

**ZEMİN NEDEN BU KADAR ÖNEMLİ?**

Doç. Dr. Eşref YALÇINKAYA

**Giriş**

Büyük bir çoğunluğumuz, son yıllara kadar evimizin ne tür bir zemin üzerine kurulu olduğunu hiç düşünmemiştik. Ta ki, 1999 İzmit-Gölcük depreminin Adapazarı ve Yalova'daki acı sonuçlarını görünceye kadar. Deprem sonrası bina hasarlarının belirli alanlarda toplanması, bize bu tür felaketlerde üzerinde yaşadığımız zeminin ne kadar önemli olduğunu gösterdi ve kafamızda *kötü zemin, iyi zemin* kavramları oluşmaya başladı. Bir süre sonra, tam doğru olmasa da, iyi zeminlerin sert zeminler olduğunu, kötü zeminlerin ise yumuşak zeminler olduğunu öğrendik (Şekil 1). Biraz daha bilimsel bakarsak; sert zeminleri sismik dalga (S dalgası) hızı yüksek, yumuşak zeminler ise sismik dalga hızı düşük zeminler olarak tanımlamak mümkündür. Yumuşak zemin tabakalarının gelen deprem dalgalarını önemli oranda büyüttüğü ve yeryüzünde meydana gelen hasarlarda önemli rol oynadığı uzun süredir bilinmesine karşın, bu konudaki önemli gelişmeler 1985 Michoacan Meksika depreminden sonra olmuştur. Bu depremde, kaynaktan yaklaşık 400 km uzaklıkta Mexico City şehrinin yumuşak zemin üzerine kurulu bölümünde ağır hasar ve yüksek ivme değerleri kaydedilmesi, araştırmaları büyük oranda bu konuya yönlendirmiştir (Şekil 2). Bu yazının amacı, zemin büyütmesi kavramını netleştirmek ve depreme dayanıklı yapı inşasındaki önemini ortaya koymaktır.

**Zemin büyütmesi nedir?**

Bir deprem meydana geldiğinde, farklı sismik dalgalar kaynaktan itibaren yer içinde değişik hızlarda yayılmaya başlarlar. Bu dalgalar yer yüzeyine eriştiklerinde birkaç saniyeden dakikalara varan sürelerde titreşimler üretirler. Belirli bir yerdeki titreşimin süresi ve şiddeti; depremin büyüklüğüne, kaynaktan uzaklığına, dalgaların yol aldığı ortamın fiziksel özelliklerine ve o yerin zemin özelliklerine bağlıdır. Sismik dalgalar, kaynaktan yeryüzüne kadar olan seyahatlerinin önemli bir bölümünü yer kabuğunu oluşturan sert ana kaya içinde geçirirler. Seyahatlerinin son aşaması, özellikleri ana kayaya göre oldukça farklı olan gevşek tutturulmuş zemin tabakaları içinde gerçekleşir ve bu zemin tabakalarının fiziksel özellikleri yeryüzünde gözlenen titreşimin karakteristiğini büyük ölçüde belirler. Zemin tabakaları, sismik dalgalar için adeta bir süzgeç gibidir. Bazı frekanslardaki sismik dalgalar sönmüldürülürken bazıları da büyütülür. Sismik dalgaların zemin tabakaları içinde geçirdiği değişimlerin tümüne *zemin etkisi* adı verilir. Genellikle bu değişim genliklerin artması şeklinde gözlemlendiğinden, zemin etkisi terimi *zemin büyütmesi* olarak da adlandırılır.

**Neden sismik dalgalar yumuşak zemin tabakaları tarafından büyütülürler?**

Sismik dalgaların taşıdıkları enerjii, enerji akısı kavramı (Stein ve Wysession, 2003) ile açıklamak istersek; basit bir harmonik dalga için enerji akısı ( $E$ );

$$E = A^2 w^2 \rho v / 2$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada  $A$ ; dalga genliği,  $w$ ; açısal frekans,  $\rho$ ; ortamın yoğunluğu ve  $v$ ; ortamın sismik dalga hızıdır. Sismik dalgaların seyahatlerini sert ana kayadan yumuşak zemin tabakalarına doğru yaptığını hatırlarsak, yeryüzüne doğru sismik dalga hızının ve bununla beraber ortam yoğunluğunun giderek azaldığını görürüz. Sismik dalga enerji akısının başka hiçbir nedenle değişmediğini ve dalga frekansının seyahat sırasında sabit olduğunu kabul edersek, enerjinin korunması ilkesine göre; azalan ortam dalga hızı ( $v$ ) ve yoğunluğunun ( $\rho$ ), artan genlik ile ( $A$ ) karşılanması gerekir. Bu nedenle, sert ana kayadan yumuşak zemin tabakalarına geçen deprem dalgalarının genliği büyür. Bu tıpkı sahile yaklaşan deniz dalgalarının genliklerinin artması gibidir. Kıyıdan uzakta önemli bir dalga genliği görülmezken, aynı dalga sahile yaklaştıkça hızı yavaşlar ve buna bağlı olarak ta genliği büyür. Sörf yapan sporcuların, sahile yaklaştıkça büyüyen dalga genlikleriyle mücadelesini hatırlayın (Tsunami dalgalarında da durum benzerdir). “Ne kadar büyür?” sorusunun cevabı ise;

$$B = \frac{1}{(1/\alpha) + (\pi/2)\xi}$$

bağıntısı ile tanımlanabilir (Roesset, 1977). Burada  $B$ ; maksimum büyütme,  $\alpha$ ; empedans oranı,  $\xi$ ; sönüm oranı'dır. Bağıntıda görüleceği gibi sismik dalgaların yumuşak zemin tabakaları içinde ne kadar büyütüleceğini belirleyen iki parametre vardır: *empedans oranı* ve *sönüm oranı*.

Empedans oranı, yukarıda enerji akısı bağıntısında belirtilen ana kaya / yumuşak zemin tabakası geçişinde hız ve yoğunluğun ne kadar değiştiğini tanımlar:

$$\alpha = \frac{\rho_r v_r}{\rho_s v_s}$$

Burada  $\rho_r$  ve  $v_r$ ; ana kayanın yoğunluğunu ve hızını,  $\rho_s$  ve  $v_s$  ise zeminin yoğunluğunu ve hızını gösterir. Empedans oranı ne kadar büyük olursa, sismik dalga genliği o oranda büyür.

Girişte de bahsedildiği gibi, sismik dalgalar yumuşak zemin tabakaları içinde sadece büyütülmezler, aynı zamanda sönümlendirilirler, yani genlikleri azalır. Elastik dalga enerjisinin bir kısmı ısıya dönüşür. Üstelik yumuşak zemin tabakalarının sert ana kayaya göre sismik dalgaları sönümlendirme özelliği daha fazladır. Zeminlerin sönümlendirme özelliği, *sönüm oranı* ( $\xi$ ) ile temsil edilir (Kramer, 1996);

$$\xi = \frac{\eta w}{2G}$$

Burada  $\eta$ ; zemin viskozitesi,  $w$ ; açısal frekans,  $G$ ; zemin kayma modülüdür. Enerji kaybını temsil eden sönüm oranı, farklı özellikteki zemin tabakaları için laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Kaya ortamlar için sönüm oranı %2 civarında iken, yumuşak zemin ortamlarda yaklaşık %5 alınabilir. Sönüm oranının daha yüksek olması, empedans oranının aksine, bu kez dalga genliklerini daha da azaltılacağı anlamını taşır.

Sismik dalga genlikleri üzerinde biri arttıran, diğeri azaltan bu iki etkinin büyütme değerine sonucunu bir örnekte inceleyelim. Binanızın bulunduğu yumuşak zeminin  $\rho_s$  ve  $v_s$  değerleri sırasıyla 1.8 gr/cm<sup>3</sup> ve 180 m/sn, onun altındaki sert ana kayanın  $\rho_r$  ve  $v_r$  değerleri ise sırasıyla 2.2 gr/cm<sup>3</sup> ve 760 m/sn olsun. Bu durumda, empedans oranı ( $\alpha$ ) 5.16 olarak hesaplanır. Eğer sönüm oranını ( $\xi$ ) sıfır kabul edersek, ana kayadan zemin tabakası içine geçen sismik dalga genliği en fazla yaklaşık 5 kat, yani empedans oranı kadar büyütülmüş olur. Yumuşak zemin tabakasının sönüm oranını 0.05 alırsak, maksimum büyütme 3.67 olarak hesaplanır. Sonuçta, yumuşak zemin üzerindeki yapı, ana kaya üzerindeki yapıya göre 3.67 kat daha büyük genlikli bir dalga ile titreştirilmiş olur.

### Zemin büyütme fonksiyonu

Gelen deprem dalgaları hiçbir zaman tek bir harmonikten oluşmaz, genelde hasar yapıcı özelliğe sahip dalga grubu 0.1 Hz ile 10 Hz arasında bileşenlere sahiptir. Deprem dalgalarının frekans içeriğini kaynaktaki kırılmanın özellikleri belirler, daha sonra yayıldıkları ortamın özellikleri bunu şekillendirir. Yumuşak zemin tabakaları, bu farklı genlik ve frekanslardan oluşan deprem dalgalarının tümüne aynı tepkiyi vermez. Yani; büyütme frekans bağımlıdır, bazı frekanslar daha çok, bazı frekanslar ise daha az büyütülür. En fazla büyütmenin ne olacağına, yukarıda açıkladığımız empedans oranı ve sönüm oranı karar verirken, bunun hangi frekanslı dalgada olacağına yumuşak zemin tabakasının kalınlığı ve sismik dalga hızı karar verir:

$$f_0 = \frac{v_s}{4H} \quad \text{ya da} \quad T_0 = \frac{4H}{v_s}$$

Bağıntıda  $f_0$  ve  $T_0$ ; maksimum büyütmenin görüleceği frekans ve periyot,  $H$ ; sert ana kaya üzerinde yer alan yumuşak zemin tabakasının kalınlığı ve  $v_s$ ; zemin tabakasının sismik dalga hızıdır. Maksimum büyütmenin görüldüğü periyot,  $T_0$ , genellikle *zemin hakim periyodu* (veya frekansı) olarak adlandırılır. Yukarıda verdiğimiz örnekte yumuşak zemin tabakasının kalınlığını ( $H$ ) 30 m kabul edersek, zemin hakim periyodunu yaklaşık 0.7 sn (ya da  $f_0 = 1.5$  Hz) buluruz. Yumuşak zemin tabakası, ana kayadan gelen sismik dalgalardan 0.7 sn periyotlu olan dalgaya özel ilgi gösterir ve onun genliğini en fazla, yani 3.67 kat büyütür. Diğer periyotlu bileşenlere etkisini ise, Şekil 3'te gösterilen büyütme fonksiyonunda inceleyelim.

Zemin büyütme fonksiyonları; frekansa (veya periyoda) bağlı olarak zemin tabakalarının sismik dalgalara tepkisini gösterir. Şekil 3'te yukarıda örnekte verilen parametre değerleri kullanılarak iki farklı sönüm oranı ( $\xi = 0$  ve  $\%5$ ) değeri için zemin büyütme fonksiyonları çizdirilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, zemin tüm frekanslara aynı tepkiyi vermez.  $f_0$ ,  $3f_0$ ,  $5f_0$  ve katı frekanslarda maksimum tepkiyi gösterir. Fakat sönümlendirme özelliğinin yüksek frekanslarda daha etkili olması, ilk hakim frekanstan sonra büyütme oranı önemli derecede azalır.

Maksimum büyütmenin görüldüğü ilk hakim frekans, yani  $f_0$ , aynı zamanda *rezonans frekansı* olarak ta adlandırılır. Rezonans olayı, etkileşim halindeki iki farklı titreşimin frekanslarının çakışması durumudur. Bu durumda titreşimin genliği en büyük değerine ulaşır. Salıncakta salladığımız bir çocuğu düşünün. Onu sallamak için yükselebildiği en son noktayı beklersiniz, bu durumda çok küçük bir itmeyle onu sallayabilirsiniz. Daha önce itmeye kalkışsanız salıncak size çarpar ve sallamayı başaramazsınız. Buradaki durumda bir tür rezonanstr. Salıncığın frekansıyla, sizin itme frekansınızı eşitleyerek çok daha küçük kuvvetlerle büyük genlikler elde edersiniz. İşte, zemin ve üzerindeki yapının bu durumdan uzak durması gerekir. Yani, hakim frekanslarının çakışmaması, böylece bir deprem sırasında rezonansın neden olacağı aşırı kuvvetlerden uzak kalması gerekir. Anlaşılacağı üzere zeminlerin olduğu gibi, üzerindeki yapıların da bir hakim periyodu (veya frekansı) vardır. Yapıların hakim periyodunu, inşa edildiği malzemelerin özellikleri ve yapının boyutları belirler. Kaba bir hesapla **kat sayısı / 10** şeklinde bulunabilir. Yani 7 katlı bir bina için; bina hakim periyodu;  $7 / 10 = 0.7$  sn'dir. Örneğimizi düşünersek, zemin ve üzerinde yer alan 7 katlı bir bina rezonans durumundadır. Bir deprem sırasında bu bina, etrafındaki daha düşük veya daha yüksek katlı binalara göre, zeminin neden olduğu 3.67 kat daha büyük genlikli sismik dalgalarla sallanacaktır. Buna enerji açısından bakarsak; genliğin karesi, yani yaklaşık 13 kat daha büyük enerjiye bu yapının direnmesi gerekecektir.

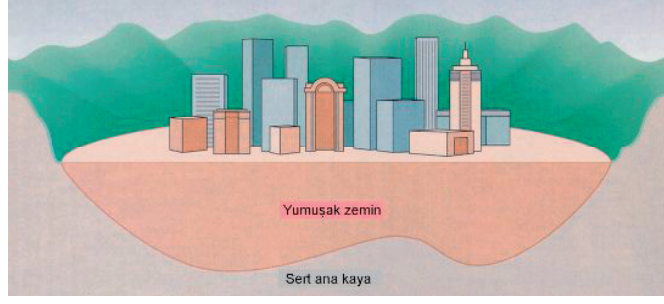
### Ne yapabiliriz?

Zeminin hakim periyodunu değiştirmek zor ve masraflı bir iş olması nedeniyle, genellikle yapının hakim periyodunun zemin hakim periyodundan farklı dizayn edilmesi yoluna gidilir. Bunun için elbette öncelikle zeminin hakim periyodunun doğru tespit edilmesi gereklidir. Son yıllarda birçoğumuz mutlaka evimizin etrafında boş alanlarda yapılan sondaj çalışmalarına veya jeofizik testlerine rastlamışızdır. Veya yeni bir inşaat yaptırmak isteyenler öncelikle bu tür bir *zemin etüt raporuna* ihtiyaç duyulduğunu görmüşlerdir. Zemin etüt raporları iki açıdan önemlidir. Birincisi; yapının inşa edileceği zeminin ne tür bir zemin olduğunun belirlenmesi, ikincisi ise; bazı fiziksel parametreler yardımıyla zeminin mühendislik davranışının (oturma, kayma, taşıma gücü, su içeriği vb.) belirlenmesidir.

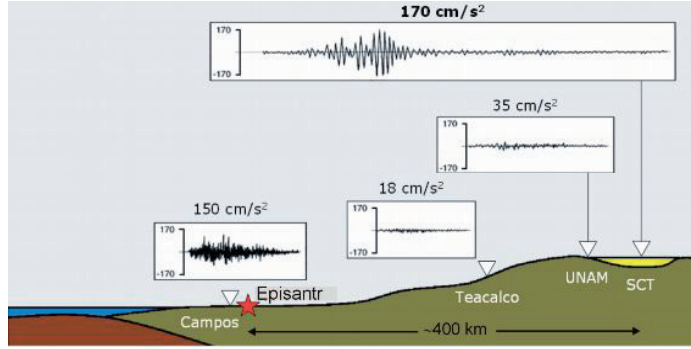
Türkiye deprem yönetmeliğinde zemin türleri dört sınıfa ayrılır: **Z1, Z2, Z3, Z4**. Bu sınıflama genellikle, yukarıda belirttiğimiz sismik dalga hızına ve zemin tabakasının kalınlığına bağlı olarak yapılır. Z1, sismik dalga hızı en yüksek ( $V_s > 700$  m/sn), yani sert ana kaya zeminlere, Z4 ise sismik dalga hızı en düşük olan ( $V_s < 200$  m/sn), yani yumuşak zeminlere karşılık gelmektedir. Yönetmelikte aynı zamanda bu zemin sınıflarının hakim periyot aralıkları ve maksimum spektral büyütme de belirtilmiştir (Şekil 4). Örneğin Z1 sınıfı için hakim periyot aralığı 0.1 – 0.3 sn, Z4 sınıfı için ise hakim periyot aralığı 0.2 – 0.9 sn'dir. Hakim periyot aralığındaki maksimum spektral büyütme ise tüm zemin sınıfları için aynı ve 2.5 katı kabul edilmiştir. Yönetmeliğin önerdiği, eğer bu dört tür zeminden hangisinin üzerine bina yapacaksan ve binanın hakim periyodu zemin için önerilen periyot aralığı içindeyse, yaklaşık 2.5 katı maksimum spektral ivmelere (yani  $0.4g \times 2.5 = 1.0g$ ) binanın dayanması gerektiği şeklindedir. Rezonans olayından kaçma gibi bir durum tanımlanmamıştır. Ne yazık ki, bir çok depremde zemin tabakalarının bu değer üstünde spektral ivmelere neden olduğu gözlenmiştir (Yalçınkaya, 2002).

### Sonuçlar

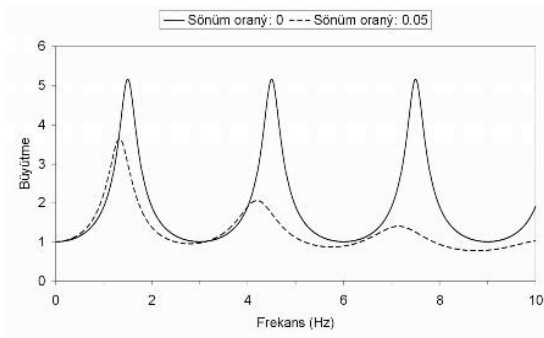
Sismik dalga genliklerinin zemin tabakaları içinde genliklerinin değişmesine neden olan sadece zemin büyütmesi değildir. Bunun yanında, ana kay topografyasına bağlı oluşan yüzeydeki odaklanmalar, havza içinde oluşan yüzey dalgaları ve topografya etkileri gibi nedenlerin tümü yeryüzünde görülen sismik dalgaları etkileyebilir. Fakat bunlar çok daha karmaşık mekanizmalara sahiptirler ve her yere özel gelişirler. Ayrıca, deprem sonucu oluşan hasarların tek nedeni de zemin değildir. Asıl önemli olan üzerindeki yapının kalitesidir. Ülkemizde henüz deprem yönetmeliklerin eksiklikleri tam olarak ortaya konabilmiş değildir. Bunun nedeni, depremler sırasında hasar gören yapıların büyük bir çoğunluğunun yönetmeliklere uygun yapılmadığının tespit edilmiş olmasındandır. Yani, yönetmelikler henüz tam olarak test edilmiş değildir. Fakat, dünyada uygulanan deprem yönetmeliklerinin de bizim yönetmeliğimizden bazı farklar gösterdiğini belirtmek gerekir.



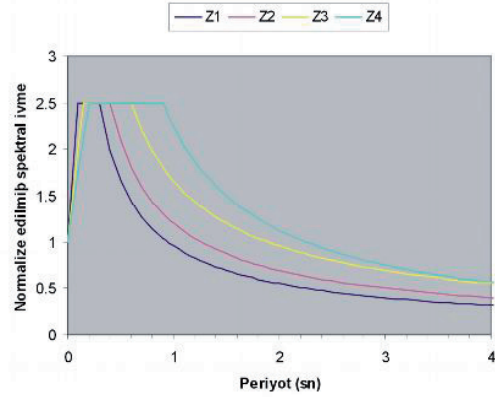
Şekil 1. Yumuşak zemin ve sert ana kaya tasviri (P.Moczo'dan değiştirildi)



Şekil 2. 1985 Meksika depremi ve uzaklığa bağlı kaydedilen ivme kayıtları (P. Moczo'dan değiştirildi)



Şekil 3. Makalede verilen zemin ve ana kaya parametreleri kullanılarak, iki farklı sönüm oranı için çizdirilen büyüme fonksiyonları.



Şekil 4. Dört farklı zemin türü için elastik tasarım spektrumları

## KAYNAKLAR

- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, ISBN 0-13-374943-6.
- Roesset, J.M., 1977, *Soil amplification in earthquakes*, Numerical Methods in Geotechnical Engineering, C.S. Desai and J.T. Christian, eds., McGraw Hill, New York, Chapter 19, 639-682, ISBN 0-07-016542-4.
- Stein, S. and Wysession, M., 2003, *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*, Blackwell Publishing, ISBN 0-86542-078-5.
- Yalçınkaya, E., 2002, *Zemin özelliklerinin deprem yer hareketine etkisi: 1 Ekim 1995 Dinar ve 27 Haziran 1998 Adana-Ceyhan depremi örnekleri*, Doktora Tezi, İ.Ü. Fen Bil. Enst., İstanbul.