

PLASTİSİTE İNDEKSİNİN SİLTLERİN SIVILAŞMA DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN LİTERATÜR YARDIMI İLE İNCELENMESİ

İrem BOZYİĞİT¹, Selim ALTUN²

ÖZET

Farklı metotlar ile hazırlanmış örneklerden ve farklı koşullar altına yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar birbirinden oldukça farklı olmaktadır. Literatürde, farklı yöntem ve koşullar altında elde edilen bu deney sonuçlarının birbiri ile karşılaştırılması yanıltıcı olabilmektedir. Bu çalışmada, 3 farklı plastisite indeksi değerine ($PI=0, 6,9$) sahip silt örnekler üzerinde yapılan dinamik üç eksenli deneyler sonucunda elde edilen sıvılaşma dirençleri literatürde hali hazırda sunulan veriler ile incelenmiştir. Bu amaçla, farklı koşullarda gerçekleştirilen düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma direncini inceleyen çalışmalar derlenmiştir. Bilindiği üzere, deney cihazının türü, yükleme frekansı, örnek hazırlama metodu, efektif çevre gerilmesi gibi parametreler deneysel verileri etkin bir şekilde etkilemektedir. Dolayısıyla, literatüre sunulan ve farklı koşullarda gerçekleştirilen bu çalışmaları birbiri içerisinde mukayese edebilmek için deney koşullarına bağlı olarak çeşitli düzeltmeler yapılmıştır. Koşullara göre düzeltme yapılan veriler ile bu çalışma için elde edilen veriler de kullanılarak tekrarlı gerilme oranı (CSR) değerleri plastisite indeksine bağlı olarak ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük plastisiteli silt, sıvılaşma direnci, plastisite indeksi, tekrarlı gerilme oranı

ABSTRACT

Different specimen preparation methods and experiment conditions lead to distinctive test results. Comparing these test results from the literature can be misleading. In this study, the liquefaction resistances obtained from dynamic triaxial experiments on silt specimens with 3 different plasticity index values ($PI=0, 6,9$) were examined with the data already presented in the literature. For this purpose, studies in the literature regarding liquefaction resistance of low plasticity silts were compiled. As it is known, parameters such as the type of test device, loading frequency, sample preparation method, and effective confining pressure affect the experimental data effectively. Therefore, to compare these studies presented in the literature with the data from the experimental study, various corrections were made depending on the experimental conditions. By using the data corrected

¹ Arş. Gör. Dr., Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, irem.kalipcilar@ege.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr., Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, selim.altun@ege.edu.tr

according to the conditions, the cyclic stress ratio (CSR) values are expressed depending on the plasticity index.

Keywords: *Low plasticity silt, liquefaction resistance, plasticity index, cyclic stress ratio*

1. GİRİŞ

Sıvılaşma olgusunun uzun yıllar boyunca sadece suya doymuş temiz kum zeminlerde olduğu kabul edilmekteydi. Ancak, siltli zemin profillerinin bulunduğu bölgelerde gerçekleşen depremler neticesinde kumlardan ziyade siltli kumların hatta siltlerin de sıvılaştığı gözlemlenmiştir. Literatüre Çin kriterlerinin (Wang, 1979) kazandırılmasından itibaren ince dane içeren ve ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli ise Çin kriterleri kullanılarak belirlenmiştir. Çin kriterlerinin genel olarak “kil boyutunda” dane yüzdesinin kullanılmasının yanıltıcı olduğu ve en önemli faktörün zeminde bulunan kil minerallerinin türü ve kil minerallerinin yüzdesi olduğu belirtilmiştir (Seed vd., 2003; Bray vd., 2004; Bray ve Sancio, 2006). Plastik olmayan siltlerin sıvılaşabilirliği Ishihara (1984, 1985) tarafından hem arazide hem de laboratuvar koşullarında araştırılmış ve plastisite indeksinin önemini vurgulanmıştır. Daha sonra, sıvılaşma direnci ile plastisite indeksi ilişkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Puri (1984), örselenmemiş ve örselenmiş örnekler üzerinde yaptığı tekrarlı üç eksenli deneyler neticesinde silt zeminde plastisite indeksi 10 değerinden 20 değerine artış gösterdiğinde sıvılaşma direncinin arttığını vurgulamıştır. Bu duruma karşılık Sandoval (1989), plastisite indeksi 1.7 değerinden 3.4 değerine yükseldiğinde silt zeminin sıvılaşma direncinin azaldığını ancak plastisite indeksi 12 değerine ulaştığında ise sıvılaşma direncinin artış gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca, düşük aralıkta plastisite indeksi azaldıkça sıvılaşma direncinin arttığı, yüksek plastisite indeksi değerlerinde ise bu durumun aksine sıvılaşma direncinin azaldığı Guo and Prakash (1999) tarafından ifade edilmiştir. Beroya vd. (2009) farklı kil mineralleri ile hazırladığı silt-kil karışımlarının sıvılaşma direncini incelemiş ve kil yüzdesinin, kil minerolojisinin de plastisite indeksi kadar önemli olduğunu belirtmiştir. Beroya vd. (2009) tarafından ifade edilen bu bulgu plastisite indeksinin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisinin sorgulanmasına neden olmuştur. Boulanger and Idriss (2006) ise genel olarak; plastisite indeksi değeri 7 değerinden büyük olduğunda ince daneli zeminlerde çevrimsel yumuşamanın, 7 değerinden küçük olduğunda ise ilksel sıvılaşmanın gerçekleştiğini vurgulamışlardır. Wang vd. (2015), düşük plastisiteli silte farklı oranlarda kil ekleyerek elde ettiği silt-kil karışımlarda plastisite indeksi arttıkça ilksel sıvılaşmadan ziyade çevrimsel yumuşamanın gerçekleştiğini gözlemlemiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; plastisite indeksinin ince daneli zeminlerin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisinin tam olarak açıklanamadığı gözlemlenmektedir. Plastisite indeksinin düşük plastisiteli ince daneli zeminlerin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini kapsamlı olarak inceleyebilmek amacıyla bu çalışmada 3 farklı plastisite indeksine sahip düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma dirençleri incelenmiş ve literatürdeki mevcut verilerde derlenerek plastisite indeksinin çevrimsel gerilme oranı CSR üzerindeki etkisi incelenmiş ve plastisite indeksine bağlı olarak tekrarlı gerilme oranını (CSR) hesaplamak için kullanılabilecek bir denklem elde edilmiştir.

2. METOT VE YÖNTEM

Literatürden derlenen veriler ile deneysel çalışmayla elde edilen verileri birbiri ile mukayese etmek amacıyla, hem literatürden elde edilen hem de deneysel çalışmadan elde edilen veriler normalize edilmiştir. Deney cihazı, örnek hazırlama metodu, efektif çevre gerilmesi ve yükleme frekansı gibi parametreler zeminlerin dinamik özelliklerini önemli şekilde etkilemektedir. Farklı koşullarda gerçekleştirilen deney verilerini birbiri arasında kıyaslayabilmek için deney parametrelerine bağlı olarak veriler düzenlenmiştir.

Deneysel çalışmada deney sonuçlarını etkileyen en önemli parametrelerden biri de deney cihazının türü olmaktadır. Laboratuvarda sıvılaşma deneyleri için çoğunlukla dinamik üç eksenli deney cihazı (CTX) ve direkt kesme cihazı (CDSS) tercih edilmektedir. Bilindiği üzere, direkt kesme cihazı, dinamik üç eksenli cihaza göre asal gerilmelerin çevrimsel devrimini daha iyi temsil etmektedir (Wijewickreme vd., 2005). Bu nedenle, literatürde ve deneysel çalışmada elde edilen veriler (CSR) Seed (1979) tarafından önerilen korelasyon kullanılarak direkt kesme cihazına göre normalize edilmiştir (Denklem 1).

$$CSR_{CDSS} = C_r \times CSR_{CTX} \quad (1)$$

C_r katsayısı; Boulanger vd. (1998) tarafından ince daneli zeminler için 0.7 olarak, Bray ve Sancio (2006) tarafından ise, C_r değerini 0.8 olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada C_r değeri, 0.8 olarak alınmıştır.

Deney sonuçlarını oldukça etkileyen en önemli parametrelerden biri de efektif çevre basıncıdır. Efektif çevre basıncının artışı ile birlikte, sıvılaşma direncinin de artacağı bilinmektedir (Izadi, 2008; Bray ve Sancio, 2006). Deneysel çalışmada tüm deneyler 100 kPa'lık çevre basıncında gerçekleştirilmiş ve literatürdeki CSR değerleri 100 kPa çevre basıncı için tekrar düzenlenmiştir. Düzeltme için Hynes and Olsen (1999) tarafından önerilen K_σ katsayısını içeren denklem kullanılmıştır (Denklem 2).

$$K_\sigma = (\sigma'_{v0})^{f-1} \quad (2)$$

f değeri 0.8 ile 0.6 arasında değişmekte olup bu çalışmada 0.7 olarak kabul edilmiştir.

Diğer bir deney parametresi olan frekans ise, artışı ile birlikte CSR değerlerinin artışına neden olmaktadır. Dolayısıyla, 0.1 Hz deney sonuçlarını 1 Hz deney koşullarına normalize edebilmek için CSR değerleri 1.09 ile, 0.2 Hz deney sonuçları 1.04 ile ve 0.5 Hz deney sonuçları ise 1.02 katsayısı ile çarpılmıştır (Wang vd., 2016).

Tablo 1'de hem deneysel çalışmada elde edilen mevcut veriler hem de literatürde hali hazırda sunulan düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma dirençleri deney koşulları ile birlikte özetlenmiştir.

Tablo 1. Düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma direncini inceleyen çalışmalar ve deney koşulları (Bozyiğit, 2022)

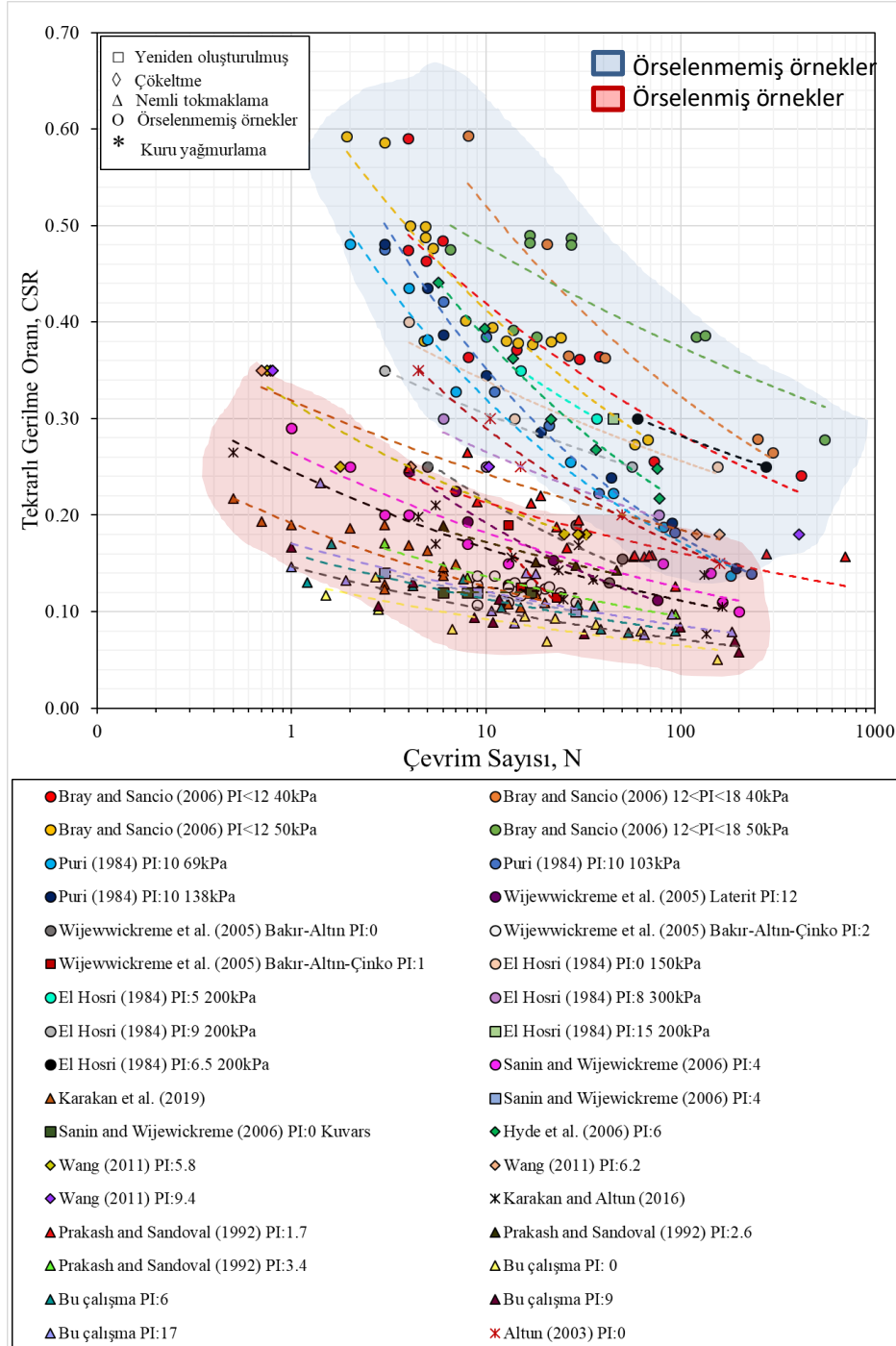
Zemin adı	Zemin sınıfı	LL	PI	İnce oranı (%)	Örnek hazırlama yöntemi	Deney cihazı	Frekans f (Hz)	σ'_c ya da σ'_{vo} (kPa)	e	Göçme kriteri	Deney sayısı	CSR	Referans
Adapazarı	ML, CL	A hattına yakın PI<12		> 35	UD	CTX	1	40	0.75- 1.00	S.A.ε=%3	10	0.24-0.59	Bray and Sancio (2006)
								50			16	0.26-0.59	
		A hattına yakın PI=12-18						40			6	0.26-0.59	
								50			10	0.28-0.49	
Lös	ML	32-36	10	93-98	UD	CTX	1	69	0.738- 0.818	D.A.ε=%5	8	0.137-0.481	Puri (1984)
								103	0.734- 0.799		8	0.139-0.475	
								138	0.734- 0.799		8	0.145-0.481	
Laterit atık	CL	34	12	100	UD	CDSS	0.1	100	1.324- 1.451	γ = %3.75	5	0.112- 0.245	Wijewickreme et al. (2005)
Bakır-altın atığı	ML	27	0	8.5- 97				100	0.556		4	0.13- 0.25	
Bakır-altın-çinko atığı	ML	19	2	62.7- 100				100-352	0.493- 1.180		20	0.107- 0.137	
		21	1	97.6	RC	100, 250	0.840- 0.870	3	0.115- 0.19				
Doğal zemin çökelleri	ML	-	-	83	UD	CTX	0.2	150	0.640-0.647	D.A.ε=%5	3	0.25-0.40	El Hosri et al. (1984)
		22	5					200	0.474-0.482		2	0.30-0.35	
Doğal zemin çökelleri	ML	32	8	83	UD	CTX	0.2	300	0.543-0.558	D.A.ε=%5	3	0.20-0.30	El Hosri et al. (1984)
		34	9					200	0.650-0.657		2	0.25-0.35	
	MH	50	15		RC			200	0.914		1	0.30	
	ML	30	6.5		UD			200	0.597-0.603		2	0.25-0.30	

Tablo 1. Düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma direncini inceleyen çalışmalar ve deney koşulları (Bozyiğit, 2022) (devam)

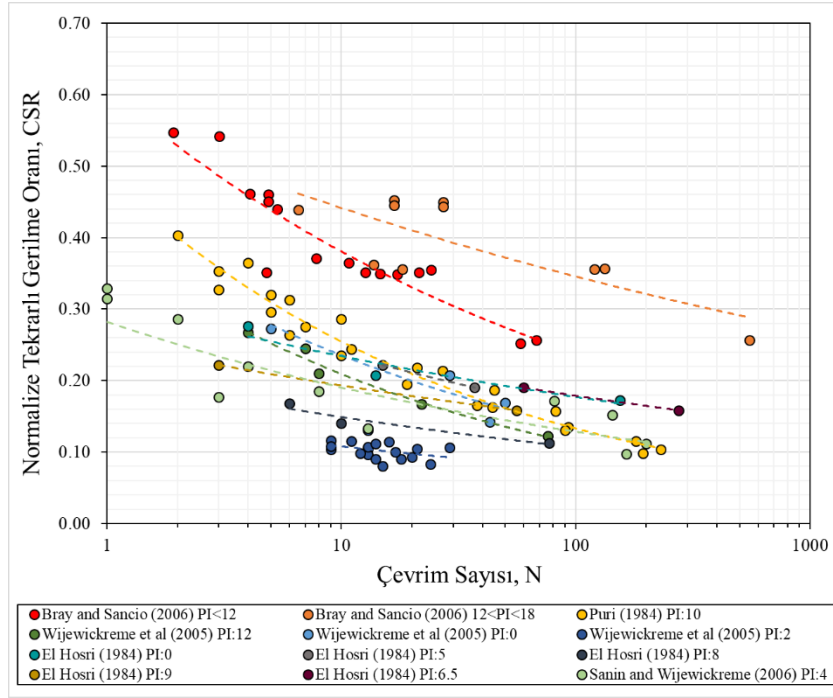
Zemin adı	Zemin sınıfı	LL	PI	İnce oranı (%)	Örnek hazırlama yöntemi	Deney cihazı	Frekans f (Hz)	σ'_c ya da σ'_{vo} (kPa)	Boşluk oranı, e	Göçme kriteri	Deney sayısı	CSR	Referans
Fraser Nehri Delta Silti	ML	30	4	90	UD	CDSS	0.1	85	0.939-0.981	$\gamma = \%3.75$	3	0.15-0.29	Wijewickreme and Sanin (2010)
		30	4	90				100	0.884-0.990		5	0.10-0.29	
		30	4	90				200	0.855-0.900		3	0.11-0.20	
		30	4	90	RC			100	0.852-0.866		3	0.10-0.14	
Kuvars Kaya Tozu	ML	-	-	95	RC	CDSS	0.1	95.9-99.7	0.787-0.799	$\gamma = \%3.75$	4	0.12	
Kireç taşı tozu	ML	24	6	~88	SC	CTX	0.1	100	0.600	D.A. $\epsilon=\%5$	7	0.217-0.441	Hyde et al. (2006)
Mississippi nehri vadi silti	ML	28.1	5.8	94.5	SC	CTX	0.1	90	0.665-0.682	D.A. $\epsilon=\%5$	7	0.18-0.35	Wang (2011)
		28.9	6.2	94.6					0.629-0.677		4	0.18-0.35	
	CL	32.7	9.4	94.8					0.685-0.690		3	0.18-0.35	
Esan hazır silt	ML	-	-	100	WT	CTX	0.1	100	0.985-1.214	$R_u=1.0$	17	0.104-0.193	Karakan et al. (2019)
Plastik olmayan silt	ML	-	-	100	KY	CTX	0.1	100	0.992-1.186		4	0.077-0.170	Karakan ve Altun (2016)
Düşük plastisiteli silt	ML								0.987-1.511		8	0.105-0.265	
Silt	ML	25	1.7	98-87	WT	CTX	0.5	103	0.695-0.780	D.A. $\epsilon=\%5$	16	0.126-0.265	Prakash and Sandoval (1992)
		-	2.6								4	0.137-0.189	
		-	3.4								3	0.09-0.170	
Taş tozu	ML	-	-	80	KY	HCA	0.1	100-196		$R_u=1.0$	12	0.15-0.35	Altun (2003)
İzmir silti	ML	29	-	> 95	WT	CTX	0.1	100	0.86-1.76	D.A. $\epsilon=\%5$	10		Bozyiğit (2022) (Bu çalışma)
		30	6						0.72-2.15		10		
		33	9						1.28-1.91		10		

3. PLASTİSİTE İNDEKSİNİN DEĞİŞİMİ İLE SIVILAŞMA DİRENCİNİN DEĞİŞİMİ

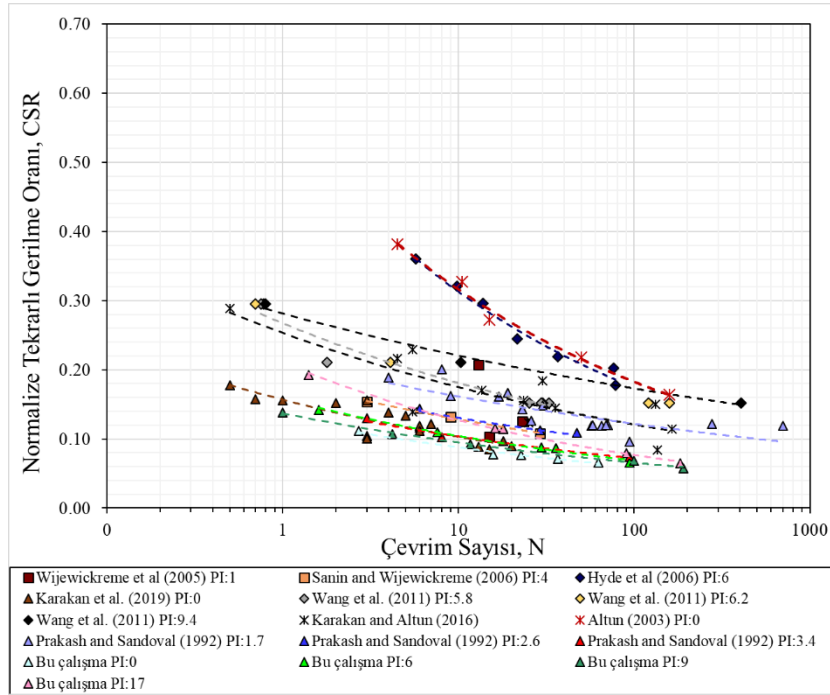
Tablo 1’de deney koşulları ve CSR değerleri bulunan çalışmalara ait CSR-çevrim sayısı ilişkisi Şekil 1’de, deney koşullarına bağlı olarak normalize edilmiş normalize CSR-çevrim sayısı ilişkileri ile Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 1. Literatürde silt zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen tekrarlı gerilme oranı (CSR) ile çevrim sayısı ilişkisi (Bozyiğit, 2022).



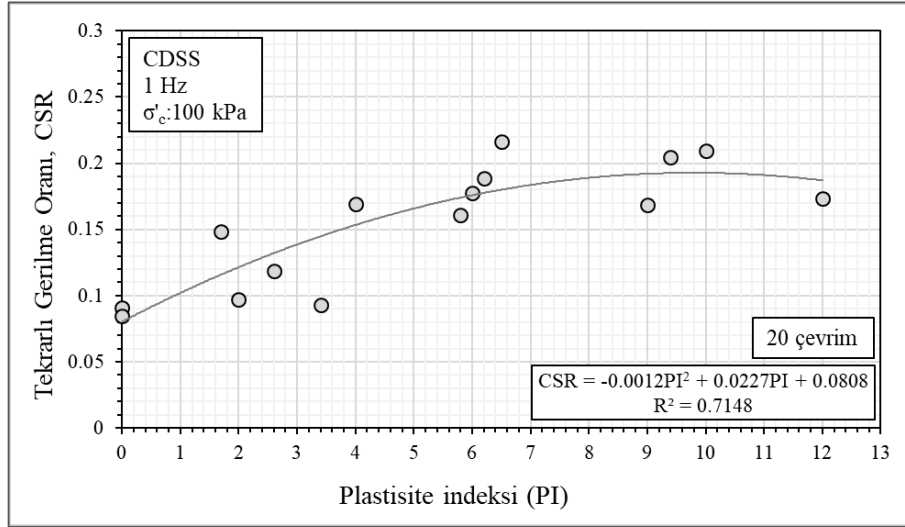
(a)



(b)

Şekil 2. a) Örselenmemiş b) çökeltme, nemli tokmıklama ve kuru yağmurlama ile hazırlanmış örneklerin normalize tekrarlı gerilme oranı (CSR) ile çevrim sayısı ilişkisi (Bozyiğit, 2022).

Deprem moment magnitüdü (M_w) 6.5 büyüklüğünü temsil etmek üzere eşdeğer uniform çevrim sayısı ince daneli zeminler için 20 çevrim olarak seçilmiştir (Seed and Idriss, 1971). Şekil 2’de normalize veriler kullanılarak her bir çalışma için 20 çevrim sayısına denk gelen CSR değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen 20 çevrime karşılık gelen CSR değerleri sahip oldukları plastisite indeksi değerleri ile grafik haline getirilmiştir. Normalize CSR değerleri, deney koşullarına göre normalize edilmesine rağmen boşluk oranı ve ince dane minerolojisi gibi parametreler ile normalize edilememiştir. Dolayısıyla, aynı plastisite değerindeki CSR değerlerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 3’te elde edilen CSR-PI ilişkisi görülmektedir.



Şekil 3 Literatürde bulunan çalışmalardan elde edilen veriler ile bu çalışmada elde edilen veriler kullanılarak 20 çevrime karşılık tekrarlı gerilme oranı ve plastisite indeksi değişimi.

Düzeltilmiş CSR değerleri ile plastisite indeksleri kullanılarak 20 çevrim için 2. dereceden polinom denklemleri elde edilmiştir.

$$CSR_{N:20} = -0.0012(PI)^2 + 0.0227(PI) + 0.0808 \quad (3)$$

4. SONUÇLAR

Literatürde hali hazırda bulunan laboratuvar verilerinin derlenmesi ve üç farklı plastisite indeksine sahip silt zeminler üzerinde yapılan deney sonuçları ile elde edilen CSR değerleri deney koşullarına göre normalize edilmiş ve plastisite indeksine bağlı olarak değişimi elde edilmiştir.

Örselenmemiş örneklerin sıvılaşma dirençlerinin; çökeltme, nemli tokmaklama ve kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmış örneklere kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Plastisite indeksinin düşük plastisiteli ince taneli zeminlerin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini göstermek için laboratuvar verilerine dayalı bir denklem sunulmuştur. Elde edilen eşitlik, plastisite indeksi 12’den küçük silt zeminler için geçerli olup, plastisite indeksinin dışında sıvılaşma direncini önemli şekilde etkileyen boşluk oranı, mineroloji, kil içeriği gibi

diğer önemli parametreler göz önüne alınmadığından elde edilen eşitlik genel bir fikir sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Altun, S. (2003), Burulmalı kesme deney aleti ile zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Beroya, M.A. A., Aydın, A., Katzenbach, R. (2009), “Insight into The Effects of Clay Mineralogy on The Cyclic Behavior of Silt-Clay Mixtures”, Engineering Geology, Vol 106, 154–162.
- Boulanger, R.W., Idriss, I. (2006), “Liquefaction Susceptibility Criteria for Silt Sand Clays”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 132(11), 1413–1426.
- Bozyiğit, I. (2022), Siltli zeminlerin tekrarlı yükler altındaki ve yükleme sonrasındaki davranışlarının belirlenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T.L., Stewart, J.P., Seed, R.B., Cetin, O.K., Bol, E., Baturay, M.B., Christensen, C. (2004), “Subsurface Characterization at Ground Failure Sites in Adapazari, Turkey”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 130(7), 673-685.
- Bray, J.D., Sancio, R.B. (2006), “Assessment of Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 32(9), 1165 – 1177.
- El Hosri, M.S., Biarez, J., Hicher, P.Y. (1984), “Liquefaction Characteristics of Silty Clay”, Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA.
- Guo, T., Prakash, S. (1999), “Liquefaction of Silts and Silt-Clay Mixtures”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 132(6), 716–735.
- Hyde, A.F.L., Higuchi, T., Yasuhara, K. (2006), “Liquefaction, Cyclic Mobility, and Failure of Silt”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 132(6), 716–735.
- Hynes, M.E., Olsen, R.S. (2018), Influence of confining stress on liquefaction resistance, Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, Routledge.
- Ishihara, K. (1984), “Post-Earthquake Failure of a Tailings Dam due to Liquefaction of the Pond Deposit”, Proceedings of International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, U.S.A.
- Ishihara, K. (1985), “Stability of natural deposits during earthquakes”, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, U.S.A.
- Izadi, A. (2008), Liquefaction and Post-Liquefaction Behavior of Low Plasticity Silts using Cyclic Triaxial Tests, Missouri University of Science and Technology.
- Karakan, E. and Altun, S. (2016), “Silt Kum Karışımlarının Sıvılaşma Davranışı ve Sıvılaşma Sonrası Hacimsel Deformasyon Özellikleri”, Teknik Dergi, Vol 27(4), 7593-7617.
- Karakan, E., Tanrinian, N., Sezer, A. (2019), “Cyclic Undrained Behavior and Post Liquefaction Settlement of a Nonplastic Silt”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 120, 214–227.
- Puri, V.K. (1984), Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils, University of Missouri.

- Sandoval-Shannon, J. A. (1989), Liquefaction and settlement characteristics of silt soils, University of Missouri.
- Seed, H.B. (1979), "Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol 105(2), 201-255.
- Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of Soil Mechanics and Foundation Divisions, Vol 97(9):1249–1273.
- Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., Faris, A. (2003), "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework", Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, CA.
- Wang, W.S. (1979), "Some findings in soil liquefaction", Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China.
- Wang, S. (2011), Postcyclic behavior of low-plasticity silt, Missouri University of Science and Technology.
- Wang, S., Luna, R., Zhao, H. (2015), "Cyclic and Postcyclic Shear Behavior of Low-Plasticity Silt with Varying Clay Content", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 75, 112–120.
- Wang, S., Onyejekwe, S., Yang, J. (2016), "Reexamination of Effect of Plasticity on Liquefaction Resistance of Low-Plasticity Fine-Grained Soils and Its Potential Application", Acta Geotechnica, Vol 11(5), 1209–1216.
- Wijewickreme, D., Sanin, M.V., Greenaway, G.R. (2005), "Cyclic Shear Response of Fine-Grained Mine Tailings", Canadian Geotechnical Journal, Vol 42(5), 1408-1421.
- Wijewickreme, D., Sanin, M. (2010), "Postcyclic Reconsolidation Strains in Low-Plastic Fraser River Silt Due to Dissipation of Excess Pore-Water Pressures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 136(10), 1347–1357.