

## Zemin Sıvılaşması ve Mekanizması

Nuray Alpaslan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Batman Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü, Merkez  
Yerleşke, 72060, BATMAN

\*[nuray.alpaslan@batman.edu.tr](mailto:nuray.alpaslan@batman.edu.tr)

### Özet

Sıvılaşma, deprem sırasında zemin hasarlarına neden olan en önemli faktörlerden biridir. Zeminin adeta bir sıvı gibi davrandığı olaydır. Zeminde farklı türlerde deformasyonlara neden olan sıvılaşma, yerleşim alanlarında meydana gelmesi halinde, yapıları olumsuz yönde etkileyerek önemli derecede hasara yol açabilmektedir. Sıvılaşma, zeminin mukavemeti ve sertliğinin deprem titreşimleri ya da diğer hızlı yüklenme ile azaldığı durumda oluşan bir olgudur. Sıvılaşma ve onunla ilişkili olgular çeşitli tarihlerde tüm dünyada meydana gelmiş depremlerde ortaya çıkan çok büyük hasarın nedeni olmaktadır.

Bu çalışmada sıvılaşmanın mekanizması ve zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde birçok ampirik bağıntı, analiz ve yöntemler bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan sıvılaşma hesaplamalarında S Dalga Hızı ve SPT (Standart Penetrasyon) arasındaki ilişkinin belirlenmesi oldukça önem kazanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Zemin Sıvılaşması, Sıvılaşma Analizi, Kayma Dalgası Hızı, SPT Değeri

## Soil liquefaction and Mechanism

### Abstract

Liquefaction is one of the most important factor that causes ground damage during an earthquake. In this event soil almost behaves like a liquid. Liquefaction which

causes different types of deformation on ground, if occurs in an urban environment, it affects the structures negatively by causing significant damages. Soil liquefaction is a fact that occurs when ground strength and hardness are reduced by the earthquake vibrations or other fast- loading. Liquefaction and related phenomena have been occurred all over the world since various dates, which are resulted with big damages.

In this study, it is focused on the mechanism of liquefaction and the assessment of soil liquefaction potential. In the evaluation of soil liquefaction, many empirical relationships and methods used to analysis the liquefaction potential. In recent years, the S wave velocity and SPT (Standard Penetration ) test data has gained considerable importance to determine liquefaction safety factors.

**Key Words:** *Soil liquefaction, Liquefaction Analysis, Shear Wave Velocity, SPT(N) Value*

## 1.GİRİŞ

Sıvılaşma, deprem sarsıntısı veya benzeri diğer hızlı ve büyük yüklemeler sonucunda, zeminin dayanımını, sertliğini ve sıklılığını kaybetmesi kavramıdır. Daneli zeminlerde (siltli, kumlu) görülen bir olaydır.

*Sıvılaşma* (liquefaction) terimini ilk kez bilimsel literatüre kazandıran araştırmacı olarak bilinen [1] olmuştur. Ref [1] sıvılaşmayı şöyle tanımlamıştır: “*Sıvılaşma, suya doymuş zeminin çökmesi sırasında, zemini oluşturan katı parçacıkların ağırlığının, zemini çevreleyen suya aktarılmasıyla oluşur. Bu olay sonucunda, zeminin herhangi bir derinliğinde hidrostatik su basıncı yükselerek, bu basıncın büyüklüğü suya batan zeminin birim ağırlığına yaklaşır*” [2].

Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesi altındaki tabakaların geçici olarak mukavemetlerini kaybederek, katı yerine viskoz sıvı gibi davranmalarıdır. Özellikle, kil bulunmayan kum ve siltler ve bazen çakıllar sıvılaşma potansiyeline sahiptirler. Deprem sırasında, dalgaların özellikle kayma dalgalarının suya doymuş daneli tabakalardan geçerken, dane yerleşim düzenini değiştirir, gevşek olarak bulunan danelerin göçerek yerleşmesine ve sıkışmasına sebep olur [3].

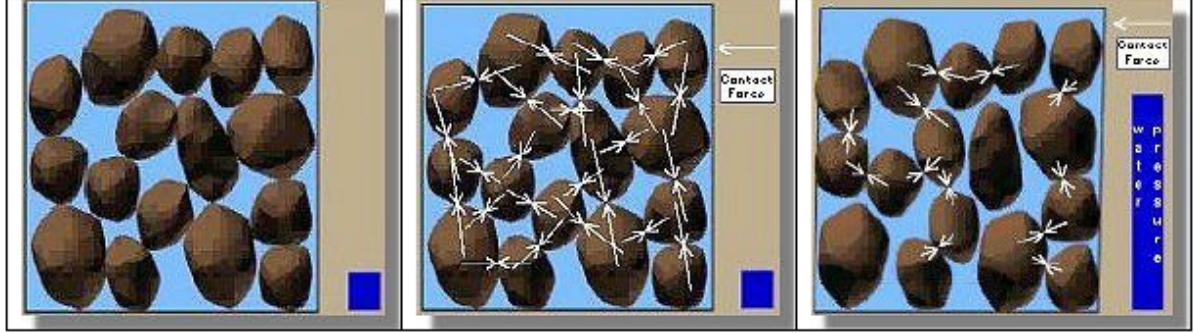
Zeminin makaslama dayanımının etkiyen statik makaslama gerilmesinden daha düşük bir değere doğru azalması durumunda, zeminde büyük deformasyonlar gelişmekte ve zemin sıvılaşmaktadır [4]. Zeminde sıvılaşmaya neden olan hareketler, sismik dalgalar ve özellikle de makaslama dalgalarıdır [5]. Bu dalgalar suya doygun taneli tabakalardan geçerken oluşturdukları ek su basıncı ile tanecikli yapıyı bozar ve zeminin dayanımını yitirmesine neden olurlar.

Zeminin sıvılaşması sonucu yapı, zemine batma veya hafif yapılarda yukarı doğru hareket ederek yüzme eğilimi gözlenebilir. Sıvılaşan zemindeki küçük kayma gerilmeleri altında büyük şekil değiştirmelere sebep olur ve yapılarda zemin göçmesi hasarları meydana getirir. Bir zeminin sıvılaşması esas olarak gevşek bir yerleşime sahip olmasına, daneler arasındaki bağ ve kil miktarına ve boşluk suyunun drenajının engellenmesine bağlıdır [6].

## 2. ZEMİN SIVILAŞMASI

Deprem süresince sismik dalgalar, özellikle kayma dalgalarının etkisi ile genellikle drenajsoz suya doygun ve gevşek zeminler içinde yayılırken birbirine göre kayma kuvvetleri yaratarak zemin partiküllerinin yer değiştirmesine neden olurlar. Bu koşullar altında doygun ve gevşek zemin partikülleri birbirine yaklaşma eğilimi gösterirler. Bu durumdaki partiküllerin temas noktalarındaki gerilim partikülleri çevreleyen suya iletilir. Deprem süresince sismik dalgalar ani ve çok kısa süreli hareketlere neden olmasından dolayı, partiküller arası suyun drene olması için gereken yeterli süreye olanak tanımamaktadır. Dolayısıyla ortamdaki uzaklaşmayan gözenek suyunun basıncı aniden artmaktadır. Gözenek suyundaki bu ani artış, zemin partiküllerini bir arada tutan temas kuvvetlerini yok ederek partikülleri birbirinden uzaklaştırır (Şekil 2.1). Böylece zemin dayanımını yitirir. Efektif düşey basıncın sıfır olduğu bu koşullar altında zemin, deprem öncesinde gösterdiği katı zemin davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak suyla birlikte yüzeye doğru hareket eder ve yüzeyden fişkırmaya başlar. Zeminin dinamik yükler sonucunda ortaya koyduğu bu davranış biçimi sıvılaşma olarak tanımlanır [7].

Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesi altındaki tabakaların geçici olarak mukavemetlerini kaybederek, katı yerine viskoz sıvı gibi davranmalarınıdır. Özellikle, kil bulunmayan kum ve siltler ve bazen çakıllar sıvılaşma potansiyeline sahiptirler.



Şekil 2.1. Zemin tanecikleri; okların uzunluğu zemin parçaları arasındaki bağlantı kuvveti ile doğru orantılıdır. Su basıncı azaldıkça bağlantı kuvveti artmaktadır [8].

### 3.SIVILAŞMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Depremler sırasında zemin sıvılaşmasının gelişmesi için jeolojik ve hidrojeolojik koşullar ile zemin bileşimi ve gerilme gibi diğer bazı koşulların uygun olması gereklidir [9].

#### 3.1. Zemin Özelliklerinin Sıvılaşmaya Etkisi

Yeraltı su düzeyi, Jeolojik birimler, Tane Boyut, SPT sayısı gibi faktörler sıvılaşma için önemli koşulları oluşturmaktadırlar. **Yeraltı su düzeyi;** Çoğunlukla ilk 3 m genellikle 20 m ye kadarki sular önemlidir. **Jeolojik birimler;** İlk 15 m ile 20 m arasında bulunan ve taşıma gücü düşük suya doymuş kumlu, siltli kumlu ve killi kumlu birimler. **Tane Boyutu;**  $D_{60} / D_{10} < 10$  olan kum – silt türü özellikle  $D_{10}$  değerinin 0.005 ile 0.15 mm arasında olduğu topraklar. **SPT sayısı;** yüzeye yakın yerlerde  $N < 10$  ve 20 m derinlikte  $N < 20$  olan özellikle düşük göreceli sıkılıktaki kumlu yerler, sıvılaşabilir uygun ortamları oluşturur.

#### 3.1.1. Jeolojik koşullar

Genel olarak Holosen yaşlı delta ve akarsu çökelleri, yaşlı çökellere oranla sivilaşmaya karşı daha duyarlı zeminlerdir [10]. Yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden itibaren 10 m'den daha derin olduğu ortamlarda sivilaşma ender olarak gelişse bile, genel olarak yeraltı suyu seviyesinin 20 m'den daha derin olduğu ortamlarda sivilaşma beklenen bir durum değildir [9].

### **3.1.2. Zeminlerin maruz kaldıkları gerilme koşulları**

Gerilmeler altında zeminin taneleri daha iyi çökelmekte ve jeolojik sürece bağlı olarak çimentolanma oluşabilmektedir. Bu durum, zeminin sivilaşmaya karşı olan direncini arttırmaktadır [11].

### **3.1.3. Zeminin bileşimi ve sıklığı**

Çakıl tane boyutundaki malzeme miktarının fazla olması durumunda, zemin oldukça geçirimli olmakta ve aşırı gözenek suyu basınçları gelişmeden gözeneklerdeki su miktarı ortamdaki uzaklaşmaktadır. Önemli miktarda çakıl içeren (~%50) kumlu zeminlerin sivilaşma potansiyeli olduğu [12] tarafından belirtilmektedir. Ayrıca suya doygun çakıllı zemin seviyelerinin az geçirimli seviyeler tarafından kapatılması halinde, gözenek suyu basıncındaki artış etkisini gösteremeyince ve zemin sivilaşma problemi ile karşı karşıya kalmaktadır. Bunun en etkili örneği, 9.2 büyüklüğündeki 1964 Alaska depreminde sivilaşan (Şekil 3.1) çakıllı zeminlerdir [13].



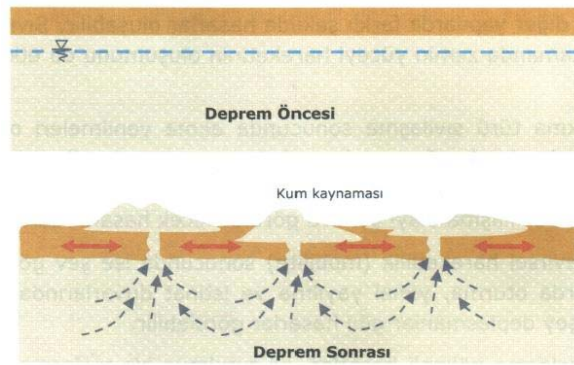


Şekil 3.1. Alaskada sıvılaşma[13].

#### 4. SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TİPLERİ

##### 4.1. Kum Kayması

Bir zemin kütleindeki aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle kum ve suyun borularak dışarı çıkması olayıdır [14]. Deprem sırasında oluşan boşluksuyu basıncının sönmüne ihtiyacı, boşluk suyunun yukarı yönde hareket etmesine neden olur (Şekil 4.1). Bu hareket, zemin taneciklerine yukarı yönde etki eden kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetler, bazı partiküllerin su ile beraber yüzeye kadar taşınmasına ve yüzeyde kum konileri oluşmasına yol açar. Şekil 4.2.'de 1999 Chi-Chi depreminde oluşan kum kayması görülmektedir.



Şekil 4.1. Kum Kayması [15].



Şekil 4.2. 1999 Chi-Chi depreminde oluşan kum kayması [15].

Şekil 4.3’de 2000 Tottori depreminde oluşan kum kaymaları görülmektedir.

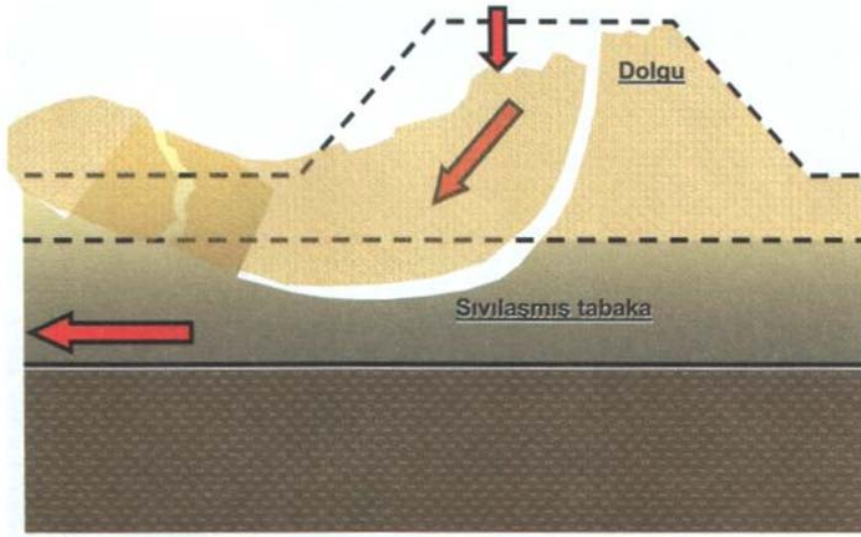


Şekil 4.3. 2000 Tottori depreminde oluşan kum kaymaları [15].

#### 4.2. Akma Göçmesi

Akma göçmeleri çoğunlukla 3.dereceden daha fazla eğimler de meydana gelirler (Şekil 4.4). Sıvılaşmanın neden olduğu en feci göçmelerdir. Ansızın ortaya çıkarlar.

Çabuk gelişirler ve çoğu zaman bir zemin kütlelerinin oldukça geniş şev, aşağı hareketini içerirler.



Şekil 4.4. Akma Göçmesi [15].

Şekil 4.5’de 1971 depreminde The Lower San Fernando Barajında oluşan akma göçmesi görülmektedir.

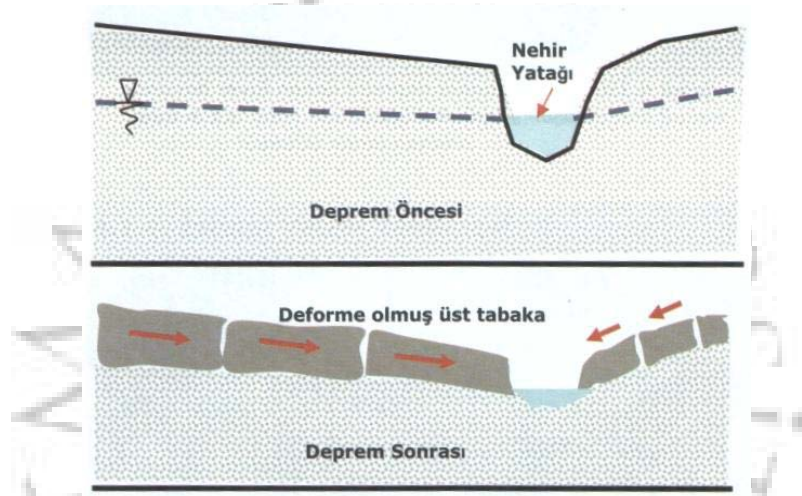


Şekil 4.5. 1971 depreminde The Lower San Fernando Barajında oluşan akma [15].



### 4.3. Yanal Yayılma

Genellikle çok az eğimli ( $0.3^{\circ}$ - $3^{\circ}$ ) yamaçlarda veya su kütlelerine komşu düzlüklerde gelişmektedir (Şekil 4.6). Yanal yayılımlar, altta bulunan zeminin sıvılaşmasını ve yüzeysel sediment blokların yanar deplasmanını ihtiva eder. Bu yayılımlar, çoğunlukla birkaç metre ile sınırlıdır. Bu gibi hareketler, tipik olarak dolgulara, liman tesislerine, boru hatlarına, köprülere ve yüzeysel temellere sahip diğer yapılara zarar vermektedir.



Şekil 4.6. Yanal Yayılma Oluşum Biçimi [15].

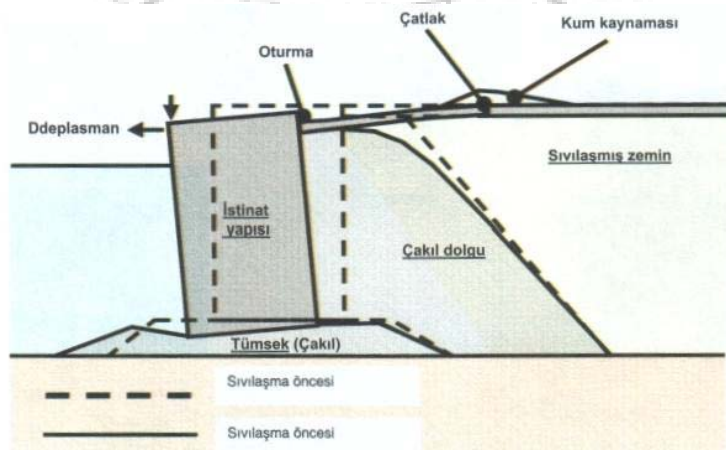
Şekil 4.7'de 1989 Loma Prieta depremde devlet parkı yakınında oluşan yanar yayılma oluşum biçimi görülmektedir.



Şekil 4.7.1989 Loma Prietadepreminde devlet parkı yakınında oluşan yanıl yayılma [15].

#### 4.4. İstinat Yapısı Yenilmesi

Sıvılaşmış temel zemininin destek kaybından veya istinat yapısı arkasındaki sıvılaşmış zeminden oluşan artan yanıl yüklerden kaynaklanır. Bu etkiler sonucu istinat yapısı düşey ve/veya yatay yönde deplasmanlara maruz kalır.



Şekil 4.8. İstinat yapısı yenilme biçimi [15].

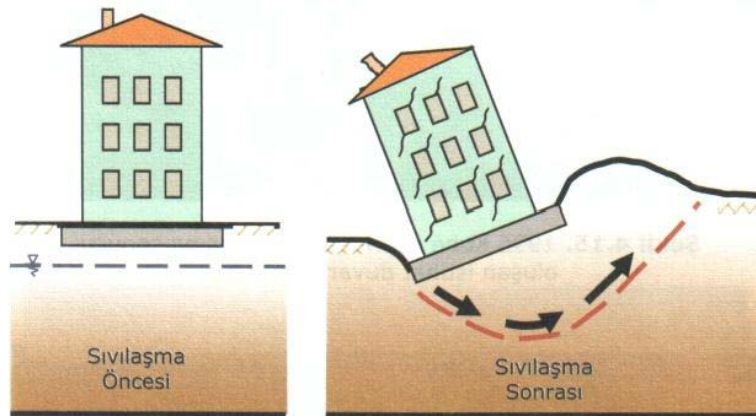
Şekil 4.9’da 1995 Kobe depreminde sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi görülmektedir.



Şekil 4.9. 1995 Kobe depreminde sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi [15].

#### 4.5. Taşıma Gücü Kaybı

Temel zemini sıvılaşma sonucu dayanımını kaybeder. Taşıma gücünü yitirir. Bunun sonucu, üzerinde bulunan yapılar batar, döner, yan yatar veya devrilir.



Şekil 4.10. Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi [15].

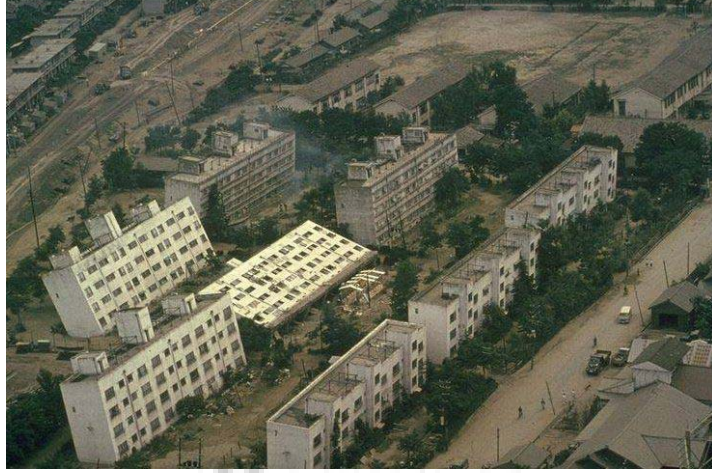
Şekil 4.11’de 1999 Türkiye depreminde Adapazarı ilinde sınılaşma sonucu devrilen binalar görülmektedir.



Şekil 4.11. 1999 Türkiye depreminde Adapazarı ilinde sınılaşma sonucu devrilen binalar [16].

Şekil 4.12’de 1964 Niigata depreminde sınılaşma sonucu devrilen binalar görülmektedir [9]. 1964 yılında meydana gelen Alaska (Mw9.2) ve Niigata (Mw7.6) depremleri esnasında oluşan zemin sınılaşması ve sınılaşmaya bağlı olarak meydana gelen oturmalar, taşıma gücü kayıpları, yanal toprak yayılması ve kaymalar oluşarak, bu depremlerden sonra sınılaşmanın mekanizması ve ne tür zeminlerin sınılaşma potansiyeline sahip olduğu konusunda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.





Şekil 4.12. 1964 Niigata depremi [9].

## 5. ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bir bölge için sivilaşmayı bulabilmek için belli parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar; O bölgede beklenen en büyük deprem büyüklüğü (M), Deprem oluşturabilecek kırığa en yakın uzaklık (d), O bölgede beklenen en büyük yer ivmesi (a), Yeraltı suyu düzeyi ve su tutan katman kalınlığı, Yeraltı kesiti ve katmanların türü (Kum, Kil, Silt Oranı Tane Boyu), Katmanların (Vs) kayma dalgası hızı ya da ( $N_{30}$ ) değerleri, Gözenek (boşluk) suyu basıncı (U), Yapının temel boyutu, ağırlığı ve oturuş biçimi, Katmanların doğal birim hacim ağırlığı ( $\gamma_n$ ), Toplam düşey gerilme ( $\sigma_v$ ), Efektif düşey gerilme ( $\sigma'_v$ ) gibi önemli parametrelerdir.

### 5.1. Kayma Gerilmesi Yaklaşımı

Bu yöntemin birinci aşamasında, zemin kesitinde bir deprem sırasında oluşacak tekrarlı/devirsel/periyojik (cyclic) kayma gerilmeleri oranı

$$\text{CSR (cyclic stress ratio)} = 0.65 (a_{\text{max/g}}) (\sigma_o / \sigma'_o) \cdot r_d \quad (5.1)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir

Bu bağıntıda ( $a_{\text{max/g}}$ ) yüzeyde oluşan en büyük yatay ivme değerini (g) cinsinden, ( $\sigma_o$ ) incelenen derinlikteki toplam düşey gerilmeyi (overburden stress) ve ( $\sigma'_o$ ) ise efektif düşey gerilmeyi, ( $r_d$ ) katsayısı ise derinlikle meydana gelen kayma gerilmesi azalmasını

gösteren bir düzeltme katsayısı olmaktadır. Bu katsayı üst 9.15 m için ( $r_d = 1.0-0.00765z$ ) ve 9.15m ile 23m derinlikler arasında ise ( $r_d = 1.174-0.0267z$ ) bağıntıları kullanılarak hesaplanabilir. Burada z metre cinsinden derinlikleri göstermektedir [17].

İkinci aşamada ise, zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı gösterdiği dayanım/direnç Standard Penetrasyon deneyinde bulunan düzeltilmiş SPT-N darbe sayısına veya jeofizik S dalga hızına bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

Bu hesaplarda N darbe sayısında enerji, derinlik ve ince dane yüzdesine göre düzeltmeler yapılmakta ve hesaplanan bu değere karşı gelen zeminin devirsel sıvılaşma direnci (CRR cyclic resistance ratio) bir gerilme oranı cinsinden [17] tarafından verilen grafikten yararlanarak bulunabilmektedir. Sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü ise bu şekilde bulunan sıvılaşma direnci ve tasarım/proje depremin o zeminde oluşturacağı devirsel kayma gerilmesi oranına bağlı olarak

$$GF_{siv} = CRR / CSR \quad (5.2)$$

CRR= Zeminin Oluşturduğu Devirsel Kayma Gerilmesi Oranı

CSR = Depremin Oluşturduğu Devirsel Kayma Gerilmesi Oranıdır.

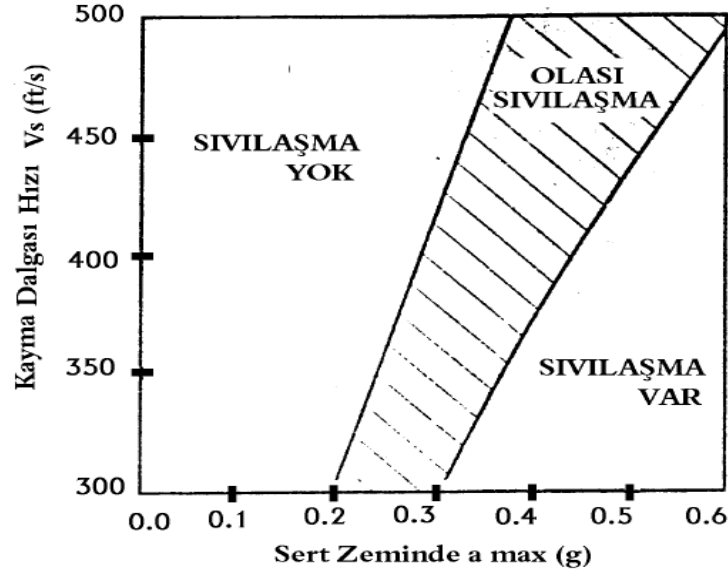
Güvenlik faktörü 1'e eşit veya küçük olması durumunda zemin tabakalarında sıvılaşma, 1-1.2 arasında olması sıvılaşma potansiyeli var 1.2'den büyük olması durumunda ise göz önüne alınan zemin tabakalarında sıvılaşma olmaz.

### **5.1.1. Sıvılaşma Direncini Belirlemede Jeofizik (S Dalga Hızı) Ölçümleri ve SPT (N) Değeri**

Yerinde jeofizik S dalga hızı ölçümleri ve buna bağlı çalışmalar; zeminin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde kullanışlı bir yöntem olarak kayma dalgası (S) hızının tanınmasına yol açmıştır (Şekil 5.1). Ölçülmüş kayma dalgası hızları aşağıdaki bağıntı yardımıyla 1 ton / feet<sup>2</sup> lik standart bir efektif üst katman (overburden) basıncı değerine n basıncı değerine normalize edilebilir.

$$V_{S1} = V_S (\sigma'_{vo})^{-1/n} \quad (5.3)$$

Burada  $\sigma'_{vo}$  ton / feet<sup>2</sup> biriminde ve n ise 3 [18] ve 4 [19] olarak alınabilir.



Şekil 5.1. Kayma Dalgası Hızı ve Pik Yer İvmesinden Sıvılaşma Potansiyelinin değerlendirilmesi için Abak [20].

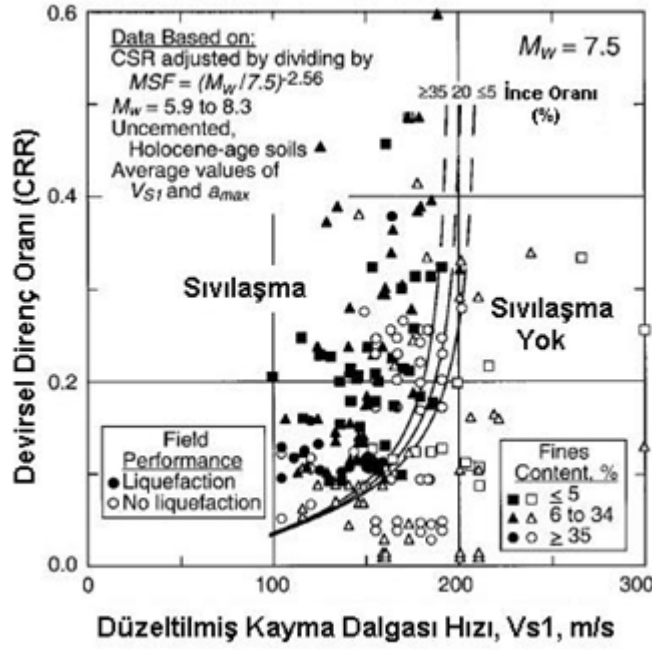
Çoğu ülkelerde, Standard Penetrasyon deneyi (SPT) zeminin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Bununla birlikte SPT değeri ortamın efektif gerilmesine bağlı olarak düzeltilmesi gerekmektedir (Şekil 5.2). Bu durumda düzeltilmiş SPT (N) değeri;

$$SPT_{\text{düzeltilmiş}} = C_N \cdot SPT_{\text{arazi}} \quad (5.4)$$

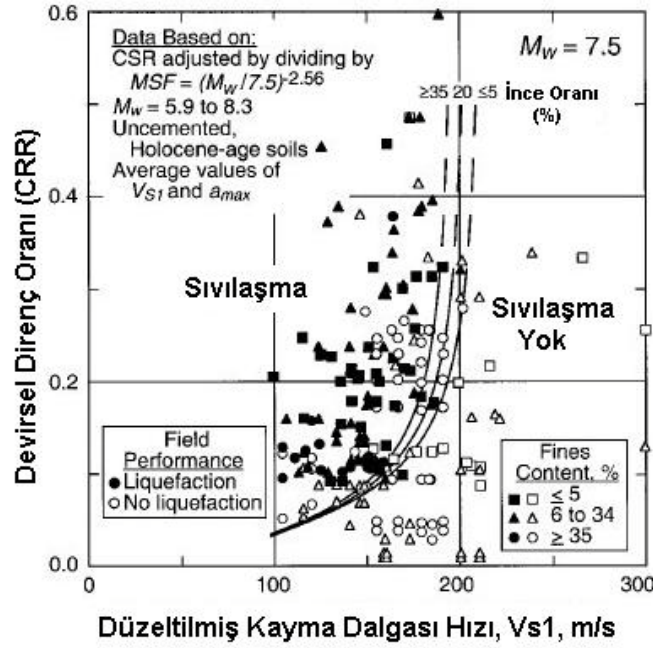
biçiminde verilmektedir. Burada  $C_N$  düzeltme faktörü

$$C_N = 1 / \sigma'_v \quad (5.5)$$

gibi tanımlanmaktadır ve burada  $\sigma'_v$  efektif gerilmedir.



Şekil 5.2.a Devirsel Gerilmesi Oranı ve Düzeltilmiş SPT değerleri arasındaki ilişki [22].



Şekil 5.2.b. Devirsel Direnç Oranı (CRR) ve Düzeltilmiş Vs hızı arasındaki ilişki [22].

### 5.1.2. Dobry ve diğ.(1981) yaklaşımı



Kayma dalgası hızı ile sıvılaşmanın değerlendirilmesine yönelik bir diğer yaklaşım [23] tarafından pik kayma streyni ölçütü kullanılarak verilmiştir. Bu yaklaşımda, deprem yer hareketi tarafından oluşturulan pik kayma streyni;

$$\gamma' = \tau_{\max(\text{mod})} / G \quad (5.6)$$

Burada; G kayma modülü ve  $\gamma'$  ise kayma streynidir. Yer hareketi tarafından oluşturulan kayma streyni ise;

$$\tau_{\max(\text{mod})} = CD [(\gamma h) a_{\max}] \quad (5.7)$$

$$\gamma' = (CD \rho h a_{\max}) / G = (CD h a_{\max}) / (G / \rho)(G_{\max} / G_{\max}) = (CD h a_{\max}) / [(G / G_{\max}) V_s^2] \quad (5.8)$$

$V_s$  zeminin kayma dalgası hızı ve  $G_{\max}$  ise maksimum kayma modülüdür.  $G / G_{\max}$  değeri yaklaşık 0.8 varsayılırsa ve bu ortalama bir CD (zeminin deforme olabilir karakteri için kayma gerilmesi azaltma faktörü) değeri alınırsa

$$\gamma' = 1.2 a_{\max} h / V_s^2 \quad (5.9)$$

Derinlik ile  $V_s$  bilindiği takdirde  $\gamma$  değerinin değişimi hesaplanabilir. Eşik streynin tipik değeri % 0.01.dir. Eğer hesaplanmış  $\gamma'$  değeri bu eşik sınırı aşmıyorsa, o vakit sıvılaşmaya karşı güvenlik vardır.

### 5.1.3. Başlangıç ivmesi yöntemi

Bu yöntemde kullanılan güvenlik sayısı,  $F_a$ , aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F_a = a_d / a_{\max} = 1.6 \times a_t / a_{\max} \quad (5.10)$$

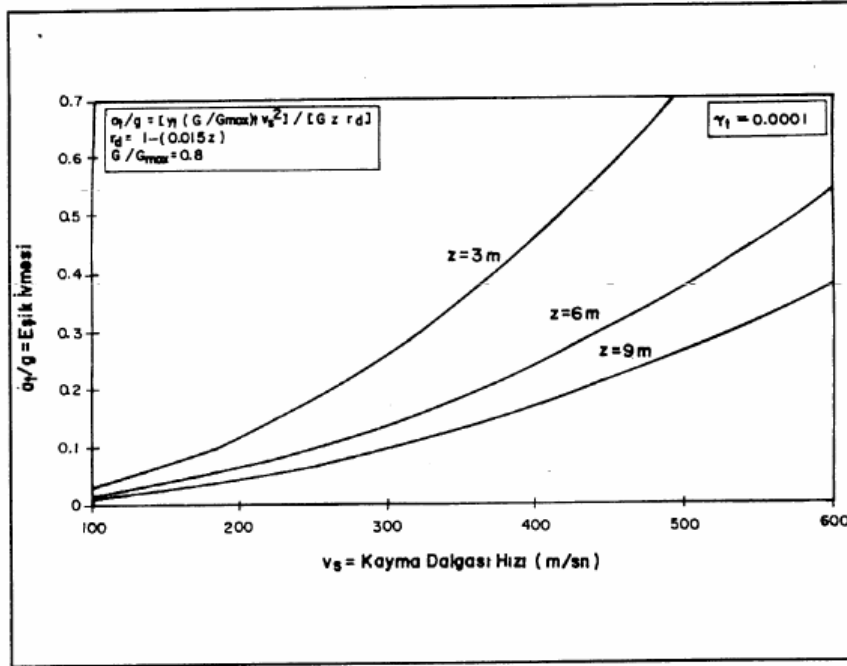
Burada,  $a_t$ ; Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli başlangıç (eşik) ivmesi,  $a_{\max}$ ; Deprem meydana getirebileceği varsayılan maksimum ivme,  $a_d$ ; Tasarım ivme değeridir.

$F_a < 1$  ise sıvılaşma riski yüksek  $F_a > 1$  ise sıvılaşma riski düşük olarak kabul edilir.

$$\tau = a / g \times \sigma_v \times r_d \quad (5.11)$$

$$r_d = 1 - 0.0015 \times z \quad (5.12)$$

Burada;  $v$  ; Toplam düşey gerilme,  $g$  ; Yerçekimi ivmesi,  $r_d$  ; Derinliğe balı olarak değişen gerilme düzeltme sayısıdır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Başlangıç ivme değerleri önerisi [23].

## 6. ÖRNEK SIVILAŞMA ANALİZİ

Aşağıdaki laboratuvar ve arazi verileri için hem S dalga hızına hem de SPT değerine göre  $M=7,5$  ve  $a=0,4g$  lik ivme için yeraltı suyunun 1m'de olduğu durum için sıvılaşma analizi yapınız.

**Tablo 1.** SPT ve Vs hızı arazi verileri ve laboratuvar verileri

Araştırma Derinliği	SPT (Arazi)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	FC (İnce Oranı)	Vs (arazi) m/s
1,8	15	1,7	5	120
3,3	18	1,8	5	143
4,8	18	1,8	5	143
6,3	18	1,8	5	143
7,8	18	1,8	5	143
9,3	18	1,8	5	143
10,8	18	1,8	5	143
12,3	18	1,8	5	143
13,8	18	1,8	5	143
15,3	18	1,8	5	143
16,8	18	1,8	5	143
18,3	18	1,8	5	143
19,8	18	1,8	5	143
21,3	18	1,8	5	143

Çözüm : SPT verileri için elde edilen değerler aşağıda verilmiştir. CRR değerleri Şekil 5.2. a ve b 'den elde edilir. CSR değeri 5.1 formülünden elde edilmiştir. GK değeri = CRR/CSR'den hesaplanmıştır. SPT Arazi değeri önce enerji oranı düzeltmesi için 45/60 değeri ile ve sonra efektif gerilme düzeltmesi ( $CN = (100/\rho_v)^{0.5}$ ) ile çarpılmıştır. Sonra bulunan değer CN, CB ve CR düzeltme katsayıları ile çarpılmış ve N1(60) elde edilmiştir.

**Tablo 2.** SPT Verilerine göre sıvılaşma analizi ve Elde edilen parametreler

$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_v'$ (kPa)	CN	CB	CS	CR	N1(60)	.rd	CRR (Z)	CSR (D)	Gk
30,0	22,2	1,7	1,0	1,0	0,80	5,1	0,9881470	0,07281	0,348	0,21
56,5	33,9	1,7	1,0	1,0	0,80	18,4	0,9773893	0,19590	0,423	0,46
83,0	45,7	1,48	1,0	1,0	0,80	16,0	0,9669309	0,16999	0,456	0,37
109,5	57,5	1,32	1,0	1,0	0,80	14,2	0,9551352	0,15255	0,473	0,32
136,0	69,3	1,20	1,0	1,0	0,80	13,0	0,9397014	0,14033	0,480	0,29
162,5	81,0	1,11	1,0	1,0	0,80	12,0	0,9179441	0,13116	0,478	0,27
188,9	92,8	1,04	1,0	1,0	0,80	11,2	0,8875651	0,12395	0,470	0,26
215,4	104,6	0,98	1,0	1,0	0,80	10,6	0,8478937	0,11810	0,454	0,26
241,9	116,3	0,93	1,0	1,0	0,80	10,0	0,8008678	0,11323	0,433	0,26
268,4	128,1	0,88	1,0	1,0	0,80	9,5	0,7507104	0,10910	0,409	0,27
294,9	139,9	0,85	1,0	1,0	0,80	9,1	0,7022129	0,10554	0,385	0,27
321,4	151,7	0,81	1,0	1,0	0,80	8,8	0,6589112	0,10244	0,363	0,28
347,9	163,4	0,78	1,0	1,0	0,80	8,4	0,6223666	0,09970	0,344	0,29
374,3	175,2	0,76	1,0	1,0	0,80	8,2	0,5925368	0,09726	0,329	0,30



**Tablo 2.** Vs hızı verilerine göre sıvılaşma analizi ve elde edilen değerler

Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	CRR (z)	Gk
120	1,46	174,88	0,1211	0,35
143	1,31	187,35	0,1635	0,39
143	1,22	173,91	0,1186	0,26
143	1,15	164,23	0,0974	0,21
143	1,10	156,75	0,0843	0,18
143	1,05	150,72	0,0750	0,16
143	1,02	145,70	0,0679	0,14
143	0,99	141,41	0,0622	0,14
143	0,96	137,69	0,0576	0,13
143	0,94	134,41	0,0537	0,13
143	0,92	131,49	0,0503	0,13
143	0,90	128,86	0,0473	0,13
143	0,88	126,47	0,0447	0,13
143	0,87	124,29	0,0423	0,13

Sıvılaşma analizinin yapıldığı bu çalışma [24] ve [25] de teorik ve bilgisayar programı olarak ayrıntılı açıklanmıştır.

## 7. SONUÇLAR

Sıvılaşma, olayının insan hayatına ve ekonomiye olan olumsuz etkilerinden dolayı bu konuda yapılan araştırmalar günden güne artmakta ve gittikçe önem kazanmaktadır. Kum – siltli kum gibi zeminler içeren tabakaların, bir deprem esnasında sıvılaşma potansiyelini saptayabilmek amacıyla arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilebilen zemin ve sismik parametrelerin bir arada kullanıldığı birçok kriterler, deneysel formüller ve ampirik bağıntılar mevcuttur. Bütün bu kriterler bir arada değerlendirilerek sıvılaşma hesaplarının yapılması gereklidir.

Sıvılaşmanın arazide bütün zemin tabakalarında oluşmadığı bilinmektedir. Bu nedenle sıvılaşma tehlikesi analizlerinde öncelikli olarak sıvılaşmanın meydana gelmesi için gerekli koşulların mevcut olup olmadığının incelenmesi gerekmektedir. Bu koşullar

arasında en önemlilerinin deprem büyüklüğü ve merkezine uzaklık, zemin tabakasının genel durumu ve jeolojik yapısıdır. Herhangi bir mühendislik yapısının inşasından önce arazinin sismik geçmişine bakarak sıvılaşma tehlikesi açısından durumu ve bölgeye ait mikrobölgeleme çalışmaları sonucunda elde edilen haritalar da sıvılaşmayı belirleyen diğer önemli etkenlerdir.

## KAYNAKLAR

- [1] Terzaghi, K., 1925. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Vienna, Deuticke.
- [2] Castro, G. 1969. Liquefaction of sands, Harvard Soil Mechanics Series, No.87 Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- [3] Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2000, *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, Beta Yayınevi, İstanbul.
- [4] Seed, H. B., Idriss, I.M., 1982, Ground Motion and Soil Liquefaction during Earthquakes, Monograph Series, Earthquake Engineering Reserch Institute, University of California, Berkeley, California.
- [5] Youd, T.L., 1992. Liquefaction, ground failure, and consequent damage during the 22 April 1991 Costa Rika Earthquake. Proceedings of the NSF/UCR US.Costa Rica Workshop on the Costa Rika Earthquakes of 1990-1991, April 2 – 4, 1992, Effects on Soils and Structures, Oakland, California, ERI Publication, No: 93-A, 73-75.
- [6] Özçep, F., Aşçı, M., Karabulut, S., Alpaslan, N., Yas, T., 2004, Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi, Uygulamalı Yerbilimleri, Cilt:3, Sayı:2, Sayfa: 11-22.
- [7] Uyanık O. (2002): “Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi”, DEU. Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi), s.190, İzmir (yayınlanmamıştır).
- [8] Anonymous, 2006a. Why does liquefaction occur? Explanation. On-line: <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/why/why1.html>. Accessed at 08 August, 2006.
- [9] Youd, T. L. 1984. Geological effects-liquefaction and associated ground failure. Geological and Hydrogeological Hazards Training Program, United States Geological Survey Open-File Report 87-76, 210-232.
- [10] Youd, T. L. and Perkins, D. M. 1978. Mapping liquefaction-induced ground failure potential. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 104 (GT4), 433-446.
- [11] Seed, H.B. 1976, Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes. ASCE National Convention on Liquefaction Problems in Engineering, P.A., pp. 27-52.
- [12] Youd T.L., vd., 1985, “The Borah Peak, Idaho earthquake of October 28, 1983-liquefaction” Earthquake Spectra, Vol.2 (1): 71-89.
- [13] Obermeier, S. F. 1996, Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. Engineering Geology, 44, 1-76.

- [14] Wang, J.G.Z.Q. and Law, K.T., 1994. Siting in Earthquake Zones, Balkema, Rotterdam, 115 p. 433-446.
- [15] Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F. 2006., Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi kitapevi, Ankara.
- [16] [http://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/d50601b7bc18501\\_ek.pdf](http://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/d50601b7bc18501_ek.pdf)
- [17] Youd, T.L. ve Idriss, I.M., 1997, Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *Proceedings of the NCEER Workshop*, Technical Report NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research.
- [18] Tokimatsu, K., Kuwayama, S., Tamura, S., 1991, Liquefaction Potential evaluation based on Rayleigh wave investigation and its comparison with field behaviour, *Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advanced Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol.1, pp357-364.
- [19] Kayen, R.E., Mitchel, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S., Cotinho, R., 1992, Evaluation of SPT-CPT and Shear wave based method for liquefaction potential assesmentusing Loma Prieta data, *Proceedings, 4th US - Japon Workshop on Earthquake Resistant design of lifeline facilities and countermeasures for Soil Liquefaction*, Vol.1, pp177-204.
- [20] Stokoe, K.H., Roeset, J.M., Bierschwalle, J.G., Aouad, M., 1988, Liquefaction potential of sands from shear wave velocity, *Proceedings, 9nd World Conference on Earthquake*, Vol.13 pp213-218.
- [21] Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, USA
- [22] Seed HB, Idriss IM, Arango I 1983, "Evaluation of liquefaction potential using filed performance data", *Journal of Geotechnical&Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 109(3):458-482.
- [23] Dobry, R., Stoke, K.H., Land, R.S., Youd, T.L., 1981, Liquefaction for S wave, Preprint 81-544, *ASCE National Convention*, St Lois, Missouri
- [24] Özçep, F., 2009, *Zeminlerin Geoteknik ve Jeofizik Analizi (İnşaatların Tasarımı Sürecinde)*, Nobel Yayın, 609 Sayfa, ISBN No: 978-605-395-177-3, Ankara.
- [25] Ozcep, F., 2010, *SoilEngineering: a Microsofts Excel® Spreadsheet© Program for Geotechnical and Geophysical Analysis of Soils, Computers & Geosciences*, Volume 36, Issue 10, October 2010, Pages 1355-1361.