

SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN SPT VE KAYMA DALGASI HIZI KULLANILARAK BELİRLENMESİ – İSTANBUL MİKROBÖLGELEME SAHA ÖRNEKLERİ

DETERMINATION OF LIQUEFACTION POTENTIAL BASED ON SPT AND V_s – MICROZONATION CASE STUDIES IN ISTANBUL

Serdar GÜNAY¹, Burak ÇATLIOĞLU², Hakan MEHMETOĞLU², Kemal DURAN²

ÖZET

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından yürütülen mikrobölgeleme çalışmaları doğrultusunda yapılan doğal afet tehlikelerinin belirlenmesi çalışmalarından biri de sivilaşma analizleridir. Sivilaşmaya elverişli zemin tabakalarının tespiti için literatürde plastisite ve ince dane oranına dayanan birçok kriter yer almaktadır. Bu kriterler sınırlı veri setlerine, nispeten öznel değerlendirmelere ve tanımlara dayanarak hazırlandığı için dikkatle kullanılmalıdır. Sivilaşma tetikleme potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen yöntemler, dinamik laboratuvar deneyleri (dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney) ve saha deneyleri (SPT, CPT ve jeofizik yöntemler) olarak iki kategori altında incelenmektedir. Bu çalışmada sivilaşmaya duyarlı olduğu değerlendirilen 30 noktada SPT ve kayma dalgası hızı kullanılarak sivilaşma tetikleme potansiyelleri araştırılarak iki yöntemin avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir. Çevrimsel yükler altında killerde yoğunlaşma ve aşırı boşluk suyu basıncı kaynaklı kayma mukavemetinde azalmalar gerçekleştiği bilinmektedir. Bu durumu temsilen çok kalın (>35 m) yumuşak ve orta katı kil tabakasının seçilen bir deprem kaydı etki ettirilerek sahaya özel zemin davranış analizi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: sivilaşma potansiyeli, kayma dalgası hızı, standart penetrasyon deneyi, sahaya özel zemin davranış analizi

ABSTRACT

Within the framework of microzonation projects undertaken by the Istanbul Metropolitan Municipality, one of the essential analyses is liquefaction assessments. The methodologies proposed for assessing the liquefaction triggering potential are categorized into two primary groups: dynamic laboratory tests (including dynamic simple shear and dynamic triaxial tests) and field tests (encompassing SPT, CPT, and geophysical methods). This study focuses on examining the liquefaction triggering potential at 30 sites deemed sensitive to liquefaction, using SPT and V_s . Additionally, a comprehensive comparison of the advantages and disadvantages of these two methodologies are given. Under cyclic loads, it is well-established that clays might undergo shear strength reduction and excessive shear strains. To assess this phenomenon, a seismic site response analysis has been conducted, applying a selected seismic record to a particularly thick (>35 m) layer of soft and medium hard clay.

Keywords: liquefaction potential, shear wave velocity, standard penetration test, seismic site response analysis

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, serdar.gunay@ibb.gov.tr (sorumlu yazar)

² Jeofizik Yüksek Mühendisi, İstanbul Büyükşehir Belediyesi

1. GİRİŞ

1957 San Francisco, 1964 Niigata ve Alaska depremleri sonrasında geoteknik deprem mühendisliği alanının önemli konularından biri haline gelen sıvılaşma ile ilgili çalışmalar geçtiğimiz 60 yılda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş ve Hatay depremlerinde, Hatay-Antakya ve Adıyaman-Gölbası gibi bölgelerde zemin sıvılaşması nedeniyle binaların, temel özelliklerine bağlı olarak farklı boyutlarda etkilendikleri; yanal yayılma neticesinde yollarda ve altyapı sistemlerinde hasarların oluştuğu bildirilmiştir.

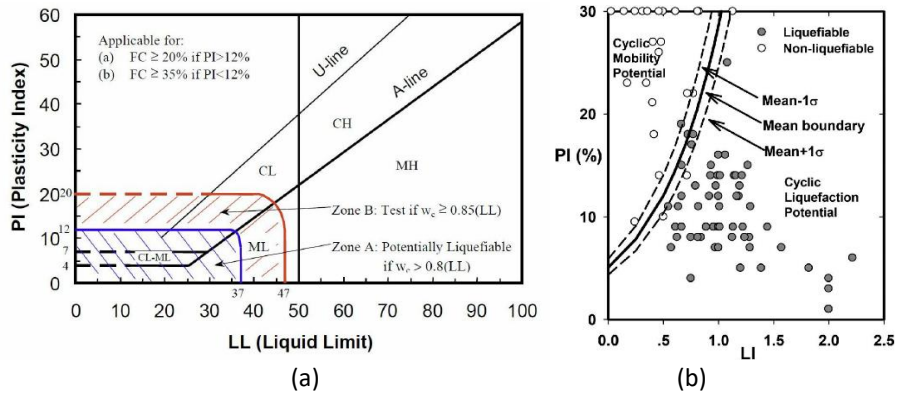
Özellikle sismik aktivitenin yüksek olduğu, genç alüvyal çöktillerden oluşan ovalar, nehir, deniz ve göl kenarları, yapay dolgu alanları sıvılaşma potansiyeli yüksek alanlardır. Genel kanı olarak, bir miktar ince daneli malzeme içeren kumlu zeminlerin sismik sıvılaşmaya duyarlı olduğu bilinmekle birlikte siltli ve killi zeminlerin, çakıllı zeminlerin ve kaya dolguların sıvılaşma potansiyelleri ile ilgili önemli çelişkiler ve karışıklıklar mevcuttur (Çetin, 2004).

Bu çalışma kapsamında, yeni yapıların tasarımında ya da mevcut yapıların sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan, uygulamada kabul görmüş yöntemlerden standart penetrasyon test (SPT) sonuçları ve kayma dalgası hızı (V_s) değerleri kullanılarak gerçekleştirilen yöntemlerden bahsedilmiş, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından yürütülen mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında saha örnekleri verilerek bu iki analiz yönteminin sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Tam olarak sıvılaşmaya denk gelmese de deprem anında kohezyonlu zeminlerde mukavemet kaybına neden olan yumuşama olayı da örnek bir alan için DEEPSOIL programı kullanılarak çalışılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Sıvılaşma potansiyeli, yapı özelinde tasarım ve değerlendirme ile mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında arazi kullanımı ve planlama olmak üzere iki amaç için belirlenir. Her iki amaç benzer yöntemler içerse de, mikrobölgeleme çalışmaları planlamadan sorumlu otoritenin işlerini kolaylaştırmak için sıvılaşma tehlikesi içeren bölgelerin tespitini ve haritalanmasını da kapsar.

Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinin ilk aşaması sıvılaşmaya karşı duyarlılığın (susceptibility) değerlendirilmesidir. Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerin çoğunlukla plastik olmayan (kohezyonsuz) zeminler olduğu kabul edilmiştir. Temiz kumların potansiyel olarak sıvılaşabilirliği uzun zamandır bilinmekle birlikte siltli ya da siltli killi kumlar ile çakıllı zeminlerin sıvılaşabilirliği konusunda halen bir anlaşmazlık söz konusudur. Sıvılaşmaya elverişli zemin tabakalarının tespiti için literatürde plastisite ve ince dane oranına dayanan birçok kriter yer almaktadır (Seed v.d., 2003; Çetin ve Bilge, 2014) (Şekil 1). Bu kriterler sınırlı veri setlerine, nispeten öznel değerlendirmelere ve tanımlara dayanarak hazırlandığı için dikkatle kullanılmalıdır (Çetin v.d., 2023).



Şekil 1. Sıvılaşmaya karşı duyarlılık kriterleri a) Seed v.d., 2003 ve b) ince dane içeren zeminler

Bu çalışma kapsamında incelenen bölgelerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığının değerlendirilmesinde TBDY 2018'deki kriterler dikkate alınmıştır. TBDY (2018) belirli deprem tasarım sınıfları (DTS) (Kısa periyot tasarım spektral ivmesi, $S_{DS} \geq 0.50$) ve zemin grupları (ZD, ZE ve ZF) için sıvılaşma potansiyelinin bulunup

bulunmadığının incelenmesini zorunlu tutmuştur. Yönetmelikte sıvılaşma, yeraltı su seviyesi 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 tanımlanmıştır.

Sıvılaşmaya duyarlı olduğu değerlendirilen alanların tespitinden sonra deprem etkisinde meydana gelecek sıvılaşma talebi ile zeminin sıvılaşmaya karşı direnci karşılaştırılır ve bir güvenlik sayısı ortaya konulur. TBDY (2018)'te sıvılaşmaya karşı kayma direnci (τ_R) ve zeminde depremden dolayı oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi (τ_{deprem}) kavramları tanımlanarak, sıvılaşma karşı güvenlik koşulu $\tau_R/\tau_{deprem} \geq 1.10$ olarak verilmiştir.

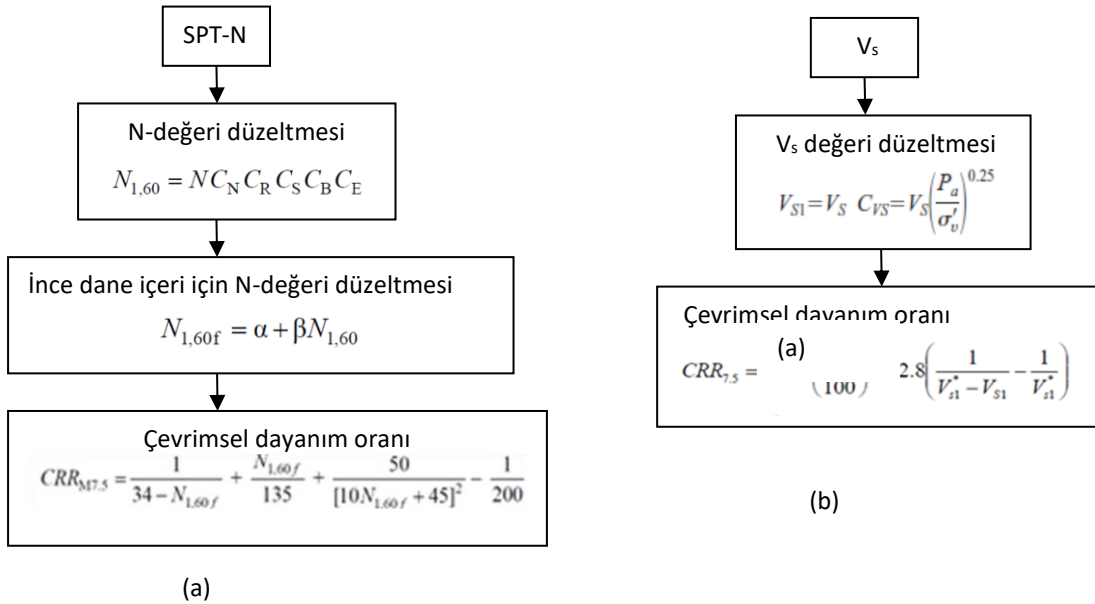
Ülkemizdeki mevzuat ve uygulama el kitaplarında önerilen sıvılaşma tetikleme potansiyelinin değerlendirilmesi yöntemleri; dinamik laboratuvar deneyleri (dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneyi) ve saha deneyleri (SPT, CPT ve jeofizik yöntemler) olarak ikiye ayrılmaktadır. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde laboratuvar deneyleri örselenmemiş numune almadaki güçlükler ve deprem durumundaki zemin durumunun deney esnasında temsiliyle ilgili problemler nedeniyle analizlerde tavsiye edilmemekte, arazi gözlemleri ve arazi deneyleri arasındaki korelasyona ve geniş veri tabanına dayanan saha deneyleri tavsiye edilmektedir. Örnek kalitesinin iyi olduğu geniş bir veri tabanına dayanan bir yöntem diğer yöntemlere göre daha güvenilirdir.

TBDY (2018)'te zeminde depremden dolayı oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi (τ_{deprem}) hesabı için Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilen yöntem sunulmuştur (Denklem 1).

$$\tau_{deprem} = 0.65 \sigma_{vo} (0.4 S_{ds}) r_d \quad (1)$$

Bu çalışmada sıvılaşma direncinin hesabı için TBDY (2008)'te sunulan SPT deney sonuçlarının ve Andrus vd. (2000) tarafından geliştirilen kayma dalgası hızının kullanıldığı yöntemlerin algoritmaları aşağıda sunulmuştur. İki yöntemde de çevrimsel dayanım oranı bulunduktan sonra öngörülen deprem büyüklüğüne göre düzeltme yapılarak sıvılaşmaya karşı kayma direnci (τ_R) hesaplanmaktadır (Denklem 2).

$$\tau_{deprem} = CRR_{M7.5} C_M \sigma_{vo}' \quad (2)$$



Şekil 2. Çevrimsel dayanım oranı hesabı için SPT deney sonuçlarının(a) ve kayma dalgası hızının(b) kullanıldığı algoritmalar

Sıvılaşma olasılığını “sıvılaşabilir” ve “sıvılaşmaz” olarak dar bir sınır içerisinde tanımlayan sıvılaşma karşı güvenlik koşulu kontrol edildikten sonra, mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında incelenen bölgenin

sıvılaşma tehlikesini göstermek için sıvılaşma tehlike indeksi (L_i) belirlenerek sıvılaşma tehlike haritaları oluşturulur (Iwasaki vd., 1982; Sönmez, 2003). Sıvılaşma tehlike indeksinin arkasındaki temel mantık, "sıvılaşabilen tabaka kalın, yüzeye yakın ve sıvılaşma güvenlik sayısı (FS) 1'den ne kadar küçükse yapılarda meydana gelecek hasar da o kadar fazla olacaktır" şeklinde açıklanabilir (Denklem 3).

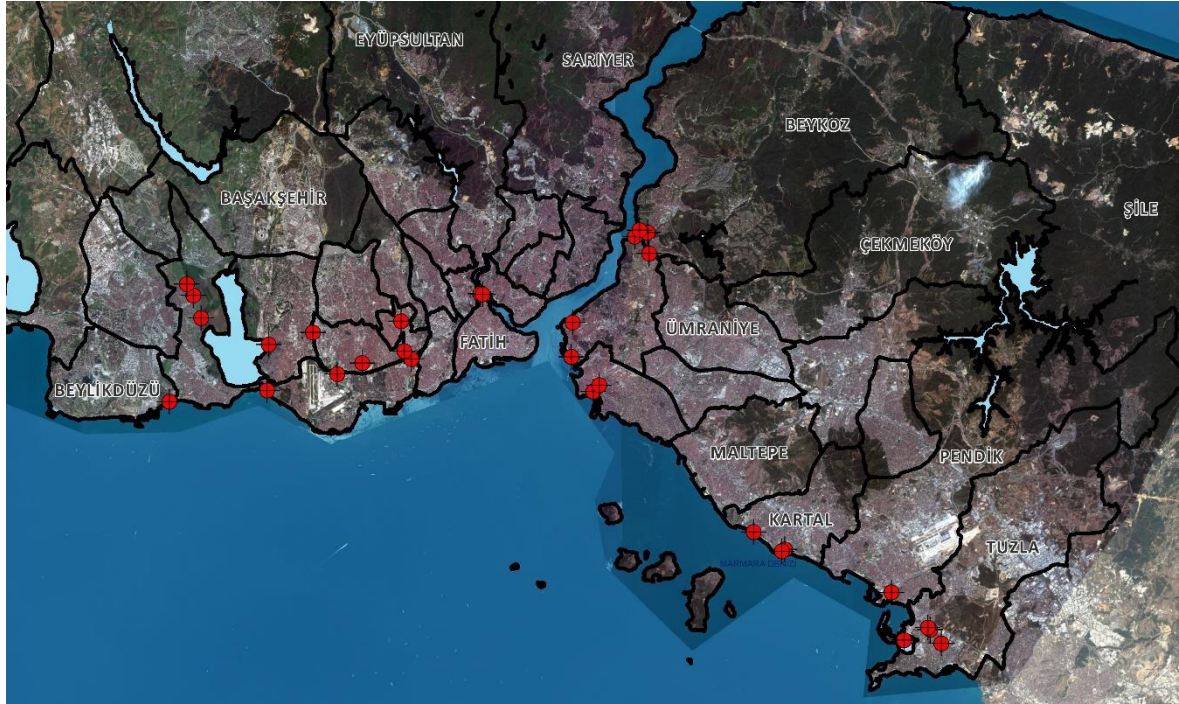
$$L_i = \int_0^{20} F(z)W(z)dz \quad (3)$$

Tablo 1. Sıvılaşma Tehlike İndeksleri

Iwasaki vd., 1982		Sönmez, 2003	
0	Çok düşük	$0 < L_i < 2$	Düşük
$0 < L_i < 5$	Düşük	$2 < L_i < 5$	Orta
$5 < L_i < 15$	Yüksek	$5 < L_i < 15$	Yüksek
$L_i > 15$	Çok yüksek	$L_i > 15$	Çok yüksek

3. İSTANBUL MİKROBÖLGELEME SAHA ÖRNEKLERİ

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından yürütülen mikrobölgeleme çalışmaları kapsamındaki SPT, Sismik Kırılma, MASW ve laboratuvar deney verileri kullanılarak sıvılaşma duyarlılığının yüksek olduğu değerlendirilen 30 noktada sıvılaşma potansiyelini irdelemek amacıyla sıvılaşma tehlike indeksleri hesaplanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Sıvılaşma duyarlılığının yüksek olduğu değerlendirilen 30 nokta

Tablo 2. Sıvılaşma Tehlike İndeksleri Karşılaştırmaları

Nokta	Zemin Sınıfı	Standart Penetrasyon Deneyi		Kayma Dalgası Hızı	
		Iwasaki (1982)	Sönmez (2003)	Iwasaki (1982)	Sönmez (2003)
1	ZC	23.84 (Çok Yüksek)	23.84 (Çok Yüksek)	19.2 (Çok Yüksek)	19.2 (Çok Yüksek)
2	ZD	57.83 (Çok Yüksek)	57.83 (Çok Yüksek)	20.3 (Çok Yüksek)	20.3 (Çok Yüksek)
3	ZE-ZF	57.2 (Çok Yüksek)	57.2 (Çok Yüksek)	65.8 (Çok Yüksek)	65.8 (Çok Yüksek)
4	ZD	75.5 (Çok Yüksek)	75.5 (Çok Yüksek)	21.0 (Çok Yüksek)	21.0 (Çok Yüksek)
5	ZC	60.67 (Çok Yüksek)	60.67 (Çok Yüksek)	11.3 (Yüksek)	11.3 (Yüksek)
6	ZD	37.14 (Çok Yüksek)	37.14 (Çok Yüksek)	0 (Çok Düşük)	0 (Düşük)

7	ZD	15.99 (Çok Yüksek)	15.99 (Çok Yüksek)	27.7 (Çok Yüksek)	27.7 (Çok Yüksek)
8	ZD	0 (Çok Düşük)	0 (Düşük)	3.7 (Çok Düşük)	3.7 (Orta)
9	ZD	34.64 (Çok Yüksek)	34.64 (Çok Yüksek)	26.7 (Çok Yüksek)	26.7 (Çok Yüksek)
10	ZD	10.59 (Yüksek)	10.59 (Yüksek)	16.5 (Çok Yüksek)	16.5 (Çok Yüksek)
11	ZD	23.39 (Çok Yüksek)	23.39 (Çok Yüksek)	24.6 (Çok Yüksek)	24.6 (Çok Yüksek)
12	ZE-ZF	55.10 (Çok Yüksek)	55.10 (Çok Yüksek)	86.9 (Çok Yüksek)	86.9 (Çok Yüksek)
13	ZE-ZF	59.2 (Çok Yüksek)	59.2 (Çok Yüksek)	84.7 (Çok Yüksek)	84.7 (Çok Yüksek)
14	ZD	37.26 (Çok Yüksek)	37.26 (Çok Yüksek)	21.0 (Çok Yüksek)	21.0 (Çok Yüksek)
15	ZD	69.87 (Çok Yüksek)	69.87 (Çok Yüksek)	50.8 (Çok Yüksek)	50.8 (Çok Yüksek)
16	ZE-ZF	75.02 (Çok Yüksek)	75.02 (Çok Yüksek)	92.2 (Çok Yüksek)	92.2 (Çok Yüksek)
17	ZD	0.01 (Çok Düşük)	0.26 (Düşük)	0.2 (Çok Düşük)	0.3 (Düşük)
18	ZD	36.14 (Çok Yüksek)	36.14 (Çok Yüksek)	2.2 (Çok Düşük)	2.2 (Orta)
19	ZD	29.2 (Çok Yüksek)	29.2 (Çok Yüksek)	0 (Çok Düşük)	0 (Düşük)
20	ZC	27.87 (Çok Yüksek)	27.87 (Çok Yüksek)	0 (Çok Düşük)	0 (Düşük)
21	ZC	15.68 (Çok Yüksek)	15.68 (Çok Yüksek)	0 (Çok Düşük)	0 (Düşük)
22	ZD	30.52 (Çok Yüksek)	30.57 (Çok Yüksek)	45.1 (Çok Yüksek)	45.1 (Çok Yüksek)
23	ZE-ZF	59.29 (Çok Yüksek)	59.29 (Çok Yüksek)	72.1 (Çok Yüksek)	72.1 (Çok Yüksek)
34	ZE-ZF	51.41 (Çok Yüksek)	51.41 (Çok Yüksek)	63.9 (Çok Yüksek)	63.9 (Çok Yüksek)
35	ZD	27.3 (Çok Yüksek)	27.3 (Çok Yüksek)	20.1 (Çok Yüksek)	20.1 (Çok Yüksek)
26	ZD	15.39 (Çok Yüksek)	15.62 (Çok Yüksek)	2.1 (Çok Düşük)	2.1 (Orta)
27	ZD	22.01 (Çok Yüksek)	22.26 (Çok Yüksek)	19.4 (Çok Yüksek)	19.4 (Çok Yüksek)
28	ZD	31.04 (Çok Yüksek)	31.04 (Çok Yüksek)	49.5 (Çok Yüksek)	49.5 (Çok Yüksek)
29	ZE-ZF	28.67 (Çok Yüksek)	28.67 (Çok Yüksek)	42.2 (Çok Yüksek)	42.2 (Çok Yüksek)
30	ZD	37.89 (Çok Yüksek)	37.89 (Çok Yüksek)	33.8 (Çok Yüksek)	33.9 (Çok Yüksek)

Sıvılaşmaya duyarlı zemin tabakalarının tespiti için literatürde plastisite ve ince dane oranını dikkate alan birçok çalışma yer almaktadır. Çetin ve Bilge (2016) PI <30 zeminlerin sıvılaşabildiğini, bu değer in ötesindeki zeminlerin ise sıvılaşmaz olduğunu ancak devrimsel hareketliliğe (cyclic mobility) maruz kalabileceklerini belirtmiştir. Çalışmaya konu olan noktaların seçiminde Çetin ve Bilge (2016) sıvılaşma duyarlılığı kriterleri kullanılmıştır.

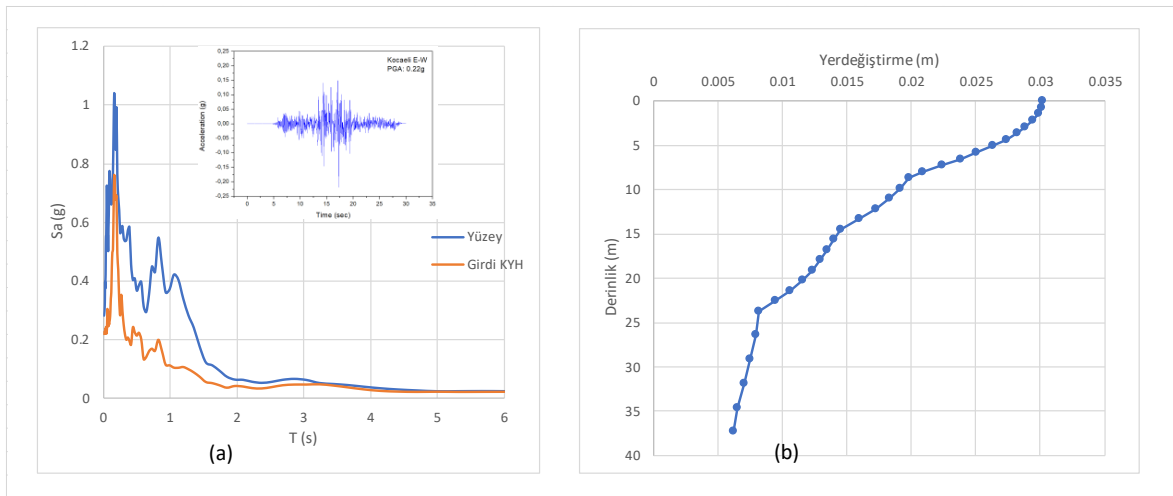
4. SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

Sıvılaşmaya duyarlı olmadığı halde kayma dalgası hızının düşük olduğu zeminlerde çevrimsel yükler altında meydana gelen şekil değiştirmelerin ve taşıma gücü kayıplarının incelenmesi amacıyla DEEPSOIL programı kullanılarak zemin davranış analizleri yapılmıştır.

Örnek olarak seçilen noktadaki zemin profili ve litolojinin büyük bir kısmını oluşturan kil birimlerin zemin özellikleri aşağıda verilmiştir (Tablo 3). Çok kalın (>35 m) yumuşak ve orta katı kil tabakasında seçilen bir deprem kaydı (1999 Kocaeli Depremi EW Kozlu-PGA:0.22g) etki ettirilerek bir boyutlu doğrusal olmayan (NL) sahaya özel zemin davranış analizi gerçekleştirilmiştir. Anakaya ve yüzey için çizilen zemin davranış spektrumlarında (Şekil 4.a) çevrimsel yükleme sonrasında zeminde meydana gelen amplifikasyon ve yer değiştirme derinlik grafiğinde (Şekil 4.b) zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmeler görülmektedir.

Tablo 3. Seçilen Noktanın Zemin Özellikleri

Derinlik (m)	Litoloji	V _s (m/s ²)	s _u (kN/m ³)	g (kN/m ³)	PI (%)
0 - 8.7	Organik Kil	92	43	14	52.4 -6 4.1
8.7 - 23.7	Yumuşak Kil	148	55	15	37-53.9
23.7 - 38	Katı Kil	329	70	17	21-37



Şekil 4. (a) zemin davranış spektrumu (b) en büyük yer değiştirmeler

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Sıvılaşma direncinin hesabı için SPT sonuçlarının ve V_s 'nin kullanıldığı iki yöntemin de avantaj ve dezavantajları vardır. Sadece sismik ölçümlerin mümkün olduğu ya da çok geniş alanların çalışıldığı durumlarda; aynı zamanda SPT sonuçlarının güvenilir olmayabileceği çakıllı zeminlerde V_s 'ye göre yapılan sıvılaşma potansiyeli analizleri tercih edilebilir. Ancak V_s 'nin küçük şekil değıştirme (<0.001%) bölgesinde ölçüldüğü, sıvılaşmanın ise büyük şekil değışmelerin gerçekleştiği (>1%) bir olay olduğu unutulmamalıdır. Bir diğer nokta ise sıvılaşmaya duyarlı ince tabakaların bazı durumlarda V_s ölçümlerinde tespit edilememesidir. SPT sonuçlarına göre yapılan değerlendirme ise özellikle enerji düzeltmesi olmak üzere SPT-N düzeltmelerinden oldukça etkilenmektedir.

İncelenen noktaların %80'inde SPT-N ve V_s ile yapılan analizlerin birbiriyle uyumlu olduğu; iki yöntemin farklı sonuçlar verdiği, yani düşük ve yüksek sıvılaşma tehlikesinin birlikte hesaplandığı durumlarda ise bazı tabakalardaki çakıllı birimlerin yüksek SPT-N okumalarına neden olduğu ya da yüksek sismik hızlar arasındaki sıvılaşmaya duyarlı ince tabakaların V_s ölçümlerinde tespit edilemediği görülmüştür. Dolayısıyla bir bölgenin sıvılaşma potansiyeli incelenirken kullanılan yöntemin avantaj ve dezavantajları dikkate alınmalı, mümkünse sonuçlar ikinci bir yöntemle doğrulanmalı ve zemin profili mümkün olduğunca doğru ortaya konmalıdır.

30 farklı noktada yapılan sismik çalışmalar sonucu, her nokta için 30 metredeki ortalama kayma dalga hızı (V_{s30}) değerine göre zemin sınıfı belirlenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'nde "Deprem Etkisi Altında Zemin Sıvılaşma Riskinin Değerlendirilmesi" başlığı altında, ZD, ZE veya ZF grubuna giren, sürekli bir tabaka veya kalın mercekler halinde bulunan ve kil içeriği ile SPT darbe sayısına bağlı bazı durumlar haricinde, kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin bulunup bulunmadığının arazi ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleriyle incelenmesi zorunludur denilmektedir. Zemin sınıfı 30 metre derinlikteki ortalama V_s ya da SPT değerlerine göre belirlendiği için yüzeyde gevşek, suya doymun kumlu birimler altta ayrılmış kaya ya da daha sert-sıkı zeminler olduğunda zemin sınıfı ZC olarak belirlenirken, kumlu birimlerde sıvılaşmaya karşı güvenlik sağlanamazken sıvılaşma potansiyeli yüksek çıkabilmektedir. Bu nedenle ZC sınıfı zeminlerde de sismik hızları düşük, suya doymun, kumlu birimler gözleniyorsa sıvılaşma değerlendirmesi yapılmalıdır.

Çevrimsel yükler altında killerde yoğrulma ve aşırı boşluk suyu basıncı kaynaklı kayma mukavemetinde azalmalar gerçekleştiği bilinmektedir. Kil oranı yüksek zeminlerde parçacık yapısı, mineral bileşimi ve yapışma kuvvetleri literatürde tanımlanan sıvılaşma (flow liquefaction) olayını önleyebilir. Ancak deprem anında kohezyonsuz zeminlerle birlikte kohezyonlu zeminlerde de devirsel hareketlilik (cyclic mobility) ve kohezyonlu zeminlerde devirsel yumuşama (cyclic softening) nedeni deformasyonlar ve taşıma gücü kayıpları gerçekleşebilir. Örneğin bu çalışma kapsamında seçilen noktada gerçekleştirilen bir boyutlu doğrusal olmayan zemin davranış analizi sonuçlarında, kil tabakasında %0.4'e ulaşan kayma şekil değıştirmeleri gözlemlenmiştir.

Netice itibariyle sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerle beraber bulunan bu zeminlerin sıvılaşmaya duyarlı olmadığı değerlendirilerek oluşabilecek büyük deformasyonların göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Çetin, K. Ö. (2004). "Sismik Zemin Sıvılaşmasını Değerlendirme Yöntemleri. Belediyeler için Sismik Mikrobölgeleme Örnek Uygulamalar ", Afet işleri Genel Müdürlüğü.
- Çetin, K. Ö., İlgaç, M. ve Can, G. (2023). "Probabilistic Models for Seismic Soil Liquefaction Susceptibility", PEER Workshop on Liquefaction Susceptibility.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018), Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar.
- Seed, H.B. ve Idriss, I.M. (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division", ASCE 97, SM9, 1249-1273.
- Andrus, R. D., Stokoe II, K. H. (2000). "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering", 126(11), 1015-1025.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K. (1982). "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during Earthquakes", Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 925-939.
- Sonmez, H. (2003), "Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey)", Environmental Geology, 44, 862-871.
- Çetin, K. Ö. ve Bilge, H.T. (2014). "Recent Advances in Seismic Soil Liquefaction Engineering", In: Ansal, A. (eds) Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 34. Springer, Cham.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., ve Park, D. (2020) "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign