli yürütülen sismik araştırma yöntemleri ve bunun yanı sıra jeofizikte yararlanılan başka yöntemler, yerin yapısını araştırmada ve çeşitli doğal kaynakların bulunup çıkarılmasında büyük kolaylıklar sağlıyor. Öyle görünüyor ki gelecekte yeraltına ilişkin bilmediğimiz pek çok olgu aydınlığa kavuşacak.

Ayşegül Yılmaz

Kaynaklar
Bowler, S., 'Seeing with seismics', *New Scientist*, 10 Kasım 2001.
Kearey, P. ve Vine, F., *Global Tectonics*, 2. baskı, Blackwell Science.
<http://basalt.geol.vt.edu/mgi/4174/node1.htm>.
<http://naturalgas.org/EXPLOR.HTM>
<http://baldrick.geoph.uq.edu.au>