T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK LİMİT BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI VE YENİ BİR YAKLAŞIM GELİŞTİRİLMESİ

Sılda Ghazi Mohammed DOORİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLASTİK LİMİT BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI VE YENİ BİR YAKLAŞIM GELİŞTİRİLMESİ

Sılda Ghazi Mohammed DOORİ
Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
İnşaat mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Özcan TAN
2020, 81 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Doç. Dr. Murat OLGUN
Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ
Dr. Öğr. Üyesi İSA KUL

ÖZET

Plastik limit, ince taneli zeminlerin önemli parametrelerinden biridir. Bu çalışmada zeminin plastik limitinin belirlenmesi için mevcut yöntemler detaylıca incelenmiştir. Plastik limitin belirlenmesi için kullanılan yöntem Cassagrande tarafından önerilmiştir. Standart elle yuvarlama yöntemi operatöre çok fazla bağlıdır. Her zaman tutarlı ve güvenilir sonuçlar vermez. Bu tez çalışmasında güvenilir ve tekrarlanabilir yöntemler araştırılmıştır. Anlatılan yöntemlerin uygulanmış örnekleri verilmiştir. Çalışma kapsamında bu yöntemlerden elde edilen plastik limit değerleri karşılaştırılmıştır. Standart yöntem (elle yuvarlama) ve diğer yöntemler arasındaki fark gösterilmiştir. Çalışmalarda kullanılan yeni geliştirilen yöntemle, standart yönteme kıyasla daha uygun bir sonuç sağlandığı sonucuna varılmıştır. Standart (elle yuvarlama) yöntem operatöre daha az bağımlı olup zeminin plastik limitinin belirlenmesi için daha uygun bir yöntem olduğu görülmüştür. Bu çalışmada plastik limit belirlenmesi için kullanılan yeni yöntemin tüm ekipman ve test prosedürü, koni hariç, düşen koni ile likit limit belirleme testiyle aynıdır. Koninin ağırlığı ve açısını değiştirerek deney yapılmıştır. Koni yöntemi operatöre daha az bağlıdır ve elle yuvarlama yönteminde görülen olumsuz etkilerin olmadığı açıktır. Koni (i); Koninin açısı 20^{o} ve ağırlığı 240 g'dır. Koni (ii); (Wood ve Wroth, 1978) tarafından önerilmiştir. Likit limit konisinin aynı ölçülere sahiptir ancak 3 kat daha ağırdır, koninin ağırlığı 240 g'dır. Koni (iii); likit limit deneyinde kullanılan konidir. Çalışma kapsamında belirli bölgeden temin edilen 3 farklı plastisiteye sahip olan killer kullanılmıştır. Düşük plastisiteli kaolinit kil (CL), orta plastisiteli kil (CL) ve yüksek plastisiteye yakın kil (CL) kullanılmıştır. Likit limit deneyi koni penetresyon aleti ile yapılmıştır ve plastik limit deneyi Standart elle yuvarlama yöntemi ile yapılmıştır. Sonuçlar, Standart elle yuvarlama yönteminden elde edilen plastik limit değerleri ile tüm koni penetrasyon yöntemlerinin arasındaki regresyon analizlerinin (0.9856) ila (0.8925) arasında olduğunu göstermiştir. Önerilen (koni i), regresyon diğeri, koni yöntemlerine kıyasla en iyi korelasyonu verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Atterberg limitleri, Koni penetrometre, Likit limit, Plastik limit, Casagrande

ABSTRACT

MS THESIS

COMPARİSON OF PLASTİC LİMİT DETERMİNATİON METHODS AND DEVELOPMENT OF A NEW APPROACH

Sılda Ghazi Mohammed DOORİ
Selcuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of civil engineering
Advisor: Prof. Dr. Özcan TAN
2020, 81 Pages

Jury
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Assoc Prof. Murat OLGUN
Asst. Prof. Atila DEMİRÖZ
Asst. Prof. İSA KUL

ABSTRACT

Plastic limit is an important parameters of fine-grained soils. In this study, new methods for determining the plastic limit of the soil are examined in detail. The method used to determine the plastic limit was proposed by Cassagrande. The standard method (Thread Rolling Method), is highly dependent on the operator. It cannot always produce consistent and reliable results. In this thesis reliable and reproducible methods were investigated. Practical examples of the described methods are given. In this study, the values of the plastic limits obtained from the methods were compared. The difference between the standard method and other methods is shown. He concluded that a more favorable result was achieved compared to the standard method. It is less dependent on the operator and is obviously a more suitable method for determining the plastic limit of the soil. In this study, the whole equipment and test procedure of the new method for determining the plastic limit is the same as the liquid limit test except for the cone. Experiment was made by changing the weight and angle of the cone. This method is less operator-dependent and it is clear that there are no negative effects seen in the (Thread Rolling) method. Cone (i) is the current operation, the angle of the cone is 20^{o} and the weight is 240g. Cone (ii) Recommended by (Wood and Wroth, 1978). The liquid limit cone has the same size but the weight of the cone is 3 times heavier, the cone weight is 240 g. Cone (iii) The cone used in the liquid limit test. The clays were used in the study having 3 different plasticity obtained from a certain region. Low plasticity kaolinite clay (CL), medium plasticity clay (CL) and close to high plasticity clay (CL) were used. The results showed that the regression analyzes between the plastic limit values obtained from the standard thread rolling method and all cone penetration methods were between (0.9856) and (0.8925). The proposed (cone i) regression is best correlated to the other cone methods. This demonstrates that it is possible to perform the plastic limit test of all cones.

Keywords: Atterberg limits, Cone penetrometer, Liquid limit, Plastic limit, Casagrande

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda öncelikle mütevazi bir şekilde tüm övgülerimi Allah'a vermek istiyorum. Yüce Allah, rahmetiyle bana bu işi tamamlama gücü, nimet ve zaman verdi.

Kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösterici değerli danışmanım merhum hocam, sayın Prof. Dr. Özcan TAN'a, teşekkür ederim. Kendisi tez savunmamdan 10 gün önce vefat etti. Kendisine Allahtan rahmet diliyorum.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana destek olan Prof. Dr. Mustafa YILDIZ, Doç. Dr. Murat OLGUN, Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ ve inşaat mühendisliği bölümündeki tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca geoteknik laboratuar personeline, yardımını hiç esirgemeyen değerli Arş. Gör. Ekrem burak TOKA, Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA'ya teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme, gözlerimi dünyaya açtığımda babam, Ghazi Mohammed, annem İklem Mejeed ve kardeşlerim Sail ve Mohammed'e sonsuz teşekkürler ederim.

Sılda Ghazi Mohammed DOORİ
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı 2
1.2. Tezin Kapsamı 3

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **5**

2.1. Literatür Özeti 5
2.2. Killer 10
2.2.1. Killerin yapısı 10
2.2.2. Kil mineralleri 11
2.3. Kıvam Limitleri 12
2.4. Kıvam Parametreleri 13
2.4.1. Plastisite (plastiklik) indisi (Ip veya PI) 13
2.4.2. Kıvam indisi , IC 14
2.4.3. Likitlik (sıvılık) indisi I_L 15
2.4.4. Aktivite (A) 15
2.5. Atterberg Limitleri 16
2.5.1 Likit limit (W_L veya LL) 16
2.5.1.1 Casagrande yöntemi 17
2.5.1.2. Koni penetrometre (Cone penetrometer) yöntemi 19
2.5.2. Rötre (büzülme) limiti (Ws veya SL) 20
2.5.3. Plastik limit (wp veya PL) 21
2.6. Koni Penetrasyon Teorisi 21
2.6.1. Pürüzsüz ve pürüzlü (kaba) konilerin analizi 23
2.7. Plastik Limit Belirleme Yöntemleri 24
2.7.1 Yuvarlanma cihazı kullanılarak plastik limitin belirlenmesi (rolling device) 24
2.7.2. Koni penetrometre cihazı kullanılarak plastik limitin belirlenmesi 25
2.7.2.1 (Wood ve Wroth, 1978) tarafından önerilen yöntem 25
2.7.2.2 (Feng, 2004) tarafından önerilen yöntem 26
2.7.2.3 Modifiye koni penetrometre cihazı kullanılarak plastik limitin belirlenmesi 27
2.7.2.4 Modifiye koni penetrometre kullanılarak enerji temelli yaklaşım 31
2.7.3. Ekstrüzyon yöntemi ile plastik limitin belirlenmesi 34

3. MATERYAL VE YÖNTEM **38**

3.1. Materyal 38
3.1.1. Kil numuneleri 38
3.1.2. Numune hazırlanması 39
3.1.3. Zemin sınıflandırması 42
3.1.4. Plastisite indesi (PI) 42
3.1.5. Su muhtevasının belirlenmesi 43
3.2.Yöntem 43
3.2.1. Likit limitin belirlenmesi 43
3.2.2. Plastik limitin belirlenmesi 44
3.2.2.1. Standart yöntem (Casagrande yöntemi) ile plastik limitin belirlenmesi 44
3.2.2.2. Yeni modifiye koni yöntemiyle plastik limitin belirlenmesi 45
3.2.3. Lineer rötre deneyi 46

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 48

4.1. Likit Limit ve Standart Plastik Limit Sonuçları 48
4.2. Yeni Modifiye Konilere Göre Plastik Limit Sonuçları 56
4.3. Geleneksel ve Geleştirilmiş Yöntemlere Göre Hesaplanan Plastik Limit Karşılaştırması 64
4.4. Lineer rötre deneyinin sonuçları 67

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 73

5.1 Sonuçlar 73
5.2 Öneriler 74

KAYNAKLAR 75

ÖZGEÇMİŞ 78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

I_P, PI	Plastisite indisi
I_C	Kıvam indisi
I_L	Likitlik indisi
LL, W_L	Likit limit
M	Kütle
$M_{yaş}$	Yaş zeminin kütlesi
M_{kuru}	Kurutulmuş zeminin kütlesi
N	Vuruş sayısı
PL, W_P	Plastik limit
SL, W_S	Rötre (büzülme) limiti
V	Hacim
W	Su içeriği

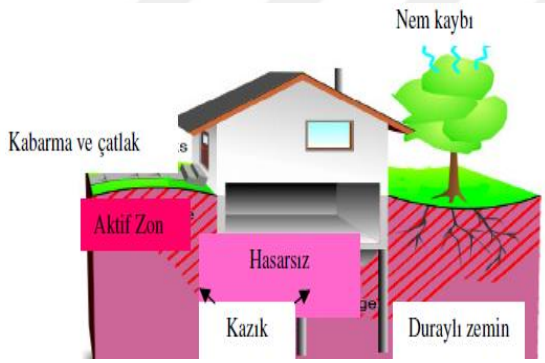
Kısaltmalar

BS	İngiliz Standartlarının Kurumu
NS	Norsk Standart

1. GİRİŞ

Suyun zemin üzerinde önemli bir etkisi vardır, özellikle ince taneli zeminlerin mühendislik davranışını su içeriği ile çok ilişkilidir. Terzaghi bu konuda “su olmayan gezegende zemin mekaniğine gerek olmazdı” bu ifadesiyle suyun önemini ve zemine ne kadar etkisini olduğu dile getirmiştir.

Zeminlerin su içeriğindeki değişiklikler çoğunlukla mevsimsel değişimlerdir. Yağışlı mevsimlerde suyun yer altına sızmasına bağlı olarak zeminin su içeriği artmakta sıcak mevsimler ise buharlaşma nedeniyle azalmaktadır. Su içeriğindeki bu değişimin bir sonucu olarak, zeminde şişme–büzülme, oturma ve gerilme artışı durumları meydana gelir. Zemine suyun etkisi Şekil 1.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Zemine suyun etkisi (Demir ve Kılıç, 2010).

Zemin davranışını tanımlamak için kullanılan sınırlar, su içeriğinin sınırlarıdır. Zeminlerin su içeriği çok düşük olduğunda katı gibi davranır ve çok yüksek olduğunda sıvı kıvamda likit gibi akabilir. Bu nedenle, zemin davranışını etkileyen en önemli sebep, su içeriği seviyesidir.

Kil danelerinin çevresindeki suyun durumu killi zeminlerin kıvam durumunu belirler. Zeminin davranışına göre dört temel duruma ayrılabilir. Bu durumlar sırayla: Katı durum, Yarı katı durum, Plastik durum, Likit durum.

Zeminin sertlik-yumuşaklık durumu kohezyonlu zeminlerde daha çok görülürken; kum ve çakılı gibi iri taneli zeminlerde bu özellik görülmez. Killerin plastiklik durumu mühendislik tasarımını etkiler. Plastik limitin belirlenmesi için yeni yöntem araştırılmıştır. Bu yöntem zemin mekanigine olumlu katkılar sağlayacaktır.

1.1. Tezin Amacı

Plastik limit belirlemek için kullanılan temel yöntem Casagrande (1958) tarafından geliştirilmiştir. Standart elle yuvarlama yöntemi (Casagrande, 1958) operatöre çok fazla bağlıdır. Bu nedenle her zaman tutarlı ve güvenilir sonuçlar vermez. Aşağıda belirtiren hususlar elle yuvarlama tekniği ile plastik limitin doğru bir şekilde belirlenmesini etkilemektedir:

- Operatörün deneyimi (tecrübesi).
- Operatörün deney esnasında uyguladığı basınç değişiklikleri.
- Yuvarlanma tekniği ve yuvarlama hızı.
- Çubuğun geometrisi.
- El, zemin ve cam arasındaki sürtünme.
- Yüzeyin kuru veya nemli olması.
- Test prosedüründeki belirsizlikler.
- Kum içeren zeminlerde uygulanmasının zor olması.
- Yüksek plastisiteli killerde adezyon faktörü nedeniyle deneyi yapan kişinin eline yapışan zeminin nem oranı, zemin örneğininin su içeriğine etkilemesi.

Standart elle yuvarlama yöntemi (Belviso ve ark., 1985) “oldukça kaba bir deney prosedürü” olarak tanımlanmıştır ve (Houlsby, 1982) (Whyte, 1982) tarafından da uzun süre eleştirilmiştir (Tefera, 2013).

Bu çalışmada plastik limitin doğru bir şekilde belirlenmesi için güvenilir ve tekrarlanabilir yeni geliştirilmiş yöntemler araştırılmıştır. Aşağıda belirtilen hususlar yapılan tez çalışmasının amaçlarıdır:

- Killerin likit limitlerinin geleneksel yönteme (koni penetrasyon yöntemi) göre belirlenmesi.
- Killerin plastik limitlerinin geleneksel (elle yuvarlama) yönteme göre belirlenmesi.
- Killerin plastik limitlerinin yeni yönteme (Modifiye koni yöntemine) göre belirlenmesi.
- Aynı aletle plastik limit ve likit limit testinin belirlenmesi.
- Geleneksel ve yeni yönteme göre hesaplanan plastik limitinin karşılaştırması.

- Karşılaştırılan yöntemlere göre belirlenen plastik limitlerin hangi yöntemin daha uygun olduğunun belirlenerek öneriler getirilmesi.

1.2. Tezin Kapsamı

Yüksek su içeriğine sahip olan ince taneli zeminler daha düşük şişme gösterir. Eğer zemin yeterince yüksek su içeriğine sahipse, önemli hacim değişikliği olmayacaktır. Plastik limit değerinin üzerine kadar ıslatılan zeminlerde şişme potansiyeli önemli ölçüde azalır. Zeminin su içeriği arttırıldığı durumda zemin dayanımı ve şev stabilitesi önemli ölçüde azalır. Zemininde su içeriği arttığında zamanla alt tabakadaki zemini de etkileyecektir ve yapı üzerinde beklenmeyen hasarlara neden olacaktır (Demir ve Kılıç, 2010). Şişen zeminlerin oluşturduğu zararlar Şekil 1.2.'de gösterilmiştir.



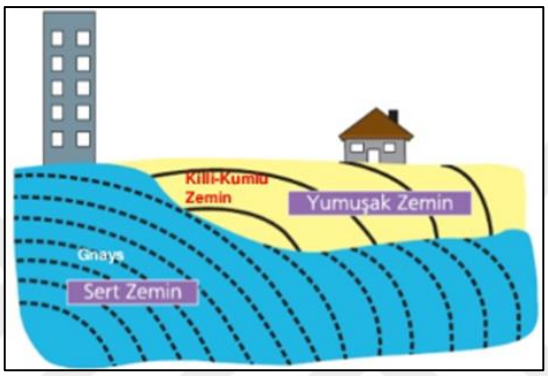
Şekil 1.2. Şişen zeminlerin oluşturduğu zararlar (Demir ve Kılıç, 2010).

Su içeriği, siltli ve killi zeminlerin özelliklerini (kum ve çakıldan farklı olarak) önemli ölçüde etkilemektedir.

- Su içeriği arttıkça zeminin dayanım azalır.
- Su içeriği arttıkça zeminin hacim ve şişme basıncı artar.
- Çok yüksek su içeriğindeki ince taneli zeminler sıvılaşmaya benzer akıcı özelliklere sahiptir.
- Su içeriği azaldıkça, zeminin hacmi azalır ve zeminler plastikleşir.

- Su içeriği daha da azalırsa, hacim değişmediğinde zemin yarı katı kıvama geçer.

Deprem dalgaları zemin katmanlarından geçer ve yeryüzündeki bir yapıya gelene kadar içinden geçtikleri katmanlarda farklı davranış gösterirler. Bu zemin tabakaları yumuşak ve gevşek ise daha uzun dalgalar halinde ilerler, sert ve katı ise daha kısa dalgalar halinde yayılır (Anonim, 2017). Yumuşak ve sert zeminlerde deprem dalgalarının davranışı Şekil 1.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Deprem dalgalarının farklı zeminlerde farklı davranışı (Anonim, 2017).

Çalışma kapsamında 3 farklı plastisiteye sahip; orta plastisiteli kil (CL), yüksek plastisiteye yakın kil (CL) ve düşük plastisiteli kil (CL-ML) kullanılmıştır. Tez çalışmasında seçilen kil numuneler üzerinde aşağıda belirtilen laboratuvar deneyleri yapılmıştır:

- Elek analizi.
- Hidrometre.
- Tane birim hacim ağırlık.
- Likit limit deneyi (Standart Koni Penetresyon yöntem ile yapılmıştır).
- Plastik Limit Deneyi (Elle yuvarlama yöntem ile yapılmıştır).
- Plastik Limit Deneyi (yeni geliştirilen (modifiye) yöntem ile yapılmıştır).
- Rötre limit deneyi.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Özeti

Literatürde yeni yöntemler ile plastik limitin belirlenmesi dair çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu kısımda plastik limitin belirlenmesine dair kullanılan yeni yöntemler araştırılmış ve bu yöntemlerin elle yuvarlama yöntemiyle karşılaştırılmalarıyla ilgili çalışmalar ele alınmıştır.

Rashid (2005) tarafından yapılan bir araştırmada plastik limit değerini belirlemek için üç tip koni kullanılmıştır.

Koni (i)'da 20 ^{o} koni açısı ile 101,47 g ağırlığında bir koni kullanılarak plastik limit belirlenmiştir.

Koni (ii)'de (Wood ve Wroth, 1978) tarafından önerilmiştir. Likit limit konisinin aynı ölçüme sahip bir koni kullanılarak plastik limit belirlenmiştir. Ancak koni 3 kat daha ağır ve koninin ağırlığı 240 g'dır.

Koni(iii)'de (Feng, 2004) tarafından önerilmiştir. Likit limit deneyinde kullanılan aleti ve koni aynıdır. Ancak küçük bir kap kullanılarak plastik limit belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan koni türleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Koni türleri (Rashid, 2005)

	Koni türü
Koni (i)	101.47g ve 20^{o} koni açısı
Koni (ii)	240g ve 30^{o} koni (Wood ve Wroth, 1978)
Koni (iii)	80 g ve 30^{o} koni, 20 mm çapında ve 20 mm derinliğinde küçük kap. (Feng, 2004)

Standart plastik limit deney sonuçları karşılaştırılmış ve deneye ait sonuçlar Çizelge 2.2, 2.3 ve 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Standart ve koni (i) yöntemleri ile elde edilen plastik limitlerin karşılaştırması (Rashid, 2005).

Numune	PL (%) Standart	PL (%) Koni(i)	Fark %	Regresyon Değeri
A	47.1	45.3	3.8	0.9943
B	29.8	29.3	1.7	
C	30.9	30.8	0.3	
D	30.0	30.8	4.0	

Çizelge 2.3. Standart ve koni (ii) yöntemleri ile elde edilen plastik limitlerin karşılaştırması (Rashid, 2005).

Numune	PL (%) Standart	PL (%) Koni(ii)	Fark %	Regresyon Değeri
A	47.1	43.4	7.9	0.9863
B	29.8	29	2.7	
C	30.9	31.8	2.9	
D	30.0	30.6	2.0	

Çizelge 2.4. Standart ve koni(iii) yöntemleri ile elde edilen plastik limitlerin karşılaştırması (Rashid, 2005).

Numune	PL (%) Standart	PL (%) Koni(iii)	Fark %	Regresyon Değeri
A	47.1	44.2	6.2	0.9163
B	29.8	27.6	7.3	
C	30.9	29.7	3.9	
D	30.0	26.6	11.3	

Çizelge 2.2, 2.3 ve 2.4, standart yöntem ve tüm modifiye yöntemden elde edilen plastik limitin farklılıkları gösterilmiştir. Tüm koni yöntemleri plastik limit testinin gerçekleştirilmesi için uygundur. Ancak koni (i), diğer koni yöntemlerine kıyasla en iyi korelasyonu vermiştir (Rashid, 2005).

- Önerilen (koni i), regresyon analizine ilişkin diğer koni yöntemlerine kıyasla en iyi korelasyonu verilmiştir.
- Düşen konilerin, standart yönteme göre daha az operatöre bağlı bir test olduğunu gösterilmiştir.

Kayabalı (2007) yaptığı çalışmada geleneksel yöntemlerle elde edilen ortalama plastik limit ve likit limit değerlerine karşılık gelen ekstrüzyon (bir metal, plastik veya zemin bloğunun basınçla zorlanarak daha dar bir kesitten geçirildiği mekanik bir süreçtir) basınçlarını çizelge 2.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Geleneksel deneylerden elde edilen ortalama plastik limit ve likit limit değerlerine karşılık gelen ekstrüzyon basınçları (Kayabalı, 2007).

Numune	Ekstrüzyon Basıncı (kPa)	
	Plastik limit için	Likit limit için
01	1300	12.5
02	1500	9.3
03	2220	21.0
04	2420	32.0
05	1900	42.0
06	3100	22.0
07	2000	43.0
08	2000	40.0
09	4600	30.0
10	3100	64.0
11	1100	0.55
12	900	2.5
13	3900	30.0
14	4900	33.0
15	3800	22.5
16	480	42.0
17	1200	49.0
18	1400	40.0
19	1500	22.0
20	1150	24.0

Rashid ve ark., (2008) tarafından yapılan bir araştırmada dört farklı yöntem ile elde edilen plastik limit değerleri belirlenmiştir.

Yöntem a'da (Hansbo, 1957) tarafından geliştirilen 20^o koni açısı ile 101 g ağırlığında bir koni, Yöntem b'de, (Bobrowski ve Griekspoor, 1992) tarafından yapılan bir çalışmada kullanılan yuvarlama cihazı, Yöntem c'de (Wood ve Wroth, 1978) tarafından geliştirilen bir koni kullanılarak plastik limit belirlenmiştir. Likit limit konisiyle aynı açıda olup (30^o) ancak 3 kat daha ağırdır, koninin ağırlığı 240 g'dır. Yöntem d 'de (Feng, 2004) tarafından önerilmiştir. Likit limit deneyinde kullanılan aleti ve koni aynıdır. Ancak küçük bir kap kullanılarak plastik limit belirlenmiştir. Standart metodu ve tüm önerilen yöntemlerden elde edilen plastik limit değerleri arasındaki farkları karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Çizelge 2.6 'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Standart metodu ve tüm önerilen yöntemlerden elde edilen plastik limit değerleri arasındaki farkları karşılaştırılmıştır (Rashid ve ark., 2008b).

Numune	PL (%) standart	PL (%) (Hansbo, 1957)	Fark %	PL (%) yuvarlama cihazı	Fark %
A	47.1	45.3	3.8	43.4	7.9
B	29.8	29.3	1.7	29.0	2.7
C	30.9	30.8	0.3	31.8	2.9
D	30.0	28.8	0.3	27.0	10

Numune	PL (%) standart	PL (%) (Wood ve Wroth, 1978)	Fark %	PL (%) (Feng, 2004)	Fark %
A	47.1	43.4	7.9	44.2	6.2
B	29.8	29.0	2.7	27.6	7.3
C	30.9	31.8	2.9	29.7	3.9
D	30.0	30.6	2.0	26.6	11.3

Standart yöntem ve yöntem (a) arasındaki fark %0,3 - 4.0, yöntem (b) için %2,0- %15 iken, yöntem (c) %2,0- %10,8 arasındadır. Yöntem (d) için, %3,9 ila %11,3 arasındadır. Yöntemin (a) en küçük fark olduğu açıktır. (a) yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla daha uygun bir sonuç sağlamıştır (Rashid ve ark., 2008b).

Ishaque ve ark, (2010) yaptıkları bir çalışmada yuvarlanma cihazı (rolling device) kullanarak plastik limit belirlenmiştir ve koni penetrometre yöntemi ile casagrande yönteminden elde edilen plastik limit değerleri aralarındaki farkılıklar araştırmışlardır. Sonuçlar Çizelge 2.7'de verilmiştir. Koni penetrometre yönteminde 30˚ tepe açısı ile 80 g ağırlığında bir koni kullanılmıştır.

Çizelge 2.7. Yuvarlanma cihazı, Koni penetrometre ve Casagrande yöntemler ile elde edilen plastik limit değerilerinin karşılaştırılması (Ishaque ve ark., 2010).

Kil oranı (%)	PL% Yuvarlanma cihazı	PL% Casagrande yöntemine	PL% Koni penetrometre yöntemi	Fark, % (yuvarlanma cihazı ve casagrande yöntemi arasındaki fark)	Fark, % (yuvarlanma cihazı ve Koni Penetrometre yöntemi arasındaki fark)
31	20.00	23.00	19.5	15.0	2.50
35	21.00	21.13	23.0	00.6	9.52
39	24.34	25.28	23.0	03.8	5.50
75	26.50	27.80	27.0	04.9	1.88
78	30.00	29.91	31.0	00.3	3.33

- Çizelge 2.7'e istinaden, (%31- %78 kil oranı için) yuvarlanma cihazı metodu her zaman Casagrande yöntemine göre daha az plastik limit değeri vermektedir.
- Yuvarlanma cihazının değerleri ile Koni penetrometre yöntemi değerleri bir birne çok yakındır ve varyasyon %2 ila %10'dur. Bu sonuçlar, yuvarlanma cihaz tekniğinin uygunluğunu kanıtlamıştır (Ishaque ve ark., 2010).

Tefera (2013) tarafından yapılan çalışmada standart Casagrande ve modify koni penetrometre yöntemler ile elde edilen plastik limit değerleri bulunmuştur ve karşılaştırılmıştır sonuçlar Çizelge 2.8'de gösterilmiştir. Standart metodun sonuçları, önerilen modifiye düşen koni yöntemiyle elde edilen değerlerden daha fazladır.

Çizelge 2.8. Standart ve Koni penetrometre yöntemiler ile elde edilen Wp değerleri. Queen University Belfast'ta yapılmıştır (Tefera, 2013).

		6 laboratuvardan elde edilen Wp (%)							
Numune	Yöntem	1	2	3	4	5	6	Ortalama	Fark, %
Speswhite Kaolin	Koni penetrometre yöntemi (yeni yöntem)	27,9	29,3	27,9	29,0	28,8	29,2	28,7	3.6
	Standart elle yuvarlama	36,1	29,7	34,5	31,5	31,5	29,9	32,3	

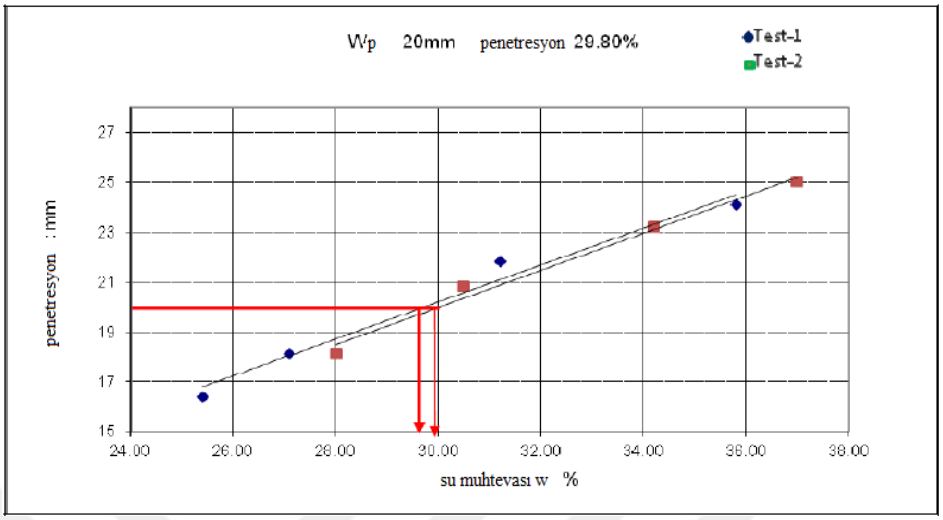
Saxena ve Arora, (2016) tarafından yapılan bir araştırmada modifiye koni penetrometre kullanılarak ince taneli zeminlerin plastik limitinin belirlenmesi amacıyla yeni bir yaklaşım olarak enerji temelli yaklaşımı kullanılmıştır.

Standart Casagrande ve (0,727 kg) ağırlıkta modify koni penetrometre yöntemleriyle elde edilen plastik limit değerleri bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar çizelge 2.9'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.9 Casagrande yönteminden elde edilen Wp ve modify koni penetrometreden elde edilen Wp arasındaki fark (Saxena ve Arora, 2016).

Zemin numunesi	PL (%) Casagrande	PL (%) Koni (0.727 kg)	Fark %
A	29.5	29.8	0.3
B	27.2	27.7	0.5
C	33.5	32.8	0.7
D	16.2	16.9	0.7

Numune A için her iki yöntem ile elde edilen plastik limiti değerleri Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



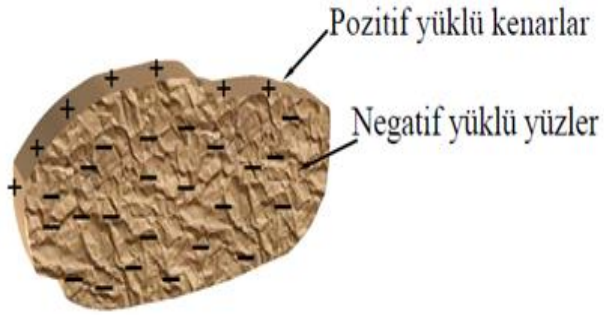
Şekil 2.1. Numune A'nin iki yöntem ile yapılan plastik limiti deneyi, kullanıların modifiye düşen koni ağılığı (0.727) kg (Saxena ve Arora, 2016).

20 mm'lik koni penetrasyonuna karşılık gelen su içeriği, zeminin plastik limiti olarak alınır. Yeni yöntem, daha hızlı olmanın yanı sıra plastisite testi sonuçları karşılaştırılabilir genişlik vermiştir ve Casagrande yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlardan daha fazla tekrarlanabilmiştir (Saxena ve Arora, 2016).

2.2. Killer

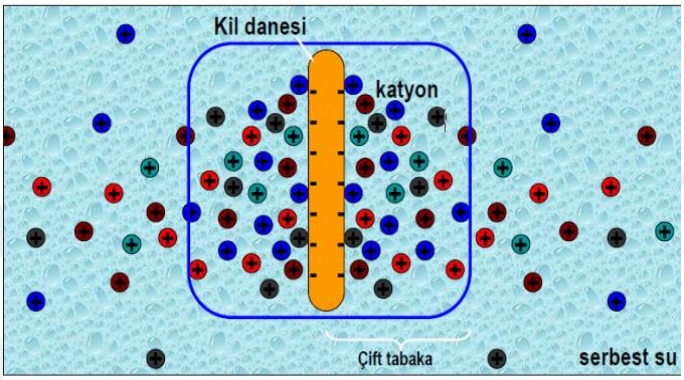
2.2.1. Killerin yapısı

Kil daneleri plak şeklinde ve boyutu ≤2 mikrondur. Kilin kenarlarındakı pozitif ve negatif elektrik yükü Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Kil danesi (Anonim, 2019).

Kil kimyasal yapısında, kristal kenarlarında negatif, yüzünde ise pozitif net elektrik yükü taşımaktadır. Kil danesi suyla karıştığında, kil yüzeyine yapışık katyonlara bağlandığında bunlar dengeyi sağlamak için yüzeyden ve birbirlerinden ayrılma eğilimi gösterirler. Böylece, saf suya giren bir kil danesinin yüzeyindeki katyonlar, sıvı içine doğru genleşerek "çiftli tabaka olarak" anılan bölgeyi oluştururlar (Önalp ve Arel, 2013). Kil ile su arasında ilişki Şekil 2.3.'de gösterilmiştir.

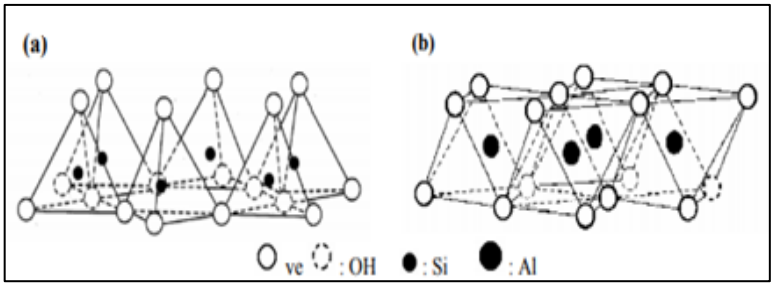


Şekil 2.3. Kil ile su arasında ilişki (Anonim, 2019).

Çiftli tabaka sudaki pozitif iyonları kilin negatif yükleri tarafından çekilir. Kil danelerinin çevresindeki suyun durumu, killi zeminlerin plastiklik özeliğini ortaya çıkarır.

2.2.2. Kil mineralleri

Kil minerallerini meydana getiren iki temel ünite Şekil 2.4'de görüldüğü gibi dört düzlemli silika ünitesi (tetrahedron) ve sekiz düzlemli alüminyum ünitesidir (oktahedron) (Önalp ve Arel, 2013).

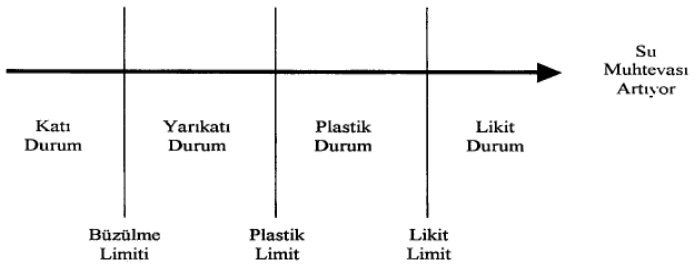


Şekil 2.4. Kil minerallerinde (a) tetrahedral ve (b) oktahedral tabakalar (Demirbaş, 2006).

2.3. Kıvam Limitleri

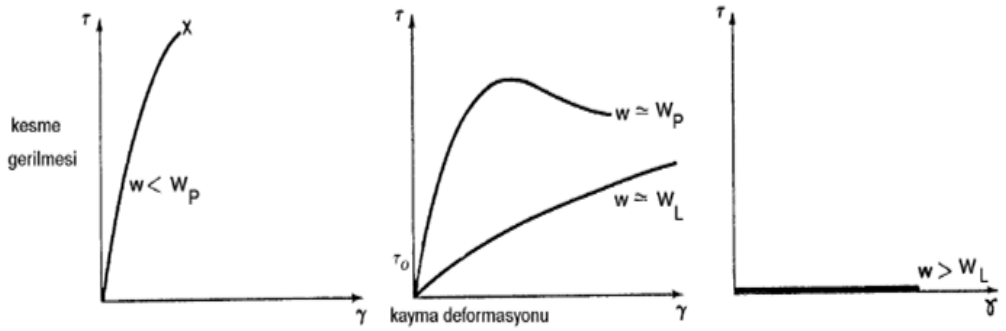
Kıvam limitleri, zemin davranışını tanımlamak için kullanılan su içeriğinin sınırlarıdır. Sınır durumları katı durum, yarı katı durum, plastik durum, likit durum Şekil 2.5'de gösterilmiştir. (Uzuner, 2014).

- **Likit durumda**, zemin bir sıvı gibi akabilir.
- **Plastik durumda,** zemin çatlamadan istenilen şekil verilebilir.
- **Yarı katı durumda**, zemin çatlar ve istenilen şekil zorlukla verilir.
- **Katı durumda,** zemine şekil verilemez ve istendiğinde şekil kırılır



Şekil 2.5. Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki (Demir ve Kılıç, 2010).

Su içeriği ile kayma mukavemetin ilişkisi Şekil 2.6.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kıvam – kayma mukavemeti ilişkisi (Anonim, 2019).

($w<w_p$) zemin yarı katı veya kat durumunda.

($w=w_p$) zemin plastik limitte.

($w=w_L$) zemin likit limitte.

($w>w_p$) zemin sıvı durumunda.

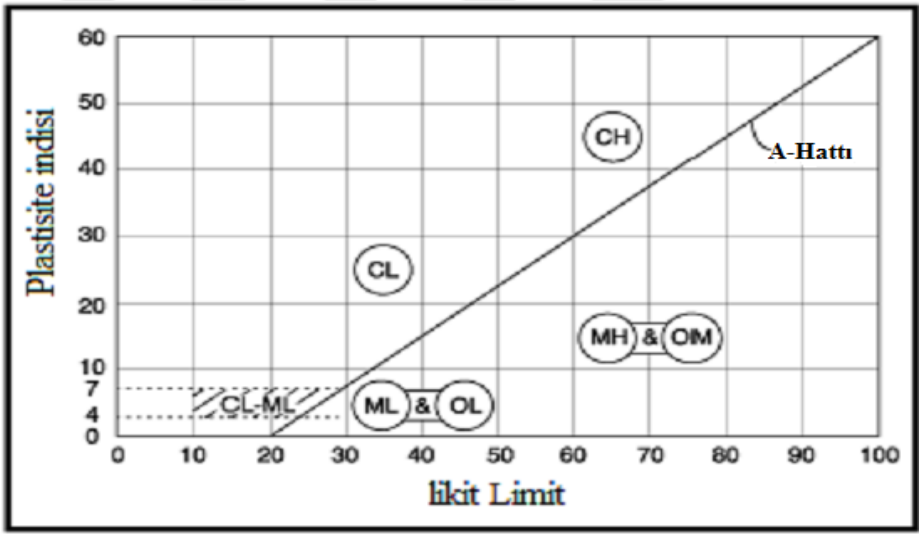
2.4. Kıvam Parametreleri

2.4.1. Plastisite (plastiklik) indisi (Ip veya PI)

Plastisite indisi zeminleri sınıflandırmada ve bazı zemin parametreleri ile korelasyon yapmada kullanılan temel zemin özelliklerinden biridir. Plastisite indisini belirlemek için plastik limit ile likit limit değerleri kullanılarak hesaplanır, Eşitlik 2.1 plastisite indisi belirlenmesi için kullanılır.

$$IP = WL - WP \tag{2.1}$$

Likit limit LL ve Plastisite indisi PI'yi bulunduktan sonra, plastisite grafiği zemini sınıflandırmak için kullanılır (Şekil 2.7). A-Hattı Genellikle killi zeminleri siltli zeminlerden ve organik zeminleri organik olmayan zeminlerden ayırır.

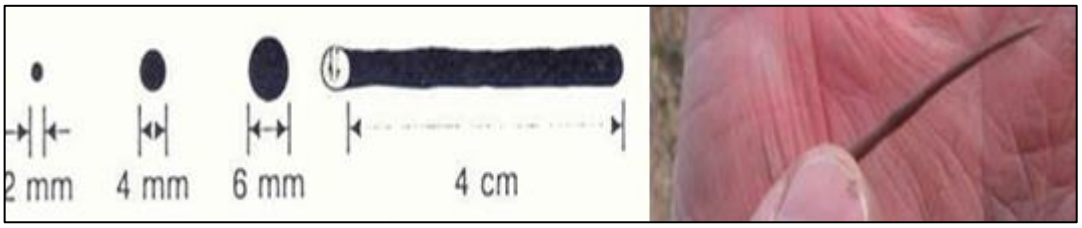


Şekil 2.7. Sınıflandırma grafikleri (Anonim).

Plastisite Sınıfı:

- **Plastik olmayan** 6 mm çaplı, 4 cm uzunluğunda bir çubuk oluşturamayacak veya oluşturulduğunda, kendini destekleyemez.
- **Hafif Plastik** 6 mm çaplı, 4 cm uzunluğunda çubuk oluşturuluyor. 4 mm çaplı, 4 cm uzunluğunda çubuk oluşturulmıyor.
- **Orta derecede Plastik** 4 mm çapında, 4 cm uzunluğunda çubuk oluşturuluyor. 2 mm çapında, 4 cm uzunluğunda çubuk oluşturulmıyor.
- **Çok Plastik** 2 mm çapında, 4 cm uzunluğunda çubuk oluşturuluyor.

Plastisite sınıflanırması için zeminin çapı ve uzunluğu Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.

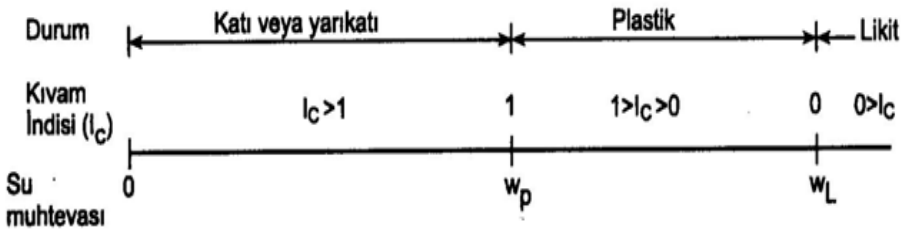


Şekil 2.8. Plastisite sınıflanırması (Anonim).

2.4.2. Kıvam indisi , IC

Kohezyonlu zeminlerin kıvamı, dayanıma bir yaklaşımda bulunulabilmesi için önemli bir özelliktir. Kohezyonlu zeminlerde kıvam indesi hesaplamak için su içeriği (w), likit limit (LL) ve plastik limitin (PL) değerleri kullanılarak hesaplanır. Eşitlik 2.2 kıvam indisi belirlenmesi için kullanılır. Kıvam indisinin grafiği Şekil 2.9.'de gösterilmiştir.

$$I_C=(W_L-W)/IP \qquad (2.2)$$



Şekil 2.9. Kıvam indisi , IC grafiği (Anonim, 2019).

W= zeminin su içeriği.

I_C=1 zemin plastik limitte ($w=w_p$).

I_C =0 zemin likit limitte ($w=w_L$).

I_C >1 zemin kat veya yarı katı durumunda ($w< w_p$).

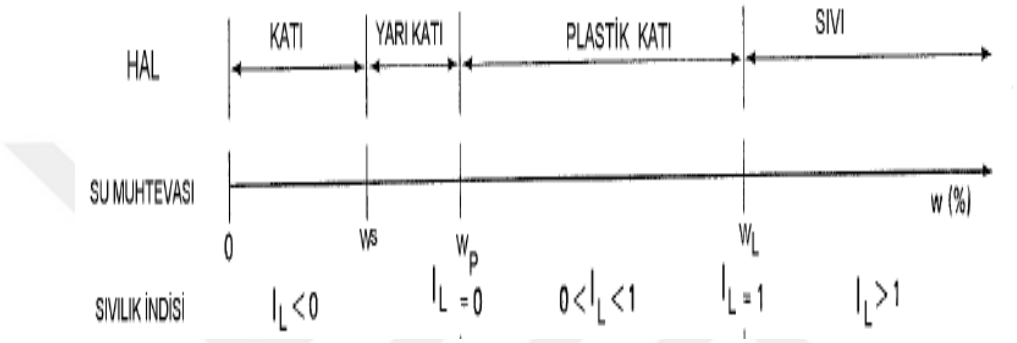
0< IC <1 zemin plastik durumda ($w_p <w< w_L$).

IC < 0 zemin likit durumunda($w> w_L$).

2.4.3. Likitlik (sıvılık) indisi I_L

Zeminler doğal durumda farklı su içeriklerinde olurlar. Su içeriği, plastisite cetvelinde zeminin bazı özellikleri hakkında bilgi verir. Sıvılık indisi Şekil 2.10'de gösterilmiştir. Eşitlik 2.3 Sıvılık indisi belirlenmesi için kullanılır.

$$I_L=(W-WP)/IP \qquad (2.3)$$



Şekil 2.10. Sıvılık indisi, LL (Anonim, 2019).

2.4.4. Aktivite (A)

Plastisite indisinin, zeminin 0.002 mm çapına karşılık gelen elekten geçen yüzdeye oranı olarak tanımlanır. Eşitlik 2.4 Aktivite belirlenmesi için kullanılır ve killerin aktiviteye göre sınıflandırılması Çizelge 2.10'de gösterilmiştir.

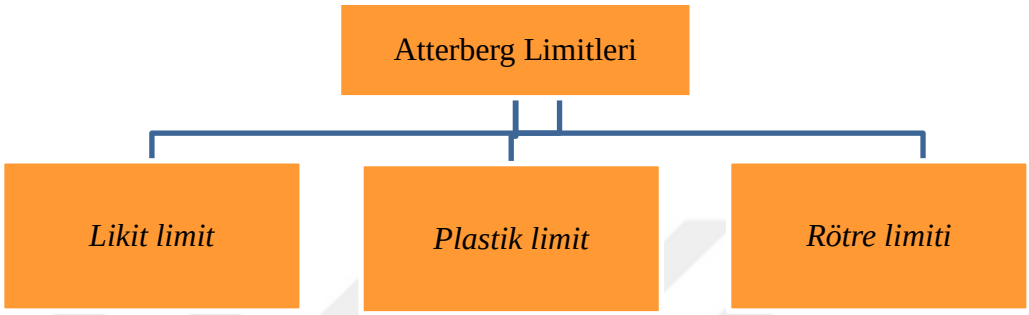
$$A = \frac{\text{IP}}{\text{Kil yüzdesi}} \qquad (2.4)$$

Çizelge 2.10. Killerin aktiviteye göre sınıflandırılması (Anonim, 2019).

Aktivite değeri (A)	Açıklama
< 0.75	Aktif değil
0.75-1.25	Normal
>1.25	Aktif

2.5. Atterberg Limitleri

Kohezyonlu zeminlerde su içeriğine göre farklı davranışlar meydana gelir. Zeminlerin durumları arasındakı su muhtevası sınırı İsveçli Atterberg (1911) tarafından zeminlerinin sınıflandırması ve mühendislik amaçları için tanımlanmıştır. Bu limitlere Atterberg limitleri denilir ve Şekil 2.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Atterberg limitleri.

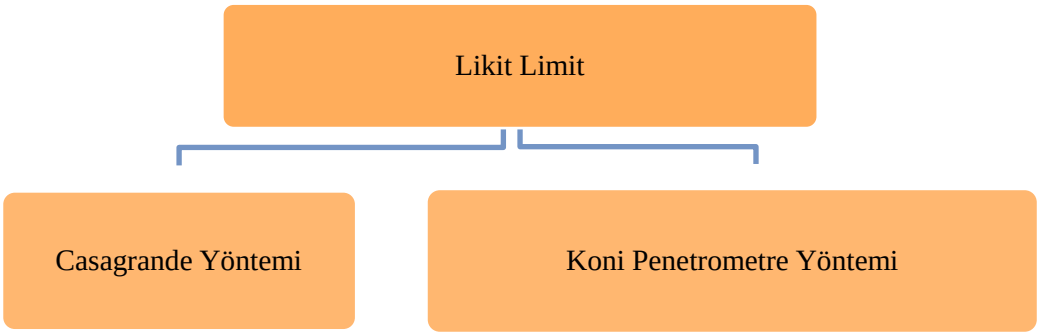
Dr. Atterberg, ilk olarak 1911'de tarım zeminlerinin sınıflandırması için bir tanımlama yapılmıştır. Prosedürler, 1932'de Casagrande tarafından mühendislik amaçları için kullanılmıştır. Zeminin tanımlanmasında ve zeminin sınıflandırılmasında önemlidir. Zemin kıvamı, silt ve killeri birbirinden ayırmak için pratik ve ekonomik bir yoldur (Önalp ve Arel, 2013).

Atterberg limitleri ve zeminin doğal su içeriği göre zeminde iki parametre belirlenebilir. Bunlar plastiklik indisi (PI) ve likitlik indisi (LI) 'dir. Plastisite indisi (PI) özellikle şişen zeminlerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılır ve ön araştırmalarda mutlaka belirlenmesi gerekir (Demir ve Kılıç, 2010).

2.5.1 Likit limit (W_L veya LL)

Zeminin kendi ağırlığı altında akabildiği en düşük su içeriğidir. Farklı bir ifade ile, plastik kıvam ile likit kıvamı birbirinden ayıran sınır su muhtevasıdır. Zeminlerin likit limitinin belirlemek için tercih edilen BS İngiliz Standardı yöntemidir.

Belirtilen kütlede standardize edilmiş koninin zemine nüfuz etmesinin ölçülmesine dayanır, likit limitinde koni penetrasyonu 20 mm'dir. Likit limit belirleme yöntemleri Şekil 2.12.'de gösterilmiştir.

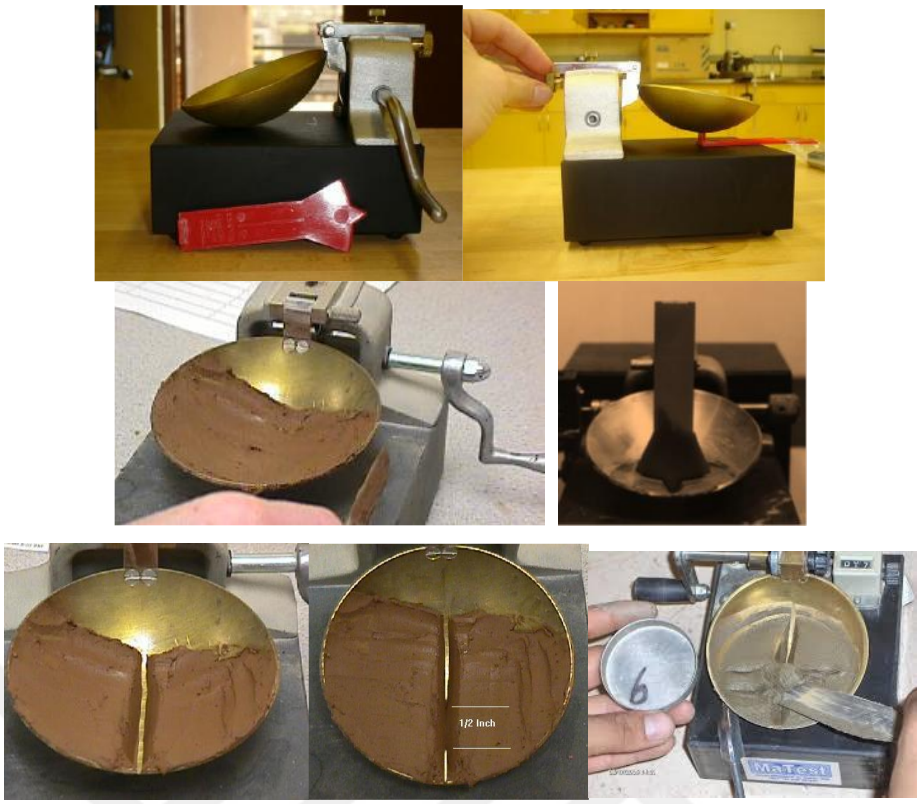


Şekil 2.12. Likit limit belirleme yöntemleri.

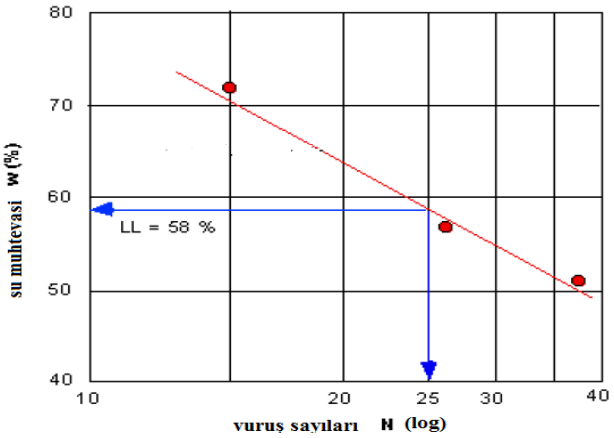
2.5.1.1 Casagrande yöntemi

Bu yöntem Casagrande tarafından önerilmiştir. Yöntemde 40 No'lu elekten elenerek kurutulan zemin numunesi üzerinde sırasıyla aşağıdaki işlemler yapılır ve Şekil 2.13.'de gösterilmiştir.

- %20 oranında su, zemine ilave edildikten sonra homojen bir şekilde karıştırılır.
- LL cihazı kabına (pirinc kap) bir zemin örneği yerleştirilir (yaklaşık 8-10 mm'lik en derin kısım).
- Bir oluk açılır (tabanda 2 mm).
- Cihaz çalıştırılır, darbe sayısı (N) sayılır.
- Zemindeki oluk 0.5 inç mesafede birleştiğinde cihaz durdurulur.
- Bir örnek alınır ve su içeriği bulunur.
- Test üç kez [N ~ (10-20), N ~ (20-30) ve N ~ (35-45)] yapılır .
- 25 darbeye karşılık gelen su içeriği zeminin likit limiti (LL) alınır. Şekil 2.14.'de gösterilmiştir



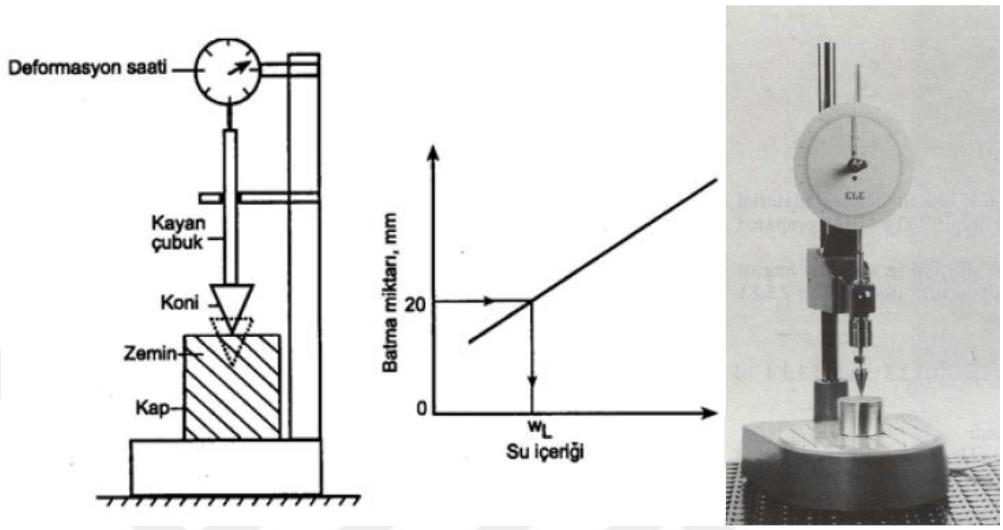
Şekil 2.13. Casagrande Yöntemi ile likit limittin belirlenmesi (Anonim).



Şekil 2.14. Vuruş sayıları ile su içerigi ilişkisi (Anonim).

2.5.1.2. Koni penetrometre (Cone penetrometer) yöntemi

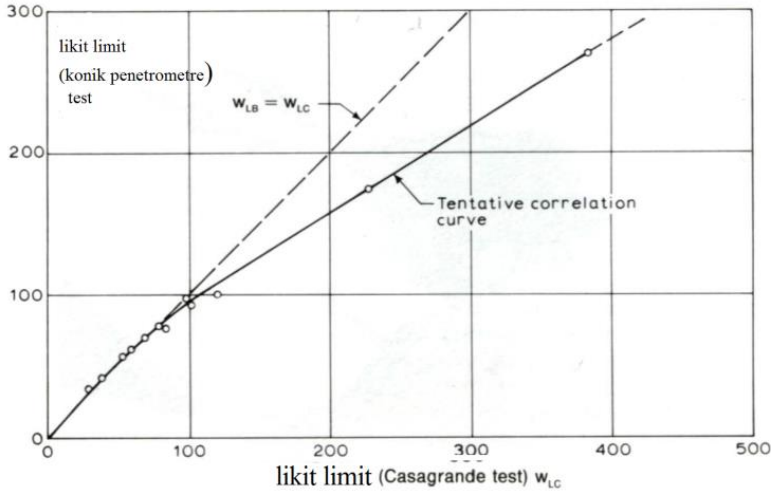
30° koni açısı olan 80 g'lık ağırlıkta bir koninin 20mm kadar zemine nüfuz ettiği su içeriği olarak alınır. Koni penetrasyon aleti Şekil 2.15.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Koni penetrasyon aleti (Anonim, 2019)

Casagrande yöntemi ile koni penetrasyon yönteminin karşılaştırması

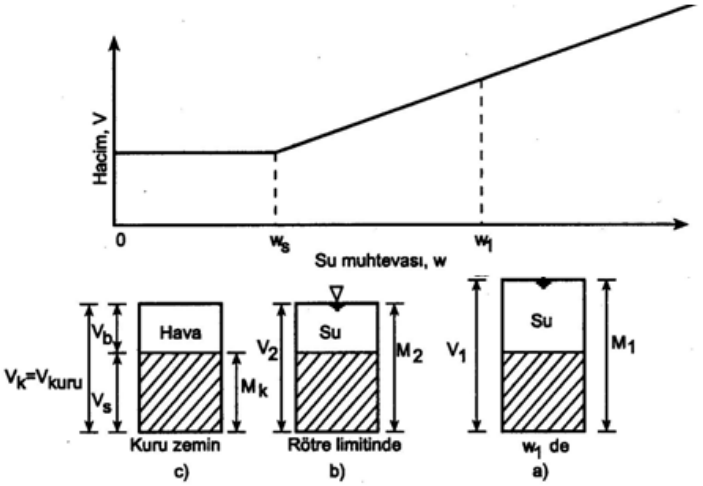
LL <100 için sonuçlar uyumludur. Şekil 2.16.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Casagrand yöntemi ile koni penetrasyon yöntemi, likit limit sonuçlarının korelasyonu (Littleton ve Farmilo, 1977).

2.5.2. Rötre (büzülme) limiti (Ws veya SL)

Kuruma ile zemin hacminde azalmanın sona erdiği sınır su muhtevası rötre limiti olarak tanımlanır. Hacım ve su içeriği ilişkisi Şekil 2.17.'de gösterilmiştir. Ayrıca büzülme durumu Şekil 2.18.'de gösterilmiştir ve killerde rötre çatlakları Şekil 2.19.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. V-w ilişkisi (Anonim, 2019).



Şekil 2.18. Büzülme durumu.



Şekil 2.19. Killerde rötre çatlakları (Anonim, 2019).

2.5.3. Plastik limit (wp veya PL)

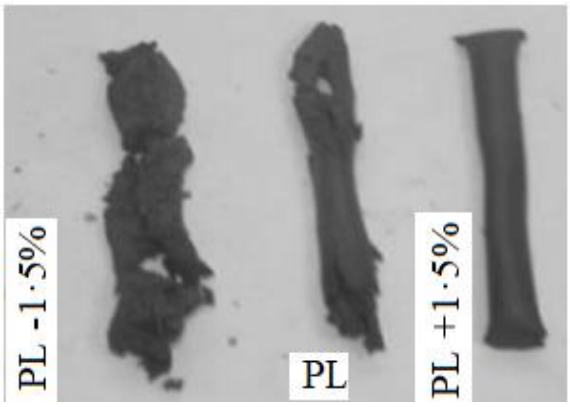
- Plastik ve yarı katı durumları birbirinden ayıran sınır su içeriğidir. Zeminde plastik davranışın başladığı su muhtevası olarak da tanımlanabilir.
- Silindirik zemin çubukları yuvarlandığında çapı 3.2 mm (1/8 inç) olduğunda kılcal çatlaklar görüldüğü andaki su içeriğidir.

  Zeminin Standart, kuru ve ıslak tarafı Şekil 2.20.'de gösterilmiştir.

  PL: Standart plastik limit (PL)

  PL -1·5%: Standart plastik limitinin kuru tarafı

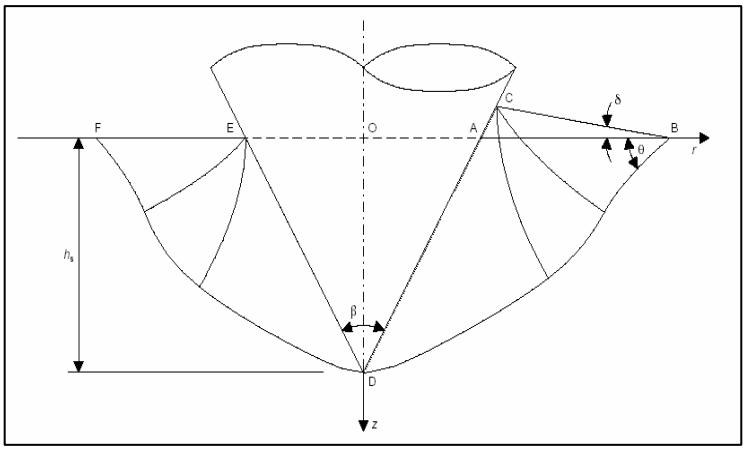
  PL +1·5 %: Standart plastik limitinin ıslak tarafı



Şekil 2.20. Zeminin plastik davranışı (Tefera, 2013).

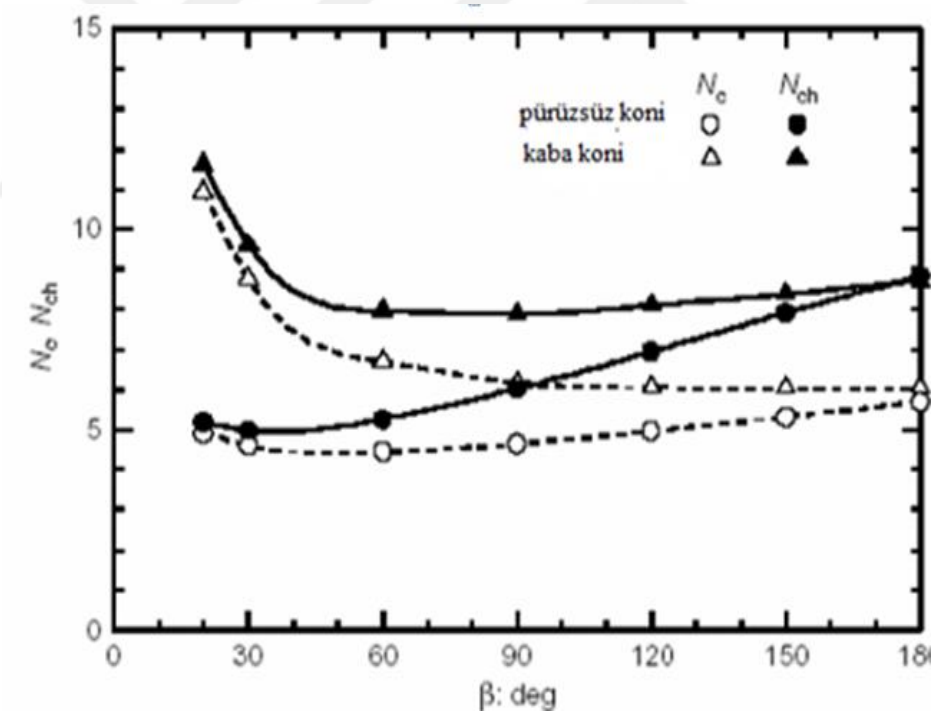
2.6. Koni Penetrasyon Teorisi

Düşen koni testi başlangıçta İskandinavya'da geliştirilmiş ve killerin likit limitinin belirlenmesinde standart yöntem olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Koninin geometrisi, koni tepe açısı, β ve penetrasyon derinliği, hs (Şekil 2.21). Koninin zemine uyguladığı düşey kuvvet Q'dur ve zeminin özellikleri, maksimum kayma gerilmesi, Su (kayma mukavemeti) ve hacim birimi ağırlığı, γ. ile verilir (Rashid, 2005).



Şekil 2.21. Düşen konisi testinin şematik diyagram (Koumoto ve Houlsby, 2001).

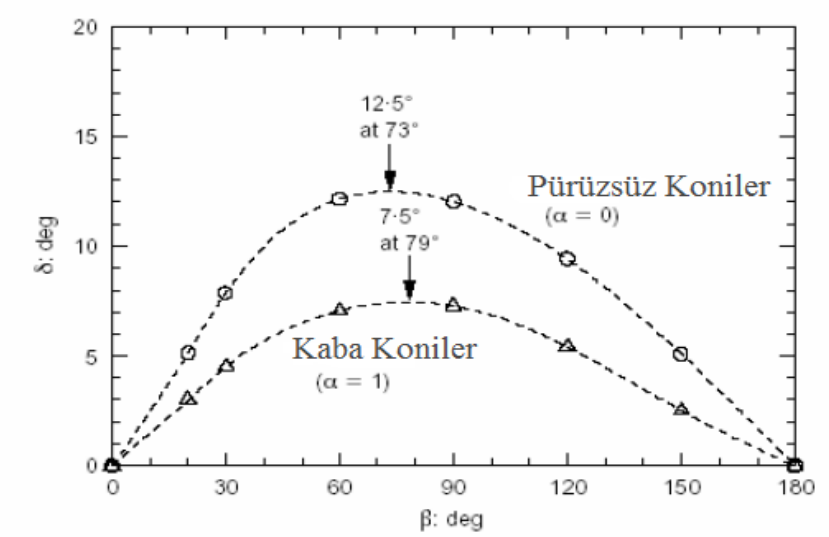
Kaba koniler için Nch ve Nc değerleri (beklendiği gibi) daha büyüktür. Pürüzsüz konilerin Nch değerleri herhangi bir değer için Nc değerlerinden daha büyüktür. Şekil 2.22.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Pürüzsüz ve pürüzlü (kaba) koniler için taşıma gücünün hesaplanması(Koumoto ve Houlsby, 2001).

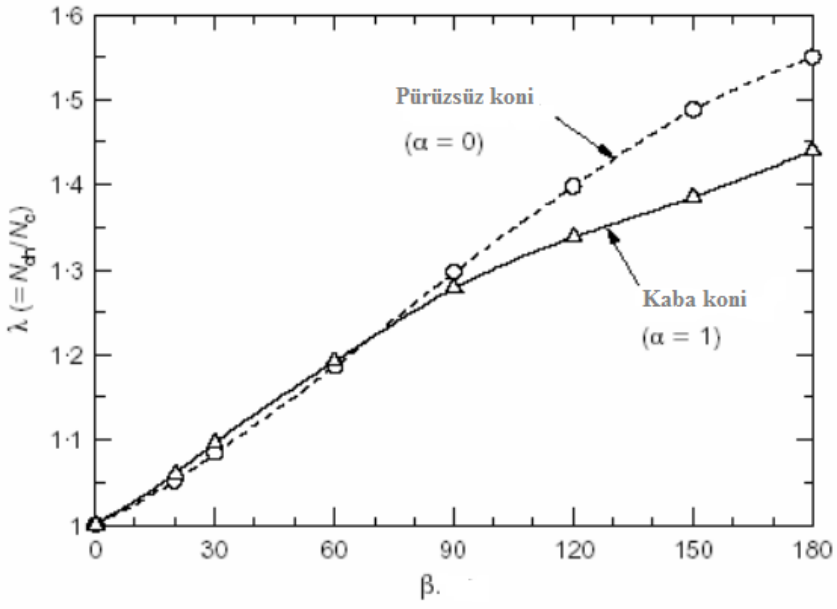
2.6.1. Pürüzsüz ve pürüzlü (kaba) konilerin analizi

Şekil 2.23'da eğri yüzeyin açısı (δ) ve koni açısı (β) arasındaki ilişkiyi gösterilmiştir. δ değerleri, hem β = 0^o hem de β = 180^o için sıfırdır. (Rashid, 2005).



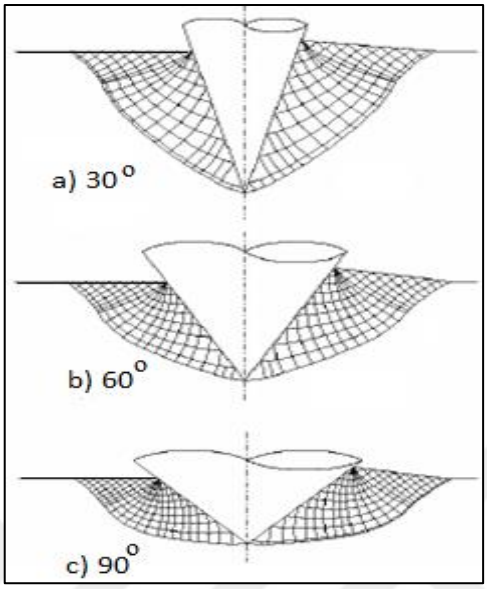
Şekil 2.23. δ ve koni açısının (B) arasındaki ilişki faktörleri (Koumoto ve Houlsby, 2001).

(B=80^o) altında λ değerleri pürüzsüz ve kaba koniler için aynıdır. Bu değerin üzerinde, pürüzsüz koni, pürüzlü (kaba) koni'dan daha fazladır. Şekil 2.24.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Koni Açı ile λ = Nch / Nc değişimi (Koumoto ve Houlsby, 2001).

Şekil 2.25'da kayma hattının alanları gösterilmiştir. Pürüzsüz koniler için kayma hattının alanı B değeri artıkça artar. pürüzlü (kaba) koniler için deforme olan bölgenin, B değeri 90º 'den daha büyük değerler için sabit kalır (Rashid, 2005).



Şekil 2.25. Koni açılarının kayma yüzeyleri (Koumoto ve Houlsby, 2001).

2.7. Plastik Limit Belirleme Yöntemleri

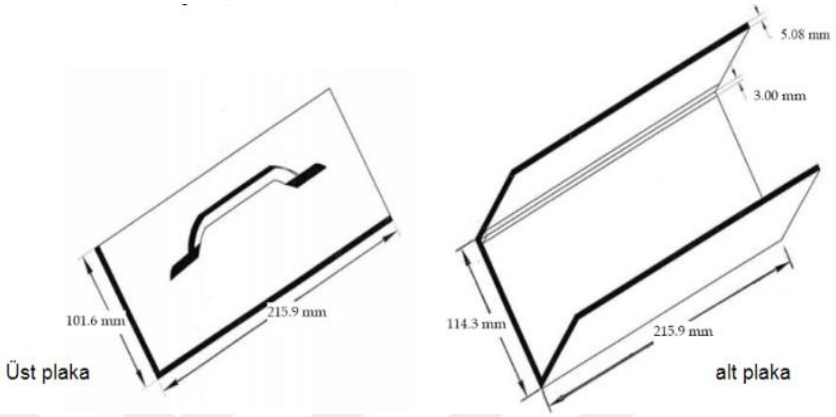
Plastik limitleri belirlemek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Standart elle yuvarlama yöntemi büyük ölçüde deneyi yapan kişinin verimliliğine bağlıdır ve çoğu zaman tutarsız veya güvenilmez sonuçlar verebilir. Bu çalışmada operatöre çok fazla bağımlılık olmadan, her zaman tutarlı ve güvenilir sonuçlar veren yeni yöntemler araştırılmıştır (Rashid, 2005).

2.7.1 Yuvarlanma cihazı kullanılarak plastik limitin belirlenmesi (rolling device)

Yuvarlanma cihazı yöntemi daha az operatöre bağlı olup, kolay ve ekonomiktir. Kohezyonlu zeminlerde plastik limiti belirlemek için güvenilir bir tekniktir. Bu nedenle, yuvarlanma cihazı, saf killerin plastik limitinin ölçülmesinde başarıyla uygulanabilir.

2 mm ve 4 mm lamine selüloit cam kullanılarak bir plastik limit-yuvarlanma cihazı imal edilmiştir. Bobroswki ve Griekspoor (1992), Şekil 2.26'de gösterilen boyutlarda üç taraflı bir kutu oluşturmuştur. Deney başında zemine farklı oranlarda su eklenerek homojen olarak karıştırılmıştır. Başlangıçta elle yaklaşık 5-10 mm'lik

silindirik çubuklar elde edilmiştir. Sonra bu çubuklar yuvarlanma cihazının alt plakasına yerleştirilerek aşağı doğru kuvvet uygulanarak hareket ettirilmiştir. Üst plaka 3 mm yan raylarla temas edene kadar yuvarlanma hareketine devam edilmiştir. Belirli çapa gelince silindir çubuklarda çatlaklar oluşmaya başlayana kadar harekete devam edilir. Bu noktadan sonra Casagrande prosedürü ile aynıdır (Rahman ve ark., 2001).



Şekil 2.26. Yuvarlanma cihazı izometrik görünümü (Ishaque ve ark., 2010).

2.7.2. Koni penetrometre cihazı kullanılarak plastik limitin belirlenmesi

Bu yöntemde likit limit için kullanılan koni penetrasyon deney aletinin koni kısmı değiştirilerek plastik limitin belirlenmesinde kullanımı amaçlanır. Aşağıda farklı araştırmacılar tarafından öneriler farklı koni ağırlığı ve açısına bağlı olarak geliştirilen yöntemler anlatılmıştır.

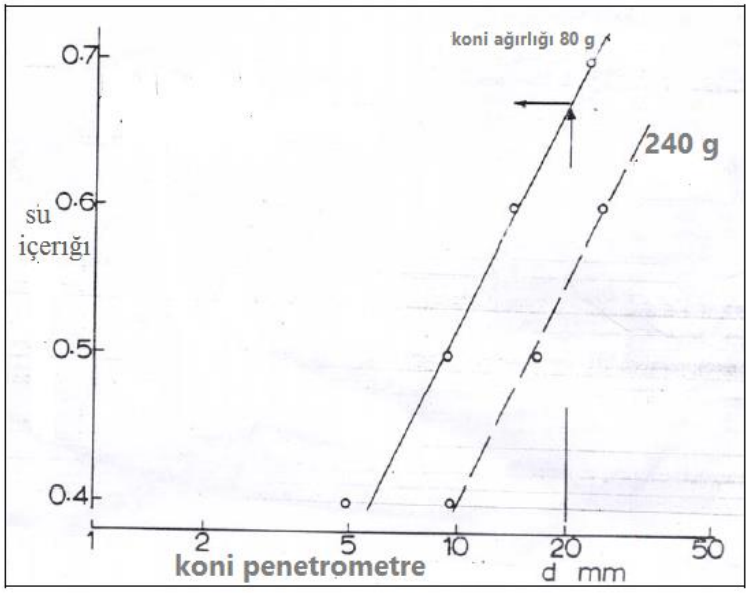
2.7.2.1 (Wood ve Wroth, 1978) tarafından önerilen yöntem

(Wood ve Wroth, 1978), standart likit limit konisinden 3 kat daha ağır (240 g) bir koni kullanmayı önerilmiştir. Likit limit deneyinde kullanılan satandart koni ile aynı geometriye ve aynı penetrasyon derinliğine sahiptir. Penetrasyon derinliği 26 ile 3 mm arasında değiştiğini varsaymışlardır. Su içeriği değerleri ve logaritmik olarak koninin batma değerleri arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu bulmuşlardır. Bu nedenle, plastik limiti belirlemek için, su içeriği değerleri ile logaritmik koni penetrasyon değerleri arasında yarı logaritmik bir ilişki geliştirmişlerdir (Rashid, 2005).

Yapılan çalışmadan, (Wood ve Wroth, 1978) konisini kullanarak penetrasyon derinliği 20 mm derinliğindedir. Önerilen koni Şekil 2.27'de gösterilmiştir. Şekil 2.28'de Bir kil örneği için koni penetrasyon testlerinin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2.27. (Wood ve Wroth, 1978) 'in önerdikleri koni.



Şekil 2.28. Bir örnek kilide koni penetrasyon testlerinin sonuçları (Wood ve Wroth, 1978).

2.7.2.2 (Feng, 2004) tarafından önerilen yöntem

(Feng, 2004) standart likit limit konisini önermiş olup ancak daha küçük bir numune kabı kullanılmıştır.

Tao-Wei (Feng, 2004)'e göre, (Karlsson, 1961), (Wasti ve Bezirci, 1986) , (Wasti ve Bezirci, 1986) ve (Feng, 2000) 'in verilerinden, yeniden kalıp içersine yerleştirilmiş killerin (remoulded kil) su içeriği, penetrasyon ve likitlik indesi arasındaki ilişkiye dayanarak bu yöntemi önermiştir.

Feng, plastik limit değerinin bir ölçüsü olarak su içeriğini 2 mm penetrasyon derinliğinde kullanmanızı önerir (Rashid, 2005).

10 ila 3 mm arasındaki koni penetrasyonları için, zemin numunesi nispeten katıdır ve 40 mm derinliğindeki ve 55 mm çapındaki numune kapı, plastik limit testi için görünüşte fazla büyüktür. Böylece, iç çapı 20 mm ve derinliği 20 mm olan küçük bir numune kabı kullanılmıştır, 10 mm'den daha az bir koni nüfuzu için 6,3 cm^3 zemin numunesi içerecek tasarlanmıştır (Rashid ve ark., 2008a). Şekil 2.29 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Küçük numune kabı (Feng, 2004).

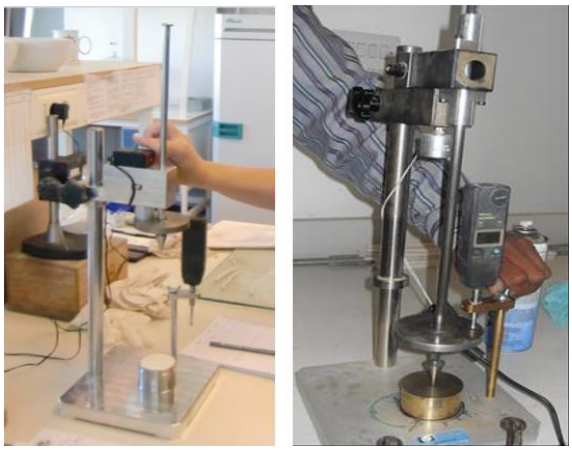
2.7.2.3 Modifiye koni penetrometre cihazı kullanılarak plastik limitin belirlenmesi

Bu yöntemde kullanılan likit limit deneyinde kullanılan standart koni aletinde geçerli olan ağırlığın yanı sıra koninin düşme mesafenin yüksekliği de değiştirilerek plastik limitin belirlenmesi amaçlanmıştır. Cihaz Şekil 2.30.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Modifiye koni penetrasyon cihazı (Tefera, 2013)

Bu yaklaşımda, likit limit testi için kullanılan düşen koni yaklaşımına dayanmaktadır. Benzer koşullar altında gerçekleştirildiğinde daha doğru ve genellikle tekrarlanabilir. Modifiye koni penetrasyon cihazı kullanma esnası Şekil 2.31'de gösterilmiştir.



Şekil 2.31. Modifiye koni penetrasyon cihazı kullanma esnası (Tefera, 2013)

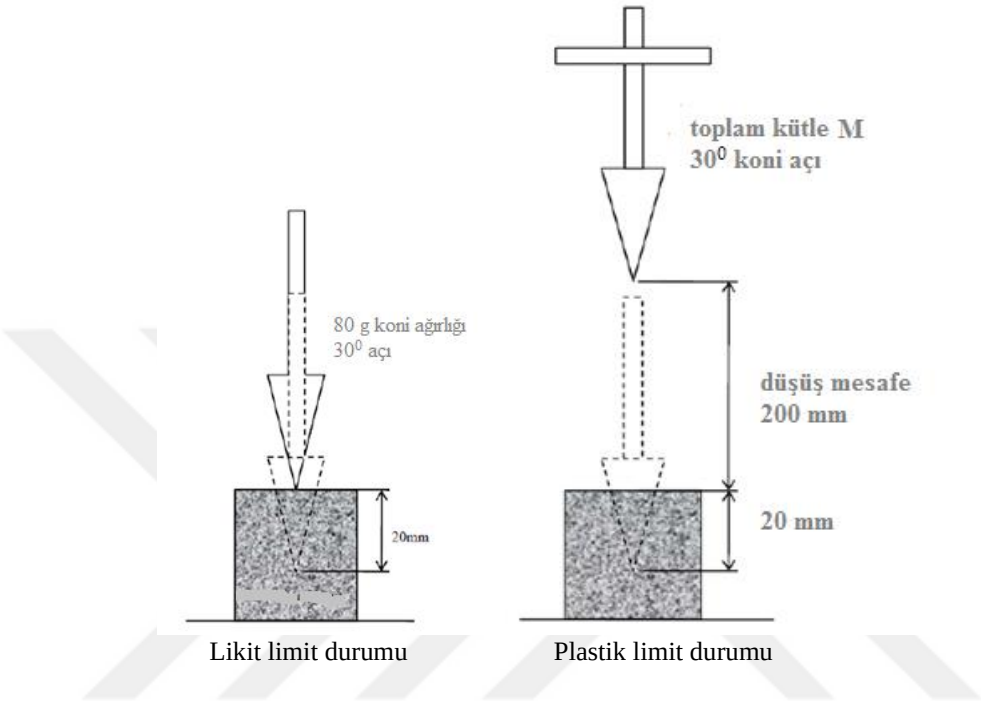
Plastik Limitin belirlenmesi için çeşitli yöntemler son yıllarda geliştirilmiştir. (Sivakumar ve ark., 2009) tarafından ince malzemelerin plastik limitinin belirlemesi için yeni tekniğin uygulanabilirliği incelenmiştir (Tefera, 2013).

Önerilen yaklaşım aynı zamanda likit limit W_L testi için kullanılan düşen koni yaklaşımına prensip ve prosedürlerine dayanmaktadır. Önerilen yaklaşım, koninin zemine nüfuz etmesiyle yayılan enerjiye dayanır. Zeminin likit limit (W_L) 'i, 30° koni açısı olan 80 g'lık bir koninin 20 mm kadar zemine nüfuz ettiği su içeriği olarak alınır. Bu koni zemine girdiğinde, düşen koninin bıraktığı enerji, zemin içinde dağılır. Şekil 2.32'de koninin, plastik ve likit limit durumunda olan koni zemine nüfüz etmeden önce ve sonra gösterilmiştir. Koninin serbest bıraktığı enerji, koninin penetrasyon öncesi ve sonrası potansiyel enerji farkıdır. Plastik limit (W_P)'deki kilin drenajsız kayma dayanımı, likit limit (W_L) 'deki mukavemetinkinden yaklaşık 100 kat daha yüksektir (Tefera, 2013)

Zemine yapılan iş W_L'dekinen 100 kat daha fazla olacaktır. Bu nedenle, W_P'de hazırlanan kilin h (20 mm) mesafesine nüfuz etmesi için gereken enerji mesafeden, 100 x mgh mevcut koni üzerinde kullanılan W_L testinde, bu yüksek enerji aşağıdaki şekillerde elde edilebilir; (Tefera, 2013)

a. Koni kütlesini 8 kg'a yükseltmek,
b. 80 g koni kütlesini korurken koninin düşen mesafesini arttırmak,
c. Hem koni kütlesini artırmak hem de düşme mesafesini dâhil etmek,

Koni kütlesini 8 kg'a çıkarmak, sağlık ve güvenlik konularına neden olabileceği için pratik değildir. 80 g koni kütlesi korunacaksa, koninin düşen mesafesi 2 m olmalıdır. Bu yine pratik bir seçenek değildir. Bu nedenle (c) seçeneği daha fazla kabul edilir. Gerekli enerjiyi geliştirmek için uygundur ve Şekil 2.32'de gösterilmiştir. (Tefera, 2013).

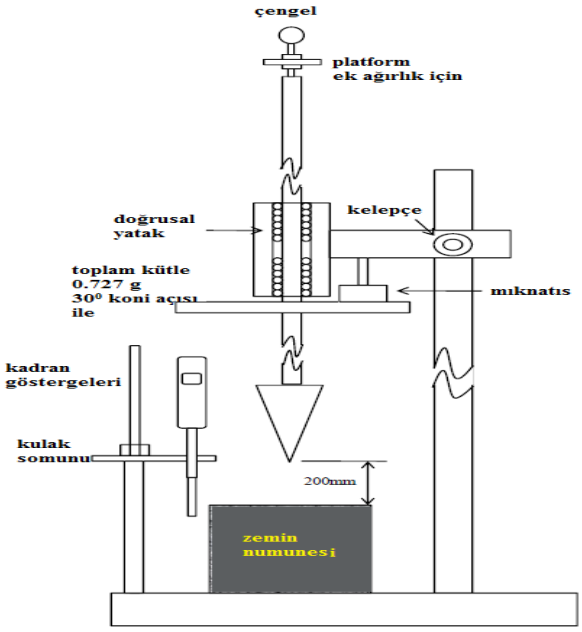


Şekil 2.32. Koni penetrasyon deneyinde likit limit ve plastik limit durumları (Sivakumar, 2011)

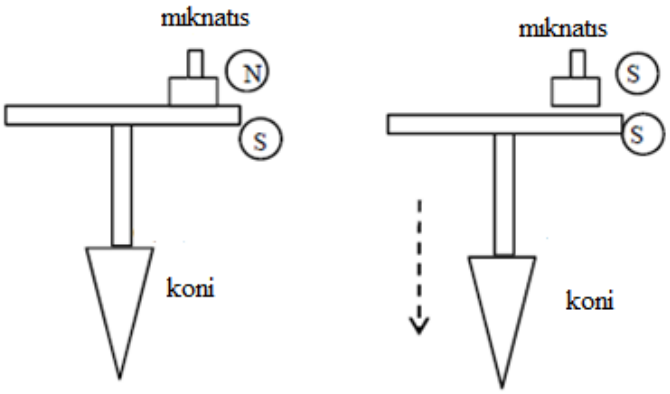
Plastik limit (Wp) yönteminde koni penetrasyon, numune yüzeyine temas etmeden önce, 200 mm'lik açık bir mesafe boyunca sabit bir konumdan serbest düşürülür. BS ve Hint Standartları likit limit (W_L) yöntemi için, koni zemine 20 mm nüfuz eder. Önerilen plastik limit (W_P) yönteminde, 200 mm'lik serbest düşüşten sonra PL (100) koşulu, zemine 20 mm'lik nüfuz eden koni ile tanımlanır. Yani zemin düşen mesafesi 220 mm'dir. Basit bir hesaplama, önerilen cihaz için gerekli olan koni kütlesi 0,727 kg'dır; Bu, potansiyel enerjinin 100 katını üreteceği anlamına gelir. Deneyin esası, koni kütlesini ve düşme mesafesini artırarak deneyleri tamamlamaktır. Önerilen cihaz için gerekli olan koni kütlesi 0.727 kg'dır ve 220 mm mesafedir (Tefera, 2013).

İnce bir çubuğa standart bir koni eklenir, toplam kütle 0,727 kg olan koni bu lineer rulmanlar ile beslenir. İnce bir metal disk, koninin hemen üstünde yer alır ve çerçeveye bağlı bir mıknatıs tarafından yerine tutulur. Bir dijital ayar göstergesi, bir kanat somunu ile yerinde tutulan bir bağlantı çubuğuna bağlanır. Böylece koni

penetrasyonu sırasında uzaklaşabilir ve penetrasyon okumaları sırasında tekrar pozisyona geri alınabilir. Manyetik alan değişikliklerini, kuzeyden güneye veya güneyden kuzeye değiştirilmiştir. Mıknatıs serbest bırakmak için gücü kapatma seçeneği, bazı artık manyetik akı ile 0.727 kg kütleye bırakabileceğinden ve güç kapatıldığında koniden mıknatıstan hemen çıkmayacağı için seçilememiştir. Cihazın fotoğrafı Şekil (2.33)'de gösterilmiştir. Şekil (2.34)'de kutup değişimi (polarizasyon) gösterilmiştir (Tefera, 2013).



Şekil 2.33. Cihazın şematik diyagramı (Sivakumar, 2011).



Gücü tersine çevirmeden önce Gücü tersine çevirdikten sonra

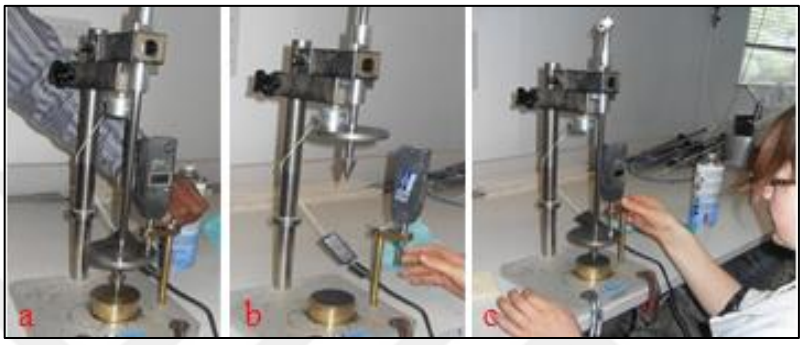
Şekil 2.34. Kutup değişimi (polarizasyon) (Sivakumar, 2011).

Numune özenle hazırlanır ve ekstra yüksekliği dikkatlice kesilerek düzenlenir. Numune kabı koni aletinin taban plakasına yerleştirilir ve koninin ucu numune kabının kenarına temas etmesinden emin olunur.

Şekil 2.35 (a)' da dijital gösterge sıfıra ayarlanır,

Şekil 2.35 (b)'de koni daha sonra numuneden 200 mm konumuna geri döndürülür.

Şekil 2.35 (c)'de koninin düşmesine izin verilir ve son okuma alınır (Tefera, 2013).



Şekil 2.35. Deneyin yapılışı, (a) sıfır okuma ayarı, (b) koniyi kendi konumuna geri almak, (c) son okuma (Tefera, 2013).

Bu yöntemin dezavantajları, tandart prosedüre kıyasla, hazırlanması daha fazla zaman alır. Test için örnekler çeşitli su içerikleri için en az üç kez tekrarlanır. Örnek başına 20 ila 30 dakika sürdüğü görülmüştür. Buna göre bir testin tamamlanması için 60-90 dakika sürdüğü gözlenmiştir. Oysa Standart elle yuvarlama prosedürü kullanılarak gerekli süre 10-20 dakikadır.

2.7.2.4 Modifiye koni penetrometre kullanılarak enerji temelli yaklaşım

Bu yöntem likit limit testi için kullanılan koni aletine dayanmaktadır. Plastik limitte zemine yayılan enerji, likit limit deneyindekinden 100 kat fazladır. Bu nedenle aynı koşullar altında plastik limiti belirlenmesi doğru olmaz. Bu yüksek enerji aşağıdaki şekillerde elde edilebilir;

a. Koni kütlesini 8 kg'a yükseltmek,
b. 80g koni kütlesini korurken koninin düşen mesafesini arttırarak,
c. Hem koni kütlesini artırarak hem de düşme mesafesini dâhil ederek

(a) seçeneğinde, bu ağır koniyi kullanmak test sırasında sağlıklı ve güvenlikli değildir. (b) seçeneğinde, koninin düşme mesafesi 2 m olmalıdır. Bu pratik bir seçenek değildir. Bu nedenle (c) seçeneği daha fazla kabul edilir. Gerekli enerjiyi geliştirmek için uygundur.

BS Hint Standartlarında likit limit (W_L) yöntemi için, koni W_L'te zemine 20 mm kadar nüfuz eder. Önerilen plastik limit W_P yönteminde, numune yüzeyine temas etmeden önce sabit bir konumdan 200 mm'lik açık bir mesafeden serbestçe düşme, yani, toplam düşme mesafesi 220 mm'dir. Basit bir hesaplama yapıldıktan sonra önerilen cihaz için gerekli olan koni kütlesi 0.727 kg'dır ve 30° açı ile (aynı likit limiteki koni açısı) . Bu, mesafe'de ve bu ağırlığ'ta enerjinin 100 katını çıkarmış olur. Bu yöntemde kabul edilen sistem Şekil 2.36 'de gösterilmiştir (Saxena ve Arora 2016).



Şekil 2.36. (0.727) kg koni ağırlığın'da koni Penetrometre aleti (Saxena ve Arora, 2016).

Çok yönlü sonuçlar elde etmek için zeminin PI plastiklik indesinin 10 ila 40 arasında olması gerekmektedir. Zemin örnekleri kırılarak toz haline getirilmiş ve sonra havada kurutulmuştur. Zemin numunesi kabın içerisine dikkatlice yerleştirilmiştir. Likit limit ölçmek için kullanılan kap 55 mm ve 40 mm derinliğindeki standart kapa sıkıştırılmıştır (IS 272 02: Bölüm 5: 1985). Numune hazırlandıktan sonra, fazlalıklar dikkatlice kesilerek düzenlenmiştir. Numune kabı daha sonra koni penetrometre taban plakasına yerleştirilir ve koninin ucu numune kabının kenarına temas etmesinden emin olunur.

İlk okuma ya sıfıra ayarlanır ya da dereceli ölçekte gösterildiği gibi not edilir. Koni daha sonra numuneden, Şekil (2.37)'deki gibi 200 mm pozisyonuna geri getirilir. Dikey kelepçe daha sonra koninin kendi ağırlığı altında zemine nüfuz etmesine izin verilir Şekil (2.38). Koni serbest bırakılır ve son okuma alınır, 5 saniye sonra koninin penetrasyonu en yakın milimetreye kaydedilir. Test en az 4 kere tekrar edilir. Su içeriği ve koni penetrasyonun değerler ile bir grafik çizilir. Grafik'ta 20 mm'lik koni penetrasyonuna karşılık gelen su içeriği zeminin plastik limiti (W_P) olarak alınır. (Saxena ve Arora, 2016).



Şekil 2.37. Deney düzeneği (koninin alınması) (Saxena ve Arora, 2016).



Şekil 2.38. Deney düzeneği (koninin serbest bırakılması) (Saxena ve Arora, 2016).

2.7.3. Ekstrüzyon yöntemi ile plastik limitin belirlenmesi

Ekstrüzyon; bir metal, plastik veya zemin bloğunun basınçla zorlanarak daha dar bir kesitten geçirildiği mekanik bir süreçtir. Bu yöntemde operatör hatalarını en aza indirmek için zeminlerin plastik ve likit limitlerinin yeniden tanımlanması amaçlanmıştır. Son derece basit, güvenilir, tekrarlanabilir ve ekonomiktir. Bir hazne ve basit bir tek veya üç eksenli basınç testi düzeneğine göre kolayca uyarlanabilir (Kayabalı, 2007).

Farklı su içeriğine karşılık gelen ekstrüzyon basınçları belirlenmiştir; bu iki parametre arasında güçlü bir yarı logaritmik ilişki vardır. Çalışma kapsamında yirmi farklı inorganik zemin örneği test edilmiştir. Ters ekstrüzyon deneylerinin sonuçlarını değerlendirerek, plastik limit ve likit limite yeni tanımlar yapılmıştır (Kayabalı, 2007).

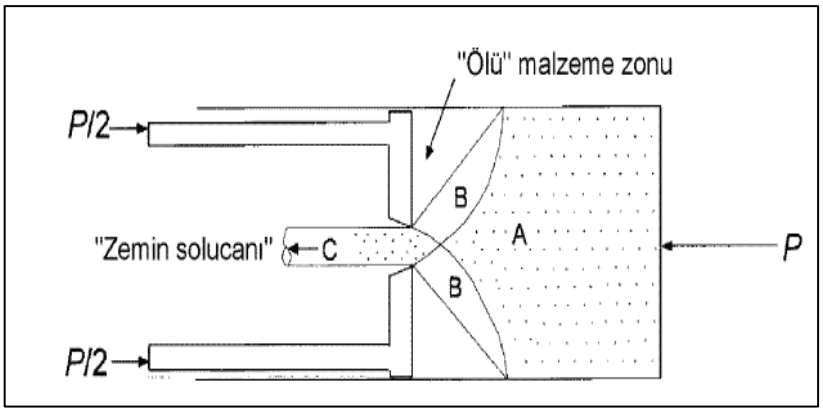


Şekil 2.39. Ters ekstrüzyon düzeneği (Kayabalı ve ark.).

Bu yöntemde bir kapatma haznesine malzeme yerleştirilir, ortada bir delik bulunan bir piston ile sıkıştırıldığında, pistondaki delikten çıkar (Şekil 2.40).

(Şekil 2.40 a) hazne içine rijit biçimde yerleştirilen malzeme. (Şekil 2.40 b) zonuna eriştiğinde deforme olarak piston deliğinden çıkarılır (Şekil 2.40 c). Bu durumda malzemeye uygulanan gerilme sünme limiti düzeyinde olup, delikten çıkan malzemeye bu plastik sünme zonunda daha fazla gerilme uygulanamaz (Whyte, 1982).

Ters ekstrüzyon deney düzeneği bir kap ve bir tokmaktan (pistondan) oluşturur (Şekil 2.39). Kabın iç çapı 38 mm, yüksekliği 150 mm'dir. Tokmağın orta kesiminde 6 mm'lik bir delik, tokmak ile kabın iç duvarı arasında 0,2 mm lik bir boşluk bulunmaktadır (Kayabalı ve ark.). Haznenin çapı ve deliğin çapı (Whyte, 1982) kullandığı alan kesit oranı (R=40) esas alınmıştır (Kayabalı, 2007).

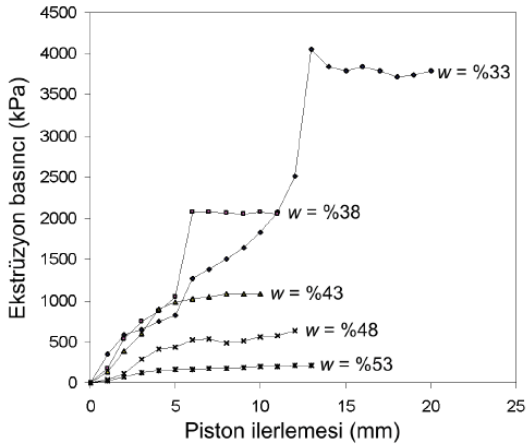


Şekil 2.40. Ters ekstrüzyon aleti ((Whyte, 1982)'den deşiğtirilerek).

Deney yapılışı aşağıdaki sırada gerçekleşmektedir (Kayabalı, 2007)

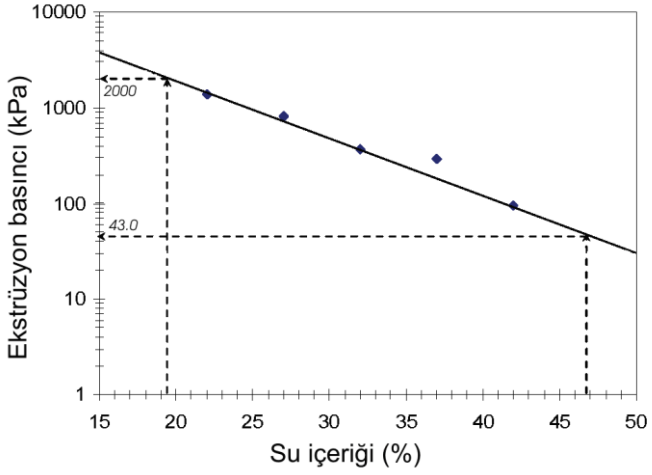
- Belli bir su içeriğinde homojen şekilde karıştırılmış bir zemin malzemesi hazne içerisine hafifçe sıkıştırılarak yerleştirilir.
- Zemin numuesi + su karışımı içeren oda farklı yükleme hızlarına sahip bir prese yerleştirildikten sonra, piston zemini sıkacaktır ve sonunda karışım malzemesi, pistonun ortasındaki delikten çıkar.
- Her bir örnek için 4 ila 6 arasında değişen su içeriği ile tekrarlanır.
- Deney pistonunun ilerlemesi ve ekstrüzyon kuvveti sürekli olarak kaydedilir.
- Deneylerde 5 mm / dak yükleme hızı uygulanır.
- Elde edilen ekstrüzyon basıncı ve piston hareketin'den bir grafik oluşturulur.

Şekil 2.41'deki grafiklerden elde edilen ekstrüzyon basıncı, su içeriği hakkındaki verileri göstermektedir. Şekil 2.42'de benzer yeni bir yarı logaritmik grafiğe dönüştürülür. En uygun doğrusal zarfın altında hiçbir nokta bulunmayacak şekilde çizilmiştir. Aynı şekilde, ekstrüzyon basıncı-su içeriği ilişkisini temsil eden her noktanın aynı doğrusal çizgi üzerine düşmesi beklenir. Doğrusal çizgi üzerinde meydana gelen sapmaların sebebinin zemin-su karışımının deney sırasında hazne ile piston arasında beklenmedik sıkışmalardan dolayı olduğu düşünülmektedir. Bu durumda gerekli ekstrüzyon kuvveti (gerilmesi) artar; aynı su içeriğinin ekstrüzyon basıncı daha yüksektir ve bu noktada ekstrüzyon basıncı-su içerik noktası dikey yönde yukarı doğru kaymaktadır. Bu sebepten dolayı, yirmi adet numunenin her biri için çizilen zarfın, doğrusal çizgi altında hiç bir nokta kalmayacak şekilde oluşturulmasına özen gösterilmiştir (Kayabalı, 2007).



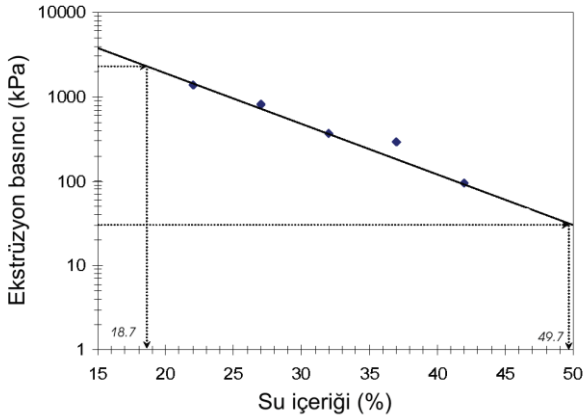
Şekil 2.41. Değişen su içeriğine karşılık gelen ekstrüzyon basınçları.(Kayabalı, 2007)

Ekstrüzyon basınçlarına karşılık gelen su içeriği değerleri bir numune için belirlenerek grafik çizilmiştir (Şekil 2.43). Bu grafikte Plastik limit için elde edilen ekstrüzyon basıncına karşılık gelen su içeriği değeri 2000 kPa' dır. Likit limit için ise 43.0 kPa'dır. İnce zeminlerin plastik limitine karşılık gelen ekstrüzyon basıncı 2250 kPa'dır ve likit limit için 30 kPa olarak tayin edilmiştir.



Şekil 2.43. Plastik limit ve likit limitinden ekstrüzyon basınçların belirlenmesi (Kayabalı, 2007).

Daha önce tayin edilen ekstrüzyon basınçları plastik limit ve likit limit için sırayla 2250 ve 30 kPa olan değerlerin ne ölçüde temsilci olduğunu belirlemek için, tersi uygulanmıştır. Yani, 2250 kPa'lık ekstrüzyon basıncına karşılık gelen plastik limit değeri ve 30 kPa'lık ekstrüzyon basıncına karşılık gelen likid limit değeri bulunmuştur. (Şekil 2.44) 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.44. Bir numune ekstrüzyon basınçlarından plastik limit ile likit limittin tayini (Kayabalı, 2007).

- Plastik limitin belirlenmesi için, 38 mm çapındaki hazne ile 6 mm delikli pistondan oluşan ters ekstrüzyon deneyin'de 2250 kPa'ya karşılık gelen su içeriği zeminin plastik limiti olarak tanımlanmıştır.
- Likid limit belirlenmesi için, 38 mm çapındaki hazne ile 6 mm delikli pistondan oluşan ters ekstrüzyon deneyin'de 30 kPa'ya karşılık gelen su içeriği zeminin plastik limiti olarak tanımlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kil numuneleri

Çalışma kapsamında belirli bölgeden temin edilen 3 farklı plastisiteli; orta plastisiteli kil (CL), yüksek plastisiteye yakın kil (CL) ve düşük plastisiteli kaolinit kili (CL-ML) kullanılmıştır. Killer 40 no'lu (0.425) elekten elenerek ve 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Killere ait endeks özellikleri Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği labaratuvarında deneyler ile belirlenmiştir. Kil numunelerine ait özellikler Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3 gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan killer Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan killer

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan CL (düşük plasitisite) zeminin özellikleri

Parametreler		Değerleri
Likit limit (LL, %)		26
Plastik limit (PL, %)		20.48
Plastisite indisi (PI, %)		8.13
Doğal su muhtevası (W, %)		13
Tane yoğunluğu (ρ_s, g/cm^3)		2.64
Zemin dağılımı %	Çakıl	2.7
	Kum	16.3
	Silt	51.0
	Kil	30.0

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan CL (orta plasitisite) zeminin özellikleri

Parametreler		Değerleri
Likit limit (LL, %)		35.21
Plastik limit (PL, %)		20.37
Plastisite indisi (PI, %)		14.84
Doğal su muhtevası (W, %)		20.5
Tane yoğunluğu (ρ_s, g/cm^3)		2.65
Zemin dağılımı %	Çakıl+ Kum	22.3
	Silt	12.38
	Kil	66.32

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan CH zeminin özellikleri

Parametreler		Değerleri
Likit limit (LL,%)		52.06
Plastik limit (PL,%)		22.7
Plastisite indisi (PI,%)		29.4
Tane yoğunluğu (ρ_s, g/cm^3)		29.4
Zemin dağılımı %	Çakıl	2
	Kum	7.7
	Silt	0
	Kil	90.3

3.1.2. Numune hazırlanması

Zemin örneği iki aşamada hazırlanmıştır. İlk aşama, laborauvar tipi çeneli kırıcı ile büyük zemin parçaları küçük boyutlara parçalanır ve ikinci aşamada, zemini los angeles aleti ile öğütülürmüştür. Laborauvar tipi çeneli kırıcı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Zemin örneğini kırıcıdan geçmeden önce ve sonrası Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Laborauvar tipi çeneli kırıcı.



Şekil 3.3. Zemin örneğini kırıcıdan geçmeden önce ve sonrası

Kil zemini öğütülmesi için Los Angeles deney aleti kullanılmıştır (Şekil 3.4). Öğütülen zemin örneği Los Angeles aletinden geçmeden önce ve sonrası Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Los Angeles deney aleti



Şekil 3.5. Zemin örneği Los Angeles aletinden geçmeden önce ve sonrası.

Zemini su ile iyice karıştırıldıktan sonra 3 tabaka halinde kalıp içerisine yerleştirilmiş ve tokmak ile hafifce sıkıştırılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Numune yerleştirilmesi

3.1.3. Zemin sınıflandırması

Plastisite indesi ve likit limit değerlerini kullanılarak, Zemin Sınıflandırması yapılmıştır Çizelge 3.5.'de gösterilmiştir.

Düşük plastisite LL < 35%
Orta plastisite LL = 35% - 50%
Yüksek plastisite LL = 50% - 70%
Çok yüksek plastisite LL = 50% - 70%
Ekstra yüksek plastisite LL > 90% (Rashid, 2005).

Çizelge 3.5. Zemin sınıflandırması.

Numune	Likit Limit LL	PI = LL - PL	Zemin sınıflandırması
1	35.21	14.84	CL
2	52.06	29.4	CL
3	26	5.16	CL-ML

Numune A : CL orta plastisite kil
Numune B : CL yüksek plastisiteye yakın kil
Numune C : CL-ML düşük plastisite kil

3.1.4. Plastisite indesi (PI)

Üç farklı zemin örnekleri için plastisite indesi değerleri Çizelge 3.4.'de gösterilmiştir. Plastisite indesi Eşitlik 3.1 belirlenir.

$$PI = LL – PL \quad (3.1)$$

Çizelge 3.4. Üç farklı zemin örnekleri için plastisite indesi değerleri.

Numune	Likit Limit LL	Plastik Limit PL	PI = LL - PL
A	35.21	20.37	14.84
B	52.06	22.7	29.4
C	26	20.48	5.16

3.1.5. Su muhtevasının belirlenmesi

Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 su içeriğinin belirlenmesi için kullanılır:

$$W = \frac{\text{Myaş} - \text{Mkuru}}{\text{Mkuru}} \times 100 \qquad (3.2)$$

W : su içerigi

$M_{yaş}$: Yaş zeminin ağırlığıdır

M_{kuru}: kurutulmuş zeminin ağırlığıdır

$$W = \frac{\text{Ww}}{\text{Ws}} \times 100 \qquad (3.3)$$

W_w: 105˚ ila 110˚C'de fırında kurutma ile zeminin çıkardığı suyun ağırlığıdır.

W_s: kurutulmuş zeminin ağırlığıdır.

3.2.Yöntem

3.2.1. Likit limitin belirlenmesi

Standart Koni penetrasyon (Cone penetrometer) yöntemi ile likit limit belirlenmiştir Şekil 3.7 'de gösterilmiştir. Bu yöntemde 30^0 açısı olan 80 g'lık bir koninin 20 mm kadar zemine battığı andaki su içeriği olarak alınmıştır.



Şekil 3.7. Koni penetrasyon aleti

Likit limit statik koni penetrasyon yöntemi ile belirlenmesi

- Bir kap içine yaş zemin doldurulur, koni 5 saniye süreyle batmaya bırakılır.
- Batma miktarı, mikrometre ile ölçülür.
- Zeminin su içeriği belirlenir.
- Değişik su içeriklerinde deney tekrarlanarak, su içeriği-batma (penetrasyon) miktarı ilişkisi çizilir.

Bu ilişkide, 20 mm lik batmaya karşılık gelen su içeriği, zeminin likit limitidir. (Önalp ve Arel, 2013).

3.2.2. Plastik limitin belirlenmesi

3.2.2.1. Standart yöntem (Casagrande yöntemi) ile plastik limitin belirlenmesi

Norsk Standart NS 8003-1982, geoteknik testler laboratuvar yöntemleri plastik limit için, hala Casagrande yöntemini önerir (1958). Bu prosedür mekanik bir süreç değildir ve elle yuvarlanarak yapılan bir çubuk olduğunda zeminin su içeriğini belirleyerek değerlendirilir.

40 No'lu elekten elenmiş ve kurutulmuş bir zemin örneği alınır ve bir cam plaka üzerinde elle yuvarlanarak yapılan bir çubuk oluşturulur. Yaklaşık 3 mm çapta çatlaklar görülduğu anda su içeriği alınır ve zemini plastik limiti olarak belirlenir.



Şekil 3.8. Standart elle yuvarlanma yöntemi

3.2.2.2. Yeni modifiye koni yöntemiyle plastik limitin belirlenmesi

Zeminlerin likit limiti ve plastik limiti iki farklı deney yöntemi ile belirlenir. Plastik limit ve likit limiti belirlenmesi için bir alet mevcutsa, o zaman iki test daha kolay, daha kullanışlı ve daha anlamlı hale gelebilir. Plastik limiti belirlemek için likit limitteki kullanılan koni penetrasyon aleti kullanarak birçok çalışma yapılmıştır (Rashid, 2005).

Bu tez çalışmasında üç tip koni kullanılmıştır:

- Koni (i), koni açısı 20^{o} ve ağırlığı 240 g olan konidir.
- Koni (ii), (Wood ve Wroth, 1978) tarafından önerilmiştir. Likit limit konisinin aynı ölçüme sahiptir ancak 3 kat daha ağırdır, koninin ağırlığı 240 g'dır.
- Koni (iii), likit limit deneyinde kullanılan konidir (koni 80 g ve açı 30˚).

Tüm ekipman ve test prosedürü, koni hariç, likit limit testiyle aynıdır. Çizelge 3.6 'da bu çalışmada kullanılan koniler gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Çalışmada kullanılan koni türleri.

	Koni Türü
Koni (i)	240g ve 20˚ açı
Koni (ii)	240g ve 30 ˚ açı
Koni (iii)	Standart Koni -80 g ve 30 ˚ açı



Şekil 3.9. Koni (i) 240g ve 20˚



Şekil 3.10. Koni (ii) 240g ve 30 ˚



Şekil 3.11. Koni (iii) 80 g ve 30 ˚

3.2.3. Lineer rötre deneyi

- 40 no'lu elekten elenmiş kurutulmuş bir zemin örneği alınır.
- Lineer rötre kalıbı iyice temizlenir ve yağlanır.
- Zemine farklı oranlarda su eklenerek (%10, %20, %30, %40, %45, %50) iyice karıştırılır.
- Kalıba 3 tabaka halinde yerleştirilip yüzeyi düzlenir.
- Her kalıp için su içeriği alınır.
- 24 saat etüve bırakılır.

- Numunenin kalıp içerisindeki ilk boyu bilinmektedir, etüvde kuruduktan sonraki son boyu ölçülür. Lineer rötre Eşitlik 3.3 ile aşağıdaki gibi tayin edilir:

$$\%R = \frac{\text{İlk boy} - \text{Son boy}}{\text{İlk boy}} x100 \qquad (3.4)$$

- Su içeriği ve lineer rötre değerleri ile bir grafik çizilir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Likit Limit ve Standart Plastik Limit Sonuçları

Kıvam limitleri deneylerinde kişi faktörlerinin etkisini belirlemek amacıyla geoteknik uzman olan 10 kişi ve uzman olmayan 30 kişiye yaptırılan kıvam limit deneylerinin sonuçları sırasıyla (Çizelge 4.1) ve (Çizelge 4.7) gösterilmiştir. Çalışmada 3 farklı plastisite değerine sahip; orta plastisiteli kil (CL), yüksek plastisiteye yakın kil (CL) ve Düşük plastisiteli kaolinit kili (CL-ML) kullanılmıştır. Operatörlerin aynı zemin üzerinde yaptıkları hem plastik limit hemde likit limit deneyi sonuçları verilmiştir. Likit limit deneyi koni penetrasyon kullanılarak yapılmıştır. Plastik limit deneyi standart yöntemi ile (elle yuvarlama yöntemi) yapılmıştır.

Numune A : CL (orta plastisiteli) kil

Numune B : CL (yüksek plastisiteye yakın) kil

Numune C : CL-ML (düşük plastisiteli) kil

Çizelge 4.1. Geoteknik uzmanları trafından yapılan likit limit ve standart plastik limit deneylerin sonuçları.

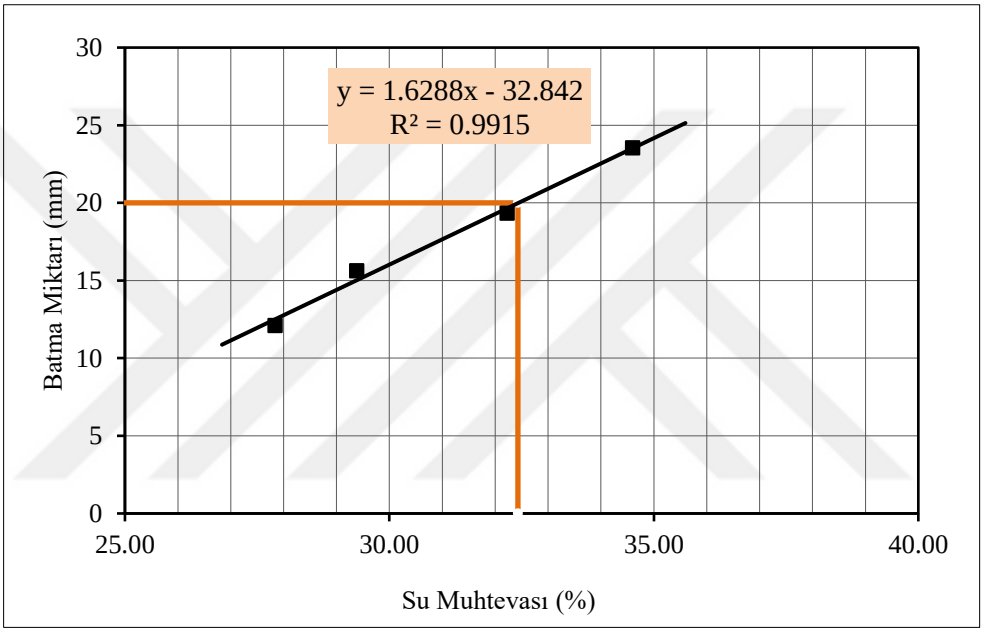
Deney	A Kil		B Kil		C Kil	
No.	WL	WP	WL	WP	WL	WP
1	32.43	16.80	45.25	22.69	26.00	17.87
2	32.41	18.78	45.90	20.52	31.60	18.19
3	33.63	15.55	47.68	18.38	30.15	16.15
4	32.52	16.83	45.95	21.24	30.96	18.35
5	35.21	18.19	47.01	22.44	29.23	17.00
6	34.34	20.37	52.06	22.07	30.16	20.84
7	34.35	17.46	45.44	22.27	27.97	19.53
8	33.31	18.05	46.69	21.95	28.88	20.34
9	33.18	19.69	46.66	20.31	28.74	17.07
10	34.69	20.20	49.15	21.20	29.92	17.82



Şekil 4.1. Geoteknik uzman olan kişiler tarafından yapılan likit limit ve standart plastik limit deneyleri.

Çizelge 4.2. Deney No.1 numune A'nin likit limit sonuçları.

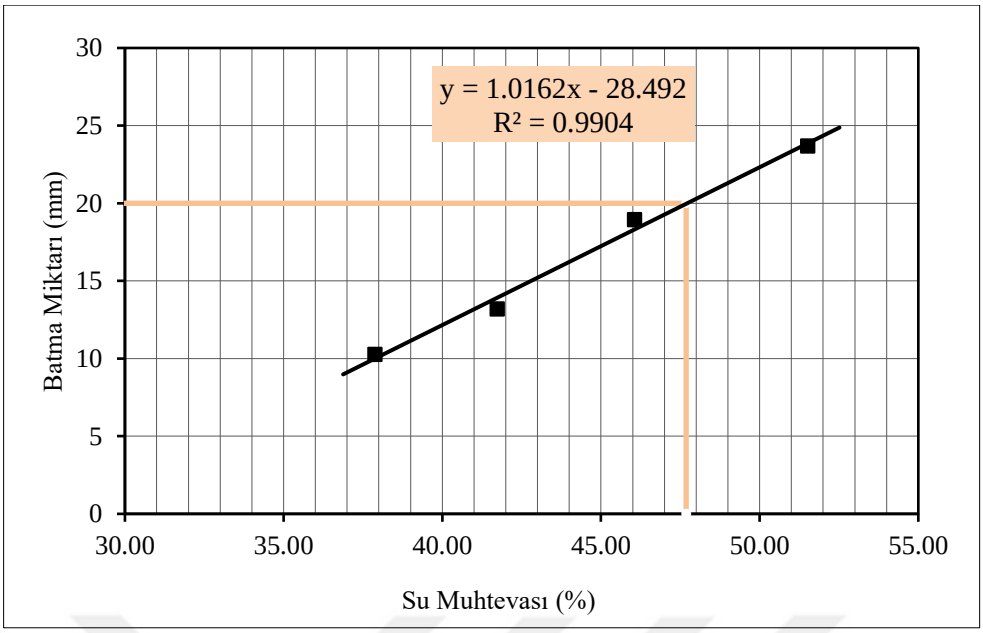
Deney	Kap(g)	Kap+Yaş (g)	Kap+Kuru (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	6.460	21.790	18.054	19.35	32.22
2	6.610	17.570	15.081	15.64	29.38
3	6.670	17.210	14.915	12.12	27.84
4	6.610	19.460	16.157	23.56	34.60
				Likit limit (%)	**32.43**



Şekil 4.2. 20 mm karşılık gelen likit limit değeri, deney No.1 numune A.

Çizelge 4.3. Deney No.3 numune B 'nin likit limit sonuçları.

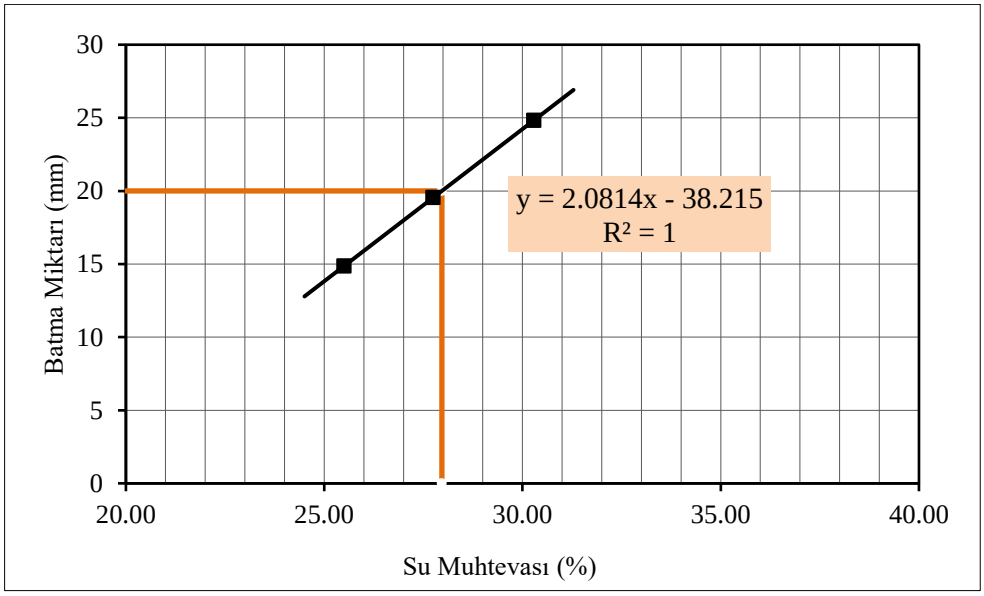
Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
9.500	26.500	21.830	10.27	37.88	9.500
9.500	27.500	22.200	13.19	41.73	9.500
9.500	24.500	19.770	18.94	46.06	9.500
9.500	35.000	26.330	23.69	51.52	9.500
				Likit limit (%)	**47.68**



Şekil 4.3. 20 mm batmaya karşılık gelen likit limit değeri, deney No.3 numune B.

Çizelge 4.4. Deney No.7 numune C 'nin likit limit sonuçları.

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	9.685	30.860	26.557	14.860	25.50
2	9.410	30.018	25.542	19.55	27.75
3	9.364	30.988	25.961	24.82	30.29
				Likit limit (%)	**27.97**



Şekil 4.4. 20 mm karşılık gelen likit limit değeri, deney No.7 numune C.

Çizelge 4.5. Deney No.10 numune A'nin plastik limit sonuçları.

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Su İçeriği (%)
1	16.54	19.403	18.92	20.29
2	6.529	9.283	8.839	19.22
3	26.391	27.817	27.572	20.75
4	10.447	13.923	13.341	20.11
5	23.657	26.103	25.685	20.61
			Plastik limit %	**20.20**

Çizelge 4.6. Deney No.4 numune C 'nin plastik limit sonuçları.

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Su İçeriği (%)
1	28.122	30.586	30.197	18.75
2	24.835	25.76	25.627	16.79
3	32.078	35.59	35.06	17.77
4	9.968	11.937	11.629	18.54
5	6.504	10.978	10.235	19.91
			Plastik limit %	**18.35**

Çizelge (4.1) göre uzman olan kişilerin tarfından yapılan likit limit deneylerin sonuçları;

- CL (orta plastisite) kil - Numune A için değerleri (32.41) ila (35.21) arasında.

- CL (yüksek plastisiteye yakın) kil - Numune B için değerleri (45.25) ila (52) arasında.

- CL-ML (düşük plastisite) kil - Numune C için değerleri (26) ila (31.60) arasında.

- CL (orta plastisite) kil-Numune A için regresyon değerleri (0.9992) ila (0.9210) arasında,

- CH (yüksek plastisite) kil-Numune B için regresyon değerleri (0.9993) ila (0.9041) arasında,

- CL-ML (düşük plastisite) kil-Numune C için regresyon değerleri (1) ila (0.9344) arasında olduğu görülmüştür.

Çizelege (4.1) göre uzman olan kişilerin tarfından yapılan plastik limit deneylerin sonuçları;

Numune A: CL (orta plastisite) kili WP =20.37-15.55 arasında,

Numune B: CL (yüksek plastisiteye yakın) kili WP=22.27-18.38 arasında,

Numune C: CL-ML (düşük plastisite) kili WP=20.84-16.15 arasında olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7. Geoteknik uzman olamayan kişiler trafından yapılan likit limit ve standart plastik limit deneyin sonuçları.

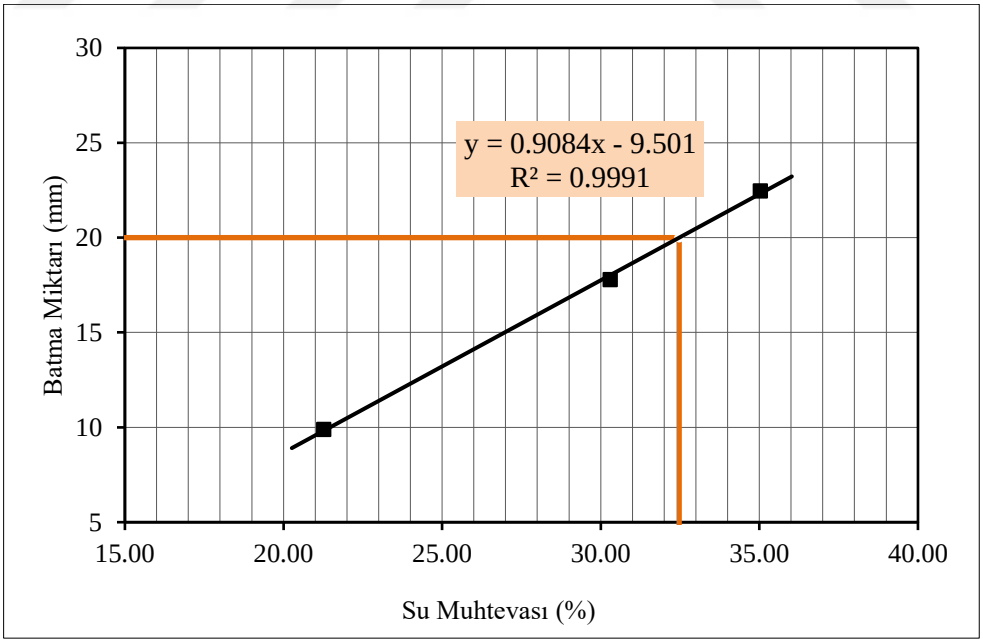
Deney	Kil A		Kil B		Kil C	
No.	WL	WP	WL	WP	WL	WP
1	33.49	21.08	44.48	22.01	35.06	15.54
2	31.78	17.61	41.73	15.84	28.27	14.60
3	30.48	22.01	45.22	21.03	28.33	16.76
4	32.47	18.08	46.88	22.13	33.46	18.08
5	30.54	19.53	45.44	18.75	30.48	14.67
6	32.47	18.97	40.63	18.34	29.87	19.76
7	33.15	19.12	42.72	16.79	30.60	16.02
8	33.63	18.08	45.51	17.76	30.22	16.99
9	33.03	19.46	45.90	18.75	28.53	19.08
10	31.46	16.40	45.45	19.25	28.17	16.40
11	34.43	16.50	45.42	18.07	31.82	17.39
12	29.26	16.15	43.90	16.58	26.49	16.79
13	31.00	18.13	39.81	17.97	30.50	19.17
14	30.40	18.72	41.97	17.82	29.62	17.53
15	30.87	18.31	42.71	21.61	28.86	14.79
16	31.26	17.26	43.51	18.03	31.99	14.98
17	25.19	44.75	42.21	25.05	33.75	58.42
18	31.89	16.92	45.33	26.08	27.02	19.59
19	30.76	17.89	43.86	10.74	30.41	18.13
20	34.59	18.14	44.20	22.77	28.24	16.53
21	29.27	17.76	47.00	20.08	29.89	18.62
22	33.25	15.59	43.28	21.19	32.21	16.43
23	30.81	43.57	47.53	18.96	31.30	26.58
24	35.37	15.17	45.47	22.43	32.39	17.73
25	30.12	17.35	42.21	24.12	31.10	21.51
26	33.86	14.43	41.75	21.12	31.10	43.05
27	40.29	15.01	46.48	20.18	33.22	14.90
28	32.41	15.13	46.84	16.97	41.55	17.36
29	32.47	15.13	47.80	21.37	36.44	15.24
30	33.15	16.40	45.44	18.75	30.60	16.02



Şekil 4.5. Geoteknik uzman olmayan kişiler tarafından yapılan likit limit ve standart plastik limit deneyi.

Çizelge 4.8. Deney No.4 Numune A 'ya ait likit limit sonuçları

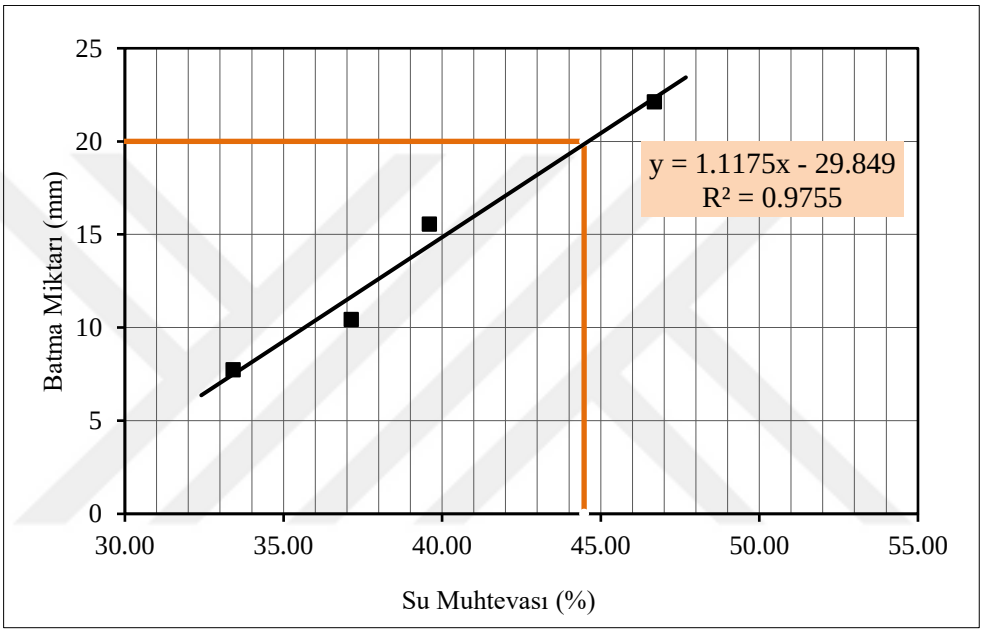
Deney	Kap(g)	Kap+Yaş (g)	Kap+Kuru (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	30.712	41.890	39.930	9.89	21.26
2	10.076	21.176	18.595	17.80	30.30
3	9.537	20.717	17.817	22.46	35.02
				Likit limit (%)	**32.47**



Şekil 4.6. 20 mm karşılık gelen likit limit değeri, deney No.4 numune A

Çizelge 4.9. Deney No.1 Numune B ye likit limit sonuçları

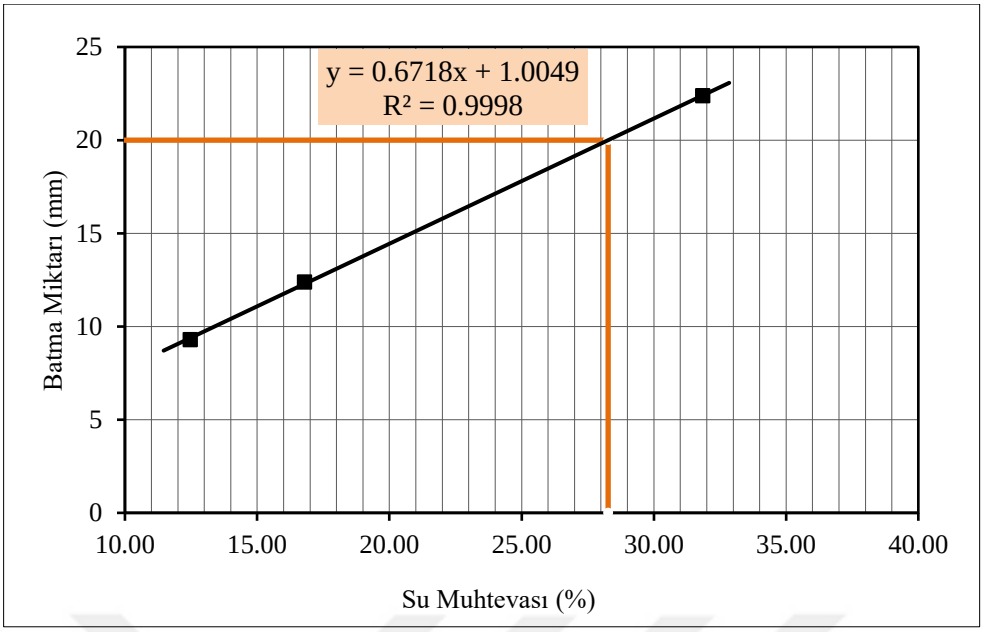
Deney	Kap(g)	Kap+Yaş (g)	Kap+Kuru (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	6.608	26.770	21.721	7.74	33.41
2	6.465	26.303	20.931	10.43	37.14
3	6.618	28.237	22.105	15.56	39.59
4	9.448	38.820	29.472	22.12	46.68
				Likit limit (%)	**44.48**



Şekil 4.7. 20 mm karşılık gelen likit limit değeri, deney No.1 numune B

Çizelge 4.10. Deney No.2 Numune C 'ye ait likit limit sonuçları

Deney	Kap(g)	Kap+Yaş (g)	Kap+Kuru (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	19.405	30.585	29.346	9.30	12.46
2	24.402	35.836	34.193	12.38	16.78
3	23.664	39.118	35.385	22.38	31.85
				Likit limit (%)	**28.27**



Şekil 4.8. 20 mm karşılık gelen likit limit değeri, deney No.2 numune C

Çizelge 4.11. Deney No.7 Numune A 'ya ait plastik limit sonuçları

Deney	Kap(g)	Kap+Yaş (g)	Kap+Kuru (g)	Su İçeriği (%)
1	10.26	13.917	13.36	17.97
2	10.01	12.177	11.803	20.86
3	9.362	12.422	11.927	19.30
4	27.05	29.475	29.103	18.12
5	9.514	14.261	13.491	19.36
			Plastik limit	**19.12**

Çizelge 4.12. Deney No.9 Numune C'ye ait plastik limit sonuçları

Deney	Kap(g)	Kap+Yaş (g)	Kap+Kuru (g)	Su İçeriği (%)
1	10.256	13.917	13.362	17.87
2	27.049	29.475	29.103	18.11
3	9.362	12.422	11.927	19.30
4	9.514	14.261	13.491	19.36
5	10	12.177	11.803	20.74
			Plastik limit	**19.08**

Çizelege (4.7) göre uzman olmayan kişilerinin tarfından yapılan likit limit deneylerin sonuçları;

Numune A: CL (orta plastisite) kili WL=40,29-25,19 arasında,

Numune B: CL (yüksek plastisiteye yakın) kili WL=47,80-39,81 arasında,

Numune C: CL-ML (düşük plastisite) kili WL=36,44-26,49 arasında olduğu görülmüştür.

Numune A: CL (orta plastisite) kilde regresyon R=0.9991-0.7731 arasında,

Numune B: CL (yüksek plastisiteye yakın) kilde regresyon R= 0.9998-0.8433 arasında,

Numune C: CL-ML (düşük plastisite) kilde regresyon 0.9998-0.8119 arasında olduğu görülmüştür.

Çizelge (4.1) göre uzman olmayan kişilerinin tarafından yapılan plastik limit deneylerin sonuçları;

Numune A: CL (orta plastisite) kili WP =22,01-15,01 arasında,

Numune B: CL (yüksek plastisiteye yakın) kili WP=26,08-10,74 arasında,

Numune C: CL-ML (düşük plastisite) kili WP=58,42-14,60 arasında olduğu görülmüştür.

4.2. Yeni Modifiye Konilere Göre Plastik Limit Sonuçları

Çizelge (4.13)'de çalışmada kullanılan koni türleri gösterilmiştir. Çizelge (4.14)'de 3 farklı konilere göre farklı killer için belirlenen plastik limit değerleri sonuçları belirlenmiştir. Çalışmada 3 farklı plastisiteli kil kullanılmıştır;

Numune A: orta plastisite kil (CL),

Numune B: CL (yüksek plastisiteye yakın),

Numune C: düşük plastisite kil (CL-ML).

Çizelge 4.13. Çalışmada kullanılan koni türleri.

	Koni Türü
Koni (i)	240g ve 20˚ açı
Koni (ii)	240g ve 30 ˚ açı
Koni (iii)	Standart Koni -80 g ve 30 ˚ açı

Çizelge 4.14. Farklı konilere göre plastik limitin sonuçları.

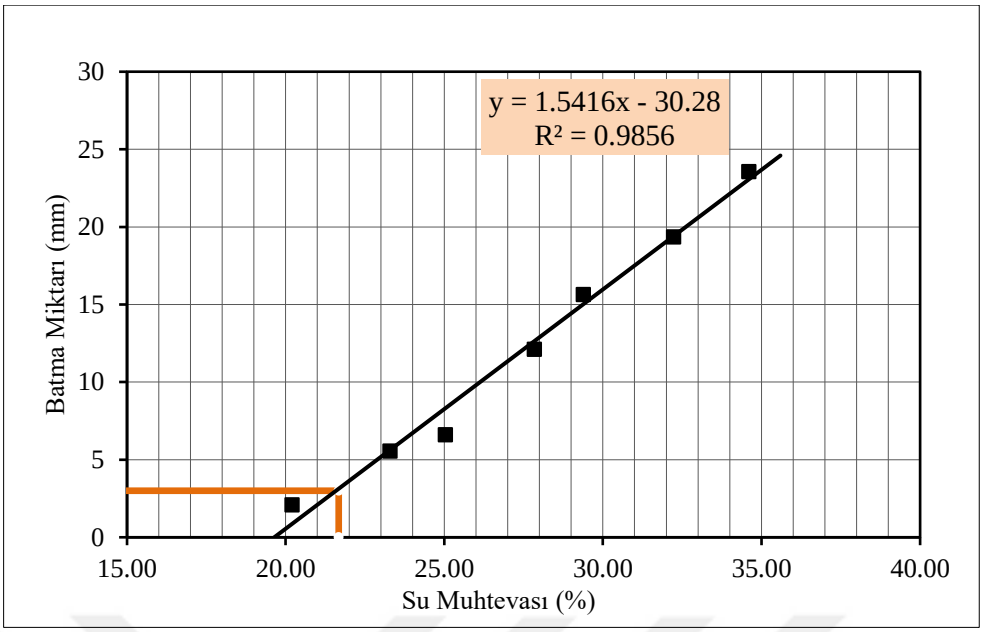
Numune	Koni Türü		
	240g ve 20˚ Koni (i)	240g ve 30˚ Koni (ii)	Standart Koni -80 g ve 30˚ Koni (iii)
A	19.07	19.21	21.67
B	23.91	23.72	27.50
C	18.61	18.09	19.22

Çizelge (4.15)'de ila (4.20)'de çalışmada kullanılan koni türlerine göre deney yapılmıştır. 3 mm karşılık gelen plastik limit değeri belirlenmiştir. Şekil (4.9)'de ila (4.14)'de sonuçları grafik şeklinde çizilmiştir ve regresyon değeri her deney için gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Numune A (Standart Koni 80 g ve 30˚)

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	9.362	40.630	35.375	2.080	20.20
2	6.610	38.617	32.571	5.55	23.29
3	6.400	37.653	31.396	6.600	25.03
4	6.670	17.210	14.915	12.12	27.84
5	6.610	17.570	15.081	15.64	29.38
6	6.460	21.790	18.054	19.35	32.22
7	6.610	19.460	16.157	23.56	34.60

3mm karşılık gelen plastik limit değeri = (21,67)

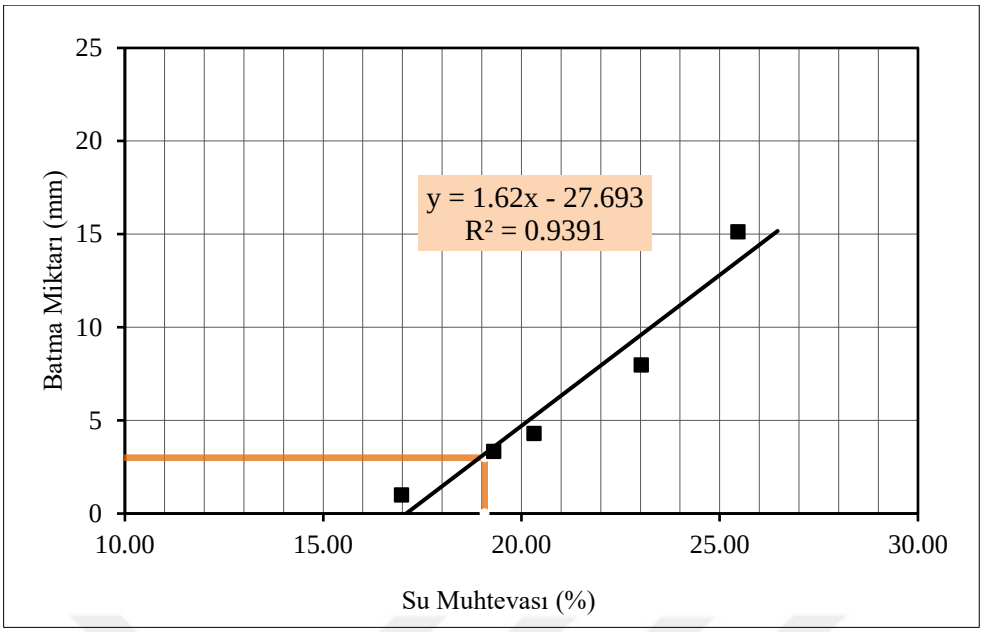


Şekil 4.9. Numune A (Standart Koni 80 g ve 30˚)

Çizelge 4.16. Numune A (240 g ve 20˚)

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	6.514	29.284	25.980	0.990	16.97
2	6.610	46.360	39.930	3.340	19.30
3	9.418	36.786	32.165	4.300	20.31
4	6.623	35.902	30.423	7.980	23.02
5	6.510	78.010	63.500	15.130	25.46

3mm karşılık gelen plastik limit değeri = (19,07)

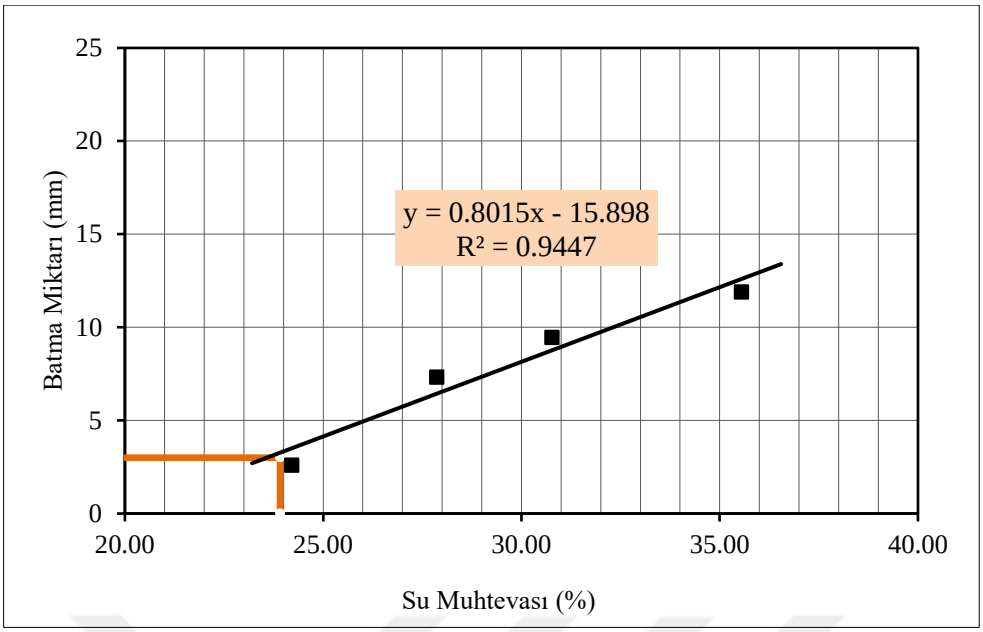


Şekil 4.10. Numune A (240 g ve 20˚)

Çizelge 4.17. Numune B (240 g ve 20˚)

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	6.602	33.463	28.228	2.600	24.21
2	6.525	33.658	27.746	7.33	27.86
3	6.454	43.025	34.420	9.46	30.77
4	6.681	54.177	41.721	11.90	35.55

3mm karşılık gelen plastik limit değeri = (23,91)

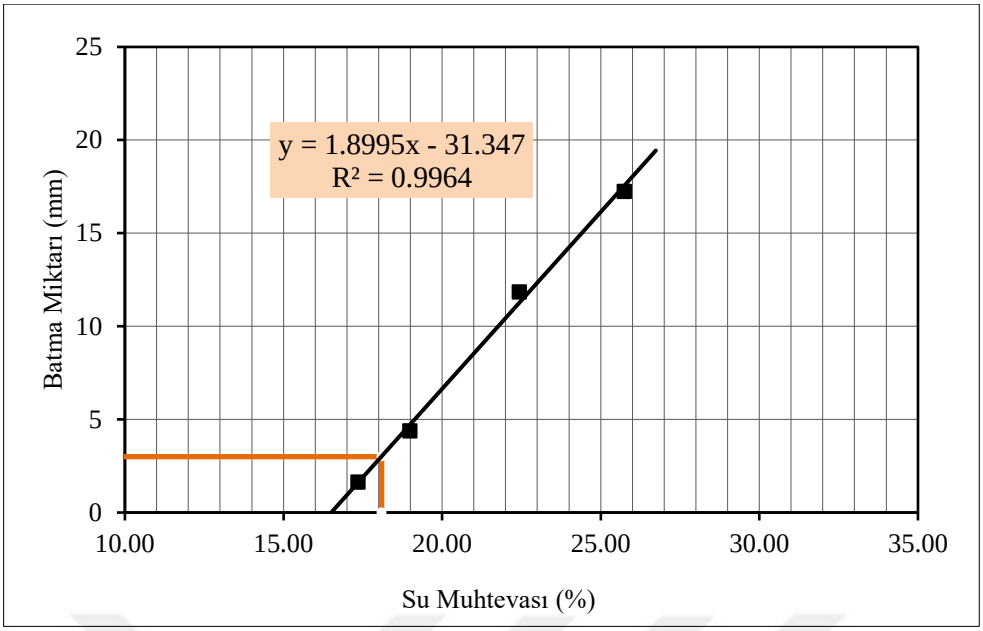


Şekil 4.11. Numune B (240g ve 20˚)

Çizelge 4.18. Numune C (240 g ve 30˚)

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	6.547	43.364	37.921	1.630	17.35
2	6.396	41.128	35.588	4.38	18.98
3	6.586	45.932	38.724	11.85	22.43
4	6.509	57.876	47.362	17.24	25.74

3mm karşılık gelen plastik limit değeri = (18,09)

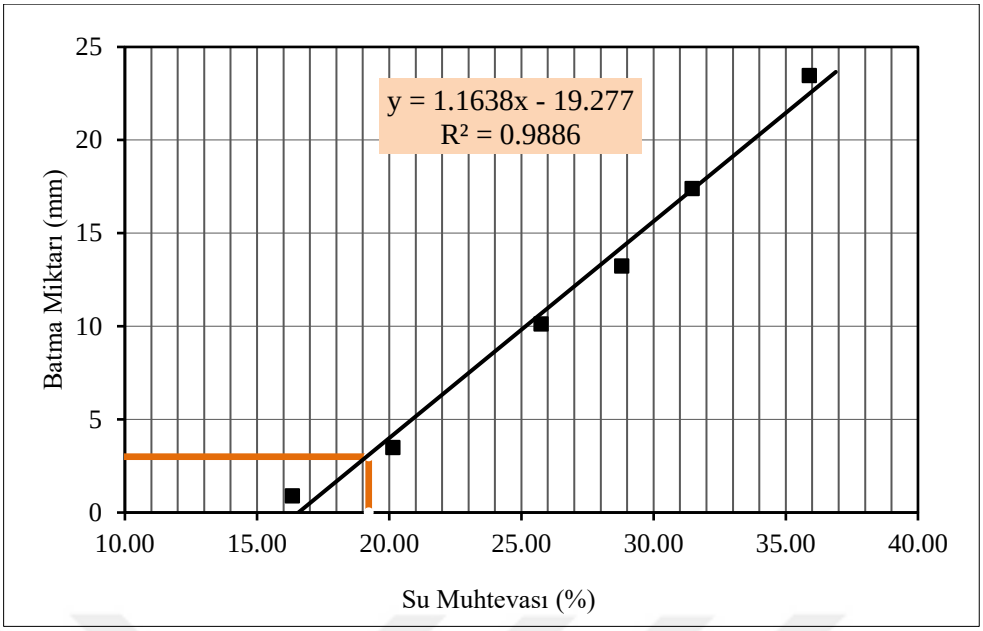


Şekil 4.12. Numune C (240 g ve 30˚)

Çizelge 4.19. Numune C (Standart koni 80 g ve 30˚)

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	6.628	31.173	27.728	0.900	16.33
2	9.724	54.909	47.335	3.48	20.14
3	9.433	50.630	42.197	10.13	25.74
4	9.645	56.163	45.763	13.24	28.79
5	9.642	47.164	38.186	17.40	31.45
6	9.957	42.968	34.249	23.47	35.89

3mm karşılık gelen plastik limit değeri = (19,22)

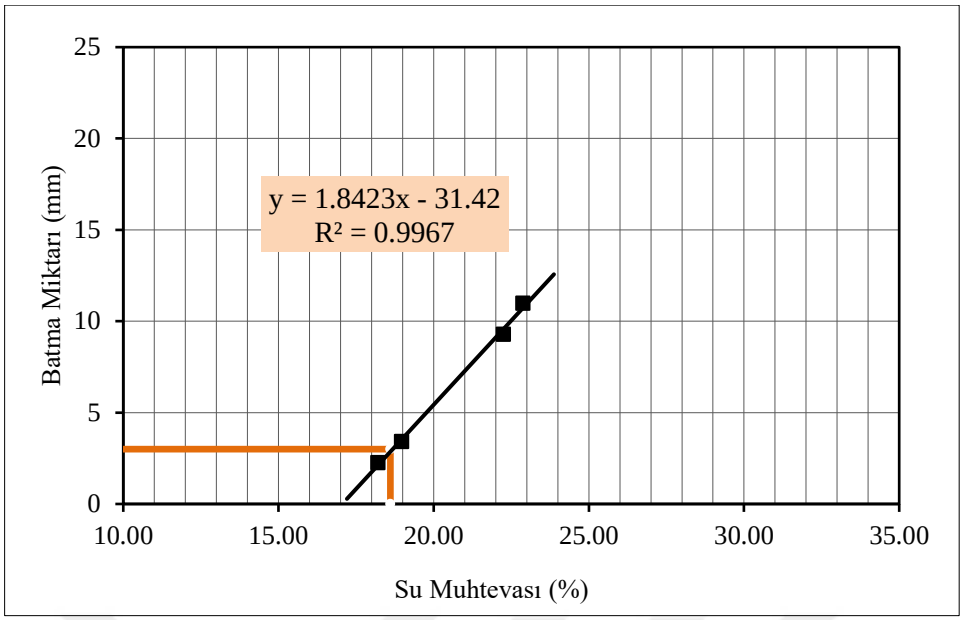


Şekil 4.13. Numune C (Standart koni 80 g ve 30˚)

Çizelge 4.20. Numune C (240g ve 20˚)

Deney	K(g)	K+Y (g)	K+K (g)	Batma (mm)	Su İçeriği (%)
1	6.626	34.869	30.519	2.260	18.21
2	6.718	38.450	33.390	3.41	18.97
3	6.448	47.964	40.409	9.28	22.25
4	6.571	37.881	32.052	10.99	22.88
5	6.590	62.270	50.710	15.760	26.201
6	12.535	39.095	33.310	18.830	27.846

3mm karşılık gelen plastik limit değeri = (18,61)



Şekil 4.14. Numune C Standart koni 240g ve 30 ˚

Şekil (4.9) ila (4.14)'de konilere göre farklı killer için belirlenen plastik limit değerleri sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.

- Yeni koni yöntemlerine göre 3 mm batma miktarına karşılık gelen su içeriği zeminin plastik limiti tayın edilmiştir.

- Aynı zemin numunesi üzerinde yapılan deneylerin sonuçlaraına göre koni (i) ve koni (ii) doğruya yakın değerlerde olduğu görülmüştür ve standart koniye göre birbirine daha yakın değerler bulunmuştur.

- Standart koni aleti ile (likit limitte kullanılan koni) elde edilen değerler daha yüksektir.

(Rashid, 2005) yaptığı çalışmada plastik limit belirlemek için kullandığı üç tip koni detayı aşağıda açıklanmıştır.

Koni (i)'de (Rashid, 2005) tarafından geliştirilen 20^{o} koni açısına ve 101.47 g ağırlığında bir koni kullanılarak plastik limit belirlenmiştir.

Koni (ii)'de (Wood ve Wroth, 1978) tarafından geliştirilen konide likit limit konisiyle aynı açıda olup (30^{o}) ağırlık 3 kat (240 g) daha fazla olan bir koni kullanılarak plastik limit belirlenmiştir.

Koni (iii)'de (Feng, 2004) tarafından önerilmiştir. Likit limit deneyinde kullanılan aleti ve koni aynıdır. Ancak küçük bir kap kullanılarak plastik limit belirlenmiştir (Rashid, 2005).

4.3. Geleneksel ve Geleştirilmiş Yöntemlere Göre Hesaplanan Plastik Limit Karşılaştırması

Çalışmada 3 farklı plastisiteli kil kullanılmıştır; Numune A : CL (orta plastisite) kil, Numune B : CL (yüksek plastisiteye yakın) kil, Numune C : CL-ML (düşük plastisite) kil.

Çizelge (4.21) ila (4.23) standart yöntem ve tüm modifiye yöntemden elde edilen plastik limitin farklılıklarını gösterilmiştir.

Şekil (4.15) ila (4.17) elle yuvarlama ve önerilen modifeye koni yöntemi ile elde edilen plastik limit değerleri ve tüm regresyon değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.21. Standart yöntemden elde edilen plastik limittin ortalama değerinin koni(i) ile karşılaştırması.

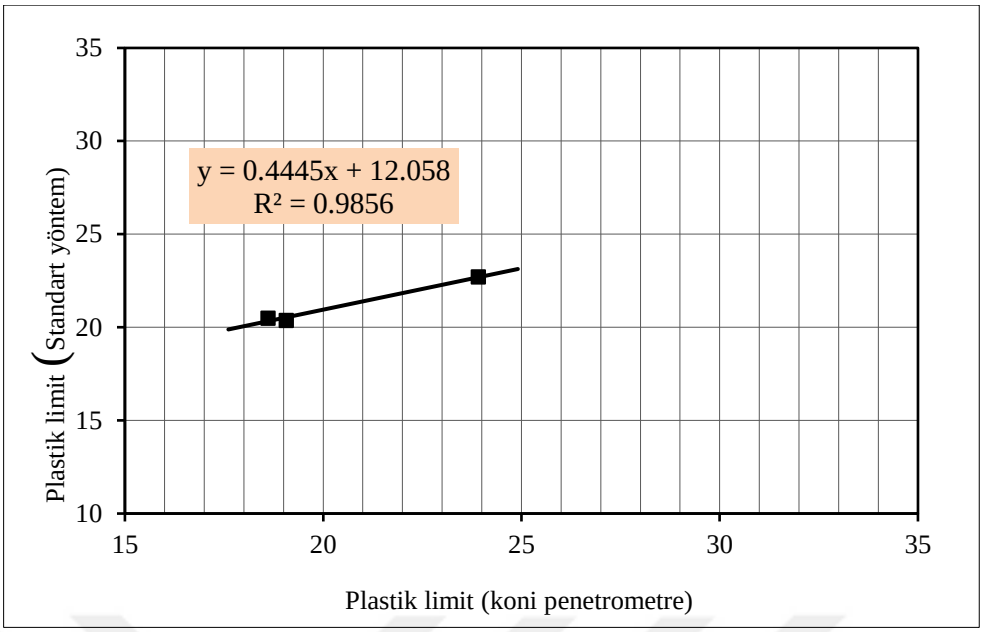
Numune	PL (%) Standart	PL (%) Koni(i) 240g ve 20˚	Fark %	Regresyon Değeri
A	20.37	19.07	6	0.9856
B	22.7	23.91	5.3	
C	20.48	18.61	9	

Çizelge 4.22. Standart yöntemden elde edilen plastik limittin ort. değerinin koni(ii) ile karşılaştırması.

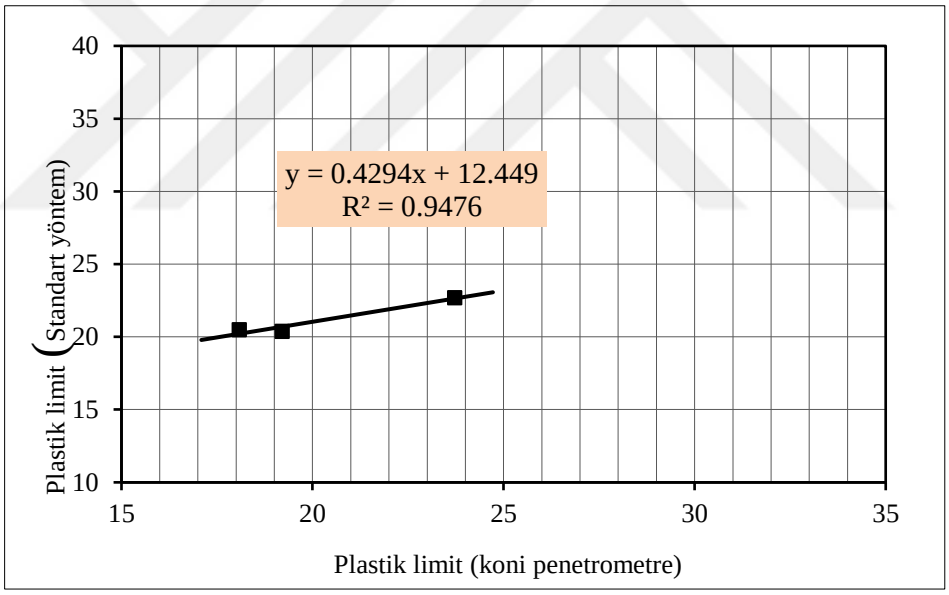
Numune	PL (%) Standart	PL (%) Koni(ii) 240g ve 30 ˚	Fark %	Regresyon Değeri
A	20.37	19.21	5	0.9476
B	22.7	23.72	5	
C	20.48	18.09	11	

Çizelge 4.23. Standart yöntemden elde edilen plastik limittin ort. değerinin koni (iii) ile karşılaştırması.

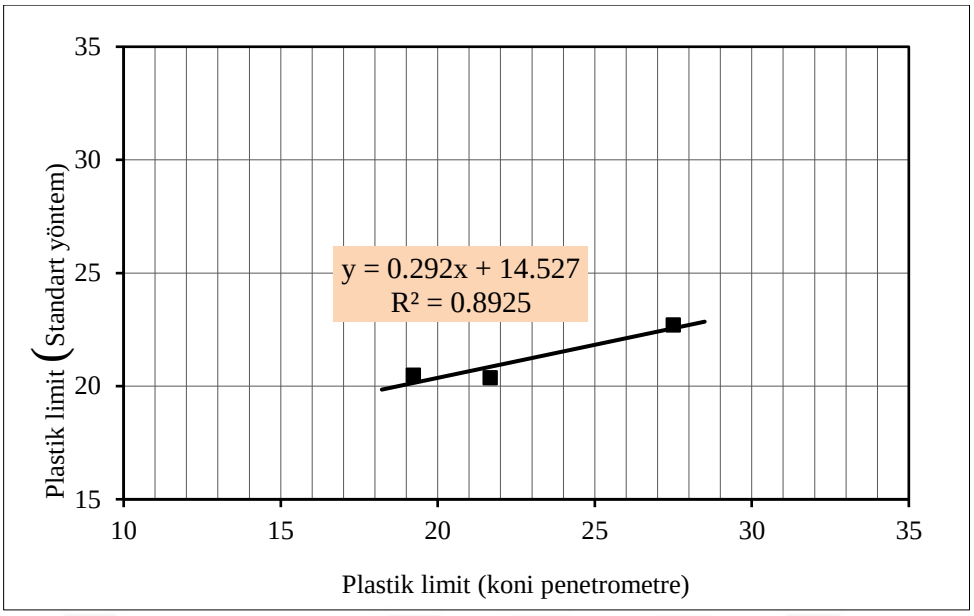
Numune	PL (%) Standart	PL (%) Koni(iii) Standart Koni -80 g ve 30 ˚	Fark %	Regresyon Değeri
A	20.37	21.67	6	0.8925
B	22.7	27.5	21	
C	20.48	19.22	6	



Şekil 4.15. Koni(i) 240g ve 20˚ve standart (elle yuvarlama) yönteminden elde edilen ortalama plastik limit değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.16. Koni(ii) 240g ve 30˚ standart (elle yuvarlama) yönteminden elde edilen ortalama plastik limit değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.17. Koni (iii) Standart Koni (80 g ve 30 ˚) ve standart (elle yuvarlama) yönteminden elde edilen ortalama plastik limit değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge (4.21) ila (4.23) standart elle yuvarlama ve modifeye koni yöntemi ile elde edilen plastik limit değerleri arasındaki farklılıkları gösterilmiştir.

Şekil (4.15) ila (4.17) elle yuvarlama ve modifeye koni yöntemin tüm regresyon değerleri (0.9856) ila (0.8925) ila arasındadır.

- Standart elle yuvarlama ve koni (i) arasındaki farklılıklar (%5) ila (%9) arasındadır ve regresyon değeri (0.9856) 'dir,
- Standart elle yuvarlama ve Koni (ii) arasındaki farklılıklar (%5) ila (%11) arasındadır ve regresyon değeri (0.9476) 'dir,
- Standart elle yuvarlama ve Koni (iii) arasındaki farklılıklar (%6) ila (%21) arasındadır ve regresyon değeri (0.8925) 'dir,
- Koni(iii), likit limit deneyinde kullanılan koni (i) ve koni (ii) göre düşük regresyon değerini (0.8925) vermiştir. Bu nedenle plastik limitin belirlemesi için uygun bir seçenek olmadığı görülmüştür.
- Önerilen koni(i), regresyon diğeri koni yöntemlerine kıyasla en iyi korelasyonu verilmiştir.
- Standart yöntemin sonuçları, önerilen modifiye düşen koni yöntemiyle elde edilen değerlerden daha fazladır.

Yapılan bir araştırmada plastik limit değerini belirlemek için üç tip koni kullanılmıştır. Koni (ii) (Wood ve Wroth, 1978) tarafından geliştirilen koni olup bu tez çalışmasında kullanılmıştır ve standart yöntem ile karşılaştırılmıştır. Koninin plastik limit testinin gerçekleştirilmesi için uygun olduğu görülmüştür.

Düşen koninin yöntemi plastik limit belirlemek için standart elle yuvarlama yöntemine göre daha az operatöre bağlı bir test olduğu görilmiştir (Rashid, 2005).

4.4. Lineer rötre deneyinin sonuçları

Çalışmada 3 farklı plastisiteli kil kullanılmıştır; Numune A : orta plastisite kil (CL), Numune B : yüksek plastisiteye yakın kil (CL), Numune C : düşük plastisite kil (CL-ML).

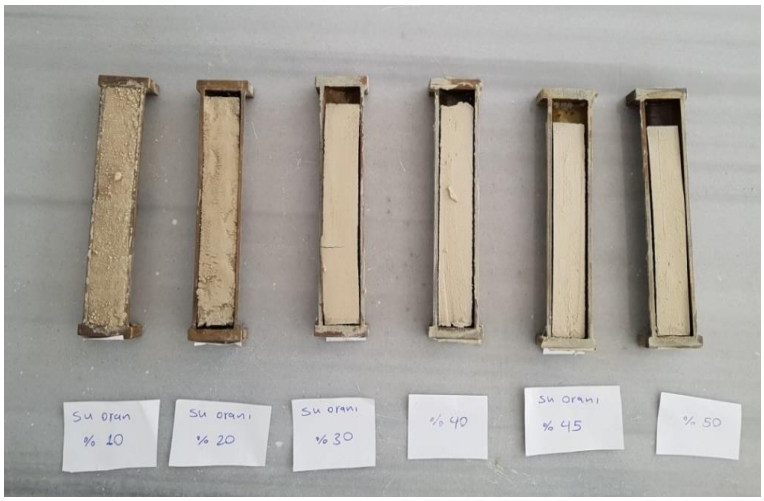
Yüksek plastisiteye yakın kil (CL) farklı su oranı ile karıştırılmıştır ve etüvde kurutulmuştur, Şekil (4.18) ila (4.20) gösterilmiştir.

Çizelge 4.24 'de rötre deney ile su içeriği ilişkisi gösterilmiştir. Deneylerin detayı grafik'te Şekil 4.21'de açıklanmıştır. Şekil (4.22) orta plastisiteli kil (CL) farklı su oranı ile karıştırılmıştır ve Şekil (4.23) etüvde kurutulmuştur.

Lineer rötre deneyi ile su içeriği ilişkisi Çizelge 4.25 'de gösterilmiştir. Deneylerin detayı grafik'te Şekil 4.24'de açıklanmıştır. Düşük plastisiteli kaolinit kili (CL-ML) etüvde kurutulmadan önce ve sonra, Şekil (4.25), Şekil (4.26) gösterilmiştir. Lineer rötre deney ile su içeriği ilişkisi Çizelge 4.26 'de gösterilmiştir. Deneylerin detayı grafik'te Şekil 4.27'de açıklanmıştır.



Şekil 4.18. Yüksek plastisiteye yakın kil (CL), etüvde kurutulduktan önce.



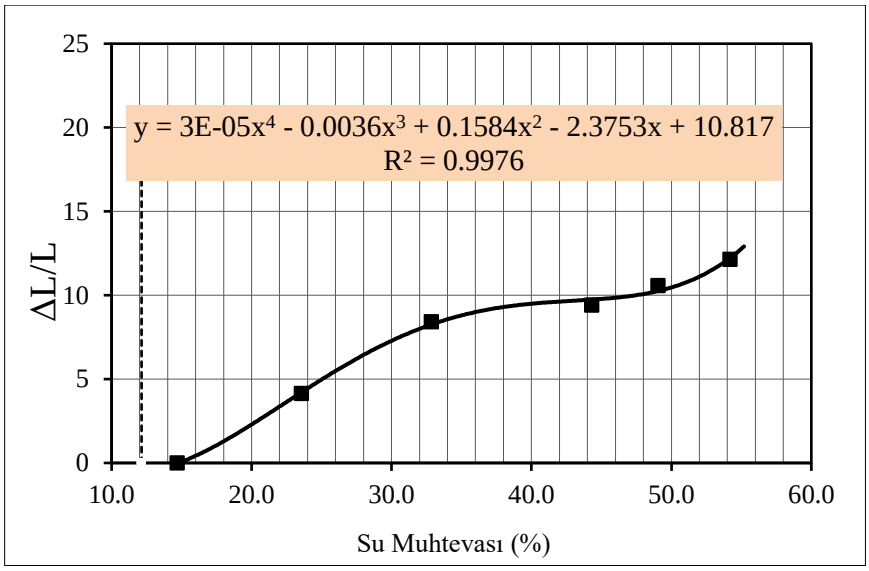
Şekil 4.19. Yüksek plastisiteye yakın kil (CL), etüvde kurutulduktan sonra.



Şekil 4.20. Yüksek plastisiteli kil (CH), %30 su oran'la kabarma durumu.

Çizelge 4.24. Yüksek plastisiteye yakın (CL) kilin deney değerleri.

W%	%R
14.700	0.00
23.58	4.14
32.850	8.42
44.31	9.41
49.05	10.57
54.19	12.14



Şekil 4.21. Yüksek plastisiteye yakın kil (CL).



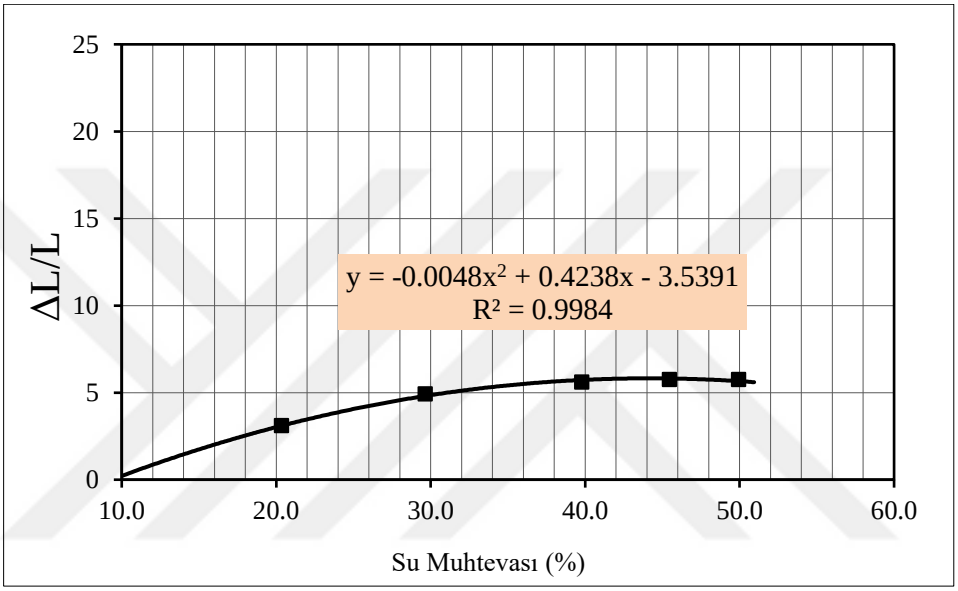
Şekil 4.22. Orta plastisiteli kil (CL), etüvde kurutulduktan önce.



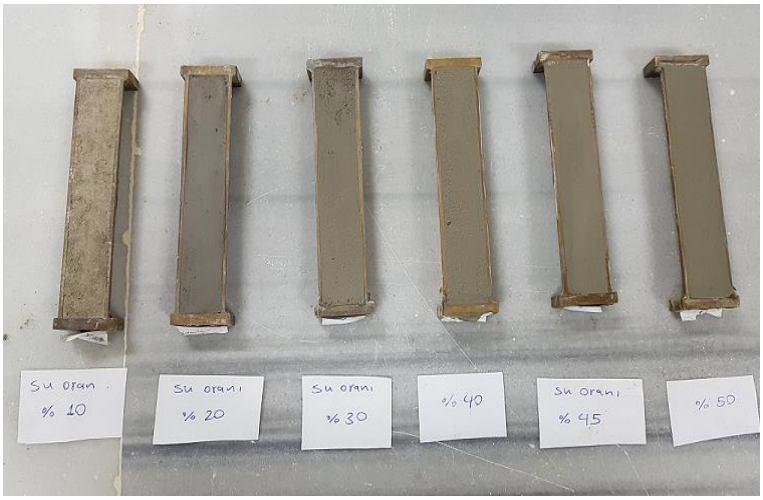
Şekil 4.23. Orta plastisiteli kil (CL) etüvde kurutulduktan sonra.

Çizelge 4.25. Orta plastisiteli (CL) kilin deney değerleri.

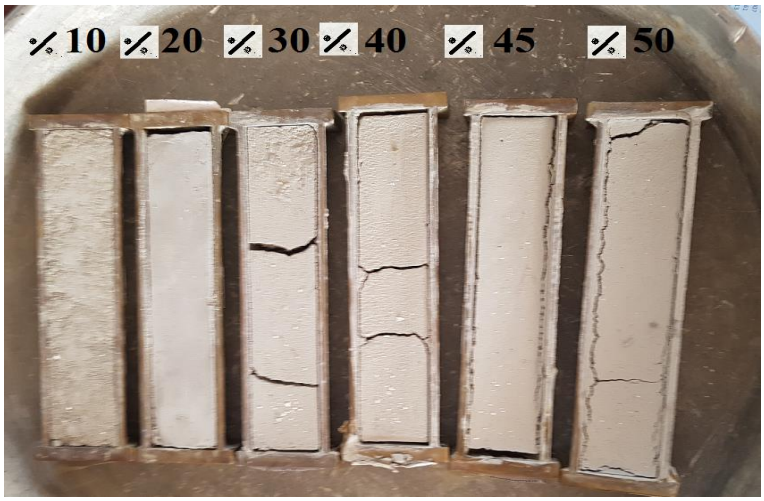
w%	%R
9.410	0.00
20.35	3.11
29.640	4.92
39.78	5.60
45.46	5.75
49.94	5.75



Şekil 4.24. Orta plastisiteli kil (CL).



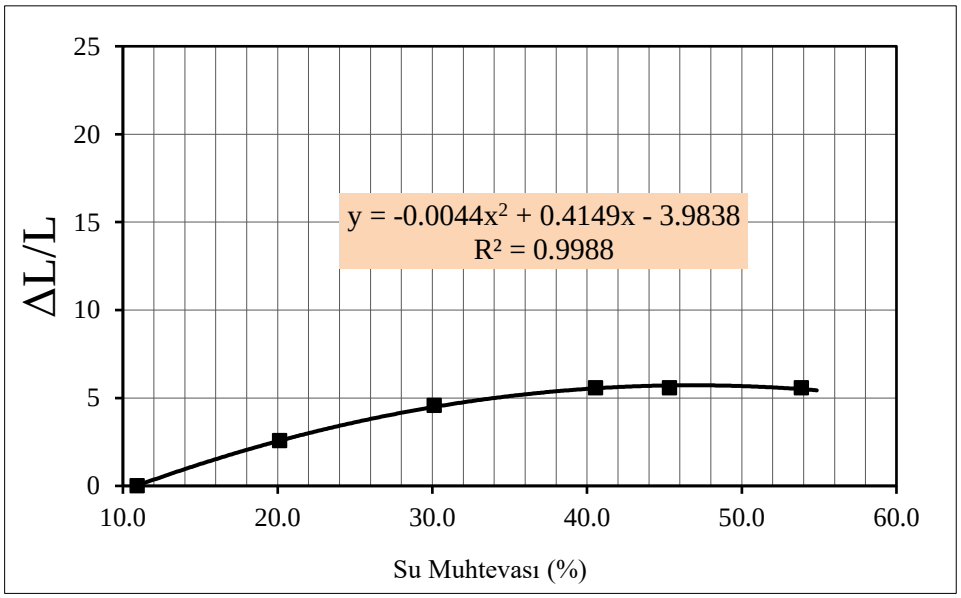
Şekil 4.25. Düşük plastisiteli kil (CL-ML), etüvde kurutulduktan önce.



Şekil 4.26. Düşük plastisiteli kili (CL-ML), etüvde kurutulduktan sonra.

Çizelge 4.26. Düşük plastisiteli (CL-ML) kiliin deney değerleri.

W%	%R
10.920	0.00
20.13	2.57
30.130	4.57
40.55	5.57
45.33	5.57
53.85	5.57



Şekil 4.27. Düşük plastisiteli kil (CL-ML).

- Lineer rötre deneyi deneylerinde yüksek plastisiteye yakın kil (CL), etüvde kurutulduktan sonra diğer killere oranla daha fazla su kaybı ve kısaldığı, özellikle %50 su oranında boy kısalmasının daha belirgin olduğu (Şekil 4.19),

- Yüksek plastisiteye yakın (CL) kilinde %30 su oranında numunede kabarma ve şişme olduğu,
- Yüksek plastisiteye yakın (CL) kilinde su içeriği arttıkça lineer rötrenin arttığı, Şekil (4.21),
- Orta plastisiteli (CL) kilinde daha az su kaybı ve boy kısalmasının belirgin olmadığı. %40 ve %50 su oranında numunelerde çatlaklar meydana geldiği,
- Orta plastisiteli (CL) kilinde su içeriği arttıkça lineer rötre limitinin arttığı ancak %50 su oranında sabit kaldığı Şekil (4.24),
- Düşük plastisiteli (CL-ML) kilinde en az oranla su kaybı olmuştur, %50 ve %40 su oranlarında numunelerde çatlaklar,
- Düşük plastisiteli (CL-ML) kilinde su içeriği arttıkça rötre limitinin arttığı ancak %45 ve %50 su oranında sabit kaldığını Şekil (4.27), görülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Kişi faktörünün kıvam limitleri deneyinde etkisini belirlemek amacıyla; uzman ve uzman olmayan kişiler tarafından yapılan standart plastik limit deneylerin arasındakı farklılıklar;

Uzman olan kişilerin tarfından yapılan standart plastik limit deneylerin arasındakı farklılıklar;

- Numune A: CL (orta plastisite) kili için farklar Wp=%23,66 arasında,
- Numune A: CL (yüksek plastisiteye yakın) kili için farklar Wp=%17,46 arasında,
- Numune A: CL-ML (düşük plastisite e) kili için farklar Wp=%22,50 arasındadır.

Uzman olmayan kişilerinin tarfından yapılan standart plastik limit deneylerin arasındakı farklılıklar;

- Numune A: CL (orta plastisite) kili için farklar Wp=%31,80 arasında,
- Numune A: CL (yüksek plastisiteye yakın) kili için farklar Wp=%58,81 arasında,
- Numune A: CL-ML (düşük plastisite e) kili için farklar Wp=%75,00 arasındadır.

- Uzman olmayan kişilerinin tarfından yapılan standart plastik limit deneyleri arasındakı farklılıklar uzman olan kişilerinden daha fazla olduğu,
- Farklı operatörin aynı zemin üzerinde yaptıkları standart plastik limit deneyleri sonuçlarından farklı değerler bulunduğunu,
- Plastik limit belirlenmesi için kullanılan standart elle yuvarlama yöntemi görüldüğü farka göre operatöre fazla baglıdır ve güvenli sonuçlar vermediğini görülmüştür.

Standart elle yuvarlama ve yeni geliştirilmiş konilerin arasındaki farklılıklar;

- Standart elle yuvarlama ve koni(i) arasındaki farklılıklar (%5) ila (%9) arasındadır,
- Standart elle yuvarlama ve Koni(ii) arasındaki farklılıklar (%5) ila (%11) arasındadır,
- Standart elle yuvarlama ve Koni(iii) arasındaki farklılıklar (%6) ila (%21) arasındadır.

➢ Bu çalışmada plastik limit belirlenmesi için kullanılan modifeye koniler, Standart elle yuvarlama yöntemine kıyasla daha uygun sonuçlar sağlamıştır.

➢ Modifeye koni yöntemi alet ile yapılan bir deneydir ve mekanik bir süreçtir. Bu nedenle operatöre daha az baglıdır ve elle yuvarlama yönteminde görülen olumsuz etkilerinin ortadan kaldırdığı açık bir şekilde görülmüştür.

➢ Yeni geliştirilmiş koni yöntemine göre koni (i) ve koni (ii) ile yapılan deneylerin sonuçları doğruya yakın değerle görülmüş. ve koni (iii) 'ye göre birbirine daha yakın değerler bulunmaktadır.

➢ Koni (iii) likit limit deneyinde kulanılan konidir Plastik limitdeki kilin drenajsız kayma dayanımı, likit limit 'deki mukavemetinkinden yaklaşık 100 kat daha yüksektir bu nedenle plastik limit belirlemesi daha fazla farklılıklar görülmüştür, (B) kilin, değer killere kıyasla daha fazla hata oranı görülmüştür.

➢ Plastik limit belirlenmesi için koni (i) ve koni (ii) nin, Koni (iii) kıyasla daha uygun bir seçenek olduğu görülmüştür.

➢ Önerilen (koni i) regresyon değer koni yöntemlerine kıyasla en iyi korelasyonu vermiştir.

5.2 Öneriler

➢ Standart (elle yuvarlama) yöntemi kullanılarak plastik limit belirlemesinde, farklı operatörlerin aynı zemin üzerinde farklı sonuçlar bulduğu görülmüştür. Bu nedenle killerin plastik limitinin belirlenmesinde daha güvenli sonuçlar sağlamak için yeni yöntemlerle belirlenmesi önerilmektedir.

- Operatörlerin olumsuz etkilerini ve hatalarını önlemek ve Plastik limiti belirlenmesi için mekanik bir süreç kullanmağı önerilmektedir.
- Plastik limit ve likit limitler iki deneyin tek bir alet ile belirlenmesi önerilmektedir.
- Standart yöntemin sonuçları, önerilen modifiye düşen koni yöntemiyle elde edilen değerlerden daha fazladır.

KAYNAKLAR

,
Belviso, R., Ciampoli, S., Cotecchia, V. ve Federico, A. J. G. E., 1985, Use of the cone penetrometer to determine consistency limits, 18 (5).
Bobrowski, L. ve Griekspoor, D. M., 1992, Determination of the Plastic Limit of a Soil by Means of a Rolling Device, *Geotechnical Testing Journal*, 15 (3), 284-287.
Demir, S. ve Kılıç, M., 2010, Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri.
Demirbaş, Ö., 2006, Kil mineralleri yüzeyine bazı biyomoleküllerin immobilizasyonu ve elektrokinetik özellikleri.
Feng, T.-W., 2000, Fall-cone penetration and water content relationship of clays, *Géotechnique*, 50 (2), 181-187.
Feng, T.-W., 2004, Using a small ring and a fall-cone to determine the plastic limit, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*

130 (6), 630-635.
Hansbo, S., 1957, New approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test, p.
Houlsby, G., 1982, Theoretical analysis of the fall cone test, *Géotechnique*, 32 (2), 111-118.
Ishaque, F., Hoque, M. ve Rashid, M. J. P. A., 2010, Determination of plastic limit of some selected soils using rolling device, 21 (1-2), 187-194.
Karlsson, R., 1961, Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remoulded clays.
Kayabalı, K., Üstün, A. B. ve ÖZKESER, A., Ters Ekstrüzyon Deneyinin İki Kıvam Limitini Belirlemek Üzere Yeniden Değerlendirilmesi, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* (150), 131-144.
Kayabalı, K. v. T., O. O, 2007, Plastik Ve Likit Limitin Tayini İçin Yeni Bir Yaklaşım, *Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, Ankara Üniversitesi, 2. Geoteknik Sempozyumu*, , 75-87.
Koumoto, T. ve Houlsby, G. J. G., 2001, Theory and practice of the fall cone test, 51 (8), 701-712.
Littleton, I. ve Farmilo, M., 1977, 39-40.
Önalp, A. ve Arel, E., 2013, Geoteknik Bilgisi 1
Birsen Yayınevi İstanbul p.
Rahman, M., Rashid, M. ve Abedin, M. J. B. J. A. E., 2001, Determination of soil consistency limits by modified cone-enetrometer, 12 (1), 81-86.
Rashid, A. S. A., 2005, Determination of Plastic Limit of Soil Using Modified Cone Peneration Method, *Universiti Teknologi Malaysia*.
Rashid, A. S. A., Katimon, A. ve Noor, N. M., 2008a, Determination of plastic limit of soil using modified methods, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 20 (2).
Rashid, A. S. A., Katimon, A. ve Noor, N. M. J. M. J. o. C. E., 2008b, Determination of plastic limit of soil using modified methods, 20 (2).
Saxena, M. ve Arora, V., 2016, RETRACTED: An Energy Based Approach to Determine the Plastic Limit of Fine-grained Soil Using Modified Cone Penetrometer, Elsevier.
Sivakumar, V., Glynn, D., Cairns, P. ve Black, J., 2009, A new method of measuring plastic limit of fine materials, *Géotechnique*, 59 (10), 813-823.

Sivakumar, V., Henderson, L., Moorhead, C.M., Hughes , D. & Sivakumar, 2011, Measurements of the Plastic Limit of Fine Soils, *publication to Géotechnique*.

Tefera, T., 2013, Measurement of plastic limit of cohesive soils. R&D Project Status Report, p.

Uzuner, B. A., 2014, Temel Zemin Mekaniği, *Derya Kitabevi*, Trabzon, p.

Wasti, Y. ve Bezirci, M. J. C. G. J., 1986, Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test, 23 (2), 241-246.

Whyte, I., 1982, Soil plasticity and strength a new approach using extrusion, *Ground Engineering*, 15 (1).

Wood, D. M. ve Wroth, C. P., 1978, The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils, *Ground Engineering*, 11 (3).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

AdıSoyadı : SILDA DOORI
Uyruğu : IRAK
DoğumYeriveTarihi : IRAK/ BAGHDAD /21 /12 / 1984
Telefon : 05350204489
Faks : -
e-mail : eng.seldagazi@ gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**BitirmeYılı**
Lise	:	Kerkük kız lisesi	**2003**
Üniversite	:	Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü-Yapı Bilimdalı/ Bağdat	**2007**
YüksekLisans	:	Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü-Geoteknik Bilim Dalı	**2017-Devam ediyor**
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2014-2016	El Kalem El Camia Fakültesi	Öğretim Görevliği
2011-2015	Teknik Üniversitesi	İnşaat Mühendisi- Öğretim Görevliği
2009	Sulamaniyah Senter	İnşaat Mühendisi

UZMANLIK ALANI : Geoteknik Mühendisliği

YABANCI DİLLER : İngilizce, Arapça

YAYINLAR : (ISESER2019) Uluslararası Çevre Bilimi ve Mühendisliği Araştırmaları Sempozyumu
(Plastik Limit Belirlemesinde Operatör Etkisinin Araştirilmasi)