



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
MEKANSAL PLANLAMA
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ



SIVILAŞMA VE YANAL YAYILMANIN MEKANSAL PLANLAMA AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ALINACAK ÖNLEMLER

*Yer Bilimsel Etüd Dairesi Başkanlığı
Eğitim Seminerleri Serisi - 2*

Hazırlayan: Doç. Dr. Mustafa K. Koçkar
Hacettepe Üniversitesi

21 Şubat 2022 – Saat 14:00



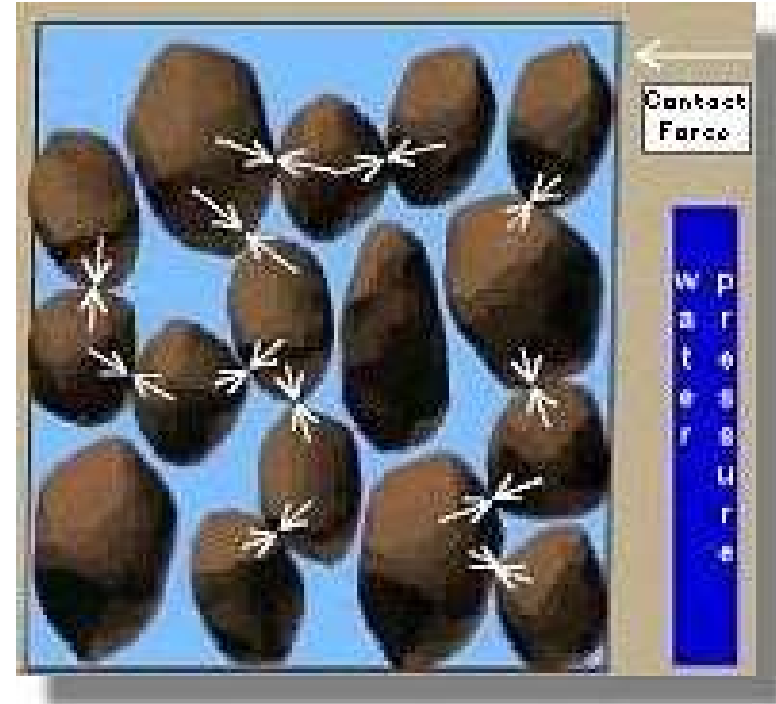
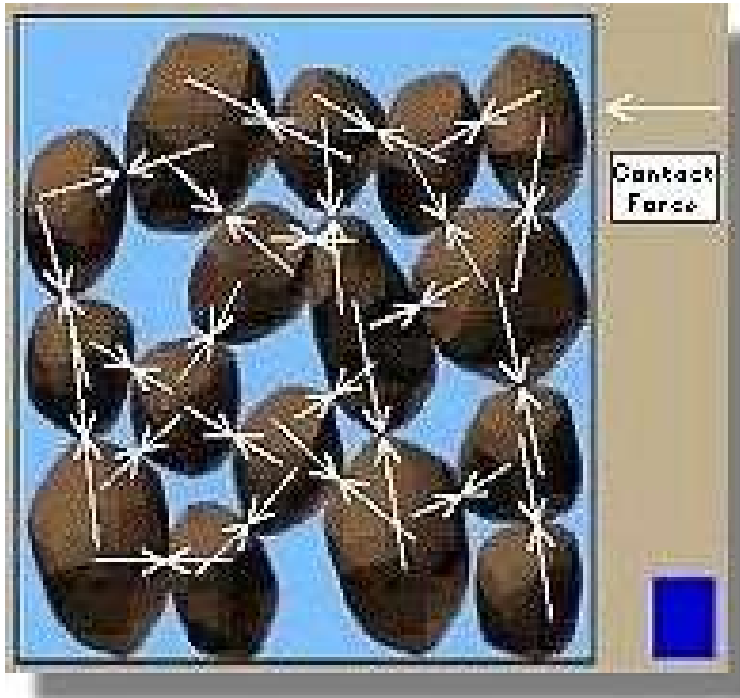
HACETTEPE
ÜNİVERSİTESİ

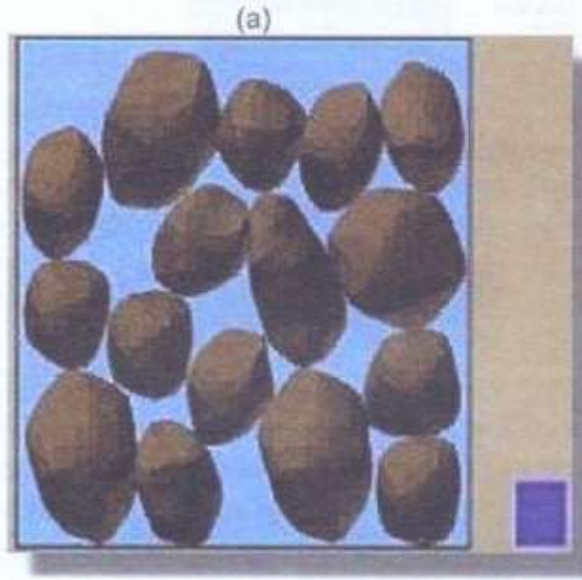
İçerik

- Sıvılaşma ve Yanal Yayılmanın Tanımı,
- Sıvılaşma bağlı zemin yenilme mekanizmaları,
- Deprem esnasındaki zemin davranışları,
- Sıvılaşma tehlikesinin değerlendirilmesi ve analiz aşamaları,
- Zemin Sıvılaşmasının TBDY 2019' a göre değerlendirilmesi
- Sıvılaşma Sonrası Alınacak Önlemler
- Sahaya Özel Zemin Davranış Analizleri

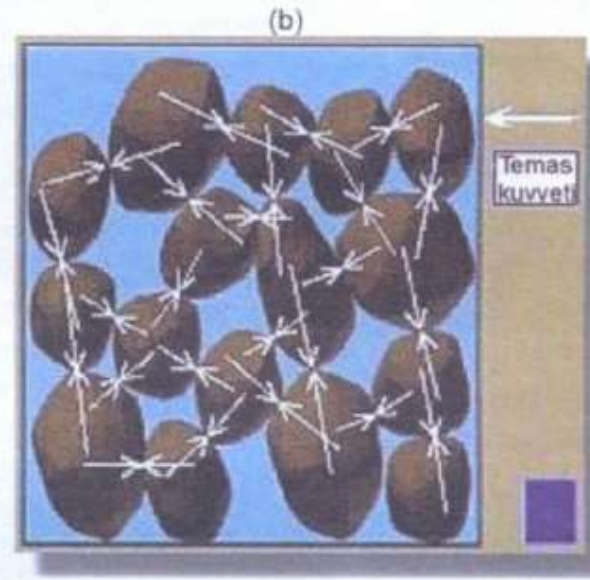
SIVILAŞMA

Özellikle suya doymun gevşek kohezyonsuz zeminlerin deprem sırasında oluşan tekrarlı gerilmeler nedeniyle zeminin boşluk suyu basıncındaki aşırı artışına paralel kayma mukavemetindeki ve rijitliğindeki ciddi düşüş **sivilaşmaya** neden olur. Efektif gerilmelerin bu esnada çok küçük değerlere inmesi sonucu, zemin kayma direncini tamamen yitirmekte ve bir sıvı gibi hareket etmektedir.

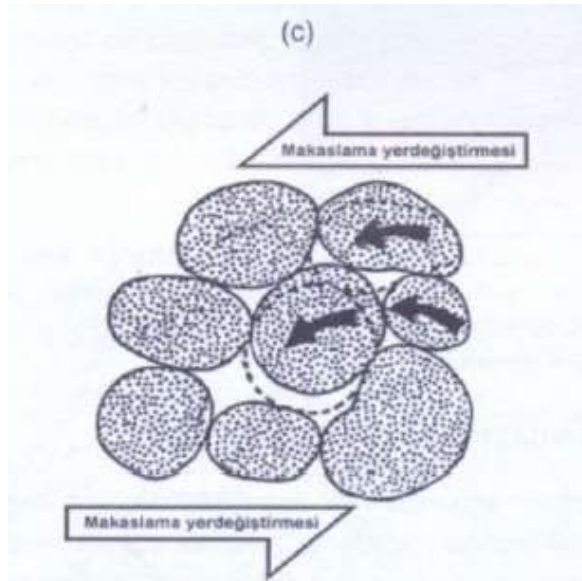




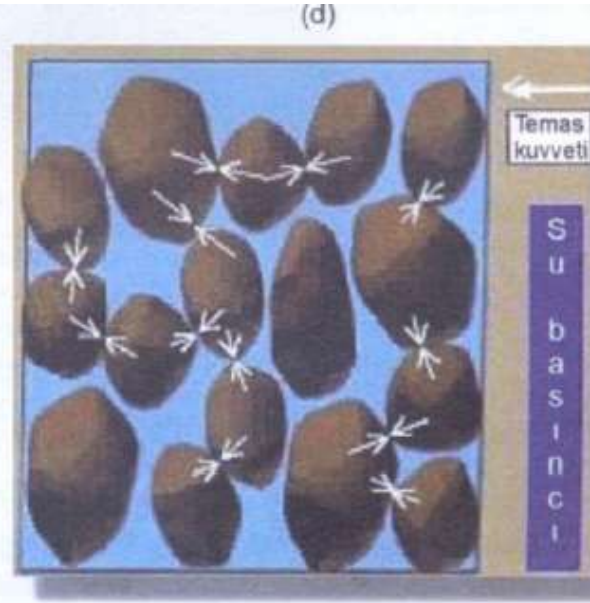
Zemin tanelerinin deprem öncesi görünümü (boşluk suyu basıncının seviyesini sağdaki mavi renkli kolon göstermektedir)



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

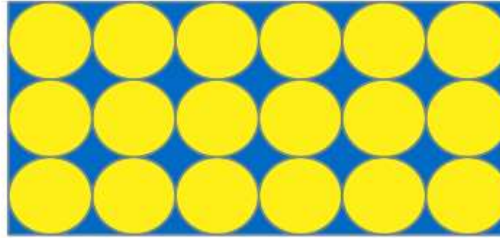


Depremiñ neden olduğu makaslıma yerdeğiştirmesiyle zemini oluşturan tanelerde sıvılaşma sürecinin gelişmesi

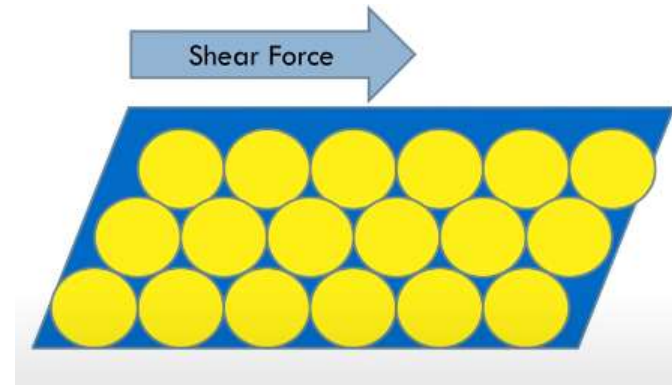
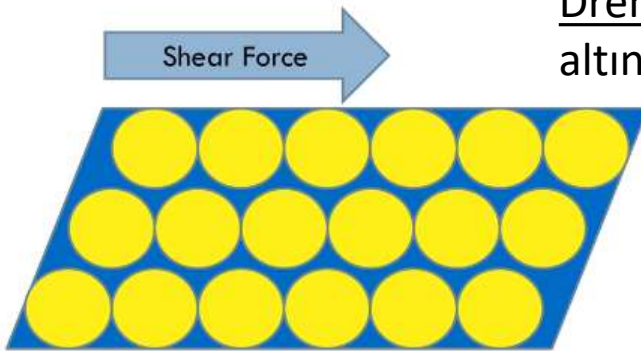


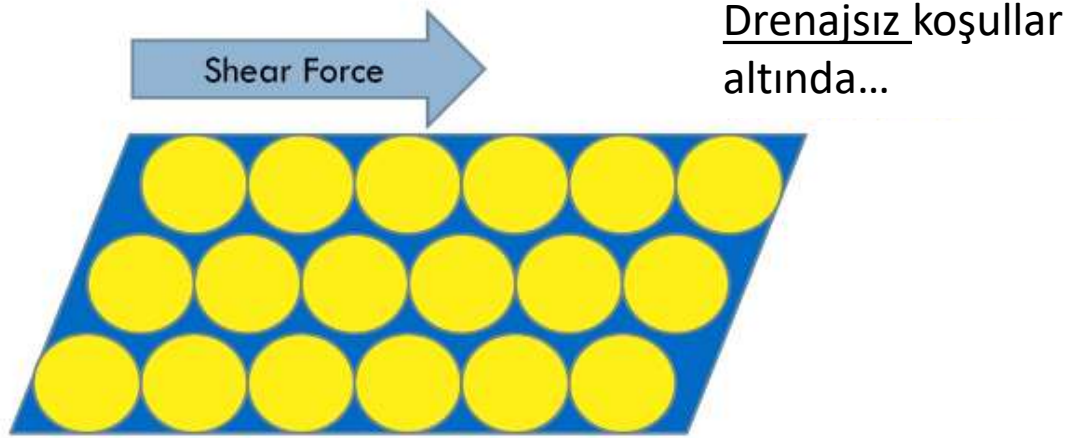
Boşluk suyu basıncının ani artışıyla taneler arasındaki temasın yitimi

Suya doygun gevşek kum
düşünelim..



Drenajlı koşullar
altında...



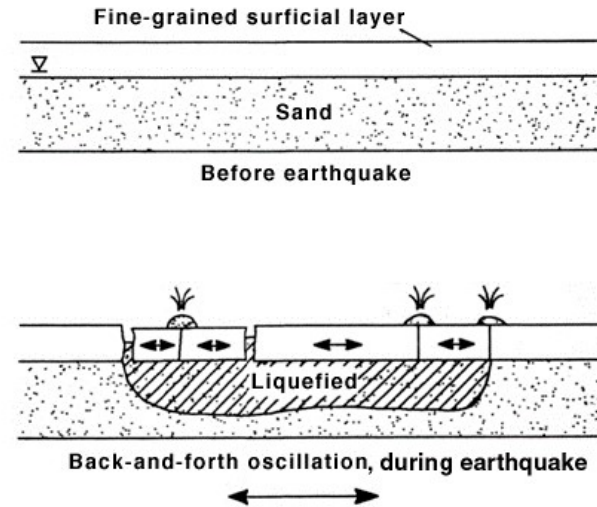
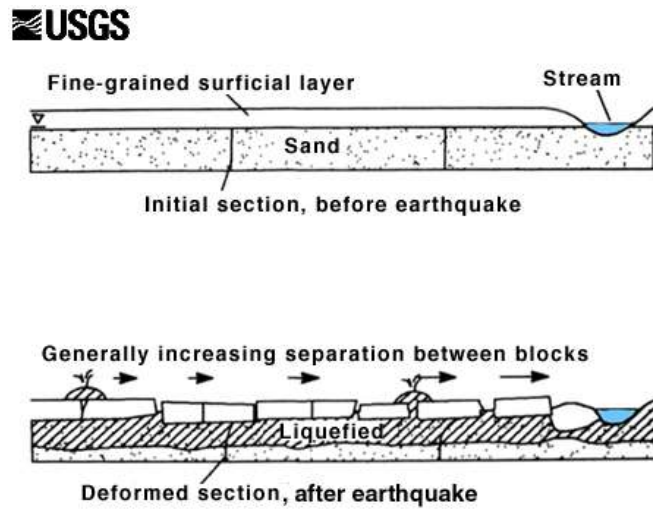


Boşluk suyu kaçamaz. Zemindeki tanelerin birbirleriyle bağlantısı azalır ve yüzmeye başlar (hydroplane). Kesme mukavemeti çok azdır veya hiç yoktur.

GEÇİCİ SÜRELİ...

Sıvılaşma bağılı zemin-yapı yenilme şekilleri

1-Çevrimsel sıvılaşma-mobilite (cyclic liquefaction): statik kayma gerilmeleri sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetini aşmadığı durumlarda ortaya çıkmakla birlikte, kabul edilebilir seviyelerin üzerinde kalıcı şekil değiştirmelere yol açabilmektedir.



Çevrimli sıvılaşmada deprem esnasında şekil değiştirmeler adımsal olarak artarak göçmelere yol açabilmektedir.

Devirsel hareketlilik (çevrimli sivilaşma-mobilite)



Volkan konileri

Devirsel hareketlilik (çevrimsel sıvılaşma-mobilite)



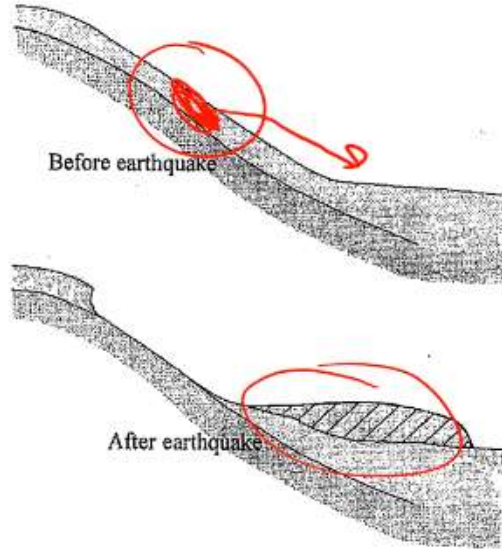


2011 Japonya Tohoku Depremi Sıvılaşma sonrası taşıma kapasitesi yenilmesi

Sıvılaşıma bağılı zemin yenilme mekanizmaları

2- Akma sıvılaşması (flow liquefaction): sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetinin zemin kütlesinin statik dengesi için gereken kayma direncinden daha az olması durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda statik kayma gerilmeleri altında zeminde büyük şekil değiştirmeler oluşmakta ve akma göçmesi meydana gelmektedir.

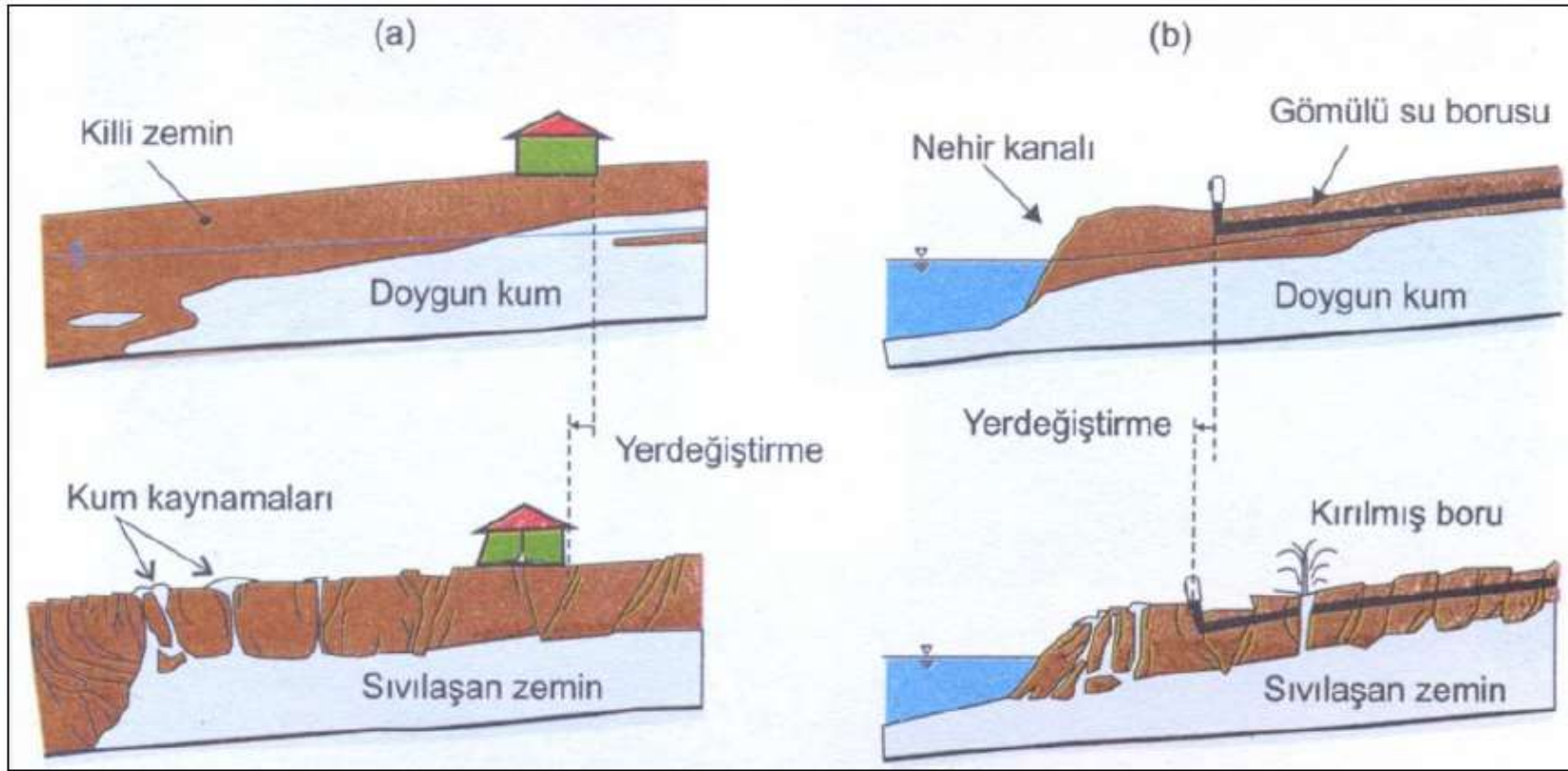
1) Flow Liquefaction



Sudden and usually catastrophic soil deformations. Soil cannot “stand under its own weight.”

a) Eğimli bir yamaçta

b) serbest yüzeye doğru gelişen yanal yayılma



Rauch, 1997

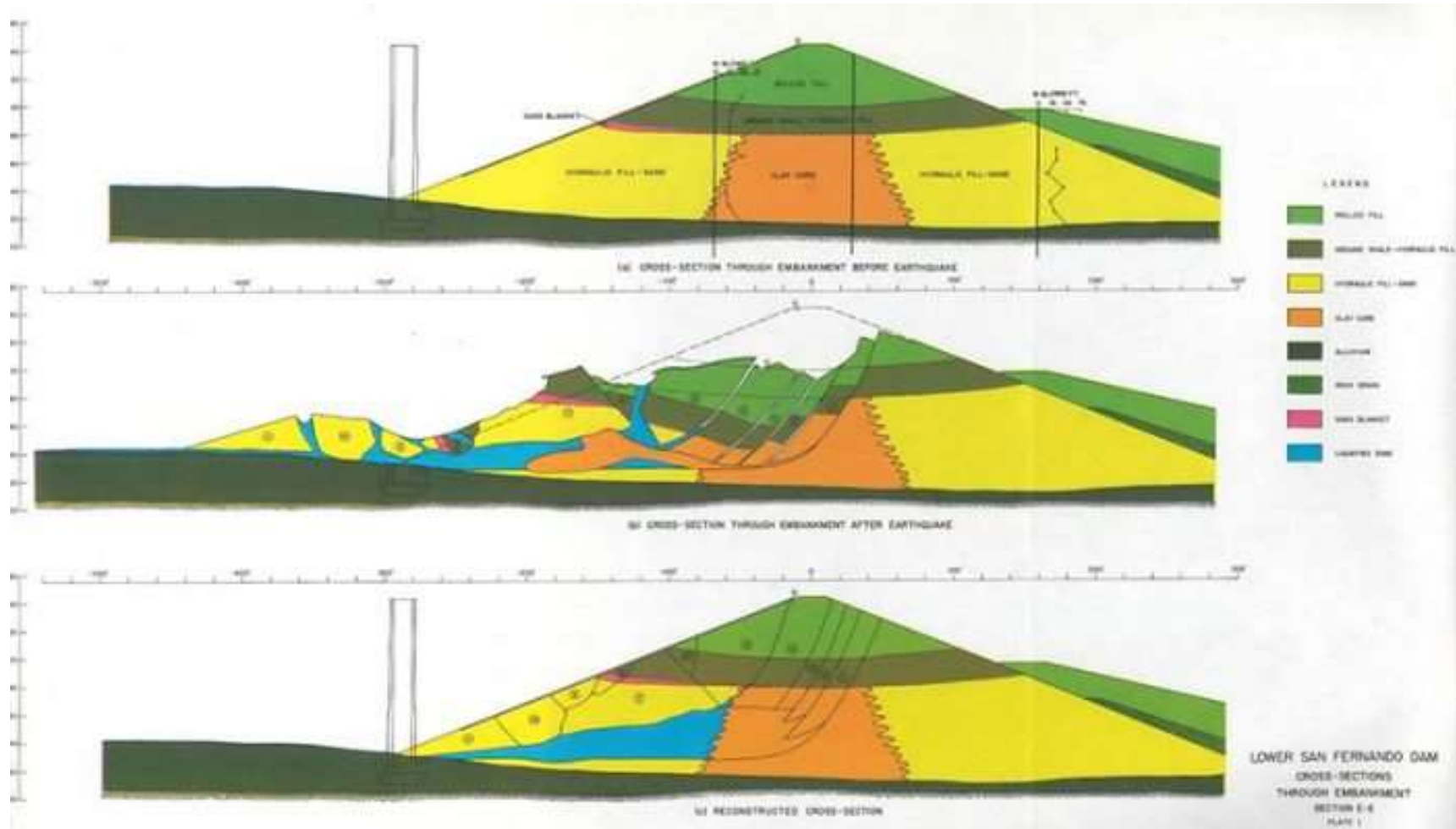
Akma sivilařması



San Fernando depreminden sonra (1971)



Kobe depreminden sonra (1995)



San Fernando baraj yenilmesi, San Fernando depreminden sonra (1971)

Akma sivilařması



1999 Kocaeli Depreminden yanal yayılmaya bağlı akma sivilaşması görüntleri



1999 Kocaeli Depreminden
yanal yayılmaya bağlı akma
sıvılaşması görüntleri



- Sıvılaşma Tehlikesinin değerlendirilmesinde aşağıdaki soruları cevaplamak suratiyle sıvılaşma tehlikesi sistematik olarak değerlendirilebilir.
 - Zemin sıvılaşmaya karşı duyarlı mıdır?
 - Şayet duyarlı ise, sıvılaşma oluşur mu?
 - Eğer sıvılaşma gerçekleşirse zarar meydana gelir mi?
- Bu sorular, sıvılaşma tehlikesi analizinin en önemli üç özelliği ile ilişkilidir: *duyarlık, başlama ve etkiler*.

Sıvılaşmaya Karşı Duyarlılık

Duyarlılığı değerlendirmek için kullanılan kriterler:

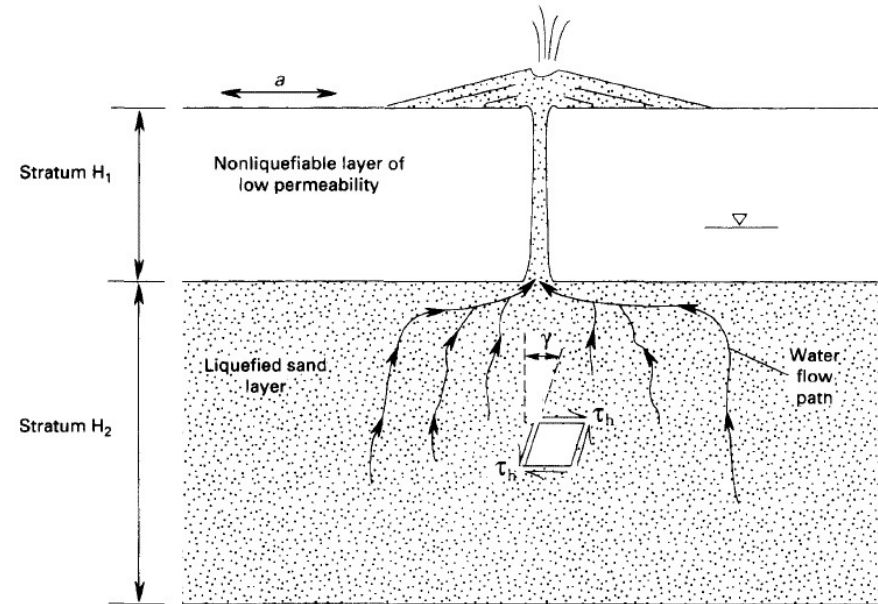
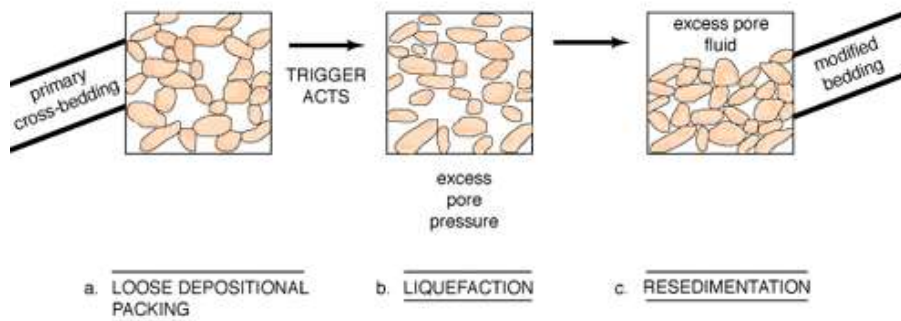
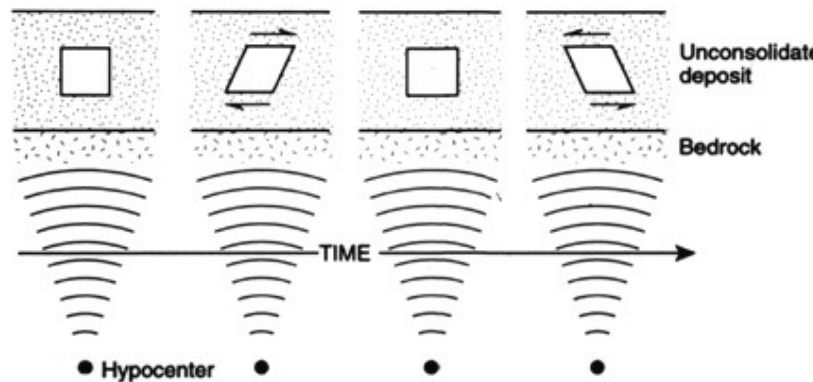
1-Tarihsel kriterler: Geçmişte sıvılaşma görülmüşse, sıvılaşmaya duyarlı olduğunu önceden tahmin edebiliriz demektir.

2-Jeolojik kriterler: Sıvılaşma zeminlerin çökelme ortamı, türü, yaşı ve yeraltı su derinliğine bağlıdır. Genellikle, jeolojik anlamda Alüvyal, fluviyal ve aeolian vb. genç ve gevşek çökellerin, özellikle kum ve silt tane boyutundaki malzemelerin depolandığı ve yeraltı suyunun sığ/yüzeye yakın olduğu ortamlar, sıvılaşmanın gelişmesi açısından en uygun ortamlardır.

Bu ortamlarda egemen çökelme süreçleri, tanelerin iyi boylanmış ve gevşek halde depolanmasına neden olmaktadır. Depremler sırasında özellikle ince-orta taneli ve düşük plastisiteli kumları içeren çökeller sıvılaşmaya en fazla maruz kalan zeminlerdir (Ishihara, 1995).

1-Tarihsel kriterler

- Paleosivilaşma



(a: yatay ivme; τ_h : yatay ivmeden kaynaklanan makaslama gerilmesi; γ : makaslama yerdeğiřtirmesi)

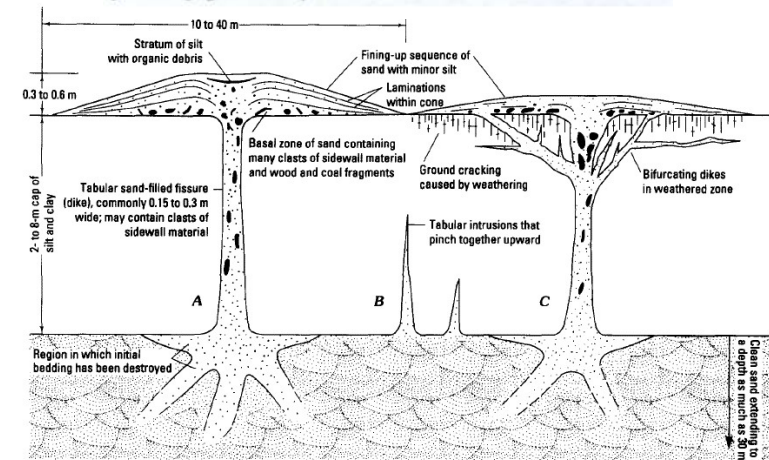
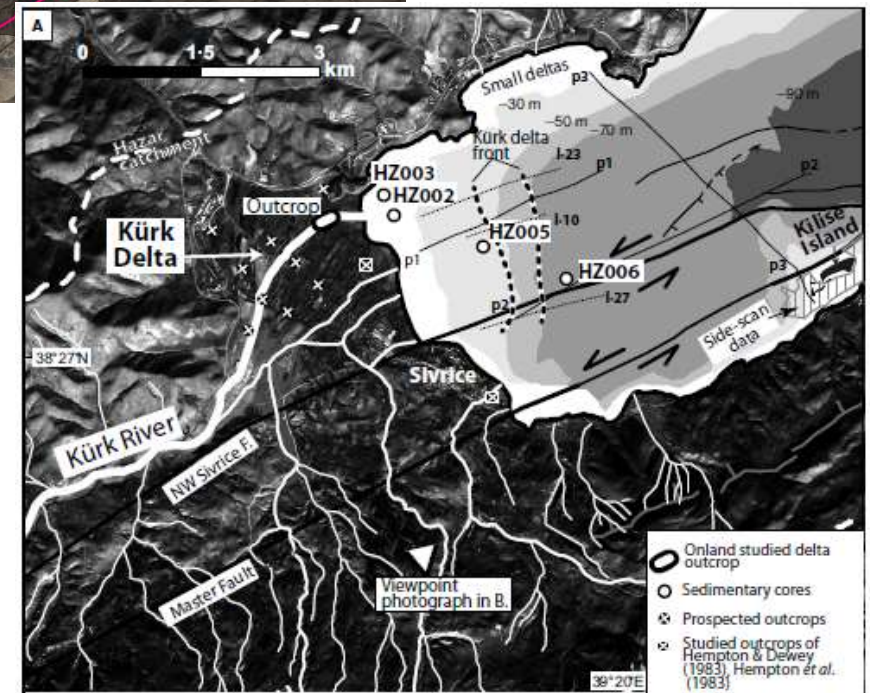


Fig. 19. Schematic vertical section showing dikes cutting through overbank silt and clay strata and showing the overlying sand-blow deposits. (A) Stratigraphic details of sediment vented to the surface. (B) Dikes that pinch together as they ascend. (C) Characteristics of dikes in fractured zone of weathering, in highly plastic clays. Situations shown are found in many places in the meizoseismal zone of the 1811–1812 New Madrid earthquakes.



Hubert-Ferrari ve diğ., 2017 (M > 7 1874 and M ~ 6.5 1875 depremleri; Kaynak: Ambraseys, 1989).

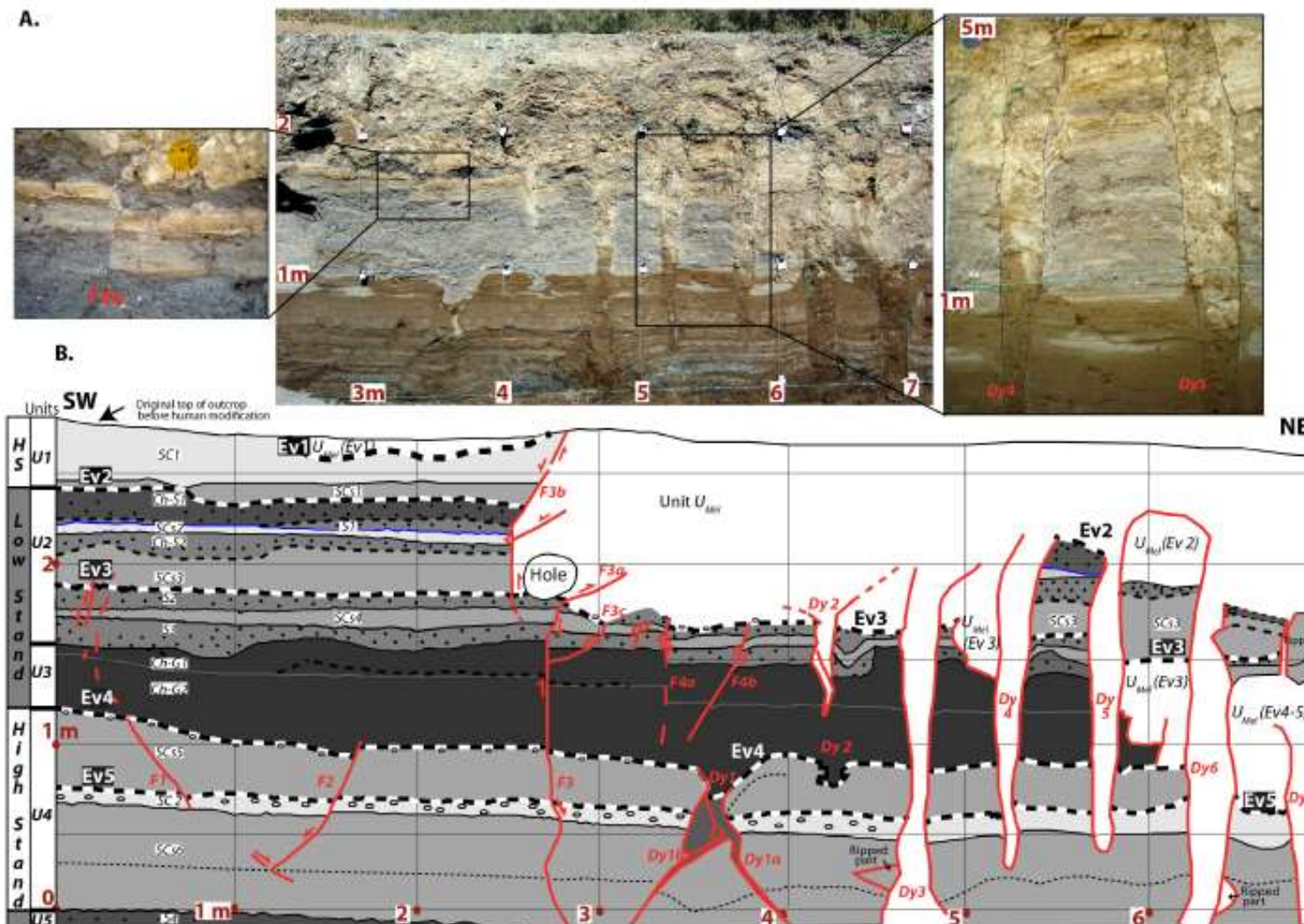


Fig. 8. Studied section through the onland delta plain (see location in Figs 2A and 5). (A) Photograph with enlargements on the right and left showing liquefaction dykes and fractures. (B) Outcrop log showing four sedimentary units emplaced during periods characterized by different lake levels. In particular, the top clay unit *U1* was deposited during a highstand, and the coarse-grained units *U3* and *U2* are characterized by the occurrence of channels during a lowstand. The stratigraphy is disrupted by dyking and the associated brittle deformation related to repeated earthquake liquefaction characterized by the concomitant deposition of the chaotic unit, *U_{del}* and by lateral spreading. Five different event horizons are identified.

Hubert-Ferrari ve diğ., 2017 (M > 7 1874 and M ~ 6.5 1875 earthquakes; Ambraseys, 1989).

Sivrice Merkez - Kürk Deltası



Elazığ-Sivrice depremi (M_w 6.8) – Sıvılaşma -Yumuşama
24 Ocak 2020

2-Jeolojik kriterler

Mekansal açıdan ön Jeolojik Değerlendirme: Bu ön çalışmalar aşağıdaki başlıklar altında yapılır.

- (a) potansiyel olarak sıvılaştırılabilir zemin tiplerinin mevcut olup olmadığı,
- (b) potansiyel olarak sıvılaştırılabilir durumda olup olmadıkları ve
- (c) saha stratigrafisi ve proje/alan geometrisinin bu zeminlerin potansiyel sıvılaşmasını için “tehlike” meydana getirip getiremeyeceği incelenebilir.

Çökelim tipi	Çökelim ortamlarına göre kohezyonsuz sedimentlerin genel dağılımı	Kohezyonsuz sedimentlerin doymuş hale gelmesi durumuna göre sıvılaşmaya potansiyelleri (çökelim yaşına göre)			
		<500 yıl	Holosen	Pleyistosen	Pleyistosen öncesi
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

(a) Karasal Çökeller

Nehir yatağı	Yerel olarak değişken	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Çok Düşük
Taşkın düzlükleri	Yerel olarak değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Alüvyon yelpazesi ve düzlükler	Yaygın	Orta	Düşük	Düşük	Çok Düşük
Denizel taraçalar and düzlükler	Yaygın	—	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük
Delta ve yelpaze-deltası	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Göller ve playalar	Değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Kolüviyum	Değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Yamaç molozu	Yaygın	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük
Kumul	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Lös	Değişken	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Bilinmiyor
Buzul tili	Değişken	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük
Tüf	Nadir	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük
Tefra	Yaygın	Yüksek	Yüksek	?	?
Rezidüel zemin	Nadir	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük
Sebka	Yerel olarak değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük

(b) Kıyı Bölgesi

Delta	Yaygın	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Çok Düşük
Nehir ağzı	Yerel olarak değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Kumsallar					
Yüksek dalga enerjili	Yaygın	Orta	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük
Düşük dalga enerjili	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Lagün	Yerel olarak değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Kıyı şeridi	Yerel olarak değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük

(c) Yapay

Sıkıştırılmamış dolgu	Değişken	Çok yüksek	—	—	—
Sıkıştırılmış dolgu	Değişken	Düşük	—	—	—

Güçlü bir sismik sarsıntı sırasında sedimanter çökellerin sıvılaşmaya karşı tahmini duyarlılığı (After Youd ve Perkins, 1978).

Bir sınıflama haritasının derlenmesinde kriter olarak kullanılan konsolide olmamış, granüler, çakılsız katmanların olası sınıflama duyarlılığı (Dupre, 1990 ve Tinsley ve Fumal, 1985).

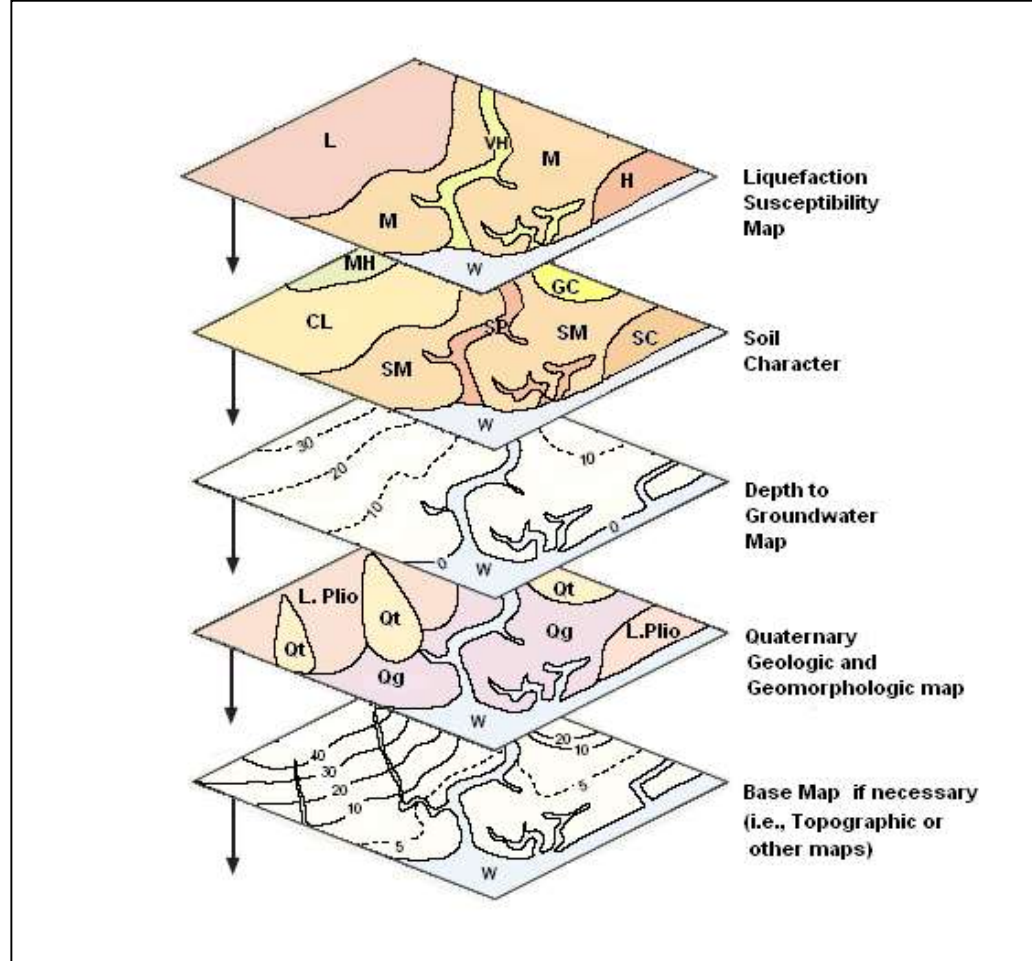
Sedimanter Birim	Yeraltı suyu derinliği (metre)			
	0-3	3-10	10-15	>15
Holosen Üst -----	Çok Yüksek - Yüksek ¹	Orta ²	Düşük	Çok Düşük
Alt -----	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük
Pleyistosen Üst -----	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük
Orta ve alt - - - -	Çok Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük

1-Akarsu- göl ve set (levee) çökellerinin mevcut olduğu biliniyorsa, alanlar çok yüksek duyarlılığa sahip olarak haritalanır; diğer sedimanter ortamlarda biriken tortunun yüksek duyarlılığa sahip olduğu kabul edilir.

2-Yüksek duyarlılığa sahip akarsu birikintileri nadiren oluşur ve yaygın olarak dağılmaz; diğer sedimanlar sınıflamaya orta derecede duyarlıdır.

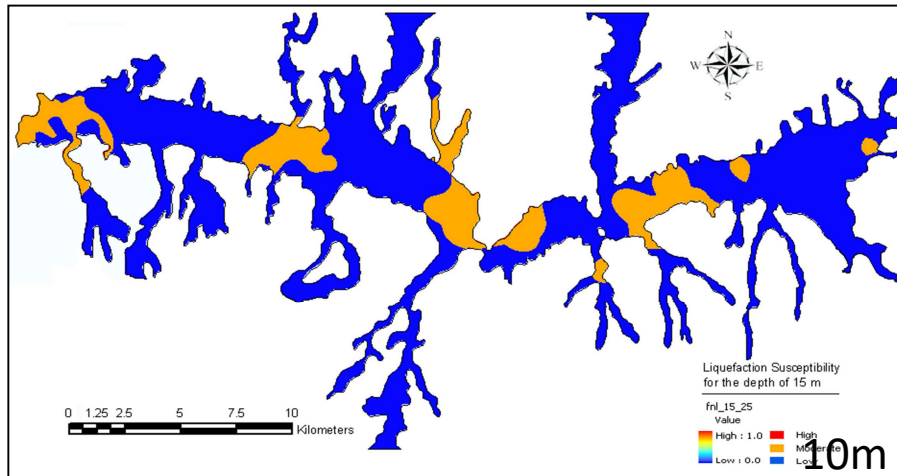
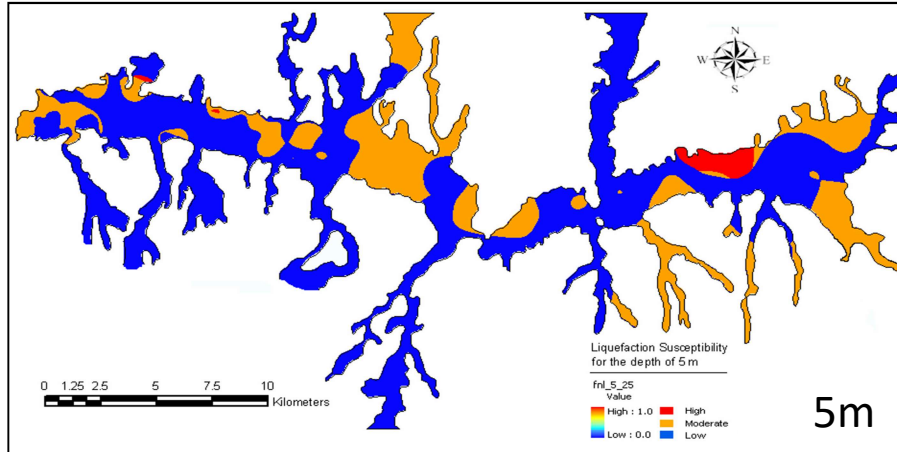
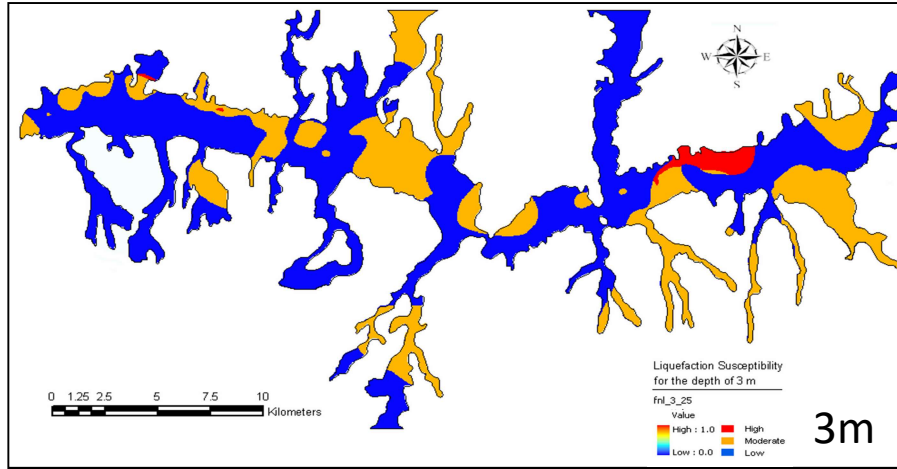
Topoğrafik bilgilere dayalı bir mikrobölgeleme yöntemleri (Iwasaki ve diğ.,1982)

Sınıf	Topografya	Sıvılaşma potansiyeli
A	Mevcut nehir yatakları, eski nehir yatakları, bataklıklar, ıslah edilmiş araziler, kumul arası düzlükler	Yüksek
B	Yelpazeler, doğal manialar, kumullar, taşkın düzlükleri, kumsallar, diğer düzlükler	Orta
C	Teraslar, tepeler, dağlar	Düşük

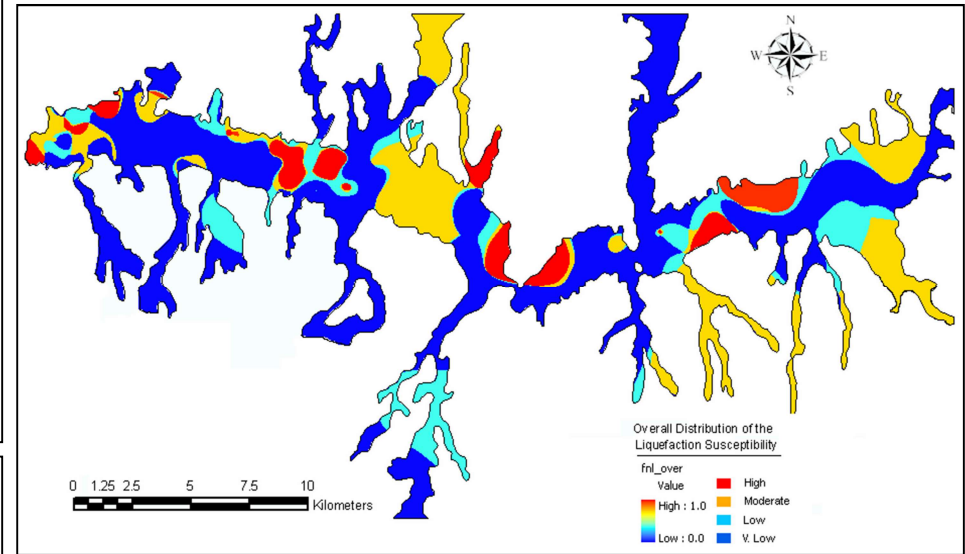


Entegrasyon Metodolojisi

Bir sınıflama mekansal duyarlılık haritası oluşturmak için veri kaynakları ve entegrasyon şeması (Hitchcock ve diğ., 1999'dan modifiye edilmiştir).



Kuvaterner birimlerinin araştırma alanındaki saha etkilerinden kaynaklanan yüksek, orta ve düşük sıvılaşma duyarlılık tehlikelerinin farklı derinlikler için dağılımını gösteren kalitatif sıvılaşma duyarlılık derecesi.

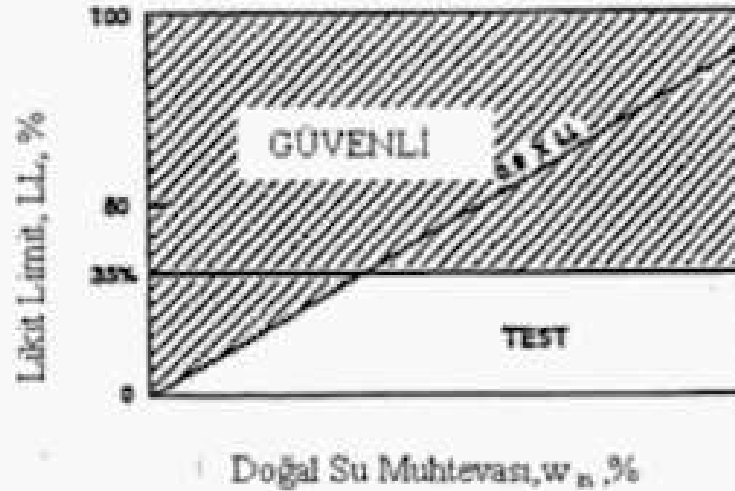


Kuvaterner çökellerinde 15 m derinliğe kadar tüm derinliklerde birleşik sıvılaşma duyarlılığı tehlikesinin genel dağılımı

Koçkar (2006)

3-Kompozisyon Kriteri :

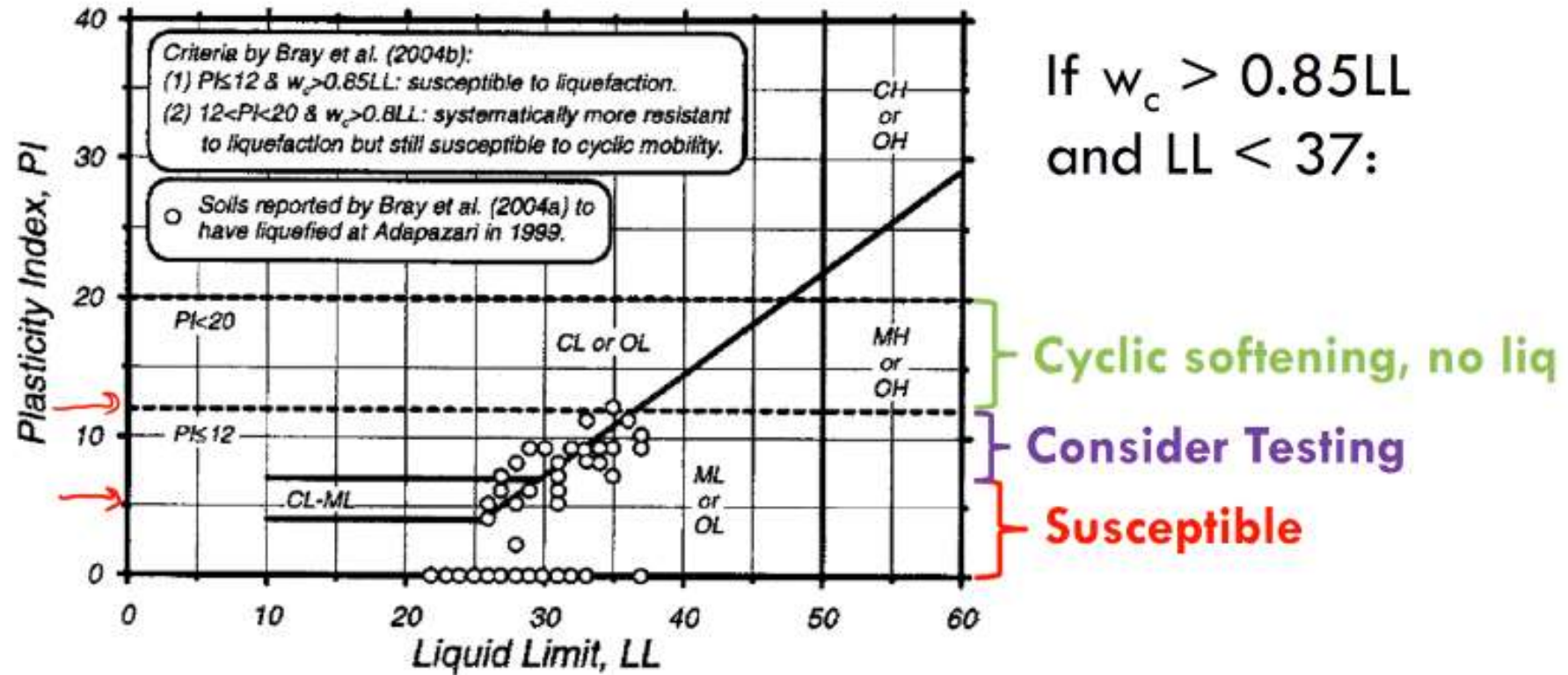
1. 0.005 mm den küçük dane yüzdesi $\leq 15\%$
2. Likit Limit, LL $\leq 35\%$
3. Su Muhtevası $\geq 0.9 \times LL$



- (1) Dane yüzdesi oranı $0.005 \text{ mm} \leq 15 \%$
- (2) Likit Limit, $LL \leq 35\%$
- (3) Doğal su muhtevası $\geq 0.9 LL$
- (4) Likidite İndeksi ≤ 0.75

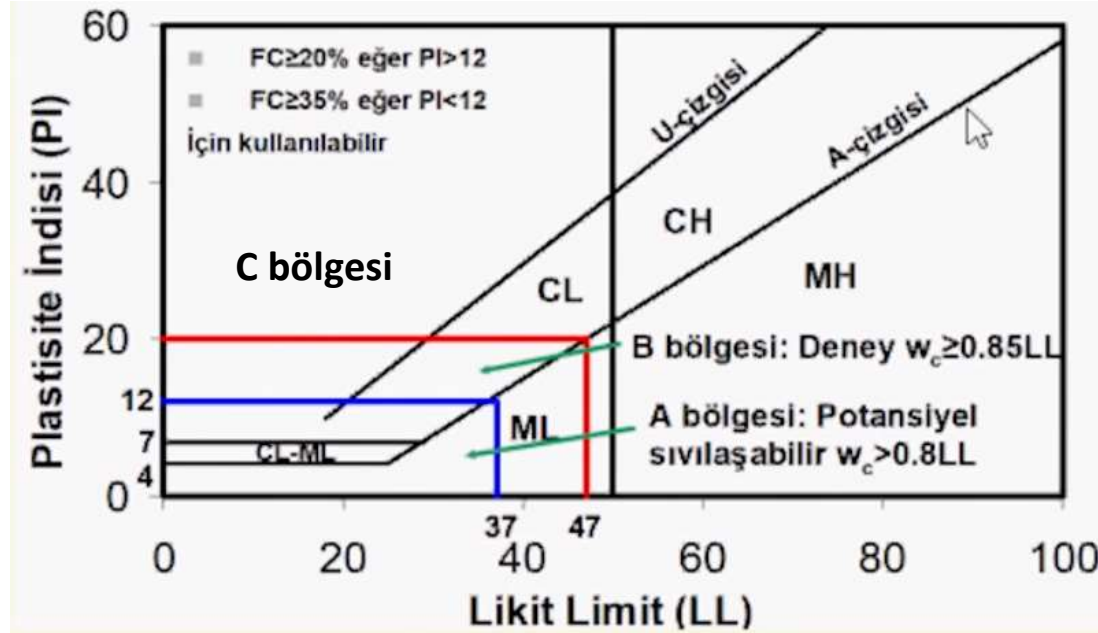
Çin Kriterleri (sadece 2 depreme dayalı olarak hazırlamış) (Finn ve diğ., 1994)

3-Kompozisyon Kriteri :



Sıvılaşabilir zeminler: Kötü dereceli, kohezyonsuz, iri taneli siltlerden çakıla kadar zeminler. Bazı araştırmacılar ise **düşük plastisiteli zeminlerin** de sıvılaşabileceğini belirtmektedirler (Idriss ve Boulanger, 2006; Bray ve Sancio, 2006).

3-Kompozisyon Kriteri (Compositional Criteria) :

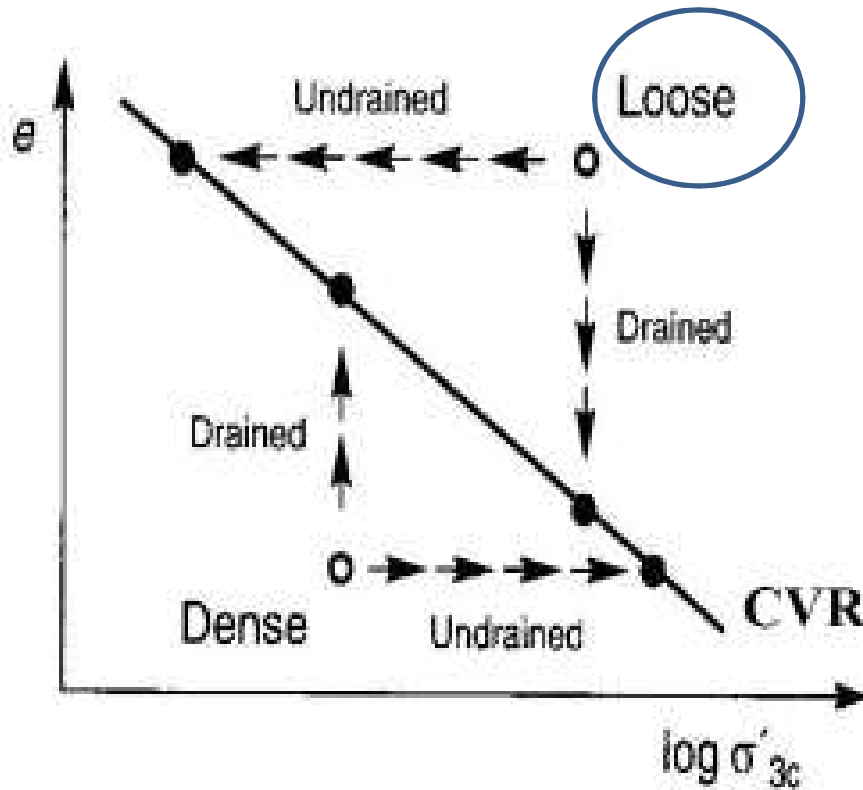


İnce taneli zeminlerin sıvılaşıma/ yumuşama performansı değerlendirilmesi (Seed vd., 2003)

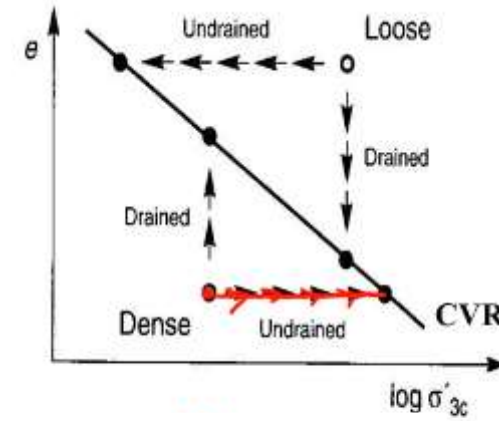
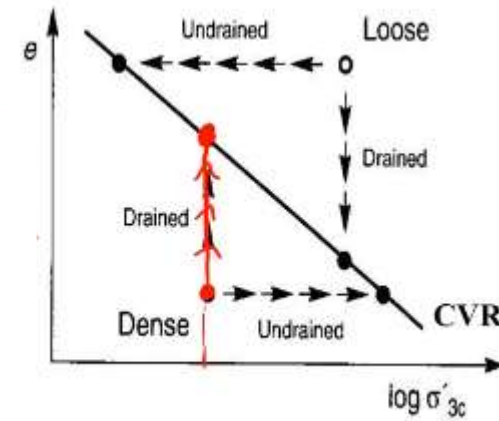
- A Bölgesi: Bu bölgedeki zeminler sıvılaştırılabilir zemin olarak tanımlanacaktır.
- B Bölgesi: Bu bölgedeki zeminler geçiş bölgesinde olup, sıvılaşıma potansiyeline ancak dinamik üç eksenli deneylerinin yapılması sonucunda karar verilebilecektir.
- C Bölgesi: Bu bölgedeki zeminlerde sıvılaşıma potansiyeli yoktur, ancak yumuşama potansiyeli değerlendirilmelidir.

4-Durum Kriteri (State Criteria) : efektif çevresel gerilme σ_{3c} ve densite-sıkılığa (ilksel boşluk oranı) bağlı değişim (Casagrande 1930'lar)

Sıvılaşmaya müsait???



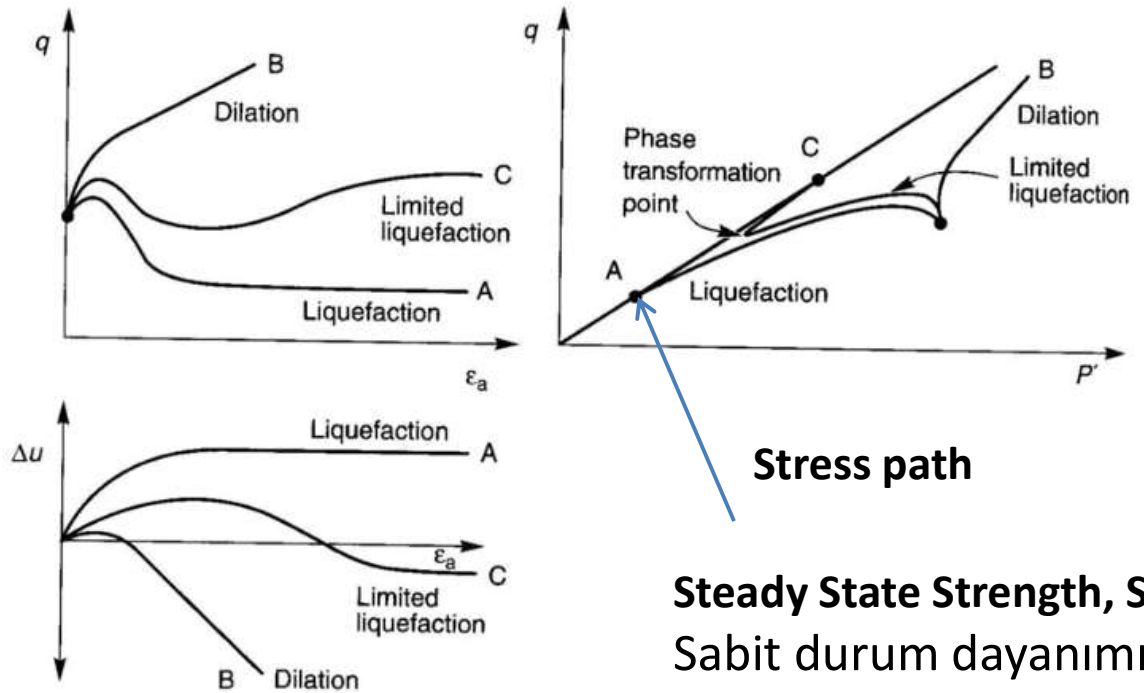
Kritik Boşluk Oranı Çizgisi



4-Durum Kriteri (State Criteria) : efektif çevresel gerilme σ_{3c} ve densite-sıkılığa (ilksel boşluk oranı) bağlı değişim Castro (1969)

- Drenajsız kayma mukavemeti testleri

Gerilme – Gerinim (Stress –strain) eğrisi

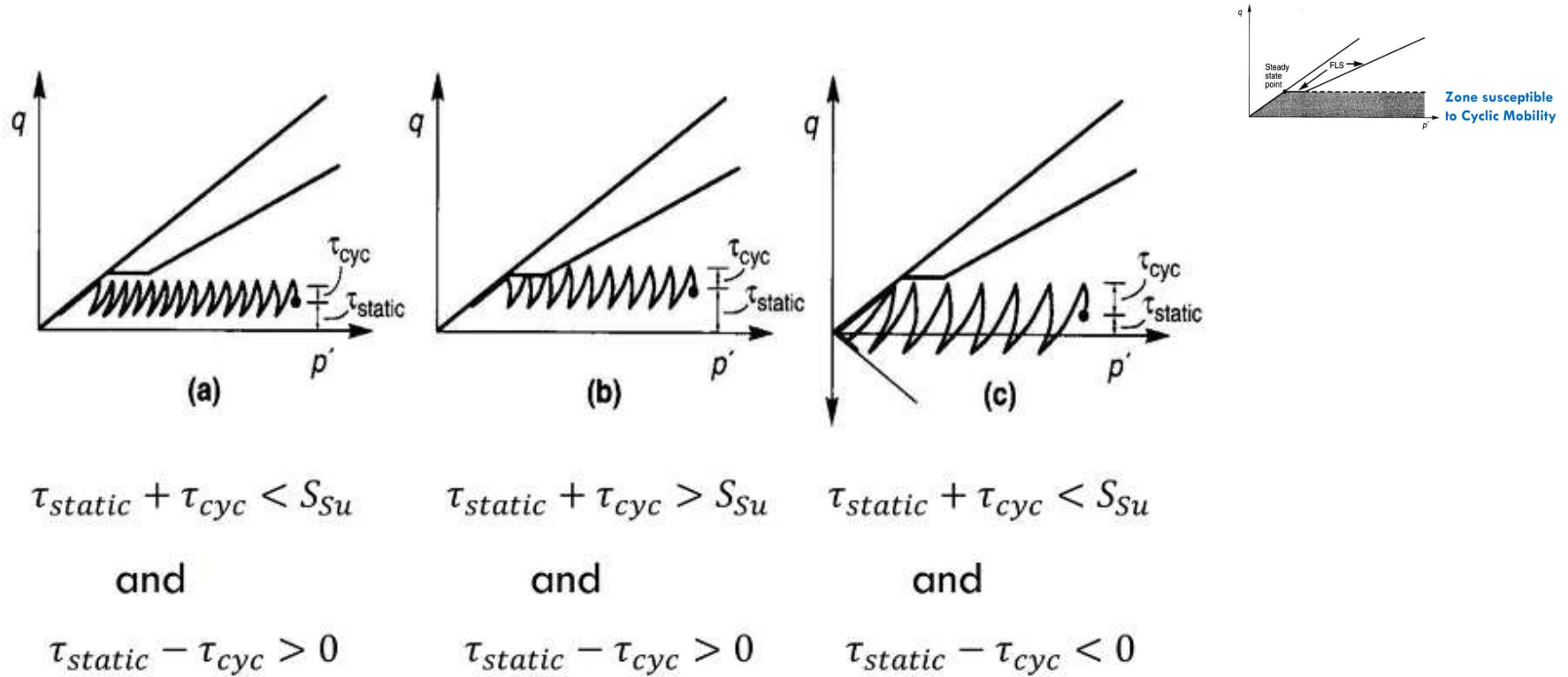


A- Gevşek zemin
B- Sıkı zemin
C- Orta sıkı zeminler

Boşluk suyu basıncı–gerinim (strain) eğrileri

- Devirsel hareketlilik (çevrimli sıvılaşma-mobilite)

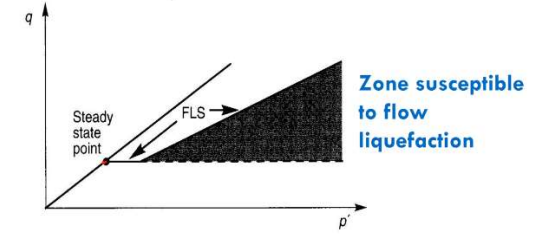
If the initial stress state of a soil sample is less than the Steady State Strength, then it is susceptible to **Cyclic Mobility**



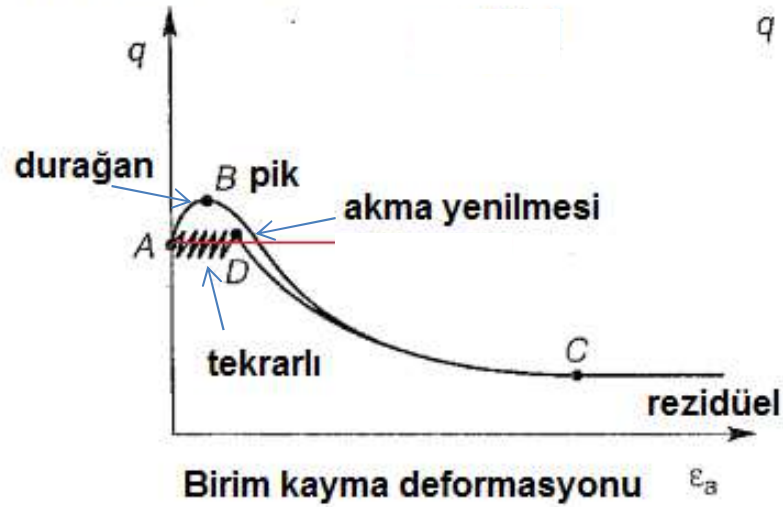
Devirsel hareketliliğin üç durumu: (a) gerilme çevrilmesinin olmadığı ve sabit durum dayanımının aşılmadığı durum; (b) gerilme çevrilmesinin olmadığı ve sabit durum dayanımının kısa bir süre için aşıldığı durum; (c) gerilme çevrilmesinin olduğu ve sabit durum dayanımının aşılmadığı durum.

- Akma sıvılaşması

If the initial stress state of a soil sample is greater than the Steady State Strength (...or State State Point), then the soil will experience flow liquefaction if sufficient stress is applied to drive the stress path to the FLS.

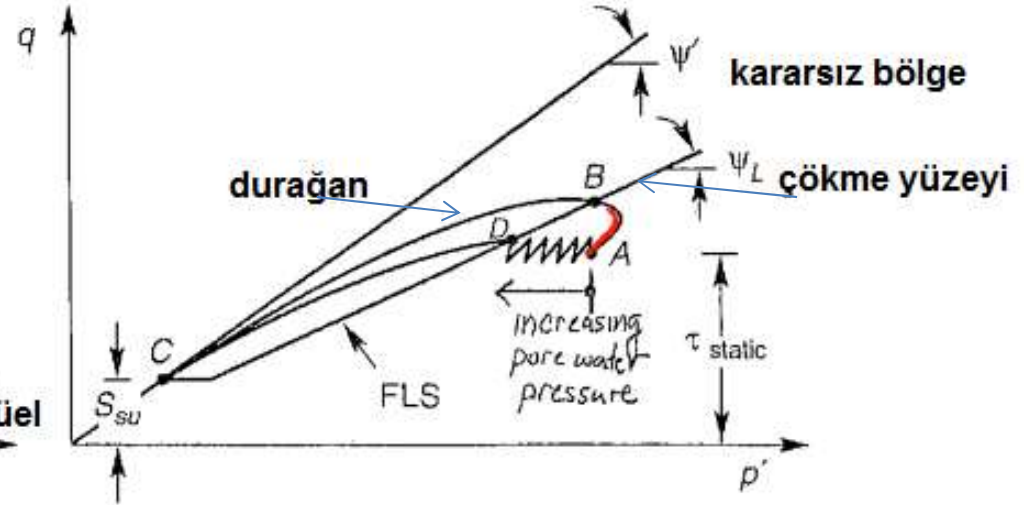


Kayma gerilmesi



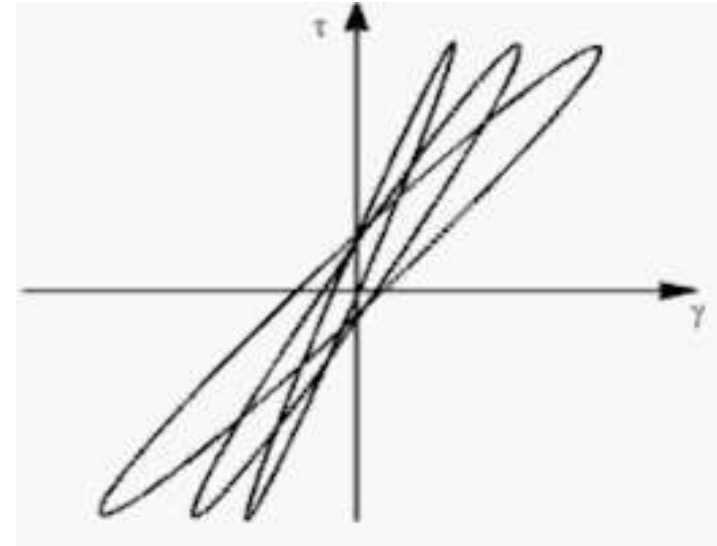
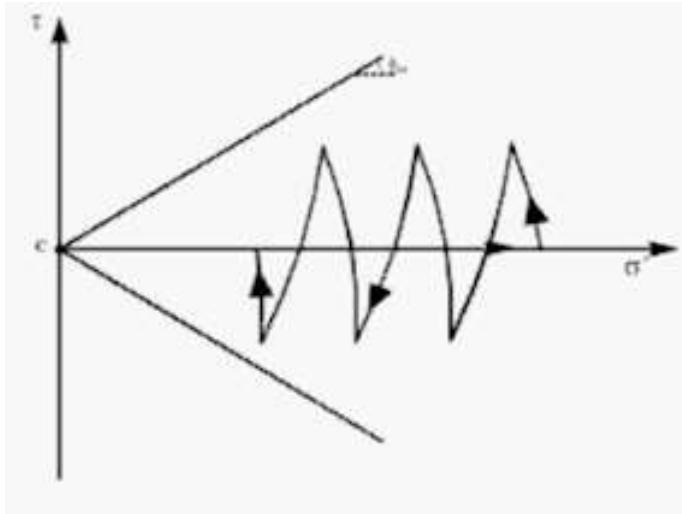
Birim kayma deformasyonu ϵ_a

A-B Statik Yükleme



A-D Tekrarlı Yükleme

- Zemin Yumuşaması



Kayma birim deformasyon birikimi – boşluk suyu basıncı artar ve efektif gerilmeler düşer



**Sivrice 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi
(Hazar Gölü Kıyısı) (M_w 6.8)**





**Sivrice 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi
(M_w 6.8)**





**Sivrice 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi
(M_w 6.8)**

SIVILAŞMA ANALİZ AŞAMALARI

- Zemin sıvılaşmasının başlama veya tetiklenme olasılığının belirlenmesi,
- Sıvılaşma sonrası dayanım ve genel stabilitenin belirlenmesi,
- Sıvılaşma sebebiyle oluşacak deformasyonların belirlenmesi,
- Bu deformasyon ve deplasmanların yapı davranışına etkilerinin belirlenmesi,
- Gerek görülürse hasar azaltıcı iyileştirme önlemlerin uygulanması.

LİTERATÜRDEKİ GELİŞMELER

- 1996 yılında, NCEER Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi tarafından desteklenen proje çalışmasıyla, son 10 yıldaki gelişmeleri gözden geçirmek üzere bir proje ile Youd and Idriss (1996) tarafından basitleştirilmiş bu prosedüre ilişkin güncellemeler ve düzenlemeler yapıldı ve yayınlandı (2001).

Bu çalışmada aşağıdaki konular gözden geçirilerek ve öneriler geliştirildi:

- (1) standart penetrasyon testlerine dayanan kriterler;
- (2) konik penetrasyon testlerine dayanan kriterler;
- (3) kayma dalgası hızı ölçümlerine dayanan kriterler;
- (4) deprem büyüklüğü ölçeklendirme faktörleri;
- (5) aşırı yük basınçları ve eğimli zemin için düzeltme faktörleri; ve
- (6) deprem büyüklüğü ve pik ivmesi için girdi değerleri.

Seed ve Idriss (1971) tarafından zeminlerin sıvılaşma direncini değerlendirmek için "basitleştirilmiş prosedür" olarak adlandırılan bir metodoloji geliştirdi ve yayınladı. Bu prosedür, Amerika'da ve dünya genelinde bir uygulama standardı haline geldi.

Tekrarlı gerilme oranı

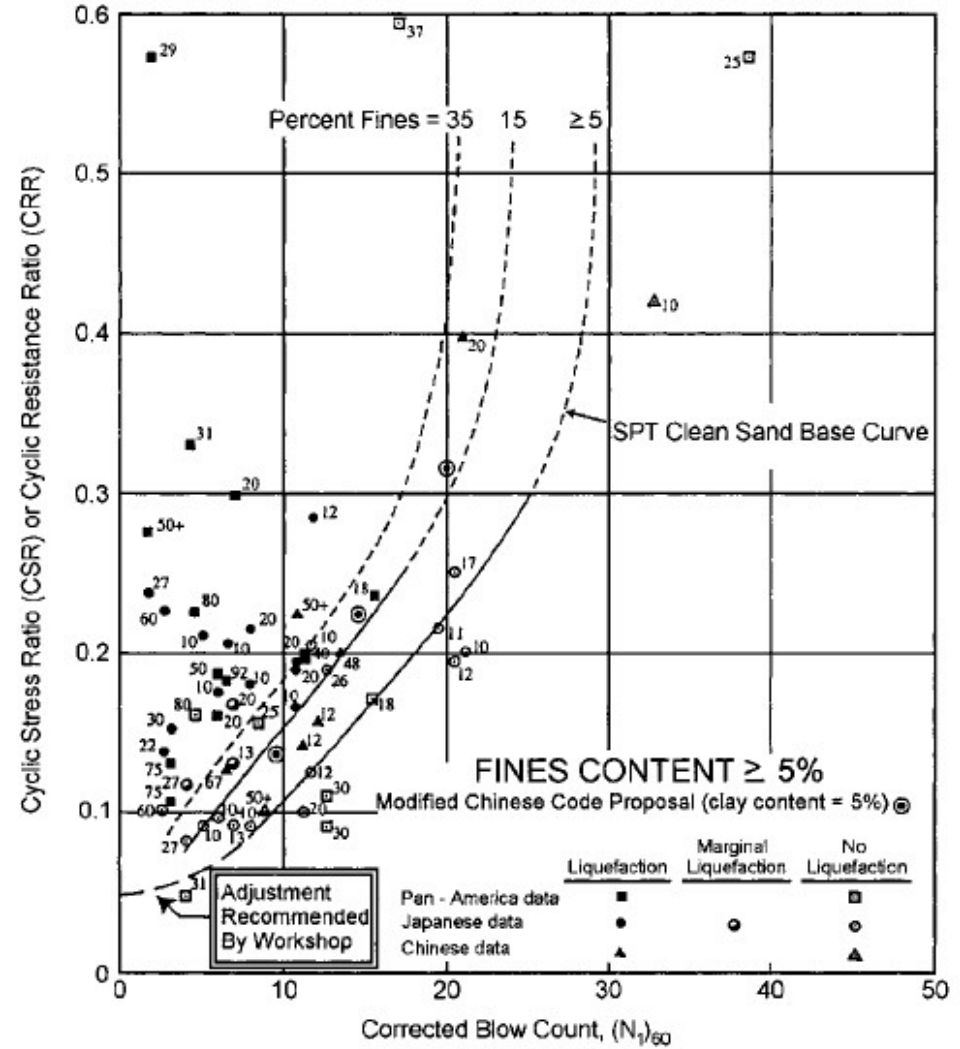


FIG. 2. SPT Clean-Sand Base Curve for Magnitude 7.5 Earthquakes with Data from Liquefaction Case Histories (Modified from Seed et al. 1985)

Zemin Mukavemeti

TBDY BÖLÜM 16.6. DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİNİN SIVILAŞMA RİSKİNİN DEĞERLENDİRMESİ

2.2.2. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)

DD-2 *Deprem Yer Hareketi*, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu *seyrek* deprem yer hareketini nitелеmektedir. Bu deprem yer hareketi, *standart tasarım deprem yer hareketi* olarak da adlandırılmaktadır.

Tablo 3.1 – Bina Kullanım Sınıfları ve Bina Önem Katsayıları

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminaleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. c) Müzeler d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1.5
BKS = 2	İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2
BKS = 3	Diğer binalar BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1.0

DD-1 = 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-2 = 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-3 = 50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-4 = 50 yılda aşılma olasılığı %68 (tekrarlanma periyodu 43 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

Tablo 3.2 – Deprem Tasarım Sınıfları (DTS)

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 \leq S_{DS} < 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 \leq S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

<https://tdth.afad.gov.tr/>

(TBDY, 2019)

Tablo 16.1 – Yerel Zemin Sınıfları

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

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

(a) Kil içeriğinin %20'den fazla ve plastisite indisinin %10'dan yüksek olduğu kumlu zeminlerde;

(b) ince dane yüzdesinin % 35'den fazla ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısının, $N_{1,60}$, 20 vuruş / 30 cm'den yüksek olduğu kumlu zeminlerde;

16.6.2 – Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ($PI < 12$) zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanacaktır.

16.6.3 – Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılacak zemin araştırma çalışmaları en az, standart penetrasyon deneyi, (SPT) ve/veya koni penetrasyon deneyinin (CPT)'nin yapımına ek olarak, ilgili zemin tabakalarındaki dane çapı dağılımı, su muhtevası ve Atterberg limit değerlerinin belirlenmesini içerecektir.

16.6.4 – Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanacaktır.

16.6.5 – Temel altı zeminlerinin potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminlerden oluştuğu ve bu zemin tabakalarında düzeltilmiş SPT vuruş sayısının, $N_{1,60}$, 30 darbe / 30 cm değerinden küçük olduğu durumlarda zemin sıvılaşması tetiklenme değerlendirmesi yapılacaktır.

16.6.7 – Zemin sıvılaşması değerlendirmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zeminde oluşabilecek yerdeğiştirmelerin dikkate alınması gereklidir.

16.6.8 – Zemin sıvılaşma değerlendirmesinin SPT deney sonuçları kullanılarak yapılmasına dayanan yöntem EK 16B'de verilmiştir. Değerlendirmenin CPT veya kayma dalgası hızına göre yapılması durumunda uygulamada genel kabul gören yöntemler kullanılabilir.

16.6.9 – Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu Denk.(16.3)'te tanımlanmıştır.

Sıvılaşma direnci

$$\frac{\tau_R}{\tau_{\text{deprem}}} \geq 1.10 \quad (16.3)$$

Tekrarlı kayma gerilmesi

Burada τ_R ve τ_{deprem} , sırası ile, sıvılaşma direncini ve zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesini ifade etmektedir. **Denk.(16.3)'te verilen koşulun sağlanamaması durumunda, *sıvılaşması beklenen tabakaların dayanım ve rijitlik özelliklerindeki azalma, olası taşıma gücü kayıpları, duraylılık bozuklukları ile oturma ve yanal yayılma türündeki zemin hareketleri*** değerlendirilecektir.

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

EK 16B – BASİTLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN SIVILAŞMA DEĞERLENDİRMESİ

16B.1. KAPSAM

Zemin sıvılaşması tetiklenme analizleri kapsamında, **saha zeminlerinin sıvılaşmaya karşı kayma direnci, τ_R** ; eğimsiz sahalar için geliştirilmiş, arazi penetrasyon deneyleri veya kayma dalga hızı değerlerine bağlı ampirik zemin sıvılaşması direnci bağıntı ve eğrileri (gerekli düzeltmeler uygulanarak) kullanılarak bulunacaktır. SPT deney sonuçlarından yararlanılarak sıvılaşma direncinin hesaplanması için önerilen yöntem **16B.3**'de verilmiştir. Deprem sarsıntısı sırasında **gelişen kayma gerilmeleri, τ_{deprem}** , basitleştirilmiş yöntem kullanılarak hesaplanacaktır.

16B.2. SPT VERİLERİNİN DÜZELTİLMESİ

16B.2.1. Ham SPT Verilerinin Düzeltilmesi

16B.2.1.1 – Araziden elde edilmiş ham SPT verileri, N , **Denk.(16B.1)** kullanılarak değerine düzeltilecektir.

$$N_{1,60} = NC_N C_R C_S C_B C_E \quad (16B.1)$$

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

16B.2.1.2 – Derinlik düzeltme katsayısı C_N hesaplanacaktır.

$$C_N = 9.78 \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{vo}}} \leq 1.70 \quad (16B.2)$$

Denk.(16B.2)'de verilen bağıntıda deney derinliğindeki efektif düşey gerilme σ'_{vo} (kN/m²), Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapıldığı durumdaki arazi koşullarına göre hesaplanmaktadır. Deney sonrasında yapılan ek dolgu, temel gerilmesi veya zemin kazısı ve benzeri nedenler ile oluşan efektif gerilme değişiklikleri dikkate alınmayacaktır.

Tablo 16B.1. SPT Düzeltme Katsayıları

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



$$N_{1,60} = NC_N C_R C_S C_B C_E \quad (16B.1)$$

C_N kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme (derinlik) düzeltme katsayısını

C_R tij boyu düzeltme katsayısı

C_S numune alıcı tipi düzeltme katsayısı

C_B sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı

C_E enerji oranı düzeltme katsayısı

16B.2.2. SPT Verilerinin İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmesi

İnce dane içeriğine (IDI) göre düzeltilmiş darbe sayıları $N_{1,60f}$
Denk.(16B.3a) ile hesaplanacaktır:

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta N_{1,60} \quad (16B.3a)$$

Denk.(16B.3a)'daki α ve β katsayıları **Denk.(16B.3b)**'de verilmiştir:

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

$$\alpha = \exp[1.76 - (190/IDI^2)] ; \beta = 0.99 + IDI^{1.5}/1000 \quad (\%5 < IDI < \%35) \quad (16B.3b)$$

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

Tekrarlı gerilme oranı

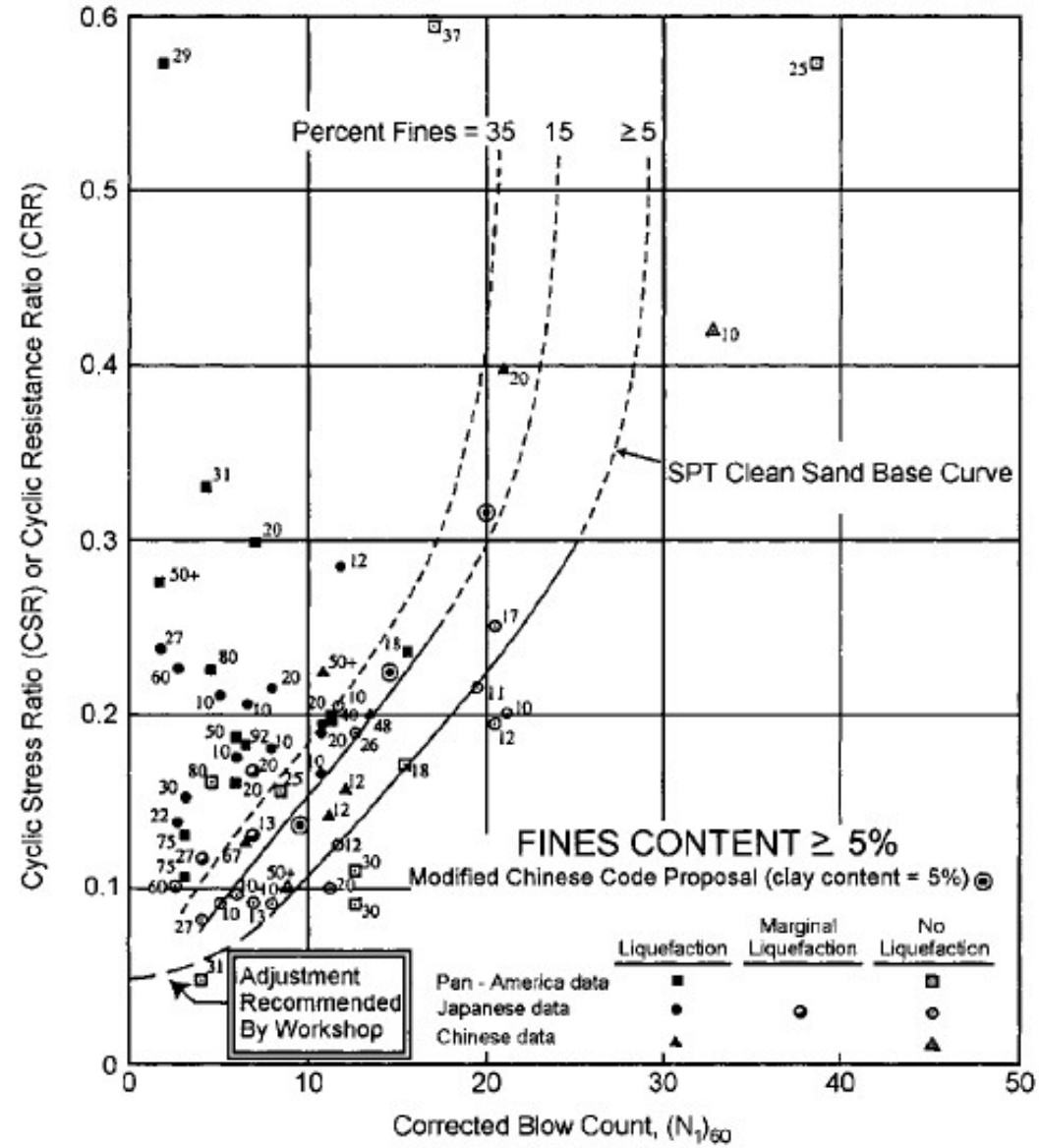


FIG. 2. SPT Clean-Sand Base Curve for Magnitude 7.5 Earthquakes with Data from Liquefaction Case Histories (Modified from Seed et al. 1985)

Zemin Mukavemeti

16B.3. SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESAPLANMASI

16B.3.1 – Sivilaşma direnci τ_R , moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranının ($CRR_{M7.5}$) , tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı (C_M) ve efektif düşey gerilme (σ'_{vo}) ile çarpılması ile hesaplanacaktır.

$$\tau_R = CRR_{M7.5} C_M \sigma'_{vo} \quad (16B.4a)$$

16B.3.2 – Çevrimsel dayanım oranı Denk.(16B.4b)'de verilen bağıntı ile hesaplanacaktır:

$$CRR_{M7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (16B.4b)$$

Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı (C_M) , *tasarım depremi büyüklüğüne* (M_w) bağlı olarak **Denk.(16B.4c)**'deki bağıntı ile hesaplanacaktır.

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (16B.4c)$$

16B.4. DEPREMDE OLUŞAN KAYMA GERİLMESİNİN HESAPLANMASI

16B.4.1 – Zeminde oluşan kayma gerilmesi **Denk.(16B.5)**'deki ilişki ile hesaplanacaktır.

$$\tau_{\text{deprem}} = 0.65 \sigma_{\text{vo}} (0.4 S_{\text{DS}}) r_d \quad (16B.5)$$

Burada σ_{vo} sıvılaşma değerlendirmesi yapılan derinlikteki toplam düşey gerilmeyi, r_d ilgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısını, S_{DS} ise kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını göstermektedir (pik yer ivmesi).

16B.4.2– Gerilme azaltma katsayısı, r_d incelenen derinliğe (z) bağlı olarak **Denk.(16B.6)**'daki bağıntı ile elde edilecektir.

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765z & z \leq 9.15\text{m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z & 9.15\text{m} < z \leq 23\text{m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008z & 23\text{m} < z \leq 30\text{m} \\ r_d &= 0.50 & z > 30\text{m} \end{aligned} \quad (16B.6)$$

- CPT ve V_s ile sıvılaşma prosedürleri için Youd and Idriss (2001) incelenebilir.

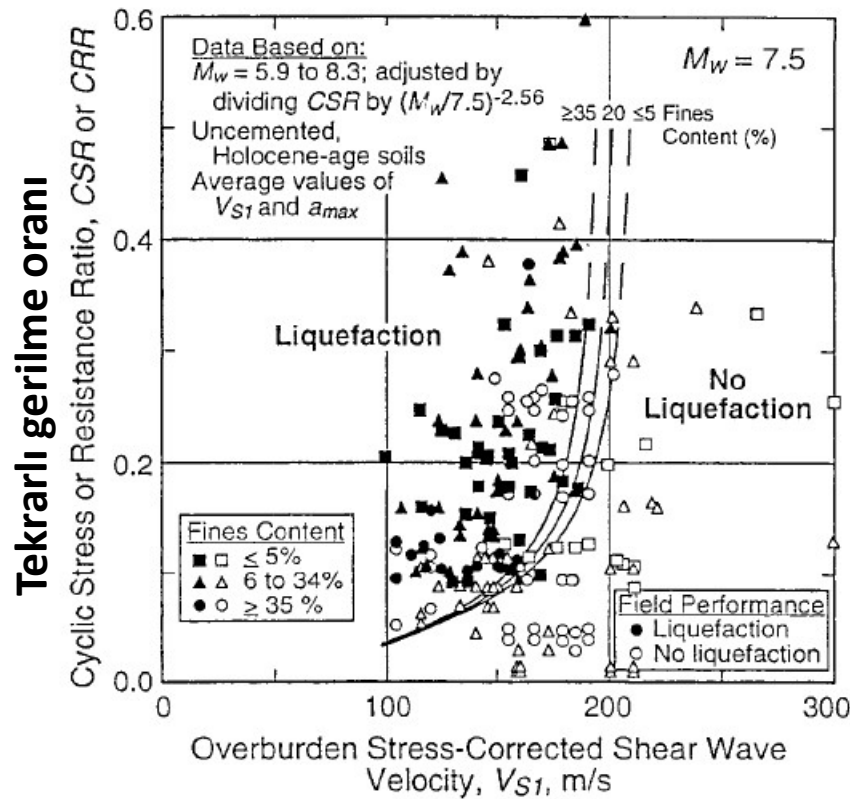
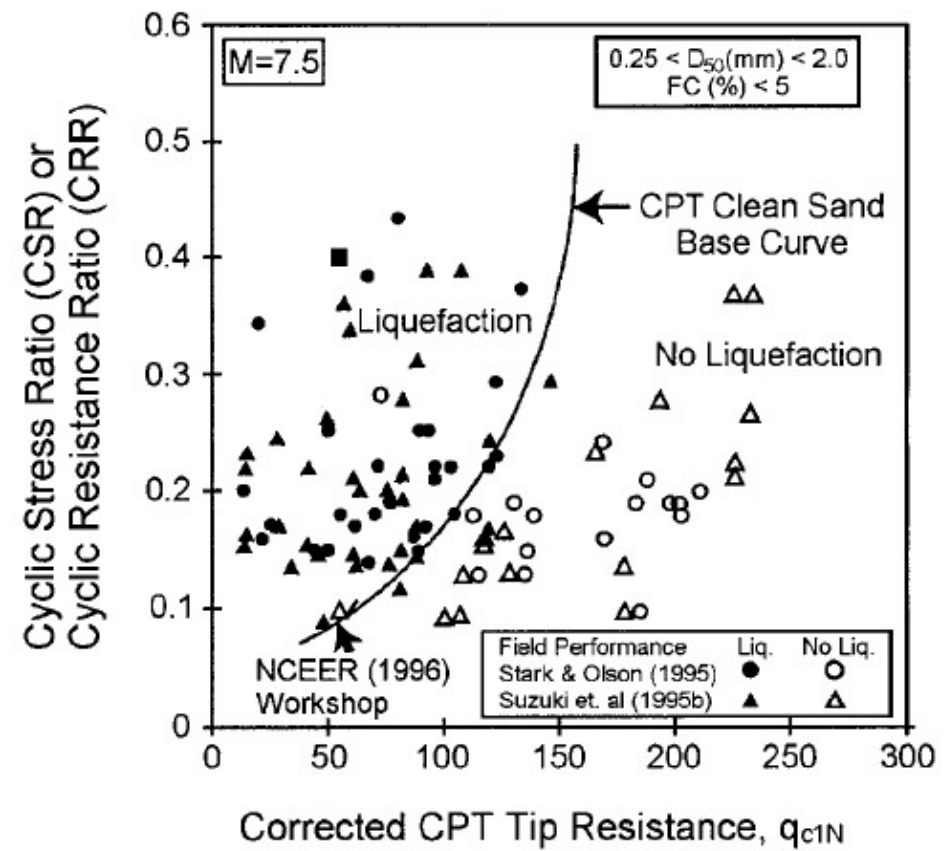


FIG. 9. Liquefaction Relationship Recommended for Clean, Uncemented Soils with Liquefaction Data from Compiled Case Histories (Reproduced from Andrus and Stokoe 2000)



Örnek N_{1,60} sıvılaşma potansiyeli verisi

Table 6.6. Examples that represent the quantitative geotechnical evaluations and the factor of safety calculations for different depths and site classes regarding site specific analysis of SPT borings in the event of both $M = 7.5$ and 6.0 earthquakes for Quaternary sediments in the Ankara basin.

AR-5 (E-Site) Navg-14										G [Alluvial Deposit]													
ANKARAY																							
GWT=4 m																							
Donut Type																						Mw	
																						7.5 8.0	
Description ($\delta < FC < 35$)	Depth (m)	PI	γ (kN/m ³)	e'_v (kPa)	e_u (kPa)	r'_f (atm)	depth (m)	sd (m)	PGA soil (g)	CRR _{su}	N _{su}	CN	N _{iso}	N _{iso/g}	CRR _s	MSF (7.5)	MSF (8)	K _v	K _d	CRR (7.5)	CRR (8.0)	F _{su}	F _{ss}
GM-GC (FC=10)	1.0-1.05	0	20.00	69.00	89.00	0.08	1.05	0.88	0.34	0.387	10.0	1.21	7.10	8.18	0.09	1.0	1.8	1.00	1	0.086	0.100	0.220	0.385
GM-GC (FC=10)	3.0-3.95	0	20.00	99.00	89.00	0.38	3.95	0.88	0.34	0.122	8.0	1.81	9.69	9.90	0.10	1.0	1.8	1.00	1	0.006	0.168	0.778	1.373
GM-GC (FC=15)	7.50-7.95	0	20.00	120.25	159.00	1.19	7.95	0.85	0.34	0.159	17.0	0.92	11.87	14.79	0.18	1.0	1.8	0.97	1	0.150	0.268	0.947	1.876
SP-SC (FC=15)	9.0-9.95	9	20.00	135.94	189.00	1.34	9.95	0.84	0.34	0.148	13.0	0.88	8.88	11.77	0.13	1.0	1.8	0.92	1	0.115	0.204	0.776	1.374
GB-BG (FC=7.5)	10.5-10.85	0	20.00	150.82	219.00	1.49	10.85	0.82	0.34	0.139	20.0	0.82	12.81	13.24	0.15	1.0	1.8	0.80	1	0.130	0.231	0.837	1.556
GB-BG (FC=7.5)	12.0-12.45	0	20.00	165.11	249.00	1.54	12.45	0.89	0.34	0.131	25.0	0.78	15.27	15.73	0.17	1.0	1.8	0.85	1	0.140	0.248	1.059	1.892
GB-BG (FC=7.5)	13.5-13.05	0	20.00	201.77	279.00	1.90	13.05	0.80	0.34	0.128	25.0	0.71	13.65	14.30	0.15	1.0	1.8	0.77	1	0.116	0.204	0.802	1.592

BY-37 (D-Site) N _{wso} =19										G [Alluvial Deposit]													
ANKARAY																							
GWT=4.1 m																							
Donut Type																						Mw	
																						7.5 8.0	
Description	Depth (m)	PI	γ (kN/m ³)	e'_v (kPa)	e_u (kPa)	r'_f (atm)	depth (m)	sd (m)	PGA soil (g)	CRR _{su}	N _{su}	CN	N _{iso}	N _{iso/g}	CRR _s	MSF (7.5)	MSF (8)	K _v	K _d	CRR (7.5)	CRR (8.0)	F _{su}	F _{ss}
SM (S+FC(27)>35)	3.0-3.45	0	19.50	67.28	67.28	0.65	3.45	0.96	0.3	0.181	10	1.23	8.21	13.78	0.15	1.0	1.8	1.00	1	0.146	0.257	0.788	1.346
SC (FC(37)>35)	4.5-4.95	9	19.50	88.18	85.63	0.87	4.95	0.87	0.3	0.173	11	1.07	7.88	14.47	0.15	1.0	1.8	1.00	1	0.150	0.283	0.825	1.538
SM-SC (S+FC(26)>35)	7.5-7.95	9	19.50	117.26	155.63	1.16	7.95	0.85	0.3	0.140	22	0.83	15.20	21.66	0.23	1.0	1.8	0.88	1	0.220	0.390	1.573	2.788
SM (S+FC(13)>35)	8.0-8.45	0	19.50	131.78	194.28	1.30	8.45	0.94	0.3	0.131	23	0.88	15.88	18.86	0.20	1.0	1.8	0.85	1	0.165	0.328	1.413	2.501
SM (S+FC(24)>35)	12.0-12.45	0	19.50	160.86	242.78	1.60	12.45	0.86	0.3	0.110	20	0.70	12.50	18.02	0.20	1.0	1.8	0.80	1	0.108	0.207	1.026	2.703
SC (S+FC(27)>35)	18-18.45	21	19.50	210.00	350.78	2.10	18.45	0.87	0.3	0.080	26	0.68	18.03	20.22	0.21	1.0	1.8	0.76	1	0.106	0.276	1.058	3.407

(Koçkar 2006)

Örnek N_{1,60} Sıvılaşma Verisi Analiz Sonucu (Güvenlik Koşulu)

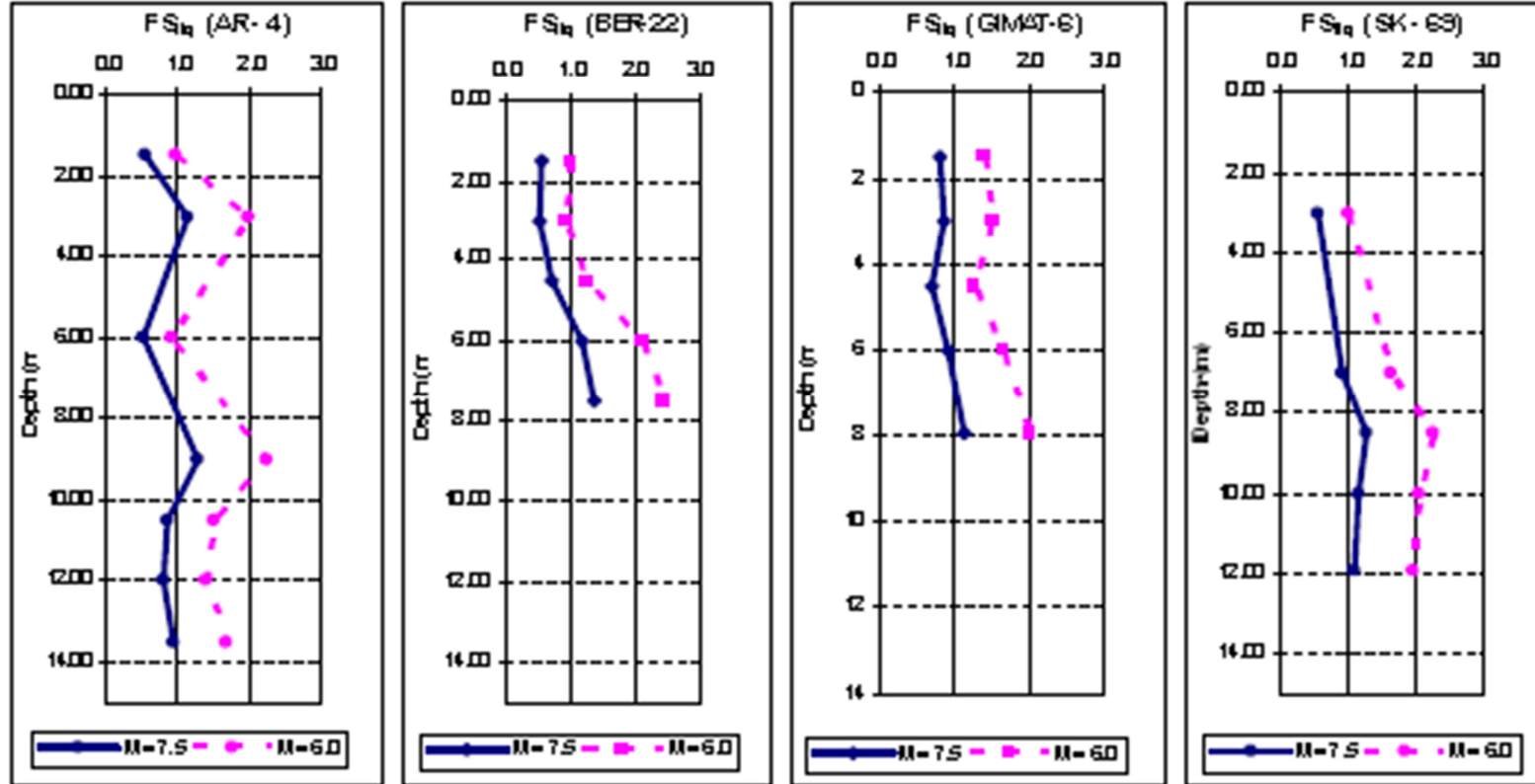


Figure 6.13. Some of the representative examples of the factor of safety results against liquefaction potential versus depth for site-specific analysis of SPT borings in the event of M = 7.5 and 6.0 earthquakes, respectively, regarding the Quaternary deposits in the Ankara Basin

(Koçkar 2006)

Örnek Vs sınıflama potansiyeli verisi

SIS-13 (E-Site) Vs _{avg} =138										Q (Alluvial Deposit)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

[illegible]

(Koçkar 2006)

Örnek Vs Sıvılaşma Very Analizi Sonucu (Güvenlik Koşulu)

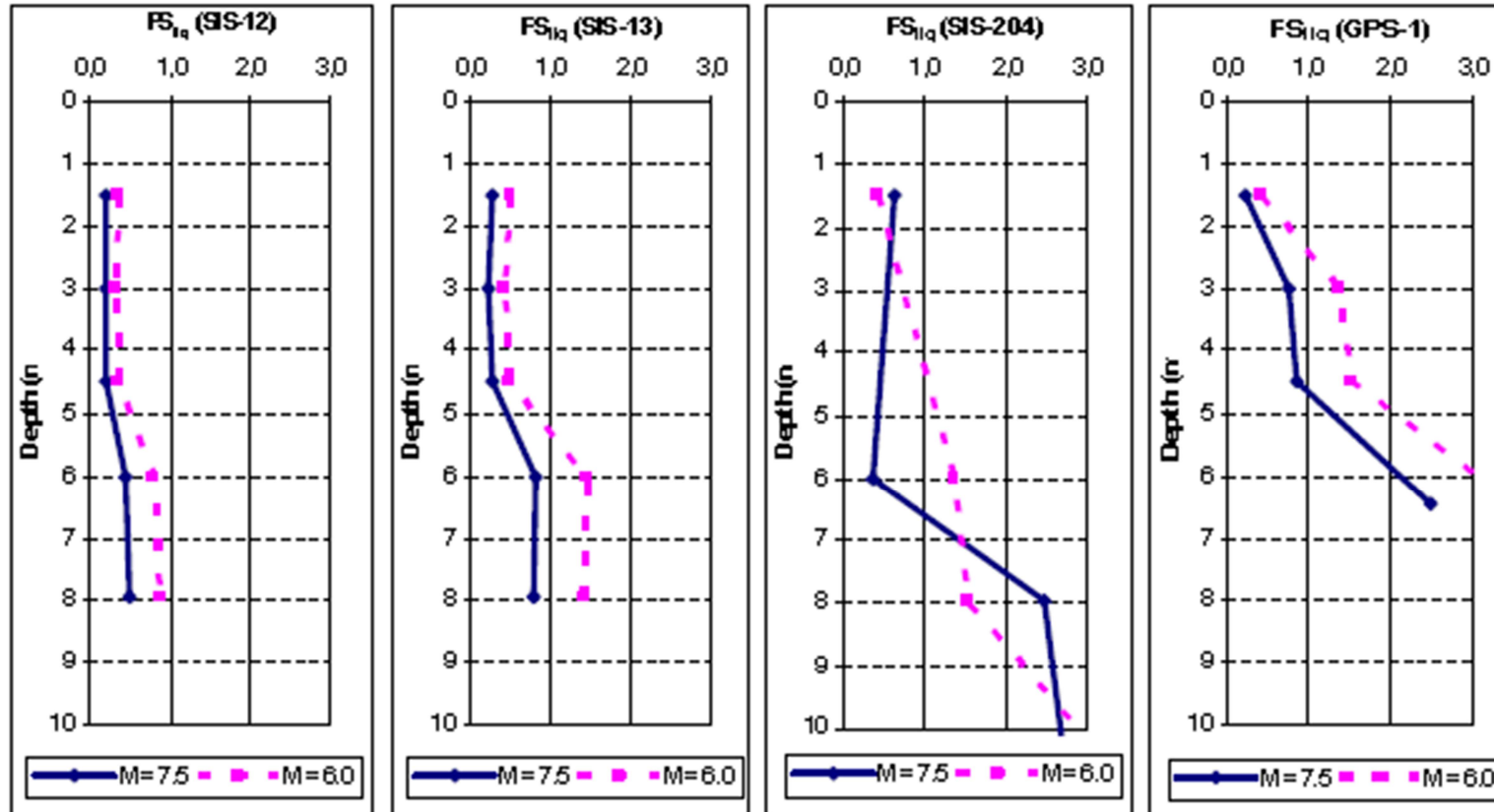


Figure 6.14. Some of the representative examples of the factor of safety results against liquefaction potential versus depth for site-specific analysis of surface wave V_s measurements in the event of $M = 7.5$ and 6.0 earthquakes, respectively, regarding the Quaternary deposits in the Ankara Basin

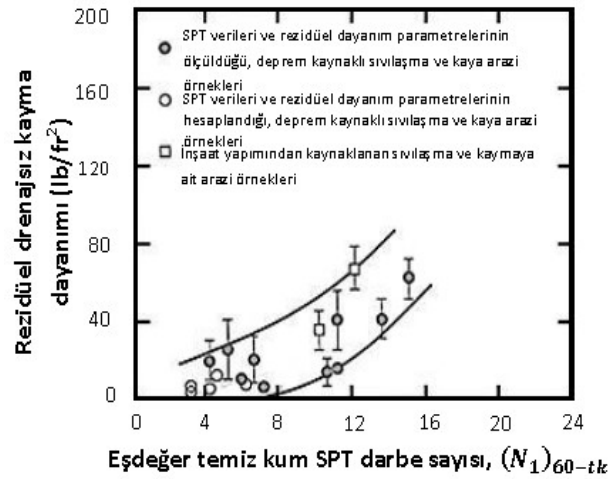
(Koçkar 2006)

16.6.7 – Zemin sıvılaşması değerlendirmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yer değiştirmelerin dikkate alınması gereklidir.

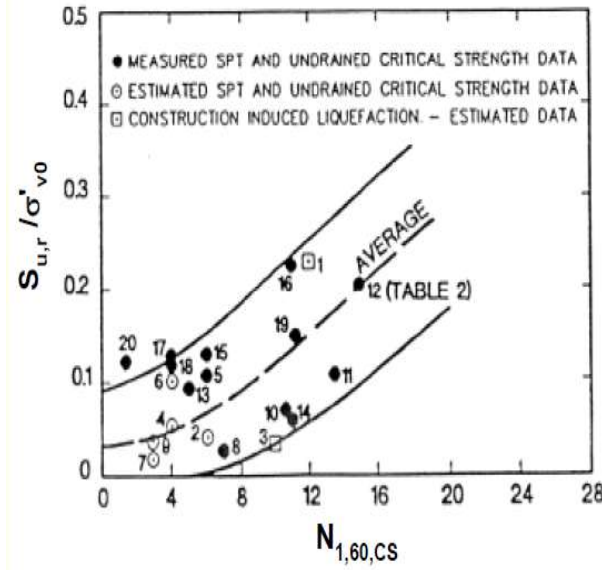
- **Sıvılaşma ve Yumuşama Sonrası Dayanım - Tekrarlı Yükleme Koşullarında Temiz Kum veya Silt Kum Karışımlarının Mukavemet Davranışı**
- **Tekrarlı Yükleme Koşullarında Kumlu Zeminlerin sıvılaşma sonrası yer değiştirmeleri - Oturma ile akma ve yanal yayılma tahminleri**

Tekrarlı Yükleme Koşullarında Temiz Kum veya Silt Kum Karışımlarının Sıvılaşma Sonrası Mukavemet Davranışı

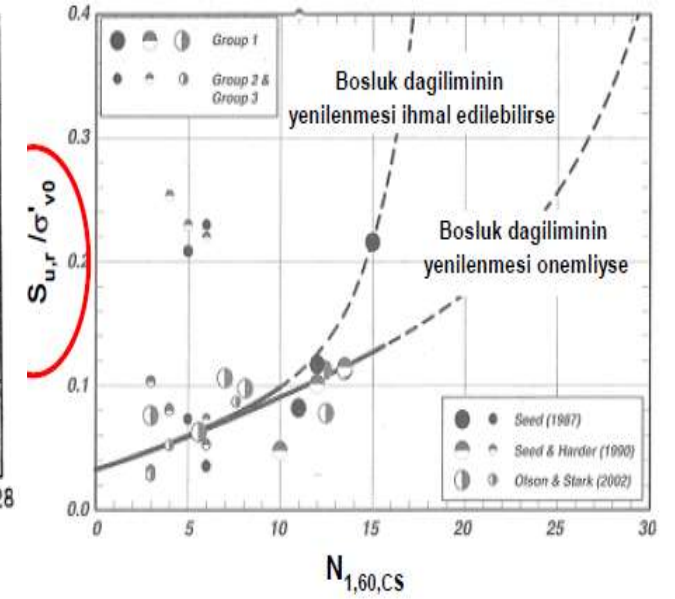
Seed ve Harder (1990)



Stark ve Mesri (1992)



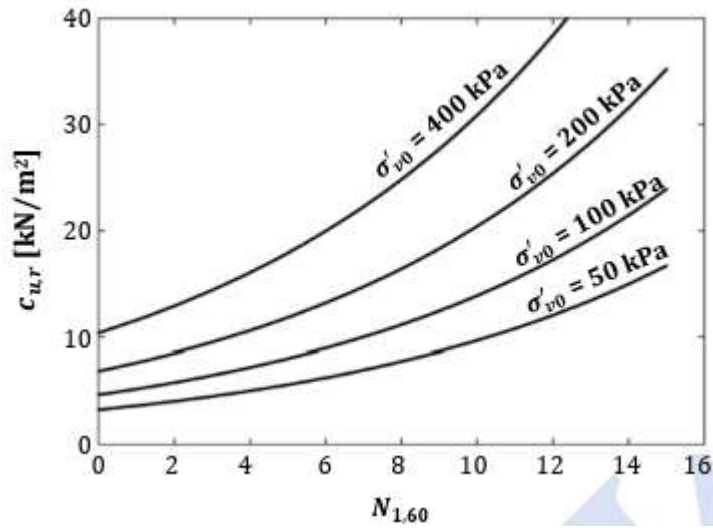
Idriss ve Boulanger (2007)



- $S_{u,r}$ (kPa): Rezidüel drenajsız kayma dayanımı

Tekrarlı Yükleme Koşullarında Temiz Kum veya Silt Kum Karışımlarının SPT direncine bağlı Residüel Kayma Dayanımı

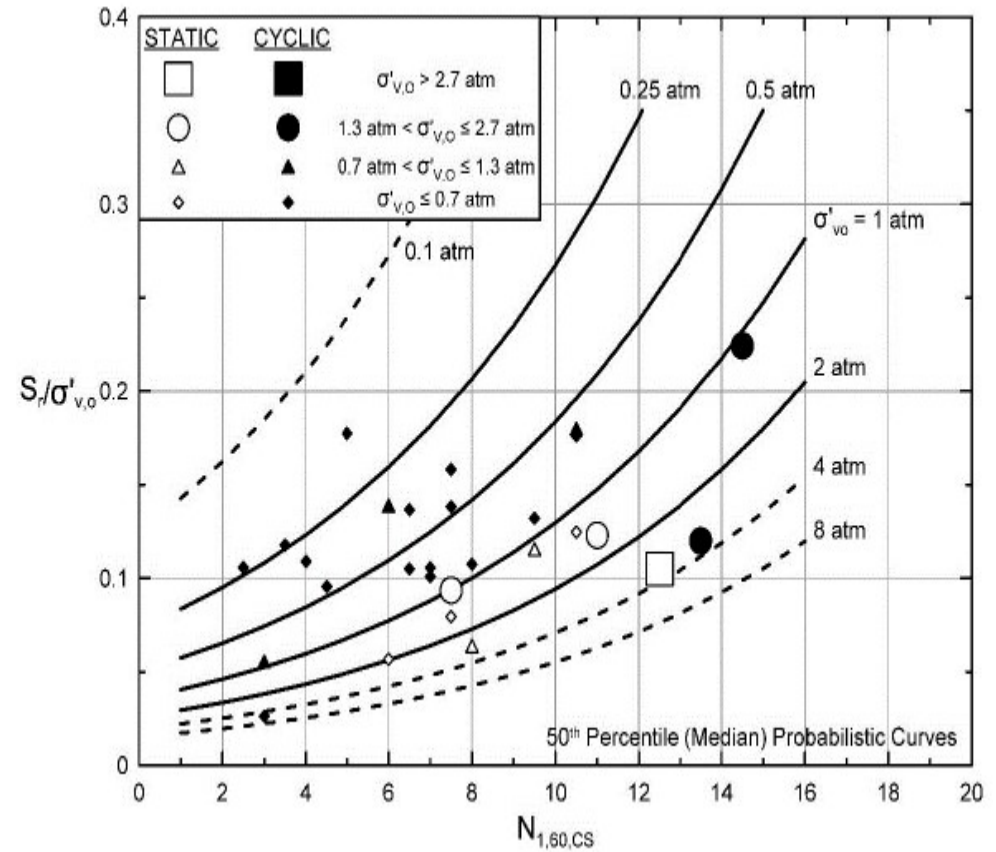
Residüel kayma dayanımı



(Kramer ve Wang, 2015)

$K_\sigma \rightarrow$ referans durum için düzeltme

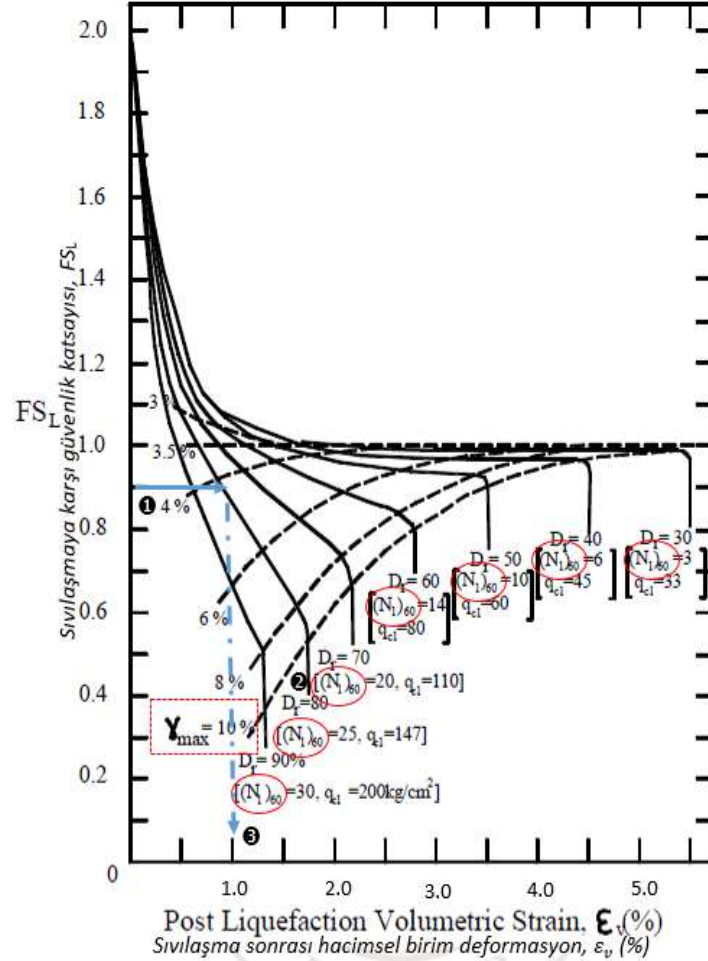
$K_\sigma \rightarrow \sigma'_v \gg 1 \text{ atm}$ için düzeltme



Weber vd. (2015)

Tekrarlı Yükleme Koşullarında Kumlu Zeminlerin Oturmaların Tahmini

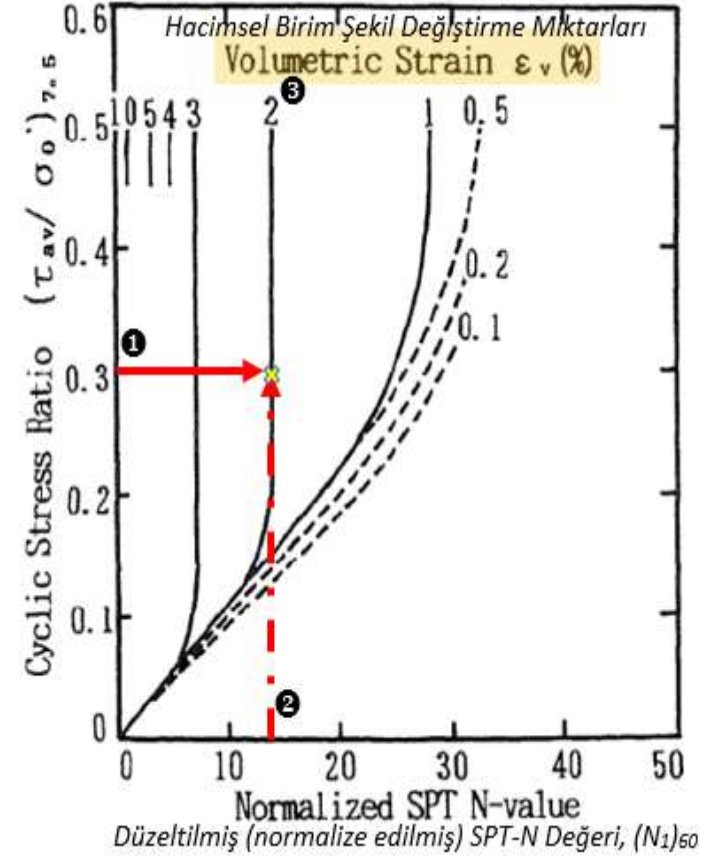
Sıvılaşma sonrası hacimsel birim şekil değiştirme



Kum için (Ishihara et. al., 1992)

$$S = H \cdot \epsilon_v$$

Burada,
S: settlement
H: lithologic thickness
 ϵ_v : volumetric strain

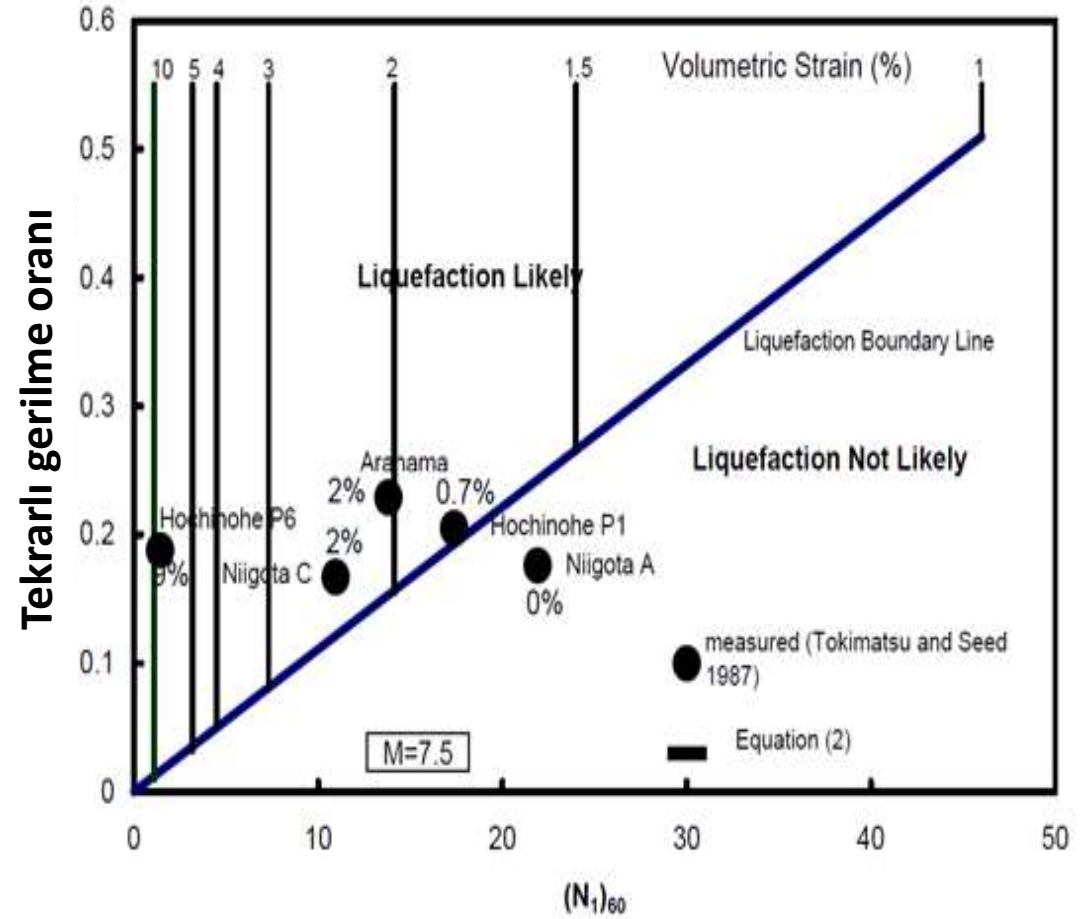


Kum için (Tokimatsu & Seed, 1987)

Kumlu Malzemelerin Sismik Yükleme Koşullarında Oturmaların Tahmini

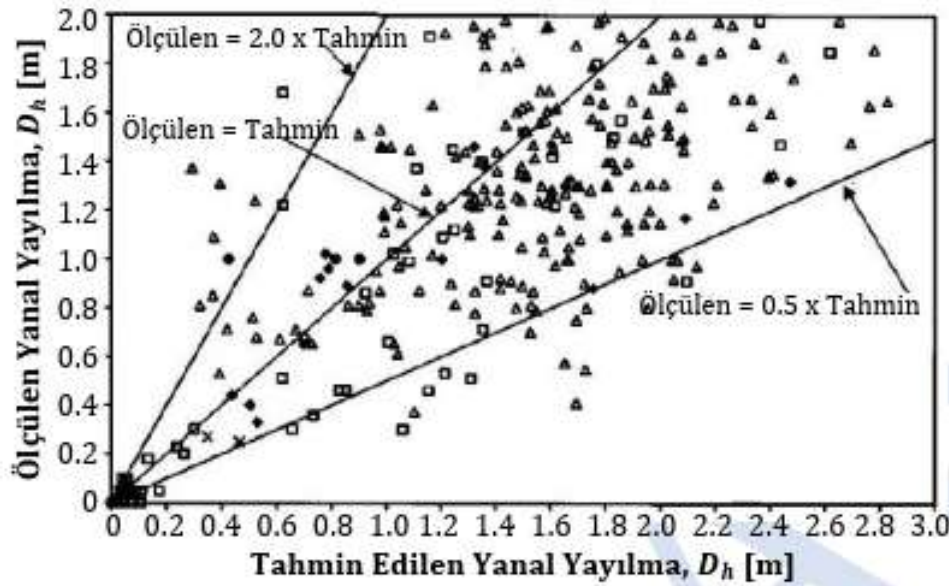
$$\varepsilon_v = 10 [(N_{1,60})]^{-0.6}$$

$$\left[\frac{CSR}{(N_{1,60})} \right] > 0.01$$



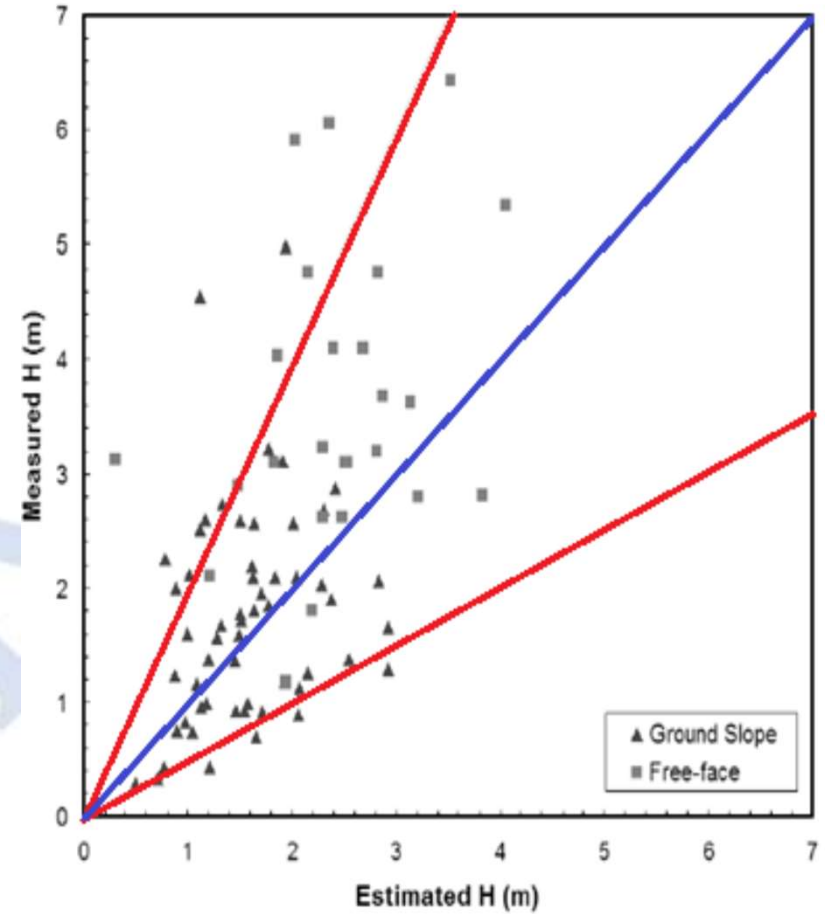
Suya doymun kumlar için tekrarlı gerilme oranı, $(N_1)_{60}$, ve hacimsel birim şekil değiştirme (volumetric strain, %) arasındaki ilişki (Lee, 2007)

Yanal Yayılma Potansiyelinin Ampirik olarak Tahmini

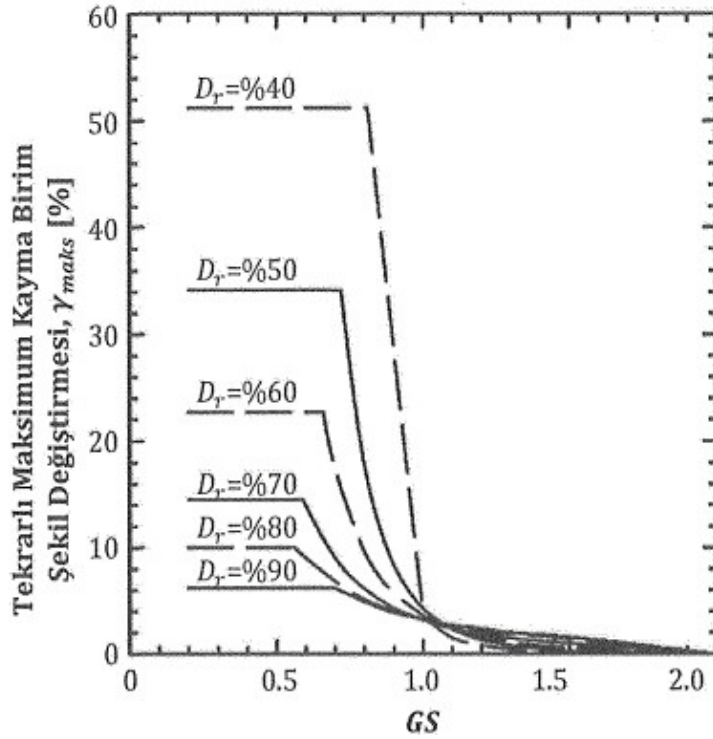


Bu yöntemden tahmin edilen yer değiştirmeler ve gerçekte ölçülen yanal yayılma değerleri arasında iki kat mertebesinde belirsizlik vardır.

Youd et al. (2002)

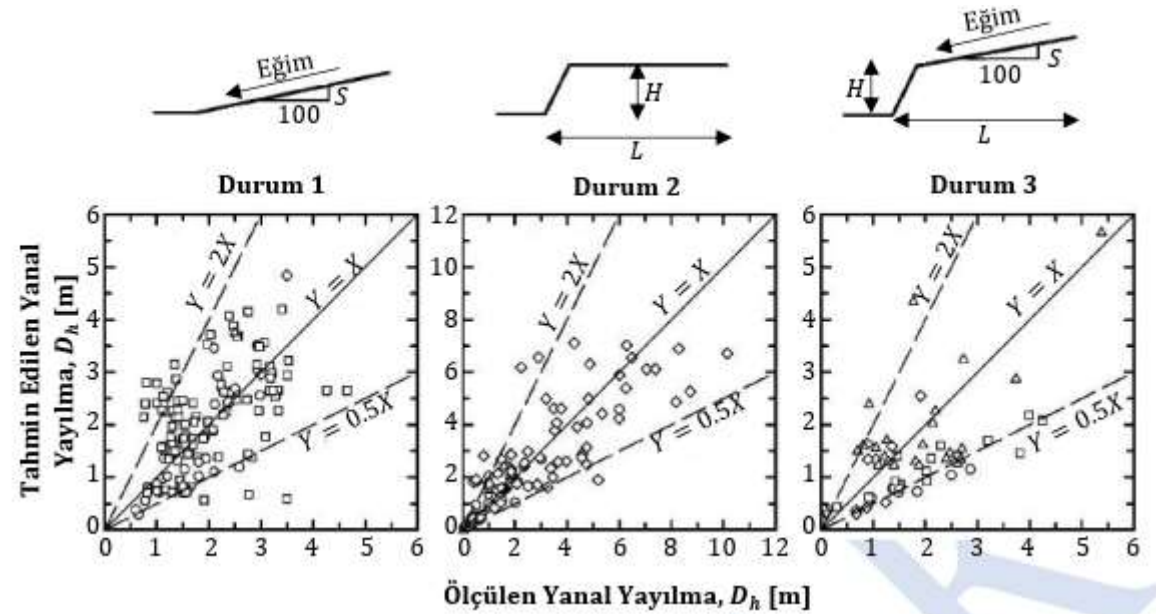


Faris et al. (2006)



Tekrarlı maksimum kayma birim şekil değiştirmesi ile sıvılaşmaya karşı hesaplanan GS ilişkisi (Zhang vd., 2004)

Yanal yayılma kaynaklı yer değiştirme değerinin yüzeyin geometrik sınıflandırılmasına bağlı olarak belirlenmesi (Zhang vd., 2004)



Üzerinde Yer Alan Tabakalara Göre Sıvılaşmanın Yüzeyde Etkisinin Tahmin Edilmesi

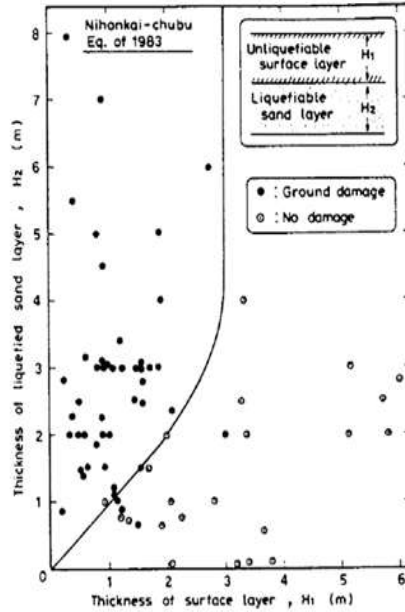
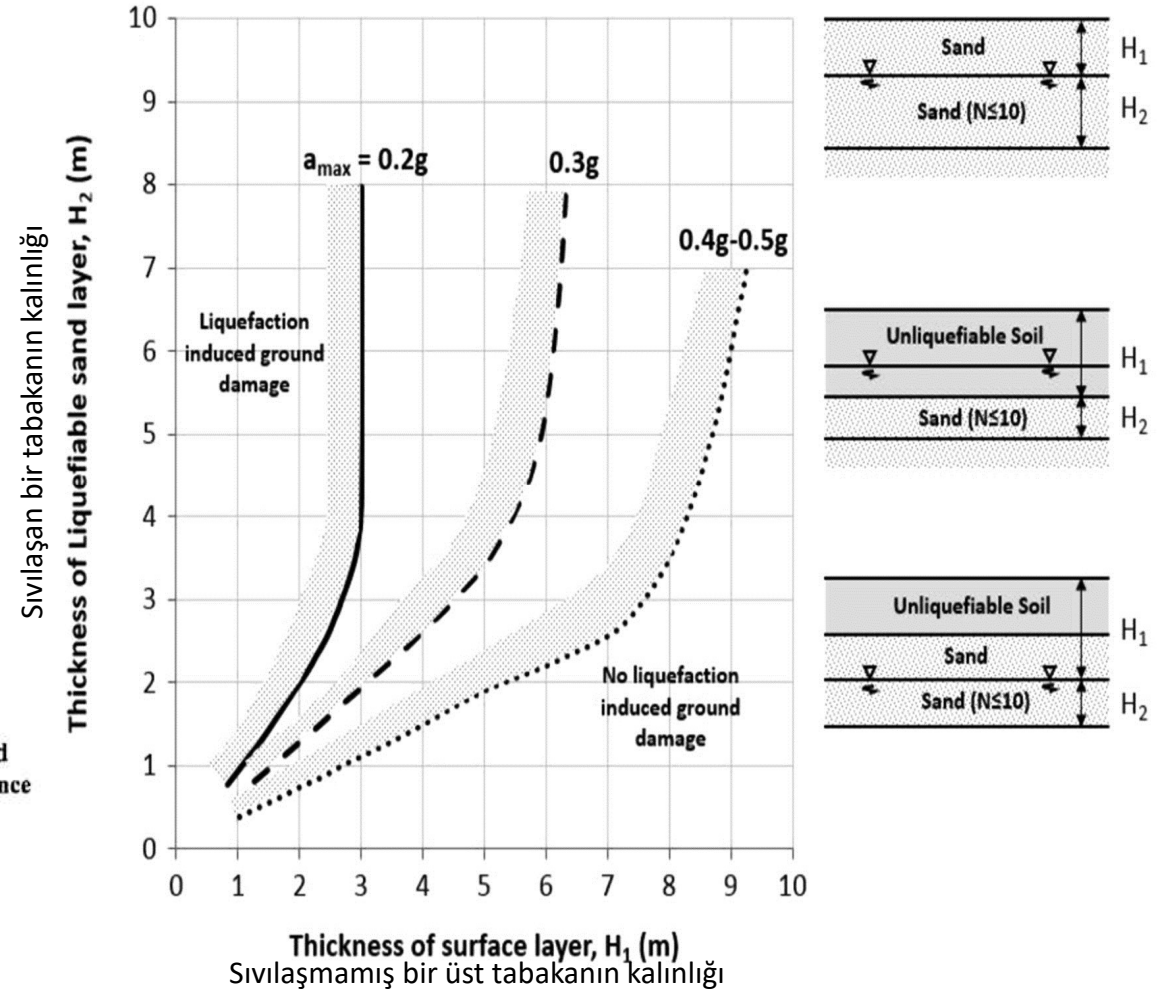


Figure 1. Thicknesses of Liquefied and Overlying Non-liquefied Layers for Discriminating Between Occurrence and Non-occurrence of Surface Effects of Liquefaction (After Ishihara, 1985)



Sıvılaştıran bir tabakanın kalınlığı, H_2 (m) ile sıvılaşmamış bir üst tabakanın kalınlığı H_1 (m) arasında, düz zeminde sıvılaşmanın yüzey tezahürünün gözlemlendiği yerlerde ilişki (Ishihara, 1985).

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (PI/LPI)

- Sıvılaşma tehlikesi bulunan tabakalardaki güvenlik sayıları hesaplandıktan sonra yüzeyden belli bir derinliğe kadar Sıvılaşma Tehlikesi Indisi (PL/LPI) hesaplanarak bölgesel sıvılaşma tehlikesi değerlendirmesi yapılabilir (Iwasaki, 1982).

$$LPI = \int_0^{\infty} w(z) \cdot [1 - FS_L(z)] \cdot dz$$

Burada $w(z)=10-0.5z$ ($z= m$ cinsinden yüzeyden derinlik)

$FS_L(z)= z$ derinliğindeki güvenlik sayısı

Iwasaki (1982 Kriteri)

$LPI= 0$, sıvılaşma yenilmesi potansiyeli çok az ya da hiç;

$0 < LPI < 5$, sıvılaşma yenilmesi potansiyeli düşük;

$5 < LPI < 15$, sıvılaşma yenilmesi potansiyeli orta ölçekte;

$LPI > 15$, sıvılaşma yenilmesi potansiyeli yüksek.

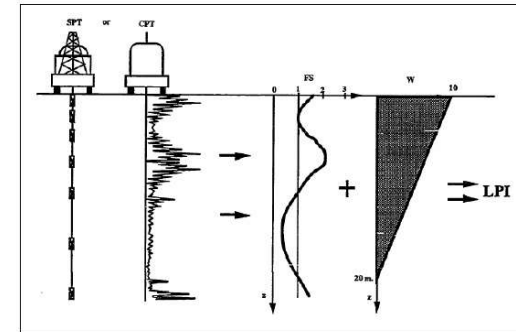
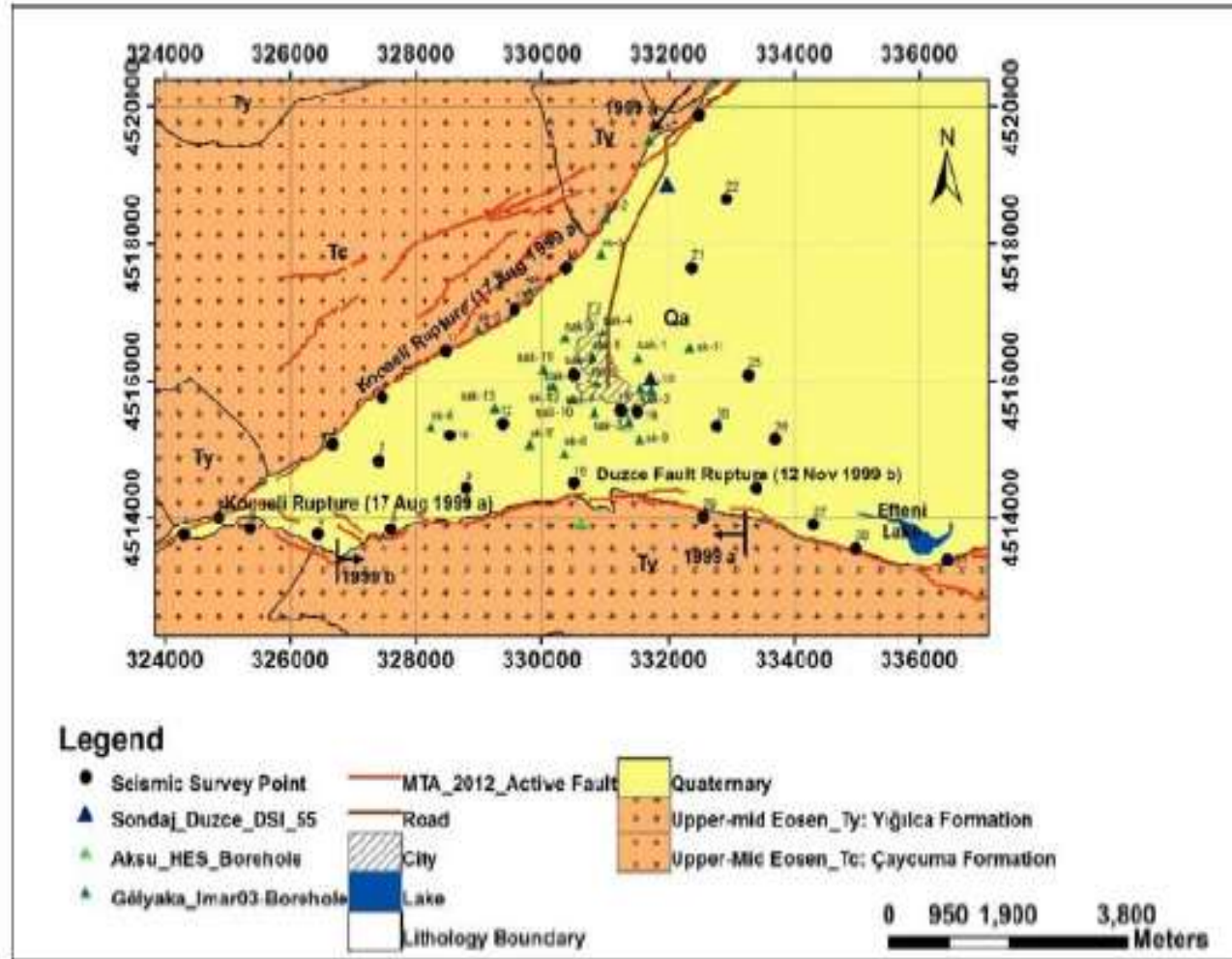


Figure 6.15. Conceptual graphic representation of LPI calculation (After Luna, 1994)

DÜZCE-GÖLYAKA ÖRNEK ÇALIŞMA



DÜZCE-GÖLYAKA ÖRNEK ÇALIŞMA (Yousefi-Bavil, Koçkar ve Akgün, 2018)

SPT ile yapılan Örnek Sıvılaşma Analizleri

	SK- 11															
	GWT (m)	1														

NO	Depth (m)	SPT-N	(USCS)	$\gamma_n \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$\gamma_d \text{ (kN/m}^3\text{)}$	FC %	$\sigma_{v0} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$\sigma'_{v0} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	C_N	C_R	C_S	C_B	C_E	N_{L60}	N_{L60f}
1	1.50	3	SM-SC	19.0	20.0	10.0	29.0	24.10	1.70	0.75	1.0	1.0	1.0	3.8	4.8
2	3.00	4	SM-SC	19.0	20.0	13.0	59.0	39.40	1.56	0.85	1.0	1.0	1.0	5.3	7.4
3	4.50	4	SM-SC	19.0	20.0	11.0	89.0	54.70	1.32	0.95	1.0	1.0	1.0	5.0	6.4
4	6.00	3	SM-SC	19.0	20.0	12.0	119.0	70.00	1.17	0.95	1.0	1.0	1.0	3.3	5.0
5	7.50	5	SM-SC	19.0	20.0	10.0	149.0	85.20	1.06	0.95	1.0	1.0	1.0	5.0	6.0
6	9.00	8	SM-SC	19.0	20.0	12.0	179.0	100.50	0.98	1	1.0	1.0	1.0	7.8	9.6

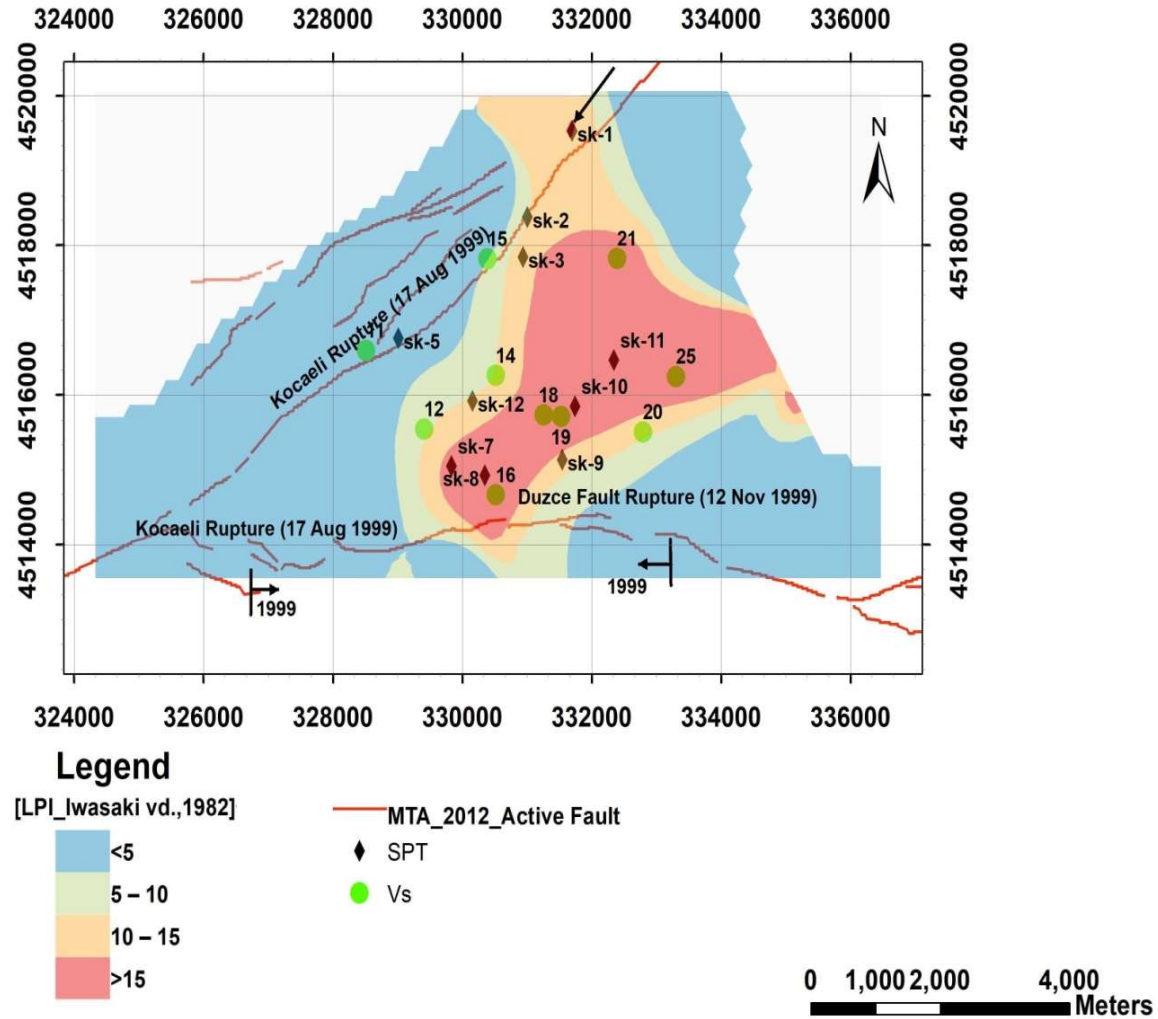
						LPI
$CRR_{M7.5}$	C_M	τ_R	r_d	τ_{deprem}	$\frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \geq 1.10$	Iwasaki vd. (1982)
0.07	1	1.7	0.99	2.35	0.73	26.91
0.091	1	3.57	0.98	4.72	0.76	
0.083	1	4.51	0.97	7.04	0.65	
0.072	1	5.03	0.95	9.3	0.55	
0.08	1	6.8	0.94	11.5	0.6	
0.11	1	11.02	0.93	13.65	0.81	

						Sönmez and Göçeoğlu (2005)
						25.81

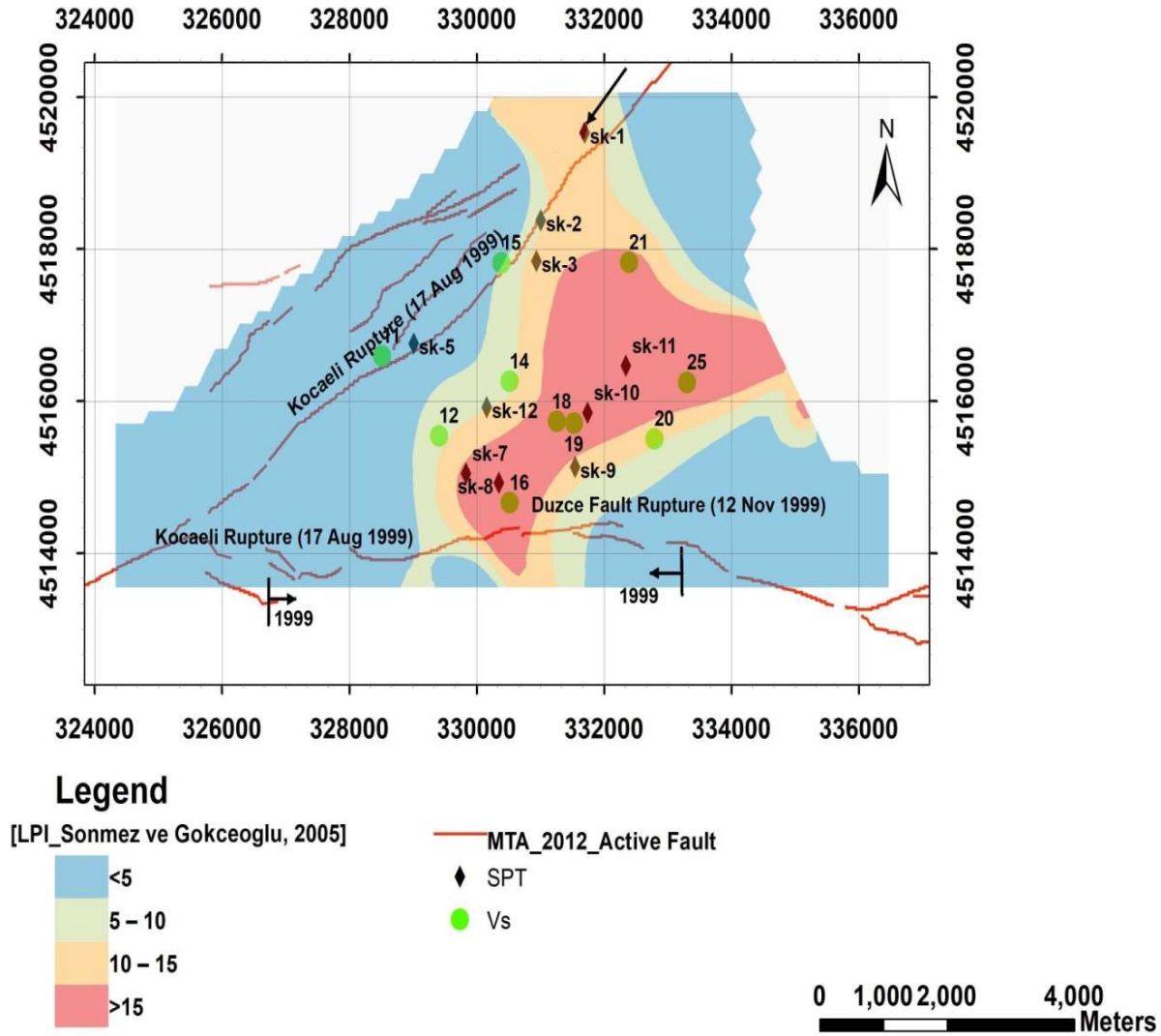
V_s ile yapılan Örnek Sıvılaşma Analizleri

	Sesi20																		
GWT (m)	2																		
Description	Depth (m)	γ (kN/m ³)	σ_v' (kPa)	σ_v (kPa)	σ_v' (atm)	depth (m)	rd (m)	PGA soil (E)	CSR _{avg}	Vs	Cv	V _{s1}	V _{s1} '	CRR _{7.5}	MSF (7.5)	K _{σ}	K _{α}	CRR (7.5)	F ₅₀₀
SM-SC(5 <FC <35)	1.50	19.00	28.50	28.50	0.28	1.50	0.97	0.315	0.199	138	1.37	189	212	0.07	1.0	1.00	1	0.070	0.352
SM-SC (5 <FC <35)	3.00	19.00	47.19	57.00	0.47	3.00	0.98	0.315	0.188	98	1.21	119	212	0.10	1.0	1.00	1	0.100	0.602
SM-SC (5 <FC <35)	5.00	19.00	65.57	95.00	0.65	5.00	0.97	0.315	0.137	126	1.11	140	211	0.12	1.0	1.00	1	0.120	0.875
SM-SC (5 <FC <35)	7.00	19.00	83.95	133.00	0.83	7.00	0.95	0.315	0.123	108	1.05	113	213	0.11	1.0	1.00	1	0.110	0.896
SM-SC (5 <FC<35)	9.50	19.00	108.93	180.50	1.08	9.50	0.94	0.315	0.114	144	0.99	142	212	0.12	1.0	1.00	1	0.120	1.052
SM (FC>35)	12.00	19.00	129.90	228.00	1.28	12.00	0.93	0.315	0.108	160	0.94	150	200	0.18	1.0	1.00	1	0.180	1.659
SM (FC>35)	14.50	19.00	152.88	275.50	1.51	14.50	0.95	0.315	0.108	150	0.90	135	200	0.21	1.0	1.00	1	0.210	1.945
SM (FC>35)	17.50	19.00	180.45	332.50	1.78	17.50	0.97	0.315	0.108	210	0.87	182	200	0.29	1.0	1.00	1	0.290	2.690
SM (FC>35)	21.00	19.00	212.81	399.00	2.10	21.00	0.95	0.315	0.104	231	0.83	192	200	0.31	1.0	1.00	1	0.310	2.990
SM (FC>35)	24.00	19.00	240.18	456.00	2.37	24.00	0.94	0.315	0.101	245	0.81	197	200	0.39	1.0	1.00	1	0.390	3.846
SM (FC>35)	28.00	19.00	276.94	532.00	2.73	28.00	0.95	0.315	0.101	264	0.78	205	200	0.48	1.0	1.00	1	0.480	4.739

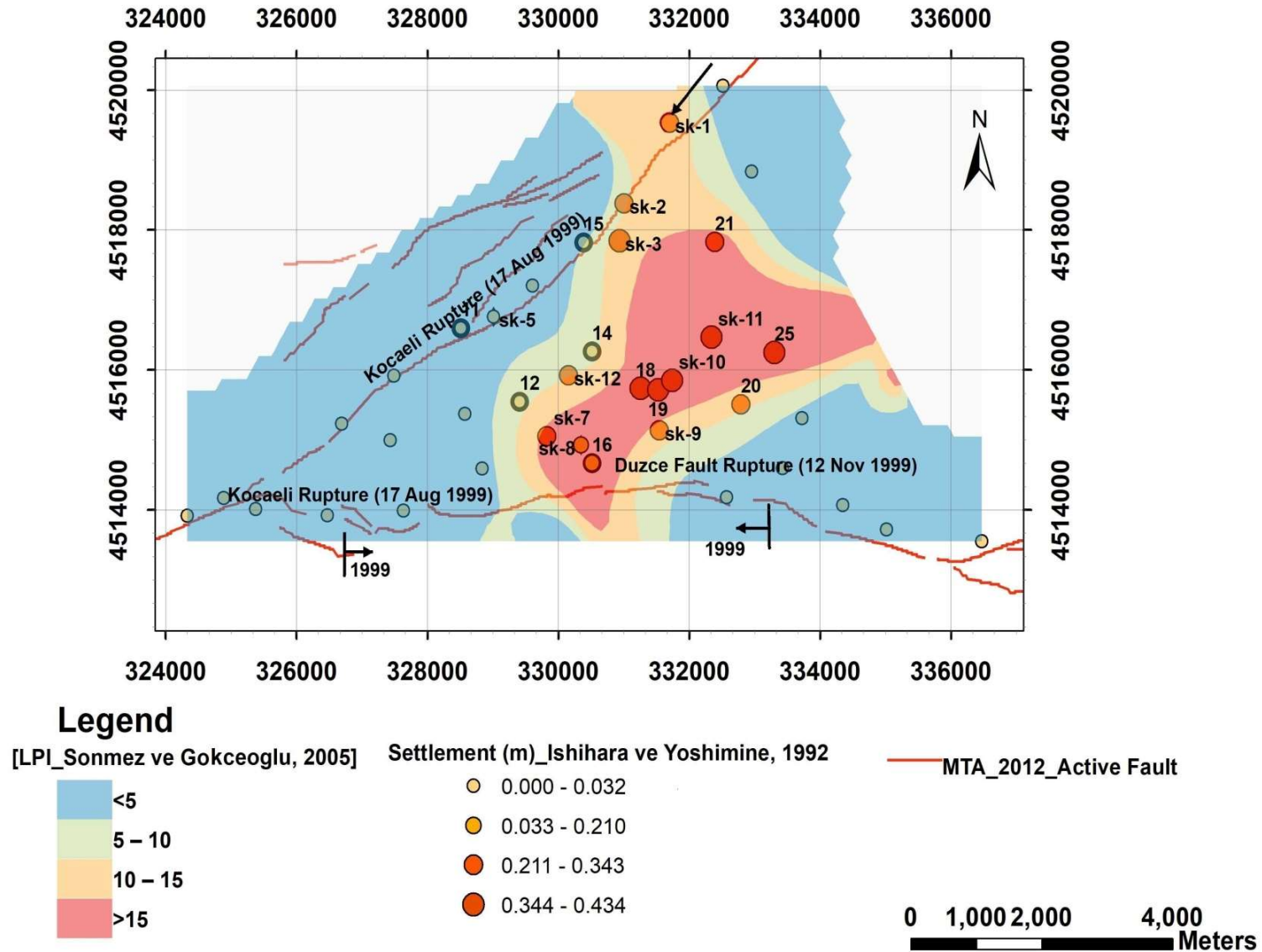
SIVILAŞMA POTANSİYELİ İNDEKSİ (LPI)



SIVILAŞMA POTANSİYELİ İNDEKSİ (LPI)



LIQUEFACTION POST DEFORMATION ANALYSIS (VOLUMETRIC STRAIN AND SETTLEMENT)



Deprem Etkisi Altında Sahaya Özel Zemin Davranış Analizleri (Tasarım Gözetim ve Kontrolü Hizmetlerine Yönelik Çalışmalar)

ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killler, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killler, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killler, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killler.
----	---

Tablo 16.1 – Yerel Zemin Sınıfları

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

16.5. DEPREM ETKİSİ ALTINDA SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ

16.5.1. Kapsam

16.5.1.1 – Sahaya özel zemin davranış analizleri, taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketinin zemin tabakaları boyunca değişimini ve zemin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere yapılır.

16.5.1.2 – Bina temeli ve yakın çevresinde zemin ortamının yaklaşık olarak yatay tabakalardan oluştuğu durumlarda, sahaya özel zemin davranış analizleri için **16.5.2**'de esas alınan tek boyutlu yatay tabakalı serbest zemin modeli kullanılabilir. Aksi durumlarda iki veya üç boyutlu zemin modelleri kullanılacaktır.

16.5.1.3 – Tablo 16.1'e göre ZF sınıfı olarak tanımlanan zeminlerin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere sahaya özel zemin davranış analizinin yapılması zorunludur.

(TBDY, 2019)

Deprem Etkisi Altında Sahaya Özel Zemin Davranış Analizleri

2.5. ZAMAN TANIM ALANINDA DEPREM YER HAREKETLERİNİN TANIMLANMASI

Bu yönetmeliğe göre bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında bir veya iki boyutlu ve üç boyutlu deprem hesabında gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanması için kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve *basit ölçeklendirme* yöntemi ile ölçeklendirilmesi veya *spektral uyum* sağlanacak şekilde dönüştürülmesi için uygulanması gerekli kurallar 2.5.1, 2.5.2 ve 2.5.3'te tanımlanmıştır.

2.5.1. Deprem Kayıtlarının Seçimi

2.5.1.1 – Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılacaktır. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtlar kullanılacaktır.

Sahaya özel deprem tehlikesine en fazla katkıda bulunan depremlere ait büyüklük ve fay uzaklığı bilgilerinin belirlenmesi için *deprem tehlikesi ayırıştırma* işleminden yararlanılabilir.

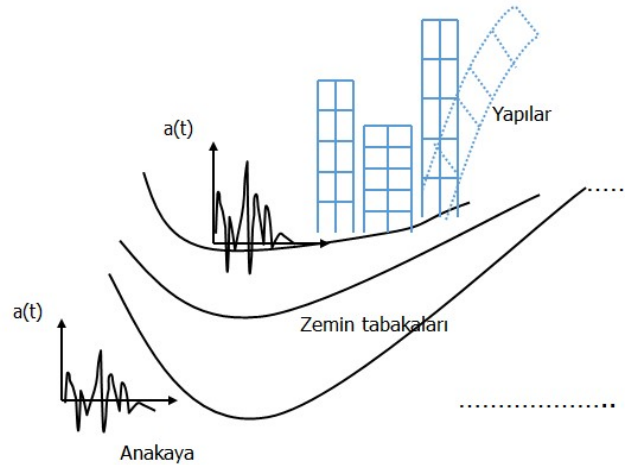
2.5.1.2 – Yeterli sayı veya nitelikte deprem kaydı seçiminin yapılamadığı durumlarda, zaman tanım alanında benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, binanın bulunduğu sahanın sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri göz önüne alınacaktır. Benzeştirme için kullanılacak model parametrelerinin, söz konusu bölgede meydana gelmiş depremlerde kaydedilmiş gerçek deprem kayıtları ile uyumlu olduğu gösterilecektir.

2.5.1.3 – Bir veya iki boyutlu hesap için seçilecek *deprem kayıtları*'nın ve üç boyutlu hesap için seçilecek *deprem kaydı takımları*'nın sayısı en az onbir olacaktır. Aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmeyecektir.

(TBDY, 2019)

Deprem Etkisi Altında Sahaya Özel Zemin Davranış Analizleri

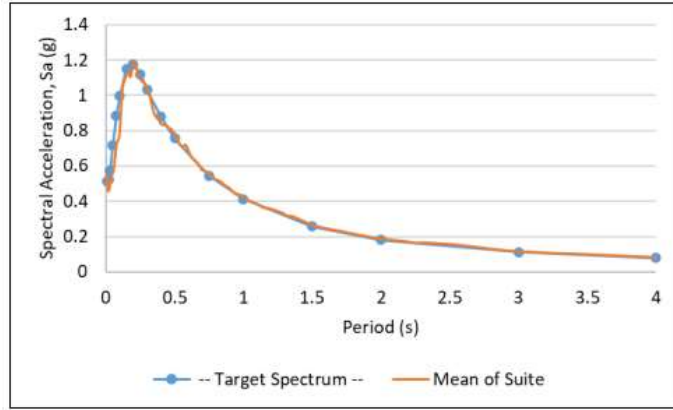
- Deprem yönetmeliğine göre sahaya özel zemin davranış analizleri taban kayasında tanımlanan $[(V_s)_{30} = 760 \text{ m/s}]$ deprem yer hareketinin yüzeyde zemin tabakalarına bağlı olarak değişimini ve yer hareketini belirlemek için yapılır.
- Deprem Kayıtlarının Seçimi: Kayıtların TBDY (2019) 'dan elde edilen ve referans zemin koşulu olan 760 m/s için geçerli olan tasarım ivme spektrumu ile uyumlu olması gerekir.



ID	Earthquake Name	Year	Station Name	Mw	Mechanism	Rrup (km)	V _{s30} (m/s)	PGA (g)
1	"Imperial Valley-06"	1979	"El Centro Array #10"	6.53	strike slip	8.6	203	0.23
2	"Imperial Valley-06"	1979	"El Centro Differential Array"	6.53	strike slip	5.09	202	0.48
3	"Imperial Valley-06"	1979	"Holtville Post Office"	6.53	strike slip	7.5	203	0.22
4	"Morgan Hill"	1984	"Coyote Lake Dam - Southwest Abutment"	6.19	strike slip	0.53	561	1.3
5	"Morgan Hill"	1984	"Gilroy Array #6"	6.19	strike slip	9.87	663	0.29
6	"Superstition Hills-02"	1987	"Parachute Test Site"	6.54	strike slip	0.95	349	0.39
7	"Kobe_Japan"	1995	"KJMA"	6.9	strike slip	0.96	312	0.63
8	"Kobe_Japan"	1995	"Takarazuka"	6.9	strike slip	0.27	312	0.62
9	"Kocaeli_Turkey"	1999	"Izmit"	7.51	strike slip	7.21	811	0.23
10	"Chi-Chi_Taiwan-04"	1999	"CHY074"	6.2	strike slip	6.2	553	0.33
11	"Bam_Iran"	2003	"Bam"	6.6	strike slip	1.7	487	0.64
12	"Parkfield-02_CA"	2004	"PARKFIELD - EADES"	6	strike slip	2.85	384	0.39
13	"Parkfield-02_CA"	2004	"Parkfield - Cholame 1E"	6	strike slip	3	327	0.36
14	"Parkfield-02_CA"	2004	"Parkfield - Cholame 3W"	6	strike slip	3.63	231	0.58
15	"Parkfield-02_CA"	2004	"Parkfield - Fault Zone 1"	6	strike slip	2.51	178	0.84
16	"Darfield_New Zealand"	2010	"DSLC"	7	strike slip	8.46	296	0.26
17	"Darfield_New Zealand"	2010	"HORC"	7	strike slip	7.29	326	0.48
18	"Darfield_New Zealand"	2010	"LINC"	7	strike slip	7.11	263	0.39
19	"Darfield_New Zealand"	2010	"TPLC"	7	strike slip	6.11	249	0.21
20	"Duzce_Turkey"	1999	"IRIGM 487"	7.14	strike slip	2.65	690	0.3

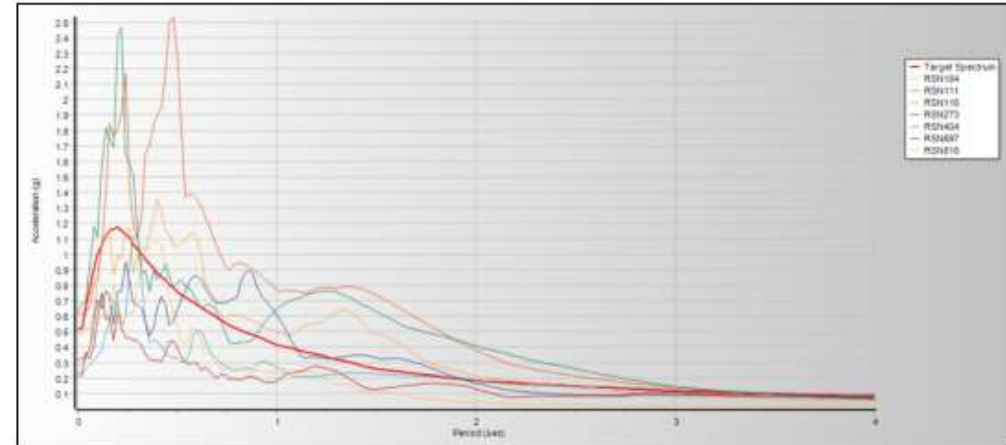
- Seçilen yer hareketi kayıtlarının bir özeti (PEER Yer Hareketi Veritabanı, NGA-WEST 2).

Yousefi-Bavil (2021)

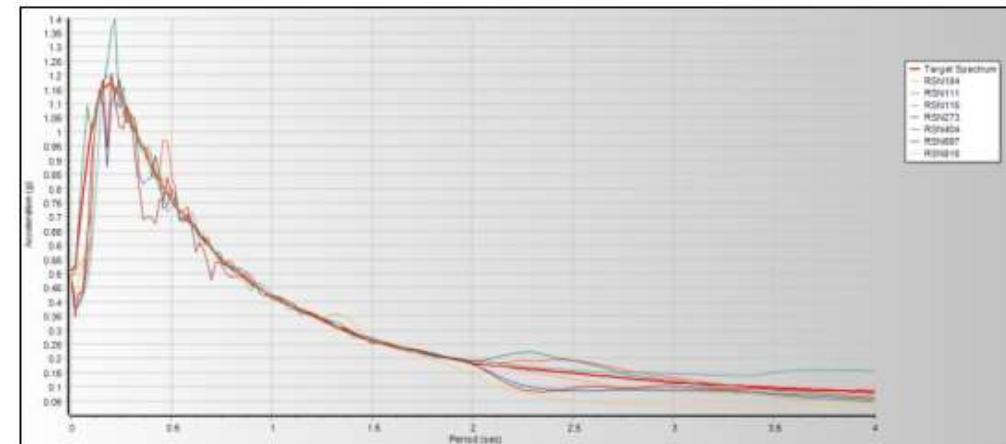


Tasarım ivme spektrumu, 11 depremin ve ivme spektrumunun ortalaması alınarak hesaplanır.

Kullanılan depremlerin orijinal ivme kayıtlarıyla tasarım ivme spektrumu.

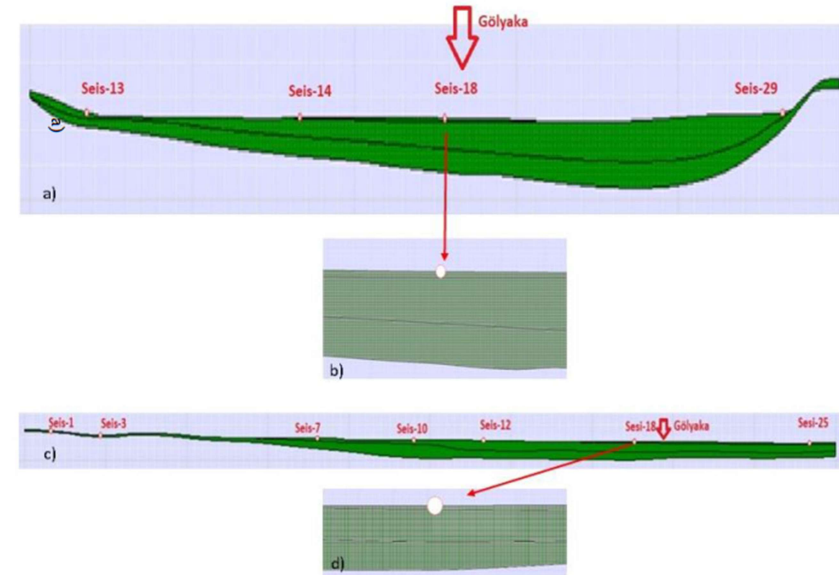
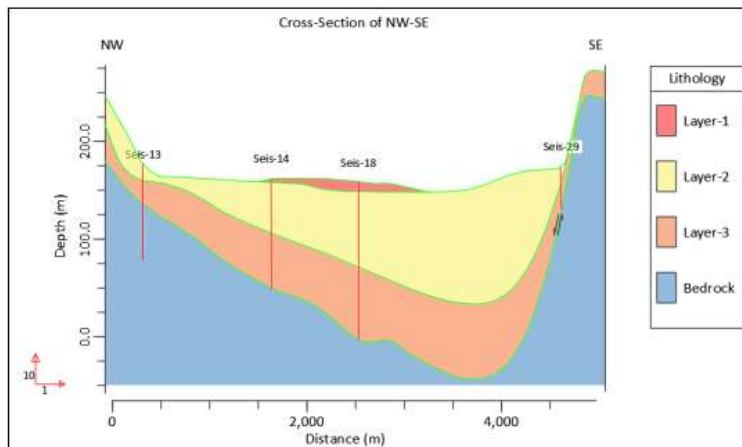
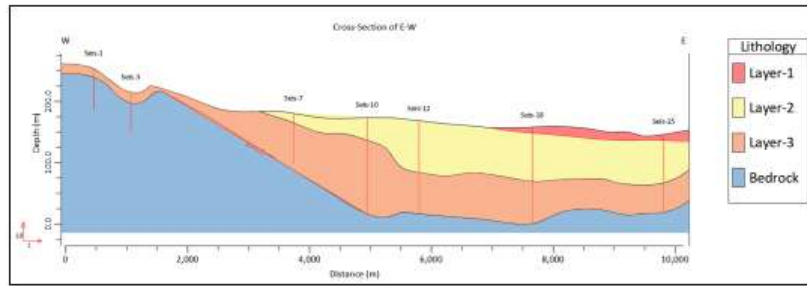


Kullanılan depremlerin ivme kayıtları tasarım ivme spektrumuyla uyumlu hale getirildi (Ölçeklendirme).



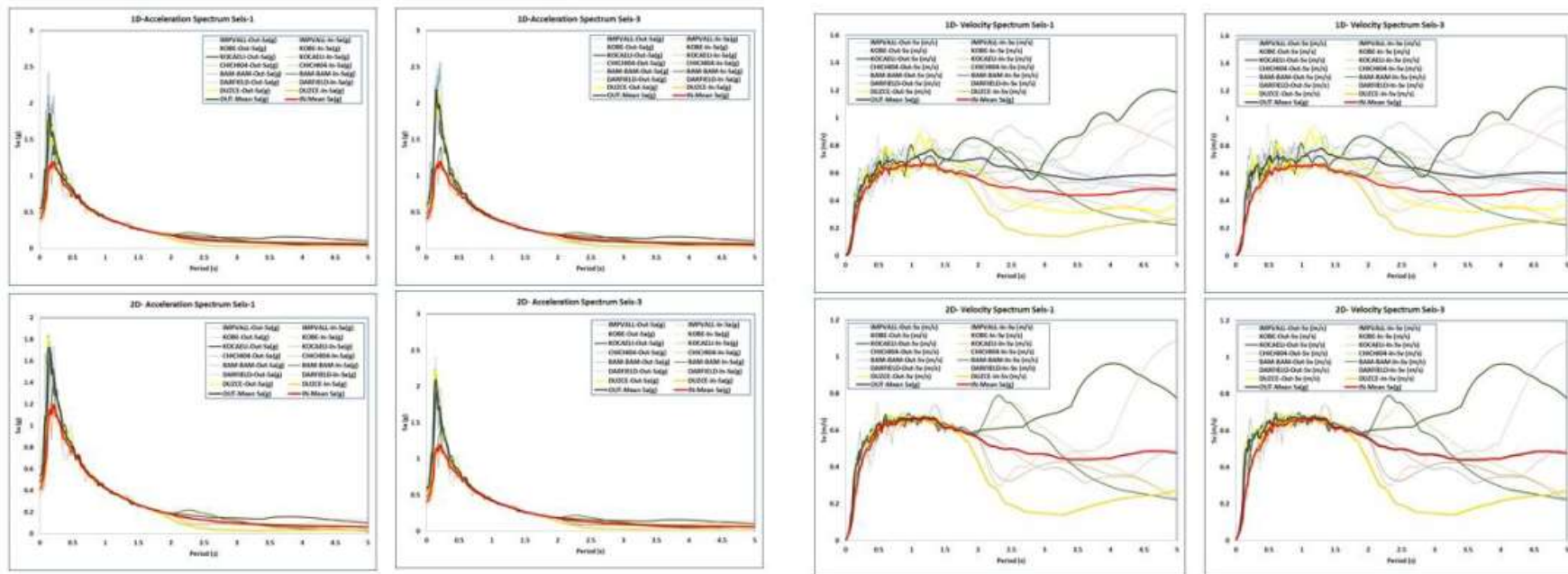
Yousefi-Bavil (2021)

- 1D (Shake 2000 ve Deepsoil vb.) ve 2D Zemin Tepki Analizleri (Site Response Analysis)



Sırasıyla KB-GD ve D-B kesitlerinin 2-D zemin modeli (FEM-tabanlı QUAD4M; Yousefi-Bavil K, 2021)

- Sahaya özel deprem tehlike analizleri



Gölyaka havzasının batı kesiminde çok ayrılmış kaya zeminlerde 1B ve 2B analizlerine bağlı ivme spektrumunun değişimlerine bağlı saha etkisinin değerlendirilmesi (1999 Kocaeli EQ)

Gölyaka havzasının batı kesiminde çok ayrılmış kaya zeminlerde 1B ve 2B sayısal saha tepki analizleri yapıldıktan sonra elde edilen hız spektrumlarının (1999 Kocaeli EQ)

Yousefi-Bavil (2021)

Zemin-Yapı Etkileşimi

1.3.2. Kapsam

Bu Yönetmeliğin uygulanmasında aşağıda (a) ila (g)'de belirtilen konular **1.3.1'**de tanımlanan “*tasarım gözetimi ve kontrolü*” hizmetine tabidir:

(a) **Bölüm 2** kapsamında **2.4.1'**de belirtilen Sahaya Özel Deprem Tehlikesi Analizleri

(b) **Bölüm 2** kapsamında **2.5'e** göre Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketlerinin Tanımlanması

(c) **Bölüm 2** ve **Bölüm 16** kapsamında **2.4.2** ve **16.5'e** göre Sahaya Özel Zemin Davranışı Analizleri

(d) **Bölüm 5** kapsamında **5.6.6'**ya göre Çok Modlu İtme Yöntemleri ve **5.7'ye** göre Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi İle Deprem Hesabı

(e) **Bölüm 13'e** göre Yüksek Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Deprem Hesabı ve Tasarımı

(f) **Bölüm 14'e** göre Yalıtımlı Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Deprem Hesabı ve Tasarımı

(g) **Bölüm 16** kapsamında **16.10'a** göre Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Hesapları

Kaynakça

- Ambraseys, N.N. (1989) Temporary seismic quiescence: SE Turkey. *Geophys. J*, 96, 311–331.
- Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2006). Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132 (11), 1413-1426.
- Bray, J. D., & Sancio, R. B. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *J. Geotech Geoenviron. Eng.* , 132, 1165-1177.
- C. Y. Lee, 2007, Earthquake-Induced Settlements in Saturated Sandy Soils
- Faris, A. T., Seed, R. B., Kayen, R. E., Wu, J. (2006). “A semi-empirical model for the estimation of maximum horizontal displacement due to liquefaction-induced lateral spreading” *Proc. 8th US National Conf. on Earthquake Eng.*, San Francisco, California, USA, Paper No. 1323.
- Finn, W. D. L., Ledbetter, R. H., and Wu, G., 1994, “Liquefaction in Silty Soils: Design and Analysis.” *Ground Failures under Seismic Conditions*, Geotechnical Special Publication 44, ASCE, New York, pp. 51-76.
- Hubert-Ferrari, A., El-Ouahabi, M., Garcia-Moreno, ve. Diğ., 2017, Earthquake imprints on a lacustrine deltaic system: the Kürk Delta along the East Anatolian Fault (Turkey), *Sedimentology*, 64, 1322–1353.
- Idriss, I. M., Boulanger, R. W. (2007), “SPT- and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils”, *Earthquake Geotechnical Engineering*, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering – Invited Lectures, K. D. Pitilakis, ed., Springer, The Netherlands, 1 – 22.
- Idriss, I. M. ve Boulanger, R. W. (2008). “Soil Liquefaction During Earthquakes” *Earthquake Engineering Research Institute (EERI), EERI Monograph MNO-12*.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. 1982. Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Southampton, UK, 925–939.

- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H., 1982, Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods, Proc., 3rd Int. Earthquake Microzonation Conf., Seattle, 1319-1330.
- Kevin Franke, CEEN 545 – Electronic Supplement
- Koçkar M.K. (2006) "Engineering Geological and Geotechnical Site Characterization and Determination of the Seismic Hazards of Upper Pliocene and Quaternary Deposits Situated Towards the West of Ankara," Ph.D. Thesis, ODTÜ, Ankara, Ocak 2006, 401 s.
- Kramer, S. L. ve Wang, C.-H. (2015). "Empirical Model for Estimation of the Residual Strength of Liquefied Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, May 2015.
- Obermeier, S.F., 1996, Use of liquefaction-induced features for seismic analysis - An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes: Engineering Geology, vol. 44, p. 1-76.
- Rauch, A. F. (1987). An Empirical Method for Predicting Surface Displacements Due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes. Ph.D. Thesis, Virginia Tech., 253 p.
- Seed, R.B., Harder, L.F. Jr., (1990), "SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength", Proceedings of the H. B. Seed Memorial Symposium, May 1990.
- Seed, R. B., et al. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified consistent framework. Berkely, California: Earthquake Engineering Research Institute.
- Sonmez, H. and Gokceoglu, C. (2005). A liquefaction severity index suggested for engineering practice, Environ. Geology., 48, 81–91.
- Stark, T.D., Mesri G. (1992), "Undrained shear strength of liquefied sands for stability analysis" J. Geotechnical Engineering Division, ASCE , 118(11), 1727-1747.

- TBDY-2018, AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları, <https://tdth.afad.gov.tr/>
- TBDY (2018). “Türkiye Binalar için Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar”, Türkiye Cumhuriyeti, Ankara.
- USGS Open-file Report 98-488, 1998, Seismic Liquefaction Features: Examples From Paleoseismic Investigations In The Continental United States, Stephen F. Obermeier.
- Weber, J. P., Seed, R. B., Pestana, J. M., Moss, R. E. S., Nweke, C., Değer, T. T. ve Chowdhury, K. (2015). Engineering Evaluation of Post-Liquefaction Strength, Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley, The U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC).
- Youd, T. L. Hansen, C. M. ve Bartlett, S. F. (2002), “Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, December 2002, pp. 1007-1017.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., & Stokoe, K.H. 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 127 (10): 817–833.
- Yousefi-Bavil K, Koçkar MK, Akgün H (2018) Development of a 3-D topographical basin structure based on seismic and geotechnical data: Case study at a high seismicity area of Gölyaka, Düzce, Turkey. In: Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering , Thessaloniki, Greece, Paper No. 11507
- Zhang, G., Robertson, P. K. ve Brachman, R. W. I. (2004). Estimating Liquefaction-Induced Lateral Displacements Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 130, Issue 8.