

## Deprem-Zemin-Yapı İlişkisi

### Öz Yılmaz

**Slide 1:** Muhterem misafirler, Cumhuriyetimizin Yüzüncü Yılı Kutlu Olsun. Önümüzdeki 25 dakikalık süre içinde, deprem-zemin-yapı ilişkisini anlatacağız. Özellikle, bir fay zonunda biriken tektonik yükün ani boşalması sonucu oluşan depremin ürettiği sismik dalgalar, kayalardan oluşan yer kabuğunda sol üstte görülen cisim dalgaları olarak yayılırlar ve yüzeye yaklaştıkça dalga hızlarının giderek azalması sonucu, ucu oklu sarı eğri çizgiyle temsil edildiği gibi yönleri dikeye yaklaşır. Bilahare, sismik dalgalar kayalara nispeten yumuşak, gevşek, alüvyon gibi çökelti malzemedan oluşan zemin katmanı içine girer, sol üstte görülen genlikleri cisim dalgalarına nispeten çok daha büyük yüzey dalgaları şeklinde yatay ve düşey yönde sarsıntıya neden olurlar. Nihayet bu dalgalar bir yapının temeline ulaşır, yapıyı sarsmaya başlar. Yapı, deprem hareketinin ivmesi ne kadar yüksek olursa ve yapının kütlesi ne kadar ağır olursa, o denli deprem hareketinin kuvvetine maruz kalır. Bu kuvvete dayanamıyacak kadar zayıf ise, yapı hasar görür veya yıkılır.

**Slide 2:** Fayları, buradaki örnekte olduğu gibi, Kuzey Anadolu Fay Sisteminin Marmara Bölgesinde karadaki segmentlerini saha jeolojisi ile izleyebilir ve haritalayabiliriz.

**Slide 3:** Hatta, yüzeydeki fay aynalarından fay segmentlerinin maruz kaldığı hareketin karakteristiklerini de belirleyebiliriz.

**Slide 4:** Lakin, fayların derinlikte geometrilerini belirlememiz için sismoloji bilimine başvururuz. Normal, ters, listrik, ve bindirme faylarını düşey sismik kesitlerde takibedebiliriz. Marmara Denizinin en batısındaki Tekirdağ Çukurundan buradaki örnekte, yoğunluklu sentetik ve antitetik normal fayları görüyoruz.

**Slide 5:** Lakin, fay zonunda tektonik yükün boşalması sonucu fay hareketinin karakteristiğini belirlemek için buradaki örnekte görüldüğü gibi fayların üç-boyutlu geometrisini tanımlamamız zaruridir. Bu da yine sismoloji bilimiyle mümkündür. Burada görüldüğü gibi faylar yeraltındaki jeolojik formasyonlardaki süreksizlik zonlarıdır. Fayların gerçekten üç-boyutlu bir geometriye sahib olduklarını ve yüzeyde izlenen bir fayın derinde nasıl davrandığını görüyoruz. Bu görüntüye istinaden, yüzeyde fayları hendek kazarak izlemenin bir yararı olmadığını da idrak edebiliyoruz. Ayrıca unutmayalım ki, her büyük deprem yeni fayların oluşmasına da sebep olabilir.

**Slide 6:** Fayların geometrisini alta görüldüğü gibi düşey sismik kesitlerde üstte görüldüğü gibi yatay sismik kesitlerde izleyerek doğru tanımlayabiliriz. Üstteki şekilde yeraltının 2,500 m derinlikte yatay kesitinde görüldüğü gibi, aslında faylar tek bir çizgi veya düzlemle tarif edilemezler.

**Slide 7:** Fay yerine, aslında, fay zonu demek daha doğrudur. Bu örnekte bir yatay sismik kesitte, sol yanal atımlı fay zonundaki Riedel shear fracture sistemini görüyoruz.

**Slide 8:** Toplumda fay denince deprem, deprem denince de doğal afet akla gelir. Unutmayınız ki deprem doğal bir afet değil, doğal bir olaydır. Depremi afete çeviren cehalettir. Ayrıca toplumun fayların faydaları hakkında da bilgilendirilmesi gerekir. Bu şekilde kırmızı çizgilerle temsil edilen yanal-atımlı fay segmentlerini ve hareket yönünü temsil eden okları görüyoruz. Kalın kırmızı okların hareket yönüne göre, fay segmentleri ova veya dağ oluşumuna neden olurlar. Görüyoruz ki, fayların aslında faydaları da çoktur.

**Slide 9:** Örneğin, yüzeye kadar yükselen kristalin temel kaya formasyonları önemli mineral kaynaklara sahiptir. Yükselen formasyonların flanklarında ve içlerinde hidrokarbon rezervuarları oluşabilir. Büyük ölçekli topoğrafik yükselimsel oluşumlarla, yağmurlaşmayı ve yeraltı akiferlerin suya doymasını sağlar. Çek-yırt basenlerde önemli miktarda sediman çökelir; bu da hidrokarbon ve endüstriyel mineral depozitlerinin oluşmasını sağlar. Releasing bend zonlarındaki kabuk dilasyonu ve yüksek ısı gradyanı jeotermal enerji kaynaklarının gelişmesini sağlar. Releasing bend zonları geniş vadiler, dolayısıyla verimli tarım alanlarının oluşmasını sağlar.

**Slide 10:** Bu demektir ki, Türkiyemizin doğasının güzelliğini, ve yer üstü ve yeraltı zenginliğini faylara borçluyuz.

**Slide 11:** Bu sunumda, depremin kendisinin değil, depreme dayanıklı olmayacak tarzda niteliksiz inşaat malzemesiyle yapılan binaların can ve mal kaybına sebep olduğunu göreceğiz.

**Slide 12:** Bu sunumda, depremin kendisinin değil, deprem hareketine maruz kalan çok zayıf, dirençsiz, yumuşak zemin üstünde zemin ıslah edilmeden yapılan binaların can ve mal kaybına sebep olduğunu göreceğiz.

**Slide 13:** Yine bu sunumda, depremin kendisinin değil, deprem hareketine maruz kalan binaların, zemin ıslah edilmiş olsa da veya inşaat nitelikli olsa da, binanın giriş katının bir market ve benzeri ticaret alanına dönüştürülmesi için alan kazanmak amacıyla taşıyıcı kolonlarının kesilmesinin neticesinde can ve mal kaybına sebep olduğunu göreceğiz.

**Slide 14:** Ve yine bu sunumda, depremin kendisinin değil, deprem hareketinin tetiklediği heyelan kaymalarının sebep olduğu, zemini heyelanlı mevkilerde yapılan binaların can ve mal kaybına sebep olduğunu göreceğiz.

**Slide 15:** Sismologlar deprem dalgalarını sismogramlar olarak kaydeder. Bir sismograf istasyonunda, deprem dalgalarının oluşturduğu yer hareketi, depremin sebep olduğu fay hareketinin karakteristiğine göre, genlikleri farklı olan üç yönde ölçülür --- düşey hareket, kuzey-güney yönünde yatay hareket, ve doğu-batı yönünde yatay hareket. Burada gösterilen sismogramlarda ölçülen parametre hareketin ivmesidir. Niçin ivme dersiniz?...

**Slide 16:** Otomobillerin çarpışma testine bakalım. Üstteki otomobilin 5 saniyede 60 km/san hıza ulaşacak tarzda önündeki kontrollü bariyere çarpacağını düşünelim. Alttaki aynı otomobilin ise 5 saniyede 30 km/san hıza ulaşacak tarzda kontrollü bariyere çarpacağını düşünelim. Newton'ın ikinci kanununa göre, bir otomobilin bariyere tatbik ettiği kuvvet eşittir, otomobilin kütlesi çarpı hareketin ivmesidir. Bu iki otomobilin kütleleri aynı olduğuna göre, alttaki otomobilin bariyere tatbik ettiği kuvvet üstteki otomobilin tatbik ettiği kuvvetin yarısıdır. Dolayısıyla, alttaki otomobil çarpışma neticesinde nispeten daha az hasara maruz kalmış olacaktır. Bu sonucu ilerde depremin yapıya tatbik edeceği kuvvetle yapının maruz kalacağı hasar ilişkisinde kullanacağız.

**Slide 17:** Deprem hareketinin düşey bileşeninin davranışını, bu örnekte görüldüğü gibi, düşey yönde burkulan yol temsil etmektedir.

**Slide 18:** Deprem hareketinin yatay bileşeninin davranışını da, bu örnekte görüldüğü gibi, yatay yönde burkulan demiryolu temsil etmektedir. Tahmin edebiliriz ki, bu iki bileşenden, binalar için en tehlikeli olan yatay harekettir.

**Slide 19:** Samos Adası Karlovası açıklarında, 30 Ekim Türkiye saatiyle 14:51 civarında, kabaca doğu-batı yönlü normal-atımlı bir fay üzerinde ve 14.9 km derinlikte 6.9 büyüklüğünde bir deprem oldu. Normal atım sonucu fayın kuzey bloku güney blokuna göre aşağı yönde harekete maruz kaldı.

**Slide 20:** Samos depremi, Seferihisar, Alaçatı, ve Demircili sahillerinde dalga yüksekliği 1 metreye varan tsunamiye sebep oldu. Lakin, depremin merkezüssünden daha uzaklarda --- Bayraklı, Bornova, Karşıyaka, ve Konak'ta, bazı binalar yıkıldı ve bazı binalar da ciddi boyutta hasara maruz kaldı. Daha da vahim olan, 115 ölü ve çok sayıda yaralı, ve evsiz-barksız insanlar. Soru şu --- deprem merkezüssüne daha uzakta olan İzmir'in bahis konusu mevkileri depremden neden en çok etkilendi?

**Slide 21:** İç İzmir Körfezi, sığ deniz baseni (yani çukurluk şeklinde çökelti havzası) olup, Ege Bölgesinin tümünü etkisi altına alan kuzey-güney yönündeki tektonik açılmaya tabidir. Bu açılmayı, doğu-batı yönlü basen kenarı normal-atımlı diri faylar kontrol etmektedir --- güneyde İzmir fayı, kuzeyde ise Karşıyaka-Bornova fayı. Genç alüvyon ve nehir delta fan çökeltileri, basen içinde üst sığ sedimanları teşkil eder. Bayraklı, Bornova, ve Karşıyaka, inşaat diliyle gevşek zemin olan bu genç alüvyon çökeltiler üzerinde oturmaktadır. Bahis konusu basenin bu özelliklerini, bir fiziksel parametreyle tanımlayıp, depremle olan ilişkisini açıklayacağız.

**Slide 22:** Bu parametre, depremde en fazla hasara sebep olan sismik dalga türünün yayılma hızıdır. Bu hız ne kadar düşük ise, zemin, tehlikeli deprem dalgalarına o denli az dirençli demektir. Bu haritada kırmızı renk sismik hızların çok düşük olduğu, dolayısıyla zeminin en az dirençli olduğu mevkilerdir --- yani, Karşıyaka, Bayraklı, Bornova, ve Konak.

**Slide 23:** Ayrıca, düşük hız demek, burada tarif edilen sebep-sonuç ilişkisine göre, deprem hareketinin ivmesinin yüksek olduğu anlamına gelir. Bu da ne demektir --- hatırlayalım, deprem hareketinin ivmesi ne kadar yüksek ise binaya tatbik ettiği kuvvet o denli büyük olur, dolayısıyla binanın hasar veya yıkılma tehlikesi o denli yüksek olur.

**Slide 24:** Şimdi, gelin bu hız haritasını Google görüntüsünün üzerine oturtalım ve Samos depreminin muhtelif istasyonlardaki sismogramlarını inceliyelim. Merkezüssüne en yakın bir istasyondan başlayıp --- örneğin Seferihisar --- İzmir Karşıyaka gibi uzak bir istasyondaki ivme değerlerini inceliyelim.

**Slide 25:** Deprem merkezüssüne yakın Seferihisar istasyonunda deprem hareketinin ivme değerleri düşük. Çünkü sismik hız oldukça yüksek. Merkezüssüne yakın olması, illaki ivme değerlerinin yüksek olacağı anlamına gelmez.

**Slide 26:** Urla istasyonunda ölçülen ivmeler de düşük --- sismik hızların nispeten düşük olmasına rağmen. Neden? Çünkü, sismik dalgalar yol aldıkça ve merkezüssünden uzaklaştıkça, giderek soğrulur, genlikleri düşer. Nasıl ki konuşurken havada yayılan ses dalgalarını size yakın bir kişi duyabiliyorsa ve fakat daha uzakta bir kişi sizi işitemiyorsa, sismik dalgalar için de bu fiziksel soğrulma olayı aynıdır.

**Slide 27:** Güzelbahçeye gelinceye kadar, genlikler giderek düşmüş görünüyor.

**Slide 28:** Lakin merkezüssünden daha uzaktaki Konak mevkiinde bir istasyonda ivmeler yüksek --- sismik dalgaların soğrulmaya maruz kalmasına rağmen, bu istasyonda sismik hızlar düşük olduğu için.

**Slide 29:** Merkezüssünden giderek uzaklaşıp, Bayraklı mevkiine geldiğimizde, hızların çok düşük olması nedeniyle, ivme değerleri iyice yükselmiş görünüyor. Sismologlar ve geoteknik mühendisleri, bu fiziksel hadiseye zemin büyütmesi derler. Tekrar hatırlayalım --- düşük hız, zeminin çok gevşek, tehlikeli deprem dalgalarına dirençsiz olduğu anlamına gelir.

**Slide 30:** Ve nihayet, Karşıyaka'da sismik hızların çok ama çok düşük olması nedeniyle, ivme değerlerinin oldukça yüksek olduğunu görüyoruz. Toparlarsak, merkezüssünden uzak olmasına rağmen, İzmir'in Bayraklı, Bornova, Konak, ve Karşıyaka mevkilerinde zeminin çok zayıf, dirençsiz olmasından ötürü, deprem dalgaları amplifikasyona maruz kalmışlardır. Dolayısıyla, böylesine bir zemin üstüne oturan binalar da oldukça yüksek hasar veya yıkılma tehlikesine maruz kalmışlardır. Dahası, yapı malzemesinin düşük standartta olması, bazı binaların yıkılma tehlikesini daha da arttırmıştır.

**Slide 31:** Deprem hasarını azaltmak için, dolayısıyla, deprem hareketinin bir yapıya tatbik ettiği kuvveti azaltmak için, yapısal kütle ve/veya deprem hareketinin ivmesini azaltmak gerekir.

**Slide 32:** Yapısal kütle nasıl azaltabiliriz? Ağır tuğla ve beton yapı malzemesi yerine, Kalifornia ve Japonya gibi deprem ülkelerinde olduğu gibi, inşaat çeliği ve ahşap gibi hafif malzeme kullanarak. Bu, inşaat kültürünü değiştirmek anlamına gelir.

**Slide 33:** Deprem hareketinin ivmesini nasıl azaltabiliriz? Zemine mahsus sismik hızları yükselterek. Bu da, geoteknik diliyle, zemini sıkılaştırarak, deprem hareketine mukavemetini arttırmak anlamına gelir.

**Slide 34:** Daha da önemlisi, alüvyon ovaları yerleşim alanı yaparak, hem yapıları yüksek ivmeli deprem dalgalarına teslim ediyoruz, hem de tarım topraklarını telef ediyoruz --- Bursa, Adapazarı, Adana, Bergama çok verimli ovalar gibi. Ayrıca, unutmayalım ki Bayraklı ve Bornova'nın üstüne oturduğu alüvyon basen bir zamanlar çok verimli bir tarım alanıydı. Ovakentler yerine antik çağdaki gibi yamaçkentler inşa etmeliyiz.

**Slide 35:** Deprem-zemin-yapı ilişkisinin hikayesi henüz bitmedi. Zemin büyütmesi aslında, bu grafikte görüldüğü gibi, deprem dalgalarının frekansına bağlıdır. Her zemin katmanının kendine mahsus, zemin büyütmesinin en büyük değerine tekabül eden kırmızı çizgiyle işaretlenen bir frekansı, dolayısıyla onun tersi olan doğal periyodu vardır. Zeminin doğal periyodu, zemin katmanının kalınlığıyla doğru orantılı, sismik hızıyla ters orantılıdır. Dolayısıyla, Bayraklı'da olduğu gibi, yumuşak ve kalınlığı fazla ve sismik hızları düşük olan bir zeminin uzun bir doğal periyodu olur. Öte yandan, boyutu uzun bir yapının, örneğin çok katlı bir binanın veya uzun bir köprünün, uzun bir doğal periyodu olur. Deprem esnasında, zeminle yapının doğal periyodları çakışırsa, yani, zemin ve yapı rezonans yaparsa, o yapı yıkılma tehlikesine maruz kalır.

**Slide 36:** Ayrıca, depremin süresi arttıkça, zemin yorulur ve sismik hızı düşer, dolayısıyla, zeminin doğal periyodu uzar. Diğer bir deyişle, deprem süresinde zeminin doğal periyodu artarak değişebilir. Bunun sonucunda, uzun bir yapı, örneğin çok katlı bir bina, sarsıntının ilk saniyelerinde depremin kuvvetine mukavemet gösterse de, sarsıntının ilerleyen saniyelerinde, yapının doğal periyodu zeminin doğal periyoduyla çakışabileceği için mukavemetini kaybedip, hasar veya yıkılma tehlikesine maruz kalabilir.

**Slide 37:** Bir belediyenin, yalnızca üst yapılarla değil, şehrin bütün mevkilerinin üstüne oturduğu zeminle ilgili sorumlulukları da vardır. Sismik mikrobölgeleme yaparak, burada gösterilen İzmit örneğinde olduğu gibi, deprem mühendisliği parametrelerini hesaplamak, sağlıklı yapılaşmak için zaruridir.

**Slide 38:** Deprem, zeminde kumlu kesimlerin yeraltı suyunun istilası sonucu zeminin sıvılaşmasına yol açar. Bu hadise de ...

**Slide 39:** İzmit Kadıköy mevkiinde, 17 Ağustos 1999 depreminde olduğu gibi, binaların, suda dalgaya maruz kalan kayak gibi sağa veya sola eğilmesine sebep olur.

**Slide 40:** Binaların depreme karşı dirençli olacak şekilde tasarlanması, kesinlikle mimarların tasarrufuna bırakılmaz.

**Slide 41:** Deprem hareketinin heyelan kayma yüzeylerini tetikleyerek, heyelan kütlelerini harekete geçirmesiyle, büyük sanayi tesisleri çok büyük tehlikeye maruz kalabilirler.

**Slide 42:** Dolayısıyla, Socar Aliğa Star Rafinerisinde olduğu gibi, inşaat öncesi, gerektiğinde heyelan araştırmaları yapmak zaruridir.

**Slide 43:** Bir baraj proje sahasında muhtemel heyelan tehlikesini araştırmak üzere, özellikle muhtemel heyelan kayma yüzeylerini tesbit etmek için sismik etüd yaptık.

**Slide 44:** Neticede, heyelan riski çok yüksek olacağından, baraj yerinin değiştirilmesine karar verildi.

**Slide 45:** Avrasya Tünel projesinde, planlanan güzergah boyunca yapılan geoteknik sondajlara istinaden inşa edilen jeolojik kesitte tünel güzergahını kesen, üstte A ve B ile işaretlenen iki fayın varlığı öngörülmüştü. Bu çok ciddi bir durumdu. Aslında bu projedeki yanlışlık milyonlarca dolara malolan deniz sondajlarından önce yeraltının görüntüsünü yüksek rezolüsyonla elde etmek için sismik etüdü yapılmamasıydı. Sismik etüdü sonucuna göre, kaç adet, hangi lokasyonlarda, ve hangi derinliklerde sondaj yapılması gerekirdi.

**Slide 46:** Sondajları müteakip yaptığımız üç-boyutlu sismik etüd sonucunda, bu fayların mevcut olmadığını tesbit ettik. İnşaat proje ekibi müthiş rahatlamıştı.

**Slide 47:** Ve ayrıca tünel güzergahı boyunca kayadan yumuşak zemine, yumuşak zeminden kayaya geçiş noktalarının koordinatlarını sismik görüntü hacmine istinaden sadece 1.5-2 m hatayla belirlemiş olduk. Bu bilgiler, tüneli kazarken kullanılacak matkap tasarımının ve kazı maliyetinin güvenilir tarzda hesabedilmesini de mümkün kılmıştır.

**Slide 48:** Bu sunumdan hatırlayacağımız noktalar: Derdimiz deprem değil, zemin ve yapı olmalı. Depremi uyardığı zemindeki hareketin ivmesini azaltmak için zemini sıkılaştırmak gerekir --- bu bir maliyet kalemi, lakin geoteknik ve inşaat mühendislerine göre toplam yapı maliyetinin sadece %3-5 miktarı. Müteahhit bu masraftan yüksünmemeli. Depremi binaya tatbik ettiği kuvveti azaltmak için, yapının kütlesini azaltmak --- ağır tuğla ve beton yerine inşaat çeliği ve ahşap gibi hafif inşaat malzemesi kullanmak gerekir --- bu da inşaat kültürünü değiştirmek anlamına gelir.

**Slide 49:** Ve son olarak tekrar hatırlayalım: Deprem bir doğal afet değil, Yerkürenin dinamik karakterinin tezahürü doğal bir olaydır. Depremi afete çeviren cehalettir. Ayrıca unutmayalım ki, yer ana, eski Türk inancındaki Umay Ana, aslında çok şefkatlidir. Zira, bir depremin ürettiği enerjinin büyük bir kısmı, fay zonundaki kaya malzemenin mekanik ezilmesine ve sürtünmeden ötürü ısıya harcanır; yalnızca yüzde 20'den az bir kısmı deprem odağından yayılan ve binaların oturduğu zemine ulaşarak tehlike arzeden sismik dalgalar tarafından tüketilir. Hepinize saygılar sunar, sağlıklı günler dilerim.