



T.C.
TARIM VE ORMAN BAKANLIĞI
DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNİK ARAŞTIRMA VE KALİTE KONTROL DAİRESİ BAŞKANLIĞI



ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVAR DENEY YÖNTEMLERİ, FORMLARI VE TS EN ISO/IEC 17025'E GÖRE BELİRSİZLİK HESAPLARI

Yazan

Dr. Vehbi ÖZAYDIN

ISBN: 978-605-7599-89-6

AĞUSTOS 2021
(Düzeltilmiş 3. Baskı - 2)

PARA İLE SATILMAZ



DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNİK ARAŞTIRMA VE KALİTE KONTROL DAİRESİ BAŞKANLIĞI



ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVAR DENEY YÖNTEMLERİ, FORMLARI VE TS EN ISO/IEC 17025'E GÖRE BELİRSİZLİK HESAPLARI

Dr. Vehbi ÖZAYDIN

ISBN: 978-605-7599-89-6

AĞUSTOS 2021
(Düzeltilmiş 3. Baskı - 2)

PARA İLE SATILMAZ

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı
06100 Yücetepe ANKARA

Tel (312) 454 3803
Faks (312) 454 3805
E posta takk@dsi.gov.tr

Ön söz

1. Baskı Mayıs 2007

Laboratuvarlarda gerçekleştirilen zemin mekaniği deneyleri belli standartlara göre yapılmaktadır. Bu sayede farklı laboratuvarlarda zemin deneylerinden elde edilen bilgiler birbirleriyle rahatça karşılaştırılabilmektedir. Gelişen teknoloji ve kazanılan bilgi sayesinde bu deney yöntemleri sık olmasa bile zamanla değişebilmektedir.

Temmuz 2002'de yayımlanan "Zemin mekaniği deney talimatları ve formları (Yayın No: Z-955)" kitabında sadece deney yöntemleri anlatılmıştı. Bu kitapta ise, deney yöntemleri Mart 2006'da revize olan TS 1900-1 (İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini) ve TS 1900-2 (İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini) standartları da dikkate alınarak yeniden düzenlenmiştir.

Bu kitapta, farklı standartlarda (Türk Standardları, American Standards of Testing Materials, International Standardized Organization, United States Bureau of Reclamation, British Standards ve American Association of State Highway and Transportation Officials) göre zemin mekaniği laboratuvar deneylerinin gerçekleştirilme yöntemleri anlatılmış ve standartlar arasındaki benzerlikler ile farklılıklar belirtilmiştir.

"TS EN ISO/IEC 17025 Deney ve kalibrasyon laboratuvarlarının yeterliliği için genel şartlar" standartının amacı ulusal ve uluslararası ölçekte kabul görmüş, güvenilir, teknik olarak yeterli ve geçerli deney sonuçları elde etmektir. Bu standart kapsamında belirsizlik hesapları da önemli bir yer tutmaktadır. Bu kitapta deney yöntemlerinin yanı sıra, zemin mekaniği laboratuvar deneylerinin, TS EN ISO/IEC 17025 standardı kapsamında belirsizlik hesaplarının nasıl yapılacağına dair teorik ve uygulamalı örnekler ile açıklanmıştır.

Bu kitapta anlatılan belirsizlik hesapları (ölçüm belirsizliği) deney süresindeki belirsizlikleri kapsamakta; numune alma, ambalajlama, taşıma, vb. işlemler sırasındaki belirsizlikleri ise, kapsamamaktadır. Sonuçlar % 95 ($k = 2$) güven aralığında hesaplanmıştır.

Uzun yıllar TSE İnşaat İntisas Grubu'nda rapörtör ve grup üyesi olarak ve yeni standartların hazırlanması ile yabancı standartların uyumlaştırılmasında çalıştım. Ayrıca, Türkiye'de zemin mekaniği laboratuvar deneylerinde deney bazında Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) tarafından ilk akredite kurum olan Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'nde Şube Müdürü olarak görev yaptım. Bu bilgi, birikim ve tecrübe altında, kitabımın, DSİ gibi diğer kamu ve özel laboratuvarlara da ışık tutacağı inancındayım. Bu kitapta olabilecek basım hatalarını ve önerileri aşağıdaki adreslere bildirilmesini rica ederim.

2. Baskı Ocak 2012

Kitapta redaksiyonel mahiyette düzeltmeler yapılmıştır.

3. Baskı Ağustos 2021

Dane çapı dağılımı deneyinin belirsizlik hesaplarında, literatüre ve kazanılan bilgi birikimine bağlı olarak, Madde 4.3 "Dane çapı dağılımı deneyinin belirsizlik hesabı" ve Madde 4.4 "Dane çapı dağılımı deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları" bölümlerinde değişiklik yapılmıştır.

Ayrıca, geçen süre zarfında zemin mekaniği konusunda, TS 1900 serisinde bulunan bir çok deney yerine TS EN ISO 17892 "Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri" standart serisi geçmiştir.

Dr. Vehbi ÖZAYDIN

ozaydinv@gmail.com

ozaydinv@dsi.gov.tr

İçindekiler

İçindekiler.....	i
Kısaltmalar ve semboller	iii
1 Numune kabul ve kayıt talimatı	1
2 Deneyler için numune hazırlama talimatı	5
3 Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	9
4 Dane çapı dağılımı deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	17
5 Hidrometre deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	27
6 Bağlı yoğunluk (özgül ağırlık) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	51
7 Tabii birim hacim ağırlık deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	63
8 Likit limit deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	73
9 Plastik limit deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	81
10 Standart sıkıştırma (2,5 kg'lık tokmak kullanarak) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	89
11 Şişme yüzdesi deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	105
12 Şişme basıncı deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	115
13 İğne deliği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	123
14 Dağılma deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	133
15 Serbest (tek eksenli) basınç dayanımı deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	139
16 Üç eksenli basınç dayanımı (UU tipi) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	149
17 Kesme kutusu (direkt kesme) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	163
18 Tek yönlü konsolidasyon deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	179
19 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı	213
Ek A Sıcaklığa göre suyun yoğunluk ve viskozitesi	225
Ek B Belirsizlik hesaplamalarının birleştirilmesinde kısa bir yol.....	227
Ek C Belirsizlikle ilgili temel istatistiki bilgiler.....	233
Ek D Formlar.....	243

Kısaltmalar ve semboller

AAHSTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Standards of Testing Materials
BS	British Standards
C_c	Sıkışma indisi
C_r	Süreklilik katsayısı
C_s	Şişme indisi
C_u	Uniformluk katsayısı
C_v	Konsolidasyon katsayısı
CEN	Comité Européen De Normalisation (European Committee for Standardization)
G_s	Bağıl yoğunluk (özgül ağırlık)
ISO	International Standardized Organization
ISO/TS	International Standardized Organization / Technical Specification (standart haline gelmemiş fakat çok kısa süre içerisinde standart haline gelecek teknik doküman)
k	Geçirgenlik katsayısı
LL	Likit limit
m_v	Hacimsel sıkışma katsayısı
n	Veri sayısı
PL	Plastik limit
PI	Plastisite indisi
q_u	Serbest (tek eksenli) basınç dayanımı
T	Sıcaklık (°C)
t	Zaman
TS	Türk Standardları
$U_{Rastgele}$	Toplam rastgele belirsizlik
$U_{Sistematisik}$	Toplam sistematik belirsizlik
U_{Toplam}	Deneyin toplam belirsizliği
U_{Toplam}	Sistematik belirsizlik kaynaklarından her bir cihazın belirsizliği
USBR	United States Bureau of Reclamation)
V	Hacim
W	Ağırlık

w_n	Doğal su içeriği
w_{opt}	Optimum su içeriği (deney numunesinin getirilmek istenen su içeriği)
$\bar{x}$	Ortalama
ε	Birim şekil değiştirme
γ_k	Kuru birim hacim ağırlık
$\gamma_{k,mak}$	En büyük kuru birim hacim ağırlık
γ_n	Tabii birim hacim ağırlık
γ_s	Zemin numunesinin yoğunluğu (birim hacim ağırlığı)
γ_w	Suyun yoğunluğu
σ_n	Normal gerilme
σ_{Std}	Standart sapma
$\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	Ölçümlerden elde edilen belirsizlik
$\sigma_1 - \sigma_3$	Eksenel asal gerilme farkı (deviatör gerilme)
τ	Kesme gerilmesi

1 Numune kabul ve kayıt talimatı

1.1 Kapsam

Bu talimat, TS EN ISO/IEC 17025 “Deney ve kalibrasyon laboratuvarlarının yeterliliği için genel şartlar” a uygun olarak yapılacak zemin mekaniği laboratuvar deney ve araştırma çalışmaları için müşterinin (DSİ içi/dışı kuruluşların) kendi imkanları ile standartlara ve talimatlara uygun olarak almış oldukları deney numunelerinin (örselenmiş ve/veya örselenmemiş) laboratuvarlara tesliminin, kontrolünün, kabulünün, kayıt altına alınmasının ve imhasının usul ve esaslarını belirler.

1.2 Numunenin müşteri tarafından teslimi

Müşteri tarafından yaptırılması istenilen deneylerle ilgili talimatlara ve standartlara uygun olarak alınmış ve paketlenmiş numune, deneyin yapılacağı laboratuvara yazı ekinde getirilir. Numune laboratuvarca yetkili kılınmış personel (şube müdürü veya mühendis veya laborant) tarafından kontrol edilerek teslim alınır.

Kargo veya ambar vb. tarafından getirilen numunelere de aynı işlem uygulanır.

1.3 Numunenin kontrolü

İlgi yazı ile birlikte gelen numune kontrol edilir ve kabul için alınır.

Numunenin ambalajı kontrol edilir, yırtılma, kırılma, dökülme varsa, kayıt altına alınır ve laboratuvardaki yetkili kişiye haber verilir.

Numune üzerindeki etikette yeterince tanıttıcı bilgi olup olmadığına bakılır ve ilgi yazıda bahsedilen numune olup olmadığı karşılaştırılarak kontrol edilir.

Numune etiketi üzerinde asgari aşağıdaki bilgiler olmalıdır:

- Numunenin alındığı yer,
- Numunenin alınma tarihi,
- Numunenin hangi kuruluşa ait olduğu,
- Numune aynı bölgeden alındı ise, numunenin numaralandırılışı,
- Numunelerden hangi deneylerin istendiği (bu bilgi ilgi yazıda da olabilir) ve bu istenilen deneyler için miktarın yeterliliği,
- Numuneler tüp içerisinde gelmişse, tüpün her iki ucundaki parafinin yerinde olup olmadığı.

Yukarıdaki bilgilerden herhangi birinin eksik olması durumunda kayıt altına alınır ve laboratuvardaki yetkili kişiye haber verilir. Bu durumda yetkili kişi tarafından numuneyi gönderen kurum/kuruluş (prosedüre veya talimata göre) uyarılır ve numunenin kabulü yapılmaz.

Deneyleri etkilemeyecek uygunsuzluk varsa, “Numune kontrol ve kabul formu” na veya arkasına tespit edilen uygunsuzluklar yazılır.

1.4 Numunenin kabulü

Herhangi bir uygunsuzluk yoksa, “Numune kontrol ve kabul formu” na iki nüsha halinde doldurulur. Numuneyi getirenin imzası ve bir nüshasını numuneyi getirene verilir. Numune ile ilgili yazı gelmemişse, formun arkasına yazının gelmediği notu düşülerek, form uygun yere kaldırılarak korumaya alınır (saklanır).

Numune ile birlikte gelen ilgi yazı “Gelen-giden evrak kayıt defteri” nde kayıt altına alınır ve bu yazıya sıraya göre muhtemel (yazı Başkanlık tarafından reddedilirse, bu numarayı başka bir yazıya ver) laboratuvar numarası verilir.

Gelen numuneyi laboratuvar içindeki izlenebilirliğini sağlamak için (Z)(YIL)-(SIRA NO)'dan oluşan numara dizisi kullanılır. Burada, (Z) zeminin baş harfi (isteğe bağlı), (YIL) numunenin geldiği yıl, (SIRA NO) ise, kayıt defterindeki numara sırasıdır. Bu kayıt numarası tüm aşamalarda (numune kabul, laboratuvara verilen deney istek formu, giden rapor vb) aynıdır.

Laboratuvar numarası verilen yazı TAKK Dairesi Başkanlığına evrak kaydı için gönderilir.

Numune projeye göre deney sırası gelinceye kadar Zemin Mekaniği Laboratuvarı numune saklama bölümünde tanımlanan raflara kaldırılır.

Tüp numunelerde teslimat anında numune özellikleri bilinemediğinden, deney sırası gelinceye kadar saklanır. Deney sırası gelen numune özenle tüpten çıkartılır. Numune yeterli ise, istenen bütün deneyler yapılır. Aksi takdirde durum numuneyi gönderen kurum ve kuruluşlara bildirilerek ek numune istenir. Ek numune yok ise, numuneyi gönderen kurum/kuruluşun belirleyeceği öncelik sırasına göre numunenin yettiği kadar deney yapılır.

Daire Başkanlığından Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na havalesi yapılan yazıya daha önce belirlenen sayı numarası verilir ve "Gelen-giden evrak kayıt defteri" ne kaydedilir.

Aslı muhafaza edilen proje yazısının fotokopileri Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürüne verilir.

Zemin Mekaniği Şube Müdürü gelen projeleri mühendislerle paylaşır.

Sorumlu mühendis yapılacak deneyleri, deneyi yapacak yetkilendirilmiş laboratuvar personeline "Deney istek formu" na yazarak bildirir.

Sorumlu mühendis, laboratuvarda istenilen deneylerin zamanında ve standartlara uygun olarak yapar veya yapılmasına nezaret eder.

Yetkilendirilmiş laborant aldığı projeyi laboratuvar kayıt defterine işler. Deney numunelerinin karışmasını önlemek için deney aşamasında deney numuneleri "Deney numunesi kartı" kullanılarak isimlendirilir. Deney bitiminde deney sonuçlarını ilgili mühendise, tekrar verir. İlgili mühendis tarafından gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra sonuçlar "Deney raporu" nda gösterilir.

Deney raporunun ilk sayfasında deney sonuçlarının özet bilgileri ile deneylerin hangi standartlara göre yapıldığına dair bilgi bulunur. Müşteri istemişse, deneyin yöntemi değiştirilebilir ve bu durum da bilgi olarak verilir.

Hazırlanan rapordan bir adet, fotokopi ile çoğaltılır. Raporu hazırlayan mühendis ile Şube Müdürü tarafından raporun her sayfası imzalanır. Daire Başkanlığı tarafından her sayfasına Daire Başkanlığının mührü basılır.

Yapılan deneylerin adedi ve bedeli "Deney adedi ve bedeli formu" na yazılarak hesaplanır.

Hazırlanan raporun imzalı ve mühürlü ikinci sureti Daire Başkanlığı tarafından imzalanan resmi bir ön yazı eşliğinde müşteriye gönderilir.

İmzalı ve mühürlü orijinal raporun arkasına "Numune kontrol ve kabul formu", deney sırasında elde edilen (deneyi gerçekleştiren yetkili kişinin imzası olan) formlar ve "Deney adedi ve bedeli formu" eklenerek Devlet Arşiv Yönetmeliği'ne göre saklanır. Bu saklama işlemi, Devlet Arşiv Yönetmeliğinde veya DSİ tarafından belirtilen belirli sürelerde aşağıda belirtilen yerlerde yapılır:

- i) Şube Müdürlüğünde,
- ii) Daire Başkanlığı arşivinde,
- iii) DSİ Genel Müdürlüğü arşivinde ve
- iv) Devlet arşivinde

1.5 Diğer kurum ve kuruluşlardan gelen numuneler

Yukarıdaki işlemlere ilave olarak protokol ve fatura hazırlanır.

Deneylere, deney bedelinin ödendiğini belirten makbuzun aslı veya fotokopisi alındıktan sonra başlanır.

Deney raporuna deney faturası ve vezne alındısının fotokopisi eklenir.

1.6 Numunenin imhası

Zemin numunelerinde canlılara ve çevreye zarar verecek herhangi kimyasal veya fiziksel madde olmadığından, raporu ilgili kuruluşlara gönderilen numuneler 1 ay bekletilir. Bu süre sonunda TAKK Dairesi Başkanlığı'nın bu numuneleri imha etmekle yetkili kıldığı kişilere haber verilerek, bu numunelerin laboratuvarından uzaklaştırılması sağlanır.

2 Deneyler için numune hazırlama talimatı

2.1 Kapsam

Bu talimat araziden alınıp laboratuvara getirilen numunelerin gözle gruplanması ve deneyler için örselenmiş/örselenmemiş numune alınması ile ilgilidir.

2.2 Zeminlerin deney amaçları için gruplandırılması

Zeminlerin deney amaçları için gözle gruplanması aşağıda verilmiştir. Sınıflama aşağıda verilen tarifler göz önüne tutularak yapılacak bir gruplandırmada, herhangi bir zemin, özelliklerini sağladığı en ince daneli gruba sokulmaktadır

- **İnce daneli:** İçindeki danelerin en az % 90'ı, 2 mm'lik elekten geçen zeminler,
- **Orta daneli:** İçindeki danelerin en az % 90'ı, 20 mm'lik elekten geçen zeminler,
- **İri daneli:** İçindeki danelerin en az % 90'ı, 40 mm'lik elekten geçen zeminler.

TS 1900-1'de anlatılan deneylerden elek analizi ve kıvam limit deneyleri dışındakiler, % 10'u 40 mm'lik elekte kalan zeminlerde yararlı sonuç vermez.

2.3 Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması

Örselenmiş numunelerden istenilen deneyler için yeteri kadar temsili numune alma miktarları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Laboratuvara teslim edilen numunelerin hangi gruba girdiğine, yani, ince daneli mi, orta daneli mi, yoksa iri daneli mi olduğuna gözle karar verilir.

Deneylerde kullanılacak olan numunenin toplam ağırlığı, zeminin gurubuna ve yapılacak deneylere bağlıdır ve deneyler için gerekli en az numune miktarları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Gönderilen zemin numunesi büyük tavalara döküldükten sonra iyice karıştırılır. Çeyreklemeye (veya yarılama) için numune konik biçimde yığılır. Dikey iki çap boyunca dört eşit parçaya bölünür. Çapraz iki bölüm ayrılır. Kalan iki çeyrek karıştırılarak bir yarım elde edilir, işlem istenen ağırlıkta deney numunesi kalana kadar sürdürülür.

Temsili numuneden deneylerde belirtilen elekler kullanılarak deney numunesi alınır.

Örselenmiş numuneler deneylerde, "Standart sıkıştırma (2,5 kg tokmak kullanarak) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" veya "Modifiye sıkıştırma (4,5 kg tokmak kullanarak) deneyi talimatı" veya "Sıkıştırma (titreşimli tokmak kullanarak) deneyi talimatı" veya müşterinin belirttiği $\gamma_{k,mak}$ (kuru birim hacim ağırlık) ile W_{opt} (getirmek istenen optimum su içeriği) değerleriyle sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilir.

Numuneleri istenilen $\gamma_{k,mak}$ ve W_{opt} değerlerine getirme işlemi aşağıda anlatıldığı şekilde gerçekleştirilir:

Temsili numune iyice karıştırılarak "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" na göre örselenmiş numunenin mevcut su içeriği (W_n) bulunur.

Deney için yeterli miktar numune (P) alınır.

Numuneye eklenecek su miktarı aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$P \frac{(1 + W_{opt})}{(1 + W_n)} - P$$

Çizelge 2.1 - Deneyler için gerekli en az numune miktarları (gram)

Deneyler	İnce daneli	Orta daneli	İri daneli
Su içeriği	30	300	3,000
Likit limit	200	200	200
Plastik limit	20	20	20
Tek eksenli büzülme	150	150	150
Hacimsel büzülme	100	100	100
Bağıl yoğunluk (ince ve orta)	2 * 100	2 * 100	
Bağıl yoğunluk (iri)			2 * 400
Tabii birim hacim ağırlık	30	300	3,000
Dane çapı dağılımı (elek)	400	1,000	1,500
Dane çapı dağılımı (hidrometre)	50	50	50
Sıkıştırma (2,5 kg'lık tokmak)	3,600	3,600	
Sıkıştırma (4,5 kg'lık tokmak)	4,500	4,500	
Sıkıştırma (titreşimli tokmak)		8,000	8,000
En küçük birim ağırlık		7,000	7,000
Kesme kutusu	300	300	300
Tek eksenli (serbest basınç)	500	500	500
Üç eksenli (UU, CU, CD tipleri)	2,000	2,000	2,000
Tek yönlü konsolidasyon	250	250	250
Şişme basıncı ve yüzdesi (her biri için)	250	250	250
Düşen seviyeli geçirgenlik	2,500		
Sabit seviyeli geçirgenlik		15,000	15,000
İğne deliği ve dağılma (her iki deney için)	350	350	350
Çifte hidrometre	100	100	100

Sonuç artı çıkar ise, çıkan miktar kadar su eklenir. Eksi çıkması durumunda ise, numune kurutulur ve kurutulan numunenin su içeriği tekrar bulunur.

Su eklenen numune iyice karıştırılarak 24 saat hava geçirmez bir kap içerisinde bekletilir. Ertesi gün numunenin su içeriği tekrar bulunur. Su içeriği W_{opt} eşit ise, numune deneye hazırlanır. Aksi takdirde yukarıdaki işlem W_{opt} elde edilinceye kadar sürdürülür.

W_{opt} su içeriğinde olan numuneden, aşağıda eşitlikten bulunan miktar kadar alınır:

$$\text{Numune miktarı} = V \gamma_{k,mak} (1 + W_{opt})$$

Burada, V sıkıştırılacak numunenin hacmidir, cm^3 . Genelde kırılan silindir şeklindeki numunenin boyu, çapının iki katı olduğundan:

$$V = A \cdot h = \frac{\pi D^2}{4} 2D = \frac{\pi D^3}{2}$$

Numune miktarı üçe bölünerek, üç katman halinde numune kabında sıkıştırılır. Katmanlar arasında ayrışım olmaması için, alt katmanın yüzeyi belirli oranda çizildikten sonra üst katman sıkıştırılır.

2.4 Örselenmemiş numunenin deneye hazırlanışı

Numuneyi tüpten çıkarma işlemi sırasında tüp, düşey durumda tutulmalı (zemine giriş yönünde) ve numune tüpün üst ucundan çıkartılmalıdır. Numune ile çıkarıcının birbirine yapışmaması için gerekli önlemler alınmalıdır (çıkartıcı ile numune arasına disk biçiminde yağlı bir kâğıt konmalı veya çıkarıcının ucu hafifçe yağlanmalıdır).

2.4.1 Numune tüpünün iç çapı, hazırlanacak deney numunesinin çapına eşit olduğu durumlar için

Numune tüpünün uçları düzgün ve tüpün eksenine dik olmadığı durumlarda, bir deney numunesi hazırlamaya yetecek uzunlukta numune, tüpten çıkarılır ve kesilir. Kesilen numune iki yarım silindirden oluşan kalıp içerisine konur ve uçları düz ve eksene dik bir biçimde tıraşlanır.

Numune tüpü iyi durumda ve uçları eksene dik olduğu durumlarda, ilk metodun yanı sıra birinci maddeye ilave yöntem de deney numunesinin aynı tüpteyken hazırlamaktır. Numunenin uçlarının yalıtmakta kullanılan parafin çıkarılır ve çelik cetvelle düzlenir. Sonra, numune, düzlenen ucundan itilip diğer ucu, tüp eksenine dik olarak kesilir ve çelik cetvelle düzlenir. Bu ucun böylece hazırlanmasından sonra numune, tüp içerisinde istenilen boyda bir deney numunesi kalacak biçimde ters yöne itilir. Tüpten taşan bölüm eksene dik olarak kesilir; tüpte kalan bölümün ucu çelik cetvelle düzlenir ve deney numunesi tüpten çıkarılır.

Deney numunesinin boyu, çapı ve ağırlığı ve yaş birim ağırlığının % 1 doğrulukla hesaplanabilmesine imkan verecek doğrulukla ölçülür.

2.4.2 Numune tüpünün iç çapı, hazırlanacak deney numunesinin çapından büyük olduğu durumlar için

Deney numunesi istenilen çapta ince çeperli tüplere itilerek veya küçük bir zemin tornasında elle yontularak hazırlanabilir.

Deney numunesinin boyu, çapı ve ağırlığı ve yaş birim ağırlığının % 1 doğrulukla hesaplanabilmesine imkan verecek doğrulukla ölçülür.

2.4.3 Deney numunesinin blok olarak sağlanan bir numuneden hazırlanacağı durumlar için

Blok halindeki numuneden, deney numunesinin istenilen boyutlarından az büyük, dikdörtgen prizma görünümünde bir numune kesilir. Prizmanın iki ucu, kılavuzlu testere kullanılarak, düz ve birbirine paralel olarak kesilir. Bundan sonra prizma zemin tornasına yerleştirilir ve taşan kesimleri tıraşlama silindirik bir deney numunesi elde edilene kadar sürdürülür.

Bundan sonra numune, zemin tornasından çıkarılır, iki yarım silindirden oluşan kaba konur, gerekli boyda kesilir ve uçları düz ve eksene dik bir biçimde tıraşlanır.

Deney numunesinin boyu, çapı ve ağırlığı ve yaş birim ağırlığının % 1 doğrulukla hesaplanabilmesine imkan verecek doğrulukla ölçülür.

2.5 İlgili standartlar

Design of Small Dams, Bureau of Reclamation.

Earth Manual, Water Resources Technical Publications.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini.

TS 1900-2: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini.

TS 1901: 1975. İnşaat mühendisliğinde sondaj yolları ile örselenmiş ve örselenmemiş numune alma yöntemleri.

3 Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

3.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1, ASTM D 2216, CEN ISO/TS 17892-1, USBR 5300 ve BS 1377'ye göre su içeriği deneyi anlatılmıştır.

3.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirme yöntemleri

3.2.1 TS 1900-1'e göre su içeriği deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.1.1, Deney 1 (A): Etüvde kurutma metoduna göre yapılmaktadır.

Bu deney ile zemin numunesinin su miktarı belirlenerek, zeminin kuru birim ağırlığının yüzdesi olarak bulunur.

3.2.1.1 Gerekli araçlar

Etüv, sürekli olarak (105 ± 10) °C doğrulukla sıcaklık sağlayabilen,

Terazi, 0,01 g, 0,1 g ve 1 g doğrulukla ölçüm yapabilen,

Kap, çeşitli büyüklüklerde ve kapağı olan,

Bakkal küreği,

Desikatör, içinde bir miktar susuz silika jel bulunan (tercihan renkli).

Not - Desikatör içinde bulunan susuz silika jelin orijinal rengi değişme gösterdiğinde değiştirilmelidir.

3.2.1.2 Deneyin yapılışı

Deney kabı ve kapağı iyice temizlenir, kurutulur ve tartılır, W_1 .

Su içeriği alınacak numuneden (ince daneli zeminden en az 30 g, orta daneli zeminden en az 300 g ve iri daneli zeminden en az 3 kg) alınır, kabın içine gevşek bir biçimde konularak, kapağı ile birlikte tartılır, W_2 .

Kabın kapağı açılarak, etüv içine konulur ve (105 ± 10) °C sıcaklıkta en az 24 saat veya değişmez ağırlığa gelene kadar kurutulur (numune jips ise, sıcaklık en fazla 80 °C olmalıdır).

Not - Değişmez ağırlık, etüvde kurutulmakta olan numunenin 4 saat aralıkla art arda yapılan iki tartım arasında % 0,1'den fazla fark göstermediği ağırlık olarak tanımlanır.

Etüv durdurularak, numuneler soğuyuncaya (oda sıcaklığına gelinceye) kadar uygun şekilde odada (ince ve orta daneli zeminlerin içerisine konulduğu kabın kapağı kapatılarak) veya desikatörde bekletilir.

Numune soğuduktan sonra, kapağı ile birlikte tartılır, W_3 .

Deneyden elde edilen değerler "Su içeriği deneyi formu" na yazılır.

3.2.1.3 Hesaplamalar

Zeminin su içeriği w_n kuru zemin ağırlığının yüzdesi olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$w_n = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100$$

Burada;

W_1 Deney kabı ile kapağının ağırlığı (g),

W_2 Deney kabı, kapağı ve yaş numune ağırlığı (g),

W_3 Deney kabı, kapağı ve kuru numune ağırlığı (g)

dir.

3.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Yüzde olarak su içeriği ve belirsizlik değerleri en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak.

3.2.2 ASTM D 2216'ya göre su içeriği deneyi talimatı

ASTM D 2216'ya göre su içeriği deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. Ancak, desikatör kullanılmaz ise, 200 g malzemeye kadar olan miktarlar için kap ile kapağı kullanılması önerilirken, bu değerden daha fazla miktar için kabın kapaksız kullanılabileceği belirtilmiştir.

3.2.3 CEN ISO/TS 17892-1'e göre su içeriği deneyi talimatı

CEN ISO/TS'ye göre su içeriği deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır.

3.2.4 USBR 5300'e göre su içeriği deneyi talimatı

USBR 5325'e göre su içeriği deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. Ancak, USBR 5300'de kap kapağı hakkında herhangi bir şey belirtilmemiştir (kapak kullanılmamaktadır).

3.2.5 BS 1377'ye göre su içeriği deneyi talimatı

BS 1377'ye göre su içeriği deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır.

3.3 Su içeriği deneyinin belirsizlik hesabı

3.3.1 Su içeriği deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği

Rastgele belirsizlik istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Su içeriği deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1- Laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Laboratuvar içi		Laboratuvarlar arası
	1. Karşılaştırma Deneyleri	2. Karşılaştırma Deneyleri	-
Veri sayısı, n	18	4	24
En büyük, %	13,9	20,5	22,0
Ortanca, %	13,6	20,2	19,1
En Küçük, %	13,0	20,0	13,7
Ortalama, $\bar{x}$, %	13,5	20,2	18,7
Standart sapma, σ_{Std} , %	0,28	0,22	1,83
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, %	0,07	0,11	0,37

Su içeriği deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değer olan 0,0011 değeri yaklaşık % 100 artırılarak (emniyetli tarafta kalmak için) aşağıda verilen değer alınmıştır:

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}}(w) = 0,002 = \% 0,2$

3.3.2 Su içeriği deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

3.3.2.1 Su içeriği eşitliğinin türevleri

Su içeriği deneyinin hesaplanması ve ilgili elemanların kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{-(W_2 - W_3) * (-1)}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_3} = \frac{-(W_3 - W_1) - (W_2 - W_3)}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{-W_3 + W_1 - W_2 + W_3}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2}$$

3.3.2.2 Su içeriği deneyinin kılçık diyagramı

Su içeriği deneyinin kılçık diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir.

3.3.2.3 Su içeriği deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

3.3.2.3.1 Teraziler

3.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Su içeriği deneyinde kullanılan teraziler ve kalibrasyon sertifikalarında belirtilen toplam belirsizlikleri aşağıda verilmiştir:

PRECISA XT 1220 M $U_{\text{Kalibrasyonu}} = \pm (0,002 + 4,3 * 10^{-5}W) \rightarrow k = 2 \rightarrow U = \pm (0,001 + 2,15 * 10^{-5}W)$

CHYO MP 3000 $U_{\text{Kalibrasyonu}} = \pm (0,02 + 1,7 * 10^{-4}W) \rightarrow k = 2 \rightarrow U = \pm (0,01 + 8,5 * 10^{-5}W)$

PRECISA CB 4200C $U_{\text{Kalibrasyonu}} = \pm (0,01 + 1,09 * 10^{-4}W) \rightarrow k = 2 \rightarrow U = \pm (0,005 + 5,45 * 10^{-5}W)$

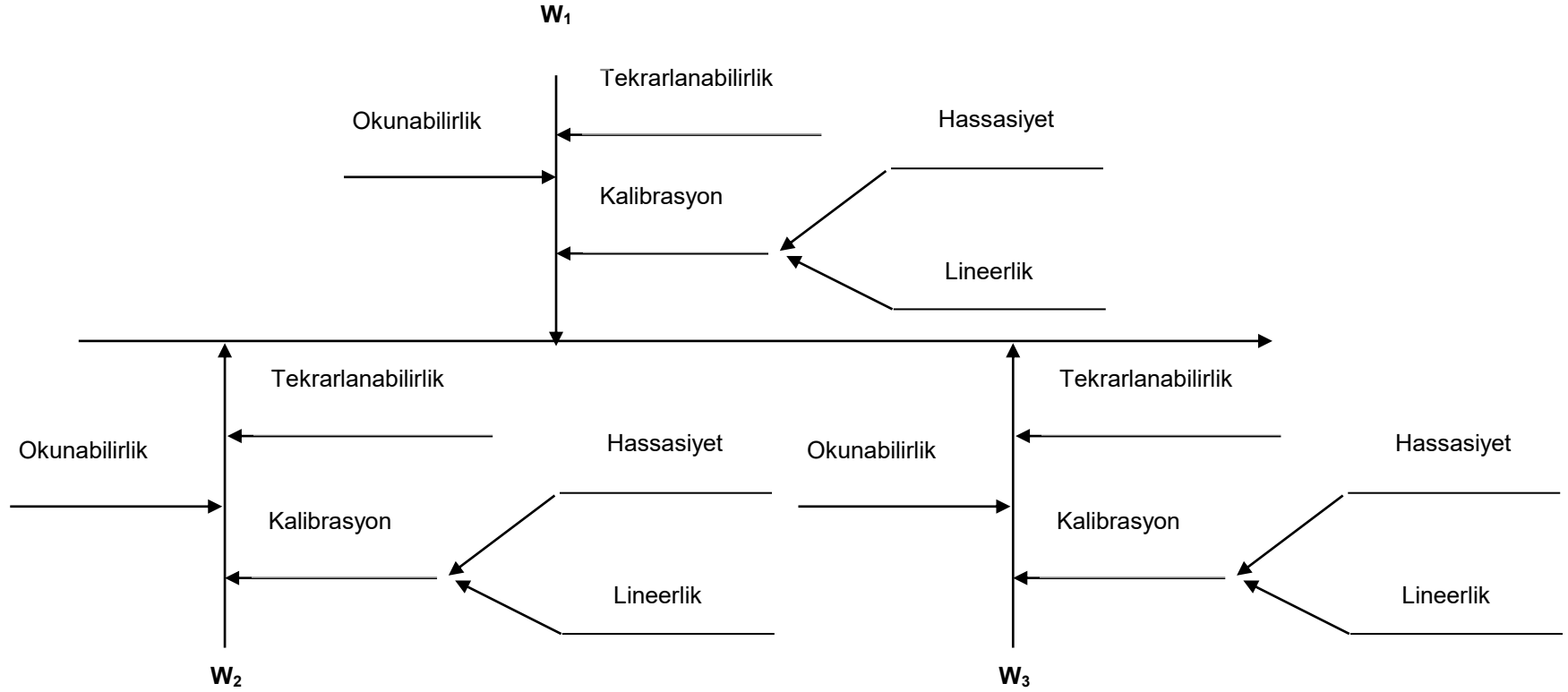
AND FX 3200 $U_{\text{Kalibrasyonu}} = \pm (0,02 + 2,2 * 10^{-4}W) \rightarrow k = 2 \rightarrow U = \pm (0,01 + 1,1 * 10^{-4}W)$

3.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

PRECISA XT 1220 M için 0,001 g $\rightarrow$ Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden $\rightarrow 0,001 / \sqrt{3} = 0,000577$

DİĞERLERİ için 0,01 g $\rightarrow$ Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden $\rightarrow 0,01 / \sqrt{3} = 0,00577$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.



