



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.

İnsanoğlu geçmişten günümüze değin savaş, salgın, hastalık, yangın vb. olayların yanısıra, deprem, heyelan, taşkın, çığ, volkan patlaması, kasırğa 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 yüzeye 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 tanelerinin 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

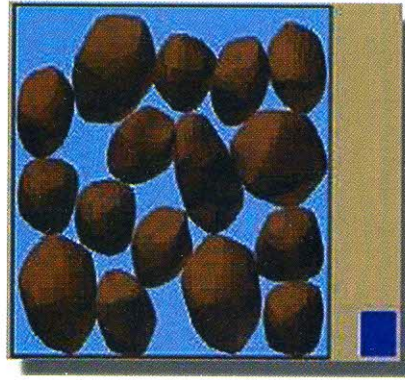
meydana gelen ve zemin sıvılaşması ile buna bağlı diğer zemin hareketlerinin ve etkilerinin yaygın şekilde gözlemlendiği 1998 Adana-Ceyhan ve 1999 Kocaeli depremlerinden sonra, bu tür zemin davranışları da geniş halk kitlelerinin dikkatini çekmeye başlamıştır. Sıvılaşma, bu depremlerden sonra halk arasında "Kum Kaynaması" ve "Kum Fıskırması", sıvılaşmaya bağlı olarak kıyı bölgelerinde gelişen yanal 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 durumsuzlukların gelişimi ile bunların yapılar ve doğal çevre üzerindeki etkileri ülkemizden ve diğer ülkelerden seçilmiş tipik örnekler verilerek anlatılmıştır.

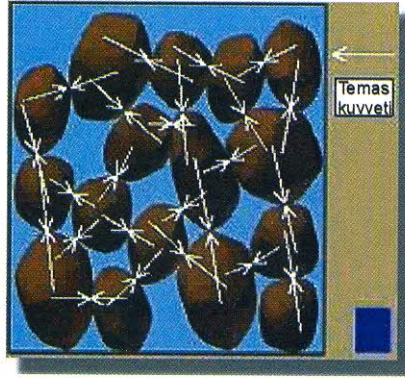
Sıvılaşma Nasıl Meydana Gelir ?

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

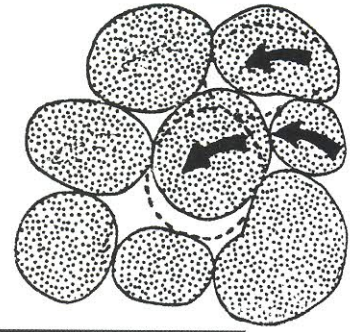
Sıvılaşma davranışının meydana geldiği ortamlar, "ayrık katı bileşenleri arasında doğal çimento görevi üstlenecek bir bağlayıcı bulunmayan veya çok gevşek olarak bulunan bir bağlayıcının su etkisiyle ortamdan kolayca uzaklaştırılarak, tanelerin serbest hale geçebildiği ayrık kayalar ve mineraller topluluğu"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



Zemini oluşturan tanelerin deprem öncesi görünümü (gözenek suyu basıncının seviyesini sağdaki mavi renkli kolon göstermektedir)



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

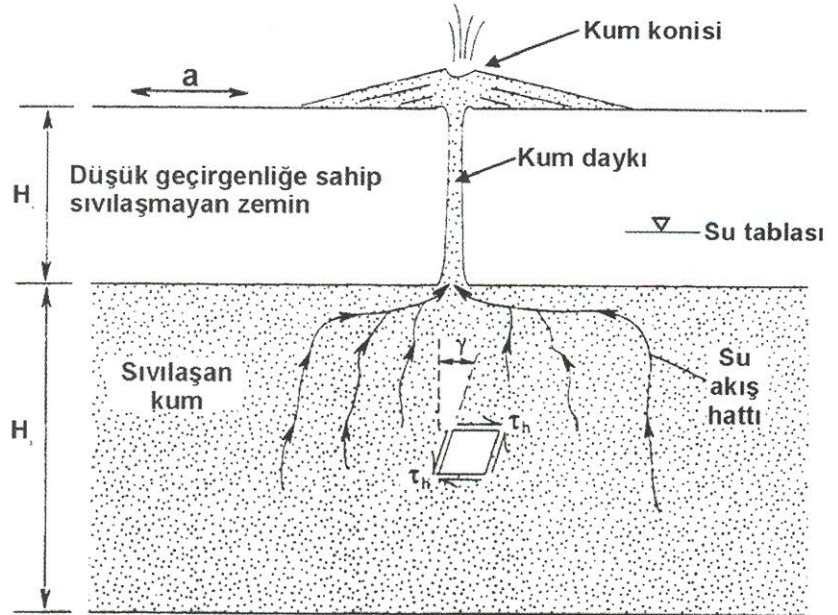


Makaslama yerdeğiştirmesi

Depremin neden olduğu makaslama yerdeğiştirmesiyle zemini oluşturan tanelerde sıvılaşma süreci



Gözenek suyu basıncının ani artışıyla tanelerin temaslarını yitirmesi



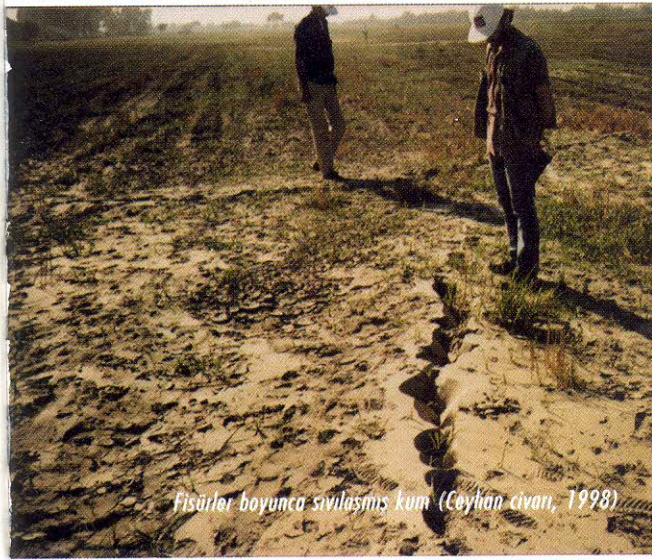
Sıvılaşma ve kum daykının oluşumunu gösteren kesit (a : yatay ivme; τ_h : yatay ivmeden kaynaklanan makaslama gerilimi; γ : makaslama yer değiştirmesi)

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
Yalacdere Deltası, Yalova, 1999)*



Fisürler boyunca sıvılaşmış kum (Coyhan civarı, 1993)

gerekir. Bir zeminde çok sayıda tane bir arada bulunmaktadır ve bunlara yakından bakıldığında, her tanenin çevresindeki diğer tanelerle temas halinde olduğu görölr. 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 tanınamakta, dolayısıyla ortamdandan uzaklaşamayan gözenek 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 biçimi "sıvılaşma" olarak tanımlanır.

Sıvılaşma yüzeyde; kum fişkırması, tek başına veya ardarda dizilmiş kum volkanları ve fisürler (yarıklar) boyunca kum birikmeleri şeklinde görölr. 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 Yalacdere deltasında gelişmiş kum konilerinin çapları 50 cm'ye kadar ulaşmıştır. Ayrıca yüzey kırıkları boyunca da kum fişkirmaları 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 çökelilerin, 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. Pleyistosen yaşlı (0.1-1.8 milyon yıl arası) çökelilerin son yüzyılda meydana gelen depremlerde sıvılaştığı ender olarak görölmüştür. Ülkemizdeki depremler sırasında gözlenen sıvılaşmaların Holosen yaşlı çok genç alüvyial çökelilerin bulunduğu alanlarda gözlenmesi de bu olguyu destekle-

mektedir. Ayrıca, yol ve baraj çalışmalarında 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 birlikte, yeraltı-suyu tablasının 20 m'den daha derin olduğu yerlerde de sınırlı miktarda sıvılaşmanın meydana geldiği bilinmektedir.

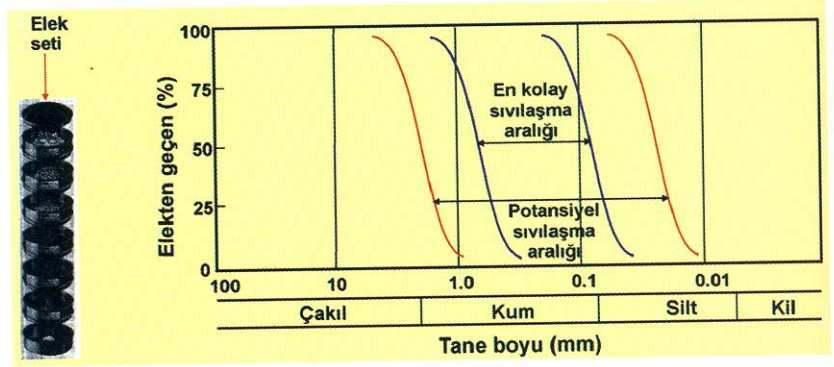
Zeminin Bileşimi ile İlgili Ölçütler

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı, zemini oluşturan tanelerin 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 zeminler) göre çok daha yüksek bir sıvılaşma riskine sahiptir. Çünkü iyi

derecelenmiş zeminlerde iri tanelerin arasını dolduran daha küçük boyutlu taneler, deprem sırasında aşırı gözenek suyu basınçlarının gelişmesini engellemekte, dolayısıyla sıvılaşma riskini azaltmaktadır. Zeminlerin tane boyu dağılımı açısından sıvılaşma potansiyeline sahip olup olmadıkları, zemini oluşturan tanelerin boyları ve dağılımları elek ve hidrometre analizi gibi laboratuvar teknikleriyle araştırılarak belirlenir.

Yıllardır sıvılaşma olgusunun kumlarla ilişkili olduğu bilinmek-

teydi. Bununla birlikte, çakıllarda ve plastik olmayan siltlerde de sıvılaşma davranışına rastlanılmıştır. 0.002 mm'den küçük taneciklerden oluşan ve tane boyu tanımı açısından kil olarak adlandırılan zeminler ise, birkaç yıl öncesine değin sıvılaşmaya karşı duyarlı olmayan zeminler olarak bilinmekteydi. Ancak, 1995 yılında Japonya'da meydana gelen 7.2 büyüklüğündeki Kobe depreminde deniz kıyısındaki killerde de yerel olarak sıvılaşmanın gözlenmesi, sıvılaşan zemin türleriyle 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 meydana 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 iyileştirmesi,

olmak üzere üç gruba ayrılır.

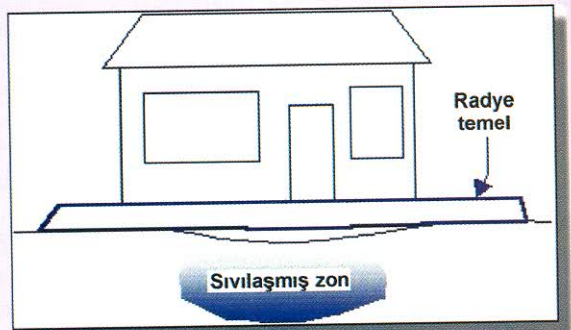
Sıvılaşmaya Duyarlı Zeminlerde Yapı İnşasından Kaçınılması: Sıvılaşmaya karşı önlem olarak akla gelen ilk ve en ekonomik yöntem, sıvılaşabilir zeminlerde inşaat yapılmasından kaçınmaktır. Bu amaçla, öncelikle sahanın jeolojik ve hidrojeolojik (yeraltı-suyuna ilişkin) özellikleri belirlenmekte, daha sonra belirli teknikler ve ölçütler kullanılarak 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 yapılmasından vazgeçilerek, başka inşaat alanı seçenekleri araştırılır.

Bununla birlikte, yapılaşma açısından zorunlu alan sınırlaması ve herhangi bir tesis (örneğin fabrika, liman vb.) için uygun koşulların o sahada bulunması gibi faktörlerden dolayı, sıvılaşma potansiyeline sahip olmasına rağmen, yapının bu tür zeminler üzerinde inşasının zorunlu 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 verilmiştir.

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



Sığ temellerde temel-sıvılaşma etkileşimi ve esnek bağlantılı borular



bir boyut getirmiştir. Kilin depremin neden olduğu sarsıntıyla yumuşayıp, sıvılaştıran kumlarla birlikte yükselerek yüzeye çıktığı 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

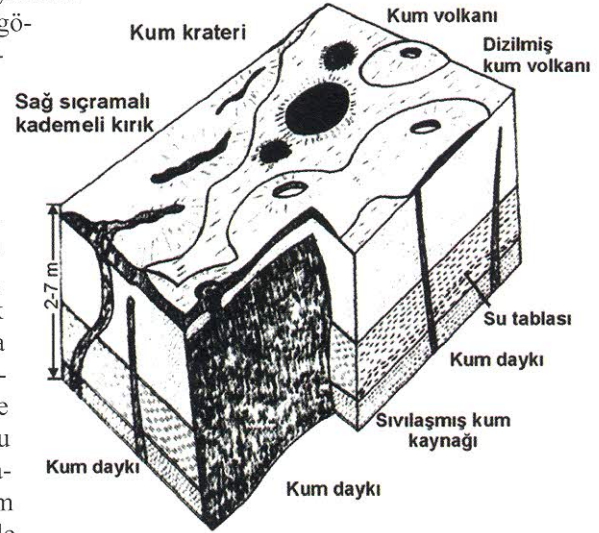
Yukarıda belirtilen ölçütlerin öngördüğü koşullar sağlansa bile, zeminler sıvılaşmaya karşı duyarlı olmayabilir. Çünkü sıvılaşma duyarlılığı, aynı zamanda zeminin deprem sırasında içinde bulunduğu gerilim koşullarına ve yoğunluğuna (sıklığına) da bağlıdır. Uzun süreli gerilim koşullarının etkisinde kalmış 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 Yüzeyde Gözlenebilir mi?

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

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



Sıvılaşma sonucu yüzeyde 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 sıvılaştıran zonun çevresindeki daha sağlam zemine aktarılarak, yapının görebileceği hasarlar en aza indirilmekte veya önlenmektedir.

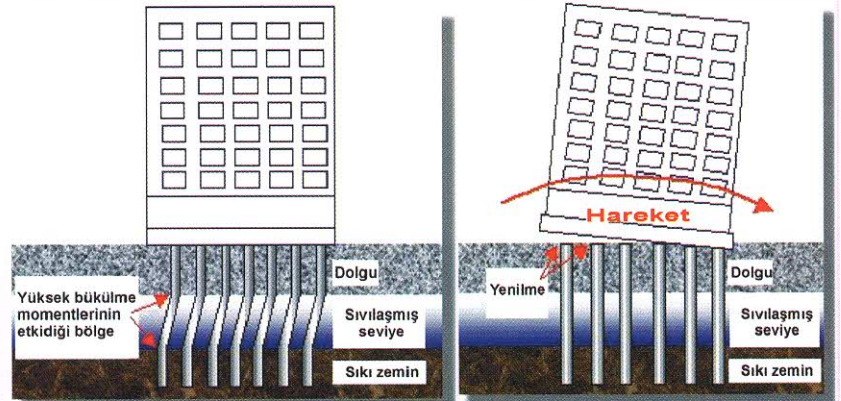
Sığ derinliklere yerleştirilen ve zeminin içinde gömülü durumda bulunan atıksu şebekesi ve su borusu gibi yapı elemanlarının sıvılaşmadan kaynaklanabilecek hareketlerden ve oturmalarından etkilenmemesi için bunların bağlantılarının mümkün olduğunca sönümlü (esnek) olmasına özen gösterilir.

(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 yanal 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 yüklere 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 iyileştirilmesi: Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini arttırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirilmesi (ıslahı) 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 kaynamaları veya volkanları görülemezle 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-

parazari'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 oturması,
- Zemin salınımı,
- Yanal yayılma,
- Akma türü kayma

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

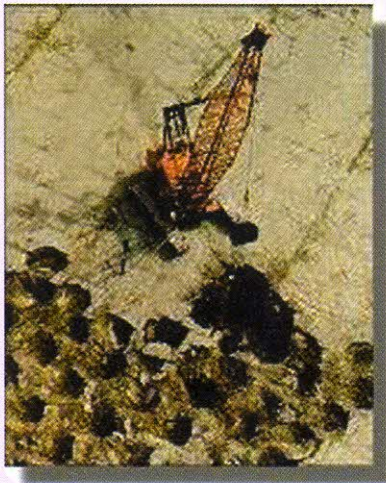


Adapazarı'nda yüzeyde sıvılaşmanın gözlenemediği, ancak sıvılaşma nedeniyle yana yatmış yapıların bulunduğu bir semt (Fotoğraf: Ömer Aydan)

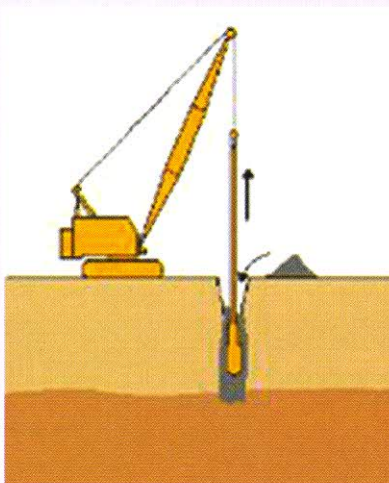
gelişmesini önlemektir. Hedefe ulaşılması için doğal durumuna oranla zeminin sıklığı artırılır veya drenaj kapasitesi (suyu uzaklaştırma kapasitesi) geliştirilir. Bu amaçla çeşitli teknikler uygulanmakla birlikte, bu teknikler özellikle geniş alanlarda yapılacak iyileştirme çalışmaları için oldukça pahalı 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-



Dinamik kompaksiyon uygulaması

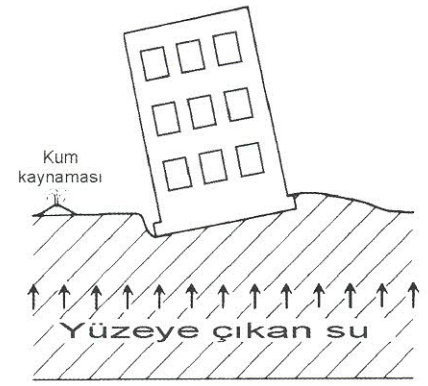
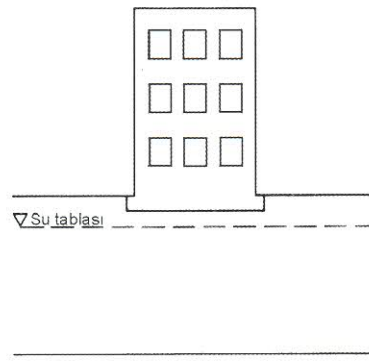


Vibroflotasyon tekniği

başlıkları altında toplanmaktadır. Her ne kadar kum kaynakları 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, sıvılaşmış 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 koşut 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.

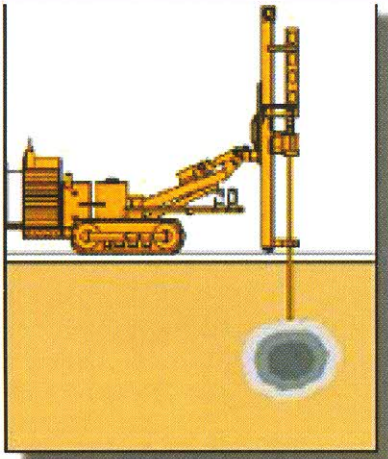


Sıvılaşma sonucu zeminin dayanımını yitirmesi ve yapının yana yatması



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

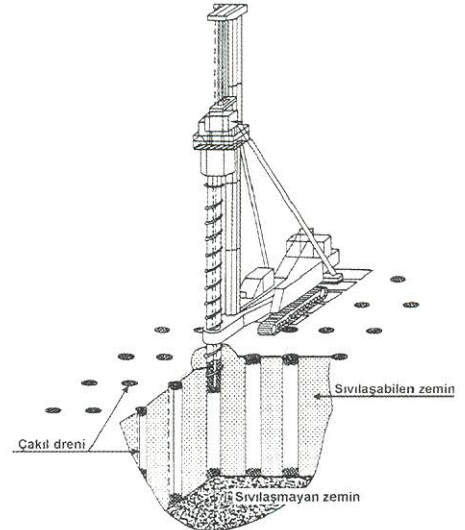
✓ Sıvılaşabilecek zeminin sıvılaşmayacak bir zeminle yer değiştirmesi

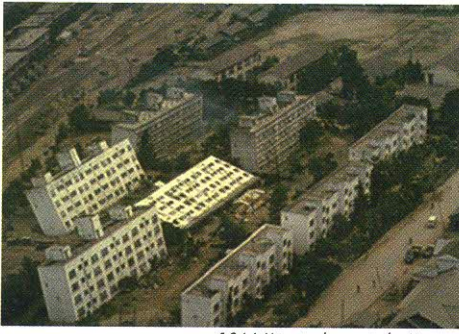
Yöntem, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminin kazılarak kaldırılması ve yerine sıvılaşma eğilimi olmayan bir zeminin konması esasına dayanır. Bu amaçla genellikle çimentoyla karıştırılmış çakıl ve kum kullanılmaktadır. Ancak yer değiştirme işlemi yapılırken, kazı şevinin yıkılmadan (kaymadan) duraylı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

✓ Drenaj teknikleri

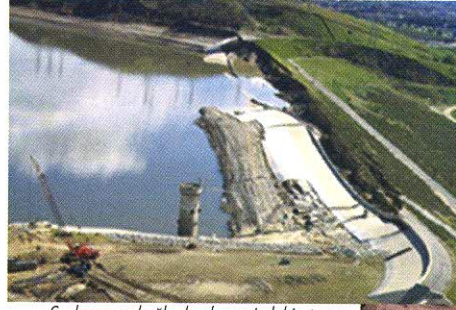
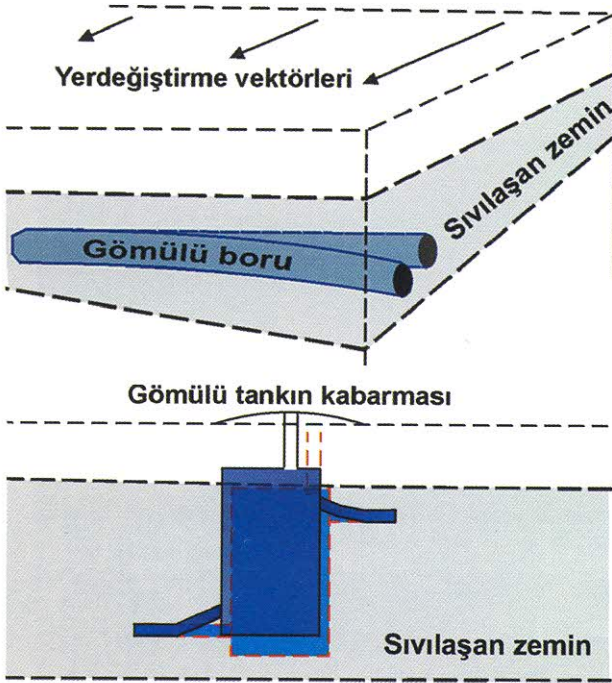
Sıvılaşmadan kaynaklanabilecek zararlar, zeminin drenaj kapasitesinin (suyun zeminden atılması) artırılması suretiyle de azaltılabilmektedir. Eğer zeminin gözeneklerindeki su ortamdan uzaklaştırılabilirse, deprem sırasında gelişebilecek aşırı gözenek suyu basınçları da önemli ölçüde azaltılmış olacaktır. 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.

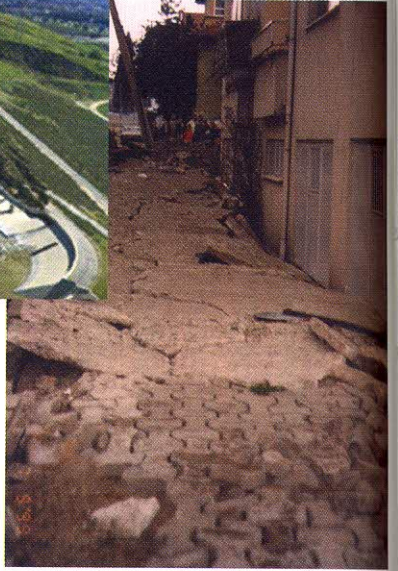




1964 Niigata depreminde (Japonya) sıvılaşma sonucu yana yatmış binalar ve yıkılan Showa Köprüsünden bir görünüm



Sıvılaşmaya bağlı olarak zemindeki oturma nedeniyle 1971 San Fernando depreminde hasara uğrayan San Fernando Barajı (ABD) ile 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda zeminine 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 Salınımı:

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

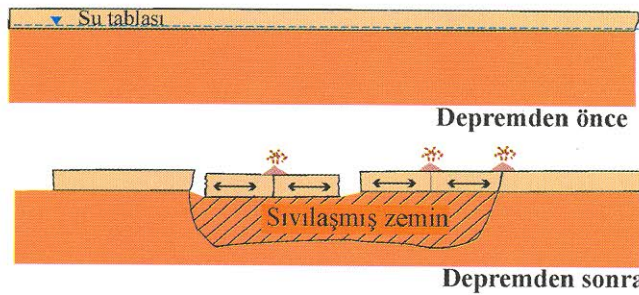
açar. Bu sürüklenme, deprem dalgaları gibi titreşimler yaratır. Titreşimle birlikte fisür veya çatlaklarda açılıp kapanmalar ve zeminde oturmalar meydana gelerek yapılar, boru hatları ve zemine gömülü diğer alt yapı tesisleri ciddi hasarlara maruz kalabilirler.

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

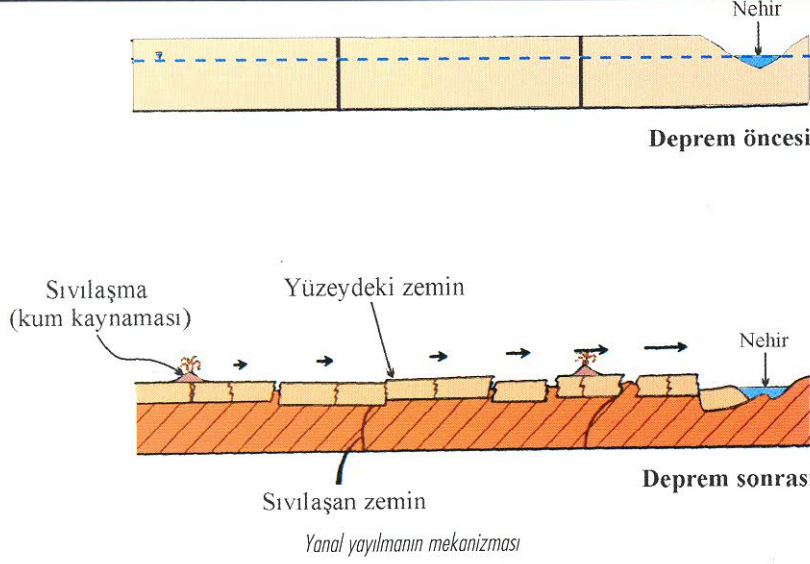
Boru, tank vb. gibi zemine gömülü alt yapı elemanlarının sıvılaşma sonucu yüzeye doğru hareket ederek kabarmaları

Sıvılaşma nedeniyle zeminin taşıma gücünü yitirmesiyle binalarda gözlenen davranışın aksine, sıvılaşan 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 salınımının mekanizması



Yanal yayılma hareketine tipik örnekler: (a) Ceyhan Nehri kıyısında (1998) Adana-Ceyhan Depremi ve (b) Sakarya Nehri kıyısında (1999) Kocaeli Depremi) yanal yayılma ile ilişkili şev hareketleri (c) Gölcük-Kavaklı'da denize sürüklenmiş kıyı ve sıvılaşan kum

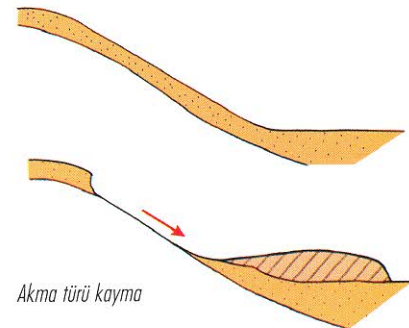
sürükleyerek, nehir, göl veya denize doğru hareket ederler. Sıvılaşmanın bu türdeki etkilerinden biri de yanal yayılma olarak adlandırılmaktadır.

Yanal yayılma, sıvılaşan 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.

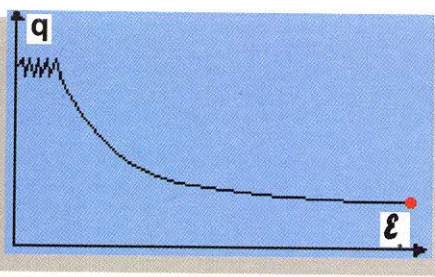
Yanal yayılmaya maruz kalan zeminlerin içinde bulunan yapı temelleri, atıksu şebekeleri ve boru hatları ile diğer alt yapı tesisleri hasar görürler veya eklem yerlerinden koparlar. Ayrıca, kaymanın topuk bölgesindeki (kıyıdaki) yapılar sıkışır ve bükülürler. Dolayısıyla, yanal yayılmanın neden olduğu hasarlar, zeminin üzerindeki yapıların yoğunluğuna da bağlı olarak, bir felaket düzeyine ulaşabilmektedir. Örneğin, 1964 Alaska Depremi'nde taşkın ovası çökelleri 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 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, sıvılaşan 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 doymun kumlar veya siltlerde gelişmektedir. Ayrıca, maden işletmelerindeki atık barajlarında toplanan, suya doymun ve çok ince cevher atıklarının da depremler sırasında akma davranışı gösterdikleri bilinmektedir.



Akma türü kayma



Akma sıvılaşması, düşük dayanımlı bir zeminde statik denge 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 etkiyen statik gerilmeye uzun süre karşı koyamaz ve akma gerçekleşir. Bu davranış biçimini, yukarıdaki şekilde verilen ve eğimli bir rampa üzerinde harekete geçen kayakçının davranış biçimine benzetmek müm-

kündür. Kayakçının, hareketini başlatmak amacıyla kendisini öne doğru itmek üzere yaptığı nisbeten küçük bir hareketten sonra, graviteden 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 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 (örneğin) sonrası gelişebilmektedir.

Günümüze değin geniş çapta ve büyük hasarlara neden olan akma hareketlerinin önemli 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 Ulusay

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