

ZEMİN SIVILAŞMASI I

Prof. Dr. Müh. Ergin ARIOĞLU
İ.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Mim. Nihal ARIOĞLU
İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi

Dr. Müh. Ali Osman YILMAZ
K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü

1. Giriş

Depremi oluşturduğu titreşimlerin etkisiyle gevşek, sature -suya doymun- durumdaki taneli zeminlerin taşıma kapasitelerini kaybederek “sıvı” gibi davranış göstermesine geoteknik literatüründe “zemin sıvılaşması” denilmektedir^(*). Sıvılaşmada toplam düşey basınç $\sigma_z = 0$ olmaktadır. Diğer bir deyişle efektif basıncın σ'_z büyüklüğü boşluk basıncına u eşittir ($\sigma'_z = u$). Sıvılaşma, geniş halk kitleleri arasında “kum fıskırması” ve “kum kaynaması” olarak bilinmektedir. Son Doğu Marmara depreminde “sıvılaşma” olayından kaynaklanan, kıyı bölgelerinde gözlenen yanıl yayılma hareketi de “kıyı kayması” veya “kıyı heyelanı” terimleriyle anılmaya başlanmıştır (Ulusay, 2000). Yerli mühendislik literatürümüzde deprem kaynaklı “zemin sıvılaşması” konusunda bir çok yayınlanmış çalışma mevcuttur. (Ünver ve Ergün, 1992; Erken ve Ansal, 1993; Erken, Alhas ve Ansal, 1994; Erken, Ansal ve Önalp, 1994; Erken, Ülker, Özkan ve Kurtulmaz, 1995 a; Erken ve arkadaşları 1995 b; Erken ve arkadaşları, 1996; Ansal, 1999; Ulusay, Tosun, 1999; Ulusay, 2000).

Zemin sıvılaşma konusuna pratik mühendislik açısından bakıldığında, aşağıda sıralanan şu konular önem kazanmaktadır:

- Deprem üretebilecek aktif fay ile sıvılaşma potansiyeli taşıyan bölge arasındaki uzaklıkların kestirimi.
- Sıvılaşmaya yol açabilecek yatay yer ivmesinin kritik değerinin belirlenmesi.
- Deprem kaynak büyüklükleriyle sıvılaşma potansiyeli bulunan kum katmanlarına ilişkin geoteknik parametreler (tekrarlı kayma gerilmesi, standart penetrasyon değeri) arasındaki ilişkilerin ortaya çıkartılması.

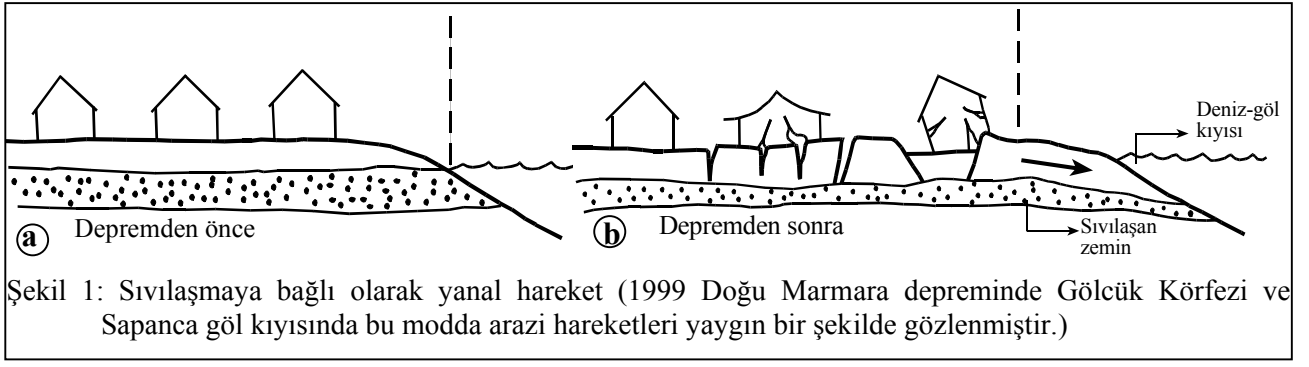
Bu çalışma, yukarıda kısaca değinilen noktaları işlemek üzere hazırlanmıştır. Ayrıca; yazı kapsamında ele alınan konuların daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla çeşitli sayısal örnekler yapılmıştır.

2. Deprem Kaynak Büyüklükleriyle Zemin Sıvılaşması Arasındaki İlişkiler

2.1 Genel

Depremi fiziksel etkileri arasında önemli bir yeri olan zemin sıvılaşması olgusunun boyutları ilkin 1964 Niigata ve 1964 Alaska depremlerinde ciddi bir şekilde algılanmaya başlanmıştır. Genel olarak “zemin sıvılaşması”nın yol açtığı üç tür arazi stabilite sorunu sözkonusudur. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır:

^(*) Zemin sıvılaşma olayı yaygın bir şekilde depremlerde gözlemlenebileceği gibi, sıvılaşma potansiyeli taşıyan daneli zeminlerin etrafında yaratılan yapay titreşimlerden de (örneğin çakma kazıkların çakımı sırasında oluşan titreşimler, yakın açık maden işletmelerinde yapılan üretim/dekapaj patlatmaları) kaynaklanabilir. Ayrıca, maden mühendisliği literatüründe hidrolik dolgunun uygulandığı panolarda yapılan patlayıcı madde atımlarından oluşan “sıvılaşma olguları” rapor edilmektedir.



Şekil 1: Sıvılaşmaya bağlı olarak yanal hareket (1999 Doğu Marmara depreminde Gölcük Körfezi ve Sapanca göl kıyısında bu modda arazi hareketleri yaygın bir şekilde gözlenmiştir.)

- **Zemin taşıma kapasitesinin önemli ölçüde kaybı**

Etkileri: Sıvılaşmış katmanlar üzerinde bulunan binalarda ciddi boyutlarda düşey oturmalar-farklı oturmalar-ötelemeler-devrilmeler. Örneğin 1964 Niigata depremi-1999 Doğu Marmara depreminde Adapazarı'ndaki alüvyal malzemeler içeren katmanlarda gözlenen ciddi bina oturmaları. (Tığcılar Mahallesi-Cumhuriyet Mahallesi. Bu bölgelerde yeraltı su seviyesi yüzeyden itibaren 1-2 m derinlikte -yaklaşık 1.5 m derinlikte başlayan ve 5 ile 20 SPT değerinde plastik olmayan silt ve kum katmanları- ortalama dane boyutu $D_{50} = 0.1$ mm, efektif boyut $D_{10} = 0.02$ mm).

- **Yanal yayılmalar**

Genellikle % 5 eğimden küçük arazide gözlenen yanal yayılma, sıvılaşmadan kaynaklanan kayma dayanımı kaybının neden olduğu bir yüzey hareketidir. Yüzeyde belirli kalınlıktaki katman "sıvılaşmış katman"ın üzerinde hareket eder (Şekil 1) (Manual, 1993).

Etkileri: Yüzeyde gözlenen bu hareket sonucunda binalar özellikle rijit binalarda çekme gerilmelerinden kaynaklanan ciddi çatlaklar-farklı oturmalar oluşur. Örneğin 1999 Doğu Marmara depreminde Gölcük-Çınarcık kıyı şerhinde özellikle Kavaklı sahilinde körfeze doğru kayan alanlar. Değirmendere'nin Çınarcık lokasyonunda kıyı şerhininin bir bölümü körfeze doğru kaymıştır. Sapanca gölünün güney kıyısında da zemin sıvılaşmasından kaynaklanan önemli yanal hareketler oluşmuştur (Kasapoğlu ve arkadaşları, 1999).

- **Akma hareketi**

Akma hareketi prensip olarak yanal hareketin daha geniş bir bölgeye yayılmış biçimi olup, genellikle % 5 eğimden daha büyük arazide oluşur.

Etkileri: Binalarda yanal yer değiştirmeler, farklı oturmalarından dolayı ciddi yapısal hasarlar söz konusudur. Binaların maruz kalacağı "farklı oturma" değerleri "yapısal hasarlar"ın düzeyini belirler. Gerek yanal yayılmada gerekse akma hareketinde gözlenen maksimum çökme değerleri binalarda izin verilebilir çökme değerlerinden (50-60 mm) daha büyüktür.

2.2 Regresyon Analizi İle Çıkarılmış Bağlıntılar

Sismoloji konusunda ciddi ve kapsamlı çalışmalarıyla tanınan Ambraseys 1988 tarihinde makalesinde literatürde rapor edilen deprem kaynaklı zemin sıvılaşma ham verilerini (veri sayısı $n = 137$ adet) regresyon analiziyle değerlendirmiştir. Anılan araştırmacının elde ettiği bağıntılar topluca Çizelge 1'de verilmiştir. (1) ve (2) nolu regresyonların değişimleri Şekil 2 'de görülmektedir (Ambraseys, 1988).

Şekil 2 yakından incelendiğinde aşağıdaki pratik sonuçlar çıkartılmaktadır:

- Depremin büyüklüğü $-M_w$ -sismik moment bazında- ile merkezüssünden sıvılaşma potansiyeli bulunan bölgeye uzaklık " L_c " arasında anlamlı bir logaritmik bağıntı vardır. Örneğin $M_w = 5$ büyüğünde bir deprem ancak merkez üssüne 2 km uzaklıkta bulunan bir bölgede sıvılaşma olayına neden olabilir. $M_w = 7$ büyüğünde bir deprem durumunda ise sıvılaşma 100 km'lik bir uzaklık içinde gözlenebilecektir. Daha açık bir deyişle, merkezüssü ile sıvılaşma olasılığı olan bir bölge arasında uzaklık $L_c = 175$ km ise bir "sıvılaşma tehlikesi" söz konusu değildir.

- Şekil 2’deki 3 nolu bağıntı Japonya’da gözlenen sıvılaşma olgularına ait olup, (1) bağıntısından oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Ambraseys’in bağıntısı bir anlamda verilen deprem büyüklüğünde sıvılaşma olayının “üst sınırı”nı tanımlamaktadır. ($\log L_m = 0.77 M_w - 3.60$, L_c (km) (3))
- Verilen bir deprem büyüklüğünde ($L_m - L_f$) farkı bir anlamda yeryüzünde deprem sonucunda kırılan fayın geometrik uzunluğunu “L” belirler. Özellikle $M_w = 6.5$ ile $M_w = 7.5$ arasındaki deprem büyüklüklerinde $L = f(L_m - L_f)$ değişimi sismoloji literatüründe verilen fay uzunluğu $= f(\text{deprem büyüklüğü})$ değişimleriyle oldukça iyi sayılabilecek bir uyum sergilemektedir (Ambraseys, 1988) ($L =$ yeryüzünde kırılan fayın geometrik uzunluğunu ifade etmektedir).

Joyner-Boore, 1981 maksimum yatay yer ivmesi “a” ile moment büyüklüğü “ M_w ” ve odak uzaklığı “r” arasındaki istatistiksel azalış ifadesi zemin bölge-leri için

$$\log(a) = -1.02 + 0.249 (M_w)$$

$$-\log(r) = -2.55 \cdot 10^{-3}(r) + 0.26 P \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. ($5.5 \leq M_w \leq 7.7$). İvme “g” cinsinden elde edilmektedir.

Burada:

$$r = (L_f^2 + 53.3)^{0.5}$$

L_f = Faya en yakın mesafe-dik uzaklık-, km

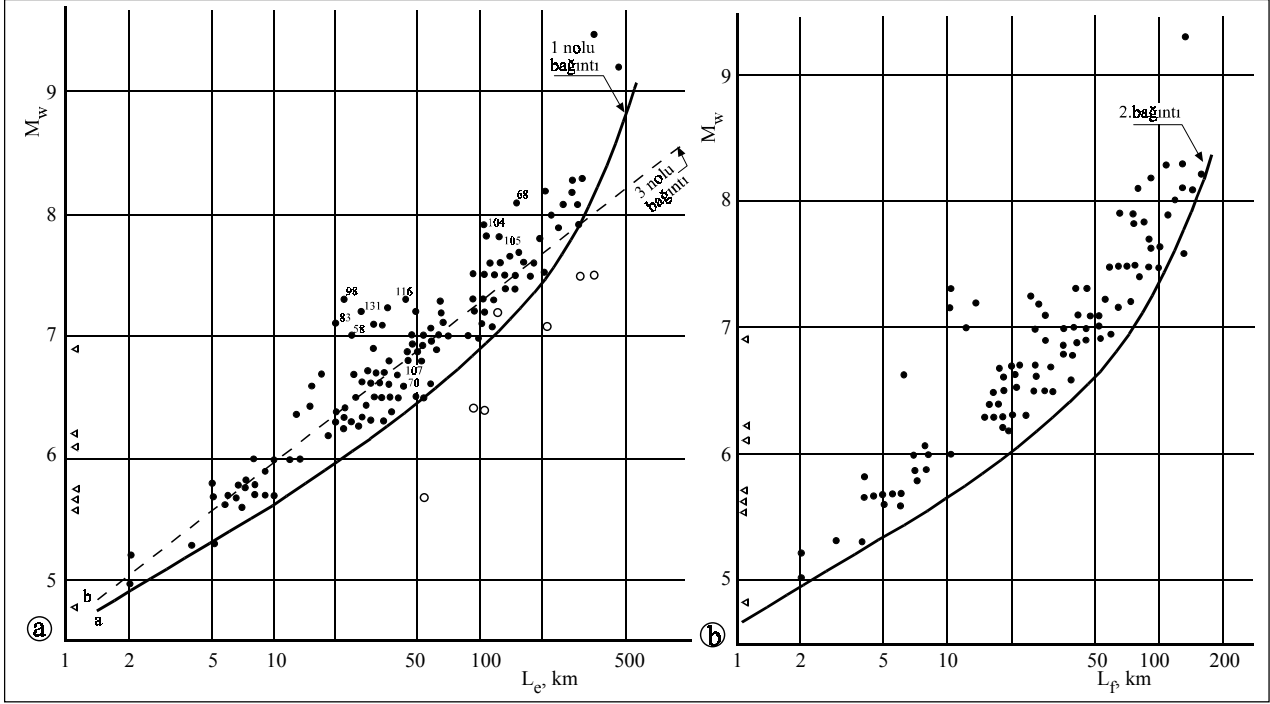
P= Bir faktör. % 50 güven derecesi için $P = 0.$, % 84 için $P = 1$

kabul edilmektedir.

Eğer kritik yer ivmesi “ K_c ” ($a = K_c$) ile ifade edilirse (4) bağıntısına karşı gelen “ L_f ” ve “ M_w ” büyüklükleri 2. Bağıntıya uyarlanırsa $K_c = f(M_w)$ ve $R_f = f(M_w)$ değişimleri çıkartılabilir. Bunlar Şekil 2’de gösterilmiştir (Ambraseys, 1988). Şekil 3 dikkatlice incelendiğinde şu sonuçlar ön plana çıkmaktadır:

| Çizelge 1 | Merkezüssü-Sıvılaşma Potansiyeli Taşıyan Bölge Arasındaki Uzaklık |
|--|--|
| • Merkezüssü- sıvılaşma potansiyeli taşıyan bölge arasındaki uzaklık | $M_w = -0.31 + 2.65 \times 10^{-8} L_m + 0.99 \log(L_m) \quad (1)$ |
| • Deprem üretme olasılığı bulunan fay ile sıvılaşma potansiyeli bulunan bölge arasındaki uzaklık | $M_w = 0.18 + 9.2 \times 10^{-8} L_f + 0.90 \log(L_f) \quad (2)$ |
| Burada: | |
| M_w = Deprem moment büyüklüğü | |
| L_m, L_f = Uzaklık, cm (Bakınız yandaki şekile) | |

- Artan moment büyüklüğü “ M_w ” ile sıvılaşma potansiyeli bulunan bölge ile faya yakın uzaklık “ L_f ” artmaktadır. Örneğin $M_w = 5.5$ büyüklüğünde bir deprem kabaca faya en yakın uzaklık 7 km içinde sıvılaşma riski taşıyan bölgeyi sıvılaştırırken $M_w = 7.5$ büyüğüne sahip bir depremde anılan büyüklük $L_f = 100$ km olmaktadır. Pratik mühendislik bakımından şöyle de değerlendirilebilir. Eğer sıvılaşmaya yatkın bölge, sözgelimi faya uzaklığı $L_f = 125$ km ise, bu durumda bir “sıvılaşma olgusu” sözkonusu değildir.
- Sıvılaşma için gerekli yatay yer -kritik ivme “ K_c ” -değeri artan deprem büyüklüğü “ M_w ” ile azalmaktadır. Şöyle ki; $M_w = 5.5$ örneğinde kritik ivme $K_c = 0.20$ g iken $M_w = 7.5$ ’de aynı büyüklük $K_c = 0.04$ g olmaktadır. Kısaca, depremde geoteknik özellikleri itibarıyla sıvılaşma riski taşıyan bir katman çok küçük bir ivme ile sıvılaşabilmektedir.



Şekil 2: ① $M_w = f(L_c)$ değişimleri. Δ Kurak bölgelerde sıvılaşma gözlenmemiş datalar, \bullet Sığ derinlikli depremlerde gözlenen sıvılaşma olguları, \circ orta derin depremlerde oluşan sıvılaşma dataları. ② $M_w = f(L_f)$

Ambraseys'in Şekil 3'te tanımladığı kritik ivme değerleri Dobry ve arkadaşları, 1981 tarafından teklif edilen ve zeminin geoteknik büyüklüklerine dayandırılan "eşik ivme kriteri" ile karşılaştırılması burada ilginç olacaktır. Anılan araştırmacılar eşik ivme değerini -sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gereken yatay yer ivmesi-

$$\frac{a_t}{g} = \left[\gamma_t \left(\frac{G}{G_{\text{maks}}} \right)_t \right] \frac{V_s^2}{g Z r_d}$$

$$r_d = 1 - 0.015 Z$$

şeklinde vermektedir (Dobry ve arkadaşları, 1992; Teri ve Tezcan, 1996).

Burada :

a_t = Eşik ivme değeri -g cinsinden-

g = Yerçekimi ivmesi

γ_t = Eşik kayma şekil değiştirmesi. Bu büyüklük $\left(\frac{G}{G_{\text{maks}}} \right)$ oranına bağlı olup, 0.8 değerine karşı gelen

$\gamma_t = 0.0001$ alınabilir.

$\left(\frac{G}{G_{\text{maks}}} \right)_t$ = Eşik yerdeğiştirmede kayma modülü azaltma faktörü

G_{maks} = Küçük kayma yerdeğiştirmelerine karşı gelen kayma modülü

$$G_{\text{maks}} = \delta \cdot V_s^2$$

δ = Dalganın yayıldığı ortamın yoğunluğu

V_s = Kayma dalgasının hızı

r_d = Sıvılaşmanın incelendiği noktanın derinliğine bağlı düzeltme faktörü -derinlik yüzeyden itibaren alınır-

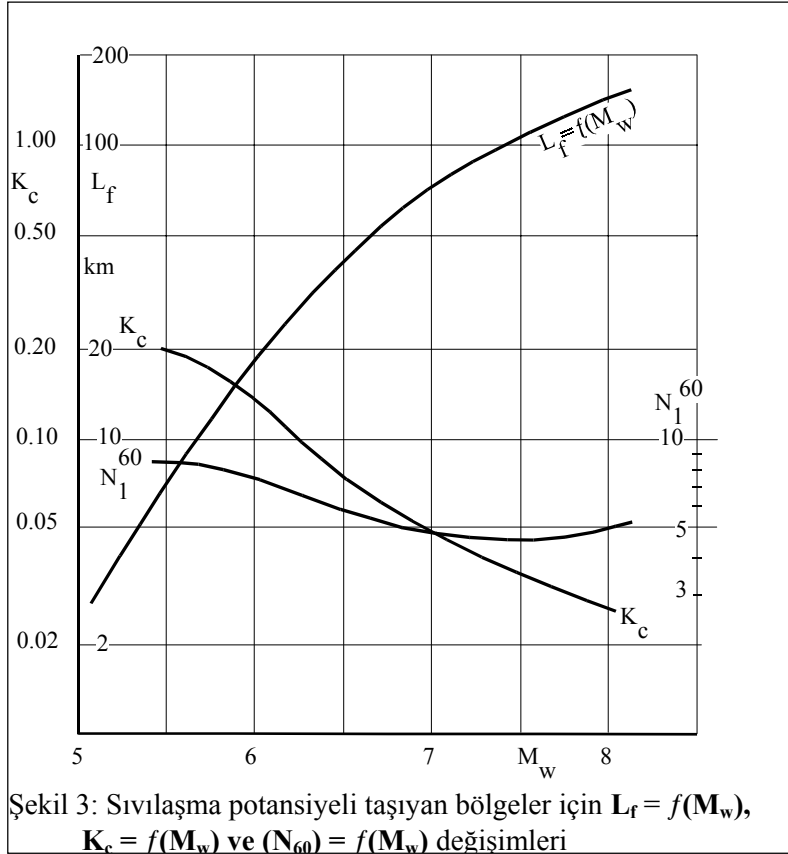
Z = incelenen noktanın derinliği

G = Kayma modülü

$\gamma_t = 0.0001$ ve $\left(\frac{G}{G_{maks}} = 0.8\right)$ değerleri kabul edilirse, sözgelimi sıvılaşmanın yaygın gözlemlendiği derinlik $Z=$

3 m'ye karşı gelen kritik ivme değeri kayma hızının fonksiyonu cinsinden $\frac{a_t}{g} \approx 2.73 \cdot 10^{-6} \cdot V_s^2$

şeklinde basitleştirilebilir.



Gevşek, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu kum katmanlarında kayma hızının değeri (100-300)m/sn aralığında değişir. Alt değer alınırsa, eşik yer ivmesinin büyüklüğü

$$\frac{a_t}{g} = 0.02$$

gibi çok küçük değer hesaplanmaktadır. Açık ki zemine ait mekanik büyüklükler sıvılaşmaya yol açabilecek yer ivme değeri -eşik ivme- üzerinde etkilidir. Artan kayma dalga hızlarında verilen derinlik için “eşik ivme değeri” artmaktadır. Diğer bir anlatımla, zeminin rölatif yoğunluğu arttıkça kum katmanını sıvılaştırmak için gereken yatay yer ivmesinin değeri de büyüyecektir. Çok iyi sıkışmış, diğer bir ifadeyle jeolojik konsolidasyona maruz kalmış alüvyon katmanlarının ($V_s=400-700$ m/sn) sıvılaşması için eşik ivme değeri

$$\frac{a_t}{g} \approx 0.95$$

olarak verilebilir. Yatay yer ivmesinin büyüklüğü $M=7.5$ gibi yıkıcı bir deprem ve merkezüssüne çok yakın olması durumunda (≤ 10 km)- (0.4 ~ 0.8)g aralığındadır. Kısaca, çok sıkı, jeolojik konsolidasyona maruz

kalmış satüre kum katmanının sıvılaşması mümkün değildir ($(0.4 \sim 0.8) < \frac{a_t}{g} = 0.95$) sadece jeolojik yaşı -

konsolidasyon- ve yeraltı su seviyesinin derinliğini dikkate alan sıvılaşma ölçütü Çizelge 2’de görülmektedir (Manual, 1993). Çizelgenin yakından incelenmesiyle şu pratik sonuçlar üretilebilmektedir:

- Verilen 0-10 m'lik yeraltı su sevipleri için genç jeolojik alüvyonların yaşlı alüvyonlara göre “sıvılaşma riski” daha yüksektir.
- En genç jeolojik yaşa sahip olan alüvyon katmanlarında

| Çizelge 2 : Jeolojik Yaş ve Yeraltı Su Seviyesine Bağlı Olarak Geliştirilmiş Basit Sıvılaşma Risk Ölçütleri | | | | |
|---|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Sedimanter birim | Yeraltı su seviyesi derinliği, m | | | |
| | 0 –3 | 3 –10 | 10 – 15 | >15 |
| Holosen | | | | |
| En yaşlı | Çok yüksek | Orta | Düşük | Çok düşük |
| En genç | Yüksek | Orta | Düşük | Çok düşük |
| Pleistosen | | | | |
| Geç | Düşük | Düşük | Çok düşük | Çok düşük |
| Orta ve erken | Çok düşük | Çok düşük | Çok düşük | Çok düşük |
| Tersiyer ve Ön Tersiyer | Çok düşük | Çok düşük | Çok düşük | Çok düşük |

artan yeraltı su seviyesi derinlikleri için “sıvılaşma riski” önemli ölçüde azalmaktadır. Örneğin en genç Holosen yaşlı alüvyonal birimlerde en yüksek “sıvılaşma riski” 0-3 m yeraltı su seviyelerinde gözlenmektedir.

- Alüvyonal katmanın yaşından bağımsız olarak 15 m'den daha derin yeraltı su seviyelerinde “sıvılaşma riski”nin düzeyi çok düşüktür.

2.3 Sayısal Örnek

1. Örnek

Doğu Marmara Depreminde ($M_w \approx 7.4$) sıvılaşma gözlenebilecek maksimum uzaklığı kestiriniz. Gölcük merkezüssü olarak kabul edilirse verilen deprem büyüklüğü $M_w \approx 7.4$ 'e karşı gelen en fazla uzaklık - merkezüssünden- Şekil 2 a'dan yaklaşık $L_m=200$ km olarak kestirilmektedir. Burada bir kere daha vurgulanmalıdır ki elde edilen değer sıvılaşma olayının gözlenebileceği en üst sınırı tanımlamaktadır. Nitekim Japonya depremlerine ait dataların kullanıldığı amirik bağıntıdan

$$\begin{aligned} \log(L_m) &= 0.77(M) - 3.60 \\ &= 0.77 \times 7.4 - 3.60 = 2.098 \\ L_m &= 125 \text{ km} \end{aligned}$$

bulunmaktadır. Hemen fark edileceği gibi iki yaklaşımın sonuçları arasında önemli sayılabilecek bir fark mevcuttur. Bu fark çok büyük ölçüde veri tabanının dayandığı ham dataların birbirinden farklı deprem büyüklükleri ile ifade edilmesinden kaynaklanabileceği söylenebilir.

Yeryüzünde deprem sonucunda oluşacak kırık (fay) hattının geometrik uzunluğu Ambraseys'in yaklaşımına göre

$$L \approx L_m - L_f$$

'dir. Burada L = fayın geometik uzunluğu, L_f = sıvılaşma bölgesinin faya en yakın uzaklığı. Şekil 2b'den verilen deprem büyüklüğü $M_w = 7.4$ için $L_f \approx 100$ m kestirilir. Buna göre yeryüzünde olası kırığın uzunluğu

$$L = 200 - 100 \approx 100 \text{ m}$$

olarak hesaplanabilir. Bu değer Well ve Copper, 1994 bağıntısıyla burada tahkik edilebilir:

Doğrultu atımlı fay için

$$M_w = 5.16 + 1.12 \log L \pm 0.28$$

s = standart sapma, $s = \pm 0.28$

Ortalama değer kullanılırsa

$$M_w = 5.16 + 1.12 \log L$$

$$7.4 = 5.16 + 1.12 \log L$$

$$\log L = 2 \longrightarrow L = 100 \text{ km}$$

bulunur. Keza aynı deprem büyüklüğü $M_w \approx 7.4$ için Mark 1977, Nowroozi 1985, Ambraseys ve Melville, 1982'de $L \approx 100$ km civarında kestirilmektedir (Ambraseys,1988).

2. Örnek

$M_w=7$ büyüklüğünde deprem üretme potansiyeline sahip bir aktif faya dik uzaklığı $L_f = 30$ km olan Holosen jeolojik yaşlı bir kum katmanı yer almaktadır. Bölgede yapılan ön araştırma sonuçlarına göre yeraltı su seviyesinin derinliği oldukça yüksek olup, daha önce aynı bölgede yaptırılan SPT (Standart Penet-rasyon Sayısı)'nın aritmetik ortalaması -4 metre derinlikte- $N= 24$ olarak belirlenmiştir. Sözü edilen bölgenin "sıvılaşma riski" taşıyıp taşımadığını tahkik ediniz

- Bölgede maksimum yatay yer ivmesinin kestirilmesi 4. bağıntıdan hareketle

$$r = (L_f^2 + 53.5)^{0.5}$$

$$= [(30)^2 + 53.3]^{0.5} = 30.87 \text{ km}$$

$$\log(a) = -1.02 + 0.249 \times 7 - \log(30.87) - 0.55 \cdot 10^{-3} (30.87) + 0.26 \times 1$$

(P=1 alınmıştır)

$$\log(a) = -0.5229 \longrightarrow a \approx 0.3 \text{ g}$$

bulunur.

- Kum katmanında ortalama kayma dalgasının hızının hesaplanması (Japon İnş. Müh. Birliği, 1997) göre kayma dalgasının hızı –Holosen alüvyonlarda-

$$V_s = 80.6 N^{0.331} = 80.6 \times 24^{0.331}$$

$$V_s \approx 231 \text{ m/sn}$$

- Kritik (eşik) ivmenin kestirilmesi

Sıvılaşma için eşik ivmenin değeri Dobry ve arkadaşlarının 1981 önerilerine göre

$$\gamma_t = 0.0001$$

$$\left(\frac{G}{G_{\text{maks}}} \right)_t = 0.8$$

$$g = 9.81 \text{ m/sn}^2$$

$$Z = 4 \text{ m}$$

$$r_d = 1 - 0.015 \cdot Z = 1 - 0.015 \times 4$$

$$r_d = 0.96$$

alınırsa (5) bağıntısından

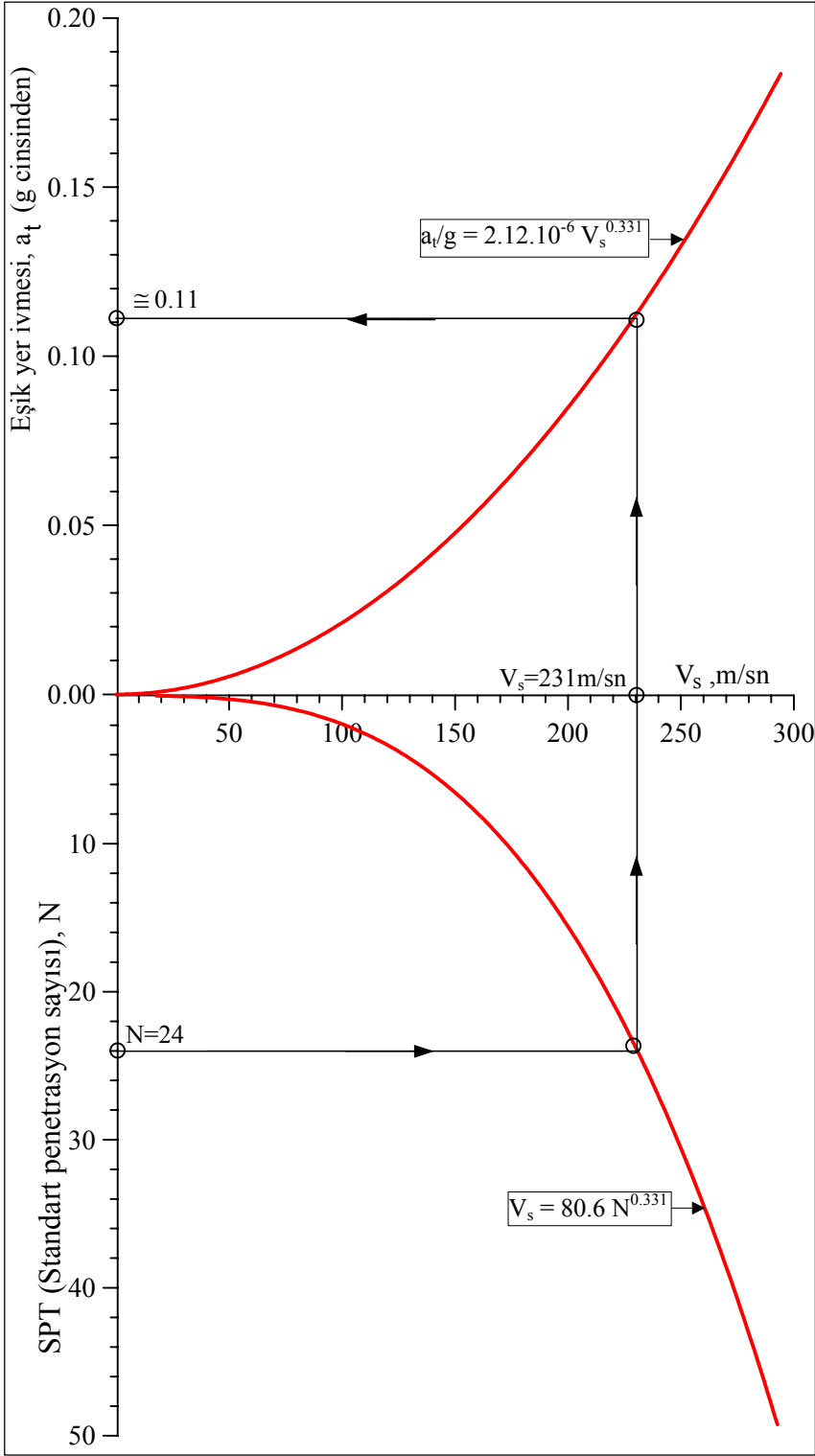
$$\frac{a_t}{g} = 2.12 \cdot 10^{-6} V_s^2$$

yazılabilir ve hesaplanan $V_s = 231 \text{ m/sn}$ değerine karşı gelen eşik ivme büyüklüğü

$$\frac{a_t}{g} \approx 0.11 \text{ g}$$

olarak bulunur.

Görüleceği üzere sıvılaşmaya yol açabilecek eşik ivme " a_t " $a_t = 0.11 \text{ g} < a_{\text{maks}} = 0.3 \text{ g}$ (g, yerçekimi ivmesi) 'dir. Daha açık bir deyişle, sözkonusu kum katmanı depreme bağlı "sıvılaşma riski" taşımaktadır. Sadece jeolojik yaş ve yeraltı su seviyesinin derinliğine dayanan sıvılaşma ölçütüne (Çizelge 2) göre de verilen bölgenin yüksek "sıvılaşma" riski taşıdığı anlaşılmaktadır. Şekil 4'te ise $a_t = f(V_s)$ ve $N = f(V_s)$ değişimleri nomogram düzeninde çizilmiştir. Sayısal örnekteki değerlerin nasıl çalıştırılacağı nomogram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4: $N = f(V_s)$ ve $a_t = f(V_s)$ değişimlerinin nomogram düzeninde gösterilmesi (kabuller; $\left(\frac{G}{G_{maks}}\right)_t = 0.8$, $\gamma_k = 0.0001$ ve $Z = 4$ m).

Makale devam edecek...