Şekil 3.1 - Su içeriği deneyinin kılçık diyagramı

3.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

500 g numune için terazilerin tekrarlanabilirliğinin istatistik analizi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 - Deneyde kullanılan terazilerden elde edilen belirsizlik değerleri

	PRECISA XT 1220 M	CHYO MP 3000	PRECISA CB 4200C	AND FX 3200
Veri sayısı, n	96	37	36	41
Ortalama, $\bar{x}$	499,768	499,80	499,758	499,95
Standart sapma, σ_{Std}	0,008	0,03	0,013	0,05
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,0008	0,0050	0,0021	0,0078

3.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$U_{Terazi} = [(kalibrasyon)^2 + (okunabilirlik)^2 + (tekrarlanabilirlik)^2]^{0,5}$$

3.3.2.3.2 Etüv

Çapı 10 cm ve yüksekliği 4 cm olan alüminyum kap içine konulan damıtık suyun buharlaşma zamanı ölçülerek sonuçlar Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu çalışmadan anlaşılacağı üzere etüv hangi derecede olursa olsun sadece içindeki suyu buharlaştırmaktadır. Etüv sıcaklığı yüksek olduğunda buharlaşma çabuk olmakta, etüv sıcaklığı düşük olduğunda buharlaşma yavaş olmakta, bu ise, numune miktarını etkilememektedir. Su içeriği deneyi için en fazla 500 g malzeme kullanıldığından 24 saatli bir kurutma süresi yeterli olduğu yapılan deneylerden anlaşılmıştır. **Bundan dolayı etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

TS 1900-1'de değişmez ağırlık tarifi ile etüvün katı numune üzerinde belli bir süre sonra etkisi olmadığı açıklanmıştır. Ayrıca, % 10, % 17,5 ve % 25 su içeriklerinde 10 g, 50 g, 100 g ve 400 g ağırlıklarındaki zemin numunelerinin ağırlıkları 1 saat, 2 saat, 4 saat, 6 saat, 8 saat, 24 saat, 26 saat, 28 saat, 30 saat, 32 saat ve 48 saat aralıklarla tartılıp, su içerikleri bulunmuştur. Hepsinin bir grafikte karşılaştırılabilmesi için normalleştirilip (% 10 su içeriği olan % 10'a bölünerek, % 17,5 su içeriği olan % 17,5'e bölünerek ve % 25 su içeriği olan % 25'e bölünerek) aşağıdaki Şekil 3.3'te verilmiştir.

Şekilden anlaşılacağı üzere: i) 24 saatlik bir kurutma süresi tüm zeminlerin içindeki suyun kurutulması için yeterlidir, ii) az zemin ağırlığının kullanıldığı deneylerde, bu süre 24 saatten daha kısa, çok zemin ağırlığının kullanıldığı deneylerde ise, bu süre 24 saate yakındır.

3.3.2.4 Su içeriği deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

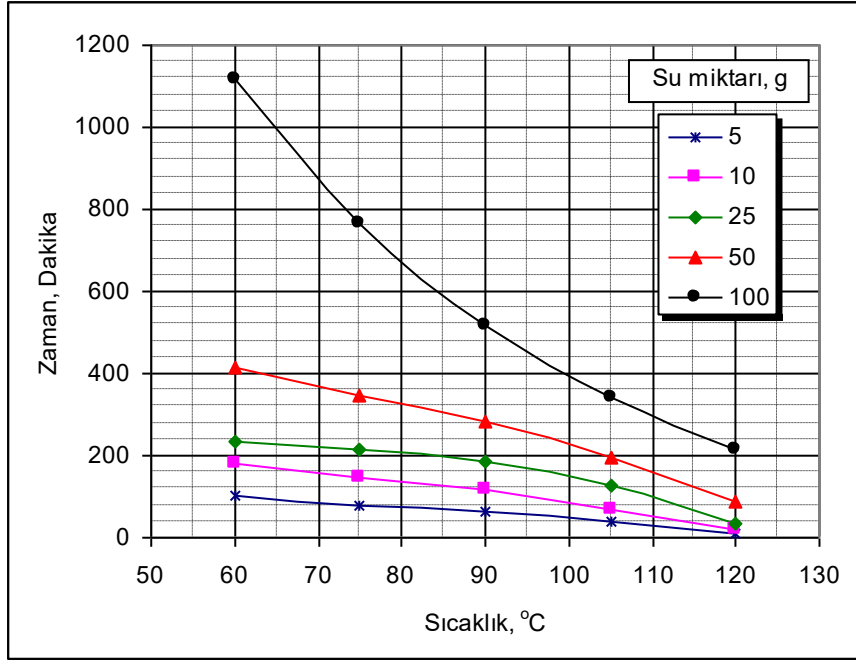
Sistematik belirsizliklerin toplamı, sadece terazinin belirsizliğinden oluşmaktadır:

$$U_{Sistematik} = [\left(\frac{\partial W}{\partial W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_3} * u_3 \right)^2]^{0,5}$$

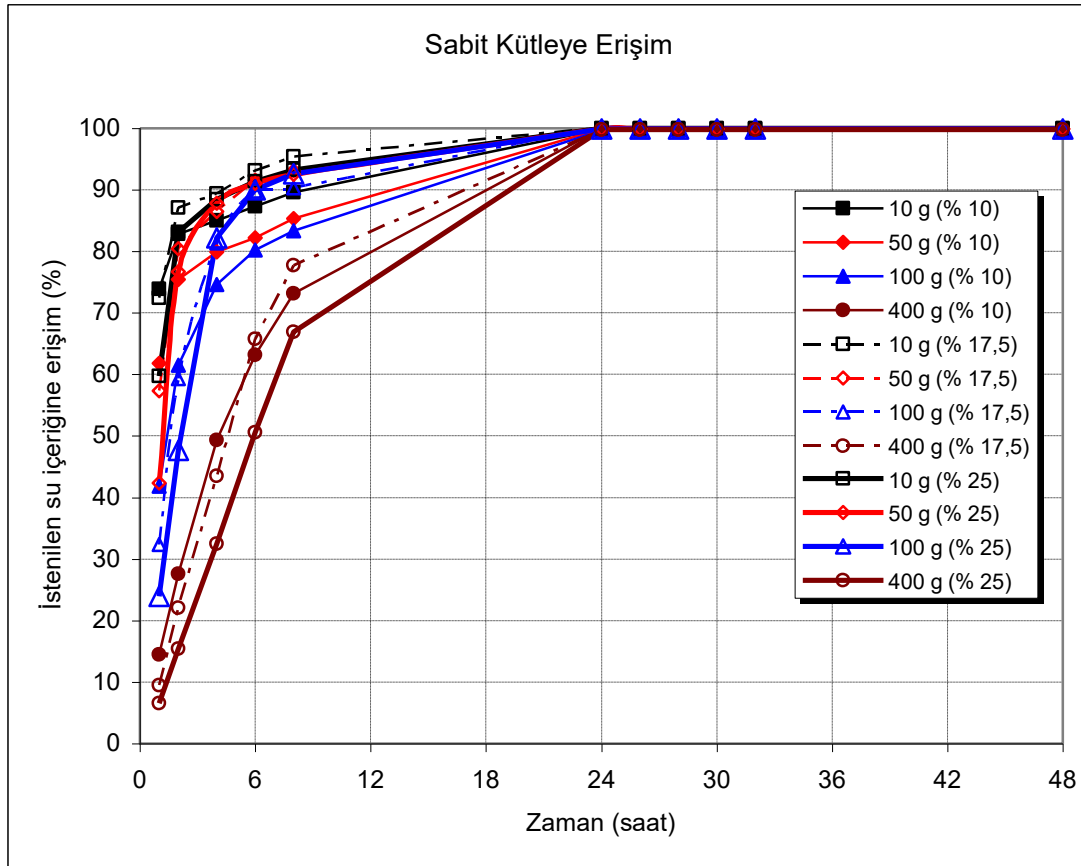
3.3.3 Su içeriği deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$U_{Deneyin} = \sqrt{[Rastgele belirsizlik (A Tipi)]^2 + [Sistematik belirsizlik (B Tipi)]^2}$$



Şekil 3.2 - Etüve konan farklı miktardaki damıtık suların farklı sıcaklıklarda zamanla buharlaşması



Şekil 3.3 - Etüve konan farklı su içeriklerine sahip farklı miktardaki deney numunelerinin sabit ağırlığa erişim zamanı

3.4 Su içeriği deneyinin çözümlü örneği

3.4.1 Su içeriği deneyinden elde edilen veriler

Su içeriği deneyinde aşağıda verilen sonuçlar Çizelge 3.3'te verilmiştir. Deneyde AND FX 3200 terazi kullanılmış ve terazinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen ($k = 2$ 'ye bölünmüş) belirsizliği aşağıda verilmiştir.

$$U_{\text{Terazi}} = \pm (0,01 + 0,00011W)$$

Çizelge 3.3 - Su içeriği deneyinde elde edilen veriler

Kabın ağırlığı, W_1	52,30 g
Kap ile yaş zemin numunesinin ağırlığı, W_2	299,40 g
Kap ile kuru zemin numunesinin ağırlığı, W_3	269,70 g

3.4.2 Su içeriği deneyinin hesaplamaları

3.4.2.1 Su içeriği

$$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} = \frac{299,40 - 269,70}{269,70 - 52,30} = \frac{29,70}{217,40} = 0,136615 = \% 13,7$$

3.4.2.2 Su içeriği deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}}(w) = 0,002$ (karşılaştırma deneylerinden)

3.4.2.3 Su içeriği deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{299,40 - 269,70}{(269,70 - 52,30)^2} = 0,000628$$

$$u_1 = [(0,01+0,00011*52,3)^2 + (0,01/\sqrt{3})^2 + (0,0078)^2]^{1/2} = [(248,15+33,3+60,84)*10^{-6}]^{1/2} \\ \cong [342,32*10^{-6}]^{1/2} = 0,0185$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1} = \frac{1}{269,70 - 52,30} = 0,0046$$

$$u_2 = [(0,01+0,00011*299,4)^2 + (0,01/\sqrt{3})^2 + (0,0078)^2]^{1/2} = [(1846,33+33,3+60,84)*10^{-6}]^{1/2} \\ \cong [1937,50*10^{-6}]^{1/2} = 0,0440$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_3} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{52,30 - 299,40}{(269,70 - 52,30)^2} = -0,00523$$

$$u_3 = [(0,01+0,00011*269,70)^2 + (0,01/\sqrt{3})^2 + (0,0078)^2]^{1/2} = [(1573,47+33,3+60,84)*10^{-6}]^{1/2} \\ \cong [1667,61*10^{-6}]^{1/2} = 0,0408$$

$$U_{\text{sistemik}} = \left[\left(\frac{\partial W}{W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{W_3} * u_3 \right)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{\text{sistemik}} = \left[(0,000628 * 0,0185)^2 + (0,0046 * 0,044)^2 + (-0,00523 * 0,0408)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{\text{sistemik}} = [0,0135 * 10^{-8} + 4,0966 * 10^{-8} + 4,5533 * 10^{-8}]^{0,5} \cong [6,6633 * 10^{-8}]^{0,5} = 0,000294$$

Toplam sistemik belirsizlik, $U_{\text{sistemik (w)}} \cong 0,0003$

3.4.2.4 Su içeriği deneyin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,002 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,0003

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} &= \left[(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistemik belirsizlik})^2 \right]^{0,5} \\ &= \left[(0,002)^2 + (0,0003)^2 \right]^{0,5} = 0,00202 \end{aligned}$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistemik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistemik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

3.4.3 Su içeriği deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam (w)}} = 2 * 0,00202 = 0,00404$

$$w = 0,1366 \pm 0,0040 = \% (13,7 \pm 0,4)$$

3.5 İlgili standartlar

ASTM D 2216: 2005. Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock, Vol. 04.08.

BS 1377: Part 2: 1990. Soils for civil engineering purposes, page 2, 3. Determination of moisture content.

CEN ISO/TS 17892-1: 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.1.1, Deney 1 (A): Etüvde kurutma metodu.

USBR 5300: 1989. Procedure for determining moisture content of soil and rock by the oven method, Vol. 2.

4 Dane çapı dağılımı deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

4.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1, ASTM D 422, CEN ISO/TS 17892-4, USBR 5325, USBR 5335 ve BS 1377'ye göre dane çapı dağılımı deneyi (elek analizi deneyi) anlatılmıştır.

4.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirme yöntemleri

4.2.1 TS 1900-1'e göre dane çapı dağılımı deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Deney 6 (A), Madde 5.1.6.1 Dane çapı dağılımının bulunması için yıkamalı eleme metoduna göre yapılmaktadır.

Bu deney ile bir zeminde, ince kum boyutunda ve daha iri danelerin dane çapı dağılımı belirlenir. Ayrıca, kil ve siltin toplam miktarı da hesaplanabilir.

4.2.1.1 Gerekli araçlar

Deney elekleri,

ASTM elekleri: 3 inç (75 mm), 1 1/2 inç (37,5 mm), 3/4 inç (19 mm), 3/8 inç (9,5 mm), No 4 (4,75 mm), No 10 (2,0 mm), No 16 (1,18 mm), No 30 (0,6 mm), No 50 (0,3 mm), No 100 (0,15 mm) ve No 200 (0,075 mm) göz açıklığında,

Metrik elekler: 75 mm, 60 mm, 40 mm, 20 mm, 6 mm, 4,75 mm, 2 mm, 0,6 mm, 0,4 mm, 0,2 mm, 0,075 mm göz açıklığında,

Terazi, 0,01 g doğrulukla ölçüm yapabilen,

Numune ayırıcı,

Etüv, sürekli olarak $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$ doğrulukla sıcaklık sağlayabilen,

Porselen pota,

Metal tepsi, 30 cm çaplı, 4 cm derinliğinde,

Tepsi, 90 x 45 x 7.5 cm boyutunda,

Bakkal küreği,

Sert fırça,

Çekiç, plastik uçlu

Elek sarsma makinesi, (mecburi değil).

Not - Deney elekleri deney numunesinin dane çapına göre seçilebilir.

4.2.1.2 Deneyin yapılışı

Yarılma veya çeyrekleme metodu ile numuneyi temsil edecek miktardaki deney numunesi alınır.

Numune $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$ 'luk etüvde 24 saat kurutulur ve toplam ağırlığı 0,01 g doğrulukla tartılır.

Numune geniş bir tepsi içine seçilir ve su ile örtülür. Kullanılan suyun her bir litresi için 2 g sodyum heksametafosfat (NaPO_3) katılır. Bunun nedeni parçacıkların üzerine yapışan ince malzemelerin yumuşaması içindir. Numune en az 1 saat süreyle ara sıra karıştırılarak su içinde bekletilir.

Tepsi içindeki deney numunesi ve su, yavaş yavaş No 200 (75 mm göz açıklıklı) eleğin üzerine aktarılır. İri danelerin No 200 eleğe zarar vermemesi için No 200 eleğin üzerine daha büyük göz açıklıklı başka bir elek (No 40 veya No 10 gibi) konularak iri danelerin bu eleğin altına geçmesi önlenir.

No 200 elekten geçemeyen iri daneler üzerindeki ince malzemelerden temizlenene kadar tel veya benzeri sert bir fırça ile fırçalanır. Temizlenen bu iri daneler yumuşak yapılı ise, temizleme işlemi sırasında kendi yapılarından parça kopmamasına özen gösterilmelidir. Bu işlem elekten geçen su hemen hemen duru olana kadar sürdürülür.

No 200 elek üzerinde kalan malzeme tepsi veya porselen potalar içinde (105 ± 10) °C doğrulukla sıcaklık sağlayabilen etüvde 24 saat kurutulur.

Numune en büyük göz açıklığı en üstte olacak şekilde üst üste duran elek serisi üzerine bırakılır ve elekler numunenin düzensiz olarak yuvarlanacak biçimde hareket ettirilir. Eleme, sarsma makinesiyle yapılıyorsa, sarsma süresi en az 10 dakika olmalıdır.

Her elekte kalan malzeme tartılır ve “Dane çapı dağılımı deneyi formu” na yazılır.

4.2.1.3 Hesaplamalar

Toplam numune ağırlığı esas alınarak, her elekte kalan numunenin miktarı ve yüzdesi hesaplanır.

Hesaplamalar tamamlandıktan sonra “Dane çapı dağılımı” formuna çizilir.

Dane dağılımı eğrisinden D_{10} , D_{30} ve D_{60} değerleri okunarak C_u ve C_r hesaplanır:

$$\text{Uniformluk katsayısı, } C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$\text{Süreklilik katsayısı, } C_r = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}}$$

4.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Yatay eksenle mm cinsinden dane çapı, düşeyde % olarak elekten geçen (veya kalan) şeklinde çizilen dane çapı dağılımı grafiği,
- Özellikle sınır elekler olmak üzere kullanılan eleklerden % geçen (veya kalan) miktarı en yakın 0,1 değerine yuvarlatılarak. Bu değer dane çapı dağılımı grafiği üzerinde de gösterilebilir

4.2.2 ASTM D 422'ye göre dane çapı dağılımı deneyi talimatı

ASTM D 422'ye göre dane çapı dağılımı deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır.

4.2.3 CEN ISO/TS 17892-4'e göre dane çapı dağılımı deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-4'e göre dane çapı dağılımı deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. Ancak, bu standartta sadece 63 µm göz açıklığına sahip olan kum-ince eleği belirtilmiş ve bu elek dâhil, numuneyi temsil edecek şekilde seçilen 12 adet eleğin kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

4.2.4 USBR 5325'e göre dane çapı dağılımı deneyi talimatı

USBR 5325'e göre dane çapı dağılımı deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. TS 1900-1 ile tek farkı, USBR 5325'te No 4 (4,75 mm göz açıklıklı) elek dâhil ve üstü elekler kullanılmaktadır.

4.2.5 USBR 5335'e göre dane çapı dağılımı deneyi talimatı

USBR 5335'e göre dane çapı dağılımı deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. TS 1900-1 ile tek farkı, USBR 5335'te No 4 (4,75 mm göz açıklıklı) elek hariç, alt elekler kullanılmaktadır.

4.2.6 BS 1377'ye göre dane çapı dağılımı deneyi talimatı

BS 1377'ye göre dane çapı dağılımı deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır.

4.3 Dane çapı dağılımı deneyinin belirsizlik hesabı**4.3.1 Dane çapı dağılımı deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Dane çapı dağılımı deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi karşılaştırma deneyleri Çizelge 4.1'de, laboratuvarlar arası karşılaştırma deneyleri ise, Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 - Laboratuvar içi karşılaştırma sonuçları (değerler % yığışlımlı değerlerdir)

	No 200	No 100	No 50	No 30	No 16	No 10	No 4	9,5 mm	19,5 mm	38,1 mm	75 mm
Veri sayısı, n	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
En büyük, %	72,8	76,2	81,3	85,8	89,9	93,1	97,1	100,0	100,0	100,0	100,0
Ortanca, %	70,2	74,5	79,6	84,5	88,7	92,0	96,0	98,5	100,0	100,0	100,0
En küçük, %	69,3	73,9	78,9	83,5	87,6	90,9	94,3	97,0	100,0	100,0	100,0
Ortalama, $\bar{X}$, %	70,8	74,9	80,1	84,7	88,9	92,2	95,9	98,5	100,0	100,0	100,0
Standart sapma, σ_{Std} , %	1,48	1,08	1,07	1,07	1,03	0,88	1,16	1,34	0,00	0,00	0,000
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, %	0,66	0,48	0,48	0,48	0,46	0,39	0,52	0,60	0,00	0,00	0,00

Çizelge 4.2 - Laboratuvarlar arası karşılaştırma sonuçları (değerler % yığışlımlı değerlerdir)

	200	100	No 50	No 30	No 16	No 10	No 4	9,5 mm	19,5 mm	38,1 mm	75 mm
Veri sayısı, n	38	35	34	34	34	36	38	35	36	36	38
En büyük, %	76,3	78,7	83,2	87,6	94,5	99,1	98,7	100,0	100,0	100,0	100,0
Ortanca, %	70,5	75,4	80,8	84,6	88,8	92,4	95,8	98,4	100,0	100,0	100,0
En küçük, %	57,4	67,9	60,8	66,0	70,5	74,9	79,2	88,6	87,4	99,3	100,0
Ortalama, $\bar{X}$, %	70,3	75,1	79,8	84,0	88,5	92,2	95,2	97,4	99,2	100,0	100,0
Standart sapma, σ_{Std} , %	3,37	2,37	3,88	3,90	3,99	4,05	3,41	2,49	2,44	0,12	0,00
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, %	0,55	0,40	0,67	0,67	0,68	0,67	0,55	0,42	0,41	0,02	0,00

Laboratuvarlar arası deneylerden elde edilen $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$ değerinin bazı eleklerde, laboratuvar içi elde edilen değerden daha küçük çıkmasının sebebi, laboratuvar içi gerçekleştirilen deney sayısının azlığıdır.

Dane çapı dağılımı bulunması deneyinin rastgele belirsizlik değeri, her bir elek için ayrı ayrı alma yerine, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değer yaklaşık % 20 artırılmış (son üç elek ile ilgili bilgi elimizde mevcut olmadığından) ve aşağıda belirtilen değer alınmıştır.

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele}$ (elek analizi) = 0,008 = % 0,8

4.3.2 Dane çapı dağılımı deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

4.3.2.1 Dane çapı eşitliğinin [geçen (veya kalan)] türevleri

Dane çapı dağılımı deneyinin hesaplanması ve ilgili elemanların kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

1. Yöntem: Deney öncesinde, etüv sonrası alınan toplam numune miktarının (W_T) tartılarak alınması

$$\text{Her bir elekten geçen (veya kalan) yüzde} = \frac{W_i}{W_T}$$

Burada;

W_i Etüv sonrası elek sarsma makinesi sonrası her bir elek üzerinde kalan kuru malzeme miktarı (g),

W_T Etüv sonrası alınan toplam numune miktarı (g)

dır.

$$\frac{\partial \text{Elekte.Kalan}}{\partial W_i} = \frac{1}{W_T}$$

$$\frac{\partial \text{Elekte.Kalan}}{\partial W_T} = -\frac{W_i}{(W_T)^2}$$

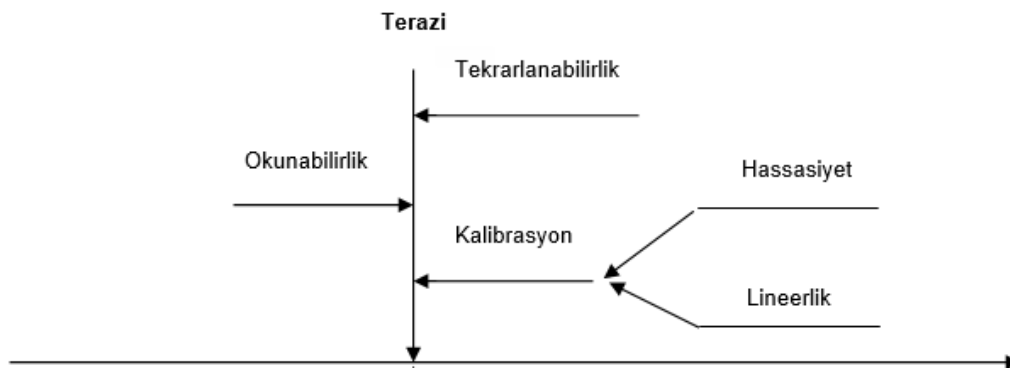
2. Yöntem: Deney öncesinde, etüv sonrası alınan toplam numune miktarının (W_T) tartılmadan yaklaşık alınması

$$\text{Her bir elekten geçen (veya kalan) yüzde} = W_i$$

$$\frac{\partial \text{Elekte.Kalan}}{\partial W_i} = 1$$

4.3.2.2 Dane çapı dağılımı deneyinin kılçık diyagramı

Dane çapı dağılımı deneyi kılçık diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 - Dane çapı dağılımı deneyi kılçık diyagramı

4.3.2.3 Dane çapı dağılımı deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

4.3.2.3.1 Terazi

4.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Dane dağılımı deneyinde kullanılan ince zemin numunesinin en büyük ağırlığı 500 g civarındadır ve aşağıda belirtilen terazi ile ölçülmektedir. Bu terazinin toplam belirsizliği:

$$\text{PRECISA CB 4200 C } u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,01 + 1,09 \cdot 10^{-4} W) \rightarrow k = 2 \rightarrow U = \pm (0,005 + 5,45 \cdot 10^{-5} W)$$

4.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$\text{PRECISA CB 4200 C için } 0,01 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,01 / \sqrt{3} = 0,00577$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

4.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

500 gram ağırlığındaki zemin numunesinin tartım değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 - Deneyde kullanılan dijital terazinin tekrarlanabilirlik verileri

	PRECISA CB 4200C
Veri sayısı, n	36
Ortalama, $\bar{x}$	499,758
Standart sapma, σ_{Std}	0,013
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$	0,0021

4.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$\text{Terazinin toplam belirsizliği, } u_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

4.3.2.3.2 Elek

Eleklerin kalibrasyon sertifikaları, ilgili standartlara göre (TS ISO 3310 serisi vb.) değerlendirilerek, standartlarda belirtilen kriterlere uygun bulunması durumunda deneyde kullanılmalıdır. Fiziksel eşitlikte elek olmadığı için belirsizlik hesabına katılmamalıdır. Bir başka deyişle elekler kontrol altında tutulması gereken ancak belirsizlik hesaplarına katılmayan unsurlardır.

4.3.2.3.3 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

4.3.2.3.4 Sıcaklık farkı

Eleklerin üretildiği çeliğin genleşme katsayısı $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm } ^\circ\text{C}}$ olduğundan, 10°C 'luk bir sıcaklık farkında ve en küçük elek göz açıklığı olan 0,075 mm (No 200):

$$10^{-6} \cdot 10 \cdot 0,075 = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

olduğundan genleşmesi ihmal edilerek **belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır**.

4.3.3.4 Dane çapı dağılımı deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliğin toplamı, her bir elekten geçen (veya kalan) miktarın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$1. \text{ Yöntem: Toplam sistematik belirsizlik, } U_{\text{Sistematik}} = [\left(\frac{\partial \text{Elekte.Kalan}}{W_i} * u_i \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Elekte.Kalan}}{W_T} * u_T \right)^2]^{0,5}$$

$$2. \text{ Yöntem: Toplam sistematik belirsizlik, } U_{\text{Sistematik}} = [\left(\frac{\partial \text{Elekte.Kalan}}{W_i} * u_i \right)^2]^{0,5} = [(1 * u_i)^2]^{0,5} = u_i$$

Bir başa deyişle toplam sistematik belirsizlik terazi belirsizliğinden oluşmaktadır.

4.3.3 Dane çapı dağılımı deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

4.4 Dane çapı dağılımı deneyinin çözümlü örneği

Son yıllarda yayımlanan ulusal ve uluslararası dokümanların incelenmesiyle, özellikle yapı malzemelerinin fiziksel deneylerinde, "fiziksel eşitlikte olmayan" parametrelerin uygunluğu değerlendirildikten sonra uygun bulunanlar "kontrol altında tutulan parametre" olarak kabul edilmiş ve belirsizlik bütçesine dahil edilmemiştir.

4.4.1 Dane çapı dağılımı deneyinden elde edilen veriler

Dane çapı dağılımı deneyinden elde edilen veriler Çizelge 4.4'te verilmiştir. Deneyde PRECISA CB 4200 terazi kullanılmış ve terazinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen ($k = 2$ 'ye bölünmüş) belirsizliği aşağıda verilmiştir. Deneyde etüv kuruşu toplam 500 g deney numunesi kullanılmıştır.

$$U_{\text{Terazi}} = \pm (0,005 + 0,0000545W)$$

Çizelge 4.4 - Dane çapı dağılımı deneyinden elde edilen ham veriler

Elek adı	Elek göz açıklığı mm	Elekte kalan
		numune
		g
3"	75	0,0
1,5"	38	113,8
3/4"	19	98,5
3/8"	9,5	73,6
No 4	4,75	67,8
No 10	2	44,8
No 16	1,19	29,8
No 30	0,59	22,2
No 50	0,297	17,0
No 100	0,149	8,5
No 200	0,075	3,8
İnce (tavada kalan)	-	20,2
		500,0

4.4.2 Dane çapı deneyinin hesaplamaları

4.4.2.1 Her elekten geçen deney numunesinin yüzdesi

Her bir elekten geçen deney numunesinin yüzdesi Çizelge 4.5'te sütun 1 ile sütun 8'de gösterilmiştir.

4.4.2.2 Dane çapı deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}} = 0,008$ (karşılaştırma deneylerinden)

4.4.2.3 Dane çapı deneyinin sistematik belirsizliği

Her elekten geçen deney numunesinin toplam sistematik belirsizliği Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

4.4.2.4 Dane çapı deneyinin toplam belirsizliği

Her elekten geçen deney numunesinin toplam sistematik belirsizliği Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

4.4.3 Dane çapı deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilen değerler 2 ile çarpılıp sütun 16'da verilmiştir. Hesaplanan bu verilere bağlı olarak çizilen dane çapı dağılımı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 - Dane çapı deneyinden elde edilen veriler kullanılarak dane çapı dağılımı değerlerinin ve belirsizlik değerlerinin hesaplanması (1. Yöntem)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Elek adı	Elek göz açıklığı mm	Elekte kalan numune g	Kalan	Toplam kalan	Toplam geçen	Toplam geçen %	$\frac{\partial EK}{\partial W_i} = \frac{1}{W_T}$	Terazi Toplam u _i	$\frac{\partial EK}{\partial W_T} = -\frac{W_i}{(W_T)^2}$	u _T	Toplam sistematiik belirsizlik	Toplam rastgele belirsizlik	Toplam belirsizlik	Genişletilmiş belirsizlik	Genişletilmiş belirsizlik %
3"	75	0,00	0,0000	0,0000	1,0000	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,5"	38	113,80	0,2276	0,2276	0,7724	77,2	0,0020	0,0128	-0,0005	0,0328	0,0000296	0,008	0,0080	0,0160	1,6
3/4"	19	98,50	0,1970	0,4246	0,5754	57,5	0,0020	0,0121	-0,0004	0,0328	0,0000274	0,008	0,0080	0,0160	1,6
3/8"	9,5	73,60	0,1472	0,5718	0,4282	42,8	0,0020	0,0109	-0,0003	0,0328	0,0000239	0,008	0,0080	0,0160	1,6
No 4	4,75	67,80	0,1356	0,7074	0,2926	29,3	0,0020	0,0106	-0,0003	0,0328	0,0000231	0,008	0,0080	0,0160	1,6
No 10	2	44,80	0,0896	0,7970	0,2030	20,3	0,0020	0,0096	-0,0002	0,0328	0,0000202	0,008	0,0080	0,0160	1,6
No 16	1,19	29,80	0,0596	0,8566	0,1434	14,3	0,0020	0,0090	-0,0001	0,0328	0,0000185	0,008	0,0080	0,0160	1,6
No 30	0,59	22,20	0,0444	0,9010	0,0990	9,9	0,0020	0,0087	-0,0001	0,0328	0,0000177	0,008	0,0080	0,0160	1,6
No 50	0,297	17,00	0,0340	0,9350	0,0650	6,5	0,0020	0,0085	-0,0001	0,0328	0,0000172	0,008	0,0080	0,0160	1,6
No 100	0,149	8,50	0,0170	0,9520	0,0480	4,8	0,0020	0,0082	0,0000	0,0328	0,0000165	0,008	0,0080	0,0160	1,6
No 200	0,075	3,80	0,0076	0,9596	0,0404	4,0	0,0020	0,0081	0,0000	0,0328	0,0000161	0,008	0,0080	0,0160	1,6
Tava	-	20,20	0,0404	1,0000											

Kolon 1	Elek adı
Kolon 2	Elek göz açıklığı
Kolon 3	Deneyden elde edilmiştir
Kolon 4	Kolon 3 / Kullanılan toplam malzeme (bu deney için 500 g)
Kolon 5	Kolon 4 kümülatif toplanarak hesaplanmıştır
Kolon 6	Toplam Geçen (1,00 - Kolon 5)
Kolon 7	Yüzde olarak Toplam Geçen (Kolon 6 * 100)
Kolon 8	1/W _T

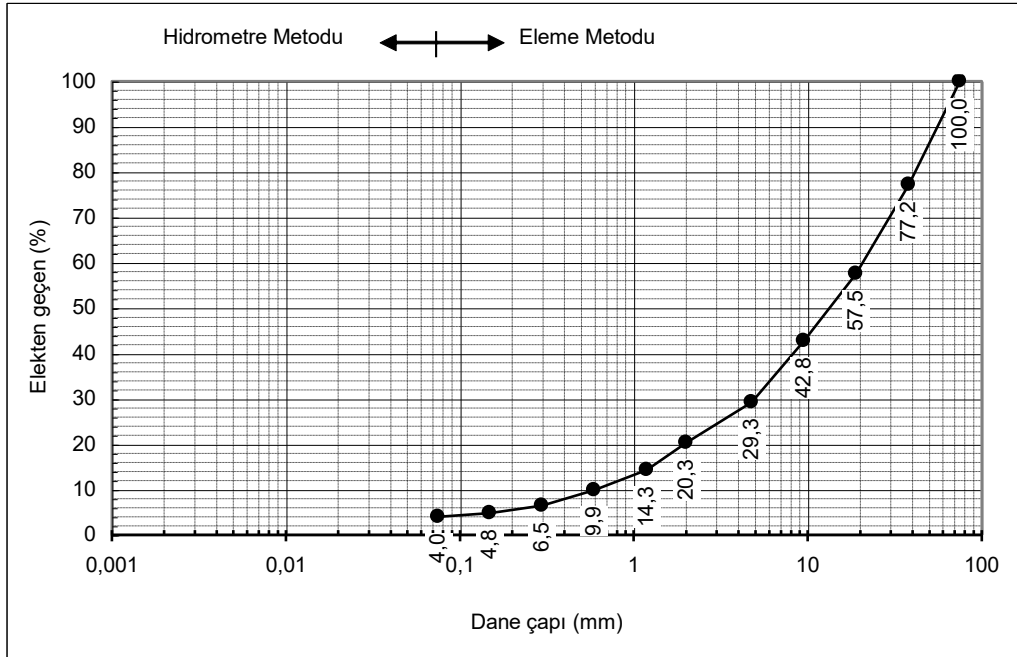
Kolon 9	u _i = Terazinin toplam belirsizliği [((0,005+0,0000545*W _i)) ² + (Okunabilirlik / 3 ^{0,5}) ² + (Tekrarlanabilirlik) ²] ^{0,5}
Kolon 10	-W _i / (W _T) ²
Kolon 11	u _T = Terazinin toplam belirsizliği [((0,005+0,0000545*W _T)) ² + (Okunabilirlik / 3 ^{0,5}) ² + (Tekrarlanabilirlik) ²] ^{0,5}
Kolon 12	Toplam sistematiik belirsizlik
Kolon 13	Toplam rastgele belirsizlik
Kolon 14	Toplam belirsizlik, [(Rastgele) ² +(Sistematiik) ²] ^{0,5}
Kolon 15	% 95 güven aralığında (k * Kolon 14)
Kolon 16	Yüzde olarak belirsizlik (kolon15 * 100)

Çizelge 4.6 - Dane çapı deneyinden elde edilen veriler kullanılarak dane çapı dağılımı değerlerinin ve belirsizlik değerlerinin hesaplanması (2. Yöntem)

9		12	13	14	15	16
Terazi toplam g		Toplam sistematik belirsizlik	Toplam rastgele belirsizlik	Toplam belirsizlik	Genişletilmiş belirsizlik	Genişletilmiş belirsizlik %
-		-	-	-	-	
0,0128		0,0128	0,008	0,0151	0,0301	3,0
0,0121		0,0121	0,008	0,0145	0,0289	2,9
0,0109		0,0109	0,008	0,0135	0,0271	2,7
0,0106		0,0106	0,008	0,0133	0,0266	2,7
0,0096		0,0096	0,008	0,0125	0,0251	2,5
0,0090		0,0090	0,008	0,0121	0,0241	2,4
0,0087		0,0087	0,008	0,0118	0,0237	2,4
0,0085		0,0085	0,008	0,0117	0,0234	2,3
0,0082		0,0082	0,008	0,0115	0,0229	2,3
0,0081		0,0081	0,008	0,0114	0,0227	2,3

DANE ÇAPI DAĞILIMI (*)

Numune no	Araştırma numunesi	Deney başlama tarihi	20.01.2007
Kuyu/sondaj no	-	Deney bitiş tarihi	23.01.2007
Deney standardı	TS 1900-1		
D ₁₀ (mm)	0,6	Uniformluk katsayısı, $C_u = D_{60}/D_{10}$	35
D ₃₀ (mm)	4,9	Süreklilik katsayısı, $C_r = (D_{30}D_{30})/(D_{60}D_{10})$	1,9
D ₆₀ (mm)	21		
Moloz, (%)	0,0	Çakıl, (%)	70,7
		Kum, (%)	25,2
		İnce, (%)	4,0



Elek	3"	1,5"	3/4"	3/8"	No 4	No 10	No 16
Elek	3"	1,5"	3/4"	3/8"	No 4	No 10	No 16
Göz açıklığı, (mm)	75	38	19	9,5	4,75	2,00	1,19
Göz açıklığı, (mm)	0,0	22,8	19,7	14,7	9,5	4,75	1,19
Kalan, (%)	100,0	77,2	57,5	42,8	29,3	20,3	14,3
Toplam geçen, (%)	-	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,6
Belirsizlik (1. Yöntem)	-	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Elek	No 30	No 50	No 100	No 200			
Belirsizlik (2. Yöntem)	No 30	No 50	No 100	No 200			
Göz açıklığı, (mm)	0,59	0,297	0,149	0,075			
Elek	No 30	No 50	No 100	No 200			
Göz açıklığı, (mm)	0,59	0,297	0,149	0,075			
Toplam geçen, (%)	9,9	6,5	4,8	4,0			
Kalan, (%)	1,6	2,4	1,6	-0,8			
Toplam geçen, (%)	9,9	6,5	4,8	4,0			
Belirsizlik (1. Yöntem)	1,6	1,6	1,6	1,6			
Belirsizlik (2. Yöntem)	2,4	2,3	2,3	2,3			

Şekil 4.2 - Dane çapı dağılımı deneyinden elde edilen sonuçlarının gösterilmesi

4.5 İlgili standartlar

ASTM D 422: 63 (1998). Standard test method for particle-size analysis of soils, Vol. 04.08.

BS 1377; Part 2: 1990. Soil for civil engineering purposes, page 30, 9.2 Wet sieving method.

CEN ISO/TS 17892-4: 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil part 4: Determination of particle size distribution (ISO/TS 17892-4: 2004), Part 6.2, page 21.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini

USBR 5325: 1989. Procedure for performing gradation analysis of gravel size fraction of soils, Vol.2.

USBR 5335: 1989. Procedure for performing gradation analysis of soils without hydrometer-wet sieve, Vol.2.

5 Hidrometre deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

5.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1, ASTM D 422, CEN ISO/TS 17892-4, USBR 5330 ve BS 1377'ye göre hidrometre deneyi anlatılmıştır.

5.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirme yöntemleri

5.2.1 TS 1900-1'e göre hidrometre deneyi talimatı

Bu deney TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.6.4 Deney 6 (D): İnce daneli zeminlerin dane çapı dağılımının bulunması için hidrometre metoduna göre yapılmaktadır.

Bu deney ile iri kum boyutundan ve daha ince danelerin dane çapı dağılımı belirlenir. Bu deney kum-ince malzeme sınırı olan elekten geçen numune miktarı % 10'dan daha fazla değişim gösteriyorsa uygulanır.

Ayrıca, numune kum - ince malzeme sınırı olan elekten geçirilmişse, deney geçen malzeme üzerinden yapılabilir.

5.2.1.1 Gerekli Araçlar

Hidrometre (dansimetre), ölçme aralığı (0,995 - 1,030) g/mL ve bölüntü çizgileri 0,0005 g/mL'lik aralıklı olan (Şekil 5.1),

Mezür, 1000 mL kapasiteli, 5,5 cm çapında, 30 cm boyunda olan,

Termometre, 0 °C ile 50 °C aralığı kapsayan, 0,5 °C doğrulukla okuma yapılabilen,

Mekanik karıştırıcı, Motor hızı 3000 devir/dakika'nın üzerinde olan,

Elek, 0,075 mm (No 200) göz açıklıklı,

Elek tavası,

Terazi 0,01 g doğrulukla tartım yapabilen,

Etüv, Sürekli olarak (105 ± 10) °C doğrulukla sıcaklık sağlayabilen,

Kronometre,

Pipet,

Kimyasal madde, Sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum heksametafosfat (NaPO_3) ve hidrojen peroksit

Cetvel,

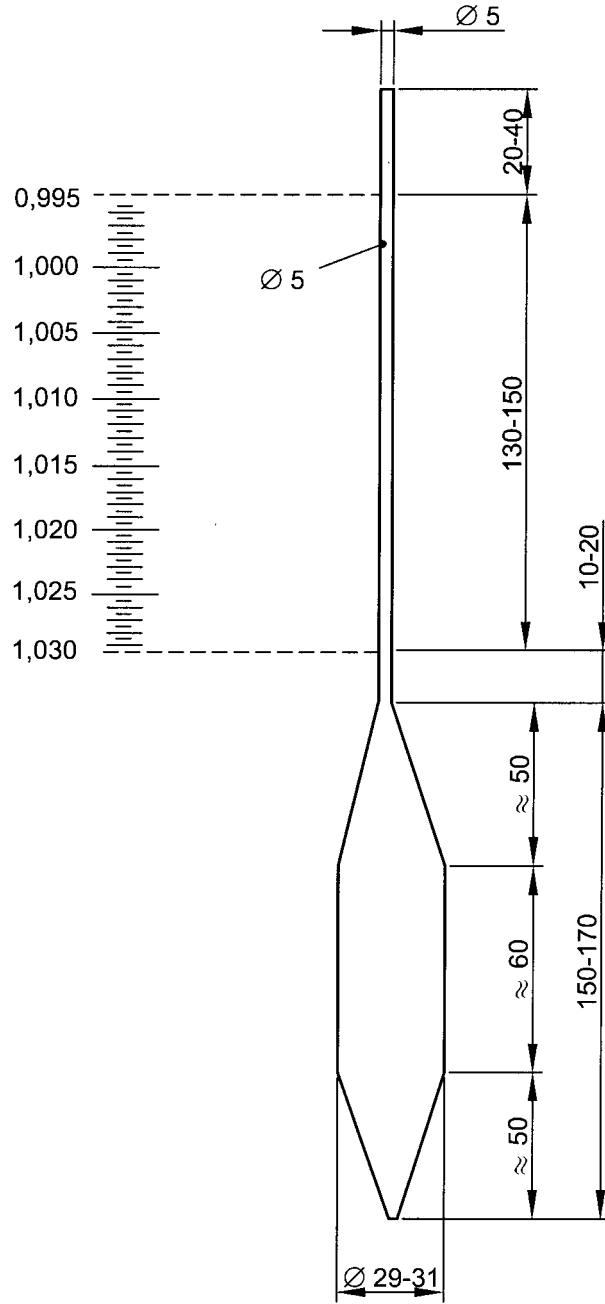
Desikatör,

Pota,

Damıtık su.

Not - Kullanım süreleri dolan kimyasallar uygun şekilde imha edilmelidir.

Ölçüler mm'dir



Şekil 5.1 - İnce daneli zeminlerde dane çapı dağılımının bulunması için kullanılan hidrometre

5.2.1.2 Reaktifler

5.2.1.2.1 Hidrojen peroksit

Organik madde yüzdesi % 2 den fazla ise, hidrojen peroksit çözeltisi kullanılır. 150 mL hidrojen peroksit çözeltisi hazırlamak için 30 mL hidrojen peroksit ve 120 mL damıtık su kullanılır.

5.2.1.2.2 Dispersiyon verici kimyasallar

40 g sodyum heksametafosfat ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{19}$) karışımı yaklaşık 150 mL damıtık suda karıştırılır ve 1000 mL'ye tamamlanır. 10 deney için hazırlanan karışım 24 saat bekletildikten sonra bu karışımdan her deney için 100 mL alınır. Bu çözelti ayda bir veya pH değeri 8-9 limiti dışına çıktığında yenilenir.

5.2.1.2.3 Dağıtma maddesi

Dağıtma maddesi katılmasının gerektirdiği düzeltme faktörü (X), tartılmış bir terazi şişesine 50 mL dağıtma maddesi çözeltisi konup, çözelti (105 ± 10) °C sıcaklıktaki etüvde buharlaştırılması sonucu elde edilen dağıtma maddesinin ağırlığından hesaplanır, W_d . Bu miktar yaklaşık 2 g olduğundan:

$$X = 2 W_d \cong 4$$

Bu düzeltme, sıcaklık derecesinden bağımsızdır.

5.2.1.3 Hidrometrenin kalibrasyonu

Hidrometre 0,1 g doğrulukla tartılır. Bu ağırlık yaklaşık olarak hidrometrenin hacmini verir, V_h (Madde 5.4.1.2.1.2)

Mezürün kesit alanı, A, iki taksimat arasındaki (örneğin 900 mL ile 1000 mL, 800 mL ile 1000 mL, ..., 100 mL ile 1000 mL) mesafenin ölçülmesi ve bu mesafenin bu iki işaret arasındaki hacme bölünmesi ile bulunur.

Hidrometrenin sapındaki taksimat işareti ile ana taksimat işaretleri arasındaki mesafeler ölçülür, R_h .

Hidrometrenin boyun noktasının en yakın bölüntü çizgisine olan uzaklığı ölçülür, H.

R_h okumasıyla ilgili uzaklık değeri, R_h ile H'nin toplamına eşittir.

Gövdenin boyun noktasından alt ucuna kadar olan uzaklık ölçülür, h.

R_h ana bölüntü çizgilerine karşılık olan H_R efektif değerleri aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$H_R = H + \frac{1}{2} \left(h - \frac{V_h}{A} \right)$$

H_R ve R_h arasındaki ilişki, milimetrik kâğıdına çizilerek en iyi doğrunun eşitliği bulunur.

5.2.1.4 Menisküs düzeltmesi

Sapı temizlenmiş hidrometre, içinde 700 mL kadar damıtık su bulunan 1000 mL'lik mezürün içerisine daldırılır (Madde 5.4.1.2.1.3).

Su yüzeyinin hafifçe altından bakıldığında, elips biçiminde görünen su yüzeyi düz bir çizgi gibi görüne kadar göz yükseltilir. Bu çizginin hidrometre ölçeğini kestiği nokta tespit edilir, AA.

Su yüzeyinin hafifçe üstünden bakılarak menisküsün üst sınırının hidrometre ölçeğini kestiği nokta saptanır, BB.

Menisküs düzeltmesi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$C_m = (AA - BB) * 1000$$

5.2.1.5 Sıcaklık düzeltmesi

Kullanılan karışımın sıcaklığa bağlı M_t katsayıları Çizelge A.1'den (Ek A) bulunur.

5.2.1.6 Deneyin Yapılışı

Zemin numunesinde organik koku (çürüme kokusu) yoksa, organik madde miktarı olmadığı kabul edilerek Madde 5.2.1.6.3'te anlatılan çökeltme işlemine geçilir.

5.2.1.6.1 Organik madde miktarı % 2 den fazla olan numunenin dane dağılımı

Havada kurutulmuş numuneden 0,075 mm göz açıklıklı elekten elenerek 50 g veya 100 g alınır (killi zeminlerde 50 g, kumlu zeminlerde ise, 100 g).

Numune geniş ağızlı konik şişeye konur, üzerine 150 mL hidrojen peroksit çözeltisi eklenir. Birkaç dakika cam çubukla hafifçe karıştırılır. Şişenin ağzı cam kapakla örtülür, ertesi güne kadar bekletilir. Çözelti hafif ateşte ısıtılır, taşma olmaması için sık sık karıştırılır. Köpürme kesilir kesilmez karışım kaynatılarak hacmi 50 mL düşürülür.

Porselen pota 0,01 g doğrulukla tartılır ve şişedeki karışım potaya aktarılır. Bu işlem sırasında olabildiğince az damıtık su kullanılır. Pota içindekilerle birlikte etüve konur $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$ 'ta kurutulur, desikatöre konur soğutulur. Bu numune 0,01 g doğrulukla tartılır, kap ağırlığı çıkarılarak kalan kuru numune miktarı **W_b** elde edilir.

Numune porselen pota içine alınır 100 mL sodyum heksametafosfat eklenir. 10 dakika hafif ateşte ısıtılır. Bazı karışımlarda topaklanma olursa, dağıtıcı miktarını arttırmak gerekebilir.

Karışım karıştırıcıya aktarılır. Pota üzerinde kalan numunelerde damıtık su ile yıkanarak karıştırıcıya girmesi sağlanır. Bu işlem sırasında kullanılan damıtık su miktarı 150 mL'yi aşmamalıdır. Sonra zemin süspansiyonu 15 dakika karıştırılır.

Süspansiyon vakit geçirmeden 1000 mL'lik mezüre aktarılır. Karıştırma kabına yapışmış kalıntılar pipetten damıtık su fışkırtılarak temizlenir. Bu işlemler için kullanılan damıtık su 500 mL aşmamalıdır. Damıtık su eklenerek 1000 mL'ye tamamlanır.

Madde 5.2.1.6.3 Çökertme işlemine geçilir.

5.2.1.6.2 Organik madde miktarı % 2'den az olan numunenin dane dağılımı

Yaklaşık 200 g numune kum - ince malzeme sınırı olan 0,075 mm göz açıklıklı elekten elenir ve $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulur.

Kurutulan numuneden 50 g tartılarak karıştırma kabına konur

Danelerin birbirine yapışmasını önleyen ve Madde 5.2.1.2.2'ye göre hazırlanan dispersiyon verici malzemeden 100 mL karıştırma kabına eklenir.

50 g zemin numunesi ile 100 mL dispersiyon verici malzeme motor hızı 3000 devir/dakika üstündeki bir karıştırıcı ile 15 dakika süreyle karıştırılır.

Bu malzeme kayıp verilmeden 1000 mL'lik mezür içerisine koyulur. Karıştırma kabına yapışmış kalıntılar pipetten damıtık su fışkırtılarak temizlenir. Mezür içindeki süspansiyon damıtık su ile 1000 mL'ye tamamlanır.

Madde 5.2.1.6.3 çökertme işlemine geçilir.

5.2.1.6.3 Çökeltme işlemi

Çökeltme işleminde Stokes kanunundan faydalanılır. Stokes kanununa göre, hareketsiz su içinde kendiliğinden çöken D çapındaki küresel daneciğin hızı (v) aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilir:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\mu} D^2$$

Burada;

γ_s Daneciğin yoğunluğu (birim hacim ağırlığı) (g/cm^3),

γ_w Suyun yoğunluğu (g/cm^3),

μ Suyun dinamik viskozitesi (Nms)

dir.

Mezürün ağzı lastik bir tıpa ile kapatılır homojen bir süspansiyon oluncaya kadar çalkalanır, en sonunda baş aşağı çevrilir. Çalkalama işlemi biter bitmez mezür durdurulur, düz bir yüzey üzerine konur ve kronometre çalıştırılır. Hidrometre yüzme durumunun az altına gelinceye kadar süspansiyona daldırılır ve serbestçe yüzme bırakılır.

Kronometreye bakılarak 0,5., 1., 2. ve 4. dakikalarda hidrometre okumaları alınır. Bundan sonra hidrometre yavaşça süspansiyondan çıkartılır damıtık suyla yıkanır ve zemin süspansiyonuyla aynı sıcaklıkta tutulan damıtık su dolu diğer bir mezür içinde bekletilir.

Kronometre 8'inci dakikaya yaklaşırken (yaklaşık 15 saniye kala) hidrometre yeniden süspansiyona daldırılır ve hidrometre okuması alınıp kaydedilir. Okuma alındıktan sonra hidrometre çıkarılır, yıkanır, damıtık su içine konur. Aynı biçimde 8., 15. ve 30. dakikalarda ve 1., 2. ve 4. saatlerde okumaları alınır. Bundan sonra iki gün süreyle 1 veya 2 kez okuma alınır ve bu okumalara karşılık çökme süreleri tam olarak kaydedilir.

Hidrometrenin her okumadan önce süspansiyona daldırılması ve okumadan sonra çıkarılması sırasında süspansiyonun çalkalanmamasına özen gösterilmelidir. Hidrometrenin daldırılması ve çıkarılması işlemlerinin her biri 10 saniyelik süre içerisinde yapılmalıdır. Süspansiyonun titreşim etkisine uğraması önlenmelidir.

Su banyosunun kullanılmadığı deneylerde süspansiyonun sıcaklığı ilk 15 dakikada bir kez ve daha sonraki her okumadan sonra ölçülüp kaydedilir.

5.2.1.7 Hesaplamalar

R_h değeri, hidrometre okumaları R'_h ve menüsküs düzeltmesi C_m in toplanmasıyla bulunur, $R_h = R'_h + C_m$.

Sıcaklığa bağlı olan, sıcaklık düzeltme katsayısı M_t , zeminin yoğunluğu γ_s ve suyun yoğunluğu γ_w bulunur (Çizelge A.1).

Eşdeğer dane çapı D (mm) aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{(\gamma_s - \gamma_w)t}}$$

Burada;

γ_s Zemin numunesinin yoğunluğu (g/cm³),

γ_w Suyun yoğunluğu (g/cm³),

μ Suyun dinamik viskozitesi (Nms),

H_R Hidrometre okuması (mm),

t Zaman (dakika)

dır.

Eşdeğer dane çapından daha küçük danelerin geçme yüzdesi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$K = \frac{100\gamma_s(R_h + M_t - X)}{W_b(\gamma_s - \gamma_w)}$$

Burada;

γ_s Zemin numunesinin yoğunluğu (g/cm^3),

γ_w Suyun yoğunluğu (g/cm^3),

R_h Hidrometre okuması,

M_t Sıcaklık düzeltmesi,

X Dağıtma maddesi,

W_b Kullanılan zeminin ağırlığı (g)

dır.

No 200 elekten geçen zemin numunesi üzerinde deney yapılmışsa, toplam geçen yüzde aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$K^*(0,075 \text{ mm göz açıklıklı elekten geçen yüzde})$

Deney sırasında elde edilen değerler "Hidrometre deneyi formu" na yazılır ve aynı form üzerinde hesaplamalar yapılır. Sonuçlar "Dane çapı dağılımı" formuna çizilir.

5.2.1.8 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Yatay ekseninde mm cinsinden eşdeğer dane çapı, düşeyde % olarak geçen (veya kalan) şeklinde çizilen dane çapı dağılımı grafiği, değerler en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak.

5.2.2 ASTM D 422'ye göre hidrometre deneyi talimatı

ASTM D 422'ye göre hidrometre deneyi talimatı aynen TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. TS 1900-1 ile farklılıkları aşağıda verilmiştir:

1000 mL damıtık suya 40 g sodyum heksametafosfat (bazen sodyum metafosfat olarak da adlandırılır) katılmak suretiyle bir çözelti hazırlanır. Çözeltinin pH değeri 8-9 arasında olmalıdır veya bir aydan fazla olan çözeltiler kullanılmamalıdır. Hazırlanan çözeltilerin hazırlanma tarihleri mezüvün üzerine yazılmalıdır.

1000 mL'lik sodyum heksametafosfatlı (40 g/L) damıtık suda hidrometre okumaları alınarak menüsküs değeri bulunur.

Havada kurtulmuş killi ve siltli kuru numuneden 50 g alınır. Bu sırada yaklaşık 15 g numune su içeriği deneyi için alınır. (105 ± 10) °C'luk etüvde kurutulduktan sonra tartılır. Aradaki fark büyükse, hesaplamalarda bir katsayı ile çarpılır. Düzeltme katsayısı = (Etüv kuru / Hava kuru)

Numune 250 mL'lik mezüve konur ve üzerine 125 mL sodyum heksametafosfatlı (40 g/L) damıtık su ilave edilir. Mezüv çalkalanarak zeminin ıslanması sağlanır. Suyun emilmesini sağlamak için en az 16 saat bekletilir.

Emme süresi bitiminde mezüv tekrar çalkalanır. Karışım mikserin kabına boşaltılır. Mezüvdeki kalıntılar damıtık su ile yıkanarak, kabın içine akması sağlanır. Su seviyesi mikser kabının en az yarısında olacak şekilde damıtık su ile doldurulur. En az 1 dakika karıştırılır. Karıştırma süresi aşağıdaki Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 - Karıştırma süreleri

Plastik endeksi	Karıştırma süresi (dakika)
PI < 5	5
5 ≤ PI < 20	10
PI ≥ 20	15

Karışım hemen 1000 mL'lik mezüve aktarılır. Karıştırma kabında kalan kalıntılar damıtık su ile yıkanarak, mezüvün içine akması sağlanır.

1000 mL'lik mezüv 1 dakika boyunca ağzı kapatılarak baş-aşağı çevrilerek karıştırılır. 1 dakika sonunda mezüv uygun bir yere konarak TS 1900-1'de belirtilen sürelerde hidrometre okumaları alınır.

Hidrometre mezüve okuma süresinden yaklaşık 20 ilâ 25 saniye önce özenle daldırılır. Okuma alındıktan hemen sonra hidrometre mezüvden özenle çıkartılır. Her okumada sırasında suyun sıcaklığı da kaydedilir. Okuma sonrası hidrometre damıtık su içinde bekletilmelidir.

Hidrometrenin çözelti yoğunluğunu ölçtüğü sırada askıda kalan yüzde aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır:

a) Bağıl yoğunluğa göre kalibre edilen hidrometrelerde (151H):

$$\text{Geçen} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \frac{V}{W_s} (r_h - r_w) * 100 (\%)$$

Burada;

γ_s Zemin numunesinin yoğunluğu (g/cm³),

γ_w Suyun yoğunluğu (g/cm³),

V Çözeltinin hacmi, (1000 mL),

W_s Kuru numune ağırlığı (g),

r_h Hidrometre okuması,

r_s Çözeltideki (damıtık suya 40 g/L olacak şekilde eklenen sodyum heksametafosfat ile) hidrometre okuması

dır.

Tüm veriler yerine konulduğunda:

$$\text{Geçen} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \frac{1000}{50} (r_h - r_w) * 100$$

1000($r_h - r_w$) değeri, hidrometre okumasından 1 sayısının çıkarılmış değeri olduğundan

$$\text{Geçen} = 2 \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} (R_h - R_w)$$

b) g/L cinsinden kalibre edilen hidrometrelerde (152H):

$$\text{Geçen} = \frac{\alpha R_h}{W_s} * 100 (\%)$$

Burada;

α Zemin numunesinin bağıl yoğunluğu 2,65'ten farklı ise, Çizelge 5.2'den alınacak bir katsayı,

R_h Hidrometre okuması,

W_s Kuru numune ağırlığı (g),

R_s Çözeltideki (damıtık suya 40 g/L olacak şekilde eklenen sodyum heksametafosfat ile) hidrometre okuması

dır.

Çizelge 5.2 - Bağıl yoğunluğa karşı α değerleri ($\alpha = 1,5555 - 0,2091G_s$ $R^2 = 0,9944$)

G_s	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90	2,95
α	1,05	1,03	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94

Yüzde geçen olarak hesaplanan geçen değeri, No 200 elekten geçen yüzde ile çarpılırsa, elek ve hidrometre deneyinin sonucu birlikte çizilme imkanına kavuşur.

Hesaplamalarda askıdaki çözeltinin eşdeğer dane çapı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmalıdır:

$$D = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{v} * 100 = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{\frac{H_R}{t}} * 100 = (\text{Katsayı}) \sqrt{\frac{H_R}{t}}$$

Burada;

D Eşdeğer dane çapı (mm),

γ_s Zemin numunesinin yoğunluğu (g/cm³),

γ_w Suyun yoğunluğu (g/cm³),

μ Suyun dinamik viskozitesi (Nms),

H_R Hidrometrenin kalibrasyon eğrisinden elde edilen değer,

t Zaman (dakika)

dır.

Deney su banyosunda yapılmıyorsa, sıcaklık düzeltmesi de yapılmalıdır. Sıcaklık düzeltmesi TS 1900-1'de anlatılmıştır.

Hidrometrenin kalibrasyonu TS 1900-1'de anlatıldığı için burada anlatılmayacaktır.

ASTM D 422'ye göre hidrometre deneyinin hesaplanma basamakları Çizelge 5.3'te verilmiştir:

Çizelge 5.3 - Hidrometre deneyinin hesaplanması

Geçen süre t Dakika	Hidrometre okuması R _h	Sudaki hidrometre okuması R _w	Su sıcaklığı °C	Düzeltilmiş hidrometre okuması R _H	H _R (cm)	γ _w g/cm ³	μ mPa	D mm	Geçen %	Toplam geçen %
---------------------------	--------------------------------------	---	--------------------	--	------------------------	-------------------------------------	----------	---------	------------	-------------------

$$D = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{v} * 100 = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{\frac{H_R}{t}} * 100$$

$$\text{Geçen} = 2 \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} (R_h - R_w)$$

5.2.3 CEN ISO/TS 17892-4'e göre hidrometre deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-4'e göre hidrometre deneyi aynen TS 1900-1 gibidir. Ancak, R_d aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$R_d = R'_h + R'_0$$

Burada, R'₀ referans çözeltide gözlenen hidrometre değeridir.

5.2.4 USBR 5330'a göre hidrometre deneyi talimatı

USBR 5330'a göre hidrometre deneyi ASTM D 422'ye benzemektedir. Aşağıda sadece farklılıkları açıklanmıştır:

USBR 5330'a göre hidrometre deneyinde 152H tipi hidrometre kullanılmalıdır.

Hazırlanan 40 g/L sodyum heksametafosfat çözeltisi (% 4), ortam sıcaklığı 23 °C civarında ise, en fazla 21 gün, 23 °C'tan çok yüksekse, en fazla 7 gün kullanılmalıdır. Hazırlanan çözeltilerin üzerinde hazırlama tarihleri yazılmalıdır.

No 200'den geçen malzeme etüv kurusu olmalıdır.

Belirli aralıklarla hidrometre okumaları alındığında, su sıcaklığı ± 2 °C arasında olmalıdır. Su sıcaklığı ayarlandıktan sonra, bir sonraki okuma aralığında okuma alınmalıdır.

USBR 5330'a göre hidrometre deneyinin hesaplanması Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Sıcaklık düzeltmesi aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$\text{Sıcaklık düzeltmesi} = 0,25 \text{ Sıcaklık (°C)} - 4,85$$

Çizelge 5.4 - Hidrometre deneyinin hesaplanması

Geçen süre t Dakika	Hidrometre okuması R _h	Sudaki hidrometre okuması R _w	Su sıcaklığı °C	Sıcaklık Düzeltmesi SD	Düzeltilmiş hidrometre okuması R _h - R _w - SD	Geçen %	Toplam geçen %	Düzeltilmiş R _h + C _m	D mm
---------------------------	--------------------------------------	---	--------------------	---------------------------	--	------------	-------------------	--	---------

$$\text{Geçen} = \frac{\alpha R_h}{W_s} * 100 (\%)$$

$$D = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{v} * 100 = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{\frac{H_R}{t}} * 100$$

5.2.5 BS 1377'ye göre hidrometre deneyi talimatı

BS 1377'ye göre hidrometre deneyi aynen TS 1900-1 gibidir.

5.3 Hidrometre deneyinin belirsizlik hesabı**5.3.1 Hidrometre deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Çizelge 5.5, Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'delerde laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinden elde edilen hidrometre okuması değerleri, bu okumalara karşılık gelen ϕ D ve yüzde geçen değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.5 - Laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinden elde edilen hidrometre okumaları

Okuma (Dakika)	0,5	1	2	5	10	20	40	60	120	240	1440
Veri sayısı, n	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
En büyük	31,6	30,5	29,6	27,5	26,4	25,4	24,2	23,6	22,5	21,0	18,6
Ortanca	30,6	29,3	27,6	25,6	24,4	23,3	22,2	21,4	20,4	19,1	15,1
En küçük	28,6	27,0	25,5	23,1	21,6	21,0	20,3	19,5	17,8	13,8	10,0
Ortalama, $\bar{x}$	30,6	29,2	27,7	25,9	24,6	23,6	22,4	21,5	20,4	18,9	14,9
Standart sapma, σ_{Std}	0,8	0,9	1,0	1,3	1,4	1,3	1,2	1,3	1,4	1,9	2,6
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7

Çizelge 5.6 - Hesaplanan D değeri ($G_s = 2,5$, 0,075 mm geçen % 100 ve sıcaklık 20 °C alınmıştır)

Okuma (Dakika)	0,5	1	2	5	10	20	40	60	120	240	1440
Veri sayısı, n	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
En büyük	5,94 E-02	4,30 E-02	3,11 E-02	2,03 E-02	1,47 E-02	1,04 E-02	7,45 E-03	6,14 E-03	4,43 E-03	3,27 E-03	1,39 E-03
Ortanca	5,76 E-02	4,16 E-02	3,02 E-02	1,96 E-02	1,41 E-02	1,01 E-02	7,27 E-03	6,00 E-03	4,30 E-03	3,08 E-03	1,32 E-03
En küçük	5,66 E-02	4,07 E-02	2,92 E-02	1,91 E-02	1,37 E-02	9,84 E-03	7,08 E-03	5,83 E-03	4,18 E-03	3,01 E-03	1,27 E-03
Ortalama, $\bar{x}$	5,75 E-02	4,16 E-02	3,01 E-02	1,96 E-02	1,41 E-02	1,01 E-02	7,25 E-03	5,98 E-03	4,29 E-03	3,09 E-03	1,32 E-03
Standart sapma, σ_{Std}	7,18 E-04	5,95 E-04	4,36 E-04	3,60 E-04	2,62 E-04	1,79 E-04	1,15 E-04	9,97 E-05	7,41 E-05	7,02 E-05	3,72 E-05
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	1,92 E-04	1,59 E-04	1,17 E-04	9,62 E-05	6,99 E-05	4,79 E-05	3,07 E-05	2,67 E-05	1,98 E-05	1,87 E-05	9,95 E-06

Çizelge 5.7 - Yüzde geçen değeri ($G_s = 2,5$, $0,075$ mm geçen % 100 ve sıcaklık 20 °C alınmıştır)

Okuma (Dakika)	0,5	1	2	5	10	20	40	60	120	240	1440
Veri sayısı, n	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
En büyük	93,6	89,9	86,9	79,9	76,2	72,9	68,9	66,9	63,3	58,3	50,3
Ortanca	90,1	85,7	80,1	73,6	69,4	65,9	62,1	59,4	56,1	51,9	38,6
En küçük	83,6	78,2	73,2	65,3	60,3	58,3	55,9	53,3	47,6	34,3	21,6
Ortalama, $\bar{x}$	90,2	85,7	80,5	74,5	70,2	66,8	62,9	60,1	56,1	51,2	37,8
Standart sapma, σ_{Std}	2,526	3,027	3,200	4,294	4,499	4,397	4,054	4,354	4,649	6,415	8,637
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,68	0,81	0,86	1,15	1,20	1,18	1,08	1,16	1,24	1,71	2,31

Hidrometre deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değerler % 25 ile artırılarak (emniyetli tarafta kalmak için) alınmış ve sonuçlar Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 - Eşdeğer dane çapı (D) ile yüzde geçen $U_{Rastgele}$ değerleri ($G_s = 2,5$, $0,075$ mm geçen % 100 ve sıcaklık 20 °C alınmıştır)

Okuma (dakika)	0,5	1	2	5	10	20	40	60	120	240	1440
D (10^{-3})	0,24	0,20	0,15	0,12	0,09	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
Yüzde geçen	0,9	1,0	1,1	1,4	1,5	1,5	1,4	1,5	1,6	2,1	2,9

Not - Hem eşdeğer dane çapının hem de yüzde geçen miktardan elde edilen en büyük değerler seçilerek, hesaplamalarda kullanılabilir.

5.3.2 Hidrometre deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

5.3.2.1 Eşdeğer dane çapı eşitliğinin türevleri

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{(\gamma_s - \gamma_w)t}} \quad (5.1)$$

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{\mu}{(\gamma_s - \gamma_w)t}} H_R^{0,5} \Rightarrow \frac{\partial D}{\partial H_R} = 0,005531 \sqrt{\frac{\mu}{(\gamma_s - \gamma_w)t}} 0,5 H_R^{-0,5} \quad (5.2)$$

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R}{(\gamma_s - \gamma_w)t}} \mu^{0,5} \Rightarrow \frac{\partial D}{\partial \mu} = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R}{(\gamma_s - \gamma_w)t}} 0,5 \mu^{-0,5} \quad (5.3)$$

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{t}} (\gamma_s - \gamma_w)^{-0,5} \Rightarrow \frac{\partial D}{\partial \gamma_s} = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{t}} (-0,5) (\gamma_s - \gamma_w)^{-1,5} \quad (5.4)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial D}{\partial \gamma_w} = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{t}} (-0,5) (-1) (\gamma_s - \gamma_w)^{-1,5} \quad (5.5)$$

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{(\gamma_s - \gamma_w)}} t^{-0,5} \Rightarrow \frac{\partial D}{\partial t} = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{(\gamma_s - \gamma_w)}} (-0,5) t^{-1,5} \quad (5.6)$$

5.3.2.2 Yüzde geçen eşitliğinin türevleri

$$K = \frac{100\gamma_s(R_h + M_t - X)}{W_b(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial K}{\partial R_h} = \frac{100\gamma_s}{W_b(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial K}{\partial M_t} = \frac{100\gamma_s}{W_b(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial K}{\partial X} = \frac{-100\gamma_s}{W_b(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial K}{\partial W_b} = -\frac{100\gamma_s(R_h + M_t - X)}{W_b^2(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \gamma_s} = \frac{100(R_h + M_t - X)W_b(\gamma_s - \gamma_w) - 100\gamma_s(R_h + M_t - X)W_b}{W_b^2(\gamma_s - \gamma_w)^2} = \frac{100(R_h + M_t - X)W_b[(\gamma_s - \gamma_w) - \gamma_s]}{W_b^2(\gamma_s - \gamma_w)^2}$$

$$\frac{\partial K}{\partial \gamma_s} = -\frac{100(R_h + M_t - X)\gamma_w}{W_b(\gamma_s - \gamma_w)^2} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \gamma_w} &= \frac{100\gamma_s(R_h + M_t - X)}{W_b}(\gamma_s - \gamma_w)^{-1} \Rightarrow \frac{\partial K}{\partial \gamma_w} = \frac{100\gamma_s(R_h + M_t - X)}{W_b}(-1)(\gamma_s - \gamma_w)^{-2}(-1) \\ &\Rightarrow \frac{\partial K}{\partial \gamma_w} = \frac{100\gamma_s(R_h + M_t - X)}{W_b}(\gamma_s - \gamma_w)^{-2} \end{aligned} \quad (5.13)$$

5.3.2.3 Hidrometre deneyinin kılçık diyagramı

Hidrometre deneyinin kılçık diyagramı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

5.3.2.4 Hidrometre deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

5.3.2.4.1 Terazî

5.3.2.4.1.1 Kalibrasyon

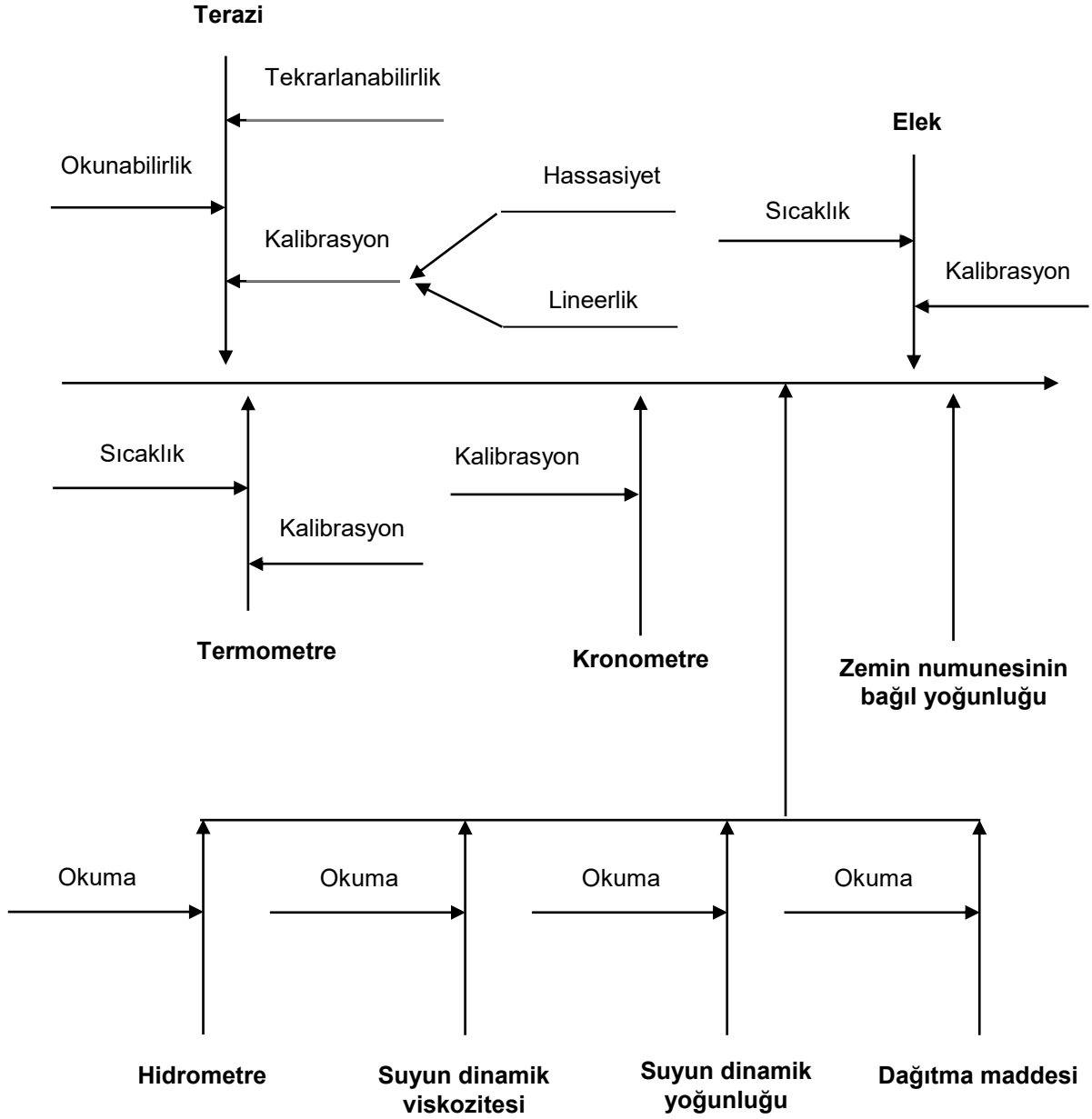
Hidrometre deneyinde kullanılan zemin numunesinin en büyük ağırlığı 50 g'dır. Deneyde aşağıdaki belirtilen terazi kullanılmaktadır. Bu terazinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{PRECISA XT 1220 M} \quad u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,002 + 4,3 \cdot 10^{-5}W) \text{ g} \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,001 + 2,15 \cdot 10^{-5}W)$$

5.3.2.4.1.2 Okunabilirlik

$$\begin{aligned} \text{PRECISA XT 1220 M} \quad 0,001 \text{ g} &\rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,001/\sqrt{3} \\ &= 0,000577 \end{aligned}$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.



Şekil 5.2 - Hidrometre deneyi kılçık diyagramı

5.3.2.4.1.3 Tekrarlanabilirlik

PRECISA XT 1220 M model terazide 50 g ağırlığındaki zemin numunesinin belirsizliği Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 - PRECISA XT 1220 M terazisinin istatistiki verileri

	PRECISA XT 1220 M
Ölçüm sayısı, n	96
Ortalama, $\bar{x}$	49,963
Standart sapma, σ	0,003
Belirsizlik, $\sigma / \sqrt{n}$	0,0003

5.3.2.4.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$U_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

5.3.2.4.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

5.3.2.4.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları $(0,075 \pm 0,0075)$ mm'dir. Farklı eleklerin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı $0,075$ mm'den büyük göz açıklığına sahip $(0,150 \pm 0,0171)$ mm ve $(0,075 \pm 0,0075)$ mm'den küçük göz açıklığına sahip $(0,063 \pm 0,005)$ mm'den elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı karşılaştırma deneyleri ile anlaşılmaya çalışılmıştır. Deneylerden, sonuçların rastgele dağıldığı, $\pm 0,0075$ mm elek belirsizliğinin deney üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

5.3.2.4.4 Kronometre

Deneyde kullanılan kronometrenin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$U_{\text{Kronometre}} = \pm 0,5 \text{ s} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kronometre}} = 0,5 / 2 = 0,25 \text{ s}$$

5.3.2.4.5 Termometre

Deneyde kullanılan termometrenin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$U_{\text{Termometre}} = \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Termometre}} = 0,5 / 2 = 0,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

5.3.2.4.6 Zemin numunesinin bağıl yoğunluğu

Bağıl yoğunluğun belirsizlik değeri "Madde 6 Bağıl yoğunluk (özgül ağırlık) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" ndan alınmıştır.

5.3.2.4.7 Hidrometre

Hidrometrenin okunabilirliği $0,25$ g/L olduğundan, bu değer yapılacak en büyük belirsizlik miktarı olarak alınmıştır.

Not - Hidrometrenin kalibrasyonu yapılmış ise, kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizlik değeri de hidrometrenin belirsizliği olarak alınabilir.

5.3.2.4.8 Suyun bağıl yoğunluğu

Suyun bağıl yoğunluğu $0,00001$ mertebesinde verildiği için yapılacak en büyük hata 10^{-5} mertebede olduğu kabulü yapılmıştır.

5.3.2.4.9 Suyun dinamik viskozitesi

Suyun dinamik viskozitesi 0,00001 mertebesinde verildiği için yapılacak en büyük hata 10^{-5} mertebesinde olduğu kabulü yapılmıştır.

5.3.2.4.10 Dağıtma maddesi

Yüksek saflıkta 33 gram sodyumheksametafosfat (NaPO_3) ve 7 gram sodyum karbonat (Na_2CO_3) kullanıldığı için en büyük saflıktan sapma değeri % 0,1 olarak verilmekte olduğundan belirsizlik olarak aşağıda verilen değer alınmıştır:

$$U_x = 40 \cdot 0,001 = 0,04$$

5.3.2.5 Sistematik belirsizliğin toplamı**5.3.2.5.1 Eşdeğer dane çapının toplam belirsizliği**

$$U_{\text{Sistematik}} = \left[\left(\frac{\partial D}{\partial H_R} u_{H_R} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \mu} u_{\mu} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \gamma_s} u_{\gamma_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \gamma_w} u_{\gamma_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial t} u_t \right)^2 \right]^{0,5}$$

5.3.2.5.2 Yüzde geçen değer toplam belirsizliği

$$U_{\text{Sistematik}} = \left[\left(\frac{\partial K}{\partial R_h} u_{R_h} \right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial R_{M_t}} u_{M_t} \right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial R_x} u_x \right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial W_b} u_{W_b} \right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \gamma_s} u_{\gamma_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \gamma_w} u_{\gamma_w} \right)^2 \right]^{0,5}$$

5.3.3 Deneyin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

5.4 Hidrometre deneyinin çözümlü örneği**5.4.1 TS 1900-1'e göre hidrometre deneyinin çözümlü örneği****5.4.1.1 Hidrometre deneyinden elde edilen veriler**

Deneyden elde edilen veriler Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10 - Hidrometre deneyinden elde edilen veriler

Geçen süre, Dakika	0,1	1	2	5	10	20	40	60	120	240	1440
Hidrometre okuması, R'_h	28,5	25,7	21,5	17,2	15,0	13,5	11,6	9,8	9,0	7,6	6,0
Su sıcaklığı, °C	20,0	20,0	20,0	20,0	19,0	19,0	19,0	19,0	18,5	18,0	17,0

5.4.1.2 Hidrometre deneyinin hesaplamaları

5.4.1.2.1 Hesaplama öncesi yapılması gerekenler

5.4.1.2.1.1 Dağıtma maddesi

50 mL dağıtma maddesi 24 saat $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$ sıcaklık sağlayan etüvde bekletildikten sonra ağırlığı 1. deneyde $W_d = 1.962$ g, 2. deneyde ise, $W_d = 1.944$ g bulunmuştur. $W_d \cong 2$ g alınabileceğinden:

$$X = 2 * 2 = 4$$

olarak bulunur.

5.4.1.2.1.2 Hidrometre Kalibrasyonu

- $W = 68,4 \text{ g} \cong V_h$

- 900 mL ile 1000 mL arası $L=2,65 \text{ cm} \Rightarrow A = \frac{1000 - 900}{2,65} = 37,74 \text{ cm}^2$

$$100 \text{ mL ile } 1000 \text{ mL arası } L=24,15 \text{ cm} \Rightarrow A = \frac{1000 - 100}{24,15} = 37,27 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{Ortalama}} = \frac{37,74 + 37,27}{2} = 37,5 \text{ cm}^2$$

- $H_R = H + \frac{1}{2} \left(h - \frac{V_h}{A} \right)$

$$30 \rightarrow H_R = 21,5 + 0,5 * (143,0 - 68,4 / 37,5 * 10) = 83,9 \text{ mm}$$

$$20 \rightarrow H_R = 21,5 + 26,0 + 0,5 * (143,0 - 68,4 / 37,5 * 10) = 109,9 \text{ mm}$$

$$10 \rightarrow H_R = 21,5 + 52,5 + 0,5 * (143,0 - 68,4 / 37,5 * 10) = 136,4 \text{ mm}$$

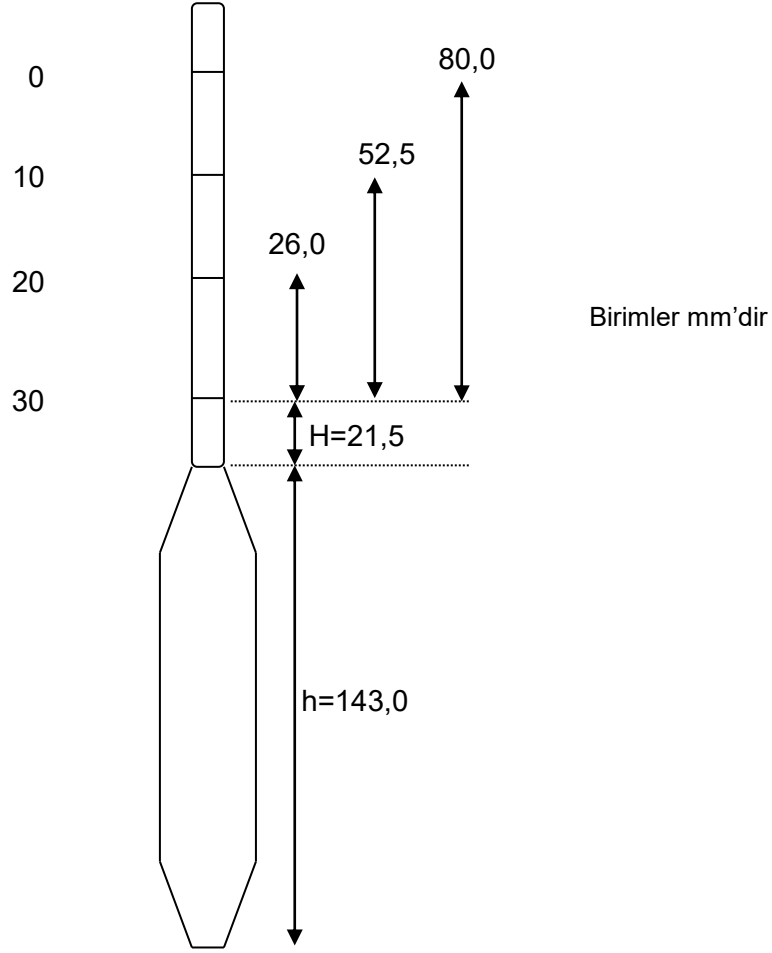
$$0 \rightarrow H_R = 21,5 + 80,0 + 0,5 * (14,3 - 68,4 / 37,5 * 10) = 163,9 \text{ mm}$$

Deneyde kullanılan hidrometrenin ölçüleri Şekil 5.3'te, ölçümlerden elde edilen kalibrasyon eğrisi ise, Şekil 5.4'te verilmiştir.

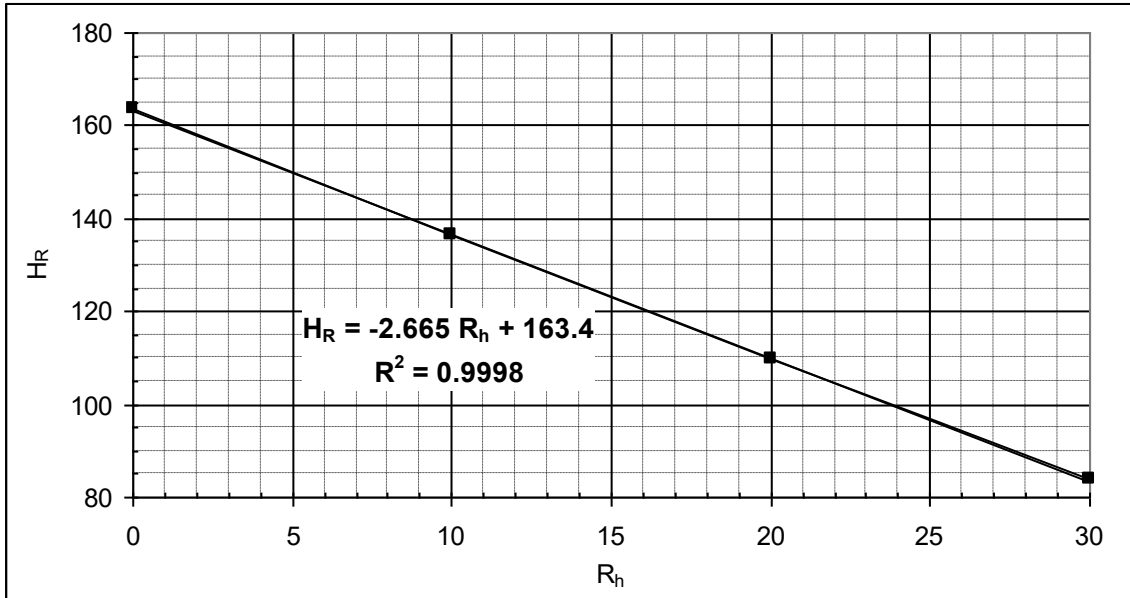
5.4.1.2.1.3 Menisküs düzeltmesi

Menisküs düzeltmesinin nasıl bulunacağı Şekil 5.5'te verilmiştir.

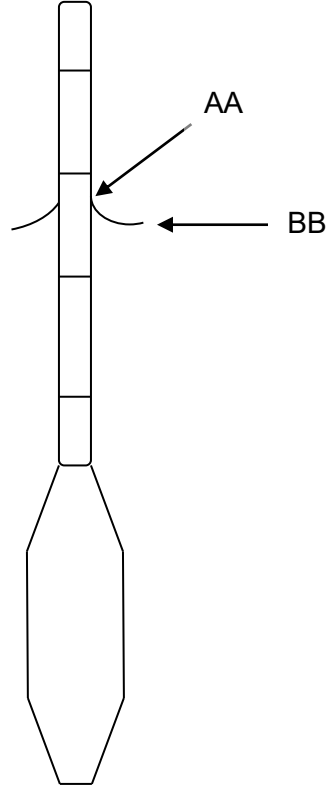
$$AA = 1,0010 \quad BB = 1,0005 \quad C_m = (1,0010 - 1,0005) * 1000 = 0,5$$



Şekil 5.3 - Hidrometre



Şekil 5.4 - Hidrometre kalibrasyon eğrisi



Şekil 5.5 - Hidrometreden menisküs düzeltmesinin bulunma prensibi

5.4.1.2.1.4 Sıcaklık düzeltmesi

$$M_t = 0,0055 T^2 - 0,0403 T - 1,3932$$

$$R^2=1$$

5.4.1.2.1.5 Suyun yoğunluğu

$$\gamma = -0,000005 T^2 - 0,000006 T + 1,0003$$

$$16 \text{ °C} \leq T \leq 30 \text{ °C}$$

$$R^2=1$$

5.4.1.2.1.6 Suyun dinamik viskozitesi

$$\mu = -0,00003 T^3 + 0,0017 T^2 - 0,0625 T + 1,7921$$

$$0 \text{ °C} \leq T < 11 \text{ °C}$$

$$R^2=1$$

$$\mu = 1,659e^{(-0,0249 T)}$$

$$12 \text{ °C} \leq t \leq 25 \text{ °C}$$

$$R^2=0,9993$$

5.4.1.2.2 Eşdeğer dane çapı ve yüzde geçen

Eşdeğer dane çapı ve yüzde geçen değerlerinin hesaplanma yöntemi Çizelge 5.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.11 - Hidrometre deneyi hesaplamaları

Geçen Süre Dakika	Hidrometre Okuması R' _h	Gerçek Okuma R _h = R' _h +C _m	Kalibrasyon Eğrisi H _R	Su Sıcaklığı °C	γ _w g/cm ³	μ mPa	D mm	M _t	R _d = R _h +M _t - X	Geçen %
0,5	28,5	29,0	86,1	20,0	0,99818	1,00825	0,05851	0,000	25,0	53,7
1	25,7	26,2	93,6	20,0	0,99818	1,00825	0,04313	0,000	22,2	47,7
2	21,5	22,0	104,8	20,0	0,99818	1,00825	0,03227	0,000	18,0	38,7
5	17,2	17,7	116,2	20,0	0,99818	1,00825	0,02150	0,000	13,7	29,4
10	15,0	15,5	122,1	19,0	0,99838	1,03367	0,01577	-0,173	11,3	24,3
20	13,5	14,0	126,1	19,0	0,99838	1,03367	0,01134	-0,173	9,8	21,1
40	11,6	12,1	131,2	19,0	0,99838	1,03367	0,00817	-0,173	7,9	17,0
60	9,8	10,3	136,0	19,0	0,99838	1,03367	0,00680	-0,173	6,1	13,2
120	9,0	9,5	138,1	18,5	0,99848	1,04662	0,00487	-0,256	5,2	11,3
240	7,6	8,1	141,8	18,0	0,99857	1,05973	0,00351	-0,337	3,8	8,1
1440	6,0	6,5	146,1	17,0	0,99875	1,08645	0,00147	-0,489	2,0	4,3

Bağıl yoğunluk, G_s = 2,55Belirsizlik (2'ye bölünmüş), U_{G_s} = 0,015

Kuru numune ağırlığı = 50 g

Kum-ince elekten geçen = % 65,4

Menisküs düzeltmesi, C_m = 0,5

Dağıtma faktörü, X = 4

Kalibrasyon eğrisi, H_R = -2,665 R_h+ 163,4

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{H_R \mu}{(\gamma_s - \gamma_w)t}}$$

$$K = \frac{100 \gamma_s (R_h + M_t - X)}{W_b (\gamma_s - \gamma_w)}$$

5.4.1.2.3 Hidrometre deneyinin rastgele belirsizliği

Hidrometre deneyinin karşılaştırma deneylerinden elde edilen toplam rastgele belirsizlik değerleri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

5.4.1.2.4 Hidrometre deneyinin sistematik belirsizliği

Hidrometre deneyinin sistematik belirsizlik değerlerinin hesaplanması Çizelge 5.12'de gösterilmiştir.

5.4.1.2.5 Hidrometre deneyinin toplam belirsizliği

Hidrometre deneyinin sistematik belirsizlik değerlerinin hesaplanması Çizelge 5.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12 - Hidrometre deneyinin belirsizlik hesaplamaları

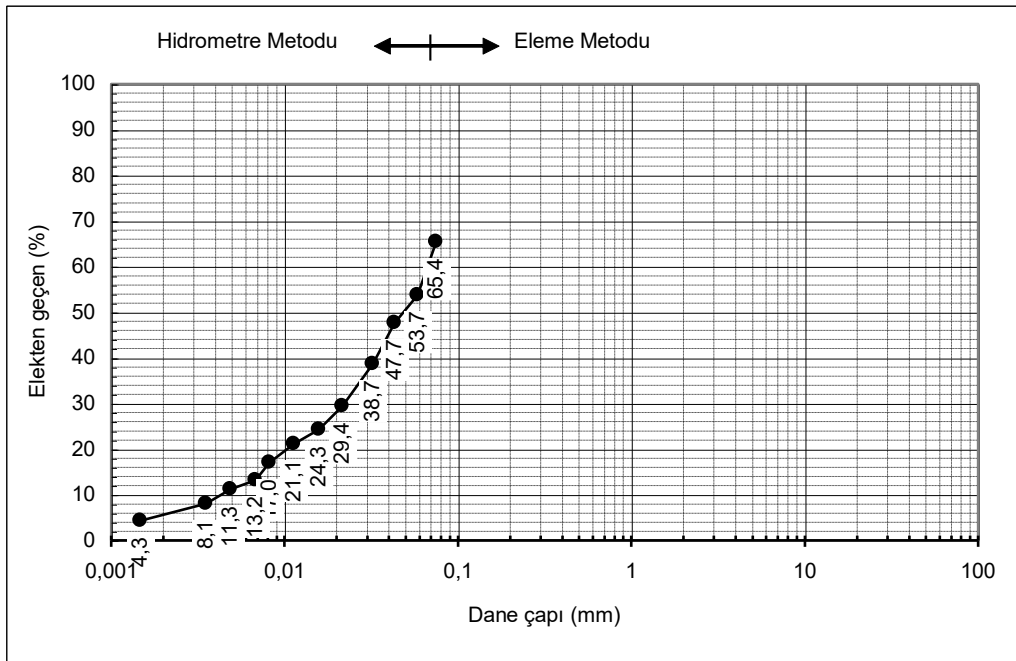
Geçen süre dakika	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	40,0	60,0	120,0	240,0	1440,0
Hidrometre okuması R'_h	28,5	25,7	21,5	17,2	15,0	13,5	11,6	9,8	9,0	7,6	6,0
Gerçek okuma $R_h = R'_h + C_m$	29,0	26,2	22,0	17,7	15,5	14,0	12,1	10,3	9,5	8,1	6,5
Kalibrasyon eğrisi H_r	86,1	93,6	104,8	116,2	122,1	126,1	131,2	136,0	138,1	141,8	146,1
Su sıcaklığı, °C	20,0	20,0	20,0	20,0	19,0	19,0	19,0	19,0	18,5	18,0	17,0
γ_w , g/cm ³	0,99818	0,99818	0,99818	0,99818	0,99838	0,99838	0,99838	0,99838	0,99848	0,99857	0,99875
μ , msPa	1,00825	1,00825	1,00825	1,00825	1,03367	1,03367	1,03367	1,03367	1,04662	1,05973	1,08645
M_t	0,001	0,001	0,001	0,001	-0,173	-0,173	-0,173	-0,173	-0,256	-0,337	-0,489
$R_d = R_h + M_t - X$	25,0	22,2	18,0	13,7	11,3	9,8	7,9	6,1	5,2	3,8	2,0
Eşdeğer dane çapı, D											
D, Eşitlik 5.1	0,05851	0,04313	0,03227	0,02150	0,01577	0,01134	0,00817	0,00680	0,00487	0,00351	0,00147
Eşitlik 5.2	0,00034	0,00023	0,00015	0,00009	0,00006	0,00004	0,00003	0,00002	0,00002	0,00001	0,00001
Eşitlik 5.3	0,02902	0,02139	0,01600	0,01066	0,00763	0,00548	0,00395	0,00329	0,00233	0,00166	0,00068
Eşitlik 5.4	0,01885	0,01390	0,01040	0,00693	0,00508	0,00365	0,00263	0,00219	0,00157	0,00113	0,00048
Eşitlik 5.5	0,01885	0,01390	0,01040	0,00693	0,00508	0,00365	0,00263	0,00219	0,00157	0,00113	0,00048
Eşitlik 5.6	0,05851	0,02156	0,00807	0,00215	0,00079	0,00028	0,00010	0,00006	0,00002	0,00001	0,00000
$U_{Sistemlik} (D)$	0,01463	0,00539	0,00202	0,00054	0,00020	0,00007	0,00003	0,00002	0,00001	0,00000	0,00000
$U_{Rastgele} (D)$	0,00024	0,00020	0,00015	0,00012	0,00009	0,00006	0,00004	0,00003	0,00003	0,00003	0,00002
$U_{Toplam} (D)$	0,01463	0,00539	0,00202	0,00055	0,00022	0,00009	0,00005	0,00003	0,00003	0,00003	0,00002
$kU_{Toplam} (D)$	0,02926	0,01079	0,00405	0,00110	0,00043	0,00019	0,00010	0,00007	0,00006	0,00006	0,00004
Yüzde geçen, K											
K, Eşitlik 5.7	0,4	0,6	0,7	1,4	1,6	1,5	1,7	1,7	2,0	2,1	3,9
Eşitlik 5.8	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Eşitlik 5.9	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Eşitlik 5.10	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3
Eşitlik 5.11	-1,6	-1,5	-1,2	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
Eşitlik 5.12	-20,7	-18,4	-14,9	-11,4	-9,4	-8,2	-6,6	-5,1	-4,3	-3,1	-1,7
Eşitlik 5.13	52,9	47,0	38,1	29,0	24,0	20,8	16,8	13,0	11,1	8,0	4,3
U_{Terazi}	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
$U_{Sistemlik} (K)$	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
$U_{Rastgele} (K)$	0,90	1,00	1,10	1,40	1,50	1,50	1,40	1,50	1,60	2,10	2,90
$U_{Toplam} (K)$	1,4	1,5	1,5	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	2,4	3,1
$kU_{Toplam} (K)$	2,8	2,9	3,1	3,5	3,7	3,7	3,5	3,7	3,8	4,7	6,2

5.4.1.3 Hidrometre deneyi sonuçlarının gösterilmesi

Hesaplama sonucu çıkan dane çapına karşılık yüzde geçen değerlerin yarı logaritmik kâğıda (dane çapı dağılımı) çizilmesi Şekil 5.6'de gösterilmiştir

DANE ÇAPI DAĞILIMI (*)

Numune no	Araştırma numunesi	Deney başlama tarihi	20.01.2007
Kuyu/sondaj no	-	Deney bitiş tarihi	23.01.2007
Deney standardı	TS 1900-1		
D ₁₀ (mm)	0,07	Uniformluk katsayısı, $C_u = D_{60}/D_{10}$	0,06
D ₃₀ (mm)	0,022	Süreklilik katsayısı, $C_r = (D_{30}D_{30})/(D_{60}D_{10})$	1,6
D ₆₀ (mm)	0,0042		
Moloz, (%)	0,0	Çakıl, (%)	0,0
Kum, (%)	0,0	İnce, (%)	65,4



Dane çapı, D, mm	0,05851	0,04313	0,03227	0,02150	0,01577	0,01134	0,00817
D'nin belirsizliği	0,02926	0,01079	0,00405	0,00110	0,00043	0,00019	0,00010
Toplam geçen, (%)	53,7	47,7	38,7	29,4	24,3	21,1	17,0
Geçenin belirsizliği	2,8	2,9	3,1	3,5	3,7	3,7	3,5
Dane çapı, D, mm	0,00680	0,00487	0,00351	0,00147			
D'nin belirsizliği	0,00007	0,00006	0,00006	0,00004			
Toplam geçen, (%)	13,2	11,3	8,1	4,3			
Geçenin belirsizliği	3,7	3,8	4,7	6,2			

Şekil 5.6 – Hidrometre deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi (dane çapına karşılık yüzde geçen değerlerin yarı logaritmik kâğıda çizilmesi)

5.4.2 ASTM D 422'ye göre hidrometre deneyinin çözümlü örneği

5.4.2.1 Deneyden elde edilen veriler

TS 1900-1'e göre yapılan deneyden bulunan değerlerin aynısı (Madde 5.4.1.1) ASTM D 422'de verilen yöntem içinde kullanılmıştır.

5.4.2.2 Hesaplamalar

ASTM D 422'ye göre hesaplamalar Çizelge 5.13'te gösterilmiştir:

Çizelge 5.13 - ASTM D 422'ye göre hidrometre deneyi

Geçen süre t Dakika	Hidrometre okuması R _h	Sudaki hidrometre okuması R _w	Su sıcaklığı °C	Düzeltilmiş hidrometre okuması R _H	H _R (cm)	γ _w g/cm ³	μ mPa	D mm	Geçen %	Toplam geçen %
0,5	28,5	3,20	20,0	25,3	9,60	0,99818	1,00825	0,06179	83,1	54,4
1	25,7	3,20	20,0	22,5	10,34	0,99818	1,00825	0,04536	73,9	48,4
2	21,5	3,20	20,0	18,3	11,46	0,99818	1,00825	0,03376	60,1	39,3
5	17,2	3,20	20,0	14,0	12,61	0,99818	1,00825	0,02240	46,0	30,1
10	15,0	3,20	19,0	11,8	13,20	0,99838	1,03367	0,01640	38,8	25,4
20	13,5	3,20	19,0	10,3	13,60	0,99838	1,03367	0,01177	33,9	22,1
40	11,6	3,20	19,0	8,4	14,10	0,99838	1,03367	0,00848	27,6	18,1
60	9,8	3,20	19,0	6,6	14,58	0,99838	1,03367	0,00704	21,7	14,2
120	9,0	3,20	18,5	5,8	14,79	0,99848	1,04662	0,00505	19,1	12,5
240	7,6	3,20	18,0	4,4	15,17	0,99857	1,05973	0,00364	14,5	9,5
1440	6,0	3,20	17,0	2,8	15,59	0,99875	1,08645	0,00152	9,2	6,0

$$D = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{v} * 100 = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{\frac{H_R}{t}} * 100 = K \sqrt{\frac{H_R}{t}}$$

$$\text{Geçen} = 2 \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} (R_h - R_w)$$

5.4.3 USBR 5330'a göre hidrometre deneyinin çözümlü örneği

5.4.3.1 Deneyden elde edilen veriler

Deneyden elde edilen veriler Çizelge 5.14'te gösterilmiştir.

5.4.3.2 Hesaplamalar

USBR 5330'a göre hesaplamalar Çizelge 5.14'te gösterilmiştir:

Zemin numunesinin yoğunluğu = 2,75

Kuru numune ağırlığı = 50 g

200 No'dan geçen = % 65,4

α = 0,98

Menisküs düzeltmesi = 1,0

H_R = 15,518 - 0,1468 R_H

Çizelge 5.14 - USBR 5330'a göre hidrometre deneyi

Geçen süre t Dakika	Hidrometre okuması R _h	Sudaki hidrometre okuması R _w	Su sıcaklığı °C	Sıcaklık Düzeltmesi SD	Düzeltilmiş hidrometre okuması R' _h - R _w - SD	Geçen %	Toplam geçen %	Düzeltilmiş R' _h + C _m	H _R (cm)	D mm
0.5	48.0	2.70	28.0	2.15	43.15	84.61	55.3	49.0	8.32	0.04900
1	47.0	2.70	28.0	2.15	42.15	82.65	54.1	48.0	8.47	0.03495
2	46.0	2.70	28.0	2.15	41.15	80.69	52.8	47.0	8.62	0.02493
5	45.0	2.70	28.0	2.15	40.15	78.73	51.5	46.0	8.77	0.01590
10	44.0	2.70	28.0	2.15	39.15	76.77	50.2	45.0	8.91	0.01134
20	43.0	2.70	28.0	2.15	38.15	74.81	48.9	44.0	9.06	0.00808
40	42.0	2.70	28.0	2.15	37.15	72.85	47.6	43.0	9.21	0.00576
60	40.0	2.70	28.0	2.15	35.15	68.93	45.1	41.0	9.50	0.00478
120	38.0	2.70	28.0	2.15	33.15	65.01	42.5	39.0	9.79	0.00343
240	32.0	2.70	28.0	2.15	27.15	53.24	34.8	33.0	10.67	0.00253
1440	29.0	2.70	28.0	2.15	24.15	47.36	31.0	30.0	11.11	0.00105

$$D = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{v} * 100 = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{\frac{H_R}{t}} * 100 = K \sqrt{\frac{H_R}{t}}$$

$$\text{Geçen} = 2 \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} (R_h - R_w)$$

5.5 İlgili standartlar

ASTM D 422-63 (2002). Standard test Method for particle-size analysis of soils, Vol 04.08.

ASTM D 854: 2006. Standard test Method for specific gravity of soils, Vol. 04.08.

BS 1377: Part 2: 1990. Soils for civil engineering purposes, page 39, 9.5 Sedimentation by the hydrometer method.

CEN ISO/TS 17892-4: 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil part 4: Determination of particle size distribution (ISO/TS 17892-4: 2004), Part 6.2.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.6.4 Deney 6 (D): İnce daneli zeminlerin dane çapı dağılımının bulunması için hidrometre metodu.

USBR 5330: 1989. Procedure for performing gradation analysis of fines and sand size fraction of soils, including hydrometer analysis, Vol.2.

6 Bağlı yoğunluk (özgül ağırlık) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

6.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1, ASTM D 854, CEN ISO/TS 17892-3, USBR 5320 ve BS 1377'ye göre bağlı yoğunluk deneyi anlatılmıştır.

6.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

6.2.1 TS 1900-1'e göre ince daneli zeminler için bağlı yoğunluk deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.5 Deney 5: Zemin danelerinin bağlı yoğunluğunun (özgül ağırlık) tayinine göre yapılmaktadır.

Bu deney ile ince daneli zemin numunesinin bağlı yoğunluğu bulunur.

6.2.1.1 Gerekli araçlar

Piknometre (bağlı yoğunluk şişesi), 500 mL kapasiteli (bağlı yoğunluk şişesi),

Vakum pompası,

Etüv, sürekli olarak $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$ sıcaklık sağlayan,

Terazi, 0,01 g doğrulukla ölçme yapabilen,

Termometre, $(0 - 50)^\circ$ arasında, $0,5 ^\circ$ doğrulukla ölçüm yapabilen,

Buharlaştırma kabı,

Damlalık veya pipet,

Plastik hortum,

Su Banyosu, $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta tutabilen,

Desikatör, içinde susuz silika jeli bulunan,

Elek, 4,75 mm göz açıklıklı,

Damıtık su.

Not - Desikatör içinde bulunan susuz silika jelin orijinal rengi değişme gösterdiğinde değiştirilmelidir.

6.2.1.2 Deneyin yapılışı

500 mL kapasiteli piknometre kurutulur, desikatörde soğutulur ve 0,01 g doğrulukla tartılır, W_1 .

Yarılama metodu ile elde edilen 200 g numune, elekten elenerek alınır ve $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat kurutulur ve desikatörde veya ağzı kapalı kapta oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur.

Piknometrenin içine 100 g numune (diğer 100 g numune 2. Deney için kullanılacaktır) konularak 0,01 g doğrulukla tartılır, W_2 .

Malzemeyi hemen örtecek biçimde damıtık su eklenir.

Not - Numunede suda eriyebilen tuzlar var ise, damıtık su yerine gazyağı veya alkol kullanılabilir.

Vakum pompası ile piknometre, hava kaçağı olmaksızın plastik tıpa ile hortumlarla birbirine bağlanır.

Piknometre çalkalanarak, numuneden hava kabarcıkları çıkışı durana kadar vakum uygulanır.

Piknometrenin boyun kısmında bulunan seviyeye kadar $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki damıtık su eklenir.

Piknometre, $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki su banyosunun içine daldırılır. Yaklaşık 1 saat süre bekletilir.

Piknometrenin işaretli yerinden su seviyesinde artma/azalma olmuş ise, piknometrenin işaretli yerine kadar tekrar damıtık su ile doldurulur ve $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki su banyosunun içine tekrar daldırılır. Yaklaşık 1 saat süre bekletilir. Bu işleme, piknometrenin işaretli yerinden su seviyesinde artma/azalma olmayana kadar devam edilir.

Not - Piknometrenin su banyosu içinde tutulması yerine, sıcaklığı $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ olan damıtık su piknometreye doldurulur ve biraz beklenir. Su sıcaklığı belirtilen aralıkta ve su yüksekliğinde herhangi bir azalma yok ise, su banyosunda bekletme işlemi yapılmaz.

Piknometredeki damıtık su ile numunenin sıcaklığı ölçülür. Su sıcaklığına karşılık suyun yoğunluğu Çizelge A.1'den (Ek A) bulunur.

Piknometre banyodan çıkartılarak dış yüzeyi kurulanır ve 0,01 g hassasiyette tartılır, W_3 .

Piknometre boşaltılır, temizlenir, damıtık su piknometrenin boyun kısmındaki işaretli yere kadar doldurulur. Piknometre, $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki su banyosunun içine daldırılır. Yaklaşık 1 saat süre bekletilir.

Piknometrenin işaretli yerinden su seviyesinde artma/azalma olmuş ise, piknometrenin işaretli yerine kadar damıtık su ile doldurulur ve $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki su banyosunun içine tekrar daldırılır. Yaklaşık 1 saat süre bekletilir. Bu işleme, piknometrenin işaretli yerinden su seviyesinde artma/azalma olmayana kadar devam edilir (yukarıda verilen Nota bakınız).

Piknometredeki damıtık suyun sıcaklığı ölçülür. Şişe banyodan çıkartılır, dış yüzeyi kurulanır 0,01 g hassasiyette tartılır, W_4 .

Deneyden elde edilen değerler "Bağıl yoğunluk (özgül ağırlık) deneyi formu" na yazılır.

Yukarıda anlatılan işlemler 2. zemin numunesine de uygulanır.

6.2.1.3 Hesaplamalar

Zemin bağıl yoğunluğu aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$G_s = G_{20} = \frac{\gamma_L (W_2 - W_1)}{\gamma_w [(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]}$$

Burada;

γ_L Kullanılan deney sıvısının deney sıcaklığındaki yoğunluğu (g/cm^3),

γ_w Suyun deney sıvısının sıcaklığındaki yoğunluğu (g/cm^3),

W_1 Piknometrenin boş olarak ağırlığı (g),

W_2 Piknometre + numune ağırlığı (g),

W_3 Piknometre + numune + su ağırlığı (g),

W_4 Piknometre + su ağırlığı (g)

dir.

Bulunan bağıl yoğunluk değerleri arasındaki fark 0,03'ten büyük çıkmışsa, deney tekrarlanır. Aksi takdirde her iki deney ortalaması alınır.

6.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- İki deneyin ortalaması olarak hesaplanan bağıl yoğunluk değeri $G_s (= G_{20})$ en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak.

6.2.2 ASTM D 854'e göre ince daneli zeminler için bağıl yoğunluk deneyi talimatı

ASTM D 854'e göre su içeriği deneyinin yapılışı, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. Ancak bazı farkları aşağıda belirtilmiştir.

Deneyde No 4 (4,75 mm göz açıklıklı) elekten elenen malzemeler kullanılmaktadır.

Piknometrenin kapasitesi en az 250 mL olmalıdır. Kapasite seçilirken, hava alma işlemi sırasında numune + su hacminin 2-3 katı olması göz önüne alınmalıdır.

250 mL kapasiteli piknometre kullanıldığında numune miktarı (60 ± 10) g, 500 mL kapasiteli piknometre kullanıldığında ise, numune miktarı (100 ± 10) g olmalıdır.

Piknometrenin hacminin bulunması için kalibre edilmelidir:

- Piknometrenin ağırlığı en az beş defa tartılır, ortalaması alınarak kaydedilir,
- Piknometre işaretli olan yere kadar damıtık su ile doldurularak, ısıl dengeye gelmesi için en az 3 saat bekletilir.
- Isıl denge şartı (oda sıcaklığı ± 4 °C veya 15 °C ilâ 30 °C olduğunda sağlanmış olur,
- Piknometrenin işaret çizgisine kadar olan su seviyesinde herhangi bir değişme yoksa termometre ile su sıcaklığı ölçülür. Aksi taktirde, Madde ii) belirtilen işlemler tekrarlanır,
- Piknometrenin hacmi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$V_p = \frac{W_{pw,c} - W_p}{\rho_{w,c}}$$

Burada;

$W_{pw,c}$ Kalibrasyon yapılan sıcaklıktaki piknometre ile suyun ağırlığı (g),

W_p Kalibrasyon sıcaklığındaki kuru piknometrenin ortalama ağırlığı (g),

$\rho_{w,c}$ Kalibrasyon sıcaklığındaki suyun yoğunluğu (g/mL)

dur.

Deney yaş numunelere ve etüv kurusu numunelere uygulanabilir.

Yaş yöntem kullanılacaksa, yaklaşık 100 g numunenin su içeriği bulunur ve kuru numune miktarı bulunan su içeriğine bölünerek hesaplanır. 100 mL damıtık su eklendikten sonra, mikser veya benzeri bir cihaz ile iyice karıştırılır,

- Etüv kurusu metodu TS 1900-1'e göre yapılan deney ile aynıdır.

Numune + damıtık suya uygulanan vakum, doğrudan numuneye veya içinde birden fazla piknometre bulunan cihaz ile de yapılabilir.

Deney TS 1900-1'e göre yapılan deney gibi gerçekleştirilir.

Piknometre ve suyun, deney sıcaklığındaki ağırlığı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$W_{pw,t} = W_p + (V_p \rho_{w,s})$$

Burada;

M_p Kuru piknometrenin ortalama ağırlığı (g),

V_p Piknometrenin kalibre edilmiş ortalama hacmi (mL),

$\rho_{w,s}$ Deneyin gerçekleştiği sıcaklıktaki suyun yoğunluğu (g/mL)

dur.

Deneyin gerçekleştiği sıcaklıktaki bağıl yoğunluk aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{W_s}{[W_{pw,t} - (W_{pws,t} - W_s)]}$$

Burada;

ρ_s Zemin danelerinin yoğunluğu (g/mL),

$\rho_{w,t}$ Deneyin gerçekleştiği sıcaklıktaki suyun yoğunluğu (g/mL),

W_s Etüv kurusu numune ağırlığı (g),

$W_{pws,t}$ Deneyin gerçekleştiği sıcaklıktaki piknometre + su + numune ağırlığı (g)

dir.

Deney yapılan sıcaklık 20 °C'tan farklı bir t sıcaklığında yapılmışsa, G_s 'i 20 °C'a getirmek için aşağıdaki düzeltme uygulanır:

$$G_{20^\circ C} = G_s \left(\frac{\rho_t}{\rho_{20^\circ C}} \right)$$

Burada;

G_s Numunenin t °C'taki bağıl yoğunluğu,

ρ_t Suyun t °C'taki yoğunluğu (g/cm³),

$\rho_{20^\circ C}$ Suyun 20 °C'taki yoğunluğu (g/cm³)

dur.

6.2.3 CEN ISO/TS 17892-3'e göre ince daneli zeminler için bağıl yoğunluk deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-3'e göre bağıl yoğunluk deneyinin yapılışı, bazı farklar dışında, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. Bu farklar aşağıda belirtilmiştir:

En az 10 g numune ile en az 50 mL'lik piknometre kullanılmalıdır,

4 mm'den daha küçük çaplı numunelere uygulanır,

Vakum işlemi doğrudan numune yerine vakum cihazı içerisinde birden fazla numuneye uygulanmaktadır.

6.2.4 USBR 5320'ye göre ince daneli zeminler için bağıl yoğunluk deneyi talimatı

İnce daneli zeminler için bağıl yoğunluk deneyi USBR 5320 Yöntem A'ya göre anlatılmıştır ve ASTM D 854'e göre yapılan ile aynıdır. Ancak, sıcaklık düzeltmesi konusunda herhangi bilgi mevcut değildir.

6.2.5 BS 1377'ye göre ince daneli zeminler için bağıl yoğunluk deneyi talimatı

BS 1377'ye göre bağıl yoğunluk deneyinin yapılışı, bazı farklar dışında, TS 1900-1'e göre yapılan ile aynıdır. Bu farklar aşağıda belirtilmiştir:

Deney eleği 4,75 mm yerine 2 mm göz açıklıklı elektir.

10 g numune ile 50 mL'lik piknometre kullanılmaktadır.

Vakum işlemi doğrudan numune yerine vakum cihazı içerisinde birden fazla numuneye uygulanmaktadır.

6.3 Bağıl yoğunluk deneyinin belirsizlik hesabı**6.3.1 Bağıl yoğunluk deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Bağıl yoğunluk deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 - Laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Laboratuvar içi		Laboratuvarlar arası
	1. Karşılaştırma Deneyleri	2. Karşılaştırma Deneyleri	-
Veri sayısı	20	4	34
En büyük,	2,82	2,59	2,8
Ortanca,	2,72	2,55	2,6
En Küçük,	2,67	2,51	2,5
Ortalama, $\bar{x}$	2,71	2,55	2,6
Standart sapma, σ_{Std}	0,03	0,03	0,08
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,0074	0,02	0,01

Bağıl yoğunluk deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değer olan 0,0074 değeri yaklaşık % 100 artırılarak (emniyetli tarafta kalmak için) aşağıda verilen değer alınmıştır. 2. Karşılaştırma deneyindeki sonuç, veri sayısının az olması nedeniyle dikkate alınmamıştır.

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (G_s) = 0,015$

6.3.2 Bağlı yoğunluk deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

6.3.2.1 Bağlı yoğunluk eşitliğinin türevleri

Bağlı yoğunluk deneyinin hesaplanması ve ilgili elemanların kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$G_s = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{W_2 - W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]}$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_1} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{(-1) * [(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)] - (W_2 - W_1) * (-1)}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{-W_4 + W_1 + W_3 - W_2 + W_2 - W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_1} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{W_3 - W_4}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_2} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{(1) * [(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)] - (1) * (W_2 - W_1)}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{W_4 - W_1 - W_3 + W_2 - W_2 + W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$$

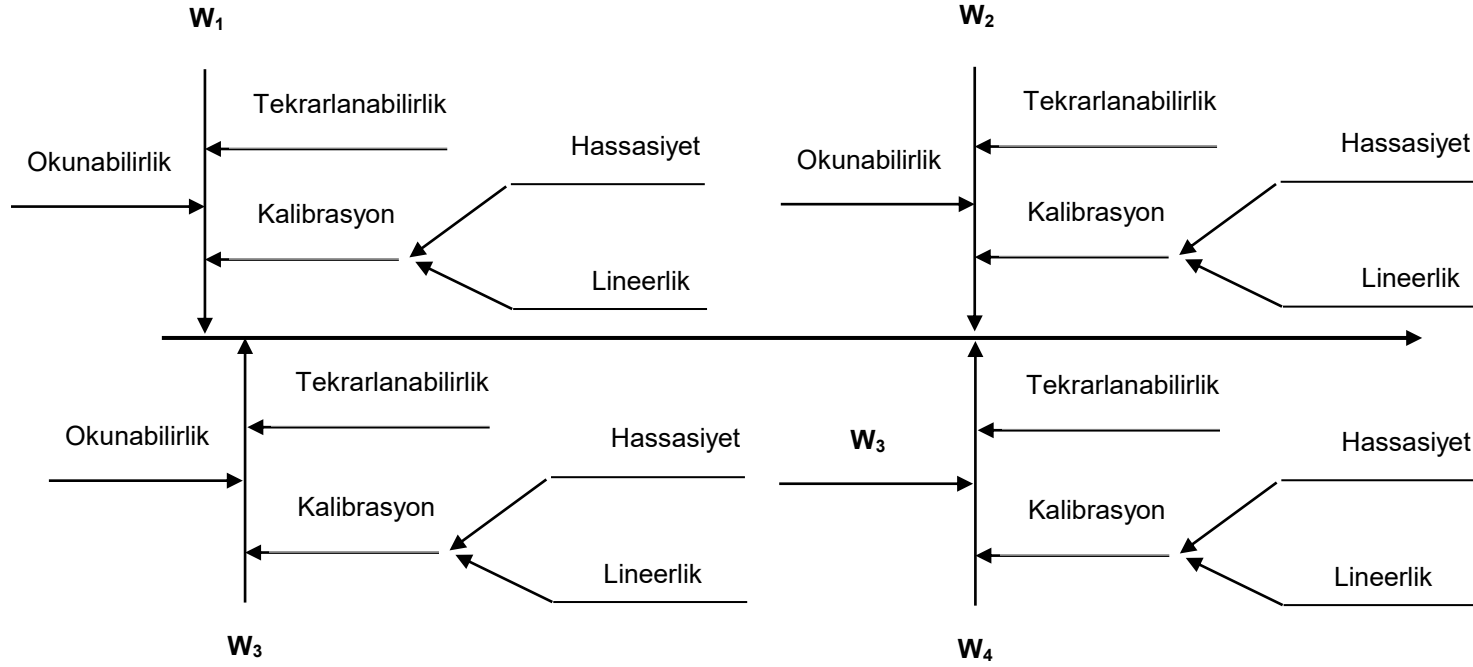
$$\frac{\partial G_s}{\partial W_2} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{W_4 - W_3}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_3} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{-(W_2 - W_1) * (-1)}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{W_2 - W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_4} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{-(W_2 - W_1) * (1)}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = \left(\frac{\gamma_L}{\gamma_w} \right) \frac{W_1 - W_2}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$$

6.3.2.2 Bağlı yoğunluk deneyinin kılçık diyagramı

Bağlı yoğunluk deneyinin kılçık diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 - Bağlı yoğunluk deneyinin kılçık diyagramı

6.3.2.3 Bağlı yoğunluk deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

6.3.2.3.1 Terazi

6.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Bağılı yoğunluk deneyinde kullanılan zemin numunesinin en büyük ağırlığı 100 g ile 1000 g arasında değişmektedir ve aşağıda belirtilen terazi ile ölçülmektedir. Bu terazinin toplam belirsizliği:

$$\text{PRECISA XT 1220 M } U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,002 + 4,3 \cdot 10^{-5}W) \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,001 + 2,15 \cdot 10^{-5}W)$$

6.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$\text{PRECISA XT 1220 M için } 0,001 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,001/\sqrt{3} = 0,000577$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

6.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

1000 g ağırlığındaki zemin numunesinin tartımda:

Çizelge 6.2 - PRECISA XT 1220 M terazisinin istatistiki analiz sonuçları

	PRECISA XT 1220 M
Ölçüm sayısı, n	96
Ortalama, $\bar{x}$	999,468
Standart sapma, σ_{Std}	0,013
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$	0,0014

6.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$\text{Terazinin toplam belirsizliği, } U_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

6.3.2.3.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

6.3.2.3.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları $(2,5 \pm 0,1)$ mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı $2,5$ mm'den büyük göz açıklığına sahip $(4,75 \pm 0,2)$ mm ve $2,5$ mm'den küçük göz açıklığına sahip $(1,18 \pm 0,0579)$ mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmasına çalışılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3 - Elek göz açıklığının bağlı yoğunluk üzerine etkisi

	No 4 $4,75 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,1$	No 16 $1,18 \pm 0,0579$
Ölçüm sayısı, n	12	19	12
Ortalama, $\bar{x}$	2,684	2,718	2,688
Standart sapma, σ	0,0132	0,0239	0,0207
Belirsizlik, $\sigma / \sqrt{n}$	0,0038	0,0055	0,0060
Fark	$0,0055 - 0,0038 = 0,0017$		$0,0055 - 0,0060 = -0,0005$

Çizelgeden de anlaşılacağı gibi sonuçlar rastgele dağılmaktadır $0,425 \pm 0,0275$ elek üzerinde herhangi bir belirsizliği yoktur. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

6.3.2.3.4 Su banyosunun sıcaklık etkisi

Deneyde kullanılan damıtık suyun sıcaklığı $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ arasında olduğundan, deney sonuçlarına etkisi olmadığı kabulü yapılarak **su banyosunun sıcaklık üzerine belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

6.3.2.4 Bağlı yoğunluk deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliklerin toplamı, sadece terazinin belirsizliğinden oluşmaktadır:

$$\text{Toplam sistematik belirsizlik, } U_{\text{Sistematik (Gs)}} = \left[\left(\frac{\partial G_s}{W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial G_s}{W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial G_s}{W_3} * u_3 \right)^2 + \left(\frac{\partial G_s}{W_4} * u_4 \right)^2 \right]^{0,5}$$

6.3.3 Bağlı yoğunluk deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

6.4 Bağlı yoğunluk deneyinin çözümlü örneği

6.4.1 TS 1900-1'e göre bağlı yoğunluk deneyinin çözümlü örneği

6.4.1.1 Bağlı yoğunluk deneyinden elde edilen veriler

Deneyden elde edilen veriler Çizelge 6.4'te verilmiştir. Deneyde PRECISA XT 1220 M marka terazi kullanılmış ve kalibrasyon sertifikasındaki toplam belirsizlik aşağıda verilmiştir. Deneyde damıtık su kullanılmıştır ($\gamma_L = \gamma_w$). Aşağıda sadece 1. Deney için sonuçların hesaplanması gösterilmiştir. 2. Deneyin hesaplanması, 1. Deney ile birlikte Çizelge 6.5'te verilmiştir.

$$U_{\text{Terazi}} = \pm (0,001 + 0,0000215 * W)$$

Deney $17 ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta yapılmıştır.

$$17 ^\circ\text{C için suyun yoğunluğu} = 0,99880 \text{ g/cm}^3$$

$$20 ^\circ\text{C için suyun yoğunluğu} = 0,99823 \text{ g/cm}^3$$

Çizelge 6.4 - Deneyde elde edilen veriler

	1. Deney	2. Deney
W_1 (Piknometrenin boş olarak ağırlığı)	156,150 g	156,150 g
W_2 (Piknometre + numune ağırlığı)	256,150 g	256,150 g
W_3 (Piknometre + numune + su ağırlığı)	716,870 g	716,753 g
W_4 (Piknometre + su ağırlığı)	653,950 g	653,945 g

6.4.1.2 Bağlı yoğunluk deneyinin hesaplamaları

6.4.1.2.1 Bağlı yoğunluk

$$G_s = \frac{\gamma_L (W_2 - W_1)}{\gamma_w [(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]} = \frac{(256,150 - 156,150)}{(653,950 - 156,150) - (716,870 - 256,150)} = 2,697$$

6.4.1.2.2 Bağlı yoğunluk deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}}(G_s) = 0,015$ (karşılaştırma deneylerinden)

6.4.1.2.3 Bağlı yoğunluk deneyinin sistematik belirsizliği

$$u_{W1} = [(0,001+0,0000215 \cdot 156,15)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0014)^2]^{1/2} = [(18,99+0,33+1,96) \cdot 10^{-6}]^{1/2} \cong 0,00461$$

$$u_{W2} = [(0,001+0,0000215 \cdot 256,150)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0014)^2]^{1/2} = [(42,34+0,33+1,96) \cdot 10^{-6}]^{1/2} \cong 0,00668$$

$$u_{W3} = [(0,001+0,0000215 \cdot 716,870)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0014)^2]^{1/2} = [(269,38+0,33+1,96) \cdot 10^{-6}]^{1/2} \cong 0,01648$$

$$u_{W4} = [(0,001+0,0000215 \cdot 653,950)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0014)^2]^{1/2} = [(226,80+0,33+1,96) \cdot 10^{-6}]^{1/2} \cong 0,01514$$

$$U = [(\frac{\partial G_s}{\partial W_1} \cdot u_1)^2 + (\frac{\partial G_s}{\partial W_2} \cdot u_2)^2 + (\frac{\partial G_s}{\partial W_3} \cdot u_3)^2 + (\frac{\partial G_s}{\partial W_4} \cdot u_4)^2]^{0,5}$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_1} = \frac{W_3 - W_4}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = 0,04576$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_2} = \frac{W_4 - W_3}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = -0,04576$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_3} = \frac{W_2 - W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = 0,07273$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial W_4} = \frac{W_2 - W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2} = -0,07273$$

Birinci deney için toplam sistematik belirsizlik:

$$U_{\text{Sistemik}}(G_{s1}) = [(0,04576 \cdot 0,00461)^2 + (-0,04576 \cdot 0,00668)^2 + (0,07273 \cdot 0,01648)^2 + (-0,07273 \cdot 0,01514)^2]^{1/2}$$

$$= [(4,450+9,344+143,662+121,249) \cdot 10^{-8}]^{1/2} \cong 0,00167$$

6.4.1.2.4 Bağlı yoğunluk deneyinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,015 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,00167

$$U_{\text{Toplam}} = [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5}$$

$$= [(0,015)^2 + (0,00167)^2]^{0,5} = 0,015$$

6.4.1.3 Bağlı yoğunluk deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam}}(G_s) = 2 \cdot 0,015 = 0,030$

$$G_{s1} = 2,697 \pm 0,030 = 2,70 \pm 0,03$$

2. Deneyin hesaplanması, 1. Deney ile birlikte Çizelge 6.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 - Bağlı yoğunluk deneyi hesaplama örneği

	1. Deney	u1	2. Deney	u2
$G_s = \frac{W_2 - W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]}$	2,697		2,689	
$\frac{\partial G_s}{\partial W_1} = \frac{W_3 - W_4}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$	0,04576	0,00461	0,04541	0,00461
$\frac{\partial G_s}{\partial W_2} = \frac{W_4 - W_3}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$	-0,04576	0,00668	-0,04541	0,00668
$\frac{\partial G_s}{\partial W_3} = \frac{W_2 - W_1}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$	0,07273	0,01648	0,07229	0,01648
$\frac{\partial G_s}{\partial W_4} = \frac{W_1 - W_2}{[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]^2}$	-0,07273	0,01514	-0,07229	0,01514
U _{Rastgele} (Gs)	0,015			
U _{Sistematik} (Gs)		0,00167		0,00166
U _{Toplam} (Gs)		0,015		0,015
kU _{Toplam} (Gs)		0,03		0,03

$$G_s = (G_{s1} + G_{s2}) / 2 = (2,697 + 2,689) / 2 = 2,693$$

$$U_{Gs} = \pm (0,030 + 0,030) / 2 = \pm 0,030$$

$$G_s = 2,693 \pm 0,03 = 2,69 \pm 0,03$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

6.4.2 ASTM D 854'e göre bağlı yoğunluk deneyinin çözümlü örneği

Deneyde Madde 6.4.1.1'de verilen değerler elde edilmiştir. Ancak, damıtık su sıcaklığı 17 °C olarak ölçülmüştür.

$$\text{Piknometrenin hacmi, } V_p = \frac{W_{pw,c} - W_p}{\rho_{w,c}} = \frac{653,950 - 156,150}{0,99878} = 498,408 \text{ mL}$$

$$\text{Piknometre ve suyun ağırlığı } W_{pw,t} = W_p + (V_p \rho_{w,s}) = 156,15 + (498,408 \times 0,99878) = 653,950$$

Deneyin gerçekleştiği sıcaklıktaki bağlı yoğunluk:

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{W_s}{[W_{pw,t} - (W_{pws,t} - W_s)]} = \frac{100}{[653,95 - (716,87 - 100)]} = 2,697$$

$$G_{20^\circ\text{C}} = G_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_{20^\circ\text{C}}} \right) = 2,697 \left(\frac{0,99880}{0,99823} \right) = 2,697 \times 1,00057 = 2,699 \approx 2,70$$

6.5 İlgili standartlar

ASTM D 854: 2006. Standard test method for specific gravity of soils, Vol.04.08.

BS 1377: Part 2: 1990. Soils for civil engineering purposes, page 27, 8.3 Small pycnometer method.

CEN ISO/TS 17892-3: 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density - Pycnometer method.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.5 Deney 5: Zemin danelerinin bağıl yoğunluğunun (özgül ağırlık) tayini.

USBR 5320: 1989. Procedure for determining specific gravity of soils, Vol. 2.

7 Tabii birim hacim ağırlık deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

7.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1/T1, ASTM D 4531, CEN ISO/TS 17892-2, USBR 5375 ve BS 1377'ye göre tabii birim hacim ağırlık deneyi anlatılmıştır.

7.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

7.2.1 TS 1900-1/T1'e göre tabii birim hacim ağırlık deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-1/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.5.3 Deney 5 (C): birim hacim ağırlık deneyi'ne göre yapılmaktadır.

Bu deney ile düzgün bir geometrik şekle sahip olan veya olmayan zeminlerin parafin yardımı ile tabii birim hacim ağırlığı bulunur.

7.2.1.1 Gerekli araçlar

Uygun hacimde su geçirmez kap,

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

Deney düzeneği, Şekil 7.1'e uygun,

Parafin,

Parafini eritmek için cihaz,

Kumpas, 0,01 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune tıraşlama aletleri,

Damıtık su.

Ayrıca, su içeriğinin belirlenebilmesi için "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda belirtilen cihazlar.

7.2.1.2 Deneyin yapılışı

7.2.1.2.1 Düzgün bir geometrik şekle sahip deney numuneleri

Deney numunesi hacmi bilinen geometrik bir şekil (silindir, kare, dikdörtgen, vb.) olarak tıraşlanır ve 0,01 g doğrulukla tartılır, (W).

Deney numunesinin boyutları farklı yerlerden kumpas ile 0,01 mm doğrulukla birkaç kez okunur ve ortalaması alınarak numunenin hacmi hesaplanır (V). Deney numunesinin su içeriği değeri su içeriği deneyi yardımıyla belirlenir (w_n).

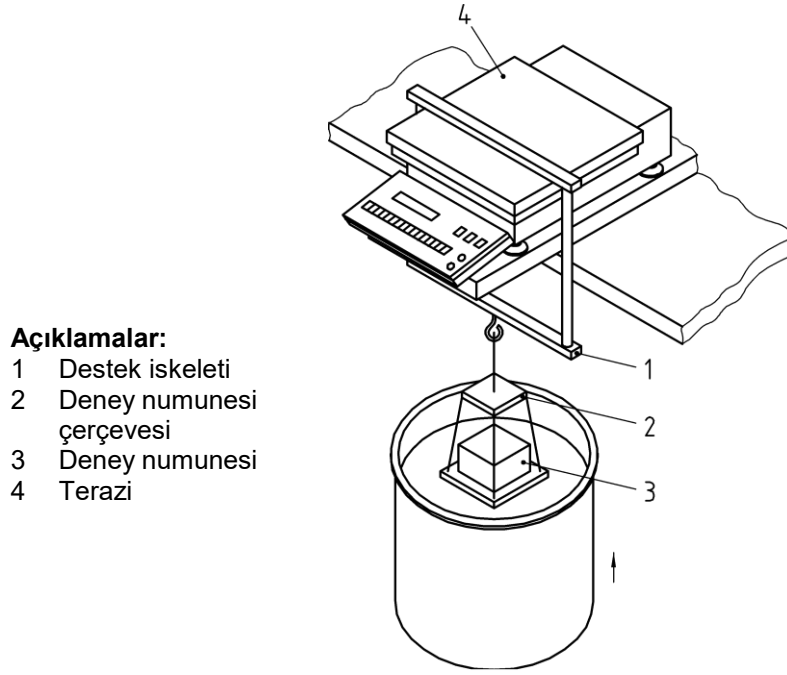
7.2.1.2.2 Düzgün bir geometrik şekle sahip olmayan deney numuneleri

Deney numunesinin varsa, keskin çıkıntıları uygun şekilde tıraşlanır veya kesilir. Numune 0,01 g doğrulukla tartılır, (W).

Deney numunesi erimiş parafin içerisine daldırılır ve numunenin parafin ile kaplanması sağlanır. Deney numunesi üzerindeki parafin kuruduktan sonra, parafinli deney numunesi tartılır (W_1).

Parafinli deney numunesi, teraziye asılı olarak duran çerçeveye yerleştirilir ve suya daldırılır. Numunenin hacmi kadar su taşması durduktan sonra su içerisindeki parafinli deney numunesi tartılır (W_2). Numune sudan ve çerçeveden çıkarılır ve parçalara ayrılarak üzerindeki parafin temizlenir.

Deneyden elde edilen veriler "Tabii birim ağırlık deneyi formu" na kaydedilir.



Şekil 7.1 - Deney düzeneği (örnek)

Parafinsiz deney numunesinin su içeriği (w_n) belirlenir

Not - Deney numunesinin su içeriği (w_n), deney numunesinin tıraşlanan kısımlarından da bulunabilir.

7.2.1.3 Hesaplamalar

Parafin ağırlığı aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$W_p = W_1 - W$$

Parafinin hacmi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$V_p = W_p / \gamma_p$$

Burada γ_p parafinin yoğunluğudur ($0,92 \text{ g/cm}^3$ alınabilir).

Not - Parafin yoğunluğu, eritilmiş halde bulunan parafinin hacmi hesaplanabilecek düzgün bir kesite sahip bir kaba (silindir, kare veya dikdörtgen vb.) dökülüp, sertliğe ulaştıktan sonra tartılıp, ağırlığının hesaplanmış hacmine bölünmesiyle elde edilebilir.

Parafinli numunenin hacmi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$V_{pn} = (W_1 - W_2) / \gamma_w$$

Burada γ_w damıtık suyun deney esnasındaki sıcaklıkta ki yoğunluğudur. Numunenin hacmi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$V = V_{pn} - V_p$$

Tabii birim ağırlık aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\gamma_n = W/V$$

Kuru birim hacim ağırlık ise, w_n su içeriği olmak üzere aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\gamma_k = \gamma_n / (1 + w_n)$$

7.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Tabii birim hacim ağırlık değeri veya istenirse, kuru birim hacim ağırlık değeri Mg/m^3 cinsinden ($\text{Mg/m}^3 = \text{g/cm}^3$) en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak.

7.2.2 ASTM D 4531'e göre tabii birim hacim ağırlık deneyi talimatı

ASTM D 4531 Yöntem B'ye göre tabii birim hacim ağırlık deneyinin yapılması, TS 1900-1/T1'de belirtilen tabii birim hacim ağırlık deneyi ile aynıdır.

Ancak, parafinlenmiş deney numunesi ile parafin kaplamanın hacmi, uygun büyüklükteki damıtık su dolu mezvü içine daldırılması sonucu, mezvü içinde yükselen damıtık suyun hacmi ile belirlenir.

7.2.3 CEN ISO/TS 17892-2'ye göre tabii birim hacim ağırlık deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-2'ye göre tabii birim hacim ağırlık deneyinin yapılması, TS 1900-1/T1'de belirtilen tabii birim hacim ağırlık deneyi ile aynıdır.

7.2.4 USBR 5375'e göre tabii birim hacim ağırlık deneyi talimatı

USBR 5375'e göre tabii birim hacim ağırlık deneyinin yapılması, TS 1900-1/T1'de belirtilen tabii birim hacim ağırlık deneyi ile aynıdır.

7.2.5 BS 1377'ye göre tabii birim hacim ağırlık deneyi talimatı

BS 1377'ye göre tabii birim hacim ağırlık deneyinin yapılması, TS 1900-1/T1'de belirtilen tabii birim hacim ağırlık deneyi ile aynıdır.

7.3 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin belirsizlik hesabı**7.3.1 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Tabii birim hacim ağırlık deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi karşılaştırma deneyleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1- Laboratuvar içi karşılaştırma deneyleri sonuçları

	γ_n g/cm^3
Veri sayısı	8
En büyük,	1,95
Ortanca,	1,93
En Küçük,	1,89
Ortalama, $\bar{x}$,	1,928
Standart sapma, σ_{Std}	0,021
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$	0,0075

Tabii birim hacim ağırlık deneyinin rastgele belirsizlik değeri, deney sayılarının az olmasından dolayı laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinden elde edilen en yüksek değer olan 0,0075 değeri yerine aşağıda verilen değer alınmıştır.

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}} (\gamma_n) = 0,015$

7.3.2 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

7.3.2.1 Tabii birim hacim ağırlık eşitliğinin türevleri

Tabii birim hacim ağırlık deneyinin sistematik belirsizlikle ilgili elemanlarının kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$\gamma_n = \frac{W}{V} = \frac{W}{\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p}}$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial W} = \frac{1 * \left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right) - W \left(\frac{1}{\gamma_p} \right)}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1}{\gamma_p} + \frac{W}{\gamma_p} - \frac{W}{\gamma_p}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2}$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial W} = \frac{\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1}{\gamma_p}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2}$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial W_1} = \frac{-W * \left(\frac{1}{\gamma_w} - \frac{1}{\gamma_p} \right)}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2}$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial W_2} = \frac{-W * \left(\frac{-1}{\gamma_w} \right)}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{\frac{W}{\gamma_w}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2}$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial \gamma_w} = \frac{-W * \left(-\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w^2} \right)}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{\frac{W(W_1 - W_2)}{\gamma_w^2}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2}$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial \gamma_p} = \frac{-W * \left(\frac{W_1 - W}{\gamma_p^2} \right)}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{-\frac{W(W_1 - W)}{\gamma_p^2}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2}$$

7.3.2.2 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin kılçık diyagramı

Tabii birim hacim ağırlık deneyinin kılçık diyagramı Şekil 7.2'de verilmiştir.

7.3.2.3 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları**7.3.2.3.1 Terazı****7.3.2.3.1.1 Kalibrasyon**

Tabii su içeriği deneyinde kullanılan teraziler ve toplam belirsizlikleri aşağıda verilmiştir:

$$\text{AND FX 3200} \quad u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,02 + 0,0115 * W) \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,01 + 0,00575 * W)$$

7.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$\text{AND FX 3200} \quad 0,01 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,01 / \sqrt{3} = 0,00577$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

7.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

500 g numune için mevcut terazilerin tekrarlanabilirliğinin istatistik analizi Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 - Deneyde kullanılan terazilerden elde edilen belirsizlik değerleri

	AND FX 3200
Ölçüm sayısı, n	41
Ortalama, $\bar{x}$	499,95
Standart sapma, σ	0,05
Belirsizlik, $\sigma / \sqrt{n}$	0,0078

7.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$\text{Terazinin toplam belirsizliği, } u_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

7.3.2.3.2 Suyun yoğunluğu

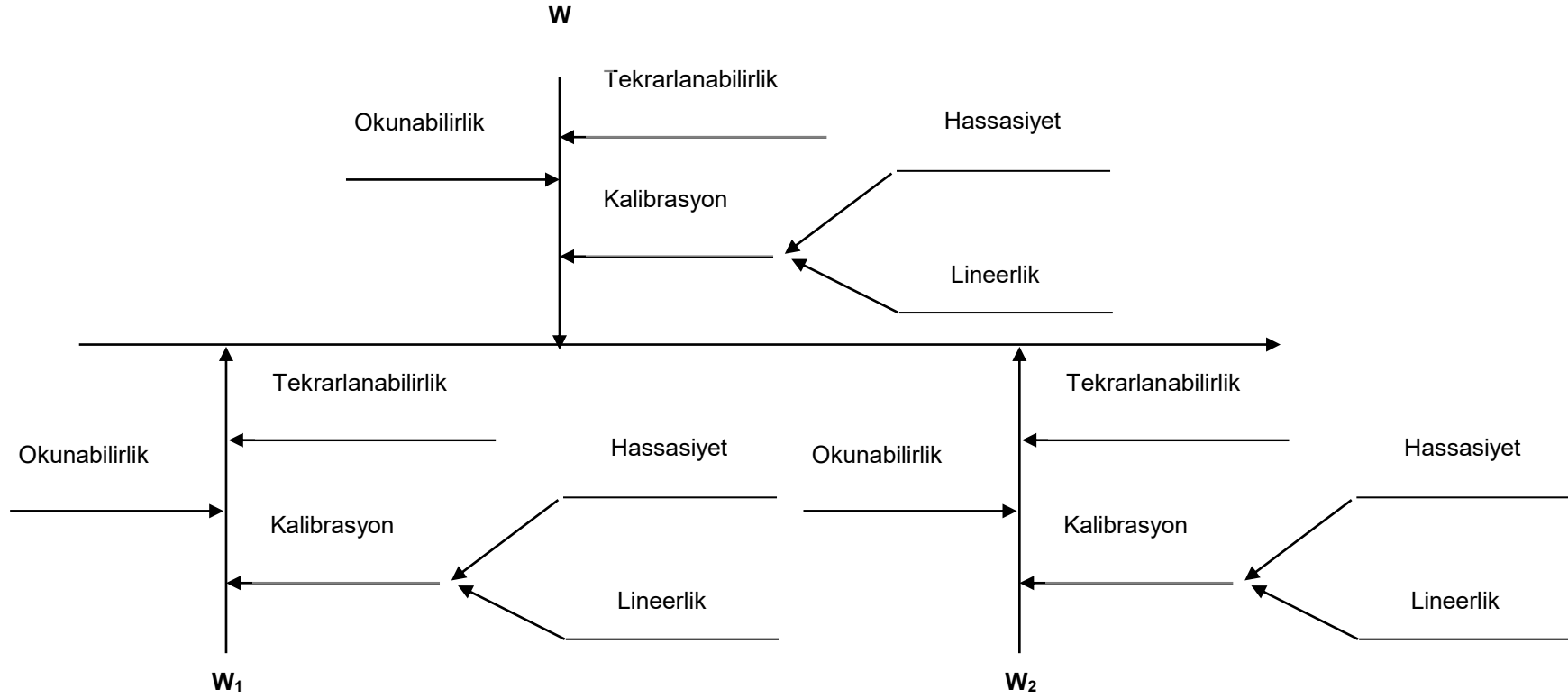
Damıtık su yoğunluğu kimya kitaplarından alındığı ve belirsizlik değeri hakkında bilgi vermediği için 0,001 olarak alınmıştır çünkü hesaplamalardan sonra bütün değerler 0,01 hassasiyetinde yuvarlatılarak rapor edilmesi gerektiği ilgili standartta belirtilmiştir.

$$u_{(\gamma_w)} = 0,001$$

7.3.2.3.3 Parafinin yoğunluğu

Parafin yoğunluğu kimya kitaplarından alındığı ve belirsizlik değeri hakkında bilgi vermediği için 0,001 olarak alınmıştır çünkü hesaplamalardan sonra bütün değerler 0,01 hassasiyetinde yuvarlatılarak rapor edilmesi gerektiği ilgili standartta belirtilmiştir.

$$u_{(\gamma_p)} = 0,001$$



Şekil 7.2 - Tabii birim hacim ağırlık deneyinin kılçık diyagramı

7.3.2.3.4 Sıcaklık değişimi

Tabii birim hacim ağırlık deneyi, numunenin tıraşlanmasından hemen sonra gerçekleştirildiği için numuneden buharlaşacak su miktarı önemsiz olduğu düşünülerek **belirsizlik değeri 0 (sıfır) alınmıştır**.

7.3.2.4 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliklerin toplamı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$U_{\text{Sistematik}}(\gamma_n) = \left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial W} * u_{\text{terazi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial W_1} * u_{1\text{terazi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial W_2} * u_{2\text{terazi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial \gamma_w} * u_{\gamma_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial \gamma_p} * u_{\gamma_p} \right)^2]^{0,5}$$

7.3.3 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

7.4 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin çözümlü örneği**7.4.1 Tabii birim hacim ağırlık deneyinden elde edilen veriler**

Tabii birim hacim ağırlık deneyi 22 °C su sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Deney numunesinin ağırlığı, $W = 45$ g

Deney numunesi ile parafinin ağırlığı, $W_1 = 48$ g

Deney numunesi ile parafinin damıtık su içerisindeki ağırlığı, $W_2 = 25$ g

Parafin yoğunluğu, $\gamma_p = 0,92$ g/cm³

22 °C sıcaklıktaki suyun yoğunluğu 0,99775 g/cm³tür.

7.4.2 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin hesaplamaları**7.4.2.1 Tabii birim hacim ağırlık**

$$\gamma_n = \frac{W}{V} = \frac{W}{\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p}} = \frac{45}{\frac{48 - 25}{0,99775} - \frac{48 - 45}{0,92}} = 2,274 \text{ g/cm}^3$$

7.4.2.2 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}}(\gamma_n) = 0,015$ (karşılaştırma deneylerinden)

7.4.2.3 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial W} = \frac{\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1}{\gamma_p}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{\frac{48 - 25}{0,99775} - \frac{48}{0,92}}{\left(\frac{48 - 25}{0,99775} - \frac{48 - 45}{0,92} \right)^2} = -0,0744$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial W_1} = \frac{-W * \left(\frac{1}{\gamma_w} - \frac{1}{\gamma_p} \right)}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{-45 * \left(\frac{1}{0,99775} - \frac{1}{0,92} \right)}{\left(\frac{48 - 25}{0,99775} - \frac{48 - 45}{0,92} \right)^2} = 0,0097$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial W_2} = \frac{\frac{W}{\gamma_w}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{\frac{45}{0,99775}}{\left(\frac{48 - 25}{0,99775} - \frac{48 - 45}{0,92} \right)^2} = 0,115$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial \gamma_w} = \frac{\frac{W * (W_1 - W_2)}{\gamma_w^2}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{\frac{45 * (48 - 25)}{0,99775^2}}{\left(\frac{48 - 25}{0,99775} - \frac{48 - 45}{0,92} \right)^2} = 2,654$$

$$\frac{\partial \gamma_n}{\partial \gamma_p} = \frac{-\frac{W * (W_1 - W)}{\gamma_p^2}}{\left(\frac{W_1 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_1 - W}{\gamma_p} \right)^2} = \frac{-\frac{45 * (48 - 45)}{0,92^2}}{\left(\frac{48 - 25}{0,99775} - \frac{48 - 45}{0,92} \right)^2} = 0,407$$

Belirsizlik değerlerinin hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

$$U_{\text{terazi}} = 0,01 + 0,00575 * 45 = 0,269$$

$$U_{1\text{terazi}} = 0,01 + 0,00575 * 48 = 0,286$$

$$U_{2\text{terazi}} = 0,01 + 0,00575 * 25 = 0,154$$

$$u_{\gamma_w} = 0,001 \text{ (kabul edilmiştir)}$$

$$u_{\gamma_p} = 0,001 \text{ (kabul edilmiştir)}$$

$$U_{\text{Sistematik } (\gamma_n)} = [(-0,0744 * 0,269)^2 + (0,0097 * 0,286)^2 + (0,115 * 0,154)^2 + (2,654 * 0,001)^2 + 0,407 * 0,001^2]^{0,5}$$

$$= [(4,00 + 0,08 + 3,14 + 0,07 + 0,00) * 10^4]^{0,5} = (0,00073)^{0,5} = 0,027$$

7.4.2.4 Tabii birim hacim ağırlık deneyinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,015 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,027

Deneyin toplam belirsizliği, $U_{\text{Toplam}} = [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5}$

$$= [(0,015)^2 + (0,027)^2]^{0,5} = 0,031$$

7.4.3 Tabii birim hacim ağırlık deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam}}(\gamma_n) = 2 * 0,03 = 0,06$

$$\gamma_n = (2,27 \pm 0,06) \text{ Mg/m}^3 \text{ (veya g/cm}^3\text{)}$$

7.5 İlgili standartlar

ASTM D 4531-86: 2002. Standard test methods for bulk density of peat and peat products, Method B - Paraffin wax method, Vol. 04.08.

BS 1377: Part 2: 1990. Soils for civil engineering purposes, classification tests, page 23, 7.3 immersion in water method.

CEN ISO/TS 17892-2: 2004. "Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 2: Determination of density of fine grained soil.

TS 1900-1/T1: 2007. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.5.3 Deney 5 (C): birim hacim ağırlık deneyi.

USBR 5375: 1989. Procedure for determining dry unit weight of irregularly shaped soil specimens, Vol.2.

8 Likit limit deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

8.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1, ASTM D 4318, USBR 5350, USBR 5355, BS 1377 ve AASHTO T89'a göre likit limit deneyi anlatılmıştır.

8.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

8.2.1 TS 1900-1'e göre likit limit deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, 5.1.2.2 Deney 2 (B): Likit limitin çarpmalı cihazla tayini (yarı logaritmik grafik kullanılarak) ve Madde 5.1.2.3 Deney 2 (C): Likit limitin çarpmalı cihaz ile tayini (tek nokta yöntemi ile ölçüm) ne göre yapılmaktadır.

Bu deney ile açıkta kurutulmuş zeminin likit limiti bulunur

8.2.1.1 Gerekli araçlar

Likit limit (Casagrande) cihazı, TS 1900-1'e uygun olan,

Plaka, en az 9 mm kalınlığında ve en az 45 cm uzunluğunda dane biçiminde düz yüzeyli,

Elek, 0,425 mm göz açıklığında,

Etüv, sürekli olarak (105 ± 10) °C sıcaklık sağlayan,

Terazi, 0,01 g doğrulukla ölçme yapabilen,

Porselen pota

Islak bez

Pipet, damıtık su dolu,

Kap, ağzı kapaklı

Desikatör, içinde susuz silika jeli bulunan,

Damıtık su

Ayrıca, "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda belirtilen araçlar

Notlar

1. Desikatör içinde bulunan susuz silika jelin orijinal rengi değişme gösterdiğinde değiştirilmelidir,
2. Otomatik olarak çalışan çarpmalı cihaz kullanılması durumunda, farklı kişilerin deneye katabileceği belirsizlik ortadan kalkar.
3. İş yoğunluğu fazla olan laboratuvarlar tek nokta yöntemini kullandıkları taktirde, daha fazla deney yapabilecektir (DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarında tek nokta yöntemi tercih edilmektedir).

8.2.1.2 Deneyin yapılışı

8.2.1.2.1 Likit limitin çarpmalı cihazla tayini (yarı logaritmik grafik kullanılarak)

8.2.1.2.1.1 Deneyin yapılışı

Numunenin deneyden önceki durumu ve kurutma şekli aşağıda belirtilenlerden birisine uymalıdır:

- a) Tabii,
- b) Etüvde kurutma ve
- c) Kurutma yöntemi bilinmiyor şeklinde belirtilerek, birisine uygun olarak 0,425 mm göz açıklığındaki elekten elenir.

Genellikle tabii (havada) kurutma şekli seçilmelidir. Elenmiş numuneden 200 g alınır. Numune karıştırma kabında, üzerine damıtık su eklenerek numunenin homojen bir şekilde macun kıvamına gelmesi sağlanır.

Macun kıvamındaki numune hava geçirmez kaba yerleştirilerek 24 saat bekletilir. Daha sonra 10 dakika süreyle karıştırılır.

Hazırlanan bu numune likit limit aletinin yarım küre kapağının içine sıvanır. Yüzeyi tabana paralel olarak düzlenir.

Oluk açma bıçağı ile kapağa sıvanmış numune iki eşit parçaya bölünür. Düşüş hızı, saniyede iki düşüş olacak şekilde likit limit aletinin kolu çevrilir.

Numune üzerine açılan kanalın ortasındaki kapanmanın kanal doğrultusu boyunca 13 mm olduğu andaki düşüş sayısı saptanır.

Bu kapanmanın olduğu bölgeden su içeriğinin saptanması için en az 10 g numune alınıp "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" na göre su içeriği bulunur.

Bu işlemler su içeriği artırılarak en az beş defa tekrarlanır. Seçilen başlangıç su ve deney sırasında eklenen su miktarları, elde edilen düşüş sayılarının 10 ile 50 arasında eşit aralıklarla dağılmasını sağlayacak biçimde ayarlanmalıdır.

Deneyden elde edilen değerler "Kıvam limitleri deneyi formu" na yazılır.

8.2.1.2.1.2 Hesaplamalar

Her denemeden elde edilen su içeriğine karşı düşüş sayısı yarı logaritmik bir grafik kâğıdı üzerine işaretlenir.

Elde edilen noktalara uyan en uygun doğru çizilir.

Akış doğrusu üzerinde 25 düşüş sayı karşısındaki su içeriği zeminin likit limitini LL verir.

8.2.1.2.1.3 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Yüzde olarak likit limit değerleri en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak.

Not - Genellikle likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin değerleri hep beraber, % olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak verilir

8.2.1.2.2 Likit limitin çarpmalı cihaz ile tayini (tek nokta yöntemi ile ölçüm)

Bu deney ile likit limit değeri beş nokta yerine iki noktada yapılarak ortalaması alınır. Yarı logaritmik yöntemde kullanılan aynı cihazlar kullanılır.

8.2.1.2.2.1 Deneyin yapılışı

Deney, yarı logaritmik yöntemde anlatıldığı şekilde gerçekleştirilir.

Numune üzerine açılan kanalın ortasındaki kapanmanın kanal doğrultusu boyunca 13 mm olduğu andaki düşüş sayısı 20 ile 30 arasında olmalıdır.

Deneye tâbi tutulan zemin numunesinin su içeriği, w_n , hesaplanır.

Deneyden elde edilen değerler "Kıvam limitleri deneyi formu" na yazılır.

8.2.1.2.2.2 Hesaplamalar

Likit limit aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$LL = w_n \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121} = (\text{katsayı}) w_n$$

Burada, N düşüş sayısı olup, 20 ile 30 arasında olmalıdır ve katsayı değerleri Çizelge 8.1'de verilmiştir:

Çizelge 8.1 - Düşüş sayısı N'ye karşılık k değerleri

Düşüş, N	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Katsayı	0,974	0,979	0,985	0,990	0,995	1,000	1,005	1,009	1,014	1,018	1,022

8.2.1.2.2.3 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Yüzde olarak likit limit değeri en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak.

Not - Genellikle likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin değerleri hep beraber, % olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak verilir

8.2.2 ASTM D 4318'e göre likit limit deneyi talimatı

ASTM D 4318 tek nokta yöntemine göre likit limit deneyi, TS 1900-1'de belirtilen tek nokta yöntemi ile aynıdır. ASTM D 4318 tek nokta yönteminde iki deneyde elde edilen düşüş sayıları arasındaki fark en fazla iki olmalıdır. Ancak, yarı logaritmik grafik yönteminde deney sayısı en az beş yerine en az üç (birincisinde düşüş sayısı 25-35, ikincisinde 20-30 ve üçüncüsünde 15-25 arasında olacak şekilde) defa yapılır.

8.2.3 USBR 5350'ye göre likit limit deneyi

USBR 5350 tek nokta yöntemine göre likit deneyi, ASTM D 4318'de belirtilen tek nokta yöntemi ile aynıdır.

8.2.4 USBR 5355'e göre likit limit deneyi

USBR 5355 yarı logaritmik grafik yöntemine göre likit limit deneyi, ASTM D 4318'de belirtilen yarı logaritmik grafik yöntemi ile aynıdır.

8.2.5 BS 1377'ye göre likit limit deneyi

BS 1377'ye göre yarı logaritmik grafik yöntemine göre likit limit deneyi, ASTM D 4318'de belirtilen yarı logaritmik grafik yöntemi ile aynıdır. Deney sayısı en az üç olmalı ve seçilen başlangıç su ve deney sırasında eklenen su miktarları, elde edilen düşüş sayılarının 10 ile 50 arasında eşit aralıklarla dağılmasını sağlayacak biçimde ayarlanmalıdır.

BS 1377 tek nokta yöntemine göre likit deneyi, ASTM D 4318'de belirtilen tek nokta yöntemi ile aynıdır. Ancak, BS 1377'de düşüş sayıları 15 ile 35 arasında olmasına müsaade edilmektedir ve iki deneyde elde edilen düşüş sayıları arasında fark olmamalıdır (eşit olmalıdır).

8.2.6 AASHTO T89'a göre likit limit deneyi

AASHTO T89 Yöntem a yarı logaritmik grafik yöntemine göre likit limit deneyi, ASTM D 4318'de belirtilen yarı logaritmik grafik yöntemi ile aynıdır.

AASHTO T89 Yöntem b tek nokta yöntemine göre likit deneyi, ASTM D 4318'de belirtilen tek nokta yöntemi ile aynıdır. İki deneyde elde edilen düşüş sayıları arasındaki fark en fazla iki olmalıdır.

8.3 Likit limit deneyinin belirsizlik hesabı

8.3.1 Likit limit deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Likit deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2 - Laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Laboratuvar içi		Laboratuvarlar arası
	1. Karşılaştırma Deneyleri	2. Karşılaştırma Deneyleri	-
Veri sayısı, n	33	22	38
En büyük, %	33,2	58,8	59,3
Ortanca, %	32,1	54,0	55,2
En Küçük, %	27,0	44,9	49,1
Ortalama, $\bar{X}$, %	28,775	53,095	54,9
Standart sapma, σ_{Std} , %	1,3672	3,6421	2,56
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, %	0,24	0,78	0,42

Likit limit deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değer olan % 0,78 değeri alınmıştır. Hesaplamalarda, kolaylık olsun diye yuvarlatılmış ve aşağıda belirtilen değer alınmıştır.

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (LL) = 0,008 = \% 0,8$

8.3.2 Likit limit deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

8.3.2.1 Likit limit eşitliğinin türevleri

Likit limit deneyi basit olarak bir su içeriği deneyi olduğundan, sistematik belirsizliğin bulunması su içeriği deneyinin hesaplanması gibi yapılmalıdır ve ilgili elemanların kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{-(W_2 - W_3) * (-1)}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_3} = \frac{-(W_3 - W_1) - (W_2 - W_3)}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{-W_3 + W_1 - W_2 + W_3}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2}$$

8.3.2.2 Likit limit deneyinin kılçık diyagramı

Likit limit deneyi basit olarak bir su içeriği deneyi olduğundan, likit limit deneyinin kılçık diyagramı Şekil 3.1'de verilen ile aynıdır.

8.3.2.3 Likit limit deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

8.3.2.3.1 Terazı

8.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Likit limit deneyinde kullanılan zemin numunesinin en büyük ağırlığı 50 g civarındadır ve aşağıda belirtilen terazi ile ölçülmektedir. Bu terazinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği:

$$\text{PRECISA XT 1220 M } u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,002 + 4,3 * 10^{-5} W) \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,001 + 2,15 * 10^{-5} W)$$

8.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$\text{PRECISA XT 1220 M için } 0,001 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,001/\sqrt{3} = 0,000577$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

8.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

50 g numune için terazilerin tekrarlanabilirliğinin istatistik analizi Çizelge 8.3'te verilmiştir.

Çizelge 8.3 - Deneyde kullanılan terazilerden elde edilen belirsizlik değerleri

	PRECISA XT 1220 M
Ölçüm sayısı, n	96
Ortalama, $\bar{x}$	49,963
Standart sapma, σ_{Std}	0,003
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$	0,0003

8.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$\text{Terazinin toplam belirsizliği, } u_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

8.3.2.3.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

8.3.2.3.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları $(0,425 \pm 0,0275)$ mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı No 40 tan büyük göz açıklığına sahip $(0,6 \pm 0,0277)$ mm ve $0,425$ mm'den küçük göz açıklığına sahip $(0,3 \pm 0,0162)$ mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Çizelge 8.4'te verilmiştir.

Çizelge 8.4 - Elek göz açıklığının likit limit üzerine etkisi

	No 30 0,6 ± 0,0277	No 40 0,425 ± 0,0275	No 50 0,3 ± 0,0162
Ölçüm sayısı, n	12	33	12
Ortalama, $\bar{X}$, %	32,08	31,46	35,15
Standart sapma, σ_{Std} , %	0,836	1,728	0,717
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, %	0,2413	0,3008	0,2070
Fark	0,3008-0,2413=0,0595		0,3008-0,2070= 0,0938

Çizelge 8.4'ten de anlaşılacağı gibi sonuçlar rastgele dağılmaktadır. (0,425 ± 0,0275) mm eleğin belirsizlik üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Ayrıca, aynı Casagrande Cihazı ile TS 1900-1 ve ASTM D 4318'de 0,425 mm göz açıklıklı (No 40) elek, BS 1377 Bölüm 2: 1990'da ise 0,4 mm göz açıklıklı elek kullanılması dolaylı (0,425 - 0,4 = 0,025 mm fark), deneyde kullanılan elekteki ± 0,0275 mm belirsizliğinin deney sonucuna bir etkisi olamayacağı anlaşılmaktadır. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

8.3.2.3.4 Likit limit deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliklerin toplamı, sadece terazinin belirsizliğinden oluşmaktadır:

$$\text{Toplam sistematik belirsizlik, } U_{\text{Sistematik (LL)}} = \left[\left(\frac{\partial W}{\partial W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_3} * u_3 \right)^2 \right]^{0,5}$$

8.3.3 Likit limit deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

8.4 Likit limit deneyinin çözümlü örneği (tek nokta yöntemi ile ölçüm)

8.4.1 Likit limit deneyinden elde edilen veriler

Likit limit deneyinde Precisa XT 1220 M marka terazi kullanılmış olup, kalibrasyon sertifikasından alınan toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir. Deneyden elde edilen veriler Çizelge 8.5'te gösterilmiştir.

$$\text{PRECISA XT 1220 M } [u_{\text{Terazi}} = \pm (0,001 + 0,0000215 * W)]$$

Çizelge 8.5 - Likit limit deneyinden elde edilen veriler

	1. Deney	2. Deney
Darbe Sayısı	25	25
W_1 (kap)	11,74 g	11,64 g
W_2 (kap+yaş numune)	23,41 g	23,60 g
W_3 (kap+kuru numune)	20,51 g	20,66 g

8.4.2 Likit limit deneyinin hesaplamaları

8.4.2.1 Likit limit

$$LL = w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} = \frac{23,41 - 20,51}{20,51 - 11,74} = \frac{2,90}{8,77} = 0,3307$$

8.4.2.2 Likit limit deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele (LL)}} = 0,008$ (karşılaştırma deneylerinden)

8.4.2.3 Likit limit deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{23,41 - 20,51}{(20,51 - 11,74)^2} = \frac{2,90}{76,81} = 0,0377$$

$$u_1 = [(0,001 + 0,0000215 \cdot 11,74)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0003)^2]^{1/2} = [(1,57 + 0,33 + 0,09) \cdot 10^{-6}]^{1/2} \\ \cong [1,99 \cdot 10^{-6}]^{1/2} = 0,00141$$

$$\frac{\partial W}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1} = \frac{1}{20,51 - 11,74} = \frac{1}{8,77} = 0,1140$$

$$u_2 = [(0,001 + 0,0000215 \cdot 23,41)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0003)^2]^{1/2} = [(2,26 + 0,33 + 0,09) \cdot 10^{-6}]^{1/2} \\ \cong [2,68 \cdot 10^{-6}]^{1/2} = 0,00164$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_3} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{11,74 - 23,41}{(20,51 - 11,74)^2} = \frac{-11,67}{76,91} = -0,1517$$

$$u_3 = [(0,001 + 0,0000215 \cdot 20,51)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0003)^2]^{1/2} = [(2,08 + 0,33 + 0,09) \cdot 10^{-6}]^{1/2} \\ \cong [2,50 \cdot 10^{-6}]^{1/2} = 0,00158$$

$$U_{\text{Sistematik (LL)}} = [(\frac{\partial w}{\partial W_1} \cdot u_1)^2 + (\frac{\partial w}{\partial W_2} \cdot u_2)^2 + (\frac{\partial w}{\partial W_3} \cdot u_3)^2]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik (LL)}} = [(0,0377 \cdot 0,00141)^2 + (0,1140 \cdot 0,00164)^2 + (-0,1517 \cdot 0,00158)^2]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik (LL)}} = [0,2826 \cdot 10^{-8} + 3,4954 \cdot 10^{-8} + 5,7449 \cdot 10^{-8}]^{0,5} \cong [9,5229 \cdot 10^{-8}]^{0,5} = 0,0003086$$

8.4.2.4 Deneyin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,008 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,0003086

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} = [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ = [(0,008)^2 + (0,0003086)^2]^{0,5} = 0,008$$

$$\% 95 \text{ güven aralığında } k = 2 \text{ olduğundan } kU_{\text{Toplam (LL)}} = 2 \cdot 0,008 = 0,016$$

$$LL_1 = 0,3307 \pm 0,016 = \% (33,1 \pm 1,6)$$

İkinci deneyin hesaplanma yöntemi ayrıntılı olarak aşağıdaki Çizelge 8.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 8.6 - Likit limit deneyinin belirsizlik hesabı

	1. Deney	u1	2. Deney	u2
$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$	0,3306		0,3259	
LL	0,3306		0,3259	
U _{Rastgele (LL)}	0,0080		0,0080	
$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2}$	0,03770	0,00141	0,03614	0,00141
$\frac{\partial w}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1}$	0,11403	0,00164	0,11086	0,00164
$\frac{\partial w}{\partial W_3} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2}$	-0,15173	0,00158	-0,14700	0,00158
U _{Sistemik (LL)}	0,0003		0,0003	
U _{Toplam (LL)}	0,0080		0,0080	
k U _{Toplam (LL)}	0,0160		0,0160	

8.4.3 Sonuçların gösterilmesi

$$LL = (LL_1 + LL_2) / 2 = (0,3306 + 0,3259) / 2 = 0,3283$$

$$U_{LL} = (U_{LL1} + U_{LL2}) / 2 = (0,0160 + 0,0160) / 2 = 0,0160$$

$$LL = 0,3283 \pm 0,0160 = \% (32,8 \pm 1,6)$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistemik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistemik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

8.5 İlgili standartlar

AASHTO T89: 2002. Standard method of test for determining the liquid limit of soils.

ASTM D 4318: 2005. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, Vol. 04.08.

BS 1377; Part 2: 1990. Soils for civil engineering purposes. Test no 4.5 Determination of the liquid limit, Page 9, One-Point Casagrande method.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.2.3 Deney 2 (C): Likit limitin çarpmalı cihaz ile tayini (tek nokta yöntemi ile ölçüm).

USBR 5350: 1989. Procedure for determining the liquid limit of soils by the one-point method, Vol. 2.

USBR 5355: 1989. Procedure for determining the liquid limit of soils by the three-point method, Vol. 2.

9 Plastik limit deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

9.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1, ASTM D 4318, CEN ISO/TS 17892-12, USBR 5360, AASHTO T90, BS 1377'ye göre plastik limit deneyi anlatılmıştır.

9.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

9.2.1 TS 1900-1'e göre plastik limit deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.3 Deney 3: Plastik limitin tayini ve plastisite indisinin bulunmasına göre yapılmaktadır

Bu deney ile ince daneli zeminlerin plastik kıvamda bulunduğu en düşük su içeriğinde ölçülür.

9.2.1.1 Gerekli araçlar

Cam plaka, en az 9 mm kalınlığında ve en az 45 cm uzunluğunda dane biçiminde düz yüzeyli,

Elek, 0,425 mm göz açıklığında,

Etüv, sürekli olarak (105 ± 10) °C sıcaklık sağlayan,

Terazi, 0,01 g doğrulukla ölçme yapabilen,

Porselen pota,

Islak bez,

Pipet, damıtık su dolu,

Kap, ağzı kapaklı,

Desikatör, içinde susuz silika jeli bulunan,

Damıtık su.

Ayrıca, "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda belirtilen araçlar.

Not - Desikatör içinde bulunan susuz silika jelin orijinal rengi değişme gösterdiğinde değiştirilmelidir

9.2.1.2 Deneyin yapılışı

Likit limit deneyi için hazırlanmış olan numuneden en az 20 g alınır.

Alınan numune parmaklara yapışmayacak ve kolayca yuvarlanabilecek homojen duruma getirilir.

Numune silindir bir makarna şekli alıncaya kadar düz bir yüz üzerinde el ayası ile yuvarlanır.

Silindirler yaklaşık 3 mm çapına gelinceye (3 mm çapındaki metal çubuk karşılaştırma amacıyla kullanılabilir) ve yüzeyinde çatlama ve dağılmaların görüldüğü ana kadar bu işlem sürdürülür.

Çatlayıp, dağılan numuneler rutubet kabına konularak su içeriği saptanır.

Bu deney en az 2 defa tekrarlanır.

Deneyden elde edilen değerler "Kıvam limitleri deneyi formu" na yazılır.

9.2.1.3 Hesaplamalar

Su içeriği değerleri plastik limit değerini verir. Deney kaç defa tekrarlandı ise, bu tekrarların ortalaması alınarak plastik limit değeri (PL), bulunur.

9.2.1.4 Plastisite indisinin bulunması

Plastisite indisi, "Likit limit deneyi talimat ve belirsizlik hesabı" ile bulunan likit değerinden, plastik limit değeri çıkarılarak bulunur ve sonuçlar "Kıvam limitleri deneyi formu" na yazılır.

$$PI = LL - PL$$

9.2.1.5 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Plastik limit ve plastisite indisi % olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak verilir.

Not - Genellikle likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin değerleri hep beraber, % olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak verilir

9.2.2 ASTM D 4318'e göre plastik limit deneyi talimatı

ASTM D 4318'e göre plastik limit deneyi, TS 1900-1'de belirtilen ile aynıdır. Ancak, ASTM D 4318'de çapın değeri 3,2 mm olmalı ve numune 3,2 mm'ye en fazla 2 dakikada getirilmelidir (el dakikada 80 ile 90 arasında gidip-gelmeli gerekir). Deney el ile yapılabileceği gibi, geliştirilen bir aletle de yapılabilir. Deneyin iki defa yapılmasının yeterlidir. İki deney arasındaki plastik limit değeri % 1'den farklı ise, deneyin tekrarı gerekir.

9.2.3 CEN ISO/TS 17892-12'ye göre plastik limit deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-12'ye göre plastik limit deneyi, TS 1900-1'de belirtilen yöntem ile aynıdır. İki deney arasındaki plastik limit değeri % 0,5'ten farklı ise, deneyin tekrarlanması gerekir.

9.2.4 USBR 5360'a göre plastik limit deneyi

USBR 5360'a göre plastik deneyi, TS 1900-1'de belirtilen yöntemi ile aynıdır. El dakikada 80 ilâ 90 arasında gidip-gelmelidir. Deneyin iki defa yapılması yeterlidir. İki deney arasındaki plastik limit değeri % 2'den farklı ise, deneyin tekrarı gerekir.

9.2.5 BS 1377'ye göre plastik limit deneyi

BS 1377'ye göre plastik limit deneyi, TS 1900-1'de belirtilen yöntem ile aynıdır. İki deney arasındaki su içeriği % 0,5'ten farklı ise, deneyin tekrarlanması gerekir.

9.2.6 AASHTO T90'a göre likit limit deneyi

AASHTO T90'a göre plastik limit deneyi, TS 1900-1'de belirtilen yöntem ile aynıdır. Ancak, AASHTO T90'da numune 3 mm'ye elin dakikada 80 ile 90 arasında gidip-gelmeli ile getirilmelidir. Deneyin el ile yapılabileceği gibi, geliştirilen bir aletle de yapılabilir. Bu aletle numune 3 mm'ye en fazla 2 dakikada getirilmelidir.

9.3 Plastik limit deneyinin belirsizlik hesabı

9.3.1 Plastik limit deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Plastik limit deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri Çizelge 9.1'de verilmiştir.

Çizelge 9.1- Laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Laboratuvar içi		Laboratuvarlar arası
	1. Karşılaştırma Deneyleri	2. Karşılaştırma Deneyleri	-
Veri sayısı, n	24	22	38
En büyük, %	20,7	30,8	28,0
Ortanca, %	18,1	23,1	22,4
En Küçük, %	17,0	19,3	17,0
Ortalama, $\bar{x}$, %	18,925	24,382	22,8
Standart sapma, σ_{Std} , %	1,4198	3,3356	2,83
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, %	0,29	0,71	0,46

Plastik limit deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değer olan % 0,71 değeri alınmıştır. Hesaplamalarda, basitliği sağlamak amacıyla aşağıda verilen değer alınmıştır.

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (PL) = 0,008 = \% 0,8$

9.3.2 Plastik limit deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

9.3.2.1 Plastik limit eşitliğinin türevleri

Plastik limit deneyi basit olarak bir su içeriği deneyi olduğundan, sistematik belirsizliğin bulunması su içeriği deneyinin hesaplanması gibi yapılmalıdır ve ilgili elemanların kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{-(W_2 - W_3) \cdot (-1)}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1}$$

$$\frac{\partial w}{\partial W_3} = \frac{-(W_3 - W_1) - (W_2 - W_3)}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{-W_3 + W_1 - W_2 + W_3}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2}$$

9.3.2.2 Plastik limit deneyinin kılçık diyagramı

Plastik limit deneyi basit olarak bir su içeriği deneyi olduğundan, plastik limit deneyinin kılçık diyagramı Şekil 3.1'de verilen ile aynıdır.

9.3.2.3 Plastik limit deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

9.3.2.3.1 Terazi

9.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Plastik limit deneyinde kullanılan zemin numunesinin en büyük ağırlığı 30 g civarındadır ve aşağıda belirtilen terazi ile ölçülmektedir. Bu terazinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği:

$$\text{PRECISA XT 1220 M } u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,002 + 4,3 \cdot 10^{-5}W) \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,001 + 2,15 \cdot 10^{-5}W)$$

9.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$\text{PRECISA XT 1220 M için } 0,001 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,001/\sqrt{3} = 0,000577$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

9.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

30 g numune için terazilerin tekrarlanabilirliğinin istatistik analizi Çizelge 9.3'te verilmiştir.

Çizelge 9.3 - Deneyde kullanılan terazilerden elde edilen belirsizlik değerleri

	PRECISA XT 1220 M
Ölçüm sayısı, n	96
Ortalama, $\bar{x}$	49,963
Standart sapma, σ_{Std}	0,003
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$	0,0003

9.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$\text{Terazinin toplam belirsizliği, } u_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

9.3.2.3.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

9.3.2.3.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları (0,4 ± 0,0422) mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı 0,4 mm'den büyük göz açıklığına sahip (0,6 ± 0,0277) mm ve 0,4 mm'den küçük göz açıklığına sahip (0,3 ± 0,0162) mm elek aynı cihazda farklı kişiler tarafından yapılan deneylerle anlaşılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Çizelge 9.4'te verilmiştir.

Çizelge 9.4 - Elek göz açıklığının likit limit üzerine etkisi

	No 30 0,6 ± 0,0277	No 40 0,425 ± 0,0275	No 50 0,3 ± 0,0162
Ölçüm sayısı, n	12	23	12
Ortalama, $\bar{x}$	21,02	18,36	23,795
Standart sapma, σ_{Std}	1,216	0,971	1,177
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$	0,351	0,2025	0,3398
Fark	0,2025 - 0,351 = - 0,1485		0,2025 - 0,3398 = - 0,1373

Çizelge 9.4'ten anlaşılacağı gibi sonuçlar rastgele dağılmaktadır. (0,425 ± 0,0275) mm eleğin belirsizlik üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Ayrıca, aynı Casagrande Cihazı ile TS 1900-1 ve ASTM D 4318 de 0,425 mm göz açıklıklı (No 40) elek, BS 1377 Bölüm 2: 1990'da ise 0,4 mm göz açıklıklı elek kullanılmasından dolayı (0,425 - 0,4 = 0,025 mm fark), deneyde kullanılan elekteki ± 0,0275 mm belirsizliğinin deney sonucuna bir etkisi olamayacağı anlaşılmaktadır. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

9.3.2.3.4 Plastik limit deneyinin sistematik belirsizliğinin toplamı

Sistematik belirsizliklerin toplamı, sadece terazinin belirsizliğinden oluşmaktadır:

$$\text{Toplam sistematik belirsizlik, } U_{\text{Sistematik}} = \left[\left(\frac{\partial W}{\partial W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_3} * u_3 \right)^2 \right]^{0,5}$$

9.3.3 Plastik limit deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

9.4 Plastik limit deneyinin çözümlü örneği

9.4.1 Plastik limit deneyinden elde edilen veriler

Plastik limit deneyinde Precisa XT 1220 M marka terazi kullanılmış olup, kalibrasyon sertifikasından alınan belirsizliği aşağıda verilmiştir. Deneyden elde edilen veriler Çizelge 9.5'te gösterilmiştir.

$$\text{PRECISA XT 1220 M } [u_{\text{Terazi}} = \pm (0,001 + 0,0000215 * W)]$$

Çizelge 9.5 - Plastik limit deneyinden elde edilen veriler

	1. Deney	2. Deney	3. Deney
W ₁	10,69 g	10,50 g	10,58 g
W ₂	13,29 g	13,18 g	13,10 g
W ₃	12,88 g	12,79 g	12,72 g

9.4.2 Plastik limit deneyinin hesaplamaları

8.4.2.1 Plastik limit

$$PL = w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} = \frac{13,29 - 12,88}{12,88 - 10,69} = \frac{0,41}{2,19} = 0,1872$$

8.4.2.2 Plastik limit deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele (PL)}} = 0,008$ (karşılaştırma deneylerinden)

8.4.2.3 Plastik limit deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{13,29 - 12,88}{(12,88 - 10,69)^2} = \frac{0,41}{4,80} = 0,0855$$

$$u_1 = [(0,001 + 0,0000215 * 10,69)^2 + (0,001 / \sqrt{3})^2 + (0,0003)^2]^{1/2} = [(1,51 + 0,33 + 0,09) * 10^{-6}]^{1/2}$$

$$\cong [1,93 * 10^{-6}]^{1/2} = 0,00139$$

$$\frac{\partial W}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1} = \frac{1}{12,88 - 10,69} = \frac{1}{2,19} = 0,4566$$

$$u_2 = [(0,001+0,0000215*13,29)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0003)^2]^{1/2} = [(1,65+0,33+0,09)*10^{-6}]^{1/2}$$

$$\cong [2,07*10^{-6}]^{1/2} = 0,00144$$

$$\frac{\partial W}{\partial W_3} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2} = \frac{10,69 - 13,29}{(12,88 - 10,69)^2} = \frac{-2,60}{4,80} = -0,5420$$

$$u_3 = [(0,001+0,0000215*12,88)^2 + (0,001/\sqrt{3})^2 + (0,0003)^2]^{1/2} = [(1,63+0,33+0,09)*10^{-6}]^{1/2}$$

$$\cong [2,05*10^{-6}]^{1/2} = 0,00143$$

$$U_{\text{Sistemik (PL)}} = [(\frac{\partial W}{\partial W_1} * u_1)^2 + (\frac{\partial W}{\partial W_2} * u_2)^2 + (\frac{\partial W}{\partial W_3} * u_3)^2]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistemik (PL)}} = [(0,0855*0,00139)^2 + (0,4566*0,00144)^2 + (-0,5420*0,00143)^2]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistemik (PL)}} = [1,41*10^{-8} + 43,23*10^{-8} + 60,07*10^{-8}]^{0,5} \cong [50,65*10^{-8}]^{0,5} = 0,00102$$

$$U_{\text{Sistemik (PL)}} \cong 0,00102$$

9.4.2.4 Deneyin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,008 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,00102

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} = [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistemik belirsizlik})^2]^{0,5}$$

$$= [(0,008)^2 + (0,00102)^2]^{0,5} = 0,0081$$

$$\% 95 \text{ güven aralığında } k = 2 \text{ olduğundan } kU_{\text{Toplam (PL)}} = 2 * 0,0081 = 0,0161$$

$$PL_1 = 0,1872 \pm 0,0161 = \% (18,7 \pm 1,6)$$

İkinci ve üçüncü deneyin hesaplanma şekli ayrıntılı olarak aşağıdaki Çizelge 9.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 9.6 - Plastik limit deneyinin belirsizlik hesabı

	1. Deney	u1	2. Deney	u2	3. Deney	u2
$PL = w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$	0,1872		0,1703		0,1776	
$U_{Rastgele (PL)}$	0,0080		0,0080		0,0080	
$\frac{\partial w}{\partial W_1} = \frac{W_2 - W_3}{(W_3 - W_1)^2}$	0,0855	0,00139	0,0744	0,00139	0,0830	0,00139
$\frac{\partial w}{\partial W_2} = \frac{1}{W_3 - W_1}$	0,4566	0,00144	0,4367	0,00144	0,4673	0,00144
$\frac{\partial w}{\partial W_3} = \frac{W_1 - W_2}{(W_3 - W_1)^2}$	-0,5421	0,00143	-0,5111	0,0143	-0,5503	0,00143
$U_{Sistemik (PL)}$	0,0010		0,0010		0,0010	
$U_{Toplam (PL)}$	0,0081		0,0081		0,0081	
kU_{Toplam}	0,0161		0,0161		0,0161	

8.4.3 Sonuçların gösterilmesi

Üç dane plastik limit değeri toplanıp üçe bölündüğü için (standart en az iki diyor):

$$PL = (PL_1 + PL_2 + PL_3) / 3 = (0,1872 + 0,1703 + 0,1776) / 3 = 0,1784$$

$$U_{PL} = (U_{PL1} + U_{PL2} + U_{PL3}) / 3 = (0,0161 + 0,0160 + 0,0161) / 3 = 0,0161$$

$$PL = 0,1784 \pm 0,0161 = \% (17,8 \pm 1,6)$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

9.4.2 Plastisite indisi ve belirsizlik hesabı

Plastisite indisi zemin numunesinin likit limiti ile plastik limiti arasındaki farktır:

$$PI = LL - PL$$

Bir zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilen deney sonucu aşağıdaki değerlere sahip olduğu kabul edilsin:

$$LL = \% (32,8 \pm 1,5)$$

$$PL = \% (17,8 \pm 1,6)$$

Plastisite indisinin belirsizliği bu iki değerden en büyüğü olarak alınmak suretiyle:

$$PI = \% (32,8 - 17,8) \pm \text{En büyük } (1,6 \text{ ile } 1,5) = (\% 15,0 \pm 1,6)$$

olarak hesaplanır.

Not - Belirsizlikler Ek B'de belirtilen yöntem kullanılarak da birleştirilebilir.

9.5 İlgili standartlar

AASHTO T90: 2002. Standard method of test for determining the plastic limit of soils.

ASTM D 4318: 2005. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, Vol. 04.08.

CEN ISO/TS 17892-12: 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of Atterberg limits, 5.3 Determination of plastic limit

BS 1377; Part 2: 1990. Soils for civil engineering purposes. Test no 5. Determination of the plastic limit and plasticity index, page 13.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.3 Deney 3: Plastik limitin tayini ve plastisite indisinin bulunması.

USBR 5360: 1989. Procedure for determining the plastic limit and plasticity index of soils, Vol.2.

10 Standart sıkıştırma (2,5 kg'lık tokmak kullanarak) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

10.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-1, ASTM D 698, USBR 5500 ve BS 1377'ye göre standart sıkıştırma deneyi anlatılmıştır.

10.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

10.2.1 TS 1900-1'e standart sıkıştırma deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-1 İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.2.1 Deney 7: Zeminde kuru birim hacim ağırlık - su içeriği bağıntısının 2,5 kilogramlık tokmakla elde edilmesi (standart enerji) ne göre yapılmaktadır.

Bu deney, belirli bir yöntemle sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren su içeriğinin bulunması ile ilgilidir. Bu deneyde 305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık tokmanın sağladığı mekanik iş kullanılmaktadır.

Bu deney, % 30 veya daha az malzeme 19 mm (veya 20 mm) lik elekte kalıyorsa uygulanır.

10.2.1.1 Gerekli araçlar

Metal kalıp, iç çapı 105 mm ve iç yüksekliği 115,5 mm, hacmi yaklaşık 1000 cm³ olan ile iç çapı 152,4 mm ve iç yüksekliği 115,5 mm, hacmi yaklaşık 2106 cm³ olan, silindir biçiminde, kolayca çıkarılabilen bir taban plakası ile 50 mm yüksekliğinde bir yakası bulunan,

Metal tokmak, 50 mm çapında dairesel tabanı ile 2,5 kg ağırlığı olan ve 305 mm'den serbest düşüş yapabilen bir düzeneç,

Terazi, 1 g doğrulukla tartım yapabilen,

Etüv, sürekli olarak (105 ± 10) °C sıcaklık sağlayan,

Palet bıçağı,

Çelik cetvel,

Metal tepsi, en az 60x45x7,5 cm boyutlarında,

Kriko,

Desikatör, içinde susuz silika jeli bulunan,

Damıtık su,

Elek, göz açıklığı 4,75 mm (No 4), 9,5 mm ve 20 mm olan.

Ayrıca, "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda belirtilen araçlar.

Notlar:

1. Sıkıştırma deneylerinde kullanılacak kalıp boyutlar yaklaşık mertebededir. Standartta verilen değerlere yakın kalıplar da kullanılabilir,
2. 20 mm göz açıklıklı elek yerine 19 mm göz açıklıklı elekte kullanılabilir,
3. Desikatör içinde bulunan susuz silika jelin orijinal rengi değişme gösterdiğinde değiştirilmelidir.

10.2.1.2 Deneyin yapılışı

10.2.1.2.1 Elek seçimi

Sıkıştırma deneyi yapılmadan önce, “Dane çapı dağılımı deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı” nda tarif edilen dane çapı dağılımıyla 4,75 mm, 9,5 mm ve 20 mm’lik eleklerde kalan malzeme yüzdeleri belirlenir. Çizelge 10.1’de gerekleri sağlayan elekten elenen malzemenin ilgili kalıba sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilir.

Çizelge 10.1 - Kullanılması gereken kalıp ve eleklerin seçim kuralları

	Kullanım şartı	Kullanılan malzeme	Kalıp (iç boyutları)	Tabaka sayısı	Her tabakaya vuruş sayısı
A	% 20 ve daha az malzeme 4,75 mm’lik elek üzerinde kalıyor ise	4,75 mm’lik elekten geçen	Çapı: 105,0 mm Boyu: 115,5 mm	Üç	25
B	% 20 ve daha fazla malzeme 4,75 mm’lik elekte kalıyor ve % 20 ve daha az malzeme 9,5 mm’lik elek üzerinde kalıyor ise	9,5 mm’lik elekten geçen	Çapı: 105,0 mm Boyu: 115,5 mm	Üç	25
C	% 20’den daha fazla malzeme 9,5 mm’lik elekte kalıyor ve % 30 ve daha az malzeme 20 mm’lik elek üzerinde kalıyor ise	20 mm’lik elekten geçen	Çapı: 152,4 mm Boyu: 115,5 mm	Üç	56

10.2.1.2.2 Deney sırasında ezilme eğilimli olmayan zeminler

Açıkta kurutulup, kullanılan elekten geçen numuneden 5 kg alınır.

Numune kumlu ve çakıllı ise, % 3 ile % 5 arasında değişen su içeriği, kohezyonlu zeminlerde ise, plastik limitin % 12 ile % 16 arasında değişen su içeriği ile iyice karıştırılır (iyice karıştırılmamak yanlış sonuçlar verir).

Kalıp taban plakası takılmış olarak 1 g doğrulukla tartılır, W_1 .

Kalıp, beton döşeme gibi sert bir yüzey üzerine oturtulur ve nemli zemin, mümkün olduğu kadar eşit ağırlıkta üç tabaka halinde, her birine 305 mm’lik serbest düşüş yapan tokmakla Çizelge 10.1’de belirtilen her tabakaya vuruş sayısı kadar darbe uygulayarak, üst ucuna yakası takılmış kalıbın içine sıkıştırılır. Darbeler her tabaka yüzeyine eşit aralıklarla dağıtılmalıdır. Tokmak kılavuzunun, tokmağın serbest düşüşünü engelleyecek biçimde, zeminle tıkanmamasına özen gösterilmelidir.

Kullanılan zemin miktarı, kalıbı doldurmağa yetmeli ancak yaka çıkarıldıktan sonra kesilip atılacak artık zemin yüksekliği 6 mm yi aşmamalıdır. Yaka çıkarılır ve sıkıştırılmış zemin, çelik cetvelle kalıbın üst kenarı seviyesinde dikkatle düzlenir. Kalıp ve zemin, 1 g doğrulukla tartılır, W_2 .

Sıkıştırılmış zemin, kalıptan çıkarılıp, büyükçe bir metal kaba konur. Bu zeminin tümünü yansıtan bir numune alınır ve “Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı” ne göre su içeriği bulunur.

Zeminin geriye kalanı ufalanıp, kullanılan elekten elenir ve deneyin başında hazırlanan numuneden artmış olanla karıştırılır.

Kumlu ve çakıllı zeminler için % (1 - 2), kohezyonlu zeminler için % (2 - 3) oranında su katılarak iyice karıştırılır ve yukarıda anlatılan işlemler tekrarlanır.

Deney, en az beş değer verecek biçimde tekrarlanır ve kullanılan su içerikleri en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren optimum su içeriğini içine alan sınırlar arasında değişmelidir.

Deneyden elde edilen değerler “Sıkıştırma deneyleri formu” na yazılır.

10.2.1.2.3 Deney sırasında ezilme eğilimli olan zeminler

Açıkta kurutulup, kullanılan elekten elenen numuneden her biri 2,5 kg ağırlığındaki beş veya daha çok numune alınır.

Madde 10.2.1.2.2'de anlatılan bütün işlemler uygulanır. Deney sonunda her numunenin artan bölümü atılır.

10.2.1.3 Hesaplamalar

Sıkıştırılmış zeminin yaş birim hacim ağırlığı γ her numune için aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\gamma = \frac{W_2 - W_1}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

Burada;

W_1 Kalıp ve tabanın ağırlığı (g),

W_2 Kalıp, tabanı ve sıkıştırılmış zemin ağırlığı (g),

V Kalıbın hacmi (cm^3)

dir.

Zeminin kuru birim hacim ağırlığı γ_k aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\gamma_k = \frac{100\gamma}{100 + w} \quad (\text{g/cm}^3)$$

Burada;

w Zeminin su içeriği (%),

γ Zeminin yaş birim hacim ağırlığı (g/cm^3)

dir.

Bir seri deney sonucunda elde edilen kuru birim ağırlık (γ_k) ve bunlara karşılık olan su içeriği değerleri, bir grafik kâğıdı üzerine işlenir. Elde edilen noktalar arasında düzgün bir eğri geçirilir ve eğri üzerindeki en yüksek değer $\gamma_{k,\text{mak}}$ bulunur.

Karşılaştırma amacıyla, aynı grafik üzerine, $V_a = 0$, % 5, % 10 hava boşluğu yüzdelerini gösteren eğriler, aşağıdaki eşitlik yardımıyla çizilir:

$$\gamma_k = \frac{1 - \frac{V_a}{100}}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{100}}$$

Burada;

V_a Hava boşluğu (%),

G_s Özgül ağırlık (bağıl yoğunluktur),

w Zeminin su içeriği (%)

dir.

10.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Milimetrik kâğıda, yatay ekseninde su içeriği, düşey ekseninde kuru birim hacim ağırlık değerleri ile çizilen kuru birim hacim ağırlık - su içeriği grafiği,
- Kuru birim hacim ağırlık - su içeriği eğrisinden elde edilen en yüksek kuru birim hacim ağırlık $\gamma_{k,mak}$; g/cm³ olarak en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak veya kN/m³ olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak,
- Kuru birim hacim ağırlık - su içeriği eğrisinde, en yüksek kuru birim hacim ağırlığa karşılık olan su içeriği (optimum su içeriği) % olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak,
- Kullanılan eleğin üstünde kalan malzeme miktarı % olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak,
- 2,5 kg tokmak metodu biçiminde bir not ve uygulanan işlem ("tek numune" veya "ayrı ayrı numuneler").

10.2.2 ASTM D 698'e göre standart sıkıştırma deneyi talimatı

ASTM D 698'e göre sıkıştırma deneyi, TS 1900-1'de belirtilen ile aynıdır.

10.2.3 USBR 5500'ye göre standart sıkıştırma deneyi

USBR 5500'e göre sıkıştırma deneyi, ASTM D 698'de belirtilen yöntemi ile aynıdır. Ancak bazı farklılıklar vardır. Bu farklar aşağıda verilmiştir:

- No 4 (4,75 mm göz açıklıklı) elekten geçen malzeme kullanılmaktadır,
- Tokmağın düşü yüksekliği 457,2 mm'dir,
- ASTM D 698 1/30 ft³'lük bir sıkıştırma kalıbı kullanırken, USBR 5500 1/20 ft³'lük bir sıkıştırma kalıbı kullanılmaktadır.

10.2.4 BS 1377'ye göre standart sıkıştırma deneyi

BS 1377'ye göre sıkıştırma deneyi, TS 1900-1'de belirtilen yöntem ile aynıdır. Ancak, deney numunesinin 20 mm göz açıklıklı elekten elenerek deneye tâbi tutulması gerektiği belirtilmektedir.

10.3 Standart sıkıştırma deneyinin belirsizlik hesabı

10.3.1 Standart sıkıştırma deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Sıkıştırma deneyi, su içeriği ile birlikte gerçekleştirildiğinden, rastgele belirsizliğin hesaplanması için sıkıştırma deneyi ve su içeriği deneylerinin laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneylerine ihtiyaç vardır ve bu sonuçlar Çizelge 10.2'de verilmiştir.

Çizelge 10.2 - Sıkıştırma deneyi laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Laboratuvar içi				Laboratuvarlar arası	
	1. Karşılaştırma deneyleri		2. Karşılaştırma deneyleri		-	
	$\gamma_{k,mak}$ g/cm ³	W_{opt} %	$\gamma_{k,mak}$ g/cm ³	W_{opt} %	$\gamma_{k,mak}$ g/cm ³	W_{opt} %
Veri sayısı, n	20	20	9	9	38	38
En büyük	1,88	15,0	1,62	22,5	1,72	22,4
Ortanca	1,83	14,0	1,60	21,5	1,63	20,3
En Küçük	1,78	13,0	1,52	20,0	1,59	16,6
Ortalama, $\bar{x}$	1,83	14,0	1,591	21,167	1,64	20,1
Standart sapma, σ_{Std}	0,027	0,685	0,034	1,0000	0,030	1,17
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,006	0,153	0,011	0,33	0,005	0,19

Su içeriği deneyinin rastgele belirsizlik değeri (su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı) 0,002 hesaplanmıştır. Çizelge 10.2'den görüleceği en büyük kuru birim hacim ağırlık değeri ($\gamma_{k,mak}$) 0,011 ve bu değere karşı gelen optimum su içeriği değeri (W_{opt}) 0,0033 hesaplanmıştır. Emniyetli tarafta kalmak için bu iki değer biraz artırılarak aşağıda verilen değerler alınmıştır.

Kuru birim hacim ağırlık değeri için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele}(\gamma_{k,mak}) = 0,013$

Optimum su içeriği değeri (W_{opt}) için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele}(W_{opt}) = 0,004 = \% 0,4$

10.3.2 Standart sıkıştırma deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

10.3.2.1 Standart sıkıştırma eşitliğinin türevleri

Bu deneyde aşağıdaki eşitlik yardımı ile bulunan γ_k değerine karşılık bir w değeri hesaplandığından, su içeriği deneyinin belirsizlik hesabının da bulunması gereklidir. Su içeriği deneyinin belirsizlik hesabı "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" talimatında gösterildiği için gösterilmemiş, sadece kuru birim hacim ağırlık eşitliğinin kısmi türevleri gösterilmiştir. Hacim belirsizliği Madde 10.3.2.3.5'te açıklandığı için hacmi oluşturan çap ile yükseklik değerlerinin türevleri aşağıda gösterilmemiş ancak Madde 10.6'da ilave bilgi olarak verilmiştir.

$$\gamma_k = \frac{100 \left(\frac{W_2 - W_1}{V} \right)}{100 + w} = \frac{100 * (W_2 - W_1)}{(100 + w) * V}$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_1} = \frac{-100}{(100 + w) * V}$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_2} = \frac{100}{(100 + w) * V}$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial V} = \frac{-100(W_2 - W_1) * (100 + w)}{[(100 + w) * V]^2}$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial w} = \frac{-100 * (W_2 - W_1) * V}{[(100 + w) * V]^2} = \frac{-100 * (W_2 - W_1)}{(100 + w)^2 V}$$

10.3.2.2 Standart sıkıştırma deneyinin kılçık diyagramı

Standart sıkıştırma deneyinin kılçık diyagramı Şekil 10.1'de verilmiştir.

10.3.2.3 Standart sıkıştırma deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları**10.3.2.3.1 Terazî****10.3.2.3.1.1 Kalibrasyon**

Sıkıştırma deneyinde iki farklı terazi kullanılmaktadır. Sıkıştırılan numunenin tartımında SARTORIUS marka terazi, sıkıştırılan numunenin su içeriği deneyinde ise PRECISA CB 4200C marka terazi kullanılmaktadır.

SARTORIUS marka terazi ile yaklaşık 5000 g malzeme, PRECISA 4200C marka terazi ile yaklaşık 500 g malzeme tartılmaktadır. Bu terazilerin kalibrasyon sertifikalarında belirtilen toplam belirsizlikleri aşağıda verilmiştir (değerler $k = 2$ ile çarpıldığından kullanırken 2 ye bölünmelidirler):

SARTORIUS $U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm 7,15 \text{ g} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm 3,575 \text{ g}$

PRECISA CB 4200C $U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,01 + 1,09 \cdot 10^{-4} W) \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,005 + 5,45 \cdot 10^{-5} W)$

10.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

SARTORIUS $1 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 1/\sqrt{3} = 0,577$

PRECISA CB 4200C $0,01 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,01/\sqrt{3} = 0,00577$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

10.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

50 g numune için terazilerin tekrarlanabilirliğinin istatistik analizi Çizelge 10.4'te verilmiştir.

Çizelge 10.4 - Deneyde kullanılan terazilerden elde edilen belirsizlik değerleri

	SARTORIUS (5000 g malzeme)	PRECISA CB 4200C (500 g malzeme)
Ölçüm sayısı, n	9	36
Ortalama, $\bar{x}$, %	5000,1	499,758
Standart sapma, σ_{Std} , %	0,3	0,013
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$, %	0,1	0,0021

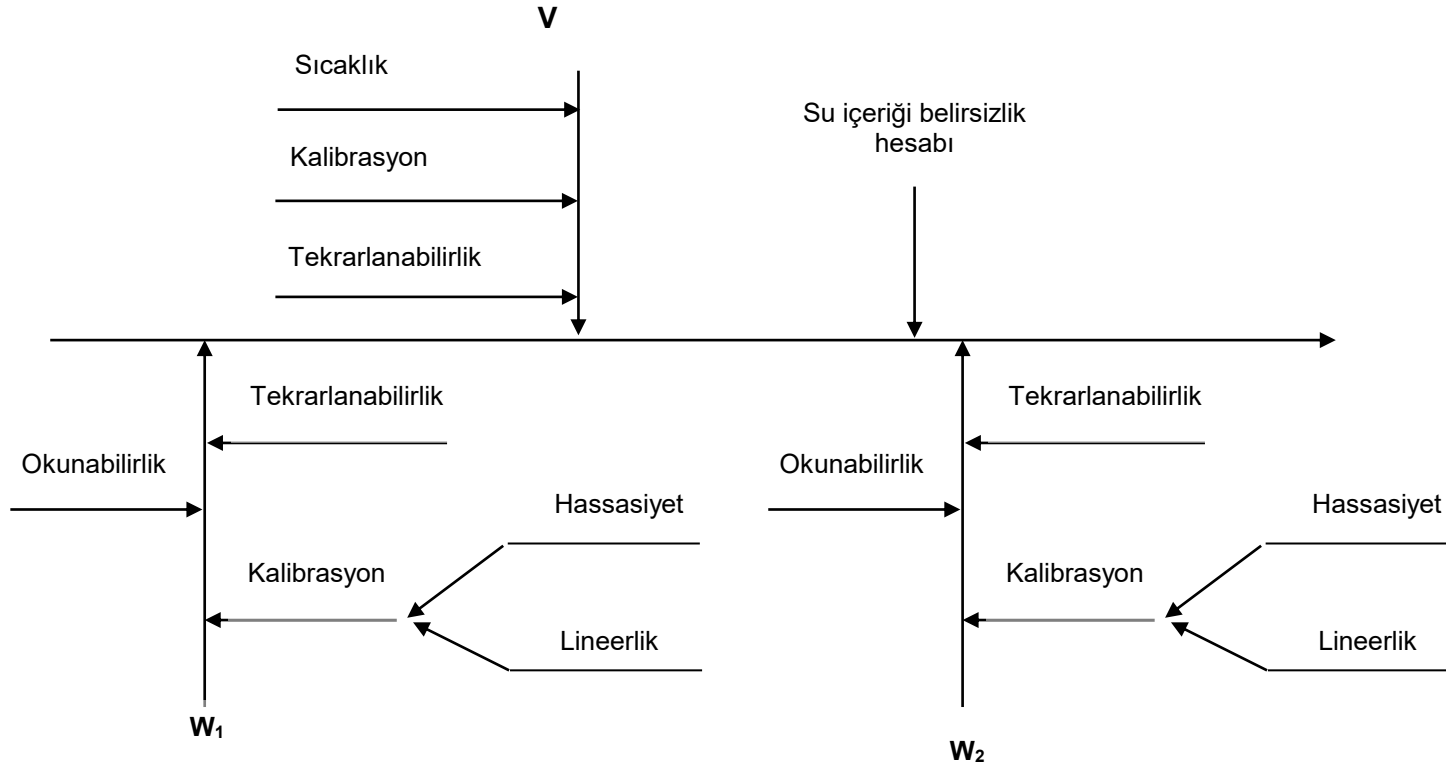
10.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

Terazinin toplam belirsizliği, $u_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$

10.3.2.3.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).



Şekil 10.1 - Sıkıştırma deneyi kılçık diyagramı

10.3.2.3.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları $(4,75 \pm 0,2)$ mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı No 4'ten büyük göz açıklığına sahip 6,3 mm göz açıklıklı elek $(6,3 \pm 0,005)$ mm ve No 4'ten küçük göz açıklığına sahip 2,5 mm göz açıklıklı elek $(2,5 \pm 0,1)$ mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmasına çalışılmıştır. Sonuçlar Çizelge 10.5'te verilmiştir.

Çizelge 10.5 - Elek göz açıklığının standart sıkıştırma deneyi üzerine etkisi

	6,3 ± 0,005	No 4 4,75 ± 0,2	2,5±0,1
Ölçüm sayısı, n	4	20	4
Ortalama, $\bar{x}$, %	1,800	1,829	1,840
Standart sapma, σ_{Std} , %	0,0071	0,0290	0,0173
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, %	0,0035	0,0065	0,0087
Fark	0,0065 - 0,035 = 0,0030		0,0065 - 0,0087 = - 0,0022

Çizelgeden de anlaşılacağı gibi sonuçlar rastgele dağılmaktadır ve birbirine çok yakındır. $(4,75 \pm 0,2)$ mm'lik eleğin belirsizliği deney üzerinde etkili olamayacağı veya olsa bile mühendislik bakımından sıfır kabul edilebileceği anlaşılmaktadır. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

10.3.2.3.4 Sıcaklık farkı

Eleklerin imal edildiği çeliğin genleşme katsayısı $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ olduğundan, 10°C 'luk bir sıcaklık farkında ve en küçük elek göz açıklığı olan 4,75 mm (No 4):

$$10^{-6} \cdot 10 \cdot 4,75 = 4,75 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

olduğundan genleşmesi ihmal edilerek **belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

10.3.2.3.5 Kalıp hacmi belirsizlik hesabı

Kullanılan çelikten yapılmış silindirik şeklindeki kalıp (molt) hacmi kalibreli kumpas ile ölçülerek bulunmuştur. Kullanılan kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir ($k = 2$ ile çarpıldığından kullanırken ikiye bölünmelidir):

$$U_{\text{Kumpas}} = \pm (0,0120 \text{ mm} + 0,00001 \cdot L \text{ mm}) \rightarrow k = 2 \text{ olduğundan}$$

$$U_{\text{Kumpas}} = \pm (0,0120 \text{ mm} + 0,00001 \cdot L \text{ mm}) / 2 \quad U = \pm (0,0060 \text{ mm} + 0,000005 \cdot L \text{ mm})$$

Cihaz kontrol kartlarından:

$$\text{Çap, } \phi_{\text{ort}} = 101,80 \text{ mm} \quad U_{\text{Kumpas}} = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 \cdot 101,80 \text{ mm}) \cong \pm 0,0065$$

$$\text{Yükseklik, } H_{\text{ort}} = 116,00 \text{ mm} \quad U_{\text{Kumpas}} = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 \cdot 116,00 \text{ mm}) \cong \pm 0,0065$$

$$\text{Silindirik şeklindeki kalıbın kesit alanı, } A = \frac{\pi \phi_{\text{ort}}^2}{4} = 8139,3 \text{ mm}^2 = 81,4 \text{ cm}^2$$

$$\text{Silindirin şeklindeki kalıbın hacmi, } V = A \cdot H_{\text{ort}} = 8139,3 \cdot 116,0 = 944155,3 \text{ mm}^3 = 944,15 \text{ cm}^3$$

$$U_V = \pm 944155,3 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,0065}{101,80}\right)^2 + \left(\frac{0,0065}{101,80}\right)^2 + \left(\frac{0,0065}{116,00}\right)^2} = \pm 100,3 \text{ mm}^3 = \pm 0,1 \text{ cm}^3$$

$$\% 95 \text{ güven aralığında } k = 2 \text{ olduğundan } kU_{\text{Toplam (V)}} = 2 \cdot 0,1 = 0,2$$

$$\text{Hacim, } V = (944,2 \pm 0,2) \text{ cm}^3$$

10.3.2.3.4 Standart sıkıştırma deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliklerin toplamı, su içeriği ile kuru birim hacim ağırlık için ayrı ayrı olarak aşağıda verilmiştir:

$$W_{opt} \quad U_{Sistematik (W_{opt})} = \left[\left(\frac{\partial W}{\partial W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial W_3} * u_3 \right)^2 \right]^{0,5}$$

$$\gamma_k \text{ değeri} \quad U_{Sistematik (\gamma_{k,mak})} = \left[\left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial V} * u_3 \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial W} * u_4 \right)^2 \right]^{0,5}$$

10.3.3 Standart sıkıştırma deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, su içeriği ile kuru birim hacim ağırlık için ayrı ayrı olarak aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmalıdır:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

10.4 Standart sıkıştırma deneyinin çözümlü örneği

Standart sıkıştırma deneyi su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık deneylerinden oluştuğu için, her birinin çözümlü belirsizlik hesabı ayrı ayrı aşağıda anlatılmıştır.

10.4.1 Su içeriği değerinin çözümlü örneği**10.4.1.1 Su içeriği deneyinden elde edilen veriler**

Sıkıştırma deneyinde, ağırlığı 1975 g ve hacmi 944 cm³ olan sıkıştırma kalıbı kullanılarak Çizelge 10.6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Deney numunesinin bağıl yoğunlu (2,68 ± 0,02) dir (bu değer deney belirsizliğine doğrudan bir etkisi olmayacaktır sadece numunedeki hava oranlarını çizmeye yarayacaktır).

Çizelge 10.6 - Standart sıkıştırma deneyinden elde edilen veriler

	1	2	3	4	5	6
Sıkıştırılmış numune + kap ağırlığı, g	3750	3855	3930	3915	3845	3810
Kap ağırlığı, g	1975	1975	1975	1975	1975	1975
Yaş numune + kap ağırlığı, g	259,1	271,8	257,6	272,4	265,5	263,8
Kuru numune + kap ağırlığı, g	240,3	248,1	230,9	240,2	228,6	221,2
Kap ağırlığı, g	52,0	51,0	44,0	52,1	45,6	44,8

10.4.1.2 Su içeriği deneyinin hesaplamaları**10.4.1.2.1 Su içeriği**

Su içeriği değerleri Çizelge 10.7'de verilmiştir.

Çizelge 10.7 - Standart sıkıştırma deneyinde su içeriği değerleri

	1	2	3	4	5	6
Kap No	96	17	1	51	82	54
Yaş numune + kap ağırlığı, g	259,1	271,8	257,6	272,4	265,5	263,8
Kuru numune + kap ağırlığı, g	240,3	248,1	230,9	240,2	228,6	221,2
Su ağırlığı, g	18,8	23,7	26,7	32,2	36,9	42,6
Kap ağırlığı, g	52,0	51,0	44,0	52,1	45,6	44,8
Kuru numune ağırlığı, g	188,3	197,1	186,9	188,1	183,0	176,4
Su içeriği, %	10,0	12,0	14,3	17,1	20,2	24,1

10.4.1.2.2 Su içeriğinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele (Wopt)}} = 0,004$ (karşılaştırma deneylerinden)

10.4.1.2.3 Su içeriğinin sistematik belirsizliği

Su içeriği belirsizlik hesabı, “Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı” nda belirtilen yöntem ile aynı olduğundan, elde edilen sistematik belirsizlik sonuçları Çizelge 10.8’de verilmiştir.

10.4.1.2.4 Su içeriğinin toplam belirsizliği

Su içeriği belirsizlik hesabı, “Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı” nda belirtilen yöntem ile aynı olduğundan, elde edilen toplam belirsizlik sonuçları Çizelge 10.8’de verilmiştir.

Çizelge 10.8 - Su içeriği deneyinin belirsizlik hesabı

	1. Deney	2. Deney	2. Deney	4. Deney	5. Deney	6. Deney
$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$	0,0998	0,1202	0,1429	0,1712	0,2016	0,2415
$U_{\text{Rastgele (w)}}$	0,004					
$U_{\text{Sistematik (w)}}$	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00016	0,00016
$U_{\text{Toplam (w)}}$	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040
k	2					
$kU_{\text{Toplam (w)}}$	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080

10.4.1.3 Sonuçların gösterilmesi

Su içeriği deneyinin analiz sonuçları Çizelge 10.9’da verilmiştir.

Çizelge 10.9 - Su içeriği deneyinin hesap sonuçları

	1. Deney	2. Deney	2. Deney	4. Deney	5. Deney	6. Deney
w (%)	10,0	12,0	14,3	17,1	20,2	24,2
$U_{\text{Toplam (%)}}$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

10.4.2 Kuru birim hacim ağırlık deneyinin çözümlü örneği

10.4.2.1 Kuru birim hacim ağırlık deneyinden elde edilen veriler

Sıkıştırma deneyinde, ağırlığı 1975 g ve hacmi 944 cm³ olan sıkıştırma kalıbı kullanılarak Çizelge 10.6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Aşağıda sadece ilk deney numunesinin belirsizlik hesabı gösterilmiştir. Diğerleri de benzer şekilde yapılmış ve Çizelge 10.10'da gösterilmiştir.

10.4.2.2 Kuru birim hacim ağırlık deneyinin hesaplamaları

10.4.2.2.1 Kuru birim hacim ağırlık

$$\gamma_k = \frac{100 \left(\frac{W_2 - W_1}{V} \right)}{100 + w} = \frac{100 * (W_2 - W_1)}{(100 + w) * V} = \frac{100 \left(\frac{3750 - 1975}{944,3} \right)}{100 + 9,98} = 1,709 \text{ g/cm}^3$$

10.4.2.2.2 Kuru birim hacim ağırlık deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}} (\gamma_{k,\text{mak}}) = 0,013$ (karşılaştırma deneylerinden)

10.4.2.2.3 Kuru birim hacim ağırlık deneyinin sistematik belirsizliği

Kuru birim hacim ağırlık sadece ilk deney numunesi için hesaplanmış, diğerleri için Çizelge 10.10'da gösterilmiştir.

SARTORIUS marka terazinin kalibrasyon sertifikasında verilen toplam belirsizlik sabit bir değer olduğundan (ölçülen ağırlıklara göre değişmiyor), belirsizlik miktarları tüm deneyler için aynıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Terazinin toplam belirsizliği, } u_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

$$u_i = \{ [3,575]^2 + (1/\sqrt{3})^2 + (0,1)^2 \}^{1/2} = [12,78 + 0,33 + 0,01]^{1/2} \cong [13,12]^{1/2} = 3,622$$

Diğer bir deyişle belirsizlik W_1 ve W_2 için belirsizlik değeri $\pm 3,622$ dir.

$$V = (944,3 \pm 0,1) \text{ cm}^3$$

$$w = (0,0998 \pm 0,008) = \% (9,98 \pm 0,80)$$

Not - Hesaplamalarda w % olarak kullanıldığı için u_w de % olarak kullanılmıştır.

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_1} = \frac{-100}{(100 + w) * V} = \frac{-100}{(100 + 9,98) * 944,2} = -0,000963$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_2} = \frac{100}{(100 + w) * V} = \frac{100}{(100 + 9,98) * 944,2} = 0,000963$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial V} = \frac{-100 * (W_2 - W_1) * (100 + w)}{[(100 + w) * V]^2} = \frac{-100 * (3750 - 1975) * (100 + 9,98)}{[(100 + 9,98) * 944,2]^2} = -0,00181$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial w} = \frac{-100 * (W_2 - W_1) * V}{[(100 + w) * V]^2} = \frac{-100 * (W_2 - W_1)}{(100 + w)^2 V} = \frac{-100 * (3750 - 1975)}{(100 + 9,98)^2 * 944,2} = -0,01554$$

$$U_{\text{Sistematik}}(\gamma_{k,\text{mak}}) = \left[\left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_1} * u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_2} * u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial V} * u_3 \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial w} * u_4 \right)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik}}(\gamma_{k,\text{mak}}) = \left[(-0,000963 * 3,622)^2 + (0,000963 * 3,622)^2 + (-0,00181 * 0,1)^2 + (-0,0155 * 0,4)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik}}(\gamma_{k,\text{mak}}) = \left[(1,217 + 1,217 + 0,0033 + 3,844) * 10^{-5} \right]^{0,5} \cong \left[6,2813,75 * 10^{-5} \right]^{0,5} = 0,0079 \cong 0,008$$

10.4.2.2.4 Kuru birim hacim ağırlık deneyinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,013 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,008

Deneyin toplam belirsizliği, $U_{\text{Toplam}} = \left[(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2 \right]^{0,5}$

$$= \left[(0,013)^2 + (0,008)^2 \right]^{0,5} = 0,0152$$

10.4.2.3 Kuru birim hacim ağırlık deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam}}(\gamma_{k,\text{mak}}) = 2 * 0,0152 \cong 0,0304 = 0,030$

$$\gamma_k = (1,709 \pm 0,030) \text{ g/cm}^3 = (1,71 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$$

Diğer hesaplamalar Çizelge 10.10'da verilmiştir.

Diğer deneylerin kuru birim hacim ağırlık ve belirsizlik miktarları özet olarak Çizelge 10.11'de verilmiştir.

Çizelge 10.10 - Kuru birim hacim ağırlık deneyinin belirsizlik hesabı

	1. Deney	2. Deney	2. Deney	4. Deney	5. Deney	6. Deney
$\gamma_k = \frac{100 \left(\frac{W_2 - W_1}{V} \right)}{100 + w}$	1,709	1,777	1,812	1,754	1,648	1,565
$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_1} = \frac{-100}{(100 + w) * V}$	-0,00096	-0,00095	-0,00093	-0,00090	-0,00088	-0,00085
$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_2} = \frac{100}{(100 + w) * V}$	0,00096	0,00095	0,00093	0,00090	0,00088	0,000853
$\frac{\partial \gamma_k}{\partial V} = \frac{-100 * (W_2 - W_1) * (100 + w)}{[(100 + w) * V]^2}$	-0,00181	-0,00188	-0,00192	-0,00186	-0,00175	-0,00166
$\frac{\partial \gamma_k}{\partial w} = \frac{-100 * (W_2 - W_1) * V}{[(100 + w) * V]^2}$	-0,01554	-0,01587	-0,01585	-0,01498	-0,01372	-0,01261
$U_{\text{Rastgele}}(\gamma)$	0,013					
u_{W1}	3,622	3,622	3,622	3,622	3,622	3,622
u_{W2}	3,622	3,622	3,622	3,622	3,622	3,622
u_V	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
u_w	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$U_{\text{Sistematik}}(\gamma)$	0,00794	0,00799	0,00793	0,00758	0,00711	0,00668
$U_{\text{Toplam}}(\gamma)$	0,0152	0,0153	0,0152	0,0150	0,0148	0,0146
k	2					
$k U_{\text{Toplam}}(\gamma)$	0,030	0,031	0,030	0,030	0,030	0,029

Çizelge 10.11 - Kuru birim hacim ağırlık deneyinin belirsizlik hesabı özeti

	1. Deney	2. Deney	2. Deney	4. Deney	5. Deney	6. Deney
γ_k (g/cm ³)	1,71	1,78	1,81	1,75	1,65	1,57
$U_{\text{Toplam}} (\pm)$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

En büyük kuru birim hacim ağırlık değerini seçerken aşağıdaki hususlar göz önüne alınmalıdır:

- En büyük kuru birim ağırlık değerlerine karşılık su içeriği değerleri çizilerek eğrinin tepe noktası bulunur,
- En büyük kuru birim ağırlık hesaplanan 5 nokta üzerinde herhangi birine yakın ise, o nokta ve belirsizlik miktarı sıkıştırma deneyinin sonucu olarak alınır,
- Hesaplanan 2 nokta arasında ise, o iki noktanın ortalaması sıkıştırma değeri olarak alınır. Aynı şekilde o iki noktadaki sıkıştırma değerinin belirsizliği ise, belirsizliklerinin ortalamasıdır.

Örneğimizde en büyük kuru birim ağırlığı ve buna karşılık gelen su içeriği değeri (% 95 güven aralığında):

$$\gamma_{k,\text{mak}} = (1,81 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$$

$$W_{\text{opt}} = \% (14,3 \pm 0,8)$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

Standart sıkıştırma deneyinden elde edilen değerler Şekil 10.2'de verilmiştir.

SIKIŞTIRMA (*)

Numune no	-	Deney başlama tarihi	08.05.2007
Kuyu/sondaj no	-	Deney bitiş tarihi	09.05.2007
Deney standardı	TS 1900-1		

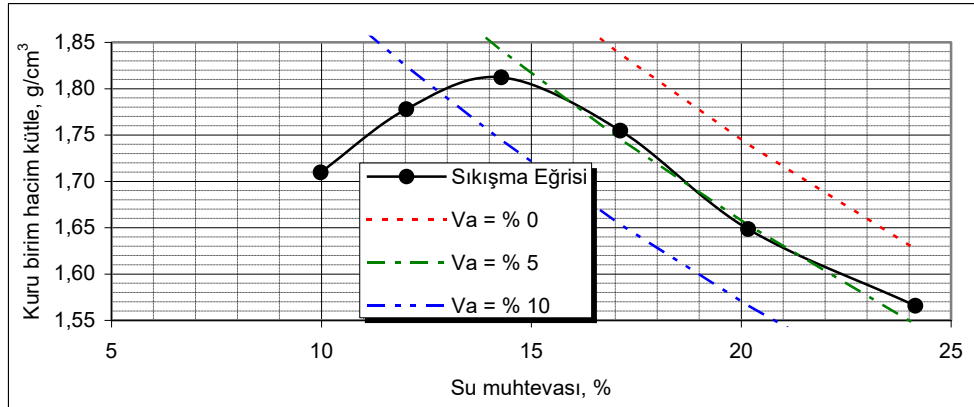
Kalıp kütlesi, g	1975	Bağıl yoğunluk	2,68
Kalıbın hacmi, cm ³	944		

Kuru birim hacim kütle, γ_k , g/cm³

	1	2	3	4	5	6
Sıkıştırılmış numune + kap kütlesi, g	3750	3855	3930	3915	3845	3810
Kap kütlesi, g	1975	1975	1975	1975	1975	1975
Sıkıştırılmış numune kütlesi, g	1775	1880	1955	1940	1870	1835
Yaş birim hacim kütle, g/cm ³	1,88	1,99	2,07	2,06	1,98	1,94
Kuru birim hacim kütle, g/cm ³	1,71	1,78	1,81	1,75	1,65	1,57
Belirsizlik	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Su muhtevası, w_n , %

	1	2	3	4	5	6
Kap No	96	17	1	51	82	54
Yaş numune + kap kütlesi, g	259,1	271,8	257,6	272,4	265,5	263,8
Kuru numune + kap kütlesi, g	240,3	248,1	230,9	240,2	228,6	221,2
Su kütlesi, g	18,8	23,7	26,7	32,2	36,9	42,6
Kap kütlesi, g	52,0	51,0	44,0	52,1	45,6	44,8
Kuru numune kütlesi, g	188,3	197,1	186,9	188,1	183,0	176,4
Su muhtevası, %	10,0	12,0	14,3	17,1	20,2	24,1
Belirsizlik	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8



$\gamma_{k, maks}$, g/cm ³	1,81	Tokmak ağırlığı, kg	2,5
Belirsizlik	0,03	Elek göz açıklığı, mm	4,75
W_{opt} , %	14,2	Kalıp çapı, mm	101,8
Belirsizlik (%)	0,8	Kalıp yüksekliği, mm	116,0
19 mm lik elekten kalan, %	0,0	Not	Tek numune

Şekil 10.2 - Sıkıştırma deneyinden elde edilen verilerin gösterilmesi

10.5 İlgili standartlar

ASTM D 698: 2000a. Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (600 kN-m/m³), Vol. 04.08.

ASTM D 4718-87: 2001. Standard practice for Correction of unit weight and water content for soils containing oversize particles, Vol. 04.08.

BS 1377; Part 4: 1990. Soils for civil engineering purposes, compaction related tests, 3.3 Method using 2,5 kg rammer for soils with particles up to medium gravel size, page 5.

TS 1900-1: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.2.1 Deney 7: Zeminde kuru birim hacim ağırlık - su içeriği bağıntısının 2,5 kilogramlık tokmakla elde edilmesi (standart enerji).

USBR 5500: 1989. Procedure for performing laboratory compaction of soils - 5,5 lbm rammer and 18 in drop, Vol. 2.

10.6 Çap ile yüksekliğin türevleri kullanılarak hesaplama

$$\gamma_k = \frac{100 \left(\frac{W_2 - W_1}{V} \right)}{100 + w} = \frac{100 * (W_2 - W_1)}{(100 + w) * V} = \frac{100 * (W_2 - W_1)}{(100 + w) \frac{\pi D^2}{4} \frac{H}{1000}} \Rightarrow \gamma_k = \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w) * D^2 * H}$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_1} = - \frac{400.000}{\pi} \frac{1}{(100 + w) * D^2 * H}$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_2} = \frac{400.000}{\pi} \frac{1}{(100 + w) * D^2 * H}$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial D} = \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w) * H} \left(\frac{-2}{D^3} \right)$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial H} = \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w) * D^2} \left(\frac{-1}{H^2} \right)$$

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial w} = - \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w)^2 * D^2 * H} \quad \left[\gamma_k = \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{D^2 H} \frac{1}{(100 + w)} \right]$$

$$\text{Çap, } \phi_{\text{ort}} = 101,80 \text{ mm} \quad u_{\text{kumpas}} = u_D = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 * 101,80 \text{ mm}) \cong \pm 0,0065$$

$$\text{Yükseklik, } H_{\text{ort}} = 116,00 \text{ mm} \quad u_{\text{kumpas}} = u_H = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 * 116,00 \text{ mm}) \cong \pm 0,0065$$

1	Deneyler İçin Gerekli Cihazlar	Terazi		Kumpas					
A)	Kalibrasyon sertifikasındaki belirsizlik ve birimi	gram		mm					
a)	Kaç defa hesaplamalara katıldığı	1		1					
b)	A	3,575		0,006					
c)	B x	0		0,000005					
B)	Çözünürlük	1		0					
C)	Tekrarlanabilirlik (s / Karekök (n))	0,1		0					
D)	Kayma (Drift)	0		0					
E)	Dış Etken	0		0					
F)	Diğer	0		0					
2	Değişken ve değeri	W ₁	W ₂	w	D	H	u _w		
3	Deneyde kullanılan bağıntı	1975	3750	9,98	101,8	116,0	0,4		
A)	Bağıntının türevi	$\gamma_k = \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w) * D^2 * H}$			1,709391666				
B)	Bağıntının türevi	$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_1} = - \frac{400.000}{\pi} \frac{1}{(100 + w) * D^2 * H}$			-0,000963038		u _i	3,62270042	
C)	Bağıntının türevi	$\frac{\partial \gamma_k}{\partial W_2} = \frac{400.000}{\pi} \frac{1}{(100 + w) * D^2 * H}$			0,000963038		u _i	3,62270042	
D)	Bağıntının türevi	$\frac{\partial \gamma_k}{\partial D} = \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w) * H} (\frac{-2}{D^3})$			-0,033583333		u _i	0,006509	
E)	Bağıntının türevi	$\frac{\partial \gamma_k}{\partial H} = \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w) * D^2} (\frac{-1}{H^2})$			-0,014736135		u _i	0,00658	
F)	Bağıntının türevi	$\frac{\partial \gamma_k}{\partial w} = - \frac{400.000}{\pi} \frac{(W_2 - W_1)}{(100 + w)^2 * D^2 * H}$			-0,01554275		u _i	0,4	
4	Toplam B tipi belirsizlik	0,007940587		Toplam A tipi belirsizlik	0,013	Toplam		0,015233283	
5	Geniştirilmiş belirsizlik, k=2	0,030466567		Bağıl belirsizlik, %	1,78				

11 Şişme yüzdesi deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

11.1 Kapsam

Bu talimatta TS 1900-2/T1, ASTM D 4546 (Yöntem A), BS 1377 (Madde 4.4) ve USBR 5705'e göre şişme yüzdesi deneyi anlatılmaktadır.

Bu deney ile örselenmiş veya örselenmemiş bir zemin numunesinin suya boğulduktan sonraki şişme/oturma yüzdesi bulunur.

11.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

11.2.1 TS 1900-2/T1'e göre şişme yüzdesi deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.8.1 Şişme yüzdesi deneyine göre yapılmaktadır.

Bu deney ile örselenmiş veya örselenmemiş bir zemin numunesinin en az 1 kPa basınç altında suya boğulduktan sonraki tek yönlü şişme - oturma yüzdesi bulunur.

11.2.1.1 Gerekli araçlar

Şişme basıncı ve yüzdesi aleti, Tek yönlü konsolidasyon deneyinde belirtilene benzer,

Deney halkası (kalıbı),

Etüv, sürekli olarak (105 ± 10) °C doğrulukla sıcaklık sağlayabilen,

Komparatör saati, en az 0,004 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Kronometre, en az 0,1 s doğrulukla ölçme yapabilen,

Ağırlıklar,

Gözenekli disk,

Süzgeç kâğıdı,

Elek, 4,75 mm göz açıklıklı (No 4) göz açıklıklı,

Numune sıkıştırma cihazları,

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

Kumpas, 0,01 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune tıraşlama cihazları,

Damıtık su.

11.2.1.2 Deneyin yapılışı

Deney halkasındaki numunenin yükseklik çap oranı 1:2,5 ilâ 1:3,5 olmalıdır.

Örselenmiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için çeyreklemeye yoluyla elde edilen temsili numune 4,75 mm göz açıklıklı elekten elenir. Deney numunesi, halkaya istenilen sıklığa ve su içeriğine göre Madde 2.3'ye göre hazırlanır.

Örselenmemiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için deney numunesi, blok veya tüp içerisinde laboratuvara getirilen numuneden Madde 2.4'e göre tıraşlanarak deney halkasına yerleştirilir.

Sıkıştırma (veya yerleştirme) işleminden sonra, kalıbın içindeki numunenin yüksekliği ölçülür (H_0) ve kaydedilir.

Kalıp ile numune ağırlığı tