



Nehir Kenarı Zeminlerinde Sıvılaşma ve Yanal Yayılma İncelemesi

¹Sedat Sert, ¹Ertan Bol ve ^{*1}Aşkın Özocak

^{*1}Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Özet

Sakarya İli, Erenler İlçesinde, Sakarya Nehri kenarında yapılması düşünülen rekreasyon projesi (Sakarya Park-2) kapsamında bazı yapıların inşası düşünülmektedir. Bu bildiriye, inşa edilmesi planlanan yapılar ve nehir kenarına yapılması düşünülen tahkimata yönelik olarak zemin koşullarının sıvılaşma ve yanal yayılma açısından geoteknik değerlendirmesi yapılmaktadır. Çalışmada alanın plankote, halihazır ve aplikasyon haritalarından yararlanılmış olup bölgenin depremselliği göz önünde tutularak; zemin profili değerlendirilmiş, temel taşıma gücü, oturmalar, sıvılaşma potansiyeli ve yanal yayılma riski hakkında incelemeler gerçekleştirilerek olası problemler sorgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akarsu, kıyı yapısı, deprem, sıvılaşma, yanal yayılma

Investigation of Liquefaction and Lateral Spreading in Riverside Soils

¹Sedat Sert, ¹Ertan Bol ve ^{*1}Aşkın Özocak

^{*1}Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, Turkey

Abstract

It is planned to construct some buildings within the scope of recreation project (Sakarya Park-2) which is planned to be built on the banks of Sakarya River in Erenler District of Sakarya Province. In this paper, the geotechnical assessment of the liquefaction and lateral spreading of the ground conditions is carried out for the structures planned to be built and the fortifications planned to be built on the riverside. In this study, plankote, current and application maps of the area were utilized and considering the seismicity of the region; soil profile was evaluated and possible problems were questioned by investigating foundation bearing capacity, settlements, liquefaction potential and lateral spreading risk.

Anahtar kelimeler: Akarsu, kıyı yapısı, deprem, sıvılaşma, yanal yayılma

1. Giriş

Baraj ve su alma yapısı gibi su yapılarının altından sızan su miktarının belirlenmesi, su yapıları altında oluşan su basınçlarının değerlerinin hesaplanarak dağılımının ortaya konması, deniz veya nehir içinde veya kıyılarında yapılacak köprü ayaklarının temel tasarımının yapılması gibi konular geoteknik mühendisliğinin çalışma alanlarındandır [1]. Bunun yanında nehirlerde su

seviyesinde meydana gelen düşüş ve artışlar, bunların yavaş veya hızlı oluşumu, depremler sırasında olası sıvılaşma ve yanal yayılma problemleri taşıma gücü ve oturma hesaplarının yanında incelenmesi gereken konular olarak ortaya çıkmaktadır.

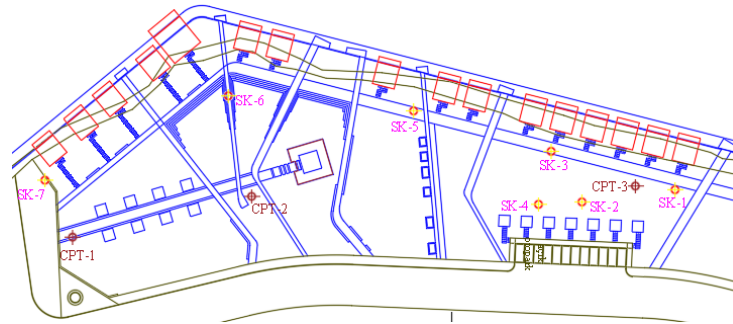
2. İnşaat Sahası ve Yapılar Hakkında Bilgiler

Çalışma sahası Sakarya İli, Erenler İlçesi, Kozluk Mahallesiinde D-100 Karayolu sınırında ve Sakarya Nehri kıyısında bulunmaktadır. Yaklaşık 11.500 m² inşaat alanına sahip araziye Sakarya Büyükşehir Belediyesi tarafından idari bina ve bungalov evleri tarzında yapıların bulunduğu bir rekreasyon alanı inşası öngörülmektedir. Çalışma alanının yer bulduru haritası Şekil 1’ de verilmiştir. Çalışma alanı Sakarya Nehri üzerine inşa edilen HES yapısının rezervuar gölü kıyısında olup ortalama kot yaklaşık 34-35 m civarındadır. Tahsis edilen sahada herhangi bir yapı bulunmamaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

Çalışma alanında toplam 21 adet yapı inşa edilmesi planlanmaktadır (Şekil 2). Yapıların çoğunluğu bungalov tipi olup merkezde bulunacak olan hizmet binası 2 katlı betonarme olarak düşünülmektedir. Yapıların özellikleri Tablo 1’ de sunulmuştur. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) ekindeki Tablo 3.1’ e göre Bina Kullanım Sınıfı BKS=3 ve Bina Önem Katsayısı I=1.00 olarak tespit edilmiştir [2]. Yine aynı yönetmelikte Tablo 3.3’ e göre Bina Yükseklik Sınıfı BYS=8 olarak belirlenmiştir. Yapı temeline etki edecek yüklerin farklı kombinasyonları ile temel tabanında belirecek maksimum taban basıncının $\sigma_{ort} = 160$ kPa civarında olduğu proje firması tarafından beyan edilmiştir [3].



Şekil 2. Çalışma alanında yapılan sondaj ve CPT lokasyonları

Tablo 1. Çalışma Alanında İnşası Öngörülen Yapılar

Bina No	Yapı	Kat Durumu	B (m)	L (m)
21	Hizmet Binası	2 Kat	11.00	13.10
1,20	Bungalov (1+1)	1 Kat	5.07	7.80
16	Bungalov (2+1)	1 Kat	6.50	7.10
2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,17,18,19	Bungalov (1+1)	1 Kat	6.00	6.00

3. Zemin Araştırmaları

Sakarya Üniversitesi Geoteknik Çalışma Grubu tarafından söz konusu alanın kuzey sınırından başlayan ve eski Sakarya köprüsüne kadar uzanan alanda nehrin sağ ve sol sahillerinde toplam 44 adet CPT deneyi yapılmış ve nehir boyunca zemin kesitlerinin kısa mesafelerde bile değişiklik gösterdiği ortaya konmuştur [4]. Güncel çalışma kapsamında çalışma alanında ER-SE Mühendislik tarafından 7 adet sondaj ve SAÜ Geoteknik Çalışma Grubu tarafından da 3 sondalama (CPT) gerçekleştirilmiş olup lokasyonları Şekil 2' deki vaziyet planında sunulmuştur. Ayrıca güncel çalışmadan CPT deney görüntüleri de Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 3. Çalışma alanında yapılan CPT deneylerinden görüntüler

Çalışma alanında zemin dinamik elastisite parametrelerinin belirlenmesi için yaptırılan üç adet sismik MAS-W ölçümü sonucunda üst 30 m' deki ortalama V_s hızları tüm hatlarda 227-259 m/sn aralığında bulunmuş olup ortam için temsili değer $V_s=235$ m/sn olarak alınmıştır.

3.1. Arazi İdealize Zemin Profili

Çalışma alanı fluvial karakterli alüvyonlar üzerinde yer almaktadır. Ayrıca bölge çalışma alanının hemen batı sınırından geçen Sakarya Nehrinden önemli derecede etkilenmiş ve onun tarafından şekillendirilmiştir. Ayrıca çalışma alanının uzun yıllar boyunca dolgu malzemeleri ile doldurulduğu hem yapılan çalışmalardan hem de ilgili kişilerin beyanlarından anlaşılmaktadır. Gerçekleştirilen sondaj çalışmasında alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler TS 1900/1 ve TS 1900/2 (2006) uyarınca zemin mekaniği deneylerine tabi tutulmuş ve zeminler TS 1500 (2000) uyarınca sınıflandırılmışlardır [5-7]. Tablo 2’ de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçlarının özeti verilmiştir. Eldeki sondaj ve PCPT logları incelendiğinde üst kısımda kalınca bir dolgu tabakasının bulunduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu dolgu kalınlığı alanda değişkenlik göstermekle birlikte minimum kalınlığın 5.00 metre ve maksimum kalınlığın ise 12.00 metre olduğu anlaşılmaktadır. Ortalama dolgu kalınlığı 7.50 metre olarak tayin edilmiştir.

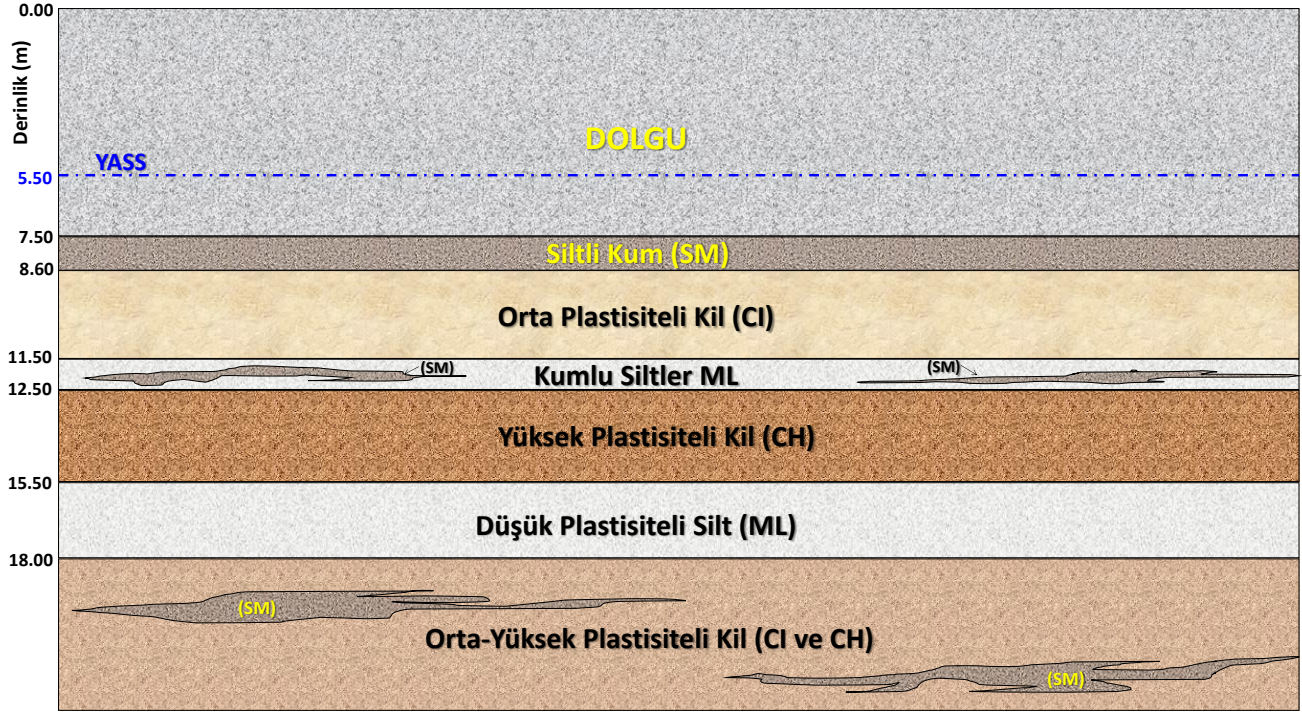
Tablo 2. Sondajlardan Elde Edilen Örselenmiş Numunelerin Fiziksel Özellikleri

SK z (m)	Renk	w _n	w _L	w _P	PI	I _L	Sınıf	%G	%S	FC	%C	SPTN	SK z (m)	Renk	w _n	w _L	w _P	PI	I _L	Sınıf	%G	%S	FC	%C	SPTN	
5	3	KGB	13	NP	NP	NP	---	SW-SM	46	48	6	20	4	12.3	YG	22	NP	NP	NP	---	SM	61	39	16		
7	3	KG	8	NP	NP	NP	---	GP-GM	70	22	8	50	1	13.5	Y	25	NP	NP	NP	---	ML	30	70	11	13	
4	4.5	K	19	NP	NP	NP	---	SM	64	23	13	25	5	13.5	Y	37	35	NP	NP	1.07	ML	100	10			
5	4.5	KGB	14	NP	NP	NP	---	SP-SM	33	60	7	17	6	13.5	YK	38	34	26	8	1.62	ML	97	10			
7	4.5	KG	12	NP	NP	NP	---	SM	21	63	16	29	7	13.5	KY	43	73	22	51	0.42	CH	99	12			
5	6	KGB	16	NP	NP	NP	---	GM	48	14	38	6	2	15	Y	39	76	23	53	0.3	CH	100	10			
6	6	KB	10	NP	NP	NP	---	GW-GM	53	38	9	23	3	15	Y	41	84	15	25	0.27	CH	98	14			
7	6	K	19	34	16	18	0.19	GC	36	28	36	12	4	15	K	39	77	23	53	0.28	CH	100	10			
3	6.5	YK	17	34	15	19	0.07	GC	43	21	36	8	5	15	Y	40	77	26	50	0.27	CH	99	14			
1	7.5	Y	33	33	26	7	0.88	ML			95	10	6	15	K	42	78	24	54	0.32	CH	99	14			
4	7.5	KY	34	37	26	11	0.71	MI			95	8	7	15	YK	36	40	30	10	0.65	MI	99	12			
5	7.5	Y	35	90	30	60	0.09	CH			99	8	1	16.5	K	38	66	22	45	0.38	CH	99	12			
7	7.5	YG	21	NP	NP	NP	---	SM	46	0	54	16	17	2	16.5	Y	30	33	24	9	0.73	ML	20	80	13	
4	8	KY	52	96	24	72	0.4	CH			96	---	5	16.5	Y	34	41	22	19	0.66	CI	98	10			
5	8.5	Y	34	86	22	64	0.19	CH			97	---	7	16.5	YG	22	NP	NP	NP	---	ML	41	59	16	16	
3	9	Y	20	NP	NP	NP	---	SM	18	58	24	12	1	18	Y-G	28	29	24	5	0.86	ML	86	10			
5	9	G	30	NP	NP	NP	---	SM	1	51	48	9	3	18	Y	38	47	23	24	0.62	CI	100	9			
6	9	KY	39	63	18	45	0.45	CH			99	7	5	18	Y	22	42	16	25	0.2	CI	46	54	28		
7	9	YG	24	NP	NP	NP	---	ML			42	58	17	19	6	18	YK	30	30	21	9	1.1	CL	87	17	
6	9.5	Y	42	85	24	61	0.28	CH			96	---	7	18	KY	33	39	19	20	0.68	CI	97	15			
1	10.5	YK	42	83	23	60	0.31	CH			100	8	2	19.5	kY	34	54	19	35	0.43	CH	97	11			
2	10.5	YG	32	29	22	7	1.36	CL			30	70	10	4	19.5	KY	32	31	24	7	1.16	ML	2	23	75	11
5	10.5	YG	24	NP	NP	NP	---	SM			56	44	11	19	5	19.5	Y	20	NP	NP	NP	---	SM	63	37	43
7	10.5	YK	41	48	22	26	0.7	CI			99	8	6	19.5	YG	25	NP	NP	NP	---	ML	34	66	14	18	
1	11	kY	32	60	18	42	0.33	CH			92	---	7	19.5	YK	29	62	24	38	0.12	CH	88	16			
2	12	Y	33	45	20	25	0.52	CI			86	7	2	25.5	kY	38	70	21	48	0.34	CH	99	14			
5	12	Y	29	41	18	23	0.44	CI			84	10	4	25.5	K	38	79	23	56	0.28	CH	100	18			
7	12	YG	23	NP	NP	NP	---	SM			51	49	11	9	6	25.5	YK	35	35	26	9	1	MI	95	16	
4	12	KY	31	64	18	47	0.29	CH			93	16														

a: açık, k: koyu, K: Kahve, Y: Yeşil, G: Gri, B: Krem

Söz konusu dolgunun altında doğal zeminlere girilmektedir. Sondaj, CPT ve deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde idealize zemin kesiti şu şekilde özetlenebilir: 0.00-7.50 metre arası dolgu, 7.50-8.60 metreler arası siltli ve kumlu birimler, 8.60-11.50 metreler arası orta plastisiteli killer, 11.50-12.50 metre arası kumlu silt tabakası, 12.50-15.50 metre arası yüksek plastisiteli

killeri, 16.00-18.00 metre arası düşük plastisiteli siltler ve bu seviyenin altında kuyu sonuna kadar yer yer ince kum bantlı orta-yüksek plastisiteli killeri hâkimdir. Şekil 4’ de çalışma verilerinden elde edilen arazi zeminlerini karakterize eden enine kesit profili görülmektedir.



Şekil 4. Arazi zeminlerini karakterize eden idealize zemin kesiti

3.2. Geoteknik tasarım parametreleri

Alanda farklı derinliklerden alınmış örselenmemiş (UD) numuneler üzerinde TS 1900-2/2006 uyarınca konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç (UU), serbest basma (UC), kesme kutusu ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Tablo 3-4-5-6’ da sunulmuştur. Bunlara göre 8.50 metredeki killerin normal yüklenmiş (NL) olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Sakarya Büyükşehir Belediyesi Sakarya Park 2. Etap UU Deney Sonuçları

SK	z (m)	Renk	Sınıf	w_n (%)	e	ρ (kN/m ³)	S_r (%)	c_u (kPa)	P (kPa)
5	8.5	Y	CH	30	0.79	19.07	100	111	110
1	11	kY	CH	32	0.8	19.23	100	88	200

Tablo 4. Sakarya Büyükşehir Belediyesi Sakarya Park 2. Etap UC Deney Sonuçları

SK	z (m)	Renk	Sınıf	w_n (%)	e	ρ (kN/m ³)	S_r (%)	c_u (kPa)	P (kPa)
6	9.5	Y	CH	29	0.8	18.68	85	20	125

Tablo 5. Sakarya Büyükşehir Belediyesi Sakarya Park 2. Etap Kesme Kutusu Deney Sonuçları

SK	z (m)	Renk	Sınıf	w _n (%)	e	ρ (kN/m ³)	S _r (%)	c (kPa)	φ (°)
4	8	kY	CH	52	1.4	16.68	100	1	18
5	8.5	Y	CH	35	0.97	17.97	97	9	16
6	9.5	Y	CH	44	1.22	16.9	96	22	14

Tablo 6. Sakarya Büyükşehir Belediyesi Sakarya Park 2. Etap Konsolidasyon Sonuçları

SK	z (m)	Renk	Sınıf	w _n (%)	e	ρ (kN/m ³)	S _r (%)	C _c	C _r	σ ₀ ¹ (kPa)	σ _c (kPa)	OCR
5	8.5	Y	CH	35	1.03	17.32	90	0.33	0.036	103	118	1.15

Çalışma alanında sondajlara ek olarak yürütülen koni penetrasyon deneyi (CPT) çalışmalarından elde edilen verilerden ortamdaki ince daneli zeminlerin drenajsız kayma direncini (c_u); $c_u=(q_c-\sigma_0)/N_k$ korelasyonu ile elde etmek mümkündür [8]. Burada N_k koni faktörüdür ve Adapazarı zeminleri için 14.55 olarak bulunmuştur [9]. Bunun yanında CPT verilerinden kumlu zeminler için efektif sürtünme açısı değerleri de elde edilebilmektedir. Laboratuvar ve arazi çalışmaları bir arada değerlendirildiğinde Şekil 4’ te sunulmuş olan zeminlerin kayma direnci parametreleri Tablo 7’ de gösterildiği gibi yorumlanmıştır.

Tablo 7. Sakarya Büyükşehir Belediyesi Sakarya Park 2. Etap Önerilen Kayma Direnci Parametreleri

Tabaka No	Derinlik (m)	c_u (kPa)	φ' (derece)
1- Dolgu	0.00-7.50	---	32
2- Siltli Kum (SM)	7.50-8.60	---	36
3- Orta Plastisiteli Kil (CI)	8.60-11.50	80	---
4- Kumlu Siltler (ML)	11.50-12.50	---	35
5- Yüksek Plastisiteli Kil (CH)	12.50-15.50	80	---

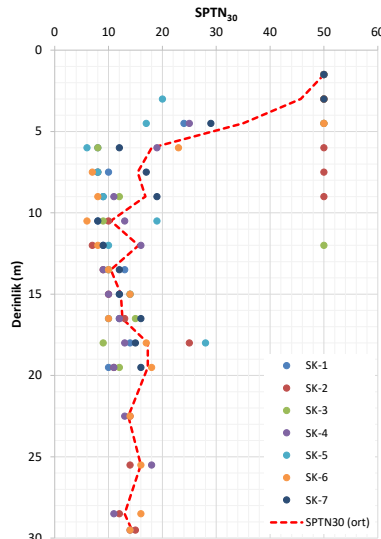
4. Yerel Zemin Sınıfı ve Depremsellik

Arazide ölçülmüş SPT değerleri (N_{30}) ve %60 enerji seviyesinde düzeltilmiş standart penetrasyon değerleri (N_{60}) Tablo 8’ de özet olarak görülmektedir. Buna göre üst otuz metrenin düzeltilmiş darbe sayısı ortalamasının (N_{60})₃₀ yaklaşık olarak 12 olduğu anlaşılmaktadır. Arazide yürütülen tüm SPT deney sonuçları ile ortalama değerleri Şekil 5’ de sunulmuştur. Buna göre üst 30 metrenin ortalama düzeltilmiş standart penetrasyon darbe sayısı ($N_{60(30)}=12$) ve kayma dalgası hızı ($V_{s(30)}=235$ m/sn) birlikte değerlendirildiğinde; alandaki dolgunun kayma dalgası hızlarını bir miktar görece yüksek verdiği düşünüldüğünden mevcut zemin koşullarına göre ortamın 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) ekindeki Tablo 16.1’ de gösterilen yerel zemin sınıflarından “ZE” ile temsil edilebilir olduğu görülmektedir.

Tablo 8. Standart Penetrasyon Deneyi Darbe Sayıları

z (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	SK-6	SK-7	SPTN _{30ort}	SPTN _{60ort}
1.5	50	50	50	50	50	50	50	50	28
3	50	50	50	50	20	50	50	46	26
4.5	24	50	50	25	17	50	29	35	21
6	8	50	8	19	6	23	12	18	12
7.5	10	50	8	8	8	7	17	15	10
9	9	50	12	11	9	8	19	17	12
10.5	8	10	9	13	19	6	8	10	8
12	9	7	50	16	10	8	9	16	12
13.5	13	9	10	9	10	10	12	10	8
15	12	10	14	10	14	14	12	12	9
16.5	12	13	15	12	10	10	16	13	9
18	14	25	9	13	28	17	15	17	13
19.5	10	11	12	11	43	18	16	17	13
22.5	---	14	---	13	---	14	---	14	10
25.5	---	14	---	18	---	16	---	16	12
28.5	---	12	---	11	---	16	---	13	10
29.5	---	15	---	14	---	14	---	14	11

Türkiye Deprem Tehlike Haritası esas alınarak N40.740609 ve E30.422769 koordinatlarındaki çalışma alanının DD-1, DD-2, DD-3, DD-4 deprem yer hareketi düzeylerine göre ayrı ayrı kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_s) ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1) değerleri Tablo 9’ da verilmiştir. Bu aşamada Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre Yerel Zemin Etki Katsayıları (F_s ve F_1) yerel zemin sınıfı “ZE” alınarak sırası ile $F_s=0.80$ (TBDY 2018-Tablo 2.1) ve $F_1=2.272$ (TBDY 2018-Tablo 2.2) olarak belirlenmiştir. Bunlara bağlı olarak da kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) $S_{DS} = S_s \times F_s = 1.699 \times 0.800 = 1.359$ ve 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (S_{D1}) $S_{D1} = S_1 \times F_1 = 0.464 \times 2.272 = 1.054$ olarak hesaplanmıştır.

**Şekil 5.** SPT sonuçlarının derinlikle değişim grafiği

Tablo 9. Çalışma Alanında Farklı Deprem Yer Hareketi Düzeylerine göre S_s ve S_1 Değerleri

Deprem Düzeyi	S_s	S_1	PGA (g)
DD-1	2.924	0.833	1.151
DD-2	1.699	0.464	0.690
DD-3	0.680	0.164	0.296
DD-4	0.345	0.079	0.151

4.1. Sıvılaşma değerlendirilmesi

Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesi altındaki tabakaların geçici olarak mukavemetlerini kaybederek, katı yerine viskoz sıvı gibi davranmalarınıdır. Özellikle, kil bulunmayan veya az olan kum ve silt bazen de çakıl tabakaları sıvılaşma potansiyeline sahiptirler. Zeminin sıvılaşması sonucu, ağır yapılar zemine batma ve hafif yapılar yukarı doğru hareket ederek yüzme eğilimi gösterebilir. Genellikle yer altı su seviyesinin yüksek olduğu yerlerde, yakın zamana ait olan sıkışmamış kum ve siltlerin sıvılaşma potansiyeli yüksektir. Bunun yanında çalışma alanında olduğu gibi akarsuların yığıldığı kumlar, boyutlarındaki düzgünlük nedeniyle sıvılaşma potansiyeline sahiptirler. Yer altı su seviyesinin yüzeye 10 metreden daha yakın olması da sıvılaşma tehlikesini artırmaktadır. Sıvılaşmanın büyük yer değiştirmelere sebep olması, büyük hasarları doğuran temel göçmelerine sebep olur. Zemin sıvılaşması ile onarımı güç olan temiz ve pis su boruları ile doğalgaz borularında hasar ve kaçaklar ortaya çıkar. Bunun yanında sıvılaşma, şev ve yamaç kaymalarına ve istinat duvarlarında yatay zemin basıncının artmasına sebep olur.

İnce kum, siltli kum ve killi kum gibi iri daneli zeminlerde; sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilebilmesi için, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçları kullanan birçok yöntem bilinmektedir. Bu yöntemlerden Tekrarlı (Çevrimsel) Kayma Gerilmesi Yöntemi (Seed vd., 1981) yardımıyla inceleme alanında geçilen iri daneli zeminlerin sıvılaşma riski değerlendirilmiştir [10]. Tekrarlı kayma gerilmesi yönteminde güvenlik sayısı (GS); $GS=(CRR/CSR)*MSF$ şeklinde tanımlanır [11, 12]. Burada, CRR = belli bir zeminde sıvılaşmanın başlayabilmesi için gerekli periyodik sınır kayma gerilmesi, CSR = aynı zeminde belli bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesidir. Eğer; $GS > 1$ ise sıvılaşma olmaz, $GS \leq 1$ ise sıvılaşma kaçınılmazdır. Ayrıca üniform ince kumlarda sıvılaşma potansiyeli daha yüksektir ($D_{10}= 0.01-0.25$ mm, $C_u= 2-10$). Çakıllı zeminlerde ise kumlara göre sıvılaşmanın daha zor olmasının iki nedeni vardır. Bunlar, geçirgenliğin daha yüksek olması ve genellikle temiz üniform kumlara göre daha sıkı yerleşimde olmalarıdır.

Elde bulunan bilgiler ve yapılmış araştırmalar, Adapazarı ve Serdivan çevresinde yaygın bulunan siltlerde belirdiği bilinen sıvılaşmanın SPT, CPT veya V_s verileri ile değerlendirilemeyeceğini ve Çin kriteri olarak bilinen kriterlerin gerçekçi sonuç verdiğini göstermektedir. Buna göre; ince daneli zeminler (özellikle siltler) “Çin Kriteri” olarak adlandırılan yöntemle değerlendirilirler, buna göre ince daneli bir zeminin sıvılaşabilmesi için; a) 0.005 mm’ den küçük ince malzeme oranı $\leq \%15$, b) Likit limit (w_L) $\leq \%35$ ve c) Doğal su muhtevası (w_n) $\geq 0.9 \times w_L$ şeklinde sıralanan üç koşulun da yerine gelmesi gerekmektedir. Kriterlerin Adapazarı zeminlerine uyarlanmasından, bir NP siltin sıvılaşabilmesi için doğal su muhtevasının likit limite

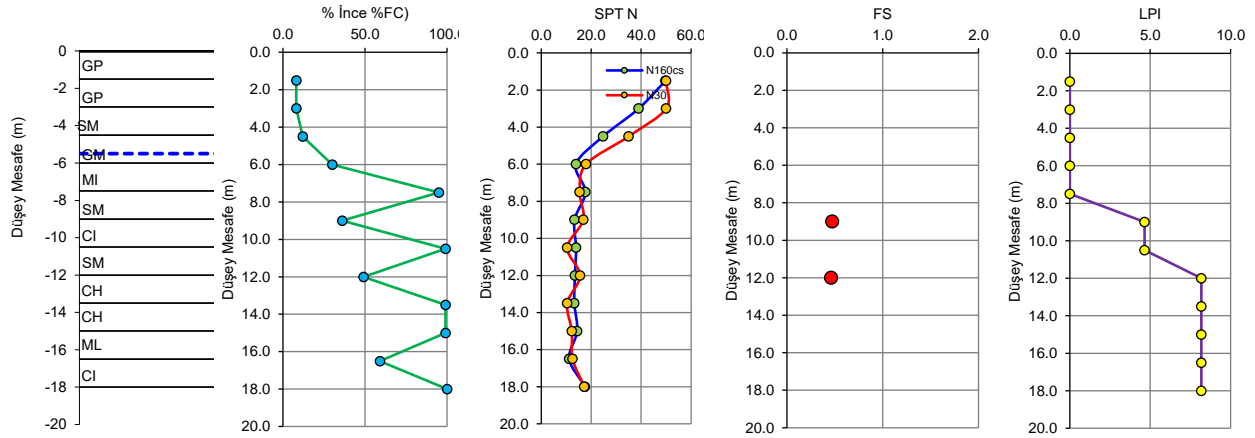
eşit veya fazla olması ($I_L > 0.9$), likit limitin (w_L) 33' den küçük ve kil (Kil < 0.002 mm) yüzdesinin 15' ten az olması gerektiği anlaşılmıştır [13]. Bu analizde sıvılaşabilir katmanların tüm kesit boyunca ne kadar bir hacim kapladığını bilmek önemlidir. Bu tipte sıvılaşır katmanları kümülatif olarak toplayan LPI grafiği sıvılaşma potansiyeli açısından önemli bilgiler vermektedir. Toprak (2003)'ün önerdiği sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) kavramına göre tüm sıvılaşabilir tabakaların kalınlıkları toplamı göz önüne alınır [14]. LPI' nın 5'ten küçük olması durumu sıvılaşma potansiyelinin yok veya düşük olduğunu, 5-15 arasında olması orta potansiyeli, 15'ten büyük olması ise yüksek sıvılaşma potansiyelini göstermektedir.

Alanda sıvılaşma analizleri koni penetrasyon deney sonuçlarının verilerine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma analizi çevrimsel kayma yöntemine (Robertson, 1998) göre yapılmış ve her ölçüm derinliğinin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanmıştır [15]. Daha sonra araştırılan noktanın sıvılaşma açısından bir risk oluşturup oluşturmayacağına ise sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) hesaplanarak karar verilmiştir. CPT analiz sonuçlarına göre hesaplanan LPI değerleri Tablo 10' dan izlenebilir.

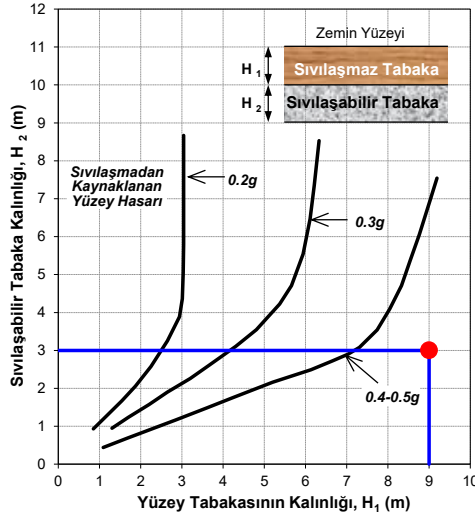
Tablo 10. Arazide Gerçekleştirilen Sondalamalarda Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi Değerleri

Sonda No	YASS (m)	Ölçüm Kalınlığı (m)	LPI	Sıvılaşabilir Tabaka Kalınlığı	
				Robertson 1998	Robertson 2010
PCPT-1	5.50	16.40	3.09	0.98	0.16
PCPT-2	5.50	13.58	3.66	1.88	0.02
PCPT-3	5.50	12.24	5.19	2.22	0.30

Alanda yeraltı su seviyesi yüzeyden ortalama 5.50 metre civarında aşağıda bulunmaktadır. Killi, siltli ve kumlu birimler parselin hemen her yerinde farklı fiziksel özelliklerdedir. Bu bakımdan ortalama şartları temsil etmek üzere karma bir kesit oluşturularak SPTN değerlerine dayalı bir sıvılaşma değerlendirmesi yapılmıştır. Tüm sondaj verileri göz önüne alınarak oluşturulan temsili kesitte yapılan sıvılaşma analizlerine göre 9.00 m ve 12.00 m' lerde başlayan kısıtlı kalınlıkta sıvılaşabilir tabakalar görülmektedir (Şekil 6). Sıvılaşır katmanların olası bir depremde yüzey hasarı oluşturup oluşturmayacağı Ishihara (1985) grafiği ile kontrol edilebilir (Şekil 7) [16]. Bu grafik sıvılaşmaz tabaka kalınlığı ile sıvılaşabilir tabaka kalınlığının kontrolünü beklenen ivme değerine göre değerlendirmekte, sonuç olarak aşağıda bulunan tabakaların sıvılaşması halinde yüzey hasarının oluşup oluşmayacağını ifade etmektedir. Şekil 6' ya göre 9.00 m'deki sıvılaşma potansiyeline sahip tabakada, sıvılaşır zeminlerin üzerinde kalın bir sıvılaşmaz tabakanın olması nedeniyle burada Ishihara Kriterini kullanmak gereklidir. Buna göre en yakın sıvılaşır tabakanın derinlikleri göz önüne alınmış ve sıvılaşır tabakaların toplam kalınlığı grafiğe noktalanmıştır (Şekil 7). Sonuç olarak olası depremde söz konusu tabakaların sıvılaşmaları durumunda bile yüzeyde bir hasar oluşturmayacağı kanaatine varılmıştır.



Şekil 6. Karma SPT Sonuçları ile gerçekleştirilen sıvılaştırma analizi sonucu



Şekil 7. Sıvılaştır tabakaların yüzeye etkisi [16]

SPT analizlerinde irdelenen kalınlık SPT kaşığından çıkan 30 cm'lik zemine karşılık geldiğinden sadece SPT ile analizlerin çok sağlıklı olmayacağı kuşkusuz doğmaktadır. Zira tabaka sınırlarının kesin değişim derinliklerini belirlemek söz konusu yöntem ile mümkün görülmemektedir. CPT ile yapılan değerlendirmelerde ise tabaka sınırları ve sınıfları doğruya yakın olarak belirlenebildiğinden daha güvenilir sonuçlar vermektedir. CPT ile yapılan sıvılaştırma değerlendirmesinde; Robertson ve Wride (1998) yöntemine göre yapılan analizlere ek olarak Robertson (2010) yöntemi analizleri de yürütülmüştür (Tablo 10) [15, 17]. Robertson (2010) önceki çalışmasına göre zemin sınıflandırmasında bir takım düzenlemeler yapmış ve potansiyel sıvılaşabilir kumlu zeminlerin sınıflandırma kriterini revize etmiştir [17]. Böylelikle Robertson (2010)' a göre yapılan değerlendirmede çalışma alanının zeminlerinde sıvılaştırma açısından daha güvenli bir durum ortaya çıkmaktadır. Tablo 10' daki özet sunumdan izleneceği üzere sıvılaştırma potansiyeli taşıyabilecek tabaka kalınlıkları Robertson 2010 ile yapılan değerlendirmeye göre tüm kesit boyunca oldukça azalmaktadır. Ayrıca sıvılaşmaz tabaka kalınlığı 9.00 metrelere

ulaştığından Ishihara (1986)' ya göre çalışma alanında olası bir depremde sıvılaşma etkilerinin yüzeye yansımayaacağı söylenebilir [16].

4.2. Yanal yayılma değerlendirilmesi

Deprem sırasında genellikle çok az eğimli (0.3-3 derece arası) yamaçlarda veya su kütlelerine komşu gelişen bir diğer etki de “yanal yayılma”dır. Yayılmalar altta bulunan zeminin sıvılaşmasını ve yüzeysel sediment bloklarının yanal ötelenmesini temsil eder [18]. Bu yayılmalar çoğunlukla birkaç metre ile sınırlıdır. Bu gibi hareketler, tipik olarak dolgulara, boru hatlarına, köprülere, yüzeysel temellere ve bu çalışmanın da konusu olan su kütlelerine bitişik istinat duvarı gibi yapılara zarar verirler. Etkiler, sıvılaşmış temel zemininin destek kaybından veya istinat yapısı arkasındaki sıvılaşmış zeminden dolayı artan yanal yüklerden kaynaklanır. Bu etkiler sonucu istinat yapısı düşey, yatay veya ikisinin toplamı bir deplasmana maruz kalır. Bu etki sonucunda temel zemini sıvılaşma sonucu dayanımını kaybeder. Bir başka deyişle taşıma gücünü yitirir. Bunun sonucunda üzerinde bulunan yapılar batar, döner, yan yatar veya devrilir. Kaldırma kuvvetinin etkisiyle, muayene bacası, tank, boru hatları ve benzeri hafif yapılar zemin yüzeyine yükselir. Sıvılaşmaya bağlı olarak yanal yer değiştirmelerini tahmin etmek için sayısal modeller, laboratuvar testleri ve arazi testi tabanlı yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli yöntemler önerilmiştir. Gevşek kumlu zeminleri örnekleme ile ilgili zorluklar, rutin uygulamada sayısal ve laboratuvar test yaklaşımlarının uygulanmasını sınırlar. Arazi deneylerine dayalı yöntemler, düşük-orta risk projeleri için sıvılaşmayla oluşan zemin deformasyonlarını tahmin etmek ve yüksek riskli projelerde basit ve doğrudan yaklaşımlarla ön tahminler sunmak için en uygun yöntemlerdir. SPT verilerine dayanarak yapılan çözümlenmelerde belli bir aşamaya gelinmişken, CPT tabanlı çözümlenmelerde ilk yapılan bilimsel araştırma Zhang vd. (2004)' e aittir [19].

Sıvılaşmış katmandaki kalıcı kayma deformasyonları esasen aşağıdakilerin bir fonksiyonudur:

- 1- Maksimum çevrimsel kayma deformasyonları γ_{max} ve
- 2- Yerinde statik kayma gerilmeleri.

Sıvılaşmış tabakaların kalınlığının artması daha fazla yanal yer değiştirmeye neden olacaktır. Sıvılaşmış tabakanın hem maksimum çevrimsel kayma deformasyonları (γ_{max}), hem de tabaka kalınlığı, zemin özellikleri ve deprem özelliklerinden etkilenir. Ishihara ve Yoshimine (1992), γ_{max} ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS) arasındaki ilişkiyi, temiz kumların farklı bağıl sıklıkları (D_r) için oluşturmuşlardır [20]. Bağıl sıklıklar ya SPT ya da CPT verileri için oluşturulmuş olan korelasyonlardan tahmin edilebilir. SPT darbe sayılarından temiz bir kumun sıklığı Meyerhof'un (1957) korelasyonunun değiştirilmiş bir versiyonu ile aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [21]:

$$D_r = 16 \cdot \sqrt{(N_1)_{78}} = 14 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} \quad \left[(N_1)_{60} \leq 42 \right] \quad (1)$$

Burada $(N_1)_{60}$: % 60 standart enerjiye ve örtü yüküne göre düzeltilmiş standart penetrasyon darbe sayısıdır. $(N_1)_{78}$ ise $(N_1)_{60}/1.3$ olarak hesaplanabilir.

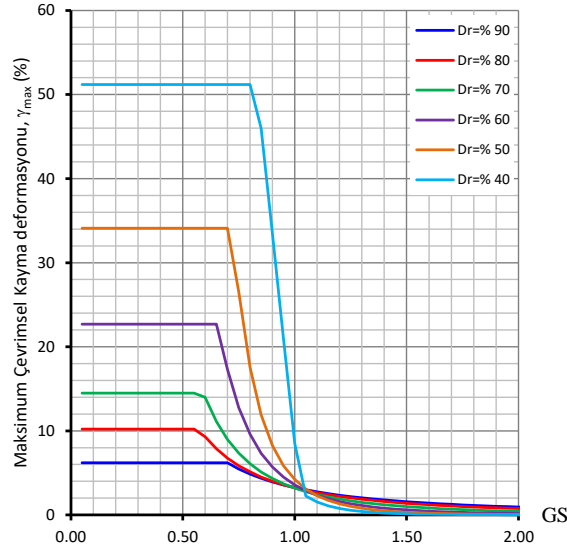
D_r ile CPT verileri arasındaki korelasyon ise Tatsuoka vd. (1990)' a göre:

$$D_r = -85 + 76 \cdot \log(q_{c1N}) \quad [q_{c1N} \leq 200] \quad (2)$$

şeklinde gösterilebilir [22]. Burada q_{c1N} 100 kPa efektif örtü yüküne göre normalize edilmiş koni penetrasyon direncidir.

Şekil 8 güvenlik sayısı ile bağıl sıklıklar arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada güvenlik sayısı (GS) NCEER (1997)' in önermiş olduğu gibi SPT veya CPT verilerine dayanılarak hesaplanabilir [23]. Hesaplanan γ_{max} değerlerinin derinliğe göre integrali alınarak yanal yayılma indeksi aşağıdaki şekilde (LDI) belirlenir:

$$LDI = \int_0^{z_{max}} \gamma_{max} dz \quad (3)$$



Şekil 8. Temiz kumlarda farklı bağıl sıklıklar için maksimum çevrimsel kayma deformasyonu ve GS ilişkisi

Burada z_{max} GS' nin 2' den küçük olduğu değerler için tüm sıvılaştıran tabakaların maksimum derinliğidir. LDI, deformasyon birimine sahip olmasına karşın yanal yayılmanın büyüklüğünü ifade eden bir değer olarak ele alınır. Sonuçta oluşacak deformasyonlar LDI' nin büyüklüğü yanında zemin yüzey eğimi, şev yüksekliği ve geometrisi ile yapının konumuna ve deprem karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 11' de bu çalışmada yürütülen CPT çalışmalarının her birinde hesaplanmış yanal yayılma analizi sonuçları verilmiştir. Buradan yanal yayılmadan kaynaklı deformasyonların oldukça kısıtlı düzeylerde kalacağı anlaşılmaktadır.

Tablo 11. Arazide Gerçekleştirilen Sondalamalarda Yanal Yayılma Analiz Sonuçları

CPT No	Analiz Derinliği (m)	LDI	LD (m)
CPT-1	16.40	13.31	0.13
CPT-2	13.58	5.31	0.05
CPT-3	12.24	17.92	0.17

5. Sonuç

Bu çalışmada Sakarya Nehri kenarında yapılması düşünülen Sakarya Büyükşehir Belediyesi, Sakarya Park Sağ Sahili Rekreasyon alanı inşaatlarına yönelik ortam zeminleri sıvılaşma potansiyeli ile nehir ve arazi kotları dikkate alınarak yanal yayılma riski açısından irdelenmiştir. Sondajlardan gelen numuneler üzerinde yürütülen laboratuvar deneyleri ve CPT deney verilerinin analizi sonrasında çalışma alanında sıvılaşma potansiyelinin düşük olduğu ve yanal yayılmadan kaynaklı deformasyonların da oldukça kısıtlı düzeylerde kalacağı değerlendirilmiştir. Buradan hareketle çalışma sonunda güvenliğin ekonomik bir şekilde sağlanabilmesi için yöntem seçimine alt yapı oluşturulmuştur. Buna göre düşük riskli bölgelerde taş tahkimat gibi klasik yöntemlerin kullanılması ekonomik bir çözüm sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] Uzundurukan S, Göksan TS. Geoteknik mühendisliği ve eğitimi. Türkiye Mühendislik Haberleri 2013. Sayı: 476, No: 2.
- [2] TBDY 2018. Türkiye bina deprem yönetmeliği.
- [3] Sakarya Üniversitesi Geoteknik Çalışma Grubu. Geoteknik Rapor 2019.
- [4] Sert S, Bol E, Özocak A. Sıvılaşma ve yanal yayılmanın coğrafi bilgi sistemleri ile değerlendirilmesi. ISHAD 3. Uluslararası Doğal Afetler ve Afet Yönetimi Sempozyumu, Sakarya, Türkiye, 04-06 Mayıs 2018; sayfa: 943-54.
- [5] TSE. TS1900-I İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm I: fiziksel özelliklerin tayini. Ankara; 2006.
- [6] TSE. TS1900-II İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm II: mekanik özelliklerin tayini. Ankara; 2006.
- [7] TSE. TS1500 İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması. Ankara; 2000.
- [8] Bol E, Önalp A, Özocak A, Sert S. Estimation of the undrained shear strength of Adapazari fine grained soils by cone penetration test. Engineering Geology 1 November 2019: Vol. 261, 105277.
- [9] Önalp A, Bol E, Ural N. Estimation of undrained shear strength from cone tip resistance in clayey soils, Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey: October11-13, 2006.
- [10] Seed HB, Idriss IM. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. ASCE Journal of Geotechnical Engineering 1971; 97:9:1249-73.
- [11] Seed HB. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 1979; 105:2:201-55.

- [12] Seed HB and Idriss IM. Evaluation of liquefaction potential of sand deposits based on observations of performance in previous earthquake. ASCE National Convention, St. Louis, Missouri, USA 1981; Preprint 81 – 544.
- [13] Bol E, Önalp A, Are, E, Sert S, Özocak A, Liquefaction of silts: the Adapazarı criteria. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010;8:859-73.
- [14] Toprak S, Holzer TL. Liquefaction potential index: field assessment. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* 2003; 129:4:315-22.
- [15] Robertson PK, Wride CE. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal* 1998; 35:442-59.
- [16] Ishihara K. Stability of natural deposits during earthquakes, Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco: 1985; 1:321-76.
- [17] Robertson PK. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 2010; 136:6:842-53.
- [18] Youd TL. Liquefaction-induced lateral spread displacement. U.S. Navy 1993, NCEL Technical Note N1862
- [19] Zhang G, Robertson PK and Brachman RWI. Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 2004; 861-71.
- [20] Ishihara K and Yoshimine M. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations* 1992; 32:1:173-88.
- [21] Meyerhof GG. Discussion on research on determining the density of sands. Proc., 4th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, London 1957; 3:110.
- [22] Tatsuoka F, Zhou S, Sato T, and Shibuya S. Method of evaluating liquefaction potential and its application. Rep. on Seismic hazards in the soil deposits in urban areas, Ministry of Education of Japan 1990: 75-109 (in Japanese).
- [23] National Center for Earthquake Engineering Research-NCEER. Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, TL Youd and IM Idriss, eds., Salt Lake City 1997; Technical Rep. NCEER-97- 0022.