

Bu makale aşağıda atf bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.
Atf bilgisi: Kayabalı K., Nagaraj H. B., Yılmaz D., Beyhan M. 2024. Determination of Atterberg Limits using the vane shear test method. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 174, 1-10. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1362349>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Kanatlı kesme deneyi yöntemi kullanılarak Atterberg limitlerinin belirlenmesi

Determination of Atterberg Limits using the vane shear test method

Kamil KAYABALI^{a*}, H. B. NAGARAJ^b, Deniz YILMAZ^a ve Muhammet BEYHAN^a

^a Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^b B.M.S Mühendislik Koleji, Bangalor, Hindistan

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Likit Limit, Plastik Limit, Drenajsız Kesme Dayanımı, Kanatlı Kesme Deneyi, Atterberg Limitleri.

ÖZ

Atterberg limitleri çeşitli mühendislik uygulamaları için zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan önemli indeks parametreleridir. Zeminlerin mühendislik özellikleri, indeks özellikleri kullanılarak basit korelasyonlar yoluyla tahmin edilebilmekte ve böylece zeminlerin mühendislik davranışı kalitatif olarak değerlendirilebilmektedir. Likit limiti belirlemede iki popüler yöntem kullanılmaktadır. Plastik limit genellikle elle nodül yuvalama yoluyla belirlenmektedir. Plastik limiti elle yuvarlama yoluyla belirlemeye alternatif olarak bazı araştırmacılar düşen koni yöntemini denemişlerdir. Ne var ki, plastik limitin belirlenmesi için kullanılan koni penetrasyon derinliği hakkında ortak bir görüş oluşturulamamıştır. Plastik limiti tayin için diğer birçok (plaka ile yuvarlama düzeneği gibi) test yöntemleri geliştirilmiş olsa da, plastik limiti sınırlı ölçüde tayin edebilme yeteneğine rağmen, düşen koni yöntemi zeminlerin hem likit hem de plastik limitini belirleyebilen tek yöntem gibi görünmektedir. Laboratuvar kanatlı kesme deneyinin ince taneli zeminlerin drenajsız kesme dayanımını belirlemede basit ve güvenilir bir yöntem olmasından hareketle, yazarlar drenajsız kesme dayanımı ile su içeriği arasında geliştirilen korelasyonlar aracılığıyla likit ve plastik limitler arasındaki bir dizi su içeriğinde hem likit hem de plastik limitin ikisinin birden belirlenebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu sayede deney sonuçların güvenilirliğinden ödün vermeden likit ve plastik limitin ayrı ayrı düzenekler yerine tek bir düzenek ile belirlenmesi mümkün olabilmektedir.

Geliş Tarihi: 14.12.2022

Kabul Tarihi: 18.09.2023

Keywords:

Liquid Limit, Plastic Limit, Undrained Shear Strength, Vane Shear Test, Atterberg Limits.

ABSTRACT

Atterberg limits are important index parameters used to classify soils for various engineering applications. Engineering properties of soils are predicted through simple correlations with index properties and thereby the engineering behavior of soils are qualitatively assessed. There are two popular methods of determining liquid limit, and plastic limit is commonly determined adopting rolling thread methods. To avoid operator related variations in determining plastic limit by conventional method, some researchers have explored using cone method as an alternative. However, there is no consensus about the depth of penetration to reckon the end of plastic state. Though various other test methods have been developed to determine plastic limit (like roll plate device), cone penetration with its limitation of determining plastic limit, is the only method to determine both liquid and plastic limit of soils. Since laboratory vane shear test is a simple and reliable method of determining undrained strength of fine-grained soils, the authors have explored to determine both liquid and plastic limits through correlations developed between undrained strength and water content over a range of consistencies between liquid and plastic states. This would eliminate determining liquid and plastic limit separately without sacrificing the reliability of results.

*Başvurulacak yazar: Kamil KAYABALI, kayabali@ankara.edu.tr

1. Giriş

Atterberg'in kıvam limitleri için ilk önerisi (Atterberg, 1911) yedi nitel limit içermektedir. Bunlardan sadece likit limit (LL) ve plastik limit (PL) jeoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. LL zeminin kendi ağırlığı altında akmaya başladığı su durumdaki içeriğidir. PL zemin kırılma eğiliminin başlangıcı veya plastikten yarı katı hale geçişe karşılık gelen su içeriğidir.

LL ve PL tek başına veya plastisite indeksi (PI) şeklinde bir dizi ampirik korelasyonda kullanılmaktadır. Bu özellikler tasarımın erken aşamalarında ön tahminlerde bulunmada yardımcı olabilirler. Zeminlerin sınıflandırılması (Feng, 2004a), drenajsız kesme dayanımı (Skempton, 1954), konsolidasyon parametreleri [örneğin, sıkışma katsayısı, yeniden sıkışma katsayısı, ön konsolidasyon basıncı, oturma (Terzaghi ve Peck, 1967; Azzouz vd., 1976; Leonards, 1976; Nagaraj ve Srinivasa Murthy, 1986)] ve zemin penetrasyon direncinin belirlenmesi (Stroud, 1974) gibi mühendislik özellikleri bu tür uygulamalardan bazılarıdır.

Likit limiti belirlemek için kullanılan en yaygın teknikler Casagrande tas yöntemi ve düşen koni deneyi olup, plastik limiti belirlemek için kullanılan yöntemler ise elle nodül yuvarlama yöntemleridir. Casagrande yöntemi ile LL'nin belirlenmesinde bir dizi belirsizlik söz konusudur (örneğin bkz. Wroth ve Wood, 1978; Lee ve Freeman, 2007; Kayabalı ve Tüfenkçi, 2010a). Düşen koni yönteminde operatör etkilerinin daha az olması ve sonuçların tekrarlanabilirliğinin iyi olması nedeniyle Casagrande yöntemine kıyasla daha avantajlıdır. Ayrıca, aynı numuneler birden fazla laboratuvarında test edildiğinde sonuçların standart sapması Casagrande deneyine göre çok daha düşüktür (Sherwood ve Ryley, 1970; Haigh, 2012). Bu nedenle, düşen koni deneylerinin belirsizlikleri konusunda çok fazla tartışma yoktur. Bununla birlikte, plastik limitin elle nodül yuvarlama yöntemiyle belirlenmesinde operatörle ilgili belirsizlikler her zaman tartışma konusu olmuştur. Buradan yola çıkılarak düşen koni yöntemi yoluyla plastik limiti belirlemede geçmişte birçok girişimde bulunulmuştur. Bu girişimlerden bazıları Towner (1973), Campbell (1976, 1983), Wood ve Wroth (1978), Campbell vd. (1980), Feng (2000, 2001), Belviso vd. (1985), Rao (1987),

Harison (1988), Sharma ve Bora (2003), Feng (2004a,b), Al-Dahlaki ve Al-Sharify (2008), Rashid vd. (2008), Lee ve Freeman (2009), Sivakumar vd. (2009, 2014) gibi çalışmaları kapsamaktadır. Shimobe (2010) çeşitli tipte koniler kullanarak genişletilmiş koni yönteminin hem likit hem de plastik limiti aynı anda belirleyebildiği sonucuna varmıştır. Ayrıca, düşen koni deneyinin bir "durum parametresi" olarak olarak likitlik indeksini, drenajsız kesme dayanımını ve zeminlerin hassasiyetini belirlemede kullanılabileceğini belirtmiştir. Ekstrüzyon yöntemi de ince taneli zeminlerin kıvam limitlerini belirlemede bir araç olarak kullanılmıştır. Timar (1974) doğrudan ekstrüzyon yöntemini kullanarak en yaygın iki kıvam limitinin belirlenmesinde kısmi başarı elde etmiştir. Whyte (1982) düşük plastisiteli bir kil üzerinde deneme amaçlı yapılan ters ekstrüzyon (RX) deneylerinin sonuçlarına dayanarak RX'in zemin plastisitesini belirlemede güvenilir bir yöntem olduğunu; ayrıca basit, hızlı ve ekonomik olduğunu göstermiştir. Kayabalı ve Tüfenkçi (2010b), RX deneyinin LL ve PL'nin belirlenmesinde makul bir başarı derecesi sağlayabileceğini ve RX deneyinin hem geleneksel PL hem de LL deneylerinde yer alan belirsizliklerin çoğunu, özellikle operatöre bağlı etkileri ortadan kaldırdığını göstermiştir. Kayabalı vd. (2016) çamur presi makinesi (MPM) adı verilen bir deney aparatı geliştirmiştir. Çalışmanın yazarları 275 zemin numunesinin test sonuçlarını kullanarak Atterberg limitlerinin MPM yoluyla daha rasyonel ve ölçülebilir bir şekilde belirlenebileceğini göstermiştir.

Kanatlı kesme deneyi kohezyonlu zeminlerin drenajsız kesme dayanımını değerlendirmede kullanılan en yaygın araçlardan biri olup, hem laboratuvarında hem de arazide kullanılabilir. 1900'lerin başında İsveç'te ortaya çıkmış ve 1940'lara doğru popüler hale gelmiştir. Deneyin başlıca avantajları uygulama kolaylığı, basitlik, sağlamlık ve hızlıdır. Ayrıca, doruk ve artık dayanımın ölçülmesine ve dolayısıyla kohezyonlu zeminlerin hassasiyetinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Ek olarak, zeminlerin aşırı konsolidasyon oranının dolaylı bir değerlendirmesini de sağlamaktadır (Ameratunga vd., 2016). Drenajsız kesme dayanımı 100 kPa'dan az olan zeminlerde kullanılması tavsiye edilmektedir Amerikan Malzeme ve Test Derneği (ASTM), (2000). Farklı sertliklere sahip dört yay kullanan

minyatür kanatlı kesme deneyi ince taneli zeminlerin likit ve plastik limiti arasındaki plastik davranış için yaygın aralık olan birkaç kPa'dan yaklaşık 100 kPa'ya kadar zeminlerin drenajsız kesme dayanımını ölçebilmektedir.

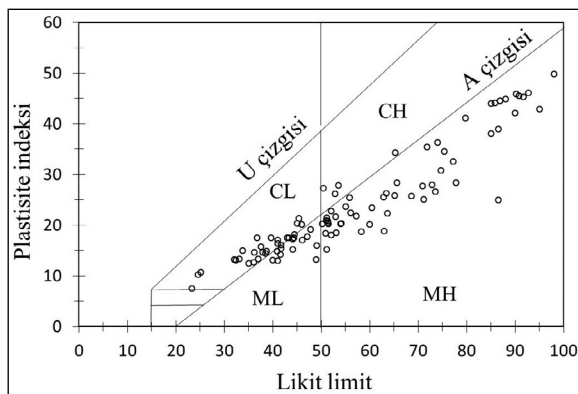
Kyambadde (2010), VST'nin çok cazip bir yöntem olmadığı halde, kanatlı kesme dayanımı verilerinin mevcut olduğu durumlarda likit limit verilerinin bir dereceye kadar doğrulanabildiğini belirtmiştir.

Bu araştırmanın amacı, iki ana Atterberg limitini belirlemek için minyatür kanat kesme deneyinin kullanılabilirliğini ortaya koymaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Araştırmada 100 adet zemin numunesi Atterberg limitleri ve kanatlı kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin çoğunluğu magmatik kayaların bozulması sonucu oluşan kalıntı zeminler, az bir kısmı da Ankara civarından elde edilen gölsel çökellerdir. Bu çalışmada kullanılmak üzere seçilen zeminlerin geniş bir plastisite aralığında olmasına özen gösterilmiştir. Kullanılan zemin numunelerinin likit limitleri 23 ila 106 arasında, plastisite indeksleri ise 7,5 ila 50 arasında değişmektedir. Zemin örneklerinin plastisite grafiğindeki konumları Şekil 1'de sunulmuştur.

Bu deneysel çalışma için kullanılan çeşitli ekipmanlar sırasıyla Şekil 2 ila 4'te gösterilen bir düşen koni düzeneği, plaka ile yuvarlama düzeneği (Şekil 3) ve minyatür bir kanatlı kesme aparatını içermektedir. Kanatlı kesme deney cihazı (Şekil 4) zemine uygulanan torku yaylar yerine elektronik



Şekil 1- Zemin numunelerinin Casagrande diyagramındaki konumları.



Şekil 2- Bu çalışmada kullanılan düşen koni cihazı.



Şekil 3- Plastik limit testleri için plaka ile yuvarlama düzeneği.



Şekil 4- Minyatür kanatlı kesme test cihazı.

transduserler ile ölçmektedir. Bu servo-kontrollü VST cihazı kullanılarak ölçülebilen kesme gerilmesi, kanat boyutları 12,7 mm x 12,7 mm olduğunda 0,1-466 kPa arasında değişmektedir. Dönme hızı dakikada 0,001-1200 derece arasında değişmektedir.

Tüm zemin numuneleri önce ASTM #40 gözenekli elekten geçirilmiştir (American Society of Testing Materials, 2005). Ardından, yeterli miktarda su ilave edilmiş ve zemin bir kap içinde iyice karıştırılmıştır. Karıştırılmış zemin numuneleri uygun şekilde etiketlenmiş ve %100 nemi korumak için alt kısmı su dolu bir desikatöre yerleştirilmiştir. Numuneler uygun doygunluk için en az 20 saat bekletilmiştir. Zemin numunelerinin her biri için likit limit düşen koni cihazı (BS1377-1990) kullanılarak belirlenmiştir.

Su içeriği kuru taraftan ıslak tarafa değiştirilerek en az beş deneme noktası elde edilmiş ve karşılık gelen konik penetrasyon miktarı kaydedilmiştir. Konik penetrasyon aralığının 15 mm ila 25 mm arasında olması hedeflenmiştir. Zeminin likit limitinin tayini için 20 mm penetrasyona karşılık gelen su içeriği dikkate alınmıştır (British Standards Institute, 1990). Tüm zeminlerin plastik limiti ASTM D4318-05 Standardı'nda (American Society of Testing Materials, 2005) belirtilen standart prosedüre göre plaka ile yuvarlama düzeneği kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel en az 5 kez tekrarlanmış ve plaka ile yuvarlama deneyine tabi tutulan zeminleri temsil etmek üzere beş plastik limit deneyinin ortalaması alınmıştır. Tüm zeminlerin likit limiti ve plastik limit deney sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1- Atterberg limitleri ve kanat kesme deneylerinin sonuçları (LL: likit limit, PL: plastik limit, PI: plastisite indeksi, USCS: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi, a ve b: kanatlı kesme deneyinin yarı logaritmik grafiğindeki deneysel eğriden elde edilen katsayılar, R²: regresyon katsayısı, ML: düşük plastisiteli silt, MH: yüksek plastisiteli silt, CL: düşük plastisiteli kil, CH: yüksek plastisiteli kil).

No.	LL	PL	PI	USCS	a	b	R ²
1	51,1	35,9	15,2	MH	2E+08	0,377	0,976
2	63,0	44,2	18,8	MH	5.E+07	0,287	0,970
3	77,2	44,6	32,6	MH	14909	0,118	0,976
4	32,4	19,3	13,1	CL	12109	0,271	0,988
5	60,4	37,0	23,4	MH	5968	0,109	0,986
6	43,3	25,8	17,5	CL	44731	0,246	0,988
7	41,0	28,0	13,0	ML	163178	0,275	0,950
8	40,0	26,9	13,1	ML	211404	0,288	0,988
9	47,1	29,4	17,7	ML	21980	0,187	0,980
10	41,7	25,6	16,1	CL	63439	0,259	0,991
11	37,0	23,7	13,3	CL	8959	0,242	0,998
12	42,9	25,4	17,5	CL	17698	0,219	0,990
13	36,2	21,6	14,6	CL	16136	0,25	0,985
14	44,5	26,3	18,2	CL	31014	0,228	0,999
15	51,3	30,5	20,8	MH	8595	0,145	0,978
16	36,0	23,3	12,7	CL	24575	0,255	0,998
17	35,0	22,5	12,5	CL	32018	0,26	0,998
18	41,0	23,9	17,1	CL	96358	0,277	0,993
19	23,3	15,8	7,5	CL	26556	0,323	0,998
20	52,0	29,2	22,8	MH	16740	0,169	0,922
21	86,5	47,6	38,9	MH	6093	0,086	0,966
22	46,0	25,9	20,1	CL	7303	0,166	0,985
23	39,6	22,1	17,5	CL	14016	0,226	0,992

MTA Dergisi

Çizelge 1- Devamı.

