



ZEMİN SIVILAŞMASI

Depremlerin neden olduğu tekrarlanmalı gerilimler sığ derinliklerde yer alan gevşek zeminlerde özel zemin davranışlarının gelişmesine yol açmaktadır. Dinamik yüklerden kaynaklanan bu tür zemin davranışları arasında yer alan sıvılaşma ve bununla ilgili zemin duraysızlıkları yapısal hasarlar üzerinde etkin rol oynamaktadır. Sıvılaşma sonucu dayanımı azalarak taşıma gücünü yitiren zemin, üzerindeki yapıları taşıyamayarak yapıların oturmasına, yana yatmasına veya devrilmesine, gömülü alt yapı elemanlarında çeşitli hasarlara neden olur. Ayrıca sıvılaşmaya bağlı olarak gelişen yanıl yayılma ve akma türü kayma davranışları nedeniyle, geniş zemin kütleleri ve üzerindeki yapılar nehir, göl ve denize doğru sürüklenebilirler.

Insanoğlu geçmişten günümüze değin savaş, salgın, hastalık, yangın vb. olayların yanısıra, deprem, heyelan, taşkın, çığ, volkan patlaması, kasırga ve hortum gibi doğal afetler nedeniyle kitlesel kayıplara ve maddi zararlara maruz kalmış ve kalmaya da devam etmektedir. Önlenemez olması, ayrıca etkilediği bölgelerdeki yapıları çok kısa bir sürede ve çoğu kez yıkım derecesine varacak düzeyde tahrip ederek insan yaşamını da büyük tehdit altında bulundurması nedeniyle depremler, en yıkıcı doğal afet türü olarak kabul edilmektedir. Depremlerin jeolojik anlamda neden olduğu etkiler birincil ve ikincil etkiler şeklinde iki grupta değerlendirilmektedir. Birincil etkiler,

yerkabuğunda fayların oluşması ve buna bağlı olarak tektonik anlamda meydana gelen yükselme ve çökmelerdir. Bu tür etkiler, yerkabuğunun derinliklerinde karmaşık mekanizmaların ürettiği kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Yerkabuğunun derinliklerinden yüze kadar devam eden faylar deprem sırasında izledikleri hatlar boyunca üzerlerinde ve yakınlarında yer alan yapıları etkileyebilmektedir.

İkincil etkiler ise, depremden kaynaklanan titreşimlerin etkisiyle çok sığ derinliklerde gelişen zemin davranışlarıdır. Bunlar, sıvılaşma, zemin taneciklerinin sıkışması ve sıvılaşmaya bağlı olarak zeminin farklı türlerde yenilmesi şeklinde sınıflandırılabilir. Gevşek toprak

zeminlerin özellikle içsel özelliklerine, yeraltısuyu seviyesinin derinliğine ve depremden kaynaklanan yer ivmesinin büyüklüğüne bağlı olarak gelişen bu tür zemin davranışları, yapısal hasarların meydana gelmesinde önemli rol oynamaktadır. Dünyada yaşanan her deprem sonrasında, depremlerle farklı açılardan ilgilenen meslek disiplinleri dışında, toplumun büyük çoğunluğunun dikkatleri daha çok birincil etki grubunda yer alan fayların yanısıra, can kayıpları ve maddi hasarlar üzerinde yoğunlaşmakta, buna karşın yapısal hasarlar üzerindeki etkileri gözardı edilemeyecek derecede önem taşıyan ikincil etkiler geri planda kalmaktadır. Bununla birlikte, ülkemizde son iki yılda

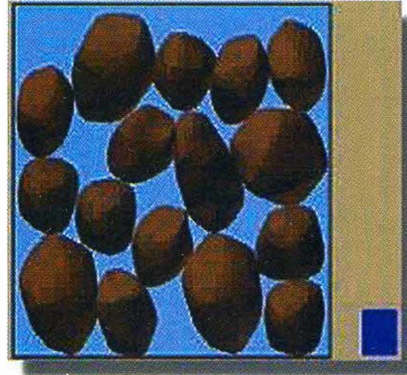
meydana gelen ve zemin sıvılaşması ile buna bağlı diğer zemin hareketlerinin ve etkilerinin yaygın şekilde gözlemlendiği 1998 Adana-Ceyhan ve 1999 Kocaeli depremlerinden sonra, bu tür zemin davranışları da geniş halk kitlelerinin dikkatini çekmeye başlamıştır. Sıvılaşma, bu depremlerden sonra halk arasında "Kum Kaynaması" ve "Kum Fıskırması", sıvılaşmaya bağlı olarak kıyı bölgelerinde gelişen yanıl yayılma ve akma sıvılaşması türü hareketler ise, "Kıyı Kayması" veya "Kıyı Heyelanı" sözcükleriyle tanımlanmaya başlamıştır.

Bu yazıda, sıvılaşma davranışının nasıl, hangi koşullarda ve ne tür zeminlerde meydana geldiği, sıvılaşmaya bağlı diğer duraysızlıkların gelişimi ile bunların yapılar ve doğal çevre üzerindeki etkileri ülkemizden ve diğer ülkelerden seçilmiş tipik örnekler verilerek anlatılmıştır.

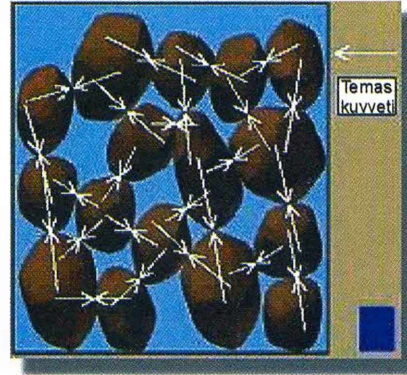
Sıvılaşma Nasıl Meydana Gelir ?

İlk kez 1953 yılında Japon araştırmacılar Mogami ve Kubo tarafından ortaya atılan sıvılaşma sözcüğü, tarihsel süreçte; suyun zemin ortamından uzaklaşmadığı koşullar altında, suya doygun kohezyonsuz (tanelerin birbirine bağlanma yeteneğinin olmaması) zeminlerin tekdüzce, geçici veya tekrarlanmalı şekilde örselenmesinden kaynaklanan zemin deformasyonlarını kapsayan davranış biçimlerinin tümü için, ayırım yapılmaksızın, kullanılmıştır.

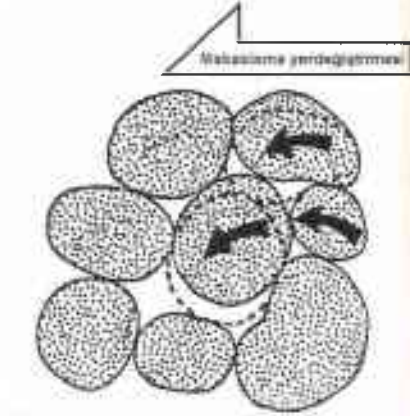
Sıvılaşma davranışının meydana geldiği ortamlar, "ayrık katı bileşenleri arasında doğal çimento görevi üstlenecek bir bağlayıcı bulunmayan veya çok gevşek olarak bulunan bir bağlayıcının su etkisiyle ortamdaki kolayca uzaklaştırılarak, tanelerin serbest hale geçebildiği ayrık kayalar ve mineraller topluluğu" şeklinde tanımlanan ve toprak zemin olarak adlandırılan malzemelerdir. Buna karşın, kütleli, çimen-



Zemini oluşturan tanelerin deprem öncesi görünümü (gözenek suyu basıncının sıfır olduğu sağdaki mavi renkli koton göstermektedir)

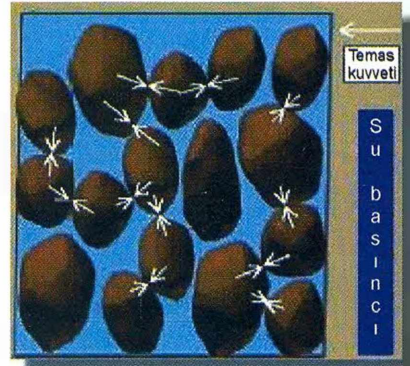


Zemin taneleri arasında etkiyen temas kuvvetleri (okların boyu temas kuvvetlerinin büyüklüğünü ifade eder)

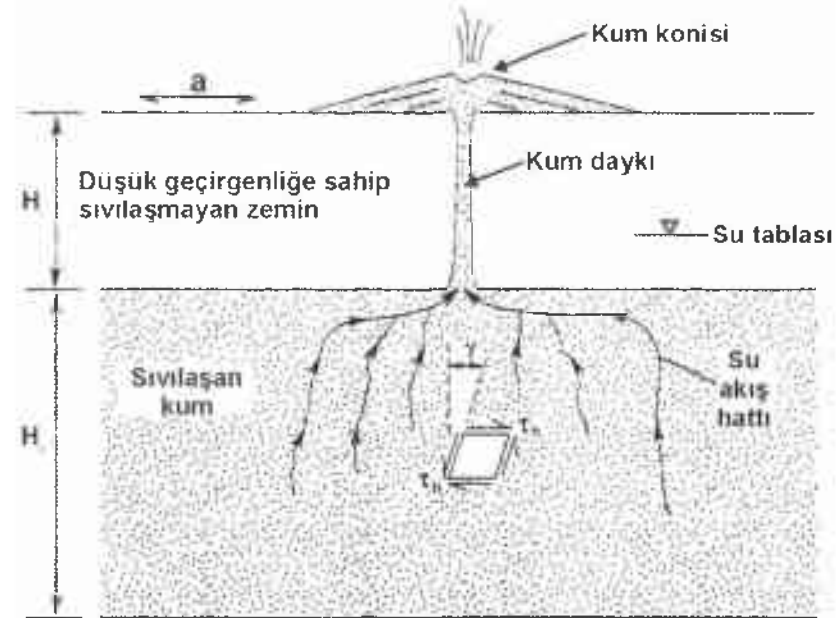


Maksimum yerdeğiştirme

Deprem öncesi olduğu ortama yerdeğiştirmeyle zemin oluşturan tanelerin sıvılaşma süreci



Gözenek suyu basıncının artışıyla tanelerin temaslarını yitirmesi



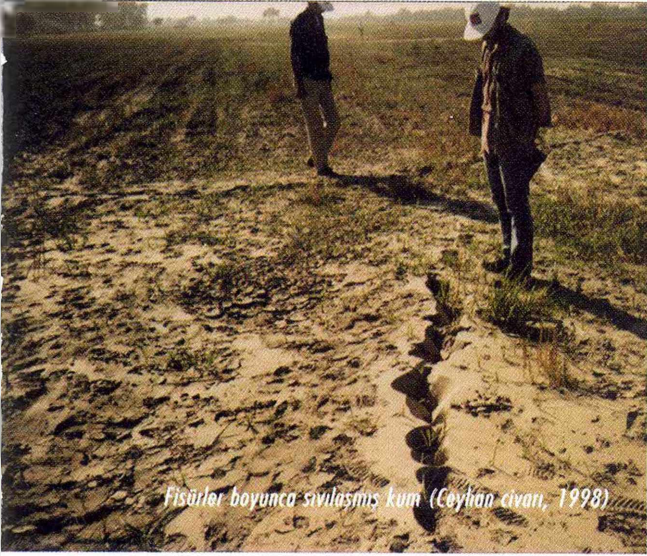
Sıvılaşma ve kum dayklarının oluşumunu gösteren kesit (a: yatay ivme; T: yatay ivmeden kaynaklanan maksilama gerilimi; γ: maksilama yer değiştirme)

tolanmış, taneli veya kristalli yoğun kayaç türü zeminlerde ise, sıvılaşma meydana gelmemektedir. Toprak

zeminlerdeki sıvılaşma davranışının anlaşılabilmesi için depremden önceki zemin koşullarının iyi bilinmesi



*Sıvılaşma sonucu oluşmuş tipik bir kum konisi
Yalovakdere Deltası, Yalova, 1999*



Fisürler boyunca sıvılaşmış kum (Ceyhan civarı, 1998)

gerekir. Bir zeminde çok sayıda tane bir arada bulunmaktadır ve bunlara yakından bakıldığında, her tanenin çevresindeki diğer tanelerle temas halinde olduğu görülür. Her tanenin kendi üzerindeki diğer tanelerin ağırlığından dolayı taneler arasında temas kuvvetleri oluşur ve bu kuvvetler taneleri bir arada tuttuğu gibi, zeminin bir dayanıma sahip olmasını da sağlar. Taneler arasındaki boşluklar ise, su ve hava ile doludur. Suyun tanelere yaptığı basınç gözenek suyu basıncı olarak adlandırılır.

Deprem sırasında sismik dalgalar, özellikle makaslama dalgaları, suya doygun (yeraltısuyu tablası altındaki) gevşek kum zeminler içinde yayılırken birbirine göre ters yönde etkiyen kuvvet çiftleri yaratarak (makaslama kuvvetleri) zeminin tanelerinde yer değişimlerine neden olurlar. Bu koşullar altında gevşek konumdaki kum tanecikleri birbirlerine yaklaşma eğilimi gös-

terirler ve bu davranış sırasında tanelerin temas noktalarındaki gerilim, taneleri çevreleyen suya aktarılır. Depremlerin ani ve çok kısa süreli hareketlere neden olması, taneler arasındaki suyun kaçması (drene olması) için gereken yeterli süreye olanak tanıyamakta, dolayısıyla ortamdaki suyunun basıncını aniden arttırmaktadır. Gözenek suyu basıncındaki bu ani artış, zemin tanelerini bir arada tutan temas kuvvetlerini yok ederek taneleri birbirlerinden uzaklaştırır ve böylece zemin dayanımını yitirir. Bu koşullar altında zemin, deprem öncesinde gösterdiği katı malzeme davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak suyla birlikte yüzeye doğru hareket eder ve yüzeyden çıkmaya başlar. Zeminin sergilediği bu davranış biçimini "sıvılaşma" olarak tanımlanır.

Sıvılaşma yüzeyde; kum fişkırmaları, tek başına veya ardarda dizilmiş kum volkanları ve fisürler (yarıklar) boyunca kum birikmeleri şeklinde görülür. Kum volkanları, sıvılaşan zeminin yüzeye doğru yükselmesi sırasında yüzeydeki toprak seviyesini yanlara iterek ve bir baca oluşturarak meydana gelmektedir. Bacanın oluşumuyla birlikte çapı 3 m, derinliği ise 1-2 m civarında olan çukurlar oluşabilmektedir. Kum konileri ise, 10-50 cm arasında değişen çapa ve 15-25 cm yüksekliğe sahip olabilmektedir. Örneğin, 1999 Kocaeli Depreminde Yalova'nın doğusundaki Yalovakdere deltasında gelişmiş kum konilerinin çapları 50 cm'ye kadar ulaşmıştır. Ayrıca yüzey kırıkları boyunca da kum fişkırmaları meydana gele-

bilmektedir.

Sıvılaşma İçin Gerekli Koşullar (Sıvılaşma Duyarlılığı)

Yukarıda verilen zemin tanımlaması kapsamına giren zemin türlerinin tümünü sıvılaşma davranışına karşı duyarlı kabul etmek doğru değildir. Bu nedenle, sıvılaşma riskine yönelik değerlendirmeler açısından ilk aşamada dikkate alınması gereken husus, sıvılaşmanın hangi koşullar altında meydana gelebileceğinin bilinmesidir. Bir zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirleyen etkenler, diğer bir ifadeyle sıvılaşma için gerekli ölçütler, üç ana başlık altında değerlendirilir. Bu ölçütlerle ilgili başlıca hususlara aşağıda değinilmiştir.

Jeolojik Ölçütler

Sıvılaşma her zeminde ve her koşulda meydana gelen bir davranış biçimi olmayıp, belirli jeolojik ortamlarda ve hidrojeolojik koşullar altında gerçekleşir. Genellikle, jeolojik anlamda genç ve gevşek çökeltilerin, özellikle kum ve silt tane boyundaki malzemenin depolandığı ve yeraltısuyunun sığ olduğu ortamlar sıvılaşmanın gelişmesi açısından en uygun ortamlardır. Sıvılaşmaya karşı en duyarlı çökeller; Holosen yaşlı (10000 yıldan daha genç) delta, akarsu, taşkın ovası, taraça, kıyı ve çöl ortamlarındaki çökeltme süreçleri sonucunda birikmiş çökellerdir. Çünkü bu ortamlarda egemen olan çökeltme süreçleri, tanelerin üniform şekilde (hemen hemen aynı tane boyundan oluşan tanelerin bir araya gelmesi) ve gevşek halde depolanmasına olanak sağlamaktadır. Pleystosen yaşlı (0.1-1.8 milyon yıl arası) çökeltilerin son yüzyılda meydana gelen depremlerde sıvılaşığı ender olarak görülmüştür. Ülkemizdeki depremler sırasında gözlenen sıvılaşmaların Holosen yaşlı çok genç alüvyal çökeltilerin bulunduğu alanlarda gözlenmesi de bu olguyu destekle-

mektedir. Ayrıca, yol ve baraj çalış-
malarında inşa edilen ince taneli ve
iyi sıkıştırılmamış dolgular ve suyla
birlikte atık barajlarına akıtılıp
biriktirilen çok ince maden atıkları
da sıvılaşmaya karşı duyarlı olan
malzemelerdir. Sıvılaşma, yeraltı-
suyu tablasının yüzeyden itibaren en
fazla 10 m derinlikte bulunduğu
ortamlarda yaygın şekilde meydana
gelebilmektedir. Ender olmakla bir-
likte, yeraltısuyu tablasının 20
m'den daha derin olduğu yerlerde de
sınırlı miktarda sıvılaşmanın mey-
dana geldiği bilinmektedir.

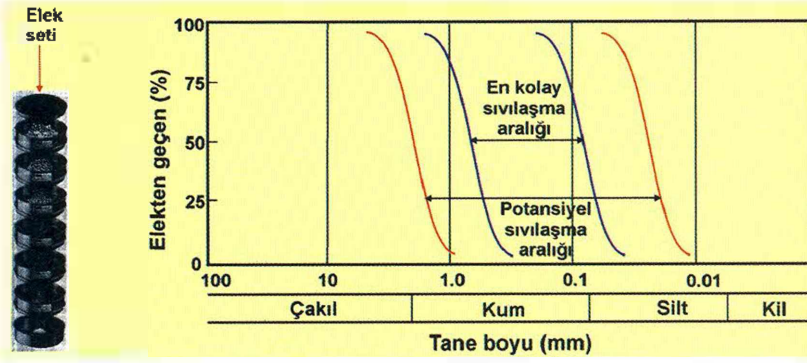
Zeminin Bileşimi ile İlgili Ölçütler

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı
duyarlılığı, zemini oluşturan taneler-
in boyutlarına ve zemin türüne,
ayrıca tanelerin şekline bağlıdır.
Hemen hemen benzer boyutlarda
tanelerden oluşan zeminler (üniform
derecelenmiş zeminler) değişik
boyuttaki tanelerin yaklaşık olarak
aynı miktarda birlikte bulunduğu
zeminlere (iyi derecelenmiş zemin-
ler) göre çok daha yüksek bir sıvı-
laşma riskine sahiptir. Çünkü iyi

derecelenmiş zeminlerde iri tane-
lerin arasını dolduran daha küçük
boyutlu taneler, deprem sırasında
aşırı gözenek suyu basınçlarının
gelişmesini engellemekte, dolay-
ısıyla sıvılaşma riskini azaltmaktadır.
Zeminlerin tane boyu dağılımı açı-
sından sıvılaşma potansiyeline sahip
olup olmadıkları, zemini oluşturan
tanelerin boyları ve dağılımları elek
ve hidrometre analizi gibi laboratu-
var teknikleriyle araştırılarak belir-
lenir.

Yıllardır sıvılaşma olgusunun
kumlarla ilişkili olduğu bilinmek-

teydi. Bununla birlikte, çakıllarda ve
plastik olmayan siltlerde de sıvılaş-
ma davranışına rastlanılmıştır. 0.002
mm'den küçük taneciklerden oluşan
ve tane boyu tanımı açısından kil
olarak adlandırılan zeminler ise,
birkaç yıl öncesine değin sıvılaş-
maya karşı duyarlı olmayan zemin-
ler olarak bilinmekteydi. Ancak,
1995 yılında Japonya'da meydana
gelen 7.2 büyüklüğündeki Kobe
depreminde deniz kıyısındaki kıl-
lerde de yerel olarak sıvılaşmanın
gözlenmesi, sıvılaşan zemin tür-
leriyle ilgili mevcut görüşlere yeni



En kolay sıvılaşan ve potansiyel sıvılaşma eğilimine sahip zeminler için
sıvılaşma alt ve üst sınırlarını gösteren tane boyu dağılımı eğrileri

Sıvılaşmadan Kaynaklanan Zararlar Nasıl Azaltılır ?

Binaların veya köprü, yol vb. gibi yapıların
tasarımında ve inşasında gelecekte mey-
dana gelebilecek olası bir sıvılaşmadan
kaynaklanabilecek zararların en aza
indirilebilmesi için esas alınan yöntemler,

1. Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde yapı
inşasından kaçınılması,
 2. Sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapı
inşası,
 3. Zemin iyileştirilmesi,
- olmak üzere üç gruba ayrılır.

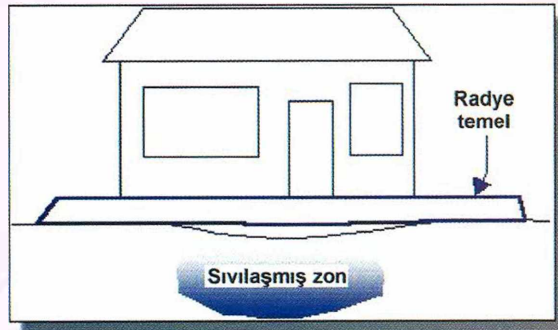
**Sıvılaşmaya Duyarlı Zeminlerde Yapı
İnşasından Kaçınılması:** Sıvılaşmaya
karşı önlem olarak akla gelen ilk ve en
ekonomik yöntem, sıvılaşabilir
zeminlerde inşaat yapılmasından kaçın-
maktır. Bu amaçla, öncelikle sahanın
jeolojik ve hidrojeolojik (yeraltısuyuna
ilişkin) özellikleri belirlenmekte, daha
sonra belirli teknikler ve ölçütler kul-
lanılarak ve zemin mekaniği biliminin
esaslarından yararlanılarak zeminin
sıvılaşmaya yatkın olup olmadığı tayin
edilmektedir. Değerlendirme sonuçlarının

zeminin sıvılaşma potansiyeline sahip
olduğunu göstermesi halinde, planlanan
yapının inşasının bu zeminde yapılmasın-
dan vazgeçilerek, başka inşaat alanı
seçenekleri araştırılır

Bununla birlikte, yapılaş-
ma açısından zorunlu
alan sınırlaması ve her-
hangi bir tesis (örneğin
fabrika, liman vb.) için
uygun koşulların o saha-
da bulunması gibi faktör-
lerden ve diğer nedenler-
den dolayı, sıvılaşma
potansiyeline sahip
yapının bu tür zeminler
üzerinde inşasının zorun-
lu olduğu durumlar da
söz konusu olabilmektedir. Sahanın terk
edilemediği bu tür durumlarda aşağıda
belirtilen yapı teknikleri veya zemin
iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır.

**Sıvılaşmaya Karşı Dayanıklı Yapı
İnşası:** Sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapı
inşasında, yapının temelini oluşturan yapı
elemanları sıvılaşmanın etkilerini
karşılayabilecek şekilde tasarlanırlar.
Temel tasarımına ilişkin hususlar sığ ve
derin temel kavramları için aşağıda ve-
rilmektedir.

(a) Sığ temeller: Yüzeiden itibaren sığ
derinliklerde yer alan yapı temellerinde
tüm temel elemanları, temelin harekete
maruz kalması halinde yapının zemine



Sığ
temelerde
temel-sıvılaşma
etkilesimi
ve
esnek
bağlantılı
borular



bir boyut getirmiştir. Kilit depremin neden olduğu sarsıntıyla yumuşayıp, sıvılaşıp kumlarla birlikte yükselerek yüze çıktıği şeklindeki görüşün, killerde ilk kez rastlanan bu sıvılaşma davranışı için, en muhtemel gerekçe olacağı öne sürülmektedir.

Zemini oluşturan tanelerin şekli de sıvılaşma duyarlılığı üzerinde etkilidir. Yuvarlak tanelerden oluşan zeminler köşeli taneleri içeren zeminlere oranla daha kolay sıkışma (bir araya gelme) eğilimi gösterdikleri için bu tür zeminlerin sıvılaşma potansiyeli daha yüksektir.

Gerilim Koşulları ve Zeminin Yoğunluğuyla İlgili Ölçütler

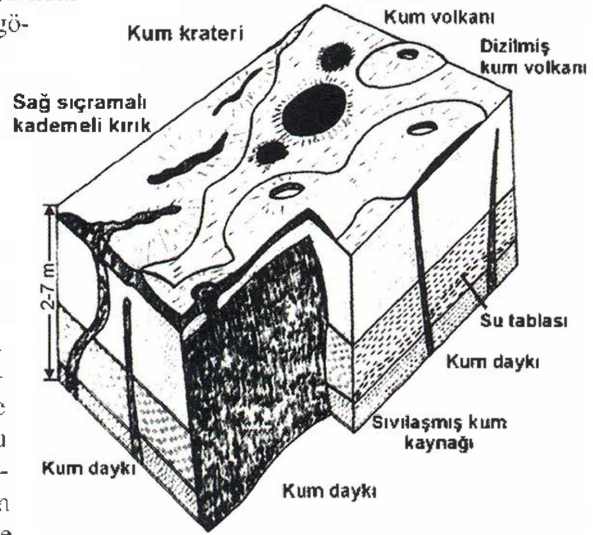
Yukarıda belirtilen ölçütlerin öngördüğü koşullar sağlansa bile, zeminler sıvılaşmaya karşı duyarlı olmayabilir. Çünkü sıvılaşma duyarlılığı, aynı zamanda zeminin deprem sırasında içinde bulunduğu gerilim koşullarına ve yoğunluğuna (sıklığına) da bağlıdır. Uzun süreli gerilim koşullarının etkisinde kalmış bir zeminde taneler arasındaki kenetlenme bozulabileceği gibi, rölatif

yoğunluğu % 47'nin altında olan zeminler daha gevşek bir konumda bulunacakları için sıvılaşmaya daha yatkındırlar.

Sıvılaşma Her Zaman Yüzeyle Gözlenebilir mi?

Sıvılaşma, yüzeyle çoğu kez kum kaynamaları veya kum volkanları şeklinde görülür. Deprem sırasında zeminlerde gelişen yüksek gözenek suyu basıncı, suyun yüze doğru hareketiyle azalma eğilimi gösterir. Bu harekete bağlı olarak, hidrolik eğim kritik bir değere ulaşınca kum taneleri zemindeki çatlak, fisür ve kanallar boyunca su tarafından yüze taşınır ve yüzeyle kum kaynamaları şeklinde

yayılır. Bu sürece "hızlı koşul" adı verilmektedir. Ancak sıvılaşıp kumun yüzeyle kadar ulaşabilmesi; gelişen gözenek suyu basıncının büyüklüğüne, sıvılaşıp zeminin kalınlığına ve yoğunluğuna, ayrıca sıvılaşıp zeminin üzerinde yer alan ve sıvılaşmaya yatkın olmayan zeminin kalınlığı ile geçirgenliğine de bağlıdır. Dolayısıyla, derinde veya



Sıvılaşma sonucu yüzeyle ve yeraltında gelişen oluşumlar

aynı miktarda oturmasını (üniform oturma) sağlayacak şekilde bağlantılandırılmaktadır. Böylece temelin üzerindeki yapısal elemanlarda gelişecek makaslama kuvvetlerinin (birbirine ters yönde etkiyen kuvvet çiftleri) miktarı azaltılmaktadır. Bu amaçla, radye temel tipi seçimi iyi bir sığ temel örneği olarak bilinir. Temelin altında yerel olarak bulunan bir sıvılaşma zonundan kaynaklanacak yükler, bu tür bir temel tarafından sıvılaşıp zonun çevresindeki daha sağlam zemine aktarılarak, yapının görebileceği hasarlar en aza indirilmekte veya önlenmektedir.

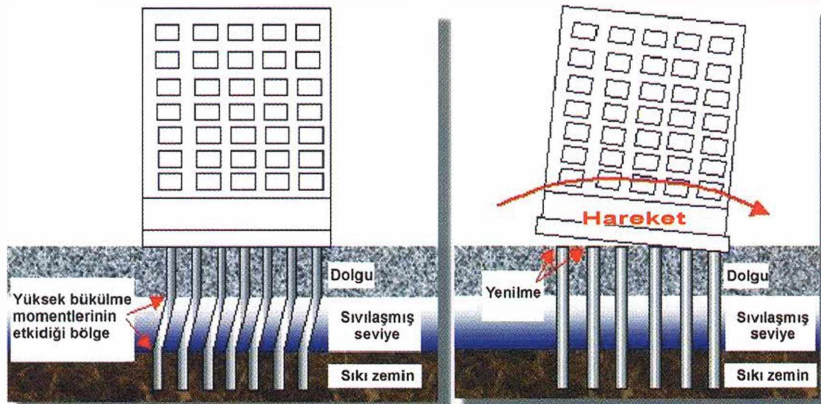
Sığ derinliklere yerleştirilen ve zeminin içinde gömülü durumda bulunan atıksu şebekesi ve su borusu gibi alt yapı elemanlarının sıvılaşmadan kaynaklanabilecek hareketlerden ve oturmalarından etkilenmemesi için bunların bağlantılarının mümkün olduğunca sünümlü (esnek) olmasına özen gösterilir.

(b)Derin Temeller: Yapı temellerinin içine yerleştirileceği zeminin taşıma kapasitesinin çok düşük ve sağlam zemin seviyesinin derin olduğu koşullarda yapının sığ temeller üzerine inşa edilmesi tercih edilmez. Bu tür koşullarda, sağlam zemine veya temel kayaya kadar inen kazık temeller oluşturularak, yapılar bu temellerin üzerine inşa edilmektedir.

Zemin sıvılaşması, kazık temellerin üzerinde büyük yanıl yüklerin etkimesine neden olur. Bu nedenle, zayıf ve sıvılaşmaya yatkın zeminler içinde yapılan kazık temeller sadece yapının aktardığı yükleri taşımakla kalmayacak, aynı zamanda zayıf zeminin sıvılaşması halinde yatay yönde etkiyen yüklerle ve bükülme momentlerine de karşı koyacak şekilde tasarlanır. Sıvılaşmanın etkilerine karşı yeterli derecede direnç gösterebilmesi için kazıklar daha büyük boyutlarda ve takviyeli olarak yapılır. Kazık temel uygulamasında dikkat edilen diğer önemli bir

husus da, kazıkların yapının tabanındaki bağlantılarının esnek bir şekilde yapılmasıdır. Böylelikle yapının herhangi bir rotasyona uğraması engellenmiş olur. Eğer kazıkların bağlantı noktaları yenilirse (hasar görürse) yapı döndürücü momentlere karşı koyamayarak hasara uğrayabilir.

Zemin iyileştirmesi: Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini arttırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirmesi (islahi) tekniklerinin esas hedefi, deprem sırasında aşırı gözenek suyu basınçlarının



Sıvılaşma nedeniyle kazık temellere etkiyen bükülme momentleri ve yapının rotasyona uğraması

ince kum seviyelerinde meydana gelen sıvılaşmalar, üzerlerindeki sıvılaşmayan kalın zeminlerin varolması halinde yüzeye kadar ulaşamayabilirler. Bu tür zemin koşullarında sıvılaşmanın göstergesi olabilecek kum kaynakmaları veya volkanları görülememekle birlikte, bu durum her zaman sıvılaşmanın

oluşmadığı anlamına da gelmemektedir. Çünkü depremler sonrasında zeminlerde açılan inceleme çukurlarında sıvılaşmış kumun bir baca (dayk) boyunca dizildiği, ancak yüzeyin altında herhangi bir derinliğe kadar yükselebildiği görülmüştür. Nitekim, 1999 Kocaeli Depremi'nden sonra özellikle Ada-

pazarı'nda sıvılaşmanın yüzeyde gözlenemediği bazı yerlerde yana yatmış yapıların bulunması, yazar tarafından sıvılaşma meydana gelmekle birlikte, sıvılaşan kumun yüzeye kadar ulaşmadığının göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Sıvılaşmanın Etkileri (Zemin Duraysızlıkları)

Sıvılaşma, zeminlerde neden olduğu duraysızlıklar nedeniyle binaları, köprüleri, yeraltına döşenmiş boruları ve diğer yapıları farklı şekillerde etkilemektedir. Sıvılaşmanın etkileri benzer olduğu için bunların ayırt edilmesi güç olabilmekle birlikte, oluşum mekanizmaları farklıdır.

Bu etkiler,

- Zeminin taşıma gücünü yitirmesi,
- Zemin oturmaları,
- Zemin salınımı,
- Yanal yayılma,
- Akma türü kayma



Adapazarı'nda yüzeyde sıvılaşmanın gözlenemediği, ancak sıvılaşma nedeniyle yana yatmış yapıların bulunduğu bir semt (Fotoğraf: Ömer Aydan)

gelişmesini önlemektir. Hedefe ulaşılması için doğal durumuna oranla zeminin sıklığı artırılır veya drenaj kapasitesi (suyu uzaklaştırma kapasitesi) geliştirilir. Bu amaçla çeşitli teknikler uygulanmakla birlikte, bu teknikler özellikle geniş alanlarda yapılacak iyileştirme çalışmaları için oldukça pahalı tekniklerdir ve ayrıca siltli zeminlerde her zaman iyi sonuç vermeyebilirler.

✓ Dinamik kompaksiyon (Sıkıştırma)

Bu yöntem, şahmerdan adı verilen metalden yapılmış bir ağırlığın 10 ile 30 m arasında değişen yüksekliklerden ardarda düşürülerek, zeminin darbe etkisiyle sıkıştırılması esasına dayanır. Bu amaçla, iyileştirilecek zeminin yüzeyi kare şeklinde alanlara bölünür ve her karenin içinde kalan alandaki zemine darbe uygulanır. Yöntem, kum zeminlerin sıvılaş-

maya karşı direncinin artırılmasında ekonomik bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Dinamik yüklemekten dolayı zemindeki aşırı gözenek suyu basıncı kaybolduğunda, zeminde ek bir sıkışma meydana gelir. Bununla birlikte, zeminin içerdiği ince tane miktarı fazla ise sıkışma zorlaşır.

✓ Vibroflotasyon:

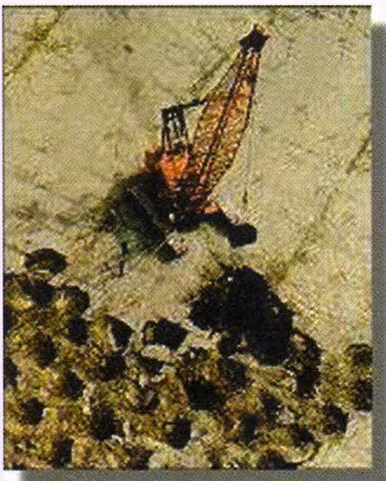
Bu yöntemde, zeminin içine indirilen bir başlığın titreştirilmesiyle zeminin tane yapısı bozulmakta ve taneler bir araya gelerek zeminin sıkışması sağlanmaktadır. Uygulamada 30 m kadar bir derinliğe inilebilmekte ve kompaksiyon yönteminde olduğu gibi, belirli aralıklarla sıkıştırma işlemi yapılmaktadır.

✓ Taş kolonları

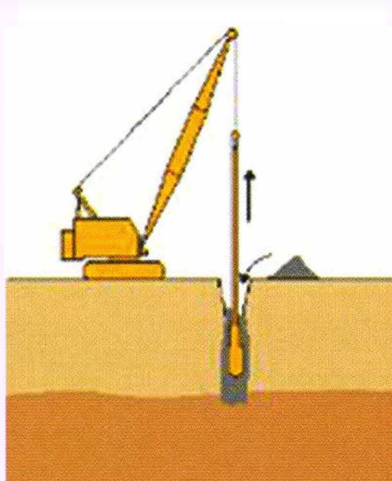
Zeminde açılan geniş çaplı deliklerin çakıl ile doldurulması, bu yöntemin esasını oluşturur. Taş kolonları, vibroflotasyon tekniğiyle zemine yerleştirilebileceği gibi, metal muhafaza borularının içinden zemine dökülen çakılların üzerine şahmerdan düşürülerek de oluşturulabilir. Sıkıştırma işlemi yapıldıkça muhafaza borusu aşamalı olarak yüzeye çekilir.

✓ Sıkıştırma enjeksiyonu

Bu yöntemde; su, kum ve çimentonun



Dinamik kompaksiyon uygulaması

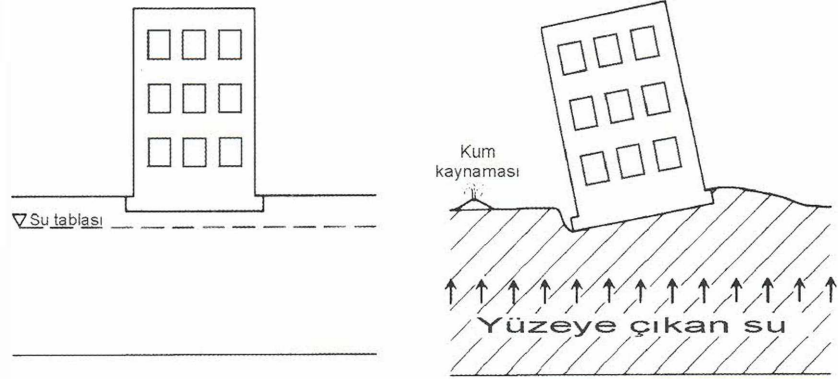


Vibroflotasyon tekniği

başlıkları altında toplanmaktadır. Her ne kadar kum kaynamaları da bazı araştırmacılar tarafından sıvılaşmanın etkileri arasına dahil edilmekteyse de, mühendislik açısından önemi fazla değildir. Sıvılaşmanın zeminde yaklaşık 0.1 m civarında bir deformasyon meydana getirerek yapısal hasarlara neden olması, zemin yenilmesi olarak adlandırılmaktadır.

Zeminin Taşıma Gücünü Yitirmesi

Yapıları taşıyan zemin, sıvılaşığı zaman taşıma gücünü yitirerek deformasyona maruz kalır. Sıvılaşan kum yüzeye doğru yükselirken zemini zayıflatır, dolayısıyla dayanımını yitiren zemin yapının aktardığı yükleri taşıyamaz duruma gelir. Bu gelişmeye koştur olarak, zeminin üzerindeki yapılar da öne veya geriye doğru yatar, ya da domino taşları gibi devrilir. Sıvılaşma sonucu bu duruma maruz kalmış binalar tabanlarından kazıklarla desteklenerek eski konumlarına getirilebilmektedir.

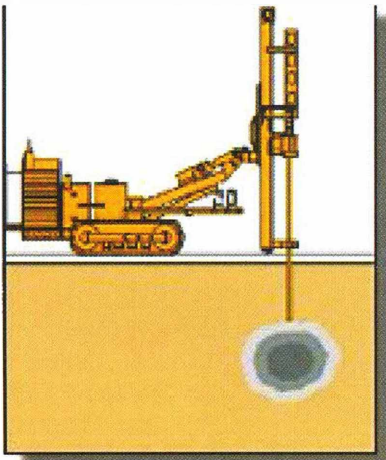


Sıvılaşma sonucu zeminin dayanımını yitirmesi ve yapının yana yatması



Adapazarı'nda sıvılaşma nedeniyle devrilmiş bir bina

karıştırılmasıyla elde edilen ve akıcılığı düşük (viskoz) bir karışım belirli bir basınç altında zemine enjekte edilir. Karışım, nüfuz ettiği zeminin tanelerini öteleyerek sıkıştırır ve duraylı bir zon oluşturur. Yöntemin en önemli avantajlarından biri de mevcut yapıların temellerine de uygulanabilmesidir. Bu amaçla enjeksiyon işlemi yapının yan tarafından yapılacağı gibi, eğimli delikler aracılığıyla doğrudan yapının tabanındaki zemine de uygulanabilir.



Sıkıştırma enjeksiyonu

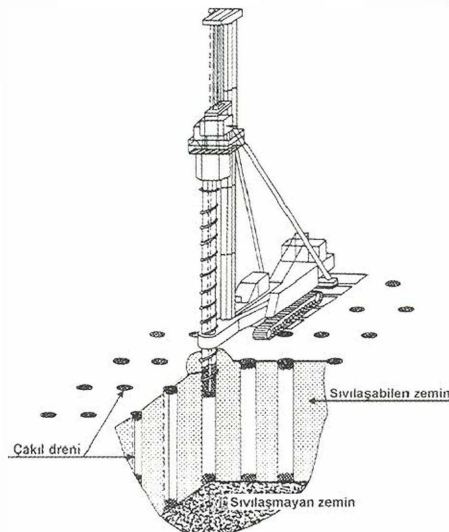
✓ Sıvılaşabilecek zeminin sıvılaşmaya cak bir zeminle yer değiştirmesi

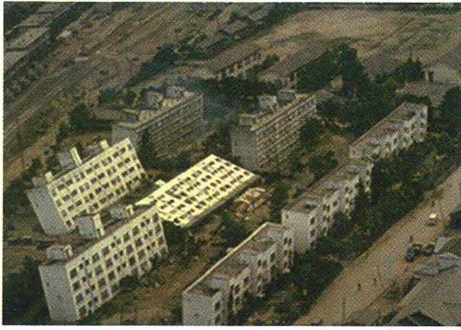
Yöntem, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminin kazılarak kaldırılması ve yerine sıvılaşma eğilimi olmayan bir zeminin konması esasına dayanır. Bu amaçla genellikle çimentoyle karıştırılmış çakıl ve kum kullanılmaktadır. Ancak yerdeğiştirme işlemi yapılırken, kazı şevinin yıkılmadan (kaymadan) duraylı kalması önem taşır. Sıvılaşabilecek zeminin kalınlığı fazla ise, yöntem ekonomik olmaz.

✓ Drenaj teknikleri

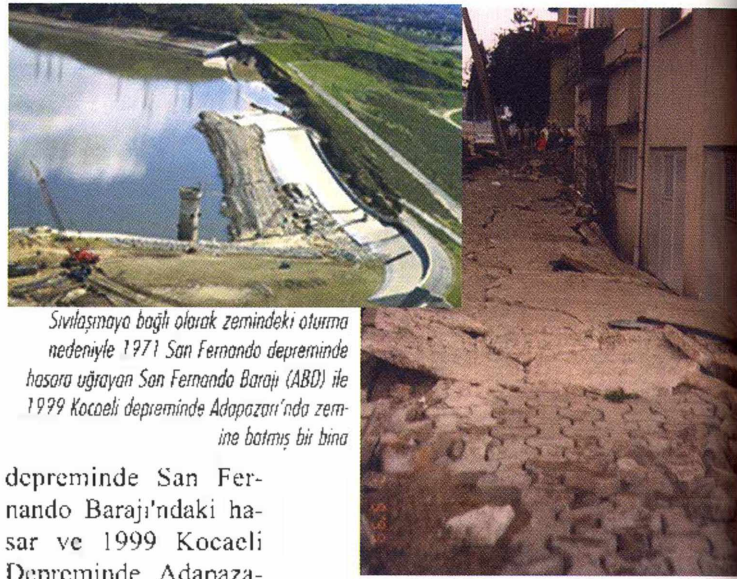
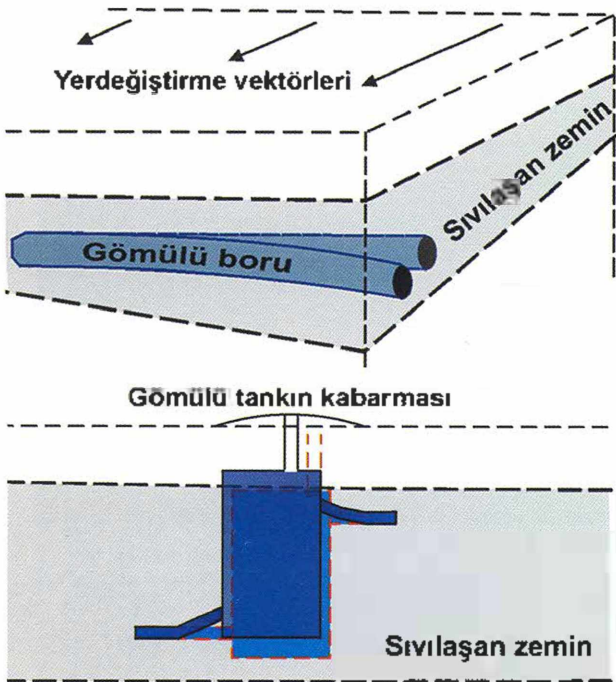
Sıvılaşmadan kaynaklanabilecek zararlar, zeminin drenaj kapasitesinin (suyun zeminden atılması) artırılması suretiyle de azaltılabilmektedir. Eğer zeminin gözeneklerindeki su ortamdan uzaklaştırılabilirse, deprem sırasında gelişebilecek aşırı gözenek suyu basınçları da önemli ölçüde azaltılmış olacaktır. Çakıl ve kum drenleri veya zemine yerleştirilen sentetik malzemeler (jeomembranlar) başlıca drenaj teknikleri olarak kullanılmaktadır. Çakıl ve kum türü malzemeler, zeminde belirli aralıklarla düşey yönde açılmış deliklerden döküle-

rek çakıl veya kum drenleri oluşturulur. Buna karşın, sentetik malzemeden yapılan jeomembranlar ise, zemine istenen bir açıyla yerleştirilebilmektedir. Sıvılaşmaya karşı daha etkili bir zemin iyileştirmesinin yapılabilmesi amacıyla drenaj teknikleri çoğu kez yukarıda belirtilen diğer zemin iyileştirme teknikleriyle birlikte kullanılmaktadır.





1964 Niigata depreminde (Japonya) sıvılaşma sonucu yana yatmış binalar ve yıkılan Showa Köprüsünden bir görünüm



Sıvılaşmaya bağlı olarak zemindeki oturma nedeniyle 1971 San Fernando depreminde hasara uğrayan San Fernando Barajı (ABD) ile 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda zemine batmış bir bina

depreminde San Fernando Barajı'ndaki hasar ve 1999 Kocaeli Depreminde Adapazarı'nda giriş katları zemine batan binalar, zemin oturmasının tipik örnekleridir.

Zemin Sıvılaşması:

Bu davranış biçimi, sıvılaşmanın yamaç eğiminin son derece az ve dolayısıyla yanal yönde bir yerdeğiştirmenin mümkün olduğu alanlarda gelişmesi halinde gözlenebilir. Sıvılaşma, yüze yakın derinlikteki zeminin bloklara ayrılmasına ve bu blokların ileriye ve geriye sürüklenmesine yol

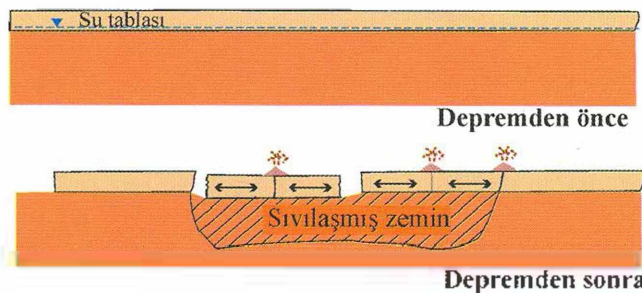
açar. Bu sürüklenme, deprem dalgaları gibi titreşimler yaratır. Titreşimle birlikte fisür veya çatlaklarda açılıp kapanmalar ve zeminde oturmalar meydana gelerek yapılar, boru hatları ve zemine gömülü diğer alt yapı tesisleri ciddi hasarlara maruz kalabilirler.

Yanal Yayılma: Sıvılaşma, genç veya suya doymun çökellerde (toprak zeminlerde) meydana gelmektedir. Bu tür çökeller, yüzey topografyasının son derece düşük eğime sahip olduğu nehir, göl ve deniz kıyılarında yaygın olarak bulunurlar. Kıyılarda sıvılaşmanın meydana gelmesi halinde çok büyük zemin kütleleri, üzerlerinde bulunan yapıları da beraberinde

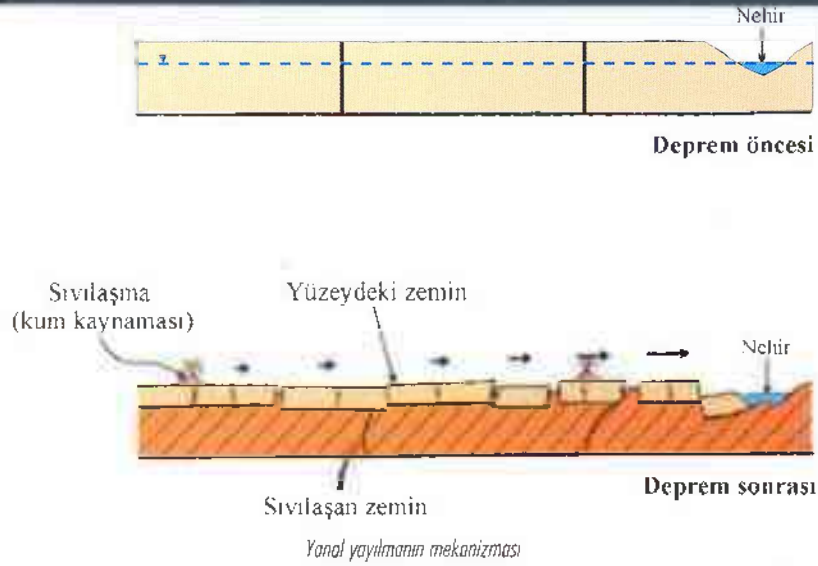
Boru, tank vb. gibi zemine gömülü alt yapı elemanlarının sıvılaşma sonucu yüzeye doğru hareket ederek kabarmaları

Sıvılaşma nedeniyle zeminin taşıma gücünü yitirmesiyle binalarda gözlenen davranışın aksine, sıvılaştan zeminin içinde gömülü tanklar ve borular ise, yüzeye doğru yükselme (kabarma) eğilimi gösterirler ve kırılmaya, ya da bükülmeye maruz kalırlar.

Zemin Oturması: Sıvılaşma sırasında tanelerin gösterdikleri bir araya gelme eğilimi ve zeminin taşıma gücünü yitirmesi yüzeyde oturma şeklinde bir deformasyona (yer değiştirmeye) neden olabilir. Bu koşullarda zeminde gelişen oturma yerdeğiştirmesi zeminin üzerindeki yapıya da yansyarak, yapının zeminin içine doğru batmasına neden olur. 1971 San Fernando (ABD)



Zeminin sıvılaşmasının mekanizması



Yanal yayılma hareketine tipik örnekler: (a) Ceyhan Nehri kıyısında (1998) Adana-Ceyhan Depremi ve (b) Sakarya Nehri kıyısında (1999 Kocaeli Depremi) yanal yayılmaya ilişkin çukurluk hareketleri (c) Gölçük-Kavaklı'da denize sürüklenmiş kıyı ve sıvılaştırılmış kum

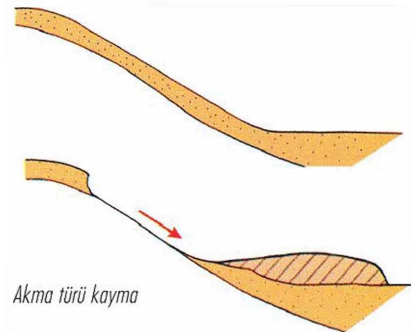
sürükleyerek, nehir, göl veya denize doğru hareket ederler. Sıvılaşmanın bu türdeki etkilerinden biri de yanal yayılma olarak adlandırılmaktadır.

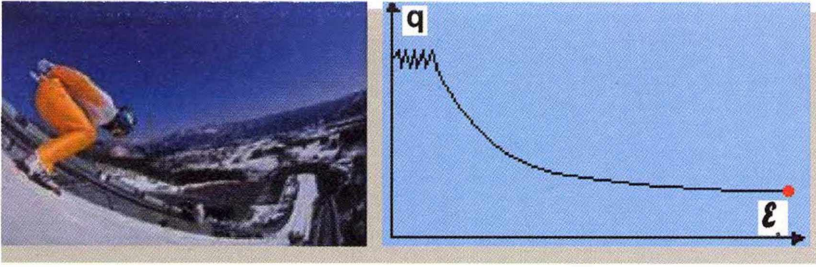
Yanal yayılma, sıvılaştırılmış zemin seviyesinin üzerinde bulunan zeminin geniş bloklara ayrılması ve blokların yanal yönde hareket etmesidir. Bu hareket, depremden kaynaklanan yerçekimi kuvvetleri ve içsel kuvvetlerin birlikte etkimesiyle meydana gelmektedir. Yanal yayılma, genellikle eğimi son derece küçük (0.3 - 3 derece) olan yamaçlar boyunca ve nehir yatağı, göl veya deniz kıyısı gibi harekete engel olmayacak serbest yüzeylere doğru gelişir. Yatay yöndeki hareket, birkaç metreden onlarca metreye kadar ulaşabilir. Hareket sırasında zemin ötelenir (yer değiştirir), bloklara ayrılır ve buna bağlı olarak zeminde fisürler, kırıklar, küçük çöküntüler ve yükselmeler meydana gelir.

Yanal yayılmaya maruz kalan zeminlerin içinde bulunan yapı temelleri, atıksu şebekeleri ve boru hatları ile diğer alt yapı tesisleri hasar görürler veya eklem yerlerinden koparlar. Ayrıca, kaymanın topuk bölgesindeki (kıyıdaki) yapılar sıkışır ve bükülürler. Dolayısıyla, yanal yayılmanın neden olduğu hasarlar, zeminin üzerindeki yapıların yoğunluğuna da bağlı olarak, bir felaket düzeyine ulaşabilmektedir. Örneğin, 1964 Alaska Depremi'nde taşkın ovası çökeltileri üzerinde inşa edilmiş 250 köprü

yanal yayılma nedeniyle tahrip olmuş veya yıkılmıştır. Japonya'da 1964 ve 1995 yıllarında meydana gelen Niigata ve Kobe depremlerinde de köprüler benzeri şekilde ve iskambil kağıdı gibi yıkılmışlardır. Ülkemizde de 1998 Adana-Ceyhan Depremi'nde Ceyhan Nehri kıyısında yanal yayılmaya bağlı deformasyonlar gelişmiştir. Ayrıca, Sakarya Nehri'nin yatağına doğru gelişen hareketle Adapazarı il merkezindeki yollarda ve nehir kıyısında fisür ve yarıkların meydana gelmesi, Sapanca Gölü'nün ve İzmit Körfezi'nin güney kıyısında, kısmen normal faylanmanın da etkisiyle yapıların denize sürüklenmiş olması, 1999 Kocaeli Depremi'nde sıvılaşmaya bağlı olarak gelişmiş yanal yayılma hareketlerinin tipik örnekleridir.

Akma Türü Kayma (Akma Sıvılaşması): Bu tür zemin hareketleri, sıvılaşmanın neden olduğu en etkili duraysızlıklardır. Akma sırasında çok geniş zemin kütleleri, çok kısa bir sürede ve saatte onlarca kilometreye ulaşan bir hızla, eğimli yüzeyler boyunca onlarca kilometre hareket ederler. Akma, tamamen sıvılaşmış bir zeminde gelişebileceği gibi, sıvılaştırılmış zeminin üzerinde yer alan daha sert bir malzemeye ait blokların hareket etmesiyle de meydana gelebilir. Bu tür hareketler, eğimi 3 dereceden daha büyük olan yamaçlar boyunca, gevşek ve suya doymuş kumlar veya siltlerde gelişmektedir. Ayrıca, maden işletmelerindeki atık barajlarında toplanan, suya doymuş ve çok ince cevher atıklarının da depremler sırasında akma davranışı gösterdikleri bilinmektedir.





Akma sıvılaşması, düşük dayanımlı bir zeminde statik dengenin dinamik yükler tarafından ortadan kaldırılması olgusudur. Dinamik yükler, depremler, patlatma ve kazık temellerin inşası sırasında gelişebilmektedir. Dinamik yüklerin zemine uygulanmasıyla akma sıvılaşmasına karşı duyarlı olan zeminin dayanımı, sarsıntı öncesinde zemine etkileyen statik gerilmeye uzun süre karşı koyamaz ve akma gerçekleşir. Bu davranış biçimini, yukarıdaki şekilde verilen ve eğimli bir rampa üzerinde hareket eden kayakçının davranış biçimine benzetmek müm-

kündür. Kayakçının hareketini başlatmak amacıyla kendisini öne doğru itmek üzere yaptığı nisbeten küçük bir hareketten sonra, gravitenden kaynaklanan statik hareket kuvveti, kayak ile kar arasındaki sürtünme direncinin aşılmasını sağlar. Bu davranış, kayakçıyı rampa aşağı hareket ettirir. Aşağıdaki grafikte gösterilen ve kayakçının izlediği yolu ifade eden eğri, kayakçının hareket öncesindeki göre duraysız bir konuma geçtiğini gösterir. Bu örnek, akma sıvılaşmasını tetikleyen dinamik hareketin benzeridir. Hem kayakçı örneğinde, hem de akma

sıvılaşmasında çok hızlı bir harekete neden olan bir duraysızlık, nisbeten küçük bir hareket (örselenme) sonrası gelişebilmektedir.

Günümüze değin geniş çapta ve büyük hasarlara neden olan akma hareketlerinin önemli bir bölümü kıyılarda gelişmiştir. Su altında gelişmesi durumunda, akma hareketleri kıyılardaki yapıların, limanların ve diğer tesislerin hareket eden zeminle birlikte derinlere sürüklenmesine yol açmaktadır. Bu tür olayların tipik örnekleri ülkemizde 1999 Kocaeli Depremi sırasında meydana gelmiş ve İzmit Körfezi'nin güney kıyısındaki Değirmendere'de akma hareketiyle kıyı şeridi ve buradaki yapılar denize sürüklenmiştir. Çünkü, Değirmendere'de kıyı topografyasının eğimi daha dik olup, sıvılaşmayla birlikte akma hareketi için gerekli ortam koşulları sağlanmıştır. Akma türü kaymanın en tahrip edici düzeyde yaşandığı deprem, Çin'de meydana gelen 1920 Kansu Depremi'dir. Bu depremde malzeme 1.6 km boyunca akmış ve yaklaşık 200.000 kişinin yaşamını yitirmesine neden olmuştur.

Kaynaklar

- Committee on Earthquake Engineering, 1985. Liquefaction of Soils During Earthquakes. National Academy Press, Washington, D.C., 240 pp.
- Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, New Jersey, 526 pp.
- Obermeier, S.F., 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. Engineering Geology, 44, 1-76.
- Port and Harbour Research Institute, Ministry of Japan, 1997. Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land. A.A. Balkema, Rotterdam, 312 pp.
- Shibata, T., Oka, F. and Ozawa, Y., 1996. Characteristics of ground deformation due to liquefaction. Soils and Foundations, Special Issue, January 1996, 65-79.



(a)



(b)

Akma türü kaymayla ilgili tipik örnekler: (a) 1964 Alaska Depremi'nde meydana gelen Turnagain Heights heyelanı; (b) 1999 Kocaeli Depremi sırasında Değirmendere'de kıyının denize sürüklenmesi.

Reşat Utusay

Doç. Dr., H.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü