

Yoğrulmuş Killerde Dayanım ve Deformasyon Parametrelerinin Düşen Koni ve Veyn Deneyleri ile Belirlenmesi

Murat GÜLEN¹
Havvanur KILIÇ²

ÖZ

Yoğrulmuş ve örselenmemiş killi zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti pratik olarak veyn deneyi ile belirlenebilmektedir. Diğer bir pratik deney olan düşen koni deneyi ile de yoğrulmuş kohezyonlu zeminlerin drenajsız kayma mukavemetine geçiş yapılabilmektedir. Ancak bu geçiş sırasında bir düşen koni faktörüne (K) ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel verilerle kalibre edilen koni faktörü, farklı su muhtevaları için hesaplanan drenajsız kayma mukavemetleri ve kritik durumdaki boşluk oranları kullanılarak drenajlı kayma mukavemeti açısına geçiş yapılmaktadır. Bu çalışmada, yoğrularak hazırlanan farklı endeks özelliklere sahip kohezyonlu zemin örnekleri üzerinde, literatürde önerilen yöntemlerden faydalanılarak sıkışabilirlik ve mukavemet parametreleri pratik olarak belirlenmiştir. Aynı zeminler için ödometre ve üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen sıkışabilirlik ve mukavemet parametreleri ile karşılaştırılarak uygulanan yöntemin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yoğrulmuş kil, kritik durum parametreleri, düşen koni deneyi.

ABSTRACT

Determination of Strength and Deformation Parameters of Remolded Clays by Falling Cone and Veyn Tests

In practice, the shear vane test is used to predict the undrained shear strength of remolded and undisturbed clay soils. The undrained shear strength could also be estimated for remolded soils by the fall cone test. However, the determination of undrained shear strength by this test requires a very significant factor which is referred to as fall cone factor. The drained internal friction angle could be obtained by using the fall cone factor, calibrated in accordance with experimental results and the values of undrained shear strength calculated for different water

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 15 Kasım 2018 günü ulaşmıştır. 16 Eylül 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.483348>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - mgulen@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-4143-9266>

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - kilic@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9455-1687>

contents and void ratios at critical state. In this study, compressibility and strength parameters were determined practically on remolded samples of cohesive soils with different index properties by using the methods proposed in the literature. In addition, the applicability of the method used was evaluated for the same soil by comparing the compressibility and strength parameters obtained from oedometer and triaxial compression tests.

Keywords: Remolded clay, critical state parameters, fall cone test.

1.GİRİŞ

İskandinav ülkelerinde yoğrulmuş killi zeminlerin likit limit (w_L) değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen düşen koni aleti, günümüzde birçok ülke tarafından standartları oluşturularak zeminlerin kıvam özellikleri, yoğrulmuş zeminlerin likit limitteki drenajsız kayma mukavemeti (S_{uL}) ve kritik durum parametrelerini (M , λ) belirlemek için kullanılmaktadır [1]. Bu çalışmada düşen koni ve veyn deney aletleri kullanılarak likit limit (w_L) ve plastik limit (w_p), normal konsolidasyon çizgisi eğimi (λ), drenajsız kayma mukavemeti (S_u), efektif içsel sürtünme açısı ve kritik durum çizgisi eğimi (M)'nin daha kısa sürede belirlenebilmesi için veyn ve düşen koni deney aletleri kullanılarak iki seri deneysel çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda literatürde mevcut olan Hansbo (1956), Schofield ve Wroth (1968), Koumoto ve Houlsby (2001) ile Farias ve Liona Serna (2016) tarafından yapılan çalışmalardan faydalanılarak 30⁰ ve 80 gram özelliklerine sahip düşen koni ve laboratuvar veyn deney aletleri kullanılarak sıkışabilirlik ve mukavemet parametreleri pratik olarak belirlenmiştir. Aynı parametreler ödometre ve konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli basınç deneylerinden belirlenerek karşılaştırılmış ve killi zeminler için uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

1.1. Düşen Koni ile Yapılan Çalışmalar

Düşen koni deney aletinden belirlenen likit limit (w_L) değerinin, deneyi yapan kişiden bağımsız olmasından dolayı Casagrande yöntemine göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Koumoto ve Houlsby (2001) tarafından çeşitli zeminler üzerinde yapılan düşen koni ve Casagrande deney sonuçları arasındaki farkın $w_L < 100$ olan zeminlerde az; $w_L > 100$ olan zeminlerde %13'e varan farklılıklar olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalarda 60⁰-60 gram özelliklerine sahip koni kullanılmış ve koninin w_L değeri için batma miktarı 11.5 mm, plastik limitteki (w_p) batma miktarı 1.15 mm olarak dikkate alınmıştır [2].

İsveç, Norveç, Kanada vb. ülkelerde yaygın olarak kullanılan, 60⁰-60 gram özelliklerine sahip düşen koniler için w_L değeri için batma miktarı (h_L) 10 mm genel kabul görünken; İngiliz konisi olarak bilinen Fransa, İngiltere vb. ülkelerde yaygın olarak kullanılan 30⁰ ve 80 gram özelliklerine sahip düşen koniler için $h_L=20$ mm kabul görmektedir. 60⁰ ve 60 gram koniler için zemin özellikleri $w_L < 90$ olduğu durumlarda h_L değerinin 10-12 mm aralığında değiştiği yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [3].

Düşen koni ile zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti belirlenmesine yönelik ilk çalışmalar Hansbo (1956) tarafından yapılmıştır. Çalışma kapsamında Hansbo düşen koni faktörü (K) tanımlanmış ve koni batması ile drenajsız kayma mukavemeti (S_u) arasındaki ilişki (1) eşitliği ile ifade edilmiştir [4].

$$S_u = \frac{K \cdot Q}{h^2} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de; S_u drenajsız kayma mukavemeti (kN/m^2), K Hansbo koni faktörü, Q koninin ağırlığı (gr), h koni batma miktarıdır (mm). Farklı araştırmacılar tarafından farklı özelliklere sahip konilerle yapılan çalışmalarda likit limitteki drenajsız kayma mukavemeti (S_{uL}) için elde edilen değerler Tablo 1'de belirtilmiştir [1, 5, 6, 7, 8].

Tablo 1 - Farklı araştırmalar tarafından önerilen S_{uL} değerleri

	Farias ve Liona Serna (2016)	Wood ve Wroth (1978)	Casagrande (1958)	Karlsson (1961)	Whyte (1982)
S_{uL} (kPa)	1	1.7	2-3	1.5-2.1	1.6

Düşen koninin çalışma mekanizması ve düşen koniden S_{uL} değerinin elde edilmesi ile ilgili başka çalışmalar da mevcuttur [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Deneysel olarak yapılan bu çalışmalarda Hansbo koni faktörü K 'nin koninin özelliklerine bağlı olduğu ifade edilse de; Koumoto ve Houlsby (2001) koni faktörü değerinin koninin yüzey pürüzlülüğüne, geometrisine, penetrasyon boyunca kile batan koninin deformasyon oranına, zeminin birim hacim ağırlığına ve numunede meydana gelen kabarma miktarına bağlı olduğu ifade edilmektedirler [2].

Skempton (1953) plastik limit su muhtevsındaki dayanımın (S_{up}), likit limit su muhtevsındaki dayanımın (S_{uL}) 100 katı olduğunu belirtmektedir [17]. Bu temel prensip, (1) eşitliğinde kullanılırsa; $S_{up}/S_{uL} = h_L^2/h_p^2 = 100$ ve $h_L/h_p=10$ olarak elde edilir. Ancak Koumoto ve Houlsby (2001) düşen koninin plastik limit değerinin belirlenmesi için kullanılması durumunda, $h_L=11.5$ mm alınmasını önermekte ve dolayısıyla $h_p=1.15$ mm olmaktadır [2]. Wood (1978) zeminlerin plastik limit (w_p) ve likit limit değerlerinin tek bir deney aleti ile belirlenmesi durumunda bu iki deneyin çok daha kolay, kullanışlı ve daha anlamlı olacağını belirtilerek, batma miktarına bağlı olarak geliştirilen amprik denklemler ile plastik limit değerinin hesaplanabileceğini göstermiştir [5]. Koumoto ve Houlsby (2001)'de ise düşen koni ile plastik limit değerini belirlemek yerine, çalışma mekanizması düşen koniye benzeyen farklı koni açısına ve ağırlığa sahip yeni bir deney aletinin geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir [2].

Koumoto ve Houlsby (2001) farklı su muhtevalarına sahip yoğrulmuş kil zeminler üzerinde yaptıkları veyn deneylerinden S_u değeri ile su muhtevası (w) arasında ters bir ilişki olduğu ve bu ilişkinin denkleminin a ve b katsayılarına bağlı olarak (2) eşitliği ile ifade edilebileceğini belirtmişlerdir [2].

$$w = a * \left(\frac{S_u}{P_a} \right)^{-b} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de "a" katsayısı zeminlerin dayanım ve su emme kapasiteleri ile ilişkili, "b" ise zeminlerin sıkışma katsayısını ve P_a atmosferik basıncı ifade etmektedir. Birçok çalışmada (2) eşitliğinde ifade edilen lineer ilişkinin likit limitten yüksek muhtevası ile plastik limite

yakın su muhtevası aralığı için geçerli olduğu belirtilmiştir [1, 2, 18]. Eşitlik (2)'de S_u değeri yerine eşitlik (1) yazılırsa eşitlik (3) elde edilmektedir [2].

$$w = a * \left(\frac{KQ}{P_{ah}^2} \right)^{-b} \quad (3)$$

1.2. Kritik Duruma Genel Bakış

Zemin mekaniği kapsamında, kritik durum çizgisinin denklemi (4) eşitliği ile ifade edilmektedir [19].

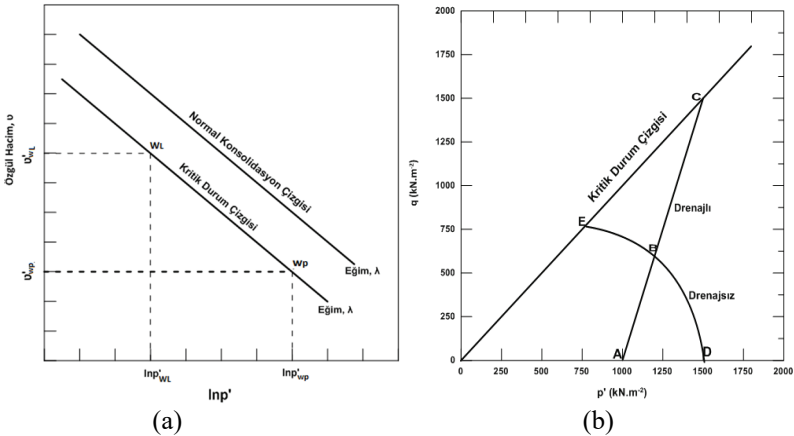
$$e = e_a - \lambda * \ln\left(\frac{p'}{P_a}\right) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te λ sıkışma katsayısı; e boşluk oranı; p' ortalama normal efektif gerilmeyi ve e_a ise $p'=P_a$ olduğu durumda boşluk oranını ifade etmektedir. Yapılan çalışmalarda yoğrulmuş zeminlerde doğrusal bir ilişki elde edebilmek için (4) eşitliği yerine, denklemin çift taraflı logaritması alınarak (5) eşitliği formunda kullanılması önerilmiştir [1, 2, 20].

$$e = e_a * \ln\left(\frac{p'}{P_a}\right)^{-\lambda} \quad (5)$$

(5) eşitliği için $e.S = w.G_s$ ilişkisi suya doymun zeminler için ($S=1$) kullanılırsa (6) eşitliği elde edilmektedir. S suya doymunluk derecesini, G_s zemin danelerinin özgül ağırlığını ifade etmektedir.

$$w(\%) = 100 \frac{e_a}{G_s} \ln\left(\frac{p'}{P_a}\right)^{-\lambda} \quad (6)$$



Şekil 1 - Kritik durumda a) $v:p'$ ilişkisi b) $q:p'$ ilişkisi

Normal konsolide bir zemin numunesi için drenajlı ve drenajsız yükleme durumlarında göçmenin kritik durum çizgisi üzerinde (KDC) gerçekleştiği bilinmektedir. Şekil 1'de özgül hacim (v) ile deviator gerilmenin (q) ortalama normal efektif gerilmeye (p') göre değişimi ve KDC'nin konumu gösterilmiştir.

Şekil 1a'da KDC'nin denklemi eşitlik (7)'de verilmiştir [19].

$$v = \Gamma - \lambda * \ln p' \quad (7)$$

Eşitlik (7)'de, $v=1+e$ değerine eşit olup, birim dane kütleinin kapladığı hacmi; $\Gamma = \text{KDC}$ için $p'=1$ olduğu durumda özgül hacim değerini ifade etmektedir. Eşitlik (7), v_{wp} ve v_{wL} değerleri için yazılıp denklemler taraf tarafa çıkarılır. Elde edilecek $v_{wL}-v_{wp}=\lambda \cdot \ln(p'_{wp}/p'_{wL})$ eşitliğinde $p'_{wp}/p'_{wL}=100=S_{up}/S_{uL}$ değeri yerine yazılırsa; $v_{wL}-v_{wp}=\lambda \cdot \ln(100)$ elde edilir. $v_{wL}-v_{wp}=\lambda \cdot \ln(100)$ ifadesinde v yerine $(1+e)$, suya doymun numuneler için e yerine $w \cdot G_s$ yazıldığında; $G_s \cdot (w_L - w_p) = \lambda \cdot \ln(100)$ eşitliği elde edilir. Bu ifade de $w_L - w_p = I_p$ (%) olacak şekilde ve $\ln(100)=4.61$ için düzenlenirse eşitlik (8) elde edilir [21].

$$\lambda = \frac{I_p}{461} \cdot G_s \quad (8)$$

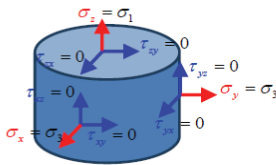
$q:p'$ düzleminde normal konsolide bir kilin drenajlı ve drenajsız yüklenmesi durumunda elde edilen göçme noktalarının ortak bir düzlem üzerinde yer aldığı ve bu düzlemin kritik durum çizgisi olarak ifade edildiği bilinmektedir. Kritik durumda zemin numunesinin boşluk oranında değişim meydana gelmemekte ve sabit hacimde deformasyonlar oluşmaktadır [21].

Şekil 1b'de drenajlı ve drenajsız koşullarda eksenel yükleme sonucunda $q-p'$ arasındaki ilişki (9) eşitliğinde verilmiştir [19].

$$q_f = M * p_f' \quad (9)$$

Bu eşitlikte q_f göçme anındaki deviator gerilme, p_f' ortalama normal efektif gerilme ve M ise KDC'nin eğimini göstermektedir. Bir zemin numunesine etki eden gerilme koşulları dikkate alındığında meydana gelecek gerilme durumları Şekil 2'de gösterilmiştir.

Üç eksenli deneyler için gerilme koşulları

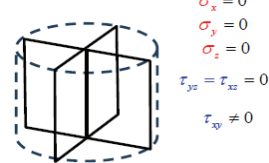


$$q = 2(\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$q_f = 2s_u, \quad \alpha = 2$$

(a)

Veyn deneyi için gerilme koşulları



$$q = \sqrt{3}\tau_{xy}$$

$$q_f = \sqrt{3}s_u, \quad \alpha = \sqrt{3}$$

(b)

Şekil 2 - Farklı mukavemet deneylerinde oluşan gerilme durumları
a) üç eksenli deneyler, b) veyn kesme deneyi [14].

Şekil 2’de, α katsayısı gerilme koşullarına bağlı olarak S_u ve q arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Tüm gerilme koşulları dikkate alındığında geçme anında elde edilecek q değeri (10) eşitliğinde verilmiştir [1].

$$q_f = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6 * (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (10)$$

Eşitlikte; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z = x, y$ ve z normal gerilmelerini ifade ederken; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ ise x, y ve z kayma gerilmelerini göstermektedir. Mini veyn kesme deneyi boyunca gerilmelerin durumu $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0, \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \tau_{xy} \neq 0$ olmaktadır. (10) eşitliğinde gerilme koşulları dikkate alınarak elde edilen deviyör gerilme değeri için genel bir ifade (11) eşitliğinde verilmiştir [1, 2].

$$q_f = a * \tau_{xy} = a * S_u \quad (11)$$

Eşitlik (9)’ da q_f yerine eşitlik (11) yazılıp p_f' yalnız bırakılırsa ve p_f' değeri eşitlik (6)’da yerine yazılırsa eşitlik (12) elde edilir.

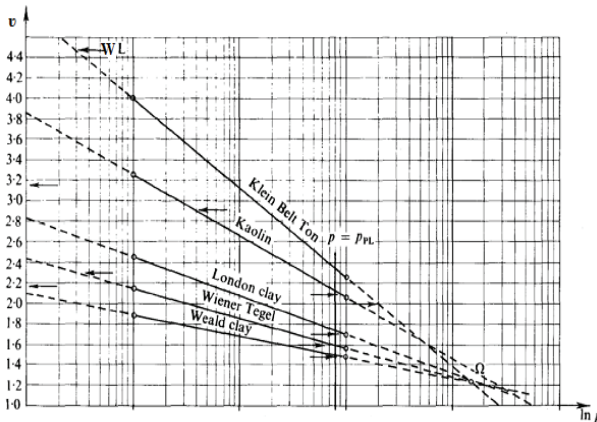
$$w = 100 * \left(\frac{e_a}{G_s}\right) * \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-\lambda} * \left(\frac{\alpha}{M}\right)^{-\lambda} \quad (12)$$

Eşitlik (12) ve eşitlik (2)’deki w eşitliği kullanılırsa (13) ve (14) eşitlikleri elde edilebilir.

$$a = 100 * \left(\frac{e_a}{G_s}\right) * \left(\frac{\alpha}{M}\right)^{-\lambda} \quad (13)$$

$$b = \lambda \quad (14)$$

Eşitlik (14)’te $b=\lambda$ eşitliğini elde etmek için yapılan açıklamalar [1] ile [2] tarafından ifade edilen çalışmalarla “a” parametresi hariç aynıdır.



Şekil 3 - Farklı zeminlerin KDC'nin tek bir referans noktasına göre konumları [22]

Schofield ve Wroth (1968) farklı özelliklere sahip zemin numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda, KDÇ'nin geometrik olarak uzantısının tek bir referans noktasından (Ω) geçtiğini saptamışlardır. Bu referans noktasında özgül hacim değerini $v_{\Omega}=1.25$ ($e_{\Omega}=0.25$) ve ortalama normal efektif gerilme değerini $p'_{\Omega}=10340$ kPa olarak Şekil 3'te belirlemişlerdir [22].

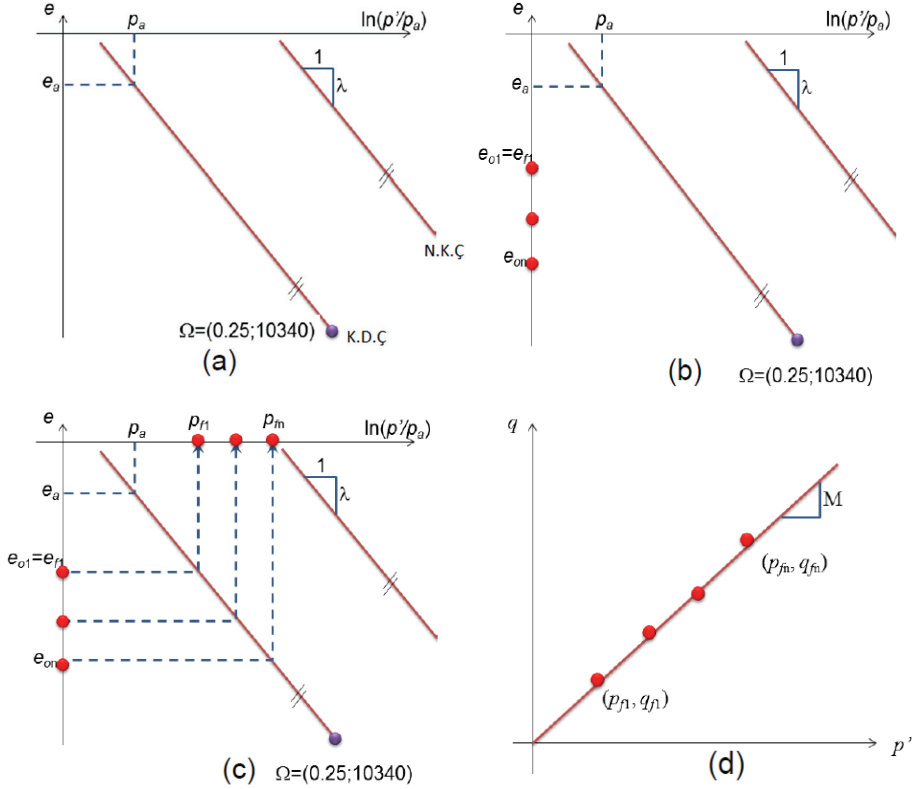
1.3. Düşen Koni İle Kritik Durum Parametrelerinin Elde Edilmesi

Bu çalışmada Hansbo (1956), Wroth ve Schofield (1968), Koumoto ve Houlsby (2001) ile Farias ve Liona Serna (2016) tarafından yapılan çalışmalardan yararlanarak aşağıdaki işlem adımları ile kritik durum parametreleri elde edilmiştir.

- Bu çalışma kapsamında kullanılacak zemin örneklerinin likit ve plastik limit değerleri, dane çapı dağılımı ve özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir.
- Belirlenen kıvam özelliklerine göre likit limitten daha büyük ve plastik limite yakın su muhtevası aralığında yoğrulmuş zemin numuneleri hazırlanarak nem odasında su muhtevasını koruyacak şekilde dinlenmeye bırakılır. Belirli aralıklarla karıştırılarak homojen hale gelmesi sağlanır.
- Yoğrularak hazırlanan zemin numuneleri üzerinde veyn deneyi yapılarak her bir w için S_u değeri belirlenir. Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilen ve eşitlik (6)'da ifade edilen ilişki belirlenerek eşitlik (14)'de gösterilen $b=\lambda$ sıkışma katsayısı elde edilir.
- Yoğrularak hazırlanan zemin numuneleri üzerinde düşen koni deneyi yapılarak batma miktarları (h) ve bu batma miktarlarına karşılık gelen su muhtevaları belirlenir. Veyn deneyinden elde edilen S_u ve düşen koniden bulunan h değerleri kullanılarak Şekil 8'de gösterilen ilişki elde edilir. Eşitlik (2)'deki K değeri deneysel verilere göre belirlenir. Bulunan K değerine göre eşitlik (2) kullanılarak her bir su muhtevası için drenajsız kayma mukavemeti (S_u^*) yeniden hesaplanır.
- Hacmi bilinen numune kaplarına, yoğrulmuş zemin numunesi spatula kullanılarak sıvama yöntemi ile boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilir ve her bir su muhtevası için boşluk oranları belirlenir.
- Her bir su muhtevası değeri için hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti (S_u^*) kullanılarak eşitlik (11)'den veyn deneyi gerilme koşulları için q_f değeri hesaplanır.
- Veyn deneyinden elde edilen λ değeri (normal konsolidasyon çizgisinin eğimi), Şekil 3'te belirtilen referans noktaları ve her bir su muhtevası için belirlenen boşluk oranları kullanılarak göçme anındaki p_f' değerleri Şekil 4'teki adımlar takip edilerek elde edilir.
- Her bir su muhtevası değeri için hesaplanan boşluk oranı kullanılarak Şekil 4 (c) işlem adımında p_f' elde edilir. S_u^* değerlerine göre hesaplanan q_f ile Şekil 4 (d) işlem adımında kritik durum çizgisinin eğim değeri (M) ve (16) eşitliği kullanılarak drenajlı kayma mukavemeti açısı (ϕ') hesaplanır.

Uygulanan yöntem kapsamında düşen koni ve mini veyn deney aletleri kullanılarak w_L , w_P , M , ϕ' , S_u ve λ parametreleri belirlenmiştir. Bu değerlerin doğruluğunu kontrol etmek için aynı

parametreler zemin mekaniğinde yaygın kullanılan Casagrande likit limit, elle yuvarlama plastik limit, üç eksenli basınç (CU), veyn kesme ve ödometre deneylerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4 - Kritik durum parametreleri için işlem adımları [14]

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmalarda BS 1377-2 standartlarıyla uyumlu 30⁰ ve 80 gram koni özelliklerine sahip yarı otomatik düşen koni deney aleti, ASTM D4648M-10 standartlarıyla uyumlu ve kesme hızı ayarı yapılabilen veyn aleti kullanılmıştır. Atterberg limitleri ASTM D4318-00, ödometre sıkışma deneyleri ASTM D2435/D2535M-11 ve üç eksenli basınç deneyleri ise ASTM D4767-11'e uygun deney aletleri kullanılarak yapılmıştır.

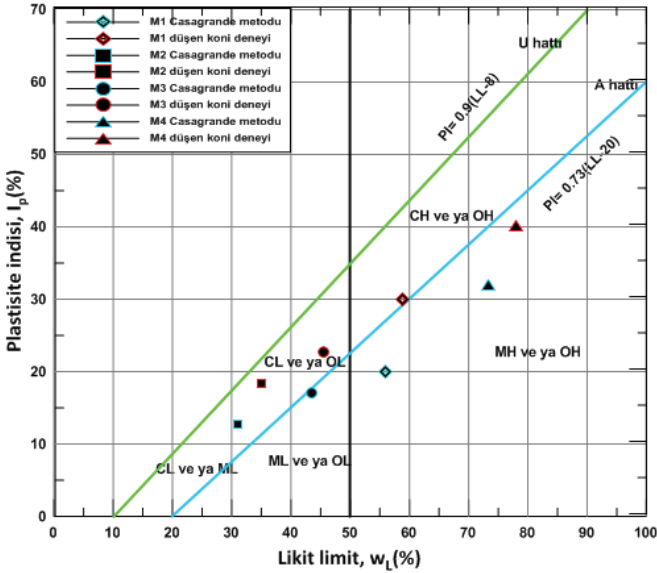
Bu çalışma kapsamında endeks özellikleri farklı dört ince daneli zemin kullanılmıştır. Bu zeminlerin düşen koni ve Casagrande deney aletleriyle bulunan kıvam limitleri Tablo 1'de, dane çapı oranları ve zemin sınıfları ise Tablo 2'de sunulmuştur. Zemin numunelerinin Casagrande Plastisite kartındaki konumları Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 1 - Zeminlerin endeks özellikleri

Numune	Sembol	G_s	Kıvam limitleri					
			Casagrande Yöntemi			Düşen Koni Yöntemi		
			w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)
Kaolin kili	M1	2.627	56.0	36.0	20.0	59.0	29.0	30.0
Havalımanı kili	M2	2.734	31.0	18.2	12.8	35.0	16.5	18.5
Gebze kili	M3	2.637	43.5	26.5	17.0	45.5	22.8	22.7
Çatalca kili	M4	2.725	73.4	41.4	32.0	78.0	37.8	40.2

Tablo 2 - Zeminlerin dane çapı dağılımı ve zemin sınıfı

Numune	Dane çapı oranları			Zemin sınıfı	
	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	Düşen koni yöntemi	Casagrande yöntemi
M1	-	35	65	MH	CH
M2	7.5	62.5	30	CL	CL
M3	-	38	62	ML	CL
M4	9	45	46	MH	MH



Şekil 5 - Çalışmada kullanılan zeminlerin Casagrande Plastisite Kartındaki konumları

Bu çalışma kapsamında yoğrularak hazırlanan zemin numuneleri üzerinde veyn kesme deneyi yapılmış ve Tablo 3'te her bir su muhtevası için belirlenen drenajsız kayma mukavemeti değerleri sunulmuştur.

Tablo 3 - Veyn deneyinden elde edilen kayma mukavemetleri

M1		M2		M3		M4	
w (%)	S _u (kPa)	w (%)	S _u (kPa)	w (%)	S _u (kPa)	w (%)	S _u (kPa)
61.65	1.48	34	1.69	46.10	2.08	78.23	1.91
55.77	2.95	33.10	2.01	44	2.61	73.31	2.75
53.25	3.52	31	3.42	41.15	4.09	66.46	5.22
49.06	5.68	29.20	4.87	37.10	6.93	63.53	6.58
45.47	8.51	27.83	6.46	33.73	11.24	57.63	10.80
42.99	11.46	24.50	11.44	30.75	19.08	52.88	15.57
40.16	19.30	23.20	17.15	29	28.44	48.84	20.22

Tablo 3'teki veriler kullanılarak eşitlik (2)'de ifade edilen $w - S_u$ arasındaki ilişki M1, M2, M3 ve M4 için Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen doğruların denklemlerinden a ve b katsayıları belirlenmiştir.

Şekil 6'da M1, M2, M3 ve M4 zeminleri için w ile S_u arasındaki ilişki için elde edilen eşitlikler sırası ile 15a, 15b, 15c ve 15d'de sunulmuştur.

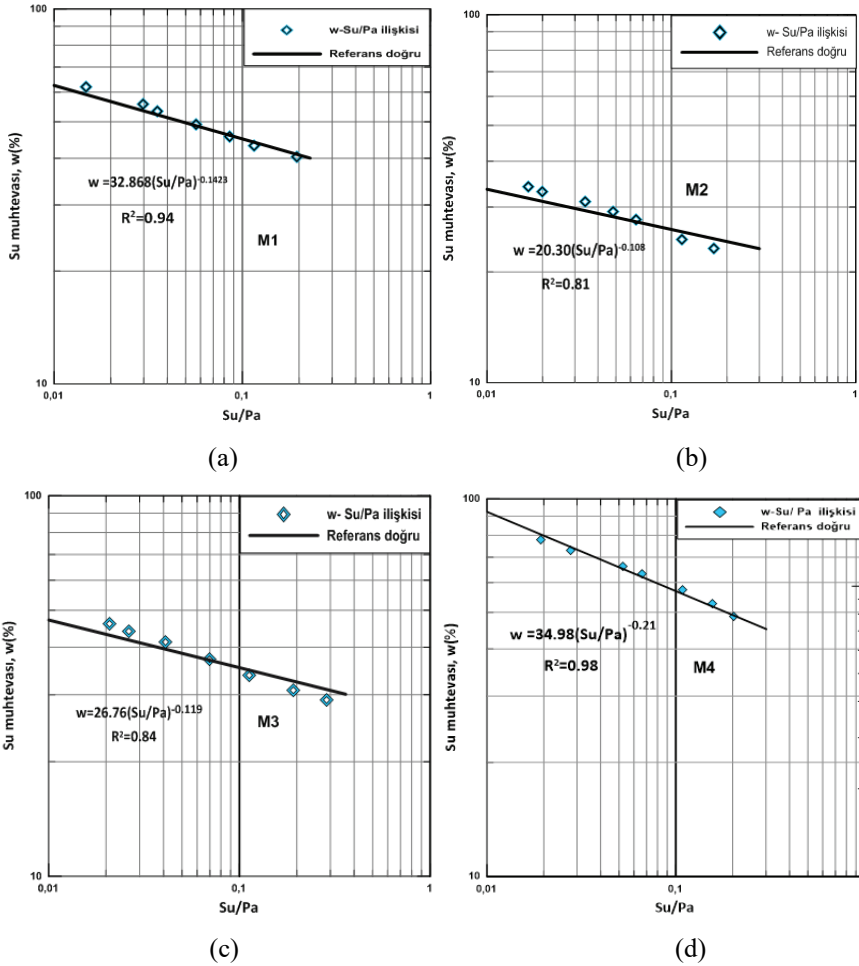
$$w_{M1} = 32.868 * \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.1423} \quad (15a)$$

$$w_{M2} = 20.30 * \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.108} \quad (15b)$$

$$w_{M3} = 26.76 * \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.119} \quad (15c)$$

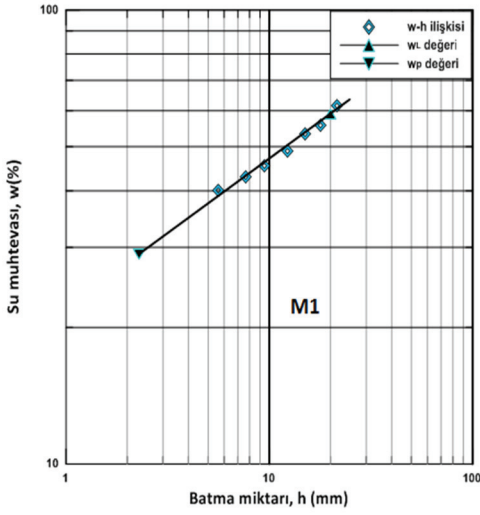
$$w_{M4} = 34.98 * \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.21} \quad (15d)$$

Tablo 3'te belirtilen her bir zemin için yedi farklı w değerinde hazırlanan yoğrulmuş numuneler üzerinde düşen koni deneyleri yapılmıştır. Deneylerde her bir w değerinde ölçülen koni batma miktarı (h) belirlenmiş ve elde edilen h ile w arasındaki ilişki Şekil 7'de gösterilmiştir. Su muhtevası ve batma miktarının çift taraflı logaritmik ekseninde gösterilmesi ile w_L ve w_P değerleri belirlenmiştir.

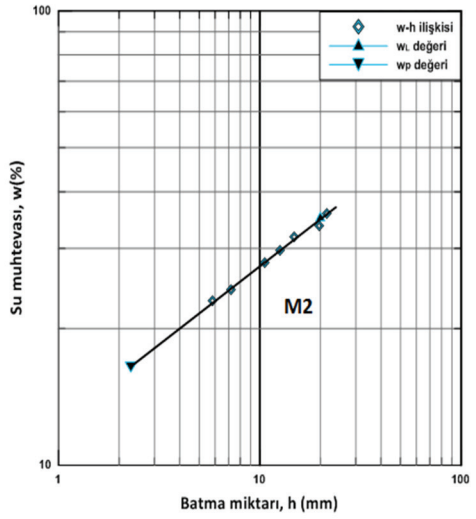


Şekil 6 - Su muhtevası ve drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi a)M1, b) M2, c)M3, d)M4

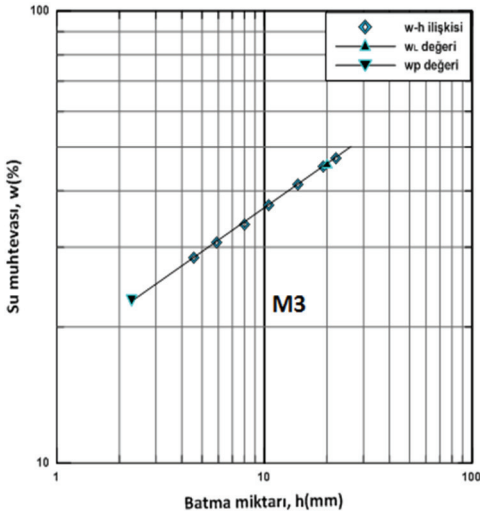
Şekil 7’de gösterilen w_L değerleri 30^0 ve 80 gram koni için 20 mm batmaya karşılık gelen w değeriyken; w_p değerleri literatürde 60^0 ve 60 gram koni için kabul gören 1.15 mm batma değerinin 30^0 ve 80 gram koniye uyarlanması ile 2.3 mm batmaya karşılık gelen w değerleri olarak dikkate alınmıştır. Yapılan literatür araştırmaları sonucu 30^0 ve 80 gram özelliklerine sahip düşen koniler için plastik limit değerine karşılık gelen ve kabul gören bir batma miktarı değerine rastlanmamıştır. Fakat 60^0 ve 60 gram koniler için plastik limit için genellikle 1.15 mm batma miktarına karşılık gelen su muhtevası değeri dikkate alınmaktadır. Farklı geometri ve ağırlığa sahip bu düşen koni deney aletleri için likit limitteki batma miktarları (10 mm ve 20 mm) arasında 2 kat fark mevcuttur. Bu çalışma kapsamında plastik limit su muhtevasının saptanması için bu 2 kat farkın plastik limit için de geçerli olduğu kabulü yapılarak, 2.3 mm ($1.15 \times 2 = 2.3$) batma için belirlenen su muhtevası değerleri plastik limit olarak kabul edilmiştir.



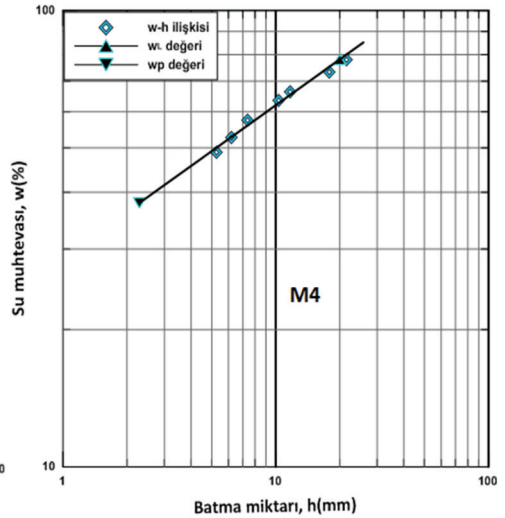
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7 - Düşen koni deneyinden belirlenen $w - h$ ilişkileri a)M1, b)M2, c)M3, d)M4

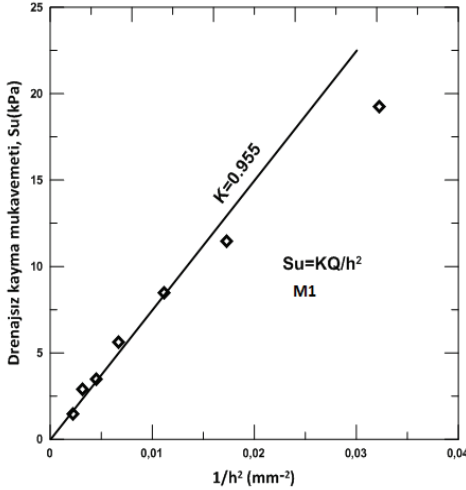
Yoğrulmuş numunelerde dikkate alınan su muhtevası değerleri (Tablo 3) için (1) eşitliği kullanılarak K koni faktörü hesaplanmıştır. Her bir numunede farklı su muhtevaları için hesaplanan bu K değerlerinin ortalaması alınarak bir $K_{(ort)}$ belirlenmiştir (Tablo 4). Deneysel verilerle belirlenen $K_{(ort)}$ ve düşen koniden elde edilen batma miktarları eşitlik (1)'de tekrar yazılarak her bir su muhtevası için drenajsız kayma mukavemeti (S_u^*) hesaplanmıştır (Tablo 4). S_u^* değerleri ile Şekil 2'de ifade edilen gerilme koşulları dikkate alınarak deviator gerilme

değerleri (q_f) belirlenmiştir. Tablo 4'te hesaplanan $K_{(ort)}$ değerlerinin S_u -h ilişkisi için Şekil 8'de gösterilmiştir.

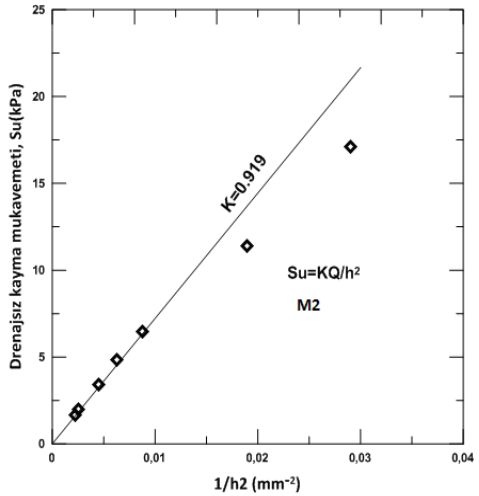
Tablo 4 - Deneysel ölçümlerden K değerinin belirlenmesi

M1		M2		M3		M4	
K	S_u^* (kPa)	K	S_u^* (kPa)	K	S_u^* (kPa)	K	S_u^* (kPa)
0.858	1.65	1.008	1.54	1.312	1.60	1.119	1.52
1.193	2.36	1.017	1.82	1.228	2.15	1.115	2.20
0.993	3.36	0.963	3.27	1.102	3.76	0.901	5.17
1.059	5.06	0.995	4.50	0.962	7.31	0.894	6.57
0.972	8.38	0.938	6.33	0.922	12.36	0.752	12.83
0.843	13.01	0.769	13.68	0.831	23.29	0.759	18.31
0.771	23.05	0.752	20.97	0.759	37.94	0.712	25.37
$K_{ort}=0.955$		$K_{ort}=0.919$		$K_{ort}=1.015$		$K_{ort}=0.893$	

Tablo 4'te görüldüğü gibi her bir zeminde farklı su muhtevası için elde edilen K koni faktörü likit limite yakın su muhtevalarında daha büyük değerler alırken; plastik limite yakın su muhtevalarında daha düşük değerler almaktadır.

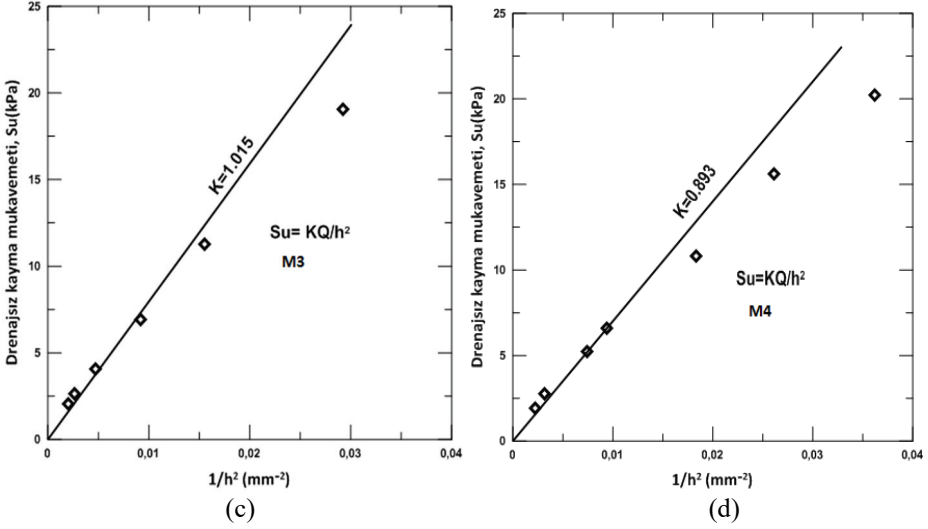


(a)



(b)

Şekil 8 - K koni faktörünün deneysel ölçümlerden elde edilmesi a)M1, b)M2, c)M3, d)M4



Şekil 8 - K koni faktörünün deneysel ölçümlerden elde edilmesi a)M1, b)M2, c)M3, d)M4 (devam)

2.1. Ödometre Sıkışma Deneyleri

Koumoto ve Houlsby (2001) tarafından önerilen $b=\lambda$ eşitliğinin doğruluğunu kontrol etmek için M1, M2, M3 ve M4 numuneleri üzerinde ödometre deneyleri yapılmıştır. Yoğrulmuş zemin numunesi sıvama yöntemi ile konsolidasyon ringine yerleştirilmiştir. Konsolidasyon deneyleri 6 yükleme ve 2 boşaltma kademesi yapılarak 8. günün sonunda sonlandırılmıştır. Deney sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Konsolidasyon deneylerinden belirlenen sıkışma çizgisi referans sıkışma doğrusu olarak ifade edilmiştir. Veyn deneyinden belirlenen sıkışma doğrusu ise kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

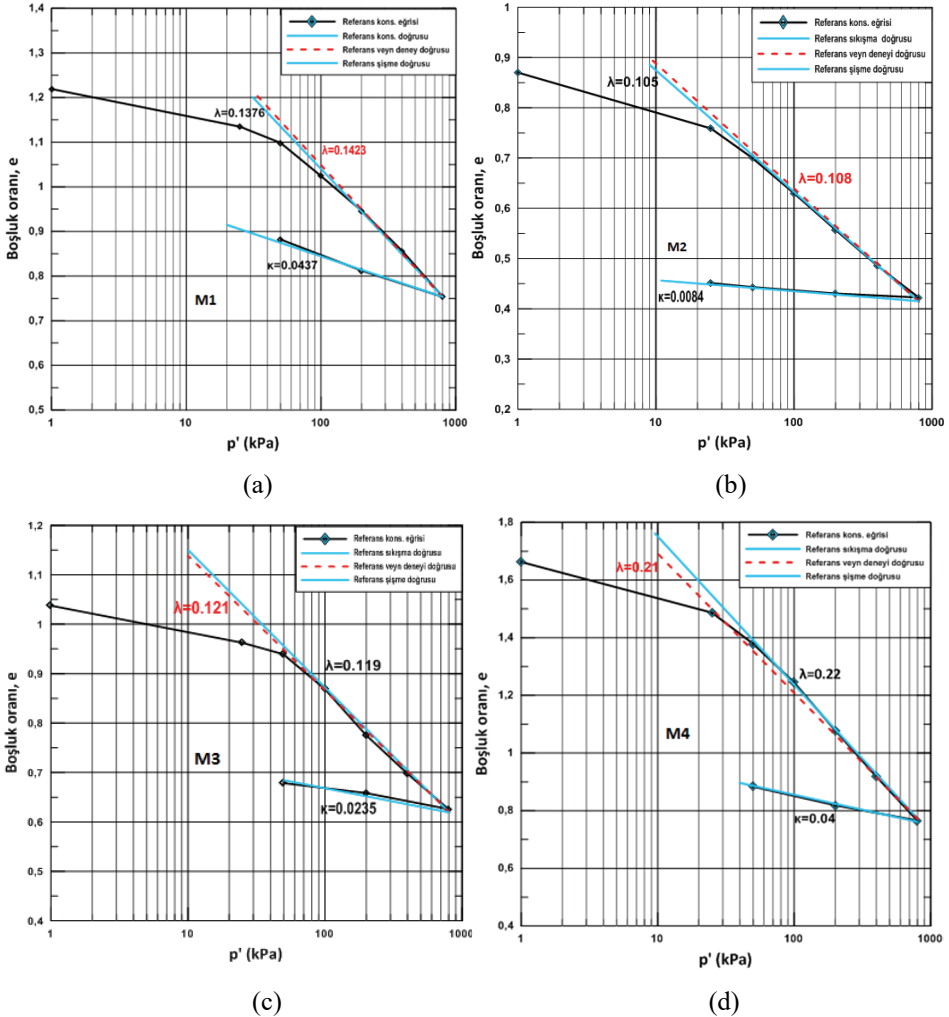
2.2. Konsolidasyonlu-Drenajsız (CU) Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Üç eksenli basınç deneyleri için yoğrulmuş zemin numunesi 30 gram ağırlığında ahşap bir tokmak yardımıyla üç eksenli numune hazırlama tüpü içerisine boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilmiştir. M1 için 100 kPa ve 200 kPa konsolidasyon basınçlarında CU deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon aşamasında suya doygunluk kontrolü yapılarak numunelerin başlangıç suya doygunluk derecelerinin %95'ten daha büyük olduğu görülmüştür. Yüksek konsolidasyon basıncında (500 kPa) deneme amaçlı yapılan deneylerde, konsolidasyon aşamasında yüksek basınç altında numunenin şekil değiştirdiği, benzer davranışın 100 kPa ve 200 kPa konsolidasyon basınçlarında olmadığı görülmüştür. Deneylerin sonuçlarına göre elde edilen gerilme izi eğrileri ($q:p'$) incelendiğinde 100 kPa ve 200 kPa konsolidasyon basınçlarında yapılan deneylerin kendi içinde uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

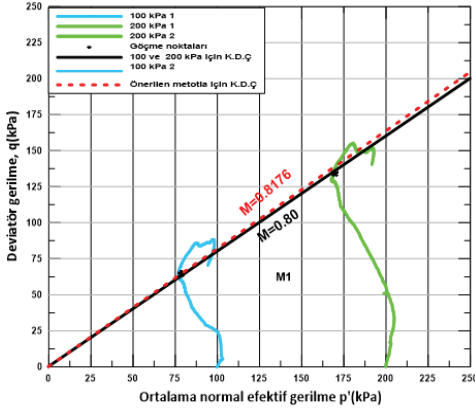
Yoğrulmuş zemin numuneleri üzerinde yapılan CU deneyleri için düşük konsolidasyon basınçlarının daha uygun olduğu görülmüştür. M1, M2, M3 ile M4 için 100 kPa ve 200 kPa konsolidasyon basıncında her bir zemin numunesi için 2 adet deney yapılmıştır. Yapılan bu

deneilerin sonuçlarının birbiri ile uyumlu ve deneylerin tekrarlanabilir olduğu görülmüştür. Bu numuneler için CU deneylerden elde edilen $q-p'$ gerilme izleri ve kritik durum durum çizgileri Şekil 10'da verilmiştir.

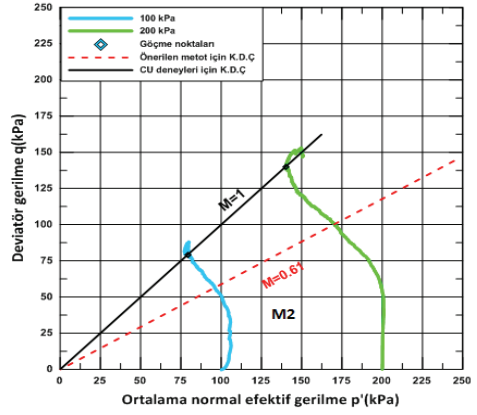
Şekil 10'da yapılan deneylerden elde edilen ortak KDC için ortalama q_f-p_f' değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. CU deney verilerinden Mohr daireleri çizilmiş ve göçme zarfından elde edilen efektif göçme zarfları Şekil 11'de gösterilmiştir.



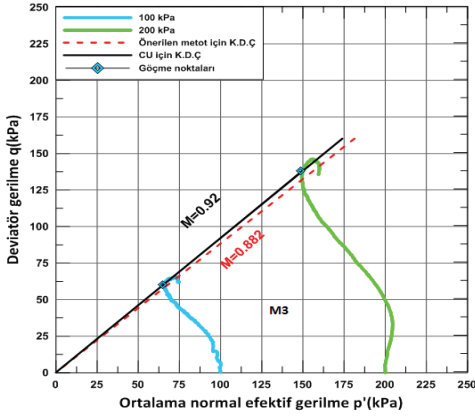
Şekil 9 - Ödometre ve veyn deneylerinden belirlenen sıkışma doğruları
a)M1, b)M2, c)M3, d)M4 (devam)



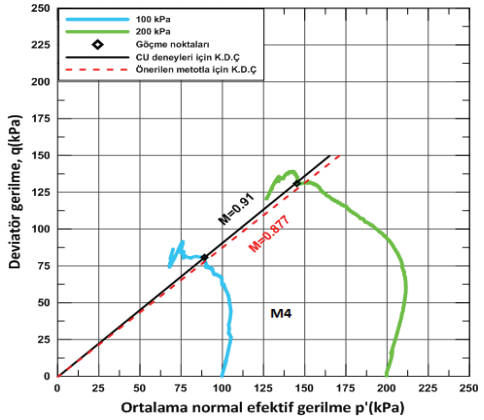
(a)



(b)



(c)

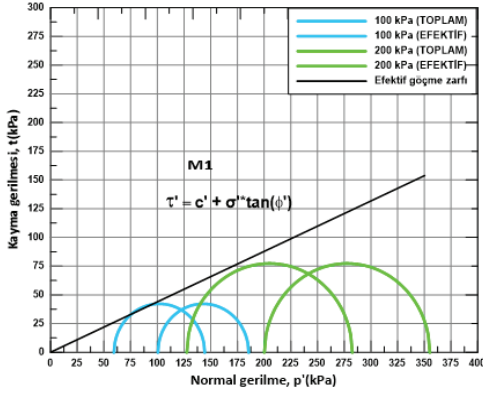


(d)

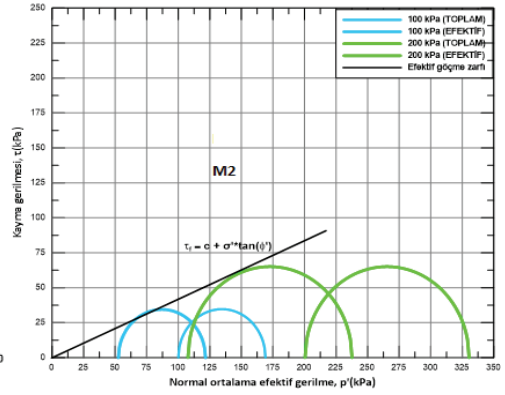
Şekil 10 - q - p' gerilme izleri için KDÇ'nin elde edilmesi a)M1, b)M2, c)M3, d)M4

Tablo 5 - Üç eksenli (CU)deneylerinden göçme anında elde edilen gerilme değerleri

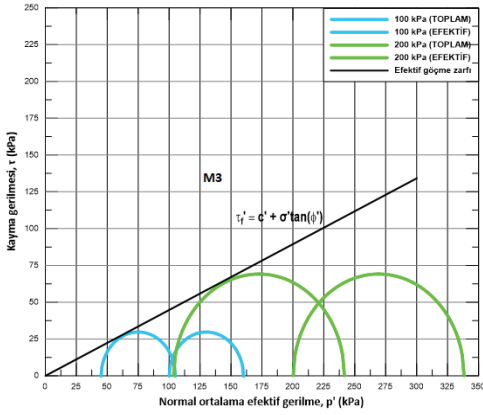
	M1		M2		M3		M4	
	100 kPa	200 kPa	100 kPa	200 kPa	100 kPa	200 kPa	100 kPa	200 kPa
q_f (kPa)	64	131	76	141	63	141	76	134
p_f' (kPa)	78.5	165	75	142.5	68	152	82.5	149.5



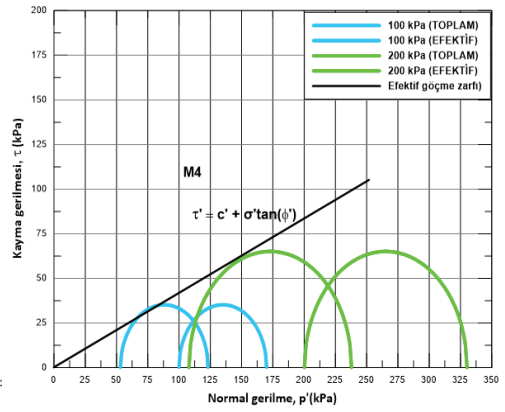
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 11 - CU deneylerinden elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfları a)M1, b)M2, c)M3, d)M4

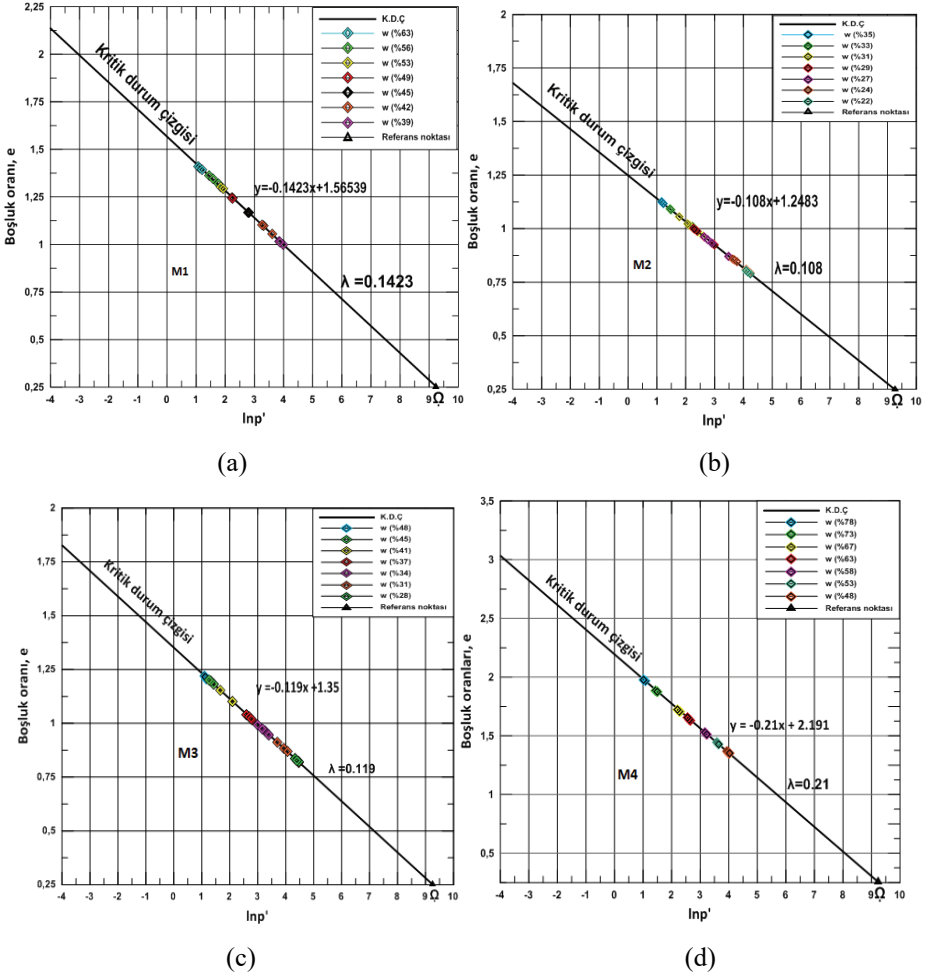
Mohr efektif göçme zarflarından elde edilen ortalama içsel sürtünme açıları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6 - Mohr dairelerinden içsel sürtünme açılarının elde edilmesi

	M1		M2		M3		M4	
	100 (kPa)	200 (kPa)	100 (kPa)	200 (kPa)	100 (kPa)	200 (kPa)	100 (kPa)	200 (kPa)
ϕ'	20.70°		22.50°		24.12°		22.62°	

2.3. Kritik Durum Parametrelerine Geçiş

Kritik durum parametrelerinin elde edilebilmesi için veyn deneyinden belirlenen eğim değerleri, önerilen referans noktaları [20] ve düşen koni deneyinden farklı w değerleri için hesaplanan boşluk oranları ile Şekil 4'te gösterilen işlem adımları takip edilerek belirlenen kritik durum çizgileri Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12 - p' değerlerinin elde edilmesi a)M1, b)M2, c)M3, d)M4

Yoğrulmuş zemin numuneleri hacmi bilinen numune kaplarına spatula yardımıyla sıvama yöntemi ile yerleştirilmiş ve her bir w için farklı e değerleri elde edilmiştir. Şekil 12'de x eksenini logaritmik olduğu için boşluk oranlarında % 0.1' lik bir farkın bile p' değerini oldukça değiştirdiği görülmüştür. Her bir w için yapılan tekrarlı denemeler sonucunda elde edilen " e "

değerleri arasındaki farkın azaltılması için çok sayıda deneme yapılmıştır. Örneğin M1 numunesinde “e” değerini bulmak için deney işlem adımları 17 kez tekrar edilmiştir. Tablo 7’de sunulan tüm değerler 17. deneme sonunda elde edilen sonuçlardır. Şekil 12a’dan elde edilen veriler Tablo 7’de M1 için sunulmuştur. Tablo 7’de yer alan q_f , Tablo 4’te hesaplanan S_u^* değerlerinin $\sqrt{3}$ ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Nihai durumda elde edilen M değeri eşitlik (16)’da yerine yazılarak ϕ' değeri hesaplanmıştır. Tablo 7’de M1 için yapılan tüm hesaplamalar M2, M3 ve M4 numuneleri için de yapılmış ve elde edilen $M_{(ort)}$ ve ϕ' değerleri Tablo 8’de sunulmuştur.

$$M = \frac{(6 \cdot \sin \phi')}{(3 - \sin \phi')} \quad (16)$$

Tablo 7 - M1 için kritik durum çizgisinden elde edilen kritik durum parametreleri

w (%)	e (=y)	p'	M=q/p'	M(ort)	M(ort)	ϕ'
61.66	1.409	2.986	0.959	0.9039	0.8176	21.1°
61.66	1.402	3.148	0.910			
61.66	1.391	3.406	0.842			
55.77	1.316	5.746	0.713	0.8440		
55.77	1.359	4.250	0.964			
55.77	1.342	4.791	0.855			
53.37	1.246	9.395	0.621	0.7969		
53.37	1.301	6.387	0.913			
53.37	1.292	6.810	0.856			
49.06	1.169	16.226	0.540	0.7986		
49.06	1.246	9.410	0.931			
49.06	1.245	9.488	0.924			
45.61	1.119	22.928	0.633	0.8247		
45.61	1.118	15.029	0.966			
45.61	1.165	16.630	0.873			
43	1.052	36.940	0.610	0.763		
43	1.095	27.322	0.824			
43	1.100	26.378	0.854			
40.16	1.014	48.297	0.826	0.7919		
40.16	0.997	54.425	0.733			
40.16	1.012	48.977	0.815			

Tablo 8 - Tüm zeminler için belirlenen $M_{(ort)}$ ve ϕ' değerleri

M1		M2		M3		M4	
$M_{(ort)}$	ϕ'	$M_{(ort)}$	ϕ'	$M_{(ort)}$	ϕ'	$M_{(ort)}$	ϕ'
0.8176	21.10 ⁰	0.609	16 ⁰	0.8822	22.65 ⁰	0.8776	22.50 ⁰

2.4. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 1 ve Şekil 5'te bu çalışma kapsamında kullanılan 4 farklı zemin için Casagrande likit limit ve düşen koni deneylerinden elde edilen kıvam özellikleri ve Casagrande Plastisite kartındaki konumları verilmiştir. M1 için düşen koni ile farklı zamanlarda yapılan 5 deneyde w_L değerlerinin %58.5-%59.5 aralığında değiştiği; Casagrande yöntemiyle aynı koşullarda farklı kişiler tarafından yapılan deneylerden w_L değerlerinin %54-%58 aralığında değiştiği ve w_L değerleri arasında %4'lük bir fark olduğu görülmüştür. Plastik limit için öngörülen 2.3 mm batma miktarına karşılık gelen w_p Şekil 7'den %29 olarak belirlenmiştir. Bu w_p değerlerinin tekrarlanan düşen koni deneyleri sonunda %28-%30 aralığında değiştiği; elle yuvarlama yöntemiyle elde edilen w_p 'nin ise %32-%36 aralığında olduğu görülmüştür. M1 için iki farklı yöntemle göre belirlenen plastisite indisleri arasında %10'luk bir fark bulunmaktadır. Bu farktan dolayı M1'in Plastisite kartındaki konumları da farklılık göstermektedir. M1'in dane çapı dağılımı eğrisinden %65'i 0.002 mm'den küçük olduğu bilinmektedir. Casagrande ve elle yuvarlama yöntemleriyle bulunan kıvam limit değerlerine göre A hattının altında kaldığı ve MH zemin grubunda olduğu belirlenmiştir. Düşen koni ile bulunan kıvam limitlerine göre A hattının hemen üstünde ve CH zemin sınıfında olduğu görülmektedir. Dane çapı dağılımı eğrisi ile düşen koniden belirlenen kıvam limitlerine göre bulunan zemin sınıfı birbiri ile tutarlıdır. Tablo 1'de M2 için bulunan w_L değerleri arasında %4; w_p değerleri arasında %5.7 fark bulunmakta ve CL; M3 için w_L değerleri arasında %2; w_p değerleri arasında %3.7; M4 için w_L değerleri arasında %4.6; w_p değerleri arasında %3.6 fark bulunmaktadır.

Casagrande ve düşen koni likit limit deneylerinden elde edilen sonuçlarının farklı olmasının nedenlerini araştıran detaylı çalışmalar da bulunmaktadır [23, 24].

Şekil 6'da veyn deneyinden, Şekil 9'da ödometre deneyinden ve eşitlik (8) 'den kıvam özelliklerine göre hesaplanan λ değerleri Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9 - Farklı yöntemlerle elde edilen λ değerleri

Numune	Veyn kesme deneyi	Ödometre deneyi	Kıvam özellikleri	
			Casagrande metodu	Düşen koni metodu
M1	0.1423	0.1376	0.114	0.171
M2	0.1080	0.1050	0.076	0.11
M3	0.1190	0.1210	0.098	0.13
M4	0.2100	0.2200	0.189	0.238

Eşitlik (1)'de deneysel verilerle kalibre edilen Hansbo düşen koni faktörüne göre hesaplanan S_{uL}^* değerlerinin literatürde yoğrulmuş zeminler için 30^0 ve 80 gram ile 60^0 ve 60 gram özelliklerine sahip düşen koniler için önerilen S_u değerleri ile karşılaştırılması Tablo 10'da sunulmuştur. M1 zemini için eşitlik (1)'de $K=0.955$ ve $h_L=20$ mm değerleri yerine yazıldığında S_{uL}^* değeri 1.88 kPa; M2 için $K=0.92$ değeri için S_{uL}^* değeri 1.80 kPa; M3 için $K=1.015$ değeri için S_{uL}^* değeri 1.99 kPa; M4 için $K=0.893$ için S_{uL}^* değeri 1.75 kPa olarak hesaplanmıştır.

Tablo 10 - Likit limit su muhtevsındaki S_{uL}^* değerleri

	Bu çalışma (2018)	Farias ve Liona Serna (2016)	Koumoto ve Houlsby (2001)	Whyte (1982)	Wood ve Wroth (1978)	Karlsson (1961)	Casagrande (1958)
S_{uL}^*	1.75-1.99	1.00	1.38-4.52	1.60	1.70	1.50-2.10	2.00-3.00

Tablo 10'da sunulan Koumoto ve Houlsby (2001) çalışması 60^0 - 60 gram özellikli koni ile Karlsson (1961) çalışmasında her iki koniyi de kullanmıştır.

CU deneylerinden belirlenen (M) değerleri ile bu çalışma kapsamında Hansbo (1956), Wroth ve Schofield (1968), Koumoto ve Houlsby (2001) ile Farias ve Liona Serna (2016) tarafından yapılan çalışmalardan yararlanarak elde edilen (M) değerleri Tablo 11'de gösterilmiştir. M1 için üç eksenli CU deneylerinden $M=0.80$ ve uygulanan yöntemle $a=\sqrt{3}$ için elde edilen $M=0.8176$ değerlerinin literatürde yapılan çalışmalarda kaolin kili için belirtilen 0.65-1.16 aralığında olduğu görülmektedir.

Tablo 11 - Kritik durum parametrelerinin karşılaştırılması

Numune	Bu çalışma kapsamında uygulanan yöntem		Üç Eksenli CU Deneyleri	
	M	ϕ'	M	ϕ'
M1	0.817	21.10°	0.80	20.70°
M2	0.610	16°	1.00	22.70°
M3	0.882	22.65°	0.92	24.12°
M4	0.878	22.50°	0.91	22.62°

Eşitlik (1)'den yararlanarak her bir zemin numunesi için belirlenen ortalama $K_{(ort)}$ değerleri sırasıyla $M1_K=0.955$, $M2_K=0.92$, $M3_K=1.015$ ve $M4_K=0.893$ olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerden belirlenen koni faktörlerinin literatürde yapılan benzer çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 12'de sunulmuştur. Tabloda yer alan Wood (1985)*, Gardiner (1982)* ve Karlsson (1961)* çalışmalarında ağırlıkları 100 gram ($Q=9.81*100$) olan koniler kullanmışlardır [7, 9, 10].

Tablo 12 - Deneysel verilerle kalibre edilen K değerlerinin literatürle karşılaştırılması

	Bu çalışma (2018)	Farias ve Liona Serna (2016)	O'Kelly (2014)	Wood (1985)*	Gardiner (1982)*	Karlsson (1961)*	Hansbo (1957)
K	0.893-1.015	0.498	0.565	0.85	1.058	0.80	1

3. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, endeks özellikleri farklı yoğrulmuş zemin numuneleri için Hansbo (1956), Wroth ve Schofield (1968), Koumoto ve Houlsby (2001) ile Farias ve Liona Serna (2016) tarafından yapılan çalışmalardan faydalanılarak 30⁰ ve 80 gram özelliklerine sahip düşen koni ve laboratuvar veyn deney aletleri kullanılarak sıkışabilirlik ve mukavemet parametreleri pratik olarak belirlenmiştir. Uygulanan yöntem ile elde edilen λ ve ϕ' değerleri ile ödometre ve üç eksenli (CU) deneylerinden elde edilen parametrelerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Zeminlerin kıvam limitlerinin belirlenmesi için kullanılan geleneksel Casagrande ve elle yuvarlama yöntemlerinden elde edilen w_L ve w_P değerlerinin deneyi yapan kişinin alışkanlıklarına göre farklılık gösterebildiği bilinmektedir. Düşen koni ile elde edilen w_L ve w_P değerlerinin kişiden bağımsız olduğu ve kendi içinde daha uyumlu olduğu görülmüştür. Bu yöntemlerden elde edilen kıvam özelliklerine göre Casagrande Plastisite Kartı dikkate alınarak yapılan zemin sınıflandırmasında da farklılık olduğu tespit edilmiştir.

Her bir zemin numunesi için deneysel veriler dikkate alınarak belirlenen Hansbo düşen koni faktörleri (K) ile likit limitten yüksek ve plastik limite yakın su muhtevası aralığında drenajsız kayma mukavemetinin kolaylıkla hesaplanabileceği görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan zeminler için bulunan S_{uL} * değerlerinin literatürde önerilen değerler ile uyumlu olduğu; hatta çoğu araştırmacı tarafından önerilen 1.70 kPa değerine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Klasik ödometre deneyinden 8 günde ve veyn kesme deneyinden 2 günde belirlenen sıkışma indeksi λ değerlerinin oldukça uyumlu olduğu; kıvam özelliklerine göre hesaplanan λ değerlerinin ise kısmen uyumlu olduğu görülmüştür.

M1, M3 ve M4 numuneleri ile yapılan üç eksenli (CU) deneylerinden elde edilen KDÇ'nin eğimi M ve ϕ' ile Hansbo (1956), Wroth ve Schofield (1968), Koumoto ve Houlsby (2001) ile Farias ve Liona Serna (2016) çalışmalarından faydalanılarak uygulanan yöntem ile elde edilen M ve ϕ' değerleri arasındaki uyum %95'ten büyüktür. Ayrıca uygulanan yöntem normal konsolide yoğrulmuş kohezyonlu zeminlerin kritik durum parametrelerinin daha hızlı, daha kolay, daha az maliyetle ve kişi faktöründen daha bağımsız elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Eşitlik (11)'de $\alpha=\sqrt{3}$ yerine $\alpha=2$ kullanılarak elde edilen M değerleri bu çalışmada kullanılan zeminler için %15.4 daha büyük olmaktadır. Ayrıca $\alpha=2$ için elde edilen M değerlerine bağlı elde edilen ϕ' değerleri M1 için %12.08; M2 için %13.51; M3 ve M4 için ise %11.76 daha büyük olmaktadır.

Bu çalışmada 30⁰ ve 80 gram koni özelliklerine sahip düşen koni ile elde edilen K değerleri, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, deneysel veriler kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen K değerlerinin ve K değerlerine bağlı olarak hesaplanan S_u* değerlerinin literatürdeki K ve S_u değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Düşen koni deneyinden plastik limitin belirlenmesinde 60⁰ ve 60 gram koni için genellikle 1.15 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası değeri dikkate alınmaktadır. Literatürde 30⁰ ve 80 gram özelliklerine sahip düşen koni için kabul gören bir batma değeri yoktur ve bu konu üzerinde çalışılması gerekmektedir. Bu iki düşen koni deney aleti için likit limitteki batma miktarları arasında 2 kat fark vardır. Bu çalışma kapsamında plastik limit su muhtevasının saptanmasında bu 2 kat farktan yararlanılarak, 2.3 mm (1.15x2=2.3) batma için belirlenen su muhtevası, plastik limit olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında dört farklı zemin için farklı zamanlarda yapılan düşen koni deneylerinden belirlenen w_P değerlerinin kendi içinde oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Tablo 1’de yer alan w_P değerlerinin % 1.7-%7; w_L değerlerinin %2-%4.6 aralığında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca birçok araştırmacı tarafından önerildiği gibi plastik limit değerinin belirlenmesi için çalışma mekanizması düşen koniye benzeyen, koni açısı ve ağırlığı tamamen özgül olan bir koni geliştirilmesi gerektiği açıktır.

M2’nin dane çapı dağılımı eğrisinden %7.5 kum, %62.5 silt ve %30 kil olduğu bilinmektedir. M2 için CU deneyleri ile elde edilen M=1 değeri ve önerilen yöntemle belirlenen M=0.61 değerlerinin uyumsuz olduğu görülmüştür. Ayrıca Mohr dairelerinden geçen göçme zarflarından $\phi'=22.70^0$ ve eşitlik (16)’da M=0.61 için $\phi'=16^0$ hesaplanmıştır. M2 diğer numunelerden farklı olarak silt oranı yüksek bir zemindir. Farklı su muhtevası değerleri için boşluk oranları belirlenirken numunenin kaplara yerleştirilmesi sırasında sorunlar yaşanmış ve numunenin kaplara sağlıklı bir şekilde yerleşmediği fark edilmiştir. Yapılan tekrarlı denemeler sonucunda bu sorun aşılammış ve nihai durumda M2 için uyumlu sonuçlar elde edilememiştir. Böylece Farias ve Lİona Serna (2016) tarafından M değerinin bulunmasına yönelik yapılan çalışmaların yoğunlaşmış kil zeminler için kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Bu sonucun genelleştirilebilmesi için daha fazla zemin numunesi üzerinde deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır.

Semboller

- a : Zeminlerin dayanım ve su emme kapasitelerini gösteren katsayı
b : Veyn deneyinden elde edilen sıkışma katsayısı
c : Kohezyon değeri
e : Boşluk oranı
e_a : Pa=p' olduğu zamanki boşluk oranı
G_s : Özgül yoğunluk
h : Koni batma miktarı (mm)

h_p	: Plastik limitteki batma miktarı (mm)
h_L	: Likit limitteki batma miktarı (mm)
I_p	: Plastisite indeksi
K	: Hansbo düşen koni faktörü
M	: Kritik durum çizgisinin eğimi
M_1	: Kaolin kili
M_2	: Havalimanı kili
M_3	: Gebze kili
M_4	: Çatalca kili
M_{1K}	: Kaolin kili için bulunan düşen koni faktörü
M_{2K}	: Havalimanı kili için bulunan düşen koni faktörü
M_{3K}	: Gebze kili için bulunan düşen koni faktörü
M_{4K}	: Çatalca kili için bulunan düşen koni faktörü
P_a	: Atmosferik basınç (kPa)
p'	: Ortalama normal efektif gerilme (kPa)
p_f'	: Göçme anındaki ortalama normal efektif gerilme (kPa)
p_{LL}'	: Likit limitteki ortalama normal efektif gerilme (kPa)
p_{PL}'	: Likit limitteki ortalama normal efektif gerilme (kPa)
S	: Doygunluk derecesi
S_u	: Drenajsız kayma mukavemeti (kPa)
S_u^*	: Kalibre edilen koni faktörüyle hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti (kPa)
S_{uL}	: Likit limitteki drenajsız kayma mukavemeti (kPa)
S_{up}	: Plastik limitteki drenajsız kayma mukavemeti (kPa)
α	: Drenajsız kayma mukavemeti ile deviyatör gerilme ilişkisini gösteren katsayı
τ	: Kayma gerilmesi (kPa)
σ	: Normal gerilme (kPa)
q_f	: Göçme anı için deviyatör gerilme (kPa)
v	: Özgül hacim
v_{PL}	: Plastik limitteki özgül hacim
v_{LL}	: Likit limitteki özgül hacim
Γ	: Kritik durum çizgisinde $p'=1$ değerindeki özgül hacim değeri

λ	: Sıkışma katsayısı
δ	: Düşen koni deneyi için zeminin kabarma açısı (°)
Q	: Düşen koni ucunun ağırlığı (gr)
w	: Su muhtevası
w _L	: Likit limit su muhtevası
w _p	: Plastik limit su muhtevası
ϕ'	: İçsel sürtünme açısı (°)
β	: Koni açısı (°)
κ	: Şişme katsayısı
Ω	: Kritik durum çizgilerinin geçtiği referans noktası

Kaynaklar

- [1] Farias, M.M., Liano-Serna, M.A., Simple Methodology to Obtain Critical State Parameters of Remolded Clays Under Normally Consolidated Conditions Using the Fall-Cone Test, Geotechnical Testing Journal, 39, 5, 855-864, 2016.
- [2] Koumoto, T., Houlsby, G.T., Theory and Practise of the Fall-Cone Test, Geotechnique, 51, 8, 701-712, 2001.
- [3] Kumapley, N., Boakye, S.Y., The Use of Cone Penetrometers for the Determination of the Liquid Limit of Soil Flow Plasticity, Prof. 7th Regional Conf. for Africa on Soil Mech. Found. Engng, 167-170, 1980.
- [4] Hansbo, S., A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall-Cone Test, Royal Swedish Geotechnical Institute, Linköping, 7-47, 1957.
- [5] Wood, D.M., Wroth, C.P., The Use of Cone Penetrometer to Determine the Plastic Limit of Soil, Ground Eng., 11, 3, 37, 1978.
- [6] Casagrande, A., Notes on the Design of the Liquid Limit Device, Geotechnique, 8, 2, 84-91, 1958.
- [7] Karlsson, R., Suggested Improvements in the Liquid Limit Test With Reference to Flow Properties of Remolded Clays, Presented at 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 171-184, 1961.
- [8] Whyte, I.L., Soil Plasticity and Strength: A New Approach Using Extrusion, Ground Eng. 15, 1, 16-24, 1982.
- [9] Wood, D.M., Some Fall-Cone Tests, Geotechnique 35, 1, 64-68, 1985.
- [10] Gardiner, E.O., Part II Project Report, Cambridge University Engineering Department, United Kingdom, 1982.

- [11] Ayadat, T., Hanna, A., Identification of Collapsible Soil Using the Fall Cone Apparatus, *Geotechnical Testing Journal*, 30, 4, 1-12, 2007.
- [12] Zentar, R., Abriak, N.E., Dubois, V., Fall Cone Test to Characterize Shear Strength of Organic Sediments, *ASCE Geotech. Geoenviron. J.*, 135, 1, 30-53, 2009.
- [13] O'Kelly, B.C., Atterberg Limits and Remolded Shear Strength-Water Content Relationships, *Geotech. Test. J.*, 36, 6, 1-6, 2013.
- [14] LIano-Serna, M.A., Experimental and Numerical Study of Geotechnical Problems Using the Material Point Method, PhD, Faculdade De Tecnologia Departamento De Engenharia Cıvıl E Ambiental, Universidade De Brasília, 2016.
- [15] Evans, T. ve Simpson, D., (2015). "Innovative Data Acquisition for the Fall Cone Test in Teaching and Research", *Geotechnical Testing Journal*, 38(3): 346-435.
- [16] O'Kelly, B.C., (2013). "Atterberg Limits and Remolded Shear Strength-Water Content Relationships", *Geotech. Test. J.*, 36(6): 1-6.
- [17] Skempton, A.W., Northey, R.D., The Sensitivity of Clays, *Geotechnique* 3, 6, 539-543, 1953.
- [18] Youssef, M.S., El Ramli, A.H., El Demery, M., Relationship Between Shear Strength, Consolidation, Liquid Limit and Plastic Limit for Remolded Clays, *Prof. 6th Int. Conf. for Africa on Soil Mech. Found. Engng, Montreal*, 1, 126-129, 1965.
- [19] Atkinson, J.H., Bransby, P.L., *The Mechanics of Soils*, McGraw-Hill, Book Company (UK) Limited, England 1977.
- [20] Butterfield, R.A., Natural Compression Law for Soils *Geotechnique*, 29, 2, 84-91, 1979.
- [21] Wood, D.M., *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, New York, 1990.
- [22] Schofield, A., Wroth, P., *Critical State Soil Mechanich*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [23] Karakan, E., Demir, S., (2018). "Liquid limit determination of various sand clay mixture by Casagrande and fall cone test method", *Teknik Dergi*, 20(2): 361-371.
- [24] Gulen, M., (2019). *Yoğrulmuş Killi Zeminlerin Kritik Durum Parametrelerinin Düşen Koni ile Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.