

Zemin Sıvılaşmasını Denetleyen Koşulların ve Sıvılaşma Nedenli Deformasyonların İncelenmesi

Sultan Gül DURMAZ , İbrahim İskender Soyaslan 

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Burdur

Geliş Tarihi (Received): 29.10.2023, Kabul Tarihi (Accepted): 29.11.2023

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): isoyaslan@mehmetakif.edu.tr

☎ +90 248 2132766 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Yapıların deprem gibi doğal afetlerden kaynaklanan hasarlarında, yapıların kalitesi kadar inşa edildikleri zeminin özellikleri de büyük bir önem taşımaktadır. Bu hasarlar arasında yapıların farklı oturmalar yapması, yan yatması, devrilmesi ve zemin içine gömülmesi gibi durumlar yer almaktadır. Bu hasarlara sebep olan en önemli etkenlerden biri, zemin sıvılaşmasıdır. Sıvılaşma, yeraltı suyu seviyesinin altındaki zeminlerin geçici olarak katılığını ve dayanım gücünü kaybederek, bir katıdan ziyade akışkan bir sıvı gibi davranması sürecidir. Bu çalışmada öncelikle sıvılaşmanın mekanizmasından ve tarihçesinden, sıvılaşma çeşitlerinden bahsedildikten sonra sıvılaşma için gerekli koşullar detaylı olarak incelenmiştir. Sıvılaşmadan dolayı meydana gelebilecek zemin hareketlerinin incelenerek, bu hareketler sonucunda meydana gelen deformasyonlar ve sıvılaşma etkilerinin nasıl azaltılacağına yönelik alınacak önlemler incelenerek ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Deprem, sıvılaşma, zemin hareketleri, hasar tipleri, zemin iyileştirme

Examination of Conditions Controlling Soil Liquefaction and Deformations Caused by Liquefaction

ABSTRACT

In the damages of buildings caused by natural disasters such as earthquakes, the characteristics of the soil on which they are built are of great importance as well as the quality of the structures. These damages include different settlements, tilting, overturning and sinking into the soil. One of the most important factors causing these damages is soil liquefaction. Liquefaction is the process in which soils below the groundwater level temporarily lose their stiffness and strength and behave like a fluid rather than a solid. In this study, firstly the mechanism and history of liquefaction, types of liquefaction are mentioned and then the necessary conditions for liquefaction are examined in detail. By examining the soil movements that may occur due to liquefaction, the deformations that occur as a result of these movements and the measures to be taken to reduce the effects of liquefaction are examined.

Keywords: Earthquake, liquefaction, ground movements, damage types, soil improvement

GİRİŞ

Boşluk basıncındaki artışa bağlı olarak zeminin kayma mukavemetinde ve sertliğinde önemli azalma olarak tanımlanan zemin sıvılaşması, depremlerden sonra yapısal hasar ve can kaybının ana nedenlerinden biridir. Bu hasarlara örnek olarak; 1964 Alaska, 1964 Niigata, 1983 Nihonkai-Chubu, 1989 Loma Prieta, 1993 Kushiro-Okii, 1994 Northridge, 1995 Hyogoken-Nambu (Kobe), 1999 Kocaeli ve 1999 Ji-Ji depremleri verilebilir (Unutmaz, 2009). Sıvılaşma, bir zeminin mukavemetinin ve sertliğinin güçlü yer hareketi, deprem sarsıntısı veya diğer hızlı döngüsel yükleme ile azaldığı bir olgudur (Tolon, 2013). 1964 yılında Niigata-Japonya ve Büyük Alaska-A.B.D. depremleri sırasında meydana gelen sismik sıvılaşma nedenli yıkıcı hasarlar, zemin sıvılaşmasının mekanizması ve sonuçlarının anlaşılmasındaki araştırmaları hızlandırmıştır (Çetin ve Unutmaz, 2004). Kahramanmaraş- Pazarçık (Mw=7.7) ve Elbistan (Mw=7.6) Depremleri 11 farklı ilde etkili olmuştur. Bu depremlerin parametreleri gözönüne alındığında yapıların zeminlerinde meydana gelecek sıvılaşmanın depremin şiddetini arttırdığı ortaya konulmuştur (Gücek ve ark., 2023).

“Sıvılaşma” terimi ilk olarak Terzaghi ve Peck (1948) çok gevşek kumların hafif örselenme nedeniyle akış arızalarına neden olan önemli mukavemet kaybını tanımlamak için kullanılmıştır. Benzer şekilde, Mogami ve Kubo (1953) aynı terimi sismik kaynaklı döngüsel yüklemeye kaynaklanan kayma mukavemeti kaybını tanımlamak için kullanılmıştır. Ancak sıvılaşmanın önemi, sıvılaşma potansiyeline sahip, doymuş kumlu zeminler üzerine kurulan binaların eğilme ve batmasından kaynaklandığı bildirilen 1964 Niigata depremine kadar tam olarak anlaşılammıştır (Unutmaz, 2009). Buna karşın zemin sıvılaşmasının statik yükler altında oluşumu Casagrande'nin 1936 yılındaki çalışmalarından itibaren bilinmektedir (Alparslan, 2006).

Youd (1973) tarafından, var olan tanımlar arasındaki farkı ayırt edilerek, bu karışıklığı giderecek bir tanım sunulmuştur. Sıvılaşma olgusu için yapılan tanıma göre, artan boşluk suyu basıncı sonucunda zemini oluşturan daneler katı halden sıvı hale geçmektedir (Etmınan, 2016). Depremle tetiklenen zemin sıvılaşması, inşa edilmiş mühendislik yapılarının ciddi zararlarına neden olan sismik bir dizi olay sonucunda ortaya çıkarak deformasyonlara sebep olan en ciddi sonuçlardan biri olarak kabul edilmektedir (Lirer ve ark., 2020). Bir zemin yatağının sıvılaşma potansiyeli, muhtemel deprem büyüklüğü, tane boyutu dağılımı ve zemin türü, görelî yoğunluk, deprem yükleme özellikleri, dikey etkili stres ve aşırı konsolidasyon, toprakların yaşı ve kökeni, sismik gerilim geçmişi, doyma derecesi ve kum

tabakası kalınlığına bağlıdır (Bahadori ve Hashemi-nezhad, 2016).

