

# Öz Yılmaz ile söyleşi: Jeofizik mühendisliği ve depremler üzerine

*Mühendis kimdir, özellikleri nelerdir? Mühendislik ne demektir? Jeoloji ile jeofizik arasındaki farklar nelerdir? Jeofizik mühendisliğinin faaliyet alanları nelerdir? Sismoloji neden önemlidir? Deprem nedir, nasıl oluşur? Faylarla neden ilgileniriz? Deprem tahmini konusunda bilimsel sorumluluk neyi gerektirir? Türkiye'nin deprem gerçeği nedir?*



**J**eofizik mühendisi Öz Yılmaz, Missouri Üniversitesi'nden 1970 yılında jeoloji esas, jeofizik yardımcı dalında lisans derecesini aldı. Stanford Üniversitesi'nden 1972 yılında kaya fiziği ve deprem sismolojisi üzerine ihtisas yaparak jeofizik yüksek lisans derecesini ve endüstride altı yıl çalıştıktan sonra, yine Stanford Üniversitesi'nden 1979 yılında arama sismolojisi (exploration seismology) üzerine ihtisas yaparak jeofizik doktora derecesini aldı.

Öz Yılmaz'ın birçok makalesinin yanı sıra dört kitabı yayımlandı: "Seismic Data Processing", "Seismic Data Analysis", "Engineering Seismology" ve "Land Seismic Case Studies".

Öz Yılmaz, 1991 yılında Amerikan Uluslararası Jeofizik Cemiyetinin (SEG) Virgil Kauffman Altın Madalyasıyla ve 1992 yılında Avrupa Yerbilimleri ve Mühendisleri Cemiyeti (EAGE) tarafından Conrad Schlumberger Yüksek Ödülüyle onurlandırıldı.

2002 yılında Avrupa Bilimler Akademisi üyeliğine ve 2011 yılında Amerikan Uluslararası Jeofizik Teşkilatının (SEG) onur üyeliğine seçildi. 2022 yılında Amerikan Ulusal Mühendislik Akademisi (NAE) üyeliğine seçildi. Yine 2022 yılında Amerikan Uluslararası Jeofizik Cemiyetinin (SEG) en yüksek ödülü Maurice Ewing Madalyasıyla onurlandırıldı.

Öz Yılmaz ile mühendis ve mühendislik tanımlarından jeoloji ve jeofizik dallarının farklarına, jeofizikğin hangi alanlarda uygulama bulduğundan depremlerin nasıl oluştuğuna ve Türkiye'nin dep-

remelliğine uzanan birçok konuda yaptığımız söyleşiyi okuyacaksınız.

## **Mühendis kimdir, mühendislik nedir?**

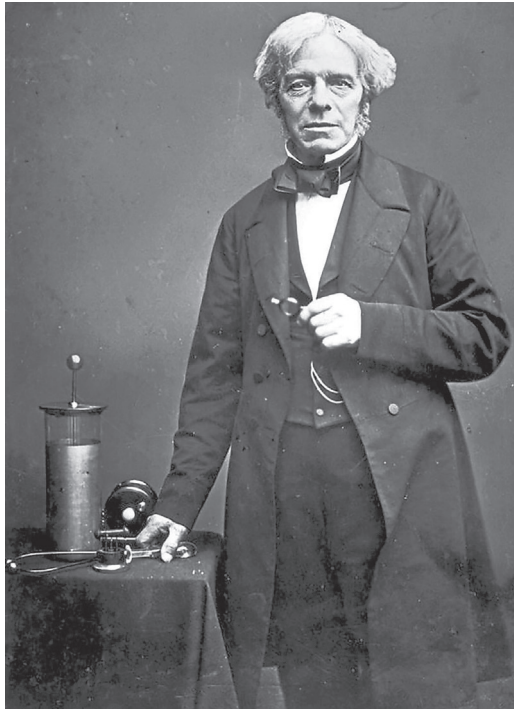
- Mühendisliğin tanımını yapar mısınız?

- Hans Oersted, 1820 yılında, elektrik akımına maruz kalan bir manyetik kompas iğnesinin hareket ettiğini keşfetmişti. Bu heyecan veren gözlemin izahı için birçok fizikçi yarışmasına laboratuvar deneyleri yapıyor, sonuçlara istinaden teoriler geliştiriyorlardı. Isınmış bir hava kütesinin aşağıdan yukarıya hareket ederek tornadoya dönüştüğü gibi, Michael Faraday, yine aşağıdan yukarıya seyreden bir elektrik akımının da etrafında devridaim bir manyetik rüzgâr oluşturacağını ve bu rüzgârın etkisindeki bir manyetik iğnenin hareket edeceğini tahayyül etmişti. Bu hipotezi test için, Faraday, laboratuvarında bir deney düzeni geliştirmek için haftalardır uğraşmıştı. Nihayet, 1821 Eylül ayında, Oersted'in keşfine özgü sırrı çözecek bir deney yapmayı başarmıştı. Önce, bir manyetik çubuğu bir ucundan bir ağırlığa bağlayıp, onun bir cıva haznesi içinde, yüzen bir "buoy" gibi, dik durmasını sağlamıştı. Sonra, cıva havuzunun ortasına yine düşey konumda bir tel yerleştirip, içinden aşağıdan yukarıya seyreden bir elektrik akımı göndermişti. Faraday, bir keşfin başlangıcını yaşıyordu; manyetik çubuk elektrik telinin etrafında saat istikametine ters bir daire yörünge üzerinde dönmeye başlamıştı. Faraday, bu deneyiyle sadece

manyetik tornado teorisini kanıtlamakla kalmamış, sonuçta dünyanın ilk prototip elektrik motorunu da inşa etmişti. Mühendis, fiziksel olayları, bilimin her şeyi sorgulayan müspet rehberliğinde araştıran ve deney sonuçlarını insanoglunun yararına dönüştürebilendir.

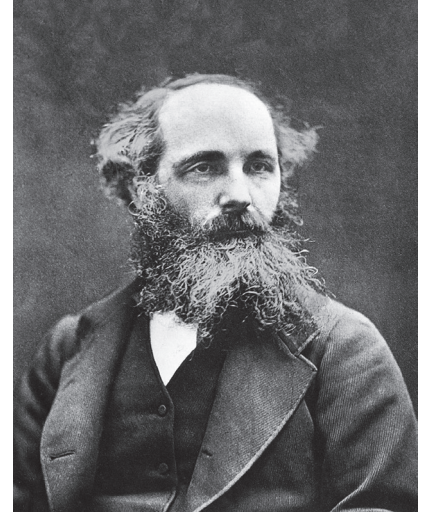
Eğer elektrik, manyetizma oluşturuyorsa, bunun tersi neden olmasın; yani manyetizma neden elektrik üretmesin? Faraday, bu ihtimali araştırmak için müteakip on yıl uğraşmıştı. Nihayet, 1831 Ağustos ayında, bu tersine problemin sırrını çözecek bir deney yapmayı başarmıştı. Bir demir halkanın iki yarısına karşılıklı tel sarmıştı. Bir sargı teline, Volta'nın yeni icadı bateryi bağlayarak elektrik akımı vermiş ve böylece bütün demir halkayı dolayan bir manyetik rüzgâr oluşturmuştu. Bu manyetik rüzgâr, karşı taraftaki sargı telinde elektrik oluşturacak mıydı? Faraday, bu tele bir metre bağlamış ve sonucu nefesi kesilircesine izlemişti. Evet, evet, metrenin ibresi hareket etmişti! Hem hareket etmiş, hem de salınıp tekrar eski yerine geri gelmişti. Biraz beklemiş, lakin ibrenin artık hareket etmediğini izlemişti. Sonra, Volta'nın batirisini devreden çıkarınca, ibre-

Michael Faraday şu tarihi keşfi yapmıştı: Bir manyetik kuvvet artınca veya azalınca elektrik üretir; ne kadar süratli artar veya azalırsa, o kadar çok elektrik üretir. Ama bunu matematik dille yazamamıştı.



nin yine hareket ettiğini görmüştü. Nasıl olurdu bu? Bir sargı telinden elektrik akımını kesince de, karşı sargı telinde elektrik üretmişti? Bütün gece bateryi tak-çıkarak yaparak bu deneyi defalarca tekrarlamıştı. Nihayet, Faraday'a ilham gelmiş gibiydi: Bir sargı teline verilen elektrik akımı manyetik tornado oluşturuyordu ve bu da karşı sargı telinde bir elektrik akımı oluşturuyordu; ama elektrik akımı yalnızca manyetik tornadonun yoğunluğunun arttığı veya azaldığı zaman oluşuyordu. İbrenin zıplayıp tekrar eski yerine dönmesi ancak böyle izah edilebilirdi. Yani, Faraday, bateryi bağladığı veya çıkardığı zaman manyetik tornadonun yoğunluğunu değiştiriyordu; diğer zamanlarda manyetik tornadonun yoğunluğu demir halka içinde aynı kaldığı için elektrik akımı oluşmuyordu. Müteakip aylarda, Faraday deney düzenliğini daha da geliştirdikten sonra, şu tarihi keşfini teyit etmişti: **Bir manyetik kuvvet artınca veya azalınca elektrik üretir; ne kadar süratli artar veya azalırsa, o kadar çok elektrik üretir.**

Bu keşif, bilim insanları tarafından heyecanla karşılanmıştı; ancak, Faraday'ın yaptığı keşfi, matematik dilini kullanmak yerine yukardaki sözcüklerle ifade etmesi yadırganmıştı. Niçin? Çünkü bilim insanı 17. yüzyılın sonlarından itibaren, artık yaptığı keşifleri Newton ve Leibnitz'in icat ettiği "calculus" dilini kullanarak kesin bir doğrulukla ifade edebiliyorlardı. **Matematik, bilim insanının dili olmuştu.** Faraday, bu açıdan bir istisnayı; o, çok zor şartlarda çocukluğunu geçirmiş ve bırakın matematik eğitimi almayı, temel eğitim şansına bile sahip olamamıştı. Faraday'ın ömür boyu amacı, Tanrı'nın ebedi ve ilahi gücünün tezahürü olan fiziksel olayları, deneysel gözlemlerle anlamak ve herkesin anlayacağı dille anlatmak olmuştu. Ancak otuz yıl sonra, James Maxwell, Faraday'ın yukarda ifade edilen keşfi-



James Maxwell, Faraday'ın keşfini otuz yıl sonra matematik dille tartışmasız bir kesinlikle ifade edebilmişti.

ni matematik dille tartışmasız bir kesinlikle ifade edebilmişti. Maxwell, manyetizmayı  $B$  ile elektrik alanı  $E$  ile temsil ettikten sonra,

$$-\partial/\partial t$$

diferansiyel ifadesini, "artma veya azalmadaki sürat" (rate of change) anlamında,

$$\nabla \times$$

ifadesini de "miktarı" anlamında kullanarak, Faraday'ın yukardaki sözlerini aşağıdaki denklemlerle ifade etmişti:

$$\nabla \times E = -\partial B/\partial t$$

Yani, manyetizma tarafından üretilen elektrik alan miktarı, manyetik kuvvetin artış veya azalma süratine eşittir. Faraday, manyetik tornado gibi bir fiziksel olayın etkisini gözlemiş ve bu olaydaki "değişimden" doğan elektrik alanı ölçmüştü. Maxwell ise, Faraday'ın gözlem ve ölçümünü matematik dille mükemmel bir kesinlikle ifade etmişti. Yukardaki denklemlerden hemen anlıyoruz ki, bir manyetik kuvvet ne kadar süratli "değişirse" o kadar çok elektrik üretir. Manyetik kuvvet zamanda sabit kalırsa, büyüklüğü ne kadar olursa olsun, elektrik üretmez. **Demek ki, fiziksel olayın büyüklüğünden ziyade, değişimi bir ürün ortaya çıkarır.** Yukardaki denklem, endüstriyel çağdan elektrik çağına geçişin sembolü olan insanoglunun yararına kullanılacak başka bir motorun, dinamunun icadına esas teşkil etmiştir.

Şimdi, daha önce mühendis için verdiğimiz tarife ince ayar yapabiliriz: Mühendis, bir fiziksel olayda-



ki değişimin vesile olduğu başka bir fiziksel olayı, bilimin her şeyi sorgulayan müspet rehberliğinde araştıran ve deney sonuçlarını matematik diliyle ifade ederek, insanoğlunun yararına dönüştürebilen bir uzmandır. Siz mühendis iseniz, mesleğinizi icra etmek için, mutlaka bir kısmi diferansiyel denkleminiz olması gerekir. Bana, kullandığınız kısmi diferansiyel denklemi söyleyin, ben size mühendislik ihtisasınızın ne olduğunu söyleyeyim. Bernoulli diferansiyel denklemi, “hareket etmekte olan bir akışkanın hızı ne kadar yüksek olursa, çevreye yaptığı basınç o kadar az olur” sözlerinin matematiksel ifadesidir. Bu denklem, bir boru içinde akan suyun boru çapı küçüldükçe niçin daha hızlı aktığını izah eder. Dolayısıyla, bu denklem, hidrodinamikte ihtisas yapmış inşaat mühendisinin denklemidir. Bu denklem, uçakların niçin havalanabildiklerini ve havada yer çekimine karşı direnerek seyredebildiklerini de izah eder. Dolayısıyla, bu denklem, aerodinamikte ihtisas yapmış makina mühendisinin de denklemidir. Isı diferansiyel denklemi, “ısı akışı, sıcaklık farkına (temperature gradient) neden olur” prensibini ifade etmektedir. Bu denklem, ısıtma-soğutma sistemlerinde ihtisas yapmış bir makina mühendisinin denklemidir.

- *Bilim insanıyla mühendisin farkı nedir?*

- Genel anlamda bilim insanı keşfeder, mühendis icat eder. Buhar

Mühendis, bir fiziksel olaydaki değişimin vesile olduğu başka bir fiziksel olayı, bilimin her şeyi sorgulayan müspet rehberliğinde araştıran ve deney sonuçlarını matematik diliyle ifade ederek, insanoğlunun yararına dönüştürebilen bir uzmandır.



makinası esasen bir ısı makinasıdır. Buhar basıncıyla bir silindir içindeki pistonu ileri-geri hareket ettirecek mekanik işe çevirmeyi sağlar. Isı teorisi ve akışkan fiziği konuları yüzyılları kapsayan birçok bilim insanının araştırmaları neticesinde geliştirildi. Bilimsel keşiflere istinaden mühendisler insanoğlunun yararına kullanılmak üzere araç-gereçler icat ederler. James Watt zamanına kadar buhar makinaları piston silindirinin tekrar tekrar soğutulması-ısıtılması esasına göre çalışırdı. Bu da buhar makinasının çok enerji israf etmesine, dolayısıyla performansının çok düşük olmasına sebep idi. Watt yepyeni bir tasarımla piston silindirinden ayrı bir kodansör (yoğunlaştırıcı) geliştirdi ve buhar makinasının gücünü, dolayısıyla verimli çalışmasını sağlayarak, performansını çok ciddi miktarda artırabildi. Bilahare, Watt makinasını “rotary” hareketini sağlayacak tarzda daha da geliştirdi ve sadece su pompalama işlevinin ötesinde başkaca mühendislik uygulamaları sağladı.

### **Jeofizik ile jeolojinin farkı**

- *Jeofizik ile jeolojinin farkı nedir?*

- Jeoloji nicel (qualitative) gözleme dayalı temel bir doğa bilimidir. Gözlemin “qualitative” olması demek, jeologun diferansiyel denklemi olmadığı anlamını taşır; dolayısıyla da jeolog mühendislik sıfatıyla mesleğini icra edemez. James Hutton ve Charles Lyell 1800’lerde bir doğa bilimi olarak jeolojinin bugün de ge-

çerli temel prensiplerini geliştirdiler. Bilahare, nicel (qualitative) yüzey jeoloji gözlemlerinin yerkürenin yapısını belirlemek için yetersiz olduğu anlaşıldı. Yerkürenin iç yapısını yerüstünden yapılan nitel (quantitative) gözlemlerle belirlemek için yer fiziğini anlamak ve dolayısıyla yer fiziğinin bazı parametrelerini ölçmek veya tayin etmek gerekiyordu.

Jeofizik bu ihtiyaca cevap vermek üzere jeolojiden ayrı bir disiplin olarak 1800’lerin ikinci yarısında gelişmeye başladı. Yerkürenin iç yapısı - iç çekirdek, dış çekirdek, alt ve üst manto tabakaları, litosferle manto arasındaki Moho süreksizlik sınırı, yerkürenin gravite ve manyetik alanı, manyetik kutupların periyodik tersine-dönüş (reversal) olması, kıtaları ve okyanus kabuklarını teşkil eden levhaların hareket ettiğini, okyanus ortalarında açılma sırtları (obduction) zonlarıyla yeni kabuğun oluşması ve buna bağlı olarak deniz tabanının yayılması (sea-floor spreading), kıta sınırlarında dalma-batma (subduction) zonlarıyla okyanus levhalarının kıta levhalarının altına dalarak manto içine batıp tüketilmesi, tektonik hareketler sonucu yüzey jeolojisinin, dağ oluşumu gibi şekillendiğini, levha sınırlarında depremlerin oluşma mekanizmaları gibi tüm fiziksel olayların tanımlanması jeofizik metotların geliştirilmesiyle mümkün olmuştur. Jeofizik metotlarla, jeolojinin dayandığı yüzeysel gözlemlerin çok ötesinde, yerin fiziksel özelliklerini “quantitative” tarzda analiz ederiz.

Jeofizik bilimi, sözcük olarak anlamından da anlaşılacağı gibi fizik kanunlarını kullanır; bu kanunların dili ise matematiktir. Dolayısıyla jeofizik biliminin temeli matematiksel fiziğe (mathematical physics) dayanır. Jeofizik disiplininde eğitim alan öğrenci jeoloji ve jeofizik derslerinden başka matematik ve fizik derslerini de alarak, fizik kanunlarını jeolojik olayları nitel (quantitative) tarzda anlamak ve tarif etmek için kullanır.

İki doğa disiplini arasındaki farkı tarif etmek için tıp biliminden bir benzetme yapalım. Tıp mezunu bir doktor insan sağlığı konusunda ancak genel pratisyen hekim olarak gö-

rev alabilir. 20. yüzyıldan önce, bir hekim her türlü hastalıkla ilgilenmek zorundaydı. İnsan vücudunun ne kadar karmaşık bir kimyasal-elektrik-mekanik sistem olduğu anlaşıldıkça, hekimler uzmanlaşmak zorunda kalmışlardır. Bugün, genel pratisyen hekimler, hiçbir zaman bir kardiyoloğun, bir dermatoloğun, veya bir nöroloğun uzmanlaştığı konularda sorumluluk yüklenemezler. Lakin bütün tıp uzmanlık alanlarının hastalığın teşhisi ve gerekli uygun tedavisi için ihtiyaç duydukları çok önemli bir başka uzmanlık vardır: tıbbi görüntüleme (medical imaging). Bugün bir ortopedist, örneğin hastanın sakrum kemiğindeki çatlak tespit için, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve/veya computed tomografi (CT) metotlarını kullanır. Hastanın kol veya bacak kırığını tespit için en basitinden röntgen görüntüsünü ister. Tıbbi görüntüleme ultrasonografi, röntgen, mamografi, PET scan, arthrogram, myelogram, computed tomografi, manyetik rezonans, nükleer tıp, ve daha nice metotları içermektedir. Bütün bu metotlar, hasta vücudunun dışından uygulanarak hasta vücudunun içindeki organları ve anatomik yapıları haritalamak ve vücudun muhtelif fiziksel parametrelerini tayin etmek ve elde edilen sonuçlara istinaden doğru teşhisi koymak için kullanılır. Bugün artık bir kalp cerrahı, bir ortopedist, bir beyin cerrahı veya bir genel cerrah, tıbbi görüntülemeye başvurmadan kesinlikle hastaya cerrahi müdahale yapamaz. Tıbbi görüntüleme o kadar önemli ki bugün artık tüm tıp uzmanlık dallarında zaruri kullanılmaktadır. Tıbbi görüntüleme konusunda yapılan yıllık toplantılara yüz bini aşan delege katılımı olmaktadır.

Benzer biçimde bir petrol şirketinin petrol ve doğalgaz arama ve üretimini için her şeyden önce jeofizik metotlardan biri olan sismik görüntüleme yapmadan kuyu açmaya kalkması düşünülemez. Neden? Çünkü yapılacak sondajların her birinin lokasyon ve derinliklerini sismik görüntüleme yapmadan bilemez. Sismik görüntüleme yapmadan sadece yüzey jeolojisi ve eski kuyu bilgilerine istinaden yeni sondaj planlarsa, petrol şirketi büyük olasılıkla kuru

çıkacak kuyuya boşuna para harcamış olur. Karada örneğin 3000 m derinlikteki bir kuyunun 5 milyon dolardan fazla ve denizde örneğin 4500 m derinlikte bir kuyunun 100 milyon dolardan fazla bir maliyeti olduğunu düşünürsek, sismik görüntülemenin ne kadar teknik ve mali yönden şirket için alternatifi olmayan önemli ve zaruri bir metot olduğunu anlarız. Bir maden veya kömür şirketinin, örneğin 1200 m ortalama derinlikte bir trona cevher damarının veya kömür damarının yeraltındaki üç boyutlu geometrisini, varsa bu cevheri kesen fayların geometrisini sismik görüntülemeyle belirlemeden, sadece yüzey jeolojisine istinaden sondajlara başlaması düşünülemez. Keşif sonrası maden veya kömür cevherinin üretim planlaması için maden mühendisinin en güvenilir bilgi kaynağı yine sismik görüntü hacmi olacaktır. Bu görüntüye istinaden nelerde üretim shaft ve galerilerinin açılacağına en doğru şekilde karar verilecektir. Aksi takdirde, yanlış lokasyon ve derinliklerde açılacak kuyular şirkete milyonlarca dolara mal olacaktır. Bakır, demir gibi maden cevherlerin aranması için her şeyden önce jeofizik metotlardan biri olan gravite ve/veya manyetik etüt yaparak cevherin geometrisini yoğunluk kontrastına ve/veya manyetik süseptibilite kontrastına istinaden tespit etmek zaruridir. Yine aksi takdirde, gravite ve manyetik haritalar olmadan yapılacak sondajlar beyhudedir. Jeotermal kaynak arama ve üretiminde sismik görüntüleme ve manyetotellürik haritalama yapılmadan, sadece yüzey jeolojisine istinaden yapılacak jeotermal sondaj, derinliği 3000 m veya daha fazla olacağını düşünürsek, yine mali yönden büyük yanlışlıktır.

Bu örnekleri göz önünde bulundurarak, doğal kaynakların aranması, keşfi ve üretimi için planlanan bir proje-

deki ilk adım kayıtsız şartsız jeofizik görüntülemedir. Jeolojik çalışmalar bu aşamadan sonra gelir - açılan kuyularda karşılaşılabilecek jeolojik formasyonların tanınması, sediman (tortul) çökelti tarihçesi ve diğer jeolojik çalışmalar ancak ve ancak jeofizik çalışmaları ardından olmak zorundadır.

- *Jeofizik mühendisliğinin faaliyet alanları nelerdir?*

- Yukardaki tariftten, mühendisi, mesleğini bir kısmi diferansiyel denkleme istinaden icra eden bir uzman olarak tanımladık. İnsanoglu yeni yüzyılda karmaşıklığı giderek artan mühendislik problemleriyle karşı karşıyadır. Bu problemler artık belli konularda uzmanlığı olan mühendislerin takım çalışmasıyla çözülebilmektedir. Jeofizik mühendisi, yerüstünde yaptığı fiziksel ölçümlerle, yeraltını değişik fiziksel parametreler kullanarak tarifler. Jeofizik mühendisi, yerüstünde yaptığı fiziksel ölçümlerden ürettiği yeraltı parametrelerini, belli derinliğe kadar açılan kuyularda yaptığı fiziksel ölçümlerle kalibrasyona tabi tutar. Jeofizik mühendisinin diferansiyel denklem repertuarı çok zengindir; dolayısıyla, jeofiziğin kendi içinde uzmanlaşma

Bir petrol şirketinin her şeyden önce jeofizik metotlardan biri olan sismik görüntüleme yapmadan kuyu açmaya kalkması düşünülemez.



kaçınılmaz olmuştur. Sismolojide ihtisas yapmış bir jeofizik mühendisi, özellikle arama sismolojisi, deprem sismolojisi ve mühendislik sismolojisinde uzmanlaşmış bir jeofizik mühendisi, elastik ve akustik diferansiyel dalga denklemlerini kullanarak, petrol ve doğalgaz arama ve üretimi konusunda, jeotermal kaynak arama ve üretiminde, kömür arama ve üretiminde, bazı madenlerin arama ve üretiminde, yeraltı suyu aramasında, deprem mekanizması konusunda ve zemin etütlerinde faaliyet gösterir.

Elektrik-elektromanyetik metotlar üzerine ihtisas yapmış bir jeofizik mühendisi, Maxwell diferansiyel denklemlerini kullanarak, bilhassa maden aramalarında, heyelan gibi probleme münhasır çevre projelerinde, yeraltı suyu ve jeotermal kaynak aramalarında ve arkeolojik araştırmalarda faaliyet gösterir. Potansiyel (gravite ve manyetik) metotlar üzerine ihtisas yapmış bir jeofizik mühendisi, Poisson ve Laplace diferansiyel denklemlerini kullanarak, maden aramalarında, arkeolojik araştırmalarda ve karstik boşluklar gibi probleme münhasır çevre projelerinde faaliyet gösterir. Kaya fiziğinde ihtisas yapmış bir jeofizik mühendisi, difüzyon diferansiyel denklemini kullanarak, kaya içindeki sıvıların davranışına münhasır, örneğin, petrol ve doğalgaz rezervuar karakterizasyonunda faaliyet gösterir. Hatırlanması gereken husus, bütün bu faaliyet alanlarında, jeofizik mühendisinin ilgilendiği, esas itibarıyla yerin fiziksel parametrelerindeki uzay ve zamandaki değişimlerdir.

Jeofizik mühendisi, yerüstünde yaptığı fiziksel ölçümlerle, yeraltını değişik fiziksel parametreler kullanarak tarifler.

### **Sismolojinin önemi**

- *Anlaşılan jeofizik bilim dalının alt birimi sismoloji, mühendislik projelerinde büyük rol oynamaktadır.*

- Sismoloji biliminin ülke ekonomisine katkıları enerji, altyapı ve inşaat sektörlerini kapsayan geniş bir yelpaze oluşturur. Özellikle, petrol ve gaz yataklarının keşfi ve geliştirilmesi için vazgeçilemez esas bir yöntemdir. Sismoloji bilimi, jeotermal kaynakların ve maden yataklarının keşfi ve verimli üretim planlaması için zaruridir. Üç-boyutlu sismik görüntü hacmine mahsus bu tür kesitlerden tespit edilen faylar haritalanarak cevher damarlarının geometrisi, varsa cevher damarlarını kesen fayların tespiti, güvenilir ve ekonomik üretim planlaması için şarttır. Benzer şekilde, sismoloji bilimi, kömür yataklarının keşfi ve verimli üretim planlaması için zaruridir. Üç-boyutlu sismik görüntü hacmine mahsus kesitlerden tespit edilen faylar haritalanarak kömür damarlarının geometrisi, varsa kömür damarlarını kesen fayların tespiti, güvenilir ve ekonomik üretim planlaması için şarttır. O kömür şirketinin yay haline, galerileri açarken karşılaşacağı fayların nerede olduğunu bilmez ise...

Ve esefle ifade edeyim ki, Çin, Avustralya ve Amerika'da kömür şirketleri için sismik yöntemi kullanmak yasalarla zorunlu iken, ülkemizde böyle bir zorunluk olmadığı gibi, çoğu kömür şirketleri jeologların önerdiği münferit kuyu bilgilerine istinaden, sismik yönte-

mi kullanmadan yaptıkları haritalara göre üretimi planlamaktalar; bunun neticesinde de açılan galerilerde sürpriz faylarla karşılaşmaktalar, beklenen fayları bulamamaktalar; dolayısıyla verimi çok düşük ve maliyeti çok yüksek bir üretim yapmaktadırlar.

Kömür şirketleri, sismik etüt yapıp yeraltında kömür damarlarını tespit edip galeri usulü işletim yerine, Trakya'da tarım arazileri içinde açık işletme yapmayı tercih ediyorlar. Çevreye zarar vermeleri bir yana milyonlarca ton tarımsal örtü toprağını kaldırarak yüksek maliyetli kömür üretiyorlar. Tek kelimeyle bir doğa ve ekonomik verimsizlik faciası. Sismoloji bilimi, yeraltı su akiferlerinin keşfi ve verimli üretim için zaruridir. Faylar, yağmur sularının yeraltına geçiş yolları olmasından ötürü, akiferin rezervuar potansiyelini artırır. Zemin etütlerinde, zemini teşkil eden tabakaların geometrisi ve varsa fayların geometrisi sığ sismik yöntemle tanımlanır. Sismik kesitlerde gözlemlendiği gibi olmasa da, tomografik hız-derinlik modellerinde de fayların belirtilerini izleyebiliriz. İsterseniz, yerbilimlerine dayanan mühendisliklerin takım çalışması yaparak icra ettikleri bazı konuları tek-tek tanımlayalım ve jeofizik mühendisliğinin bu takım çalışmalarındaki rolünü belirleyelim.

- *Petrol ve doğal gaz arama ve üretiminde mühendislerin görev paylaşımını anlatır mısınız?*

- Bugün, bütün dünyada petrol ve doğalgazın hem aranması hem de üretiminde kullanılan teknoloji esas itibarıyla sismolojiye dayanır. Yeraltının iki veya üç boyutlu sismik görüntülerine istinaden, yapısal jeoloji, sedimanların çökelti tarihçesi ve stratigrafik seri (sequence) tanımlanarak ve jeokimyasal basen analizi yapılarak, bir basenin petrol veya doğalgaz potansiyeli hakkında çok güvenilir bir hükme varılabilmektedir. Arama safhasına esas teşkil eden sismik görüntü hacmini kullanarak arama kuyularının nerelerde konumlandırılacağı ve beherinin kaç metre derinliğe kadar planlanmasına sismolog karar verir.

Sondaj üzerine ihtisası olan petrol







Sismoloji bilimi, jeotermal kaynakların ve maden yataklarının keşfi ve verimli üretim planlaması için zaruridir.

mühendisinin açtığı arama kuyularından keşif sonucu alınırsa, bu kez sismolog, sedimantolog, jeokimyacı ve yapısal jeolog birlikte çalışarak basenin üretim potansiyeli hakkında karar verirler. Ayrıca, rezervuarın karakterizasyonu, üç boyutlu sismik görüntüye istinaden, sismolog, paleontolog, sedimantolog, petrofizikçi, jeokimyacı ve rezervuar üzerine ihtisası olan petrol mühendisi tarafından yapılır. Rezerv hesabı ise, porozite, permeabilite gibi üretim parametrelerine istinaden rezervuar mühendisi tarafından yapılır. Üretim süresince, rezervuarın monitor edilmesi için de belli zaman aralıklarında üç boyutlu sismik görüntüler 4-boyutlu sismik (4-D seismic) metoduyla yenilenir. Bu görüntüler rezervuar mühendisi tarafından kullanılarak geleceğe yönelik üretim hakkında tahminler yapılır (reservoir simulation). Yukardaki kısa tariften anlaşıldığı gibi, petrol ve doğalgaz arama ve üretiminde, esas itibariyle sismik metot kullanılmakta, bununla beraber birçok yerbilimci uzman birlikte çalışmaktadır.

- **Kömür, maden ve jeotermal kaynak arama ve üretiminde mühendislerin görev paylaşımını anlatır mısınız?**

- Bir kömür veya maden yatağı yüzeyde ise, zaten arama diye bir faaliyet söz konusu olmaz. Yeraltı kömür veya maden aramasında, yine esas olan jeofizik metotlardır. Özellikle

le kömür aramasında, sismik metot, maden aramasında da elektrik-elektromanyetik ve/veya gravitemanyetik metotlar kullanılmaktadır. Jeotermal kaynak aramasında, jeotermal basenin geometrisinin tayini için sismik metot esas olup, manyetotellürik metoduyla basenin jeotermal potansiyeli belirlenir. Arama safhasında, konusuna göre, sismoloji, elektrik-elektromanyetik, gravitemanyetik konularında uzman jeofizik mühendisiyle, yapısal jeolog birlikte çalışırlar.

Arama kuyularının konum ve derinlikleri sismik görüntü hacmine istinaden belirlenir. Keşfi müteakip, üretim safhasında, özellikle rezerv hesabında esas itibariyle sorumluluk maden mühendisindedir. Bununla beraber, üretim için planlanan shaftların nerelerde ve galerilerin geometrilerinin tayininde sismik görüntüye istinaden karar verilir.

- **Yeraltı suyu arama ve üretiminde mühendislerin görev paylaşımı nasıldır?**

- Akiferin oluşabileceği yapıyı sismik metotla, bu yapı içinde suyun mevcut olup olmadığı da elektrik metotla anlaşılır. Yeraltı suyunun arama ve üretiminde jeofizik mühendisi ve hidrojeolog birlikte çalışır.

- **Zemin etütlerinde mühendislerin görev paylaşımı nasıldır?**

- Bir zemin etüt projesinde, zemin geometrisi, zemin pedolojisi (çökelti tarihçesi) ve zemin dinamiği tanımlanır. Zemini teşkil eden katmanların ara yüzlerinin geometrisi, zemin-temel kaya arayüzünün geo-

metrisi, varsa, zemini ve temel kayayı etkileyen fayların geometrisi, heyelan kayma yüzeylerinin tespiti, zemin ve temel kayanın P- ve S-dalgalar hız-derinlik profillerinin tayini; özetle, zeminin sismik modelinin tanımı mühendislik sismolojisiyle belirlenir. Zemin pedolojisinin tanımı, zemini teşkil eden malzemenin taşınma ve çökeltme tarihçesi, holosen çağında ihtisas yapmış jeomorfolojist tarafından yapılır. Zemin dinamiği, zeminin yük altındaki davranışı, geoteknik sondaj ve zemin laboratuvar çalışmalarına istinaden geoteknik mühendisi tarafından yapılır. Zemin geometrisi, zemin pedolojisi ve zemin dinamiği ile ilgili çalışmaların sonuçlarının entegrasyonunu da geoteknik mühendisi yapar. Gerekirse, zeminin bir deprem esnasındaki -zemin büyütmesi ve sıvılaşma gibi- davranışını incelemek için deprem sismolojisi uzmanı jeofizik mühendisi ve/veya geoteknik deprem mühendisi bu görevi üstlenir.

### **Levha hareketleri ve depremler**

- **Türkiye deprem kuşağında bir ülke. Deprem konusundaki düşüncelerinizi genel hatlarıyla açıklar mısınız?**

- Deprem-zemin-yapı üçlüsünde en popüler konu ve dolayısıyla medyada en fazla işlenen depremin kendisidir. Oysa en fazla sorumluluk ve insanımızı doğrudan ilgilendiren konular ise zemin ve daha da önemlisi yapıdır. Deprem hareketinin bir binaya uyguladığı kuvveti, dolayısıyla muhtemel hasarı azaltmak için binanın kütlelerini ve/veya hareketin ivmesini azaltmalıyız. Unutmayalım ki, deprem ağır yapılara daha fazla yüklenir. Dolayısıyla, binaları

Zemin dinamiği, zeminin yük altındaki davranışı, geoteknik sondaj ve zemin laboratuvar çalışmaları çerçevesinde geoteknik mühendisi tarafından yapılır.



mızı hafif malzemeyle yapmalıyız. Yani, yapıları hantal beton ve tuğla yığınları şeklinde inşa etmek yerine, inşaat kültürümüzü değiştirip, Kaliforniya ve Japonya'da olduğu gibi, yapılarda ahşap ve çelik malzeme kullanmalıyız. Ve nihayet, deprem hareketinin ivmesini ise, bir yandan zemini ıslah ederek, yani gevşek bir zemini sıkılaştırarak azaltabiliriz, bir yandan da yeni yerleşim alanları için tarımsal amaçlı kullanılması gereken gevşek alüvyon malzemeden müteşekkil ovalar yerine kaya zeminden müteşekkil yamaç araziler tahsis etmeliyiz.

**- Depremi bir cümlede nasıl tarif edersiniz?**

- Deprem, yerkabuğunu teşkil eden irili-ufaklı levhaların izafi hareketleri esnasında temas yüzeylerinde biriken yükün ani serbest bırakılmasıdır. Bu cümledeki anahtar kelime "ani" biriken yük yavaş yavaş serbest bırakılırsa, herhangi tehdit karakteri olmayan "creep" mekanizması sonucu mikro depremler oluşur.

**- Neden-sonuç ilişkisini kurarak, bu konuyu biraz açar mısınız?**

- Yerkürenin dış çekirdeği bir nükleer santral gibi çalışır, bu santral muazzam bir ısı üretir, ısı enerjisi çekirdeği saran mantoya transfer edilir, ısınan yarı-akışkan manto konveksiyon akımlarıyla yerkabuğuna doğru yükselir, yükselen mal-

zeme okyanusların ortasında belli eksenler boyunca yeni kabuk oluşmasını sağlarken, eski kabuk da kıta kenarlarının altından mantoya dalar ve tüketilir. Manto içindeki ısı-konveksiyon akımlarının neden olduğu kabuk yenileme ve tüketme hadisesi, yerkabuğunu teşkil eden levhaların birbirlerine izafi hareketleri sonucu temas yüzeylerinde yükün birikmesine ve bu yükün aniden boşalmasına, yani depremlerin oluşmasına neden olur. Depremler, aslında yerkürenin dinamik karakterinin bir tezahürüdür. Levha hareketleri sonucunda dağ oluşumu ve bunun neticesinde de bütün doğa olaylarının gelişmesi de yerkürenin dinamik karakterinin bir başka tezahürüdür.

**- Türkiye'deki depremlere neden olan levha hareketini tarif eder misiniz?**

- Özellikle, Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay zonlarının her iki tarafındaki levhaların zıt yönde esas itibariyle yanal hareketleri esnasında sürtünmeleri sonucu, fay düzleminde biriken yükün aniden serbest bırakılmasıyla oluşan depremler bizi ilgilendirmektedir. Fay zonlarında, levhaların birbirlerine zıt istikamette yatay hareketleri sonucu oluşan depremler, yerkabuğunun tüketildiği eksenlerde oluşan depremlerden genellikle daha küçüktürler. Lakin, Erzincan 1939 ve Kocaeli 1999 depremleri gibi yedi-

nin üstünde büyüklükte de oluşabilirler. Deprem sismolojisinde son yılların en önemli keşfi, levha içindeki depremlerin, örneğin Anadolu Levhasındaki gibi, faylar boyunca mevcut lokal zayıf zonlardaki yük birikiminden ziyade, esas itibariyle levhaların birbirlerine izafi hareketleri sonucu daha büyük ölçekteki rejyonel (bölgesel) yük birikiminden ötürü olmasıdır.

**- Fay zonları boyunca levha hareketleri sadece yanal yönde midir?**

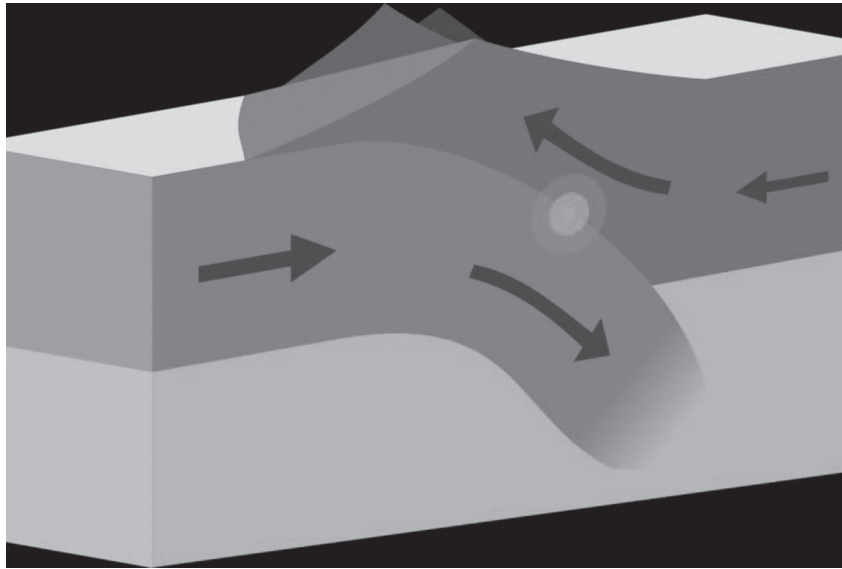
- Fay zonları boyunca levha hareketlerinin hem yanal hem de düşey bileşenleri vardır. Ama bazı fay zonlarında yanal hareket daha baskındır; örneğin, Kuzey ve Doğu Anadolu Faylarında olduğu gibi. Bazı fay zonlarında ise düşey hareket daha baskındır; örneğin, Ege Bölgesindeki fay sistemlerinde olduğu gibi. Burada önemli olan husus, yanal hareketin baskın olduğu fay zonlarındaki depremler, düşey hareketin baskın olduğu fay zonlarındaki depremlerden daha büyük olurlar.

**- Depremin büyüklüğü ile fayların uzunluğu arasında bir ilişki var mıdır?**

- Bir fay zonu boyunca levhaların temas yüzeyleri ne kadar büyüksse, diğer bir deyişle fay zonu ne kadar uzun mesafe kat ediyorsa, biriken tektonik yük ve dolayısıyla deprem de o kadar büyük olur.

**- Deprem-tsunami ilişkisi nedir?**

- Tsunami, Japonca bir sözcüktür. Japon Adaları'nın doğu sahilleri boyunca Pasifik Levhası Asya Levhası'nın altına dalmaktadır. Bu hareket, daha önce de ifade ettiğimiz gibi çok büyük depremlere neden olmaktadır. Ayrıca, dalan kütlemin düşey yönde ani hareketi neticesinde, Pasifik Okyanusu'nun çok kalın su tabakası da birlikte ani bir düşmeye maruz kalır. Bu hadise de çok uzun periyotlu ve yüksek genlikli su dalgasının oluşmasına neden olur. Dev dalgalar sahile vardığında tsunami felaketi olur. Tsunamiye neden olabilecek dalma-batma levha hareketi Anadolu sahillerinde, olsa olsa Akdeniz'de Helenik Dalma-Batma Kuşağı bo-



yunca mümkündür. Marmara'da ise Japonya, Sumatra, Alaska veya Şili sahillerindeki gibi tsunami tarzında büyük bir felaket düşünülemez. Bununla beraber, Marmara Baseni'ndeki düşey bileşeni olan fayların sahillerde önemli derecede tsunami tarzındaki dalga hareketlerine neden olması da mümkündür.

### ***İstanbul ve deprem***

- *Marmara Bölgesi Türkiye'nin sanayi ve ticareti bakımından en önemli bölgesi. Bu bölgenin depremselliği hakkında ne söyleyebilirsiniz?*

- Marmara Denizi, aslında Anadolu'da Kuzey Anadolu Fayı boyunca hakim yanal atılım hareketiyle Ege Denizinde hakim düşey hareketler arasında geçiş zonedir. Bu nedenle, Marmara Denizinde, bilhassa orta kısımda, Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki oluşan büyük depremler beklenmez. Diğer yandan, ne yazık ki, son yıllarda yapılan araştırmalara rağmen, Marmara Baseni'nin fay geometrisi güvenilir doğrulukta henüz tespit edilememiştir. İncelediğim mevcut sismik kesitler çerçevesinde, yayımlanmış altıdan fazla neotektonik modeller içinde belki de doğruya yakın olanı Aykut Barka'nın 1999 modelidir. Bununla beraber, eldeki verilere göre denilebilir ki geçmişte İstanbul'u, Marmara Baseni içinde İstanbul'a yakın büyük bir deprem yerine İzmit veya Gelibolu'da oluşan uzak bir depremin lokal zemin etkisi tehdit etmiştir. Nitekim, 1999 Kocaeli Depreminin Avcılar'daki hasar ve can kaybı lokal zemin etkisindedir.

- *Marmara Baseninin neotektonik modelinin deprem riskini belirlemek için güvenilir doğrulukla bilinmediğini ifade ettiniz. Bu konuyu biraz açar mısınız?*

- Güvenilir bir neotektonik model için, Marmara'da son yirmi yıl içinde yapılmış takdire şayan sismik araştırmalara ek olarak, fay yüzeylerinin geometrisi ve yanal-atım (strike-slip) ve düşey-atım (vertical slip) bileşenlerinin tanımlanmasına yönelik bir yüksek çözünürlü 3-boyutlu sismik etüt gerekmektedir. Bununla beraber, eldeki sismik, gravite, manyetik, batimetre ve sismik

aktivite verilerine istinaden, Marmara için kuzeydoğu-güneybatı istikametinde bir kuvvet çiftine maruz bir "pull-apart" tektonik model önerilebilir. Bu modele göre, Marmara, İzmit doğusunda Kuzey Anadolu Fayı (KAF) boyunca hakim yanal-atım rejimiyle, Ege'de hakim düşey-atım rejiminin bir geçiş zonedir. Bir anlamda, Marmara kısmen de olsa tektonik anlamda yükün biriktiği bir zon yerine, tam tersine bir gevşeme zonu olabilir. Dolayısıyla, Marmara'da, özellikle orta basende ve İstanbul'a yakın mesafede, 1999 İzmit depremindekinden daha büyüklükte bir deprem beklemek yanlış olur. İstanbul'u, yakındaki bir büyük deprem yerine, uzaktaki bir büyük deprem yerel zemin davranışı (local site effect) bakımından her zaman tehdit etmektedir. Bölgedeki büyük depremlerin tekrarlama periyodu, tarihsel depremlere istinaden 100-150 yıl arasında kabul edilirse, medyada popülerize edilen "İstanbul'a yakın, beklenen büyük depremin" aslında İstanbul'dan 170 km uzakta, 1999 yılında olup bittiğini söylemek pek de yanlış olmaz.

### ***Faylarla neden ilgileniriz?***

- *Diri fay ile dingin fay arasındaki fark nedir? Diri faylar nasıl tespit edilir?*

- Bir sismik kesitte gördüğümüz faylar derinlerde bazı jeolojik katmanları etkilemiş fakat bu faylar üstteki genç katmanları etkilememiş ise dingin faylar olarak tanımlanabilir. Fayların doğrudan yüzey jeolojik gözlemiyle tespiti esas itibariyle

1999 Kocaeli Depreminin Avcılar'daki hasar ve can kaybı lokal zemin etkisindedir.





yetik (aeromanyetik) etütle büyük bir alan içindeki sığ fayları haritalamak mümkündür. Manyetik alanın düşey türevi haritasında muhtelif fayların belirtilerini gözlemleyerek faylar haritalanabilir. Jeolojik saha gözlemiyle tespit edilemeyen birçok fay havadan jeofizik yöntemiyle elde edilen manyetik haritadan kolayca tespit edilirler.

- *Pekâlâ, faylarla neden bu kadar ilgileniyoruz?*

- Doğal kaynakların -petrol ve gaz, kömür, maden, jeotermal ve yeraltı akiferlerinin- aranmasında ve geliştirilmesinde fayların haritalanması zorunludur. Geoteknik amaçlı zemin etütlerinde, zemin geometrisinin tanımlanması ve varsa fayların haritalanması zorunludur. Deprem ve onun neden olduğu heyelan ve sıvılaşma gibi afetlerden dolayı faylarla ilgilenmek zorundayız. Tekrar hatırlatalım: fayların yalnızca yüzeyden jeolojik gözlemlerle haritalanması yetmez; fayların derinlikle beraber üç boyutlu tespiti ancak jeofizik görüntüleme ile mümkündür. Bir denizaltı tünelinin güzergâhı boyunca jeolojik kesiti inşa etmek için, ilkönce yapılması gereken sismik etüt yerine, projede çalışan jeologlar maliyeti çok yüksek olan denizde sondajlar yaptırmışlar. Sondajlarda karşılaşılan formasyonların ara yüzleri sondaj lokasyonlarının arasında enterpole edilerek bir jeolojik model inşa edilmiş. Ve

Fayların derinlikle beraber üç boyutlu tespiti ancak jeofizik görüntüleme (sismik etüt) ile mümkündür.



kil-kum-siltten müteşekkil çökelti-lerle temel kayanın ara yüzünde iki fay yerleştirilmiş. Ve bu jeolojik model hiç ama hiç sismik veri kullanılmadan, bir dizi geoteknik sondajlara istinaden inşa edilmiş. Yüklenici konsorsiyum “eyvah, tünel güzergâhını kesen iki fay var; ne yapacağız şimdi?” diye ciddi telaşa düşmüş. Biri nihayet akıl etmiş ve acaba bu faylar gerçekten var mı sorusunu sormuş. Bir sismik etütle bu fayları araştırabilir miyiz? Evet, tünel güzergâhını içine alacak tarzda üç-boyutlu yüksek hassasiyetli sismik etüt yaparak bu sorunun cevabını verebiliriz. Üç-boyutlu sismik görüntü hacminin planlanan tünel güzergâhı boyunca kesitini incelediğimizde, jeolojik kesitte belirtilen fayların olmadığını buna mukabil sismik kesitte gözlenen eski bir basenin yamacı olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca sismik kesiti daha yakından incelediğimizde eski basendeki çökelti tarihçesini çok net bir şekilde tespit etmiş olduk. Bu hikâyeden çıkarılacak çok önemli bir ders var. Yüklenici konsorsiyum çok ama çok maliyetli ve bazıları gereksiz birçok deniz sondajı yaptırmak yerine, ilk önce çok daha hesaplı üç-boyutlu bir sismik etüt yaptırmalıydı. Ardından sismik etütün sonuçlarına göre teyit amaçlı ve formasyonların litolojisini tayin amaçlı sondajlar yaptırmalıydı. Sondajların kaç adet ve lokasyon ve derinlikleri de sismik etütün sonuçlarına göre doğru bir

tarzda belirlenebilirdi. Eğer sismik kesite dayanılarak sondaj lokasyonları verilseydi, mutlaka daha farklı lokasyonlarda sondajlar yaptırıp sediman-temel kaya ara yüzünün dik yamaçları teyit edilebilirdi. Jeologların derinlik boyutunu görmek için önerdikleri münferit sondajlardır. Buradaki örnekten ve daha önce değindiğimiz kömür ve maden aramalarındaki örneklerden ders alınması gerekir.

### **Deprem tahmini ve bilimsel sorumluluk**

- *Depremi önceden tahmin edebilir miyiz?*

- Nasıl hava durumunu, çok ama çok parametrelili fiziksel bir hadise olmasına rağmen, tahmin etmeye çalışıyorsak, depremin de nerede, ne zaman ve hangi büyüklükte ve nasıl bir fay hareketi sonucu olacağını tahmin etmeye çalışmak da doğaldır. Ayrıntılara girmeden, kayaçların sismik ve elektrik öz direnç gibi bazı fiziksel özelliklerinin depremden birkaç saat önceden birkaç ay öncesine kadar değişime maruz kaldıklarını söyleyebiliriz. Lakin deprem tahmini pratikte kullanılabilir bir düzeyden çok uzak, üstünde daha çok araştırma yapılması gerekli bir konudur. Bu durumda, mühendislik ve bilim alanlarında uğraşanlar olarak, kamuoyunu “tahmin senaryolarıyla” meşgul etmemiz doğru değildir. Yarardan ziyade, sosyal ve ekonomik zarara neden olabilir.

Deprem ile ilgili öngörüler, örneğin, bir fay boyunca hareketin başka bir fayın dinamik davranışını etkilemesi veya genel olarak depremlerin kısa, orta veya uzun vadeli önceden kestirimi (earthquake prediction) gibi konularda bir ülkede yalnızca bir kamu kuruluşunun basına beyanat yetkisi mi olduğu veya herhangi bir şahsın da, bilimsel dayanağı olsun veya olmasın, benzeri beyanat verip veremeyeceği konularını, Çin, Japonya, Kaliforniya, İtalya, Yunanistan ve İran'daki tanınmış sismolog (deprem bilimci) meslektaşlarıma sordum. Depremlerle sıkça karşılaşılan altı ülkenin deprem konusunda uzmanlaşmış bilim insanlarının cevaplarından anlaşılacağı gibi, deprem kuşağındaki ülkelerde,

yasayla düzenlensin veya düzenlenmesin, depremlerle ilgili toplumun bilgilendirilmesi yetkili bir kamu kuruluşu nezdindedir. Deprem bir ulusal güvenlik konusu olması ve bu nedenle çok ciddiye alınması bakımından, topluma konuyla ilgili bilimsel olarak güvenli bilgi vermek üzere kişiler yerine bir kamu kuruluşunun yetkilendirilmesi zorunludur. Eğer bir kişi depremlerle ilgili önceden kestirim veya herhangi öngörüyle medyada beyanat verirse, bilimsel dayanağı olsun veya olmasın, o kişi hakkında yasal işlem yapılması uygun olmaz. Buna karşılık, beyan etmeden önce kişinin depremleri önceden kestirim veya herhangi öngörüsünü, önce “acaba bu görüşüm doğru mudur?” diye kendini sorgulayıp, sonra meslektaşlarıyla paylaşıp, onların hakemliğine başvurup, teyit ettikten sonra yazılı veya sözlü beyanat vermesi bilimsel etik ve toplumsal sorumluluk kurallarının gereğidir. Nasıl ki bir bilim insanının yazdığı bir makale, yayınlanmadan önce mutlaka birkaç bilim insanından oluşan bir hakemler kurulu tarafından incelenmek zorunda olduğu gibi. Çin, Japonya, Kaliforniya, İtalya, Yunanistan ve İran’daki tanınmış sismolog (deprem bilimci) meslektaşlarıma depremi önceden tahmini konusunu sorduğumda, konunun uzman kişileri olarak depremlerin ne zaman ve nerede olacağına yönelik depremleri önceden kestirmenin bilimsel olarak mümkün olmadığı hususunda ortak bir görüş beyan ettiler.

Bu konuda Çin, Amerika ve Japonya’nın deprem araştırma kurumları birkaç yüz milyon dolarlara varan çok büyük bütçeler ayırmışlardır. Üstelik konu üzerinde bir veya birkaç bilim insanı değil, çok tecrübeli sismologlardan oluşan büyük proje grupları çalışmaktadır. Depremi önceden tahmin problemi hem çok yönlü olup hem de kolay çözülebilecek bir problem değildir. Marmara Havzasında tarihsel depremlere istinaden, deprem riski bakımından önemli olan büyük depremlerin her yüz-yüz elli yılda bir olduğunu ve yapılan olasılık (ihtimal) hesaplarına göre tehlikenin büyük olduğunu söyleyebiliriz. Nite-

kim Ulusal Deprem Tehlike Haritası bulunduğunuz herhangi bir konum için maruz kalacağınız olası yer hareketi şiddetini göstermekte ve tehlikenin derecesine işaret etmektedir.

Bunun dışında, ülke ekonomisindeki deprem riskine yönelik bir analiz yapabilmek ve toplum endişesini gidermeye yönelik çok daha yakın gelecek için depremin nerede, ne zaman ve hangi büyüklükte önceden kestirimini yapabilir miyiz? Kesinlikle hayır. Biz jeofizikçiler, fay mekanizmasının ve deprem hareketinin her yönüyle modellenemeyecek derecede çok karmaşık (complicated) olduğunu ve dolayısıyla, örneğin, bir fay boyunca hareketin başka bir fayın dinamik davranışını etkileyebileceğini iddia etmenin veya genel olarak depremlerin kısa, orta veya uzun vadeli lokasyon, zaman ve büyüklüğünü önceden kestirmenin, bunca yıldır dünyada birçok araştırma grubu tarafından yapılan bilimsel çalışmalara rağmen, henüz mümkün olmadığını çok iyi biliyoruz. Yerbilimlerinde deprem sismolojisi ve aktif tektonik konularında uzmanlaşmamış kişilerin, bilimsel olmayan uluorta beyanat vermeleri halkın yanlış bilgileneşine yol açmaktadır. Biz jeofizikçiler, depremi bir ulusal güvenlik konusu diye ele alarak ve topluma karşı bilim insanının sorumluluğunu taşıyarak, bilimsel davranışlarımızla örnek olmak zorundayız. Deprem-zemin-yapı üçlüsünün son iki başlığı toplumu daha çok ilgilendirmektedir. Biz jeofizikçiler, yerel yönetimlerle dayanışma yoluyla bu konularda sıkça ve dönemsel su-

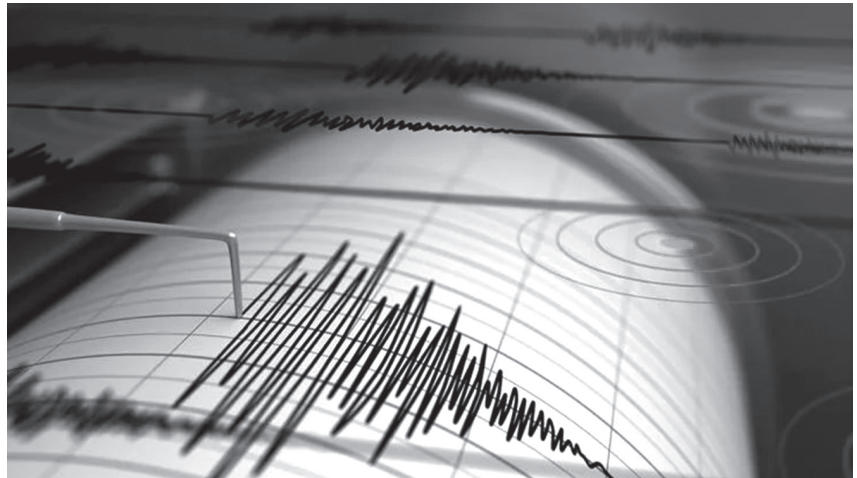
Depremi nerede, ne zaman ve hangi büyüklükte önceden kestirimini yapabilir miyiz? Henüz mümkün değil.

numlar yaparak topluma daha çok yararlı oluruz.

- *Erken uyarıyla depremi önceden tahmin arasındaki fark nedir?*

- Depremi daha olmadan kestirebilmek, depremin nerede, ne zaman aralığında, ne kadar büyüklükte olacağını tanımlayabilmek demektir. Saroz Körfezi-Gelibolu veya İzmit-Adapazarı civarlarında her 100-150 yılda bir büyük deprem olma ihtimali çok yüksektir diyebiliriz. Bu kanaate tarihsel depremlerin geriye dönüş periyotlarından varırız. Lakin örneğin merkezi İstanbul olacak şekilde 30 km çapında dairesel alan içinde 2045 yılında 7.2 büyüklüğünde deprem olacak deyip basına beyanat vermek bilimsel hiçbir dayanağı olmayan ve bir bilim insanının yapmayacağı itibar edilemez bir davranıştır. Ne yazık ki ülkemizde bu tür beyanatlar her depremde, üstelik deprem sismolojisi konusunda ihtisası olmayan kişiler tarafından, basına verilmektedir.

Aslında, depremin bir ulusal güvenlik meselesi olduğunu kavramak yalnızca bilim insanlarına değil basın mensuplarına da sorumluluk yükler. Bu nedenle, ülkemizde basın da bu konuda kabahatlidir. Bilinçli ve sorumlu bir basın kuruluşu, Avrupa ve Amerika’da olduğu gibi, tıp, teknoloji, tarım, eğitim, doğa bilimleri, çevre ve birçok konularda uzman olan muhabirler yetiştirmelidir. Böylelikle bir muhabir, deprem konusunda uluorta bir kişiyi bulup konuşturmak yerine, konunun uzmanı olan deprem sismolojisinde tecrü-





beli bilim insanlarına, zemin konusunda deneyimli geoteknik deprem mühendislerine, yapılar konusunda deneyimli inşaat mühendislerine başvurmalıdır. Ve basın popüleri olan depremin kendisinden ziyade halkı daha çok ilgilendiren zemin ve yapı konularını öne çıkarmalıdır.

Erken uyarı, örneğin İzmit'te olmuş bir depremi, merkez üssüne en yakın birkaç istasyonda kaydedilen ilk varan P-dalgalarına istinaden tespit edip, 170 km batısında İstanbul'da halkı anında akıllı telefonlarla bu depremden haberdar etmektir. Bu ne işe yarar? Sismograf istasyonlarında P-dalga türünden ilk varan cisim dalgasını müteakip S-dalga türünden cisim dalgası kaydedilir. Cisim dalgalarını takip eden, büyük genlikli yüzey dalgaları türünden asıl tehlikeli olan deprem dalgaları sismograf istasyonlarında kaydedilir. Dolayısıyla, İstanbul'da bir vatandaş merkez üssüne yakın bir sismograf istasyonunda P-dalgası kaydedilir kaydedilmez erkenden uyarırsanız, diyelim ki 10 saniye sonra tehlikeli deprem dalgaları vatandaşın bulunduğu mevkiye varmadan belki doğalgaz vanasını kapatmak ve açık alana çıkma fırsatını elde edebilir. Erken uyarı depremleri önceden tahmin etmekten çok daha fazla mümkün olup vatandaş için de daha önemlidir. Kaliforniya ve Çin'de sınırlı başarılı da olsa erken uyarı sis-

1766 depreminin merkez üssünün Gelibolu civarında olduğu bilinmektedir.



temleri birkaç yıl önce kullanılmaya başlanmıştır. Sistemin sınırlı başarılı olması derken şunu kastediyoruz: sismograf istasyonlarına ilk varan P-dalgasını bazen gürültüden ayırt etmek mümkün olmayabilir.

### **Tarihsel depremlerin büyüklüklerinin tahmini**

- Deprem kayıtlarının alınmasından önceki tarihsel depremlerin büyüklüğünü nasıl tahmin edebiliriz?

- 1509 yılında küçük kıyamet diye adlandırılan ve İstanbul'da büyük hasara neden olan büyük bir deprem oldu. Merkez üssünün nerede olduğu bilinmemekle beraber İzmit civarında olduğu tahmin edilmektedir. 1766 depreminin merkez üssünün Gelibolu, 1894 depreminin ise yine İzmit civarında olduğu bilinmektedir. Lakin bütün bu depremlerin büyüklüğü hakkında güvenilir bir tespit yapmak Osmanlı dönemine ait tarihi belgelere dayanılarak oldukça zordur. Bunun nedeni, deprem hasarını merkezi hükümete rapor edenler ya kadılar ya da imamlardı. Bu kişiler, merkezi hükümetten azami yardımı temin edebilmek için deprem hasarını abartırlardı. Lakin, depremin süresi hakkında ise masumane gerçeğe yakın bir süreyi telaffuz ederlerdi. Bu nedenle, depremin büyüklüğü hakkında güvenilir tahmini, rapor edilen hasar tür ve miktarı yerine, ancak deprem hareketinin süresine dayanarak yapabiliriz. Depremin süresiyle büyüklüğü arasında ampirik ilişkiye dayanarak, örneğin, yaklaşık art arda üç büyük şokun 19 saniye sürdüğü 1894 depreminin 6-6.5 büyüklüğünde olduğu tahmin edilmektedir.

### **Zeminin ve yapının depreme karşı davranışı**

- Zeminin deprem hareketine karşı davranışı hakkında neler söyleyeceksiniz?

- Bir inşaat projesi için zeminin sismik anlamda tanımlanması binaların emniyetli olmasını sağlamaya yönelik zemin ıslahı için elzemdir. Zeminin sismik anlamda modelini oluşturan parametreleri geoteknik sondajlardan ve laboratuvar deneylerinden elde edilen bilgilerle birlikte kullanarak, geoteknik mühendisi "zeminin geoteknik modelini" gerekli hassasiyetle tanımlayabilir. Depreme yönelik geoteknik modelleme, zemin hakim periyodunun ve zemin büyütme katsayısının tespiti, zeminin suya doymuşluk derecesini gösteren Poisson oranının hesaplanması, sıvılaşma ve mikrozonlama analizlerinin yapımı ve nihayet binaların asismik tasarımını kapsar. Zeminin sismik modelini tanımlayan sismolojide ihtisas yapmış jeofizikçi bir kardiyolog gibi zeminin geoteknik modelini tanımlayarak ıslahını projelendiren cerrah rolündeki geoteknik mühendisine yardımcı olur.

Çok-katlı bir binayı bir yay gibi düşünürsek, binanın deprem esnasındaki hareketini yayın sönümlü salınımına benzetebiliriz. Bu salınımı tarif eden esas parametre yayın salınım periyoduna eşdeğer olan binanın kendine özgü periyodudur. Kayaya göre nispeten gevşek malzemedir oluşan zemin içinde yayılan deprem dalgaları, bir kaval içinde üretilen ses dalgaları gibi davranır. Üflenen kavalın bazı ses harmoniklerini üretilip, sonra onların genliğini büyütürsek bize duyurması gibi, zemin de maruz kaldığı yüzey dalgalarının harmoniklerini büyütürsek yanıl yönde yayılmasına neden olur. Zeminin bir radyo verici istasyonu, binayı da bir alıcı istasyon gibi düşünürsek, en az parazit ile en fazla ses iki istasyonun frekanslarının çakışmasıyla elde edilir. Benzer, fakat arzu edilmeyen biçimde, deprem esnasında zemin hakim periyoduyla bina periyodu çakışırsa, bina tehlikeli biçimde sarsılabilir. Zemin ıslahının bir amacı, zeminin yüzey dalgalarını büyütmesine ve zemin hakim periyodunun uzamasına karşı tedbirler almaktır. Bunu sağlamak için ya zeminin gevşek tabakalarını maliyeti makul ise hafriyatla sıyrmanız gerekir veya S-dalga hızını



zemini sıkılaştırarak artırmanız gerekir.

**- Yapının deprem hareketine karşı davranışı hakkında neler söyleyeceksiniz?**

- Yeni bir yapı tasarlarken, depremin etkisini en asgariye indirebilmek için Semih Tezcan Hocamızın belirttiği şu kurallara mühendislerin ve mimarların titizlikle uymaları gerekmektedir: “Çerçevesiz sistemler yerine perdeli sistemleri tercih et. Planda düzgün ve simetrik sistemleri seç. Burulmaya olanak verme. Binanın hiçbir yerinde gereksizce ağır kütle oluşturma. Zayıf kolon güçlü kiriş yerine, güçlü kolon zayıf kiriş seç. Ağır cephe askıları ve panelleri kullanma. Kısa kolona müsaade etme. Tehlike katına (yumuşak kat) müsaade etme. Çelik profil kolonlu yapılarda, Japon mucizesi denilen kompozit kesitleri kullan. Betonarme kolonları ise alt ve üst uçlarında etriyelerle yoğun bir tarzda sar. Bitişik binaların çarpışmasına engel ol. Kat başına 2 cm boşluk bırak. Kolonları konsollara veya kiriş ortalarına oturtma. Yumuşak zeminlerde sivilaşma ve/veya zemin büyütme riskini çok iyi analiz et. Temelde ve/veya üst katlarda sismik izolatörler ve söndürücüler kullanarak mutlak deprem güvencesini garantiye al.”

Deprem hareketinin bir binaya tatbik ettiği kuvveti, dolayısıyla muhtemel hasarı azaltmak için binanın kütlelerini ve/veya hareketin ivmesini azaltmalıyız. Dolayısıyla, binalarımızı hafif malzemeye yapmalıyız. Yani, yapıları hantal beton ve tuğla yığınları şeklinde inşa etmek yerine, inşaat kültürümüzü değiştirip, yapılarda ahşap ve çelik malzeme kullanmalıyız. Deprem hareketinin ivmesini ise, zemini ıslah ederek, gevşek bir zemini sıkılaştırarak azaltabiliriz.

**- Gevşek zemin üzerine oturtulmuş bir yapı kaya üzerine oturtulmuş bir yapıya göre, zemin ıslah edilmezse, deprem hareketinden daha fazla etkilenir ve hasara maruz kalma ihtimali daha fazladır; doğru mu?**

- Evet. Gevşek zemin daha ziyade kil-silt-kumdan oluşan alü-

yon malzemenin çökeldiği ovalarda mevcuttur. Aslında bu konuyla yakından ilişkili esas mesele Bursa, Adapazarı, Adana ve Mersin gibi ovaların yerleşime açılmaması, aksine tarımsal amaçlı kullanılması gerekirdi. Eski Bergama, tapınakların bulunduğu ve esas itibarıyla kaya zeminden oluşan tepenin yamacındadır; yeni Bergama ise güzelim ova üstündedir. Ne acıdır ki, iki bin yıl öncesine göre iki bin yıl geriden düşünülüyor. Deprem-yapı ilişkisine mahsus çok önemli bir hususu dikkatinize sunmak isterim. Örneğin Amerika'nın Kaliforniya eyaletindeki sağ-yanal atımlı San Andreas Fayı üzerinde San Francisco kentine yakın 6.5 büyüklüğündeki bir depremin sebep olacağı can ve mal kaybı, yine sağ-yanal atımlı Kuzey Anadolu Fayı üzerinde İzmit kentine yakın yine 6.5 büyüklüğünde bir depremin sebep olacağı can ve mal kaybından kesinlikle çok çok daha az olur. Bunun nedeni, yapılaşmamızın nispeten daha kötü kalitede olmasıdır.

**- Türkiye'nin deprem gerçeği hakkındaki söyleşimizin bir özetini yapar mısınız?**

- Deprem konusu bilimsel olması bakımından akademik ortamlarda tartışılmalıdır. Medyada bu konunun tartışılması, hele hele sismoloji konusunda uzman olmayan kişiler tarafından her deprem olduğunda gündeme getirilmesinin hiçbir yararı yoktur. İnsanları, doğal bir olay olan depremden korkutmak ve tedirgin etmenin ve bu konuda medyada

Yapıları hantal beton ve tuğla yığınları şeklinde inşa etmek yerine, inşaat kültürümüzü değiştirip, yapılarda ahşap ve çelik malzeme kullanmalıyız.



dedikodu yapmanın hiçbir yararı yoktur. Halkımızın bir depremin ardından telaşlanıp gecelerini parklarda veya sokaklarda geçirmelerine meydan vermemek için, örneğin, Fethiye'deki depremden sonra tsunami olur mu veya Marmara'daki 5.1 büyüklüğündeki depremin ardından daha büyük deprem olur mu gibi soruların muhatabı olarak, Amerika, Çin ve Japonya'daki gibi resmi ve yetkin bir kuruluşun gerektiği zaman bilimsel açıklamada bulunup basındaki dedikodu türünden beyanatlara meydan vermemesi gerekir.

Depremden ziyade, medyada işlenmesi gereken mühendislik konuları zemin ve daha da önemlisi yapıdır. Bu iki hususta yapılması gerekeni, Newton'un İkinci Kanunu çok açık biçimde ifade etmektedir: Bir cisme uygulanan ve onu harekete maruz bırakan kuvvet eşittir cismin kütlesi çarpı hareketin ivmesi. O halde, deprem hareketinin bir binaya tatbik ettiği kuvveti, dolayısıyla muhtemel hasarı azaltmak için ne yapmalıyız? Binanın kütlelerini ve/veya hareketin ivmesini azaltmalıyız. Unutmayalım ki, deprem ağır yapılara daha fazla yüklenir. Dolayısıyla, binalarımızı hafif malzemeye yapmalıyız. Deprem hareketinin ivmesini ise, bir yandan zemini ıslah ederek, yani gevşek bir zemini sıkılaştırarak azaltabiliriz, bir yandan da yeni yerleşim alanları için tarımsal amaçlı kullanılması gereken gevşek alüvyon malzemeden oluşan ovalar yerine kaya zeminden oluşan yamaç araziler tahsis etmeliyiz.