



SIVILAŞMA

DOÇ. DR. ERDAL UNCUOĞLU
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
2019



Sıvılaşma; geoteknik deprem mühendisliğinin önemli ve karmaşık konularından birisidir. Sıvılaşmanın yıkıcı etkilerinin Geoteknik Mühendislerinin dikkatini çekmesi 1964 yılında 3 aylık dönem içerisinde peş peşe meydana gelen Alaska' daki Good Friday ($M_w=9.2$) depremi ile Japonya' daki Niigata ($M_s=7.5$) depremi ile olmuştur. 17 Ağustos 1999 yılında meydana gelen Gölçük ($M_w=7.5$) depremi de sıvılaşmanın en çarpıcı örneklerinin görüldüğü depremlerden birisidir.

Bu depremlerde birçok bina, temel zemininin taşıma gücünü yitirmesinden dolayı, yan yatmış, devrilmiş veya batmıştır. İstinat duvarları oluşan aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle ötelenmiş veya devrilmiştir. Eğimli alanlarda sıvılaşma kökenli akma ve/veya yanal yayılmalar olmuş ve gömülü yapılar yüzeylenmiştir.

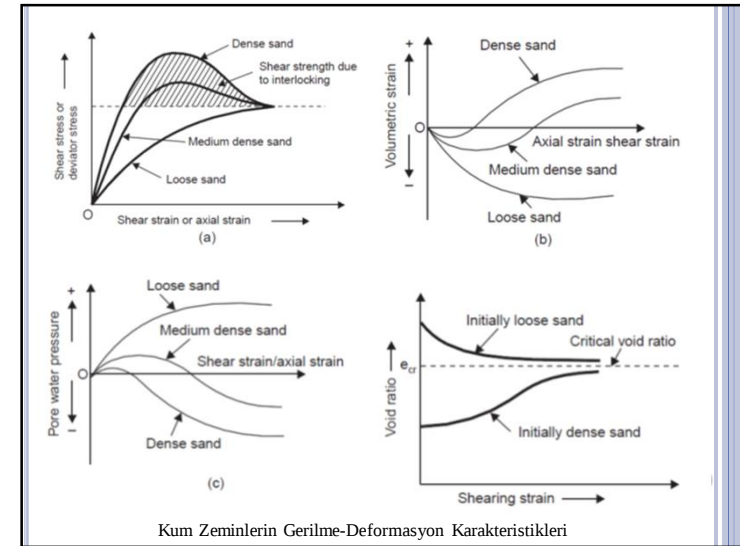
Kayma mukavemeti katıların dayanımıdır. Zemin kütlesi kayma mukavemetini kaybederse viskoz bir sıvı gibi akar.

Kohezyonsuz kuru zeminlerin statik ve tekrarlı yükler etkisi altındaki sıkılaşma eğilimi iyi bilinen bir konudur. Ancak; kohezyonsuz zeminler doygun oldukları zaman drenajsız şartlardaki yüklemenin çabuk gelişmesi ve zeminin sıkılaşma eğilimi aşırı b.s.b. artmasına ve efektif gerilmelerin azalmasına neden olur.

Eğer; etki çok şiddetli değilse ya da rölatif olarak yavaş bir şekilde uygulanıyor ise boşluklardaki suyun drene olması ile danelerin birbirlerine yaklaşmaları söz konusu olacaktır. Bunun sonucunda; zeminde bir miktar oturma gözlenir de sıvılaşma meydana gelmeyecektir. Diğer bir ifade ile zemin drenajlı ise kayma sırasında serbestçe genişleme ya da büzülme davranışı sergileyebilir.

Ancak; zemine olan etki güçlü ise, hızlı bir şekilde uygulanıyor ise ve tekrarlı bir yükleme ise suyun boşluklardan drene olması danelerin biraraya gelmesini sağlayacak kadar hızlı gerçekleşemeyeceğinden b.s.b. artacak ve sıvılaşma meydana gelecektir.

Tüm sıvılaşma olaylarının en karakteristik özelliği, drenajsız yükleme şartlarında oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarıdır.



Mechanism: Why does the Liquefaction occur?

Soil grains in a soil deposit



The length of the arrows represent the size of the contact forces between individual soil grains

The small contact forces are because of the high water pressure.

In an extreme case, the porewater pressure may become so high that many of the soil particles lose contact with each other. In such cases, the soil has very little strength, and behaves like a liquid; called "Liquefaction".

Suya doymun granüler zeminlerin kayma mukavemeti aşağıdaki eşitlik ile tanımlanı

$$S = (P - P_w) \tan \phi'$$

P : Zemin ağırlığı ve üst yapı yükü nedeni ile normal gerilme,

P_w : Boşluk suyu basıncı,

ϕ : İçsel sürtünme açısı

Normal gerilme, daneler arasında etkileşim kuvvetini oluşturan bir etkidir. Daneler arasındaki sürtünme, danelerin birbiri üzerinden ya da yanından kaymasını engelleyen ve zemine mukavemetini veren etkidir. Boşluk suyu basıncı normal gerilmeye eşit olacak değere kadar arttığında zeminin kayma mukavemeti sıfıra düşer ve zemin bir sıvı gibi davranır. İlave boşluk suyu basınçları (b.s.b) zemin içindeki efektif gerilmeyi azaltacak yönde etki eder. Çünkü; zemin bünyesi içindeki toplam basınç iki bileşenle taşınır. Etki eden toplam gerilme aynı kaldığına göre b.s.b. artınca efektif gerilme azalır.

Statik şartlarda;

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_s$$

Dinamik şartlarda;

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - (u_s + u_d)$$

$u_s + u_d = \sigma_{v0}$ olur ise ;

$$\sigma'_{v0} = 0 \text{ olur.}$$

**SIVILAŞMAYI ETKİLEYEN
UNSURLAR**

Sivilaşmayı etkileyen unsurlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Zemin Cinsi,
- Dane Dağılımı,
- Relatif Sıklık Derecesi,
- Sivilaşmaya Neden Olabilecek Deprem Yüklemesinin Karakteristiği,
- Düşey Efektif Gerilme,
- Drenaj Şartları,
- Doymunluk Derecesi,
- Kum Tabakasının Kalınlığı,
- Sismik Geçmiş.

• **Zemin Cinsi**

Uzun yıllar, sıvılaşmanın sadece kohezyonsuz kumlu zeminlerde oluştuğu düşünülmesine karşın son yıllarda yapılan çalışmalar ve gözlemler düşük kohezyonlu siltler ve çakıllı zeminlerde de sıvılaşmanın ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Ishihara (1985); sıvılaşmaya en duyarlı zeminlerin ince ve orta kum ile düşük plastisiteli ince daneler içeren kum çökelileri olduğunu belirtmiştir.

Bu durumda, sıvılaşmaya duyarlı zemin türleri; plastik olmayan (kohezyonsuz) zeminlerdir. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşmaya karşı en az dirençliden en çok dirençliye kadar olan bir sıralaması kabaca; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar olarak verilebilir. Bu sıralamanın birçok istisnası olabilir. Örneğin, Ishihara (1985,1993) madencilik endüstrisinden elde edilen, gerçekte öğütülmüş kayalardan oluşan ve kaya unu olarak sınıflandırılan atıkların durumunu tanımlamıştır. Ishihara(1993) kaya ununun suya doygun halde iken önemli bir kohezyona sahip olmadığını ve temiz bir kum gibi davrandığını belirtmektedir. Bu maden atıklarının sıvılaşmaya karşı direncinin temiz kumdaki kadar düşük olduğu gösterilmiştir.

Kısmen de ince-orta çakıllar sıvılaşmaya duyarlı zeminlerdir. Çakıllı zeminlerin sıvılaşabilirliğini gösteren iyi dökümente edilmiş örnekler mevcuttur. Ancak bu tip zeminler (daha ince daneli kumlu zeminlere göre) davranış olarak iki önemli farklılık gösterirler. İlki; daha geçirimli olduklarından sismik yükleme sırasında oluşan tekrarlı b.s.b. daha çabuk dağılabilmektedir. İkinci ise; jeolojik oluşumları sırasında iri danelerinden dolayı ağır kütleleri çok nadiren gevşek depositlenme karakteri göstermekte ve dolayısı ile doğada gevşek halde sıkça rastlanılmamaktadır. Kumlu zeminlerin gevşek durumda sıkça rastlanılmalarına karşın çakıllı iri daneli zeminlere gevşek halde fazla rastlanılmaz.

Çakıllı zeminlerin yüksek geçirimlilik avantajı şu durumlarda bozulabilir;

- Daha az geçirimli tabakalar arasında sıkıştığında,
- İnce daneli malzemelerin çakıllı danelerin boşluklarını doldurduğu durumlarda,
- Eğer çakıllı tabaka oldukça kalın ve drenaj mesafesi uzunsa

Bu gibi durumlarda iri daneli malzemelerin de sıvılaşabileceği bilinmeli ve gerekli sıvılaşma hesapları yapılmalıdır.

Sıvılaşmaya duyarlı zemin türleri; plastik olmayan (kohezyonsuz) zeminlerdir. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşmaya karşı en az dirençliden en çok dirençliye kadar olan bir sıralaması kabaca; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar olarak verilebilir. Bu sıralamanın birçok istisnası olabilir. Örneğin, Ishihara (1985,1993) madencilik endüstrisinden elde edilen, gerçekte öğütülmüş kayalardan oluşan ve kaya unu olarak sınıflandırılan atıkların durumunu tanımlamıştır. Ishihara(1993) kaya ununun suya doygun halde iken önemli bir kohezyona sahip olmadığını ve temiz bir kum gibi davrandığını belirtmektedir. Bu maden atıklarının sıvılaşmaya karşı direncinin temiz kumdaki kadar düşük olduğu gösterilmiştir.

Zeminin sıvılaşma potansiyeli, daneler arasındaki çimento ya da kil miktarına, zeminin gevşeklik derecesine ve suyun drenajının kısıtlanmasına bağlıdır.

Seed vd. (1983) laboratuvar deneyi ve arazi performansına dayalı olarak, kohezyonlu zeminlerin büyük çoğunluğunun depremler esnasında sıvılaşmayacağını belirtmiştir. Kohezyonlu zeminde sıvılaşma olmasada, sismik sarsıntıdan dolayı önemli bir drenajsız kayma direnci kaybı olabilir.

• **Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) - Deprem Etkisi Altında Zeminin Sıvılaşma Riskinin Değerlendirmesi:**

- Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ($PI < 12$) zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanacaktır.
- Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılacak zemin araştırma çalışmaları en az, standart penetrasyon deneyi, (SPT) ve/veya koni penetrasyon deneyinin (CPT)'nin yapımına ek olarak, ilgili zemin tabakalarındaki dane çapı dağılımı, su muhtevası ve Atterberg limit değerlerinin belirlenmesini içerecektir.
- Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanacaktır.
- Temel altı zeminlerinin potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminlerden oluştuğu ve bu zemin tabakalarında düzeltilmiş SPT vuruş sayısının, $N_{1,60}$, 30 darbe/30 cm değerinden küçük olduğu durumlarda zemin sıvılaşması tetiklenme değerlendirme yapılacaktır.

* *Deprem Tasarım Sınıfı*'nın DTS = 4 olduğu ve aynı zamanda aşağıdakilerden en az birinin sağlandığı durumlarda **sıvılaşma tetiklenme analizi yapılmayabilir**:

- (a) Kil içeriğinin %20'den fazla ve plastisite indisinin %10'dan yüksek olduğu kumlu zeminlerde;
- (b) İnce dane yüzdesinin % 35'den fazla ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısının, $N_{1,60}$ ' ın 20 vuruş/30 cm'den yüksek olduğu kumlu zeminlerde;

Deprem Tasarım Sınıfı; DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olan binalar için **Tablo 16.1**'de ZD, ZE veya ZF grubuna giren, sürekli bir tabaka veya kalın mercerler halinde bulunan ve yukarıda tanımlanmış (* başlığı altında gösterilen maddeler) durumlar dışındaki kumlu zeminlerde *sıvılaşma potansiyeli*'nin bulunup bulunmadığının, arazi ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve analiz sonuçlarının ayrıntılı olarak rapor edilmesi zorunludur.

Tablo 16.1 – Yerel Zemin Sınıfları

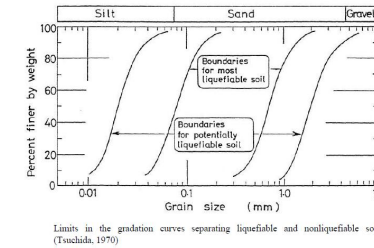
Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	—	—
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	—	—
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas kiler, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek kiler, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) kiler, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı kiler.			

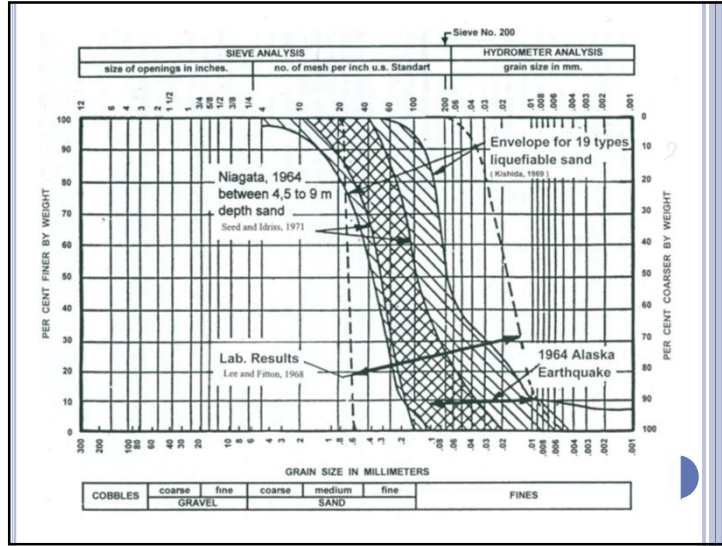
Tablo 16.1'de verilen zemin parametreleri, zemin profilinin temel veya kazık başlığı alt kotundan itibaren aşağıya doğru en üst 30 m kalınlığındaki kısmı için belirlenecektir. Birbirinden belirgin şekilde farklı zemin ve kaya tabakalarını içeren zemin profillerinde üst 30 metredeki tabakalar, yeteri kadar alt tabakaya ayrılarak en üstte $i = 1$ ve en altta $i = N$ olacak şekilde sıralanacaktır. Üst 30 metredeki *ortalama kayma dalgası hızı* $(V_s)_{30}$, *ortalama standart penetrasyon darbe sayısı* $(N_{60})_{30}$ ve *ortalama drenajsız kayma dayanımı* $(c_u)_{30}$ aşağıda gösterilen denklemler yardımı ile hesaplanacaktır:

$$(V_s)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{V_{s,i}} \right)} \quad ; \quad (N_{60})_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{N_{60,i}} \right)} \quad ; \quad (c_u)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{c_{u,i}} \right)}$$

• Dane Dağılımı

Zeminin hacim değişim potansiyeli ve su geçirgenliği üzerinde etkili olduğu bilinen dane boyutu ve dağılımı da sıvılaşma potansiyeli üzerinde etkilidir. Üniform derecelenmiş zeminler dengesiz dane dizilimi oluşturma eğiliminde olup bu tip zeminlerin sıvılaşmaya duyarlılığı iyi derecelenmiş zeminlerden daha fazladır. İyi derecelenmiş zeminlerde; küçük daneler, büyük daneler arasındaki boşlukları doldurduğundan deprem esnasında da aşırı b.s.b. daha az artışa neden olmakta ve zeminin potansiyel hacim büzülmesini azaltmaktadır. Yuvarlak daneli zeminler, köşeli daneler içeren zeminlere göre daha kolay sıvılaşma eğilimindedirler.





• Rölâtif Sıklık

Relatif sıklık değeri $> \%65$ ($D_r > \%65$, sıkı veya çok sıkı) olan zeminlerde sıvılaşma oluşmayacağı söylenebilir. 1964 Niigata depreminde $D_r \approx \%50$ olan kumlu zeminlerde sıvılaşma oluşmuş fakat $D_r \approx \%70$ olan bölgelerde sıvılaşma oluşmamıştır (Seed ve Idriss, 1971). Deprem ivmesi değeri arttıkça sıvılaşma riski sınıflamasına giren relatif sıklık değerleri de artmaktadır.

Sıvılaşma Riski (Seed ve Idriss, 1971)

a_{maks}	Yüksek	Orta	Düşük
0.10g	$D_r < 0.33$	$0.33 < D_r < 0.54$	$D_r > 0.54$
0.15g	$D_r < 0.48$	$0.48 < D_r < 0.73$	$D_r > 0.73$
0.20g	$D_r < 0.60$	$0.60 < D_r < 0.85$	$D_r > 0.85$
0.25g	$D_r < 0.70$	$0.70 < D_r < 0.92$	$D_r > 0.92$

• Sıvılaşmaya Neden Olabilecek Deprem Yüklemesinin Karakteristiği

Zeminde sıvılaşmanın gerçekleşmesi için bir yer sarsıntısına ihtiyaç vardır. Zeminin hacimsel büzülmesine ve aşırı boşluk suyu basıncının gelişmesine neden olan kayma deformasyonlarını, yer hareketinin ivme ve sarsıntı süresi gibi özellikleri belirler. Sıvılaşmanın en yaygın nedeni, deprem anında açığa çıkan sismik enerjidir. Deprem şiddeti ve sarsıntı süresi artarken, sıvılaşma için potansiyel de artmaktadır. Yüksek büyüklüklü depremler, hem büyük yer ivmesi hemde daha uzun süreli yer sarsıntısı üretir. Veriler az olsa da, sıvılaşmanın oluşması için gerekli eşik bir sarsıntı değerinin olduğu tahmin edilmektedir. Bu eşik değerler, maksimum yatay yer ivmesi için yaklaşık 0.10g ve yerel büyüklük için yaklaşık olarak 5'dir. Bu nedenle, 0.10g'den daha küçük bir maksimum yatay yer ivmesinin veya 5'den daha küçük bir yerel büyüklüğün söz konusu olduğu yerler için, sıvılaşma analizine gerek yoktur.

Bununla birlikte magnitudü büyük olmayan bir deprem hareketinin yüzeye doğru ilerlerken zemin tarafından büyütüldüğü bilinmektedir. Bu nedenle bu durumun sıvılaşmaya yol açabileceği de unutulmamalıdır.

• Düşey Efektif Gerilme

Çevre basıncının büyüklüğü zeminin sıvılaşmaya karşı hassaslığını azaltmaktadır. Daha yüksek çevre basıncı oluşturan koşullar; daha derin bir y.a.s.s., zemin yüzeyinden oldukça derinde yer alan zemin tabakası ve zemin yüzeyine uygulanmış bir sürsajdır. Arazi incelemeleri, olası sıvılaşma bölgesinin, genellikle, zemin yüzeyinden yaklaşık 15 m' lik bir derinliğe indiğini göstermektedir. Daha derinde yer alan zeminler, genellikle, daha yüksek çevre basınçlarından dolayı sıvılaşmaz. Bu durum, 15 m' den daha derindeki zeminlerde sıvılaşma analizi yapılmayacağı anlamına gelmez.

• Drenaj Şartları

Sıvılaşmaya neden olan etken, suyun drene olamaması nedeniyle boşluk suyu basıncında oluşan artışların, efektif gerilmeyi azaltmasıdır. Bu nedenle eğer sıvılaşma riski olan tabakanın üzerinde daha az geçirimli bir tabaka varsa bu durum sıvılaşma riski taşıyan tabakada oluşacak boşluk suyu basıncı artışının sönmülmesi için gerekli olan drenaj süresini uzatacağından tabaka için deprem sırası ve sonrasında sıvılaşma tehlikesi daha fazla olacaktır.

• Kum Tabakasının Kalınlığı

- **Sismik Geçmiş**

Geçmişte sivilaşmaya maruz kalmış zeminlerin yeni depremler ile birlikte tekrar sivilaşma gösterme ihtimalinin büyük olduğu hem laboratuvar çalışmalarından hem de arazi gözlemlerinden bilinmektedir (Ansal ve Ögünç,1981).

Herhangi bir mühendislik yapısının inşasından evvel arazinin sismik geçmişine bakarak sivilaşma tehlikesi açısından bir ön bilgi elde edilebilir.

Mikröbölgeleme yöntemi ile üretilen haritalar bu konuda oldukça yol gösterici bir rehberdir.

- **Doygunluk Derecesi**

Sivilaşma durumunda, zemin az bir kayma direnci altında deformasyona uğrar. Sivilaşmaya bağlı zemin deformasyonu ise malzemenin gevşeklik derecesine, sivilaşabilen tabakanın derinliğine, kalınlığına ve yanal devamlılığına, topoğrafik eğime, binalar ya da diğer yapılar tarafından uygulanan yüklere bağlıdır.

SIVILAŞMANIN YOL AÇTIĞI ZEMİN PROBLEMLERİ

Kayma mukavemeti katıların dayanımıdır. Zemin kütlesi kayma mukavemetini kaybederse bir sıvı gibi akar.

Kohezyonsuz kuru zeminlerin statik ve tekrarlı yükler etkisi altındaki sıkılaşma eğilimi iyi bilinen bir konudur. Ancak; kohezyonsuz zeminler doymun oldukları zaman drenajsız şartlardaki yüklemenin çabuk gelişmesi ve zeminin sıkılaşma eğilimi aşırı b.s.b. artmasına ve efektif gerilmelerin azalmasına neden olur.

Bu süreç sonunda akma sivilaşması (flow liquefaction) ve devirsel hareketlilik (cyclic mobility) olarak adlandırılan ve farklı şekillerde meydana gelen sivilaşma olayları gözlenecektir.

Tüm sivilaşma olaylarının en karakteristik özelliği, drenajsız yükleme şartlarında oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarıdır.

Sivilaşma durumunda, zemin az bir kayma direnci altında deformasyona uğrar. Sivilaşmaya bağlı zemin deformasyonu ise malzemenin gevşeklik derecesine, sivilaşabilen tabakanın derinliğine, kalınlığına ve yanal devamlılığına, topoğrafik eğime, binalar ya da diğer yapılar tarafından uygulanan yüklere bağlıdır.

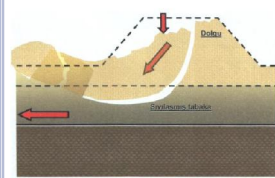
Gevşek malzemelerde yumuşama ile birlikte kayma mukavemeti kaybı ortaya çıkarken bunun sonucunda büyük kayma şekil değiştirmeleri hatta akma göçmesi ve akma sivilaşması (flow liquefaction) meydana gelebilmektedir. Orta sıkı malzemelerde ise sivilaşma geçici yumuşamaya ve artan çevrimli kayma şekil değiştirmelerine yol açmakla birlikte, genişleme eğilimi mukavemet kaybını ve büyük şekil değiştirmeler meydana gelmesini sınırlamaktadır. Bu tür zeminlerde çevrimli oynaklık (cyclic mobility) ortaya çıkmaktadır.

Akma sivilaşması, sivilaşmış zeminin kayma mukavemetinin zemin kütlelerinin statik dengesi için gereken kayma direncinden daha az olması durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda; statik kayma gerilmeleri altında zeminde büyük şekil değiştirmeler oluşmakta ve akma göçmesi meydana gelmektedir. Akma sivilaşması çok hızlı ortaya çıkmakta ve sivilaşan zemin çok büyük yer değiştirmeler göstermektedir.

Çevrimli sivilaşma veya çevrimli oynaklık; statik kayma gerilmeleri sivilaşmış zeminin kayma mukavemetini aşmadığı durumlarda ortaya çıkmakla birlikte kabul edilebilir seviyelerin üzerinde kalıcı şekil değiştirmelere yol açabilmektedir.

Akma türü sivilaşma sonucunda akma yenilmeleri oluşur. Buna ek olarak ağır yapıların batması veya devrilmesi, hafif gömülü yapıların yüzmesi ve istinat yapılarının yıkılması da akma türü sivilaşma olayı sonucu görülebilecek hasarlardandır. Devirsel hareketlilik (mobilité) sonucunda ise şev göçmesi, binalarda oturma, yanal yayılma ve istinat duvarlarında yanal ve düşey deplasmanlar gibi hasarlar görülebilir.

3 derece ve daha fazla eğime sahip şevlerde sıvılaşma sonucu geniş zemin kütlelerinin akması söz konusu olmaktadır. Kısa sürede gerçekleşen zemin akması, sıvılaşmanın en ağır sonuçlarından birisi olup yapısal hasarlara da neden olur.



Akma göçmeleri biçimi



1971 depreminde The Lower San Fernando Barajında oluşan akma göçmesi



San Francisco'daki Merced Gölü kıyısı boyunca 1957 yılında gelişen bir akma kayması

Yanal yayılma, göreceli olarak, rijit bir örtü altındaki zeminin sıvılaşması ile yüzeydeki blokların yanal deplasman göstermesidir. Deplasmanlar, hem yer çekimi hem de yer sarsıntılarının neden olduğu kuvvetler etkisi ile meydana gelmektedir. Bu tip zemin yayılmaları eğimi 3 dereceden az şevlerde veya su kütlelerine komşu düzlüklerde gerçekleşmektedir. Bu yayılmalar, çoğunlukla, birkaç metre ile sınırlıdır. Yanal yayılma sırasında zemin içinde kırılmalar, fisürler vb. oluşabilir. Aynı zamanda; yapılarda yüzeyel temellerde, gömülü boru hatlarında, köprülerde önemli hasarlara neden olurlar. 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 Marmara ve Düzce depremleri ile 27 Haziran 1998 Adana-Ceyhan depremlerinde yanal yayılma türü deformasyonlar yaygın olarak gelişmiştir.

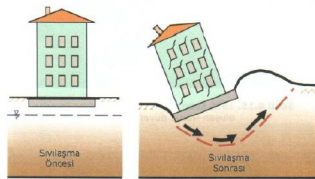


2001 Nisqually depremi Green River boyunca oluşan yanal yayılma

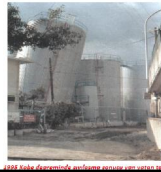


1989 Loma Prieta depreminde devlet parkı yakınında oluşan yanal yayılma

Sıvılaşmanın belki de en önemli sonucu zemin taşıma gücünde azalmadır. Sıvılaşan zeminde inşa edilen yapılarda batma, aşırı oturma ve düşeyden sapma meydana gelir. Bunun dünyadaki klasik örneği; 1964 Niigata, Japonya' da Kawangishicho apartman kompleksi, Türkiye' de ise 17 Ağustos 1999 Marmara depremi sırasında Adapazarı' nda gözlenmiştir.



Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi



1998 Kocaeli depreminde Adapazarı' nda taşıma gücü kaybı

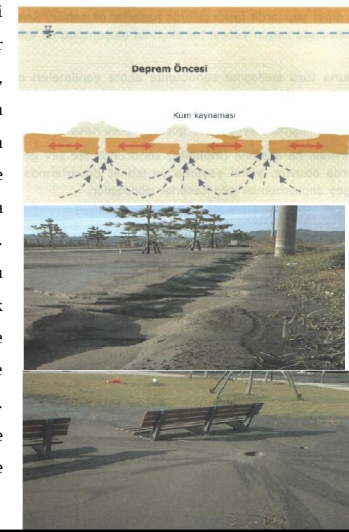


1964 Niigata depreminde sıvılaşma sonucu devrilen binalar



1999 Türkiye depreminde Adapazarı' nda sıvılaşma sonucu devrilen binalar

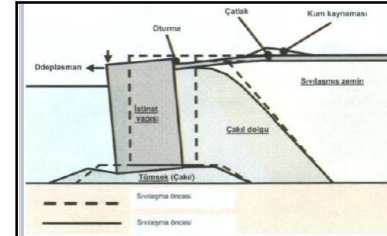
Sıvılaşma derinde olduğu ve zemin yüzeyi yanal deplasmana izin vermeyecek kadar hafif bir eğime sahip olduğu zaman, sıvılaşma zonu üstündeki zemin (sıvılaşmayan zemin) blokları birbirinden ayrılabilir ve sıvılaşmış zon üzerinde sallanır. Neden olunan zemin salınımına açılan ve kapanan çatlaklar eşlik edebilir. Deprem sırasında oluşan boşluk suyu basıncının sönmülme ihtiyacı, boşluk suyunun yukarı yönde hareket etmesine neden olur. Bu hareket, zemin taneciklerine yukarı yönde etki eden kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetler, bazı partiküllerin su ile beraber yüzeye kadar taşınmasına ve yüzeyde kum konileri oluşmasına yol açar.



Zemin osilasyonları; yanal yayılmanın oluşmadığı düz ya da çok az eğimli sahalarda alt seviyelerde oluşan sıvılaşma, toprak örtüsünde dalga benzeri yanal ve düşey salınımlara neden olabilmektedir. Bu salınımlar aynı zamanda beton kaplamalarda ve gömülü boru hatlarında çatlak ve fisürlerin açılıp kapanmalarına yol açar.



Sıvılaşma sırasında boşluk suyunun drenajı, granüler malzemede bir miktar konsolidasyona neden olur. Bunun sonucunda meydana gelen oturmalar yapılar üzerinde etkili olabilmektedir.



İstinat yapısı yenilme biçimi

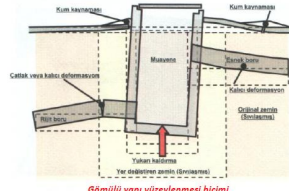


1995 Kobe depreminde sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi

İstinat duvarı arkasındaki granüler malzeme sıvılaşır, duvar üzerinde yanal basınç artar ve duvar yanal olarak hareket eder, eğilir ya da devrilir.

Gömülü Yapı Yükselenmesi

Sıvılaşma esnasında kaldırma kuvveti etkisiyle, muayene bacası, tank, boru hatları ve benzeri hafif yapılar zemin yüzeyine yükselir



Gömülü yapı yükselenmesi biçimi



2000 Tottori depreminde sıvılaşma sonucu muayene bacası yükselmesi



2004 Nigata Chuetsu depreminde sıvılaşma sonucu muayene bacası yükselmesi



2003 Tokachi-oki depreminde sıvılaşma sonucu muayene bacası yükselmesi

SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deprem nedeni ile oluşan S-dalgaları, suya doygun granüler zeminlerde hareketleri sırasında daneler arasında distorsiyona neden olurlar, bu ise gevşek zemin kütlelerinin iskelet yapılarının çökmesine yol açar. Bu çökme, suyun drene edilememesi durumunda, daneler arasındaki boşluk suyu basıncında ani artışlara neden olur. Eğer; boşluk suyu basıncı örtü basıncı düzeyine yükselirse granüler malzeme viskoz davranış kazanır ve sıvılaşır.

Sıvılaşma potansiyeline sahip sahalar tanımlanabilir. Ancak; sıvılaşmanın ne zaman nerede olacağını tahmin etmek depremi tahmin etmek kadar zordur. Sıvılaşma potansiyeline sahip sahalar parsel bazında zemin etütleri ile ayrıntılı olarak incelenmelidir. Sıvılaşmanın arazide bütün zemin tabakalarında oluşmadığı bilinmektedir. Bu nedenle; sıvılaşma analizlerinde, öncelikli olarak sıvılaşmanın meydana gelmesi için gerekli koşulların bulunup bulunmadığının incelenmesi gerekmektedir.

Sismik Gerilme Oranının (CSR) Bulunması

Sismik kayma gerilmesi oranını bulmak için çeşitli metodlar mevcuttur. Bu değerin elde edilmesinde yaygın olarak Seed ve Idriss (1971)' in amprik ifadesi kullanılmaktadır.

- Bu yöntemde bir deprem sırasında zemin tabakası içerisinde herhangi bir noktada oluşan kayma gerilmesinin, kayma dalgasının düşey olarak yayılımı nedeniyle meydana geldiği kabul edilir.
- Zemin yüzeyinin düz olduğu, birim genişlik ve birim uzunluktaki bir zemin kolonunun zemin yüzeyinde deprem sonucu oluşan maksimum yatay ivme a_{maks} ile zorlandığı ve bu etkiye karşı rijit bir nesne gibi davrandığı kabul edilmiştir.
- Eğer h kadar derinde yer alan bir zemin elemanı üzerinde bulunan bir zemin kütlesi rijit bir cisim olarak kabul edilirse zemin elemanı üzerindeki maksimum kayma gerilmesi aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

Deprem sırasında etkiyen tekrarlı gerilmeler ile sıvılaşma direncinin karşılaştırılması, sıvılaşmaya karşı bir güvenlik katsayısı hesaplanmasını mümkün kılacaktır. Bunu gerçekleştirmek için de deprem sırasında oluşacak tekrarlı ya da çevrimsel kayma gerilmeleri ile laboratuvar veya arazi deneyleri yardımı ile elde edilecek sıvılaşma direncinin karşılaştırılmasını sağlayacak bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır.

• Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018);

Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır.

$$\tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$$

Burada τ_R ve τ_{deprem} sırası ile, sıvılaşma direncini ve zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesini ifade etmektedir. Güvenlik katsayısı koşulunun sağlanamaması durumunda, sıvılaşması beklenen tabakaların dayanım ve rijitlik özelliklerindeki azalma, olası taşıma gücü kayıpları, duraylılık bozuklukları ile oturma ve yanal yayılma türündeki zemin hareketleri değerlendirilecektir.

Sıvılaşmaya elverişli zeminlerden örselenmemiş örnekler alınmasındaki zorluklardan dolayı, genellikle, arazi deneyleri ile korelasyonun daha sağlıklı sonuçlar verdiğine inanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan arazi deneyleri, çoğunlukla, SPT ve CPT dir. Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilmiş olan "Basitleştirilmiş Yöntem" bu konuda en yaygın kullanılan yaklaşımdır. Basitleştirilmiş Yöntemde, sıvılaşma analizi, SPT deney sonuçlarına dayanarak yapılmaktadır. Basitleştirilmiş Yöntem, 15 m' den daha küçük derinlikler için doğrulanmıştır.

- Yatay yönde bulunan kuvvetler toplandığında, rijit zemin elemanı üzerinde etkiyen F kuvveti, zemin elemanın tabanındaki maksimum kayma kuvvetine eşit olur. Zemin elemanın birim taban genişliği ve uzunluğuna sahip olduğu varsayıldığında maksimum kayma kuvveti, maksimum kayma gerilmesine eşit olur.

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a \\ F &= \gamma h A \cdot a_{max} \\ F/A &= \tau = \sigma_v \frac{a_{max}}{g} \\ \frac{\tau}{\sigma_v} &= \frac{\sigma_v \cdot a_{max}}{\sigma_v \cdot g} \\ CSR &= 0.65 \frac{\sigma_v \cdot a_{max}}{\sigma_v \cdot g} \cdot r_d \end{aligned}$$

a_{max} = yüzeydeki maksimum ivme
 γ = zeminin birim hacim ağırlığı
 g = yer çekimi ivmesi

$$(\tau_{max})_r = \frac{\gamma h}{g} a_{max}$$

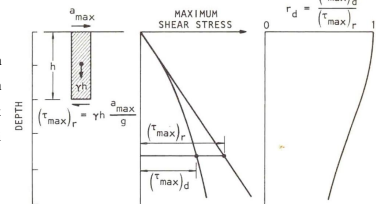
- Bununla birlikte; deprem sırasında zemin kolonu rijit olarak davranmayıp deforme olduğundan dolayı bu değer azaltılmalıdır.

r_d = gerilme azaltma faktörü

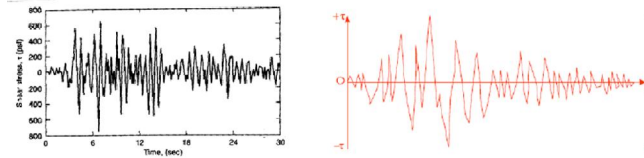
$$(\tau_{max})_d = r_d (\tau_{max})_r$$

- Yukarıdaki iki eşitlik bir arada değerlendirildiğinde deprem sırasında, zemin içerisinde herhangi bir noktada meydana gelecek maksimum kayma gerilmesi de aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\tau_{max} = \frac{\gamma h}{g} a_{max} r_d$$



- Zaman tanım alanındaki düzensiz kayma gerilmeleri, pik kayma gerilmesinin %65' i büyüklüğündeki çevrimsel eşdeğer üniform gerilme serisine dönüştürülür (Seed et al. 1975).



$$\tau_{av} \cong 0.65 \frac{\gamma_h}{g} a_{max} r_d$$

- Bu değer efektif gerilme ile normalize edilirse eşdeğer çevrimsel kayma gerilmesi (CSR_{eq}) elde olunur.

$$CSR_{eq} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}}$$

Aynı ilişki Idriss (1998) tarafından deprem büyüklüğünü dikkate alan bir düzeltme faktörü kullanılarak aşağıdaki formda sunulmuştur.

Burada; MSF deprem büyüklüğü düzeltme faktörüdür.

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \frac{r_d}{MSF}$$

$$MSF = 37.9 (M_w)^{-1.81} \quad (M_w \geq 5.75 \text{ 'ten büyük olduğu zaman})$$

$$MSF = 1.625 \quad (M_w \leq 5.75 \text{ ise})$$

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde baz alınan CSR oranı yaklaşımı; düz, serbest saha koşulları ve sık çökeller için geçerlidir. Eğimli sahalarda veya ağır yapılar altındaki tabakalarda başlangıç (statik) kayma gerilmelerinin varlığı sıvılaşma olasılığını etkilemektedir. Başlangıç kayma gerilmeleri ve yüksek çevre basınçlarının (örtü yükü basıncının 100 kPa' dan büyük olduğu) etkisini dikkate almak için CSR oranı üzerinde aşağıdaki düzeltmeler yapılması önerilmektedir.

$$(CSR_{arazi})_{\alpha, \sigma} = (CSR_{arazi})_{\alpha = 0, \sigma < 100 \text{ kPa}} K_{\alpha} K_{\sigma}$$

$$\alpha = \frac{\tau_{h,statik}}{\sigma'_{v0}}$$

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{N_{1,60}}}$$

K_{α} değerinin gevşek ve sık çökellerde 1.0'den küçük, sıkı zeminlerde ise 1.0'den büyük alınması önerilmektedir. Burada, σ'_{v0} =düşey efektif gerilme, $N_{1,60}$ =düzeltilmiş SPT darbe sayısı olmaktadır.

• Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) - Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Değerlendirmesi

Zemin sıvılaşma değerlendirmesinin SPT deney sonuçları kullanılarak yapılmasına dayanan yöntem aşağıda açıklanmıştır. Bununla birlikte; değerlendirmenin CPT veya kayma dalgası hızına göre yapılması durumunda uygulamada genel kabul gören yöntemler kullanılabilir.

Deprem sarsıntısı sırasında gelişen kayma gerilmeleri, τ_{deprem} , basitleştirilmiş yöntem kullanılarak hesaplanacaktır.

Depremde Oluşan Kayma Gerilmesinin Hesaplanması

Zeminde oluşan kayma gerilmesi aşağıdaki ilişki ile hesaplanacaktır.

$$\tau_{deprem} = 0.65 \sigma'_{v0} (0.4 S_{DS}) r_d$$

Burada σ'_{v0} sıvılaşma değerlendirmesi yapılan derinlikteki toplam düşey gerilmeyi, r_d ilgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısını, S_{DS} ise kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını göstermektedir.

Gerilme azaltma katsayısı, r_d incelenen derinliğe (z) bağlı olarak aşağıda verilen bağımlılar ile elde edilecektir.

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765z & z \leq 9.15\text{m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z & 9.15\text{m} < z \leq 23\text{m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008z & 23\text{m} < z \leq 30\text{m} \\ r_d &= 0.50 & z > 30\text{m} \end{aligned}$$

Harita Spektral İvme Katsayıları ve Tasarım Spektral İvme Katsayıları

Boyutsuz harita spektral ivme katsayıları, dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için Türkiye Deprem Tehlike Haritaları kapsamında tanımlanmıştır:

(a) Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı S_s

(b) 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı S_1

Birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşı gelen harita spektral ivme katsayıları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulu [$(V_s)_{30} = 760$ m/s] esas alınarak %5 sönüm oranı için harita spektral ivmeleri'nin yerçekimi ivmesine bölünmesi ile boyutsuz katsayılar olarak tanımlanmıştır.

Harita spektral ivme katsayıları S_s ve S_1 , aşağıdaki şekilde tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} 'e dönüştürülür:

$$S_{DS} = S_s F_s$$

$$S_{D1} = S_1 F_1$$

Burada F_s ve F_1 yerel zemin etki katsayıları'nı göstermektedir.

Tablo 2.1 – Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).					

Tablo 2.2 – 1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).					



Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı	1
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZD Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katlı kil tabakaları
Enlem	37.521847°
Boylam	42.442007°

Çıktılar

$S_s = 0.776$ $S_1 = 0.176$ $PGA = 0.330$ $PGV = 16.847$

S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA : En büyük yer ivmesi (g)

PGV : En büyük yer hızı (cm/sn)

Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZD ve $S_s = 0.776$ için $F_s = 1.190$

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZD ve $S_1 = 0.176$ için $F_1 = 2.248$

Tasarım Spektral İvme Katsayıları

$$S_{DS} = S_S F_S = 0.776 \times 1.190 = 0.923$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.176 \times 2.248 = 0.396$$

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

Sismik Direnç Oranının (CRR) Bulunması

Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini temsil ettiği düşünülen çevrimsel kayma direnci oranı (CRR); SPT deneyinden elde edilen N değeri, CPT deney sonucunda elde edilen q_c değeri ve kayma dalgası hızı V_s yardımı ile belirlenebilir.

Basitleştirilmiş Yöntemde arazi SPT darbe sayılarına bazı düzeltmeler yapılarak sıvılaşma direnci (CRR) tahmin edilerek depremde oluşacak çevrimli kayma gerilmesi oranı (CSR) ile karşılaştırılmaktadır.

• Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)

SPT Verilerinin Düzeltilmesi

Araziden elde edilmiş ham SPT verileri, N , aşağıdaki deneklem kullanılarak $N_{1,60}$ değerine düzeltilmektedir.

$$N_{1,60} = NC_N C_R C_S C_B C_E$$

Burada C_N kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme (derinlik) düzeltme katsayısını, C_R tij boyu düzeltme katsayısını, C_S numune alıcı tipi düzeltme katsayısını, C_B sondaj delgi çapı düzeltme katsayısını, C_E enerji oranı düzeltme katsayısını göstermektedir. Derinlik düzeltme katsayısı C_N aşağıdaki bağıntı ile hesaplanacaktır.

$$C_N = 9.78 \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{vo}}} \leq 1.70$$

Derinlik düzeltme katsayısı için verilen bağıntıda deney derinliğindeki efektif düşey gerilme σ'_{vo} (kN/m²), Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapıldığı durumdaki arazi koşullarına göre hesaplanmaktadır. Deney sonrasında yapılan ek dolgu, temel gerilmesi veya zemin kazısı ve benzeri nedenler ile oluşan efektif gerilme değişiklikleri dikkate alınmayacaktır.

Tablo 16B.1. SPT Düzeltme Katsayıları

Düzeltme Katsayısı	Değişken	Değer
C_K	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
C_s	Standart numune alıcı (iç tüptü olan)	1.00
	İç tüptü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C_b	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
C_E	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60

SPT Verilerinin İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmesi

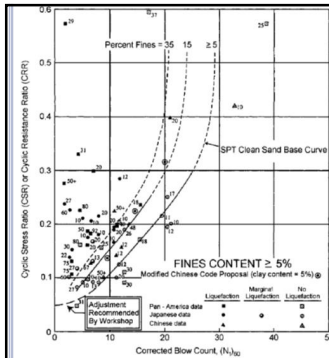
İnce dane içeriğine (IDI) göre düzeltilmiş darbe sayıları $N_{1,60f}$ aşağıdaki denklem ile hesaplanacaktır:

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

$$\alpha = 0 \quad ; \quad \beta = 1.0 \quad (IDI \leq \%5)$$

$$\alpha = \exp[1.76 - (190 / IDI^2)] \quad ; \quad \beta = 0.99 + IDI^{1.5} / 1000 \quad (\%5 < IDI \leq \%35)$$

$$\alpha = 5.0 \quad ; \quad \beta = 1.2 \quad (IDI \geq \%35)$$



SPT Clean Sand Base Curve for Magnitude 7.5 Earthquakes with Data from Liquefaction Case Histories (Modified from Seed et al. 1985)

Eğrinin yatay eksenini temiz kumda ölçüleceği varsayılan $N_{1,60,CS}$ değeri yerine silt ve killi malzeme miktarı için ince dane oranı ile ilgili düzeltme uygulanmamış $N_{1,60}$ değerini göstermektedir. 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için $N_{1,60}$ değerinin 30'dan büyük olması durumunda temiz kum sıvılaşmaz. $N_{1,60} \geq 30$ ise kum, sıkı veya çok sıkı durumdadır. Sıkı kumlar sıvılaşmaz. Başlangıç sıvılaşması, tekrarlı kayma gerilmelerinin tersine çevrilmesi nedeni ile kumun hacmini artırma eğiliminde olması.

Şekilde görülen grafik, deprem sırasında sıvılaşmış veya sıvılaşmamış birçok yerde yapılan araştırmalara dayanarak geliştirilmiştir. Grafikte yer alan verilerin çoğunluğunda **deprem büyüklüğü 7.5 civarındadır. Grafik üzerinde %35, %15 ve $\geq$ %5 eğrileri sıvılaşma potansiyelinin araştırıldığı zeminlerin ince dane içeriklerini tanımlamaktadır. Bu eğriler yaklaşık sınırları temsil etmektedir.** Eğrinin sağında bulunan veriler, genellikle, deprem sırasında sıvılaşma olmayan sahalara, solunda bulunan veriler ise sıvılaşma olmuş sahalara belirtmektedir.

Sıvılaşma Direncinin Hesaplanması

Sıvılaşma direnci τ_R , moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranının ($CRR_{M7.5}$), tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı (C_M) ve efektif düşey gerilme (σ'_{v0}) ile çarpılması ile hesaplanacaktır.

$$\tau_R = CRR_{M7.5} C_M \sigma'_{v0}$$

Çevrimsel dayanım oranı aşağıda verilen denklem ile hesaplanacaktır:

$$CRR_{M7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı (C_M), tasarım depremi büyüklüğüne (M_w) bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanacaktır.

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$$

Zemin Yapısı - Kil İçeriği

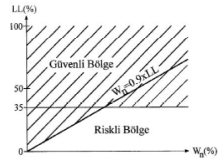
Kil içeriğinin artması, kohezyonsuz zeminde sıvılaşma tehlikesini azaltan bir etkidir. Bu içeriğin ne şekilde etkili olacağına ilişkin kriterler çeşitli araştırmacılar tarafından literatüre sunulmuştur.

Modifiye Çin Kriterleri

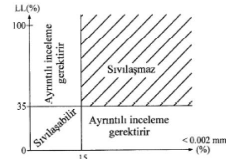
Sıvılaşma Potansiyeli olan zeminler:

- (1) 0.005 mm' den küçük ince malzeme oranı $\leq$ %15
- (2) Likit limit(LL) $\leq$ %35
- (3) Doğal su muhtevası (W_n) $\geq 0.9 \times LL$

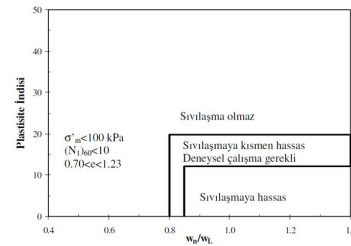
Marcuson vd. (1990)



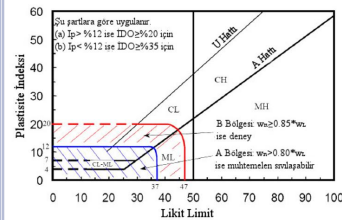
Seed ve Idriss (1982)



Bray ve Diğerleri (2004a) Kriteri



Seed ve Diğerleri (2003) Kriteri



B bölgesi içerisinde yer alan zeminler, arazi penetrasyon deneyleri ile değerlendirilmek için uygun olmayıp bu bölgede yer alan zeminlerin laboratuvarında test edilmesi gereklidir.

1999 Kocaeli depreminden sonra Adapazarı siltlerinin sıvılaşabilirliğinin incelendiği araştırmalarda, Çin kriterlerinin $w_L < \%33$, Kil Oranı $< \%10$, $I_L < 0.90$ ve $D_{50} < 0.02$ mm olarak uygulanmasının daha doğru olacağı öne sürülmüştür.

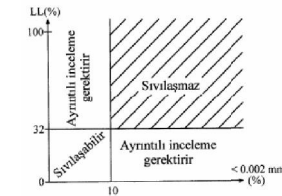
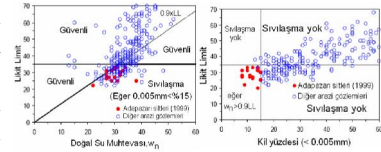
$$I_L = (w_n - w_p) / I_p$$

Andrew ve Martin (2000) bu kriterleri 0.002 mm'lik kil çapı için yeniden düzenlemiştir. Buna göre;

- İçerisindeki kil oranı (0.002 mm'den küçük dane oranı) yaklaşık olarak %10'dan az olan ve
- Likit limit değeri %32'den küçük olan zeminler potansiyel olarak sıvılaşabilecek zeminler olarak kabul edilmektedir.

Andrew ve Martin (2000) Kriterleri

Likit limit $< \%32$	Likit limit $\geq \%32$
Kil içeriği $< \%10$	Sıvılaşma olur
Kil içeriği $\geq \%10$	Daha fazla araştırma gerekli
	Sıvılaşma olmaz



• Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018);

Zemin sıvılaşması değerlendirilmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yerdeğiştirmelerin dikkate alınması gereklidir.

Kum ve Kumlu Siltlerde Deprem Kaynaklı Oturmaların Tahmini

Gevşek haldeki doygun kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması daima, yer sarsıntıları sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basınçları sönmüldüğünden, oturmalar eşliğinde meydana gelir. Oturmalar, genellikle, zeminin karakterine ve drenaj yolunun uzunluğuna bağlı olarak sarsıntıların tamamlanmasından sonra saniyeler ile bir güne kadar varan süreler içinde tamamlanır. Sıvılaşma sonrası oturmaların gevşek – orta sıkı kumlar için kum tabakası kalınlığının %2 ila 3'ü mertebelerinde ve çok gevşek kum zeminler için de tabaka kalınlığının %5'inden fazla miktarda olduğu rapor edilmiştir.

Kohezyonsuz zemin tabakalarında sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı 1.1' den büyük olduğunda sıvılaşma meydana gelmeyeceği olmasına rağmen deprem sarsıntıları sırasında zemin kütlesi içerisinde bir miktar boşluk suyu basıncı oluşabilir ve bundan dolayı kısmi sıvılaşma gözlenebilir. Boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi ile az miktarda oturmalar meydana gelebilir. Eğer sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı 1.25' den büyük ise kısmi sıvılaşma nedeni ile meydana gelecek olan oturmaların yapılar üzerindeki etkisi önemsiz olup oturma analizine ihtiyaç duyulmaz. Eğer güvenlik katsayısı değeri 1.25' den küçük ise aşağıda belirtilen prosedüre göre bir oturma analizi yapılır.

Tokimatsu ve Seed (1987); diğer araştırmacılar tarafından doygun kum zeminlerin sıvılaşma öncesi ve sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon davranışları konusundaki çalışmalarından derledikleri laboratuvar deney verilerine göre **doygun kum zeminlerde** oturma davranışını kontrol eden başlıca unsurların deprem sarsıntılarını nedeni ile meydana gelen tekrarlı gerilme oranı ve maksimum kayma deformasyonları olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışmalar ve arazi gözlemlerine dayanarak şekilde görülen abağı geliştirmişlerdir. Bu abağı göre 7.5 büyüklüğündeki bir depremde ($M = 7.5$) meydana gelen hacimsel deformasyonlar tekrarlı gerilme oranı ve $N_{1,60}$ değerlerinin bir fonksiyonudur. **Bu abak, sadece, %5' den daha az ince dane içeriğine sahip kum zeminler için geçerlidir.**

- Öncelikle, sıvılaşma potansiyeli olan zemin tabakaları tanımlanır. Sıvılaşma potansiyeline sahip her bir tabaka için tasarım deprem büyüklüğü için elde edilmiş olan tekrarlı gerilme oranı değeri, $M=7.5$ büyüklüğündeki bir deprem durumunda elde edilecek eşdeğer tekrarlı gerilme oranı değerine dönüştürülür.
- $M=7.5$ büyüklüğünde bir deprem durumundaki tekrarlı gerilme oranı değeri ve $N_{1,60}$ kullanılarak hacimsel deformasyon miktarı ϵ_v değeri abaktan elde edilir.
- H , sıvılaşma potansiyeline sahip tabaka kalınlığı olmak üzere sıvılaşma kaynaklı toplam oturma miktarı sıvılaşma potansiyeline sahip tabakaların $\epsilon_v H$ ifadelerinin toplamı olarak elde edilir.

$$(\tau_{av} / \sigma_o') \text{ induced by an } M=7.5 \text{ earthquake} = (\tau_{av} / \sigma_o') \text{ induced by an } M=\text{design magnitude earthquake} \cdot (1/\gamma_m)$$

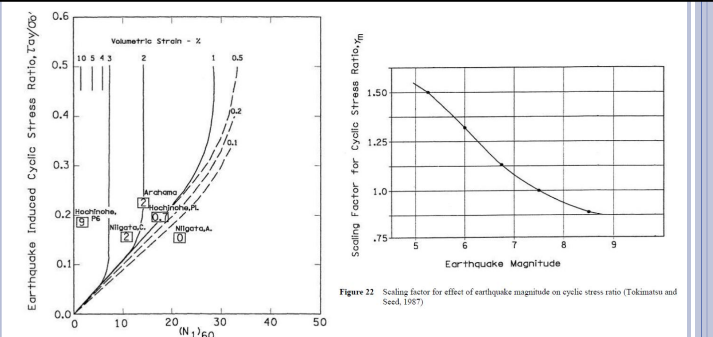
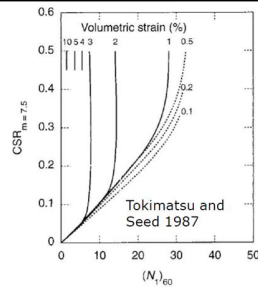


Figure 21 Relationship between cyclic stress ratio, volumetric strain and $(N_1)_{60}$ (Tokimatsu and Seed, 1987)

Siltli Kum ve Silt zeminlerde meydana gelebilecek oturmaların tahmini için mevcut bir abak hali hazırda bulunmamaktadır. Tasarımda ön fikir olması amacı ile siltli kum ve siltlerde meydana gelecek olan oturma miktarı yukarıda anlatılmış olan **Temiz Kum** için geliştirilmiş yöntem kullanılarak elde edilen oturma miktarının yarısı olarak kabul edilmektedir.

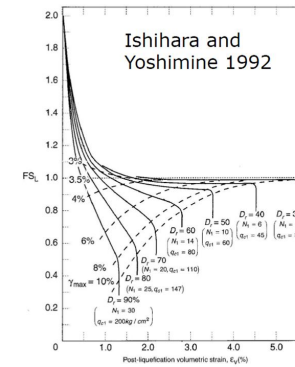


For example
 $(N_1)_{60} = 15$
 $CSR = 0.2$
 $\epsilon_v \approx 1.5\%$

- Kumlarda, deprem kaynaklı oturmaların tahmin edilmesi zordur.
- Statik yüklemeler etkisindeki oturmaların tahmininde dahi %25 ila %50 seviyelerinde hatalar olabilmektedir. Daha karmaşık olan sismik yükleme durumundaki oturmaların tahmininde doğruluğun daha az olması beklenir.
- Kuru kumlar çok çabuk şekilde sıkılırlar. Bu sıkışma ya da oturma, depremin sonunda tamamlanmış olur.
- Doygun kum zeminlerde ise oturma için daha fazla zaman gerekli olabilir. Boşluk suyu basınçları, zeminin permeabilitesi ve drenaj yoluna bağlı olarak sönümlenir.

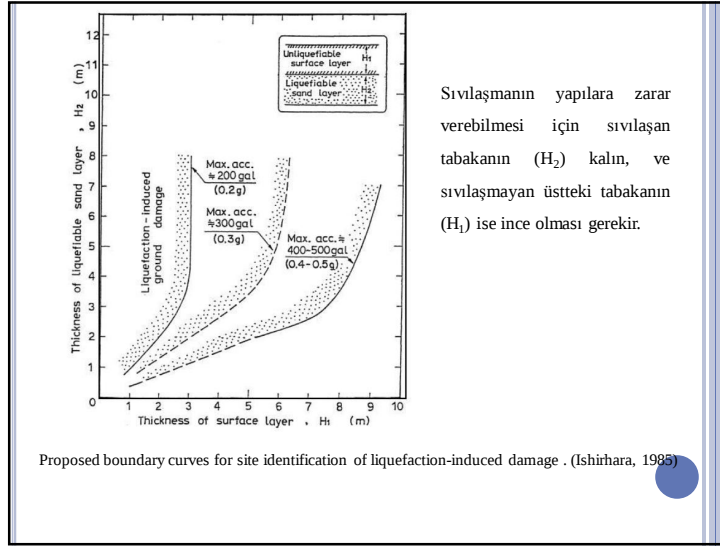
Doygun Kumların Oturması

Doygun kum zeminlerin deprem sonrası sıkışması kumun sıkılığına bağlı olarak gerçekleşir. Kum zeminde meydana gelecek maksimum kayma deformasyonu, deprem nedeni ile oluşan ilave boşluk suyu basıncının miktarına bağlıdır.



In an alternative approach, a FS against liquefaction and soil strength can be used to estimate post liquefaction volumetric strain

For example
 Given: $(N_1) = 20$
 $FS = 1.1$
 $\epsilon_v \approx 0.6\%$



Sıvılaşmanın yapılara zarar verebilmesi için sıvılaşan tabakanın (H_2) kalın, ve sıvılaşmayan üstteki tabakanın (H_1) ise ince olması gerekir.

• **Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018);**

Belirlenen sıvılaşma sonrası yerdeğistirmelerin üstyapı/altyapı davranışına etkileri değerlendirilerek ihtiyaç duyulması halinde üstyapı ve/veya zemin iyileştirmeleri uygulanacaktır.

Arazi Zemin Özelliklerinin Yerinde İyileştirilmesi

Etkilerin dirençler tarafından karşılanmadığı durumlarda, deprem sırasında zemin sıvılaşmasının tetiklenmesi ve/veya büyük dayanım/rijitlik kaybına uğraması beklenen zeminlerde, zemin özelliklerinin yerinde iyileştirilmesi veya güçlendirmesi yoluna başvurulabilir. Uygun zemin iyileştirme veya güçlendirme yöntemi, *geoteknik* alanında sorumlu inşaat mühendisine aşağıda sıralanan genel ilkelerden yararlanılarak belirlenir.

- Gevşek ve orta sıkı kohezyonsuz (iri daneli) zeminlerde, sıkalık derecesinin artırılması en etkin iyileştirme yoludur. Sıkılık derecesinin artırılmasında zemine titreşimler uygulayan yöntemler daha etkindir. Titreşimli yöntemler; derin kompaksiyon (sıkıştırma), vibroflotasyon, sıkıştırma kazıkları, vibrasyonlu sondalar, patlatma, yüzeyden titreşimli silindirlerle sıkıştırma vb. olarak sayılabilir.
- Yumuşak-katı kohezyonlu (ince daneli) zeminlerde, zeminin su muhtevasını azaltıcı, konsolidasyon basıncını artırıcı ve iç yapısını kuvvetlendirici yöntemler ile etkili iyileştirme sağlanabilir. Bu kapsamda, drenaj, yeraltı suyu düzeyini düşürme, konsolidasyon yöntemleri (önyükleme, elektro ozmotik, vakum etkisinde) kullanılabilir. Ayrıca, çimento, kireç gibi bağlayıcı katkı maddeleri karıştırarak katılaştırma (derin karıştırma) ve enjeksiyon yöntemleri kullanılabilir. Suyu doygun olmayan ve plastisitesi yüksek olmayan kohezyonlu zeminlerde, derin kompaksiyon (sıkıştırma) yönteminden de yararlanılabilir.
- Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde, zemin içinde rijit elemanlar (taş kolonlar, jet enjeksiyonu kolonları, beton kolonlar vb.) oluşturulması ile statik ve deprem yüklerinin ağırlıklı olarak bu elemanlar tarafından karşılanması sağlanabilir.

- Zemin iyileştirmesi tasarımı, iyileştirilecek zemin özellikleri (sıkılık derecesi, kayma dayanımı, sıkışma modülü, vb.) ve hedeflenen iyileşme derecesi açıklıkla belirtilmelidir.
- Seçilen zemin iyileştirme yönteminin saha uygulaması aletsel gözlemlerle yakından izlenmeli, mevcut duruma göre sağlanan iyileşme derecesi ve tasarımda hedeflenen iyileşmenin gerçekleşme durumu kontrol edilmelidir.
- Mevcut bir yapının altında zemin iyileştirmesi için uygulanabilecek önlemler daha sınırlıdır. Yapı temelleri altında çalışmanın zorluğu yanında, iyileştirme yöntemlerinin uygulanması sırasında gelişebilecek olası zemin yerdeğistirmelerinin dikkate alınması gerekir.
- Bazı durumlarda yapı çevresinde alınan önlemlerle, deprem sırasında oluşabilecek yanıl zemin yerdeğistirmelerinin sınırlanması yoluna başvurulabilir.
- Zemin güçlendirme yöntemleri yerine (veya ile birlikte) temel sisteminin değiştirilmesi (kazıklı veya baret temeller, çevre diyafram duvar, rijit bodrum temel tasarımı vb.) ve üstyapıda tasarım değişiklikleri yapılması yoluna da başvurulabilir.