Bu çalışmada öncelikle sıvılaşmanın mekanizmasından ve tarihçesinden, sıvılaşma çeşitlerinden bahsedildikten sonra sıvılaşma için gerekli koşullar detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonra sıvılaşmadan dolayı meydana gelebilecek zemin hareketlerinin incelenmesinin ardından bu hareketler sonucunda meydana gelen hasar tiplerinden bahsedilip sıvılaşma etkilerinin nasıl azaltılması gerektiği üzerinde durulmuştur.

ZEMİN SIVILAŞMASI NEDİR?

Sıvılaşma, doymuş ve kohezyonsuz zeminlerde artan boşluk suyu basınçları ve dolayısıyla dinamik yükleme nedeniyle azalan efektif gerilmeler nedeniyle mukavemet kaybının gerçekleştiği bir olaydır. Sıvılaşma, döngüsel yükleme veya sarsıntı nedeniyle zeminde boşluk suyu basıncının oluşması ile meydana gelmektedir. Ortaya çıkan zemin ve su karışımı bir sıvı gibi davranır ve zemin yük taşıma özelliğini kaybeder. Zemin sıvılaşması esnasında gerçekleşen mekanizmanın adımlarını sıralayacak olursak:

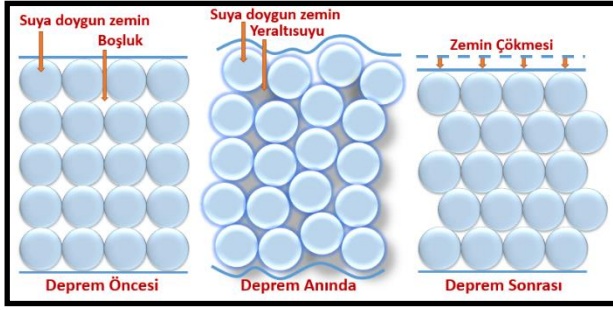
Aşırı Boşluk Suyu Basıncı: Toprak tanecikleri birbirleriyle temasını kaybettiğinde topraktaki su yükselerek boşlukları doldurur. Bu, boşluk suyu basıncının artmasına neden olarak zeminin mukavemetini ve sertliğini daha da azaltır.

Kesme Gerilmesi: Bir deprem sırasında, zemin ileri geri kayarken kayma gerilmesi yaşar. Gerinim çok büyükse, toprak parçacıkları birbirleriyle temasını kaybederek sıvı gibi davranmalarına neden olur.

Sıvılaştırılmış Durum: Zemin sıvı hale geldiğinde, kesme dayanımı büyük ölçüde azalır ve artık yapıları veya diğer yükleri taşıyamaz.

Zemin sıvılaşması, depremlerde görülebileceği gibi, sıvılaşma ihtimali olan granüler zeminlerin etrafında oluşan yapay titreşimlerden de meydana gelebilir. Örneğin, çakma kazıkların çakımı sırasında oluşan titreşimler ve yakın açık maden işletmelerinde yapılan üretim/dekapaj patlatmaları bu titreşimlere örnek olarak verilebilir (Ulusay, 2000). Şekil 1'de deprem öncesi, deprem sırasında ve deprem sonrasında zeminde meydana gelen sıvılaşmaya bağlı deformasyon aşamaları görülmektedir. Sıvılaşma, zeminin mukavemetini ve sertliğini kaybederek katı yerine sıvı gibi davranmasına neden olan bir süreçtir (Kumar, 2020).

Zemin Sıvılaşmasını Denetleyen Koşulların ve Sıvılaşma Nedenli Deformasyonların İncelenmesi



Şekil 1. Depremlerde zeminde sıvılaşmaya bağlı oluşan deformasyonlar (Soyaslan, 2022)

Zemin sıvılaşması, zeminin kesme dayanımı sıfıra düştüğünde meydana gelir. Bu, monoton yükleme veya döngüsel yükleme ile başlatılabilir. Her iki durumda da doymuş gevşek durumdaki bir zemin ve yükteki bir değişiklikte önemli boşluk suyu basıncı oluşturabilen bir zemin sıvılaşmaya en yatkın olanlardır. Boşluk suyu basıncı yükseldikçe, efektif gerilme azaldıkça zeminin mukavemetinde ilerleyici bir kayıp meydana gelir (Şekil 2) (Kumar, 2020).



Şekil 2. San Fernando (1971) depreminde sıvılaşma sonucu oluşan hasarlar (Koçkar, 2022)

Sıvılaşma davranışını anlamak, kohezyonsuz zeminlerin boşluk suyu basıncının hızlı yükleme ile artması sonucu gösterdiği sürtünme davranışının tüm biçimleriyle anlaşılmasıyla başlar (Aytaş, 2019). Ülkemizde sıvılaşma olayının önemi, 1993 yılındaki Erzincan depremiyle birlikte fark edilmiştir. Ardından 1999 yılındaki Gölcük ve Düzce depremleri sırasında pek çok yapıda sıvılaşma kaynaklı hasarlar gözlemlenmiş ve bu durum, sıvılaşmanın önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Şekil 3 ve 4'de 1999 yılında meydana gelen Kocaeli depremindeki yıkımlar görülmektedir.



Şekil 3. Kocaeli (1999) depreminde sıvılaşma sonucu binada oluşan hasar (URL-1, 2023)



Şekil 4. Kocaeli (1999) depreminde meydana gelen yıkım (URL-2, 2023)

SIVILAŞMA TÜRLERİ

Akma Sıvılaşması

Boşluk suyu basıncındaki artış nedeniyle zeminin efektif gerilmesinin azalmasıyla oluşur. Sıvılaşmanın neden olduğu en yıkıcı zemin arızalarıdır. Bu yenilmeler genellikle büyük zemin kütlelerini yanal olarak yer değiştirir. Nispeten dik yamaçlarda gevşek doymuş ince kum veya siltlerde gelişir. Şekil 5'de San Fernando Kalifornia Depremi (1971) sonrasında The Lower San-Fernando Barajı'nda oluşan akma sıvılaşması gösterilmektedir.

Zemin Sıvılaşmasını Denetleyen Koşulların ve Sıvılaşma Nedenli Deformasyonların İncelenmesi



Şekil 5. Deprem (1971) sonrası The Lower San Fernando Barajında oluşan akma (Alpaslan, 2013)

Devirsel Hareketlilik

Deprem esnasında gerçekleşen devirsel hareketlilik, önemli kalıcı bozulmaların oluşmasına sebep olan bir sıvılaşma çeşididir. Statik kayma gerilmeleri, sıvılaşan zeminin kayma dayanımından az olduğu durumlarda, kayma sıvılaşması akma sıvılaşmasından farklı bir şekilde meydana gelir. Zemin, bir deprem sırasında tekrarlanan yükleme ve boşalmaya maruz kalmaktadır. Bunun sonucunda zemini oluşturan daneler zamanlar taşıma güçlerini kaybeder ve sıvılaşma meydana gelir.

Düz Yüzey Sıvılaşması

Deprem veya sismik durumlar sonrasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının dağılması esnasında, suyun

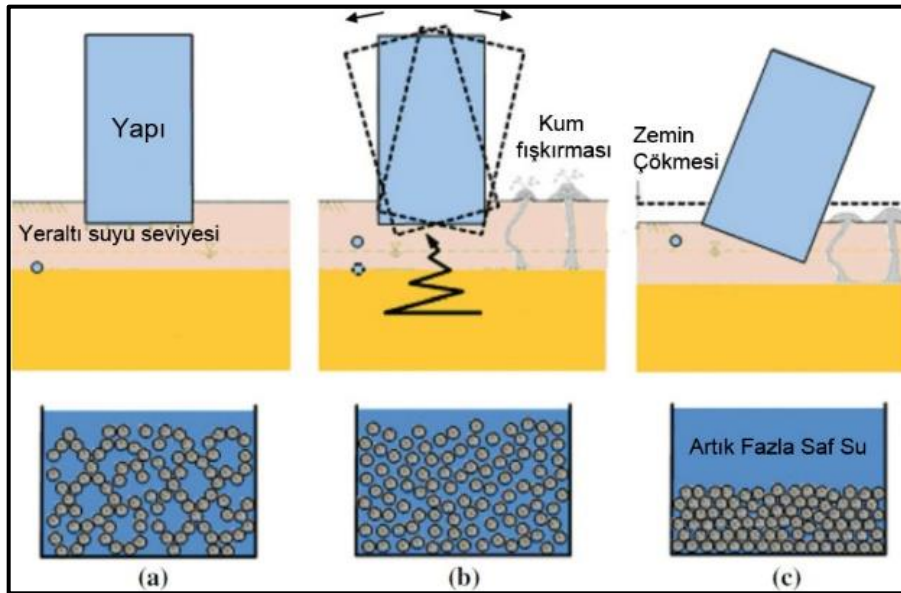
yukarı doğru hareket etmesi sonucu meydana gelen bir zemin yenilme şeklidir. Bu tür yenilme olayı, hidrolik kararlılığa ulaşmak için gerekli sürenin uzunluğuna bağlı olarak deprem sonrasında da oluşur.

SIVILAŞMAYI DENETLEYEN KOŞULLAR

Sıvılaşmanın gerçekleşmesi için, mevcut olması gereken birkaç gerekli koşul vardır. İlk olarak, zemin suya doyurulmalıdır, yani yeraltı suyu seviyesi yükselerek zemin suya doymuş duruma geçmelidir. İkinci olarak, zemin birbirine güçlü bir şekilde bağlanmamış sıkıştırılmış parçacıklardan oluşmalıdır. Son olarak, sismik aktivite veya yoğun yağış gibi, zemine etki eden bir tür dış kuvvet olmalıdır. Bu koşullar genellikle ince kumlu ve siltli zemin türünün hâkim olduğu kıyı, nehir ve göl yakınlarında bulunabilir. Sıvılaşma riskini değerlendirmek, gerekli önlemleri alarak potansiyel hasarı azaltmak için tüm koşulların belirlenmesi gerekmektedir.

Depremın Büyüklüğü ve Süresi

Sismik aktivite, sıvılaşmanın en yaygın nedenlerinden biridir. Bir deprem meydana geldiğinde yer sallanır ve titreşir, toprak parçacıklarının kendilerini yeniden düzenlemelerine ve yapılarını kaybetmelerine neden olur. Bu, sıvılaşmaya neden olan kayma mukavemeti ve sertlik kaybına yol açabilir (Şekil 6).



Şekil 6. Sıvılaşmaya neden olan sismik dalgaların (a) deprem öncesi, (b) deprem anı ve (c) deprem sonrası zemindeki değişimin gösterilmesi (URL-3, 2023)

Yeraltı Su Seviyesinin Derinliği

Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için yeraltı suyu seviyesinin yüksek olması gerekmektedir. Sıvılaşmanın görüldüğü bölgelerde yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden derinliği 3 m civarındadır. Ayrıca sıvılaşma için referans derinlik olarak 3-20 m literatürde verilmekle birlikte yaklaşık 50 m'ye kadar olan konsolide olmayan jeolojik litolojilerde dahil edilmelidir (Soyaslan, 2022). Şekil 7'de görüldüğü üzere Adapazarı'nda yeraltı su tablasının yüksek olması zemin sıvılaşmasına neden olmuştur (Yatman, 2006). Şiddetli yağışlar da zemini suyla doyurarak sıvılaşmaya neden olabilir. Zemin tamamen doygun hale geldiğinde, su basıncı artar bu da mukavemet ve taşıma gücü kaybına yol açar (Özçelik, 2017).



Şekil 7. 1999 Adapazarı depreminde sıvılaşma sonucu zemine gömülmüş bina (Ulusay, 2000)

Zemin Türü ve Dane Şekli

Düşük yoğunluklu ve yüksek su içeriğine sahip zeminler sıvılaşmaya karşı daha hassastır. Kohezyonsuz zeminler, sıvılaşmaya en eğilimli zemin türlerindedir. Temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar kohezyonsuz zeminlere örnek verilebilir (Mert, 2018). Kum ve çakıl gibi iri taneli zeminler, killer gibi ince taneli zeminlere kıyasla sıvılaşmaya karşı daha hassastır. Zeminin yuvarlak tanelerden oluşması, köşeli tanelerden oluşan zeminlere göre daha kolay sıkışabileceği anlamına gelmektedir.

Zeminin Sıklık Derecesi

Sıvılaşma eğilimi gösteren zeminlerde, genellikle birbirine güçlü bir şekilde bağlanmamış gevşek, zayıf sıkıştırılmış danelerden oluşmaktadır. Zeminin rölatif sıklığı ne kadar düşükse zemin sıvılaşmasına o kadar uygun ortam oluşmaktadır. Tablo 1'de rölatif sıklık oranı

ile zemin sınıflandırılması arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Tablo 1. Rölatif sıklık oranına göre zemin sınıflandırılması (Mert, 2018)

Rölatif Sıklık (D_r)	Açıklama
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok sıkı

Tabakalanma Özellikleri ve Drenaj Şartları

Kumlu zeminler, ince taneli silt ve kil zeminlere göre daha iyi geçirgenliğe sahiptir. Ancak, kalın ve geniş bir geçirgen kum tabakası varsa, drenaj yolu uzayacağından, deprem sırasında ani yüklemeye maruz kaldığında, bu zeminler drenajsız zemin tabakası gibi davranabilmekte ve sıvılaşma riski artabilmektedir (Çavuş, 2015).

Çökeltme Ortamı ve Yaş

Doğal olarak oluşan deniz, nehir veya göl çökelleri ile su altında yapılan dolgu işlemleri, gevşek ve düzensiz bir zemin yapısı oluşturduğundan, sıvılaşmaya karşı oldukça hassas hale gelirler. Holosen yaşlı çökeller (10000 yıldan daha genç), sıvılaşmaya en yatkın olanlardır. Ülkemizde meydana gelen depremlerdeki sıvılaşma olayları genellikle bu çökellerin olduğu alanlarda gözlemlenmiştir (Ulusay, 2000).

Çevre Basıncı

Zeminin bulunduğu derinlik arttıkça çevre basıncı da gelen yüklerden dolayı artmaktadır. Derine gidildikçe artan çevre basıncına karşılık zeminin sıvılaşmaya karşı hassasiyeti azalmaktadır. Sonuç olarak zeminin çevre basıncı ne kadar artarsa sıvılaşmaya yatkınlığı da o kadar azalmaktadır.

Bina yükü

Binaların kumlu zeminlere inşa edilmesi durumunda, binaları taşıyan temellerin altındaki zeminler, bina yüklerinin neden olduğu kayma gerilmelerinin etkisi altında kalır. Bu durum, zeminin sıvılaşmaya daha duyarlı hale gelmesine sebep olabilir (Mert, 2018).

Zemin Sıvılaşmasını Denetleyen Koşulların ve Sıvılaşma Nedenli Deformasyonların İncelenmesi

Zemin Sıvılaşması Sonrası Oluşan Deformasyonlar

Sıvılaşma meydana geldiğinde, zemin önemli hareketlere ve deformasyonlara maruz kalabilir. Bu, yerleşimi, yanal yayılmayı ve hatta yüzey dalgalarını içerebilir. Oturma, toprak mukavemetinin kaybı nedeniyle zemin çöktüğünde meydana gelir. Yanal yayılma, zemin yatay olarak hareket ettiğinde, binaların ve altyapının kaymasına veya çökmesine neden olduğunda meydana gelir. Yüzey dalgaları, zemin yüzeyinde hasarı daha da artıracak dalgalanmalar veya dalgalanmalar oluşturabilir. Bu yer hareketleri, yapısal hasara ve hatta çökmeye neden olabileceğinden özellikle binalar ve altyapı için tehlikeli olabilir (Özçelik 2022).

Hacimsel Sıkışmadan Kaynaklanan Zemin Yükü Oturmaları

Zemin sıvılaşması sonrasında oluşan deformasyonların en önemli nedenleri hacimsel sıkışmadan kaynaklanan zemin yüzeyi oturmaları ve yanal zemin yer değiştirmeleridir. Bu deformasyonlar akma ve yayılma mekanizmasına bağlı olarak gelişmektedir (Şengöz, 2019). Şekil 8'de Adapazarı depreminde meydana gelen zemin yükü oturma örneği verilmiştir.



Şekil 8. Adapazarı depreminde meydana gelen zemin yükü oturma örneği (Ulusay, 2000)

Yanal Zemin Yer Değiştirmeleri

Sıvılaşma sonrası meydana gelen yanal zemin hareketleri, bazı durumlarda büyük yapısal hasarlar oluşturabilir (Özaydın, 2007). Şekil 9'da Adapazarı'nda sıvılaşma nedeniyle devrilmiş bir bina gösterilmektedir.



Şekil 9. Adapazarı'nda sıvılaşma nedeniyle devrilmiş bina (Ulusay, 2000)

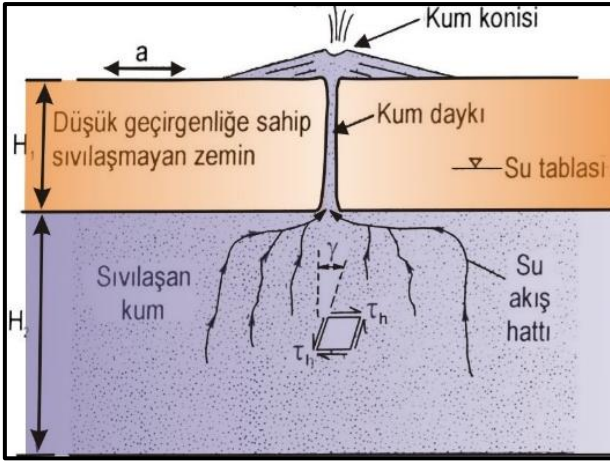
SIVILAŞMA NEDENİYLE OLUŞAN HASAR TİPLERİ

Sıvılaşma binalara, altyapıya ve doğal çevreye çok çeşitli zararlar verebilir. Binalar, temel çökmesi, çatlama ve hatta çökme gibi sorunlarla karşı karşıya kalabilir. Yollar, köprüler ve boru hatları gibi altyapılar da zarar görebilir veya kullanılmaz hala gelebilir. Doğal çevre heyelanlardan, çamur akışlarından ve diğer erozyon biçimlerinden etkilenebilir.

Kum Kaynaması

Zeminin içindeki boşluklarda bulunan kum ve suyun suyun basıncına bağlı olarak, yüzeye fışkırarak çıkması olarak bilinen bir sıvılaşma hasar tipidir (Özçelik, 2019). Çok ince kumlarda, sıvılaşan toprağın düşük geçirgenliği nedeniyle suyun çıkışı uzun bir süre devam eder. Dahası, ince toprak partikülleri suyun püskürtülmesiyle kolayca yer yüzeyinin üzerine kalkar (Yasuda ve ark., 2012). Bu durum, yüzeyde kum konilerinin oluşmasına neden olur. Şekil 10'da kum kaynamasının anlatıldığı bir zemin kesiti gösterilmektedir.

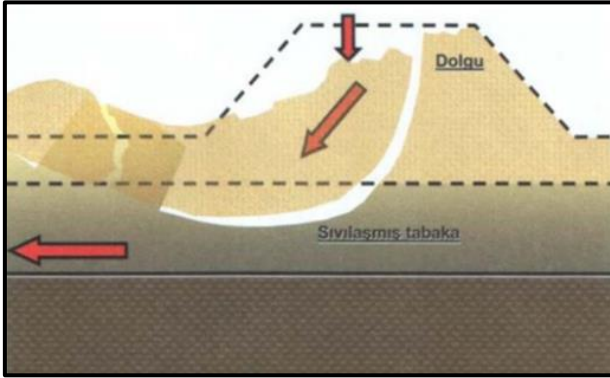
Zemin Sıvılaşmasını Denetleyen Koşulların ve Sıvılaşma Nedenli Deformasyonların İncelenmesi



Şekil 10. Kum kaynaması oluşumunu gösteren kesit (Mert, 2018)

Akma Göçmesi

Akma göçmeleri genellikle %30'dan daha fazla eğime sahip yamaçlarda meydana gelir. Ansızın ortaya çıkarlar, hızla ilerlerler ve genellikle büyük bir zemin kütlelerinin yamaç boyunca aşağı doğru hareketini içerirler (Alpaslan, 2013).



Şekil 11. Akma göçmesini gösteren kesit (Alpaslan, 2013)

Yanal Yayılma

Yanal yayılmalar, genellikle düşük eğime sahip (0.3° - 3°) yamaçlarda veya suya yakın düzlüklerde meydana gelir. Bu hasar tipi, alttaki zeminin sıvılaşması ve yüzeydeki sediman bloklarının yanal hareketini içerir (Alpaslan, 2013). Bu tür hareketler genellikle dolgu alanlara, liman tesislerine, boru hatlarına, köprülere ve diğer yüzey temellerine ciddi zararlar verebilmektedir (Çıklaiblikçi, 2019). Şekil 12'de 2010 yılında Haiti'de

yaşanan deprem sonucunda meydana gelen yanal yayılma gösterilmektedir.



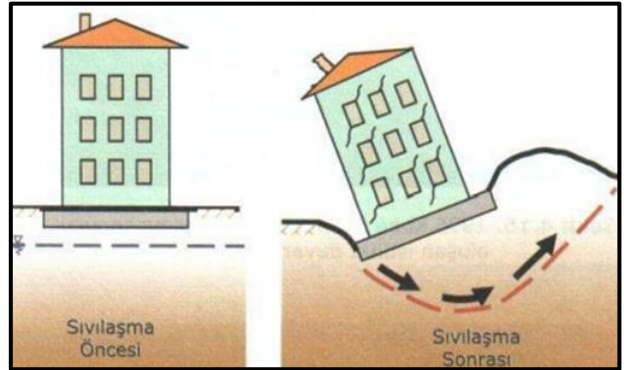
Şekil 12. Haiti'de 2010 yılında yaşanan deprem sonucu oluşan yanal yayılma (Altındış, 2020)

İstinat Yapı Göçmesi

Bu hasar tipi, destek yapılarının oturduğu zeminin taşıma kapasitesinin azalması veya destek yapısının gerisindeki zeminin sıvılaşmasıyla birlikte artan yanal kuvvetler nedeniyle meydana gelir (Altındış, 2020). Bu artan yanal kuvvetlerin etkisiyle destek yapısı yatay ve/veya dikey yönde deforme olur ve göçmeler meydana gelir (Çıklaiblikçi, 2019).

Taşıma Gücü Kaybı

Taşıma gücü kaybı, kısmi veya tam sıvılaşma sırasında oluşan gözenek suyu basıncının artması ve toprağın yumuşamasıyla ilişkili olan toprak mukavemetinin kaybindan kaynaklanır (Şekil 13). Temel taşıma basıncının azalmış kapasiteyi aşması sonucu aşırı yer değiştirmelerin oluşmasına yol açabilir (Cooke, 2000).



Şekil 13. Taşıma gücü kaybı nedeniyle oluşan göçme (Çıklaiblikçi, 2019)

Şekil 14'de, Adapazarı'nda bir yapının Gölcük depremi sırasında meydana gelen sıvılaşma nedeniyle taşıma gücü kaybına bağlı olarak farklı oturmalar oluştuğu görülmektedir. Bu oturmaların etkisiyle yapının devrildiği gözlenmektedir.



Şekil 14. Adapazarı'nda sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybı ve farklı oturma nedeniyle devrilen yapı (Altındış, 2020)

Gömülü Yapı Yüzeylenmesi

Sıvılaşma esnasında meydana gelen kaldırma kuvvetinin etkisiyle, su, benzin, mazot gibi depolama tankları, doğalgaz ve çeşitli boru hatları gibi hafif alt yapı elemanları yeryüzeyine çıkarak birçok sorun teşkil etmektedir. Bu durum ayrıca muayene bacaları, internet gibi yapılar için de problemlere sebep olabilir (Altındış, 2020). Şekil 15'de 2004 yılında meydana gelen Niigata depreminde sıvılaşma nedeniyle oluşan gömülü yapının yüzeye çıkması örneği gösterilmektedir.



Şekil 15. Niigata (2004) depreminde sıvılaşma nedeniyle oluşan hasar (Altındış, 2020)

SIVILAŞMAYA KARŞI ALINACAK ÖNLEMLER

Sıvılaşmaya meyilli bölgelerde alınabilecek önlemler üç ana başlık altında toplanabilmektedir.

- Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde yapı inşasından kaçınılması
- Yapıların sıvılaşmaya karşı dayanıklı inşa edilmesi
- Sıvılaşmaya meyilli zeminlerde zemin iyileştirme çalışmaları yapılması

Sıvılaşmaya Duyarlı Zeminlerde Yapı İnşasından Kaçınılması

Mühendisliğin temel ilkelerinden olan ekonomiklik ve emniyet faktörlerinin sağlanması için sıvılaşabilir nitelikteki alanlarda herhangi bir mühendislik yapısının inşa edilmemesi ve yapılaşmanın daha güvenli olduğu bölgelerde olması durumu sıvılaşma etkilerinin azaltılması için en mantıklı ve en ucuz yoldur.

Sıvılaşmaya Karşı Dayanıklı Yapı İnşası

Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde, inşa edilecek yapılarda zemin iyileştirmesi dışında değişik bazı tedbirler de alınabilmektedir. Bu tedbirlerden en çok uygulananlar radye temel yapımı ve kazıklı radye temel yapımıdır (Alparslan, 2006). Sıvılaşma meydana gelen zeminlerde özellikle bodrumsuz binalarda radye temelin sıvılaşmaya karşı bazen yeterli olmamaktadır. Depremde radye temelli bazı binaların aldıkları hasarlardan veya bu yapıların devrilmeleri en iyi kanıt olmaktadır. Dolayısıyla sadece radye temel yapımı yerine mutlaka yeterli derinlikteki radye temel yapımı çok daha önemli olmaktadır.

Zemin İyileştirilmesi

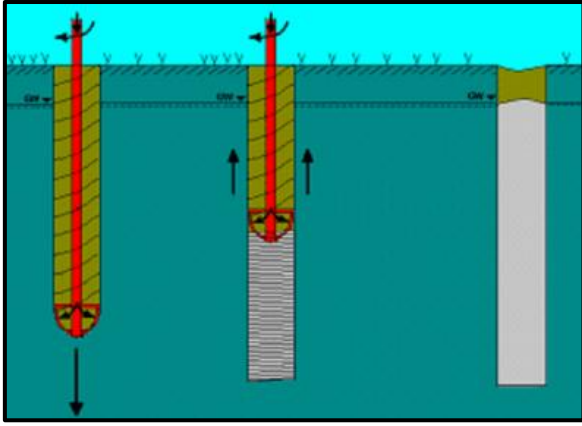
Zemin iyileştirme çalışmalarını genel olarak üç ana başlık altında toplayıp bu ana başlıkları alt sınıflara ayırabiliriz.

Enjeksiyon teknikleri

Zemin iyileştirme yöntemleri arasında, zeminin özelliklerini iyileştirmek için çimento bazlı malzemelerin zemine enjekte edilmesi veya karıştırılması yöntemiyle zemin çökelleri düzeltiler. Bu malzemeler, zemin taneleri arasındaki teması güçlendirir ve boşlukları doldurur. Karıştırma işlemi mekanik veya hidrolik olarak gerçekleştirilebilir. Enjeksiyon ve karıştırma teknikleri maliyetli yöntemlerdir, ancak minimum oturma ve titreşimle iyileştirme sağlar (Alparslan, 2006).

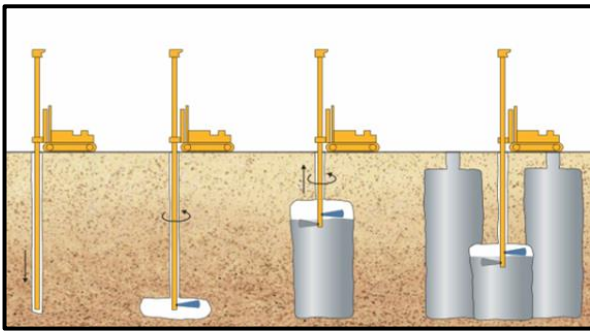
Gözenek enjeksiyonu: Zemin yapısını bozmayacak şekilde düşük viskoziteli sıvının zemine enjekte edilmesini içeren bir yöntemdir. Bu işlemde, taneli sıvılar (çimento, uçucu kül, bentonit, mikro çimento veya bunların belirli karışımları su ile birlikte) veya kimyasal enjeksiyon maddeleri (silikat jel, fenolik reçineler) kullanılır (Alparslan, 2006).

Derin karıştırma: Bu iyileştirme yöntemi, zemine enjekte edilen katkı maddelerinin, büyük çaplı tek veya çok eksenli burgular ile karıştırılması işlemidir. Şekil 16'da karıştırma kolonlarının oluşum şekli gösterilmektedir.



Şekil 16. Karıştırma tekniğinin şematik gösterimi (Alparslan, 2006)

Jet enjeksiyonu: Bu enjeksiyon yönteminde, tasarım derinliğine kadar su kullanılarak delik açılır ve deliklere yüksek basınçta çimento şerbeti püskürtülür. Bu işlem sırasında tijler dönerek ve zemin içerisinden yukarıya doğru çekilerek ilerler (Şekil 17). Bu şekilde belirli çap ve boyutta silindirik bir kolon oluşturulur. Zemin içerisinde dayanıklı ve geçirimsiz beton-zemin karışımı kolonlar elde edilir. Türkiye'de yaygın ve bilinen yöntemdir (Alparslan, 2006).



Şekil 17. Jet enjeksiyon kolonlarının oluşturulması (Alparslan, 2006)

Sıkıştırma teknikleri

Sıkıştırma yöntemleri, sıvılaşma duyarlılığına sahip zeminlerde yaygın olarak kullanılan iyileştirme tekniklerindedir (Alparslan, 2006).

Vibroflotasyon tekniği: Vibroflotasyon yönteminde, bir zemin çökeline sıkıştırmak için vince asılı olan ve torpido şeklinde, genellikle 30-46 santimetre çapında ve yaklaşık 3-4,9 m uzuluğunda bir vibroflot kullanılır (Alparslan, 2006).

Vibrotij yöntemi: Vibrotij sistemleri, zeminin sıkıştırılması için titreşimli bir kazık çakma çekicinin uzun bir probu zemin içinde titreşerek kullanıldığı bir yöntemdir. Prob, zemin içinde titreşerek ilerlerken zemini sıkıştırmaya devam eder (Alparslan, 2006).

Dinamik kompaksiyon: Dinamik kompaksiyon, zeminin sıkıştırılması için zemin üzerindeki noktalara büyük bir ağırlığın tekrarlı olarak düşürülmesi işlemidir. Ağırlıklar genellikle 5,5-27 t arasında olurken bazı durumlarda 155 t'a kadar çıkabilmektedir. Düşürme yükseklikleri genellikle 10-30 m arasında değişirken bu yükseklik 40 m kadar çıkabilir (Mayne ve ark., 1984).

Kompaksiyon enjeksiyonu: Kompaksiyon enjeksiyonu, zemini yoğunlaştırmak için çok düşük slamp değerlerinde yüksek basınç altında şerbetin zemine enjekte edilmesi işlemidir (Alparslan, 2006).

Sıkıştırma kazıkları: Zeminler, kazık çakma işlemiyle oluşan deformasyonlar ile sıkıştırılabilir. Elde edilen sıkıştırma derecesi, sıkıştırma kazıklarının aralıklarına ve titreşim enerjisine bağlıdır (Alparslan, 2006).

SONUÇ

Zemin sıvılaşması, boşluk basıncındaki artışa bağlı olarak kayma mukavemetinde ve sertliğinde önemli azalma olarak tanımlanan, bugüne kadar birçok depremde kendini gösteren, çeşitli yıkımlara, deformasyonlara neden olan jeolojik bir olgudur. Verdiği hasar yalnızca konut tarzı yapılarla sınırlı olmamakla beraber her türlü mühendislik yapılarında kendini gösterebilmektedir. Sıvılaşma mekanizması, döngüsel yükleme veya sallama nedeniyle zeminde boşluk suyu basıncının oluşmasını içerir. Bu, toprak parçacıklarının birbirleriyle temasını kaybetmesine ve suda asılı kalmasına neden olur. Suda asılı kalan toprak bir sıvı gibi davranarak zeminin mukavemetini ve sertliğini önemli derecede etkiler. Zemin sıvılaşmasının yarattığı hasarlardan korunmak için mühendisliğin temel ilkelerinden

Zemin Sıvılaşmasını Denetleyen Koşulların ve Sıvılaşma Nedenli Deformasyonların İncelenmesi

olan ekonomiklik ve emniyet faktörlerinin sağlanarak sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerden kaçınılmalıdır. Günümüz şartlarında hızla artan nüfus yoğunluğundan ve yüksek göç oranlarından dolayı bu korunma yöntemi her zaman kullanılamamaktadır. Bundan dolayı eğer şartlar elverişli değilse radye temel ve kazıklı radye temel uygulaması ile sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapılar inşa edilmelidir. Sıvılaşma etkilerinin azaltılması için kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri; enjeksiyon, sıkıştırma ve drenaj tekniklerinden oluşmaktadır. Sıvılaşma, sismik durumlarda kohezyonsuz ve suya doygun kumlu zeminlerde tekrarlı ve geçici yükler altında boşluk suyu basıncının artmasıyla dayanım kaybının meydana gelmesidir. Bu durum, zeminin sıvılaşarak sertliğini ve taşıma kapasitesini kaybetmesine ve yapıların çökmesine veya hasar görmesine yol açar. Sıvılaşma hem ülkemizde hem de dünyada can ve mal kayıplarına sebep olan önemli bir jeoteknik risktir. Bu nedenle, deprem bölgelerinde zeminin sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmeli ve uygun önlemler alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Alparslan, H. (2006). *Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde iyileştirme yöntemlerine ait kriterlerin belirlenmesi*. Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği. Sakarya: Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. AD., Yüksek Lisans Tezi.
- Alpaslan, N. (2013). Zemin sıvılaşması ve mekanizması. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 3(2), s. 67-89.
- Altındış, M. (2020). *Sıvılaşma analizi ve sıvılaşma sonucu oluşan yanıl yayılma hesap yöntemlerinin karşılaştırılması*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. AD., Yüksek Lisans Tezi.
- Aytaş, Z. (2019). *Zemin sıvılaşmasına zemin ve deprem parametrelerinin etkisinin değerlendirilmesi*. Batman: Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Müh. AD., Yüksek Lisans Tezi.
- Bahadori, H., Hasheminezhad, A. (2016). Standard penetration test-based assessment of seismic soil liquefaction potential of Urmica, Iran. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, s. 591-596.
- Cooke, H. (2000). *Ground improvement for liquefaction mitigation at existing highway bridges*. Civil Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Çavuş, U. (2015, Nisan). Zeminlerin sıvılaşması ve barajların alüvyon temellerinin sıvılaşma riskinin pratik değerlendirilmesi. *DSİ Teknik Bülteni*, s. 28-39.
- Çetin, K., Unutmaz, B. (2004). Zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, s. 32-35.
- Çıklablıkçı, P. (2019). *Depremler sırasında zeminlerin sıvılaşması ve sonrasında meydana gelen deplasmanların belirlenmesi*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği AD., Yüksek Lisans Tezi.
- Etmınan, E. (2016). *Effect of gradation, fines content and silt shape characteristics on static liquefaction of loose sands*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği AD., Doktora Tezi.
- Gücek, S., Afacan, K. B., Zorluer, İ. (2023). 6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu Örnekleri. *AKÜ FEM BİD*, 740-752. doi: DOI: 10.35414/ akufemubid.1298648
- Gündüz, Z., Arman, H. (2005). Zemin davranışına uygun yapı tasarım ilkeleri ve uygulanabilirliği. Deprem Sempozyumu (s. 1237-1243). Kocaeli: Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Koçkar, M. (2022). *Sıvılaşma ve yanıl yayılmanın mekansal planlama açısından değerlendirilmesi ve alınacak önlemler*. Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. Ankara: Yer Bilimsel Etüd Dairesi Başkanlığı.
- Kumar, A. (2020). Liquefaction of soil. Civil Engineering. Patna: Department of Civil Engineering National Institute of Technology Patna.
- Lirer, S., Chiaradonna, A., Lucia, M. (2020). Soil liquefaction: from mechanisms to effects on the built environment. *Rivista Italiana Di Geotecnica*, s. 23-51.
- Mayne, P., Jones, J., Dumas, J. (1984, June 01). Ground response to dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6).
- Mert, M. (2018). *Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerle değerlendirilmesi*. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. AD., Yüksek Lisans Tezi.
- Mogami, T., Kubo, K. (1953). The Behaviour of soil during vibration. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (s. 152-155). Switzerland: ISSMGE.
- Özaydın, K. (2007). Zeminlerde sıvılaşma. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği. İstanbul: İnşaat Mühendisleri Odası (İMO).
- Özçelik, M. (2017). The Effects of Vertical Stress on the Liquefaction Potential Originated from Buildings in The Urban Areas: A Case Study. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 8(1), 38-57.
- Özçelik, M. (2019). Paleo-tectonic data evaluating from foundation excavations: a case study Burdur Fault segments (Turkey) *Acta Geodaetica et Geophysica. Acta Geodaetica et Geophysica*, (54), 545-556. doi: <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00275-3>
- Özçelik, M. (2022). Assessment of Liquefaction Susceptibility in Sedimentary Deposits on the Western Side of the Antalya Urban Area (Turkey). *Pure Appl. Geophys*, (178), 1859-1869. doi: <https://doi.org/10.1007.s00024-021-02738-7>
- Soyaslan, İ. İ. (2022). Zemin sıvılaşmasında yeraltı suyunun önemli ve sıvılaşmanın mühendislik yapıları üzerindeki etkisi. Ahi Evran 2nd International Conference on Scientific Research (s. 467-476). Kırşehir: Full Texts Book (V-3).
- Şengöz, T. (2019). *Sıvılaşma nedir? Zemin sıvılaşmasının mühendislik değerlendirilmesi, zemin sıvılaşması ile ilgili alınması gereken tedbirler, önlemler ve tavsiyeler ile zemin ve temel etüdü uygulama esaslarında ve rapor formatında sıvılaşma ile ilgili bilgiler*. Marmara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği. Ankara: ResearchGate.

Zemin Sıvılaşmasını Denetleyen Koşulların ve Sıvılaşma Nedenli Deformasyonların İncelenmesi

- Terzaghi, K., Peck, R. (1948). *Mühendislik uygulamasında zemin mekaniği*. New Jersey: John Wiley.
- Tolon, M. (2013). *A Comparative numerical analysis for liquefaction*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği AD., Doktora Tezi.
- Ulusay, R. (2000). Zemin sıvılaşması. *Mavi Gezegen*, 2, 47-56.
- Unutmaz, B. (2009). *Assessment of soil structure earthquake interaction induced soil liquefaction triggering*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği. Ankara: Ph.D. - Doctoral Program, Middle East Technical University.
- URL-1. (2023). Bizden Detay. Jeoloji Mühendisleri Odası: https://www.jmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=9979&tipi=2&sube=6 adresinden alındı
- URL-2. (2023). MMO: 17 AĞUSTOS 1999 Marmara Depremi'nin 19. yılı ve yapı denetimi. Makine Mühendisleri Odası: <https://www.mmo.org.tr/istanbul/basin-aciklamasi/mmo-17-agustos-1999-marmara-depreminin-19-yili-ve-yapi-denetimi> adresinden alındı
- URL-3. (2023). Soil Liquefaction. Dream Civil: <https://dreamcivil.com/soil-liquefaction/> adresinden alındı
- Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K., Kanemaru, Y. (2012). Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake. *Soils and Foundations*, s. 793–810.
- Yatman, Z. (2006). *Sıvılaşma sonucu oluşan zemin yetersizliklerinin irdelenmesi*. Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı . Şanlıurfa: Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği AD., Yüksek Lisans Tezi.
- Youd, T. (1973). *Ground movements in Van Norman Lake vicinity during San Fernando California, earthquake of February 9, 1971*. San Fernando: U.S. Department of Commerce, National Oceanographic and Atmospheric Administration.
-