No.	LL	PL	PI	USCS	a	b	R ²
24	45,4	24,0	21,4	CL	6445	0,175	0,998
25	65,6	37,2	28,4	MH	171511	0,192	0,972
26	75,4	40,9	34,5	MH	8817	0,112	0,992
27	72,9	44,9	28,0	MH	5341	0,096	0,971
28	103	62,2	40,8	MH	7639	0,074	0,943
29	41,7	26,3	15,4	ML	22955	0,22	0,997
30	46,1	29,0	17,1	ML	83707	0,246	0,981
31	54,1	33,7	20,4	MH	20170	0,166	0,997
32	56,1	33,6	22,5	MH	88339	0,214	0,996
33	51,5	31,2	20,3	MH	25663	0,192	0,978
34	74,7	43,9	30,8	MH	916	0,058	0,915
35	45,0	24,6	20,4	CL	7024	0,174	0,996
36	68,6	42,8	25,8	MH	34188	0,135	0,967
37	58,2	39,5	18,7	MH	54624	0,163	0,995
38	60,0	39,8	20,2	MH	344266	0,205	0,983
39	50,4	23,1	27,3	CH	3019	0,149	0,990
40	51,0	30,1	20,9	MH	104103	0,214	0,967
41	95,0	52,1	42,9	MH	2731	0,073	0,996
42	85,0	46,9	38,1	MH	3649	0,084	0,989
43	73,5	46,9	26,6	MH	120860	0,154	0,970
44	71,1	46,0	25,1	MH	11807	0,116	0,990
45	77,8	49,4	28,4	MH	1.E+06	0,174	0,991
46	101	62,2	38,3	MH	922631	0,145	0,934
47	48,9	35,7	13,2	ML	1.E+06	0,263	0,998
48	36,8	19,3	17,5	CL	3165	0,191	0,992
49	33,8	18,8	15,0	CL	6551	0,233	0,992
50	32,0	18,8	13,2	CL	24462	0,311	0,996
51	65,3	31,0	34,3	CH	2761	0,116	0,997
52	57,2	35,4	21,8	MH	56743	0,186	0,976
53	41,6	27,4	14,2	ML	6773	0,165	0,997
54	49,0	33,0	16,0	ML	883887	0,259	0,997
55	44,1	26,8	17,3	ML	75389	0,235	0,993
56	53,5	25,6	27,9	CH	8660	0,171	0,981
57	33,1	19,8	13,3	CL	10956	0,26	0,997
58	38,7	23,8	14,9	CL	1979	0,159	0,999
59	37,5	21,8	15,7	CL	4517	0,208	0,997
60	53,0	31,3	21,7	MH	81326	0,211	0,994
61	54,0	33,7	20,3	MH	424	0,067	0,941
62	85,1	41,1	44,0	MH	10705	0,108	0,986
63	62,9	37,4	25,5	MH	35110	0,161	0,996
64	55,8	30,4	25,4	MH	24486	0,178	0,987
65	38,5	24,1	14,4	CL	1922	0,161	0,993

Çizelge 1- Devamı.

No.	LL	PL	PI	USCS	a	b	R ²
66	44,1	28,9	15,2	ML	62961	0,229	0,994
67	63,4	37,1	26,3	MH	9868	0,133	0,991
68	44,3	26,8	17,5	ML	45369	0,222	0,991
69	55,0	31,3	23,7	MH	14609	0,159	0,989
70	51,1	29,6	21,5	MH	18762	0,174	0,993
71	52,0	33,9	18,1	MH	2.E+06	0,275	0,987
72	41,0	24,6	16,4	CL	62589	0,261	0,996
73	37,9	23,2	14,7	CL	2567	0,178	0,995
74	65,1	39,2	25,9	MH	164541	0,184	0,986
75	50,2	29,9	20,3	MH	26825	0,194	0,984
76	63,7	41,4	22,3	MH	8.E+06	0,258	0,980
77	40,9	26,0	14,9	ML	136616	0,281	0,988
78	50,9	32,5	18,4	MH	36741	0,191	0,998
79	71,8	36,4	35,4	MH	283563	0,202	0,984
80	53,1	34,6	18,5	MH	853309	0,247	0,986
81	47,8	28,6	19,2	ML	18210	0,181	0,977
82	52,9	26,7	26,2	CH	5226	0,149	0,984
83	86,5	61,5	25,0	MH	174311	0,127	0,996
84	106	73,8	32,4	MH	49136	0,092	0,997
85	91,7	46,4	45,3	MH	1707	0,072	0,960
86	51,4	30,9	20,5	MH	9713	0,16	0,993
87	102	66,7	35,1	MH	39473	0,098	0,995
88	70,9	43,2	27,7	MH	4576	0,108	0,985
89	24,6	14,4	10,2	CL	9276	0,353	0,999
90	25,1	14,4	10,7	CL	4485	0,271	0,978
91	74,0	37,7	36,3	MH	2981	0,094	0,992
92	79,8	38,6	41,2	MH	4561	0,101	0,992
93	85,8	41,7	44,1	MH	2371	0,085	0,990
94	86,9	42,4	44,5	MH	5409	0,097	0,989
95	88,0	43,1	44,9	MH	3884	0,088	0,991
96	90,2	44,4	45,8	MH	2425	0,078	0,995
97	90,8	45,3	45,5	MH	4599	0,089	0,997
98	92,8	46,7	46,1	MH	2475	0,075	0,996
99	90,0	47,9	42,1	MH	4725	0,084	0,990
100	98,0	48,2	49,8	MH	1905	0,067	0,993

Kanatlı kesme deneyleri ASTM D4648-00 Standardı'na (American Society of Testing Materials, 2000) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kullanılan zemin numunlerinin her biri likit limit ve plastik limit deneyleri için yapılarına benzer şekilde

hazırlanmıştır. Deney prosedürü, likit limit ve plastik limit arasında bir kıvama sahip olan doymuş zeminler kullanılarak, beş tekrarlı kanatlı kesme deneyi yapılmasını içermektedir. Ölçülen torklar, Denklem 1 ve 2'de verilen ilişkiler kullanılarak drenajsız kesme

dayanımına dönüştürülmüştür (American Society of Testing Materials, 2000):

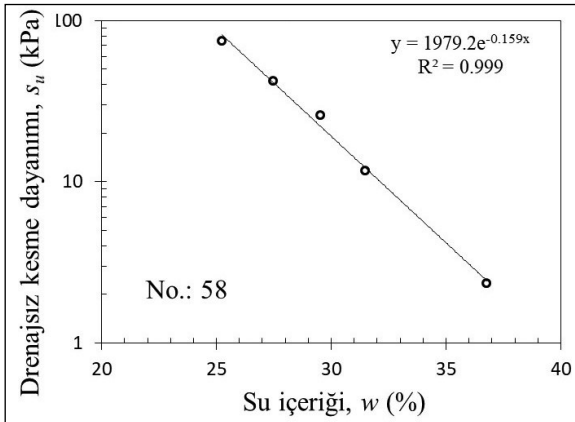
$$T = \tau \times K \quad (1)$$

$$K = \frac{\pi D^2}{2 \times 10^6} \left[1 + \frac{D}{3H} \right] \quad (2)$$

Burada T = tork (N.m), τ = drenajsız kesme dayanımı (N/m²), K = kanat sabiti (m³), D = ölçülen kanat çapı (mm) ve H = ölçülen kanat yüksekliğidir (mm). Uygun su içeriklerinde ölçülen drenajsız kesme dayanımları yarı logaritmik bir grafiğe aktarılmıştır. Zemin No. 58 için böyle tipik bir grafik Şekil 5'te verilmiş olup, buradan aşağıdaki formda bir denklem elde edilmiştir:

$$y = a \exp^b \quad (3)$$

Burada y : Drenajsız kesme mukavemeti (s_u), a ve b ise regresyon katsayılarıdır.



Şekil 5- VST test sonuçları üzerine oluşturulmuş örnek bir grafik.

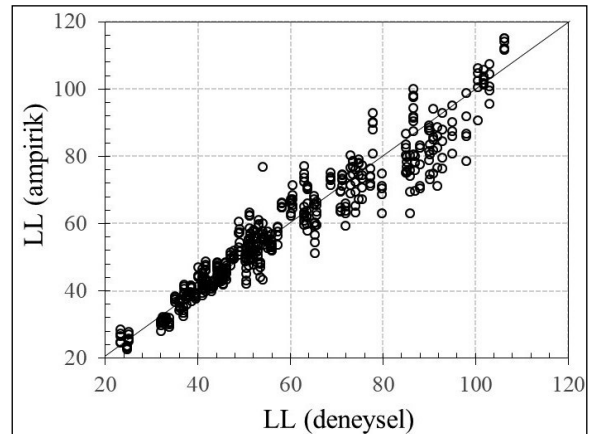
3. Deney Sonuçları

Çizelge 1'de farklı yerlerden derlenen 100 adet numunenin 57'sinin MH (yüksek plastisiteli silt), 26'sının CL (düşük plastisiteli kil), 13'ünün ML (düşük plastisiteli silt) ve 4'ünün CH (yüksek plastisiteli kil) olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. Böylece, zeminler geniş bir plastisite aralığını kapsamaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, her bir zemin numunesi farklı su içeriklerinde beş kanatlı kesme deneyine tabi tutulmuştur. Böylece, 100 adet zemin numunesi için elde edilen drenajsız kesme dayanımı ve su içeriği çifti sayısı 500'dür. Bu kadar büyük bir verinin listelenmesi büyük bir yer kaplayacaktır; bu nedenle, alandan tasarruf etmek için, kanatlı kesme deneylerinin

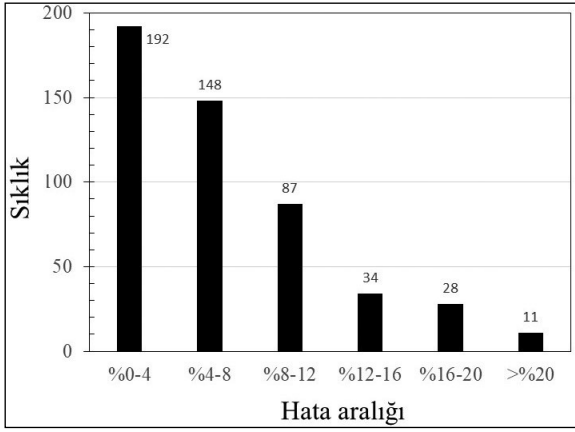
sonuçları Çizelge 1'de sunulduğu gibi sadece a ve b katsayıları cinsinden gösterilmiştir. Minyatür kanatlı kesme deneyinden elde edilen drenajsız kesme dayanımları ile Atterberg limitleri arasında makul bir istatistiksel ilişki olup olmadığını araştırmak üzere Çizelge 1'de sunulan sayısal veriler bir dizi analize tabi tutulmuştur. Drenajsız kesme dayanımı (s_u) ve su içeriği (w) açısından likit limitinin belirlenmesinin mümkün olup olmadığını göstermek üzere DATAFIT yazılımı (DATAFIT, 2008) kullanılarak çoklu bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, LL'yi s_u ve w cinsinden tanımlayan bir dizi denklemler elde edilmiştir. Bu tür bağıntıların en basitlerinden biri seçilmiş ve aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$LL = 0,902 (w^{0,997}) s_u^{0,138} \quad (R^2 = 0,92) \quad (4)$$

Burada s_u kPa cinsinden ve w ise yüzde cinsindedir. Çok sayıda sabit katsayı içeren oldukça karmaşık polinom denklemleri için maksimum korelasyon katsayısı da 0,95 olmuştur. Bir sonraki adımda likit limiti ampirik ilişkiden tahmin etmek için Denklem 4 kullanılmıştır. Düşen koni yöntemi yoluyla deneysel olarak belirlenen likit limit ile ampirik olarak tahmin edilen likit limitin karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir. Deneysel yolla ölçülen likit limitten sapmalar mutlak yüzde hataları açısından istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Denklem 4 kullanılarak hesaplanan likit limitin deneysel yolla belirlenen likit limite göre mutlak yüzde hataları histogram formunda Şekil 7'de verilmiştir. Bu değerlendirmeye göre toplam mutlak yüzde hatası 6,8'dir. Şekil 7'ye bakıldığında tüm zeminlerin %80'inin hesapla



Şekil 6- Hesaplanan likit limitler ile ölçülen likit limitlerin karşılaştırılması.



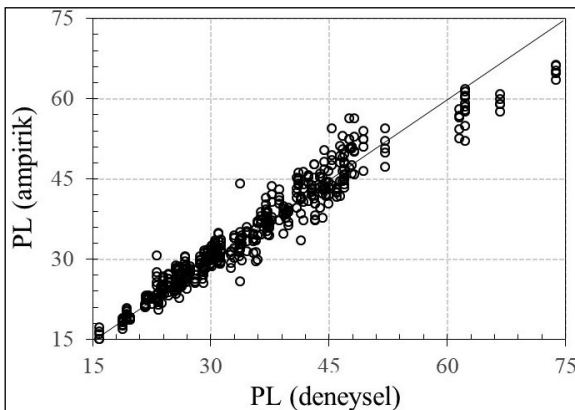
Şekil 7- Hesaplanan likit limitlerin mutlak hatalarının histogramı.

bulunan likit limitler için hata miktarının $\pm\%10$ içinde olduğu görülmektedir.

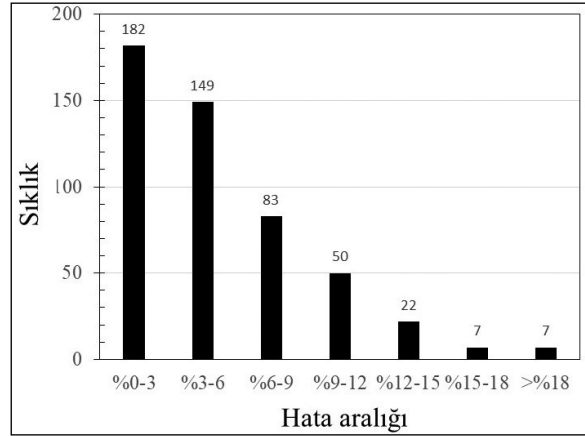
Benzer şekilde, 500 adet su içeriği, drenajsız kesme dayanımı ve plastik limit seti de plastik limitin sadece su içeriği ve drenajsız kesme dayanımı kullanılarak kestirilmesi için çoklu regresyon analizine tabi tutulmuştur. Ampirik denklemin aşağıdaki basit versiyonu elde edilmiştir:

$$PL = 0,609 (w^{0,959}) s_u^{0,139} \quad (R^2 = 0,95) \quad (5)$$

Bir sonraki adımda plastik limiti ampirik olarak hesaplamak için Denklem 5 kullanılmıştır. Şekil 8'de plaka ile yuvarlama yöntemiyle belirlenen plastik limitlerin kestirim yoluyla bulunan plastik limitler arasındaki karşılaştırmalı grafiği görülmektedir. Denklem 5 kullanılarak hesaplanan plastik limitin deneysel yolla belirlenen plastik limite göre mutlak yüzde hataları histogram formunda Şekil 9'da verilmiştir. Bu değerlendirmeye göre toplam mutlak



Şekil 8- Hesaplanan plastik limitlerle ölçülen plastik limitlerin karşılaştırılması.



Şekil 9- Hesaplanan plastik limitlerin mutlak hatalarının histogramı.

yüzde hatası 5,3'dür. Şekil 9'a bakıldığında tüm zeminlerin %86'sının hesapla bulunan plastik limitler için hata miktarının $\pm\%10$ içinde olduğu görülmektedir.

Denklem (4) ve (5), likit limit ve plastik limit arasındaki herhangi bir su içeriğinde yapılan VST deneyinin tek bir denemesine dayanarak iki Atterberg limitini, yani likit limiti ve plastik limiti tahmin etmek için kullanılabilirler açısından çok faydalı bulunmuştur. Likit ve plastik limitlerin tahmininde tek bir VST deneyi ile ortaya çıkabilecek hatayı önlemek için, PL ve LL arasındaki farklı su içeriklerinde yapılan en az birkaç kanatlı kesme deneyi sonuçlarını kullanmak daha iyi olacaktır. Bu yolla a ve b katsayıları da elde edilebilir.

Her bir zemin numunesi için Çizelge 1'de sunulan a ve b katsayıları da Atterberg limitleri verileriyle birlikte çoklu regresyon analizlerine tabi tutulmuştur. Yüz adet a ve b katsayısı ve likit limit setinin çoklu regresyon analizinden elde edilen birçok denklem arasında aşağıdaki kısa denklem seçilmiştir:

$$LL = 3,62 (a^{0,106}) b^{-0,92} \quad (R^2 = 0,92) \quad (6)$$

Benzer şekilde, plastisite limit de a ve b katsayıları cinsinden tanımlanabilir:

$$PL = 1,72 (a^{0,129}) b^{-0,91} \quad (R^2 = 0,92) \quad (7)$$

Denklemler 6 ve 7'ye göre deneysel yolla bulunan ve tahmin edilen likit limitler arasındaki toplam mutlak yüzde hata % 6,3 ve benzer şekilde deneysel yolla bulunan plastik limitler ile tahmin edilen plastik

limitler arasındaki toplam mutlak yüzde hata ise %3,9'dur. Bu sonuç da Atterberg limitlerinin su içeriği ve drenajsız kesme dayanımını kullanan Denklemler 4 ve 5 tarafından tahmin edilenlerden biraz daha yüksek bir doğruluk derecesiyle tahmin edildiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Yapılan araştırmada sınır durumu su içerikleri olan LL ve PL'nin tek bir düzencele tayin edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen bulgular, sadece kanatlı kesme deneyiyle LL ve PL'nin drenajsız kesme dayanımı ve su içeriği kullanılarak korelasyonlar yoluyla ve güvenilirlikten de taviz vermeden belirlenebileceğini göstermektedir. Elde edilen bulguların uygulamada daha kapsamlı bir şekilde kullanılabilmesi için, çalışmada plastisitesi geniş bir aralığa yayılan 100 çeşit zemin kullanılmıştır. Drenajsız dayanım ile su içeriği ilişkisinden elde edilen iki deneysel katsayı olan a ve b 'nin çoklu regresyona tabi tutularak LL ve PL ile ilişkilendirme girişimleri sonucunda LL ile PL'nin hesaplama yoluyla bulunabileceğini gösteren iki ampirik denklem daha elde edilmiştir. LL ve PL arasında herhangi bir su içeriğinde yapılan sadece bir kanatlı kesme deneyinden elde edilen drenajsız kesme dayanımı bile (sırayla Denklem 4 ve 5 aracılığıyla) LL ve PL'yi tahmin etmek için yeterli olabilmektedir. Ancak, LL ve PL'yi daha güvenilir şekilde hesaplamak için PL ve LL arasındaki farklı su içeriklerinde en az birkaç kanatlı kesme deneyi yapılması ve a ve b katsayılarının elde edilmesi tavsiye edilir. Bu katsayılar da Denklem 6 ve 7'deki korelasyon kullanılarak sırasıyla LL ve PL'yi tahmin etmede kullanılabilir. Geliştirilen korelasyonlar, zemin laboratuvarlarında üretilen kapsamlı kıyım limiti verilerinin değerlendirilmesi sırasında deneysel LL ve PL değerlerinin doğruluğunu hızlı bir şekilde kontrol etmede de yardımcı olabilecektir.

Değerlenen Belgeler

Al-Dahlaki, H., Al-Sharify, G. A. 2008. A proposed approach for plastic limit determination using the drop-cone penetrometer device. *Journal of Engineering and Development* 12(1), 107–117.

Ameratunga, J., Sivakugan, N., Das, B. M. 2016. Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering. Springer India, 228 p.

American Society of Testing Materials, 2000. Standard test method for laboratory vane shear test for saturated fine-grained soils. ASTM D4648-00, West Conshocken, PA, USA.

American Society for Testing Materials, 2005. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM D4318-05, West Conshohocken, PA.

Atterberg, A. 1911. Lerornas forhallande till vatten, deras plas ticitetsgranser och plasticitetsgrader. *Kungliga Lantbruk sakademiens Handlingar och Tidskrift* 50(2), 132–158 (in Swedish).

Azzouz, A. S., Krizek, R. J., Corotis, R. B. 1976. Regression analysis of soil compressibility. *Soils and Foundations* 16(2), 19-29.

Belviso, R., Ciampoli, S., Cotecchia, V., Federico, A. 1985. Use of the cone penetrometer to determine consistency limits. *Ground Engineering* 18(5), 21–22.

British Standards Institution, 1990. British standard methods of test for soils for engineering purposes, BS 1377. Milton Keynes, British Standards Institution.

Campbell, D. J. 1976. Plastic limit determination using a drop cone penetrometer. *Soil Science* 27(3), 295–300.

Campbell, D. J. 1983. Discussion. *Geotechnique* 33(1), 78–79.

Campbell, D. J., Stafford, J. V., Blackwell, P. S. 1980. The plastic limit as determined by the drop cone test in relation to the mechanical behavior of soil. *European Journal of Soil Science* 31, 11-24.

DATAFIT, 2008. Datafit Version 9.0.59, Oakdale Engineering, RC 101, 23 Toney Road, Oakdale, PA, 15071 USA.

Feng, T. W. 2000. Fall-cone penetration and water content relationships of clays. *Geotechnique* 50(2), 181-187.

Feng, T. W. 2001. A linear log d -log w model for the determination of consistency limits of soils. *Canadian Geotechnical Journal* 38(6), 1335-1342.

Feng, T. W. 2004a. Using a small ring and a fall-cone to determine the plastic limit. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(6), 630-635.

Feng, T. W. 2004b. Determining the consistency limits of high plasticity clays by the BS fall cone method. *Ground Engineering* 37(4), 56-57.

Haigh, S. K. 2012. Mechanics of the Casagrande liquid limit test. *Canadian Geotechnical Journal* 49, 1015-1023.

- Harison, J. A. 1988. Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils. *Geotechnique* 38(3), 433–438.
- Kayabalı, K., Tüfenkçi, O. O. 2010a. Shear strength of remolded soils at consistency limits. *Canadian Geotechnical Journal* 47(3), 259-266.
- Kayabalı, K., Tüfenkçi, O. O. 2010b. Determination of plastic and liquid limits using the reverse extrusion technique. *Geotechnical Testing Journal* 33(1), 14-22.
- Kayabalı, K., Aktürk, O., Fener, M., Özkeser, A., Üstün, A. B., Dikmen, O., Harputlugil, F. H., Asadi, R. 2016. Determination of Atterberg limits using newly devised mud press machine. *Journal of African Earth Sciences* 116, 127-133.
- Kyambadde, B. S. 2010. Determination of strength and index properties of fine-grained soils using a soil minipenetrometer. PhD Thesis, University of Brighton 292 p.
- Lee, L. T., Freeman, R. B. 2007. An alternative test method for assessing consistency limits. *Geotechnical Testing Journal* 30(4), 1–8.
- Lee, L. T., Freeman, R. B. 2009. Dual-weight fall cone method for simultaneous liquid limit determination. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(1), 158–161.
- Leonards, G. A. 1976. Estimating consolidation settlements of shallow foundations on overconsolidated clays. Special Report 163, Transportation Research Board, 13-16.
- Nagaraj, T. S., Srinivasa Murthy, B. R. 1986. A critical reappraisal of compression index. *Geotechnique* 36(1), 27-32.
- Rao, H. Y. 1987. Determination of Atterberg limits by cone penetrometer. *International Proceeding of 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 1, 81–84.
- Rashid, A. S. A., Kassim, K. A., Katimon, A., Noor, N. M. 2008. Determination of plastic limit of soil using modified methods. *Malaysian Journal of Civil Engineering* 20(2), 295–305.
- Sharma, B., Bora, P. K. 2003. Plastic limit, liquid limit and undrained shear strength of soil - reappraisal. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129(8), 774-777.
- Sherwood, P. T., Ryley, M. D. 1970. An investigation of a cone penetrometer method for the determination of the liquid limit: *Geotechnique* 20(2), 203-208.
- Shimobe, S. 2010. Determination of index properties and undrained shear strength of soils using the fall cone test. *Proceedings of the 7th International Symposium on Lowland Technology*, September 16-18, Saga, Japan, 51-59.
- Sivakumar, V., Glynn, D., Cairns, P., Black, J. A. 2009. A new method of measuring plastic limit of fine materials. *Geotechnique* 59(10), 813–823.
- Sivakumar, V., O’Kelly, B. C., Henderson, L., Moorhead, C., Chow, S. H. 2014. Measuring the plastic limit of fine soils. An experimental study. *Proceedings of Institution of Civil Engineers* 168(GE1), 53-64.
- Skempton, A. W. 1954. Discussion – sensitivity of clays and the c/p ratio in normally consolidated clays. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Separate 478, 19-22.
- Stroud, M. A. 1974. The Standard Penetration Test in sensitive clays and soft rocks. *International Proceeding of European Seminar on Penetration Testing*, Stockholm 2(2), 366-375.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. 1967. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons 2nd Ed., 729 p.
- Timar, A. 1974. Testing the plastic properties of cohesive and intermediate-type soils by extrusion. *Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae* 76(3-4), 355-370.
- Towner, G. D. 1973. An examination of the fall cone method for the determination of some strength properties of remoulded agricultural soils. *Journal of Soil Science* 24(4), 470–479.
- Whyte, I. L. 1982. Soil plasticity and strength - a new approach using extrusion. *Ground Engineering* 15(1), 16–24.
- Wood, D. M., Wroth, C. P. 1978. The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils. *Ground Engineering* 11(3), 37.
- Wroth, C. P., Wood, D. M. 1978. The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal* 15(2), 137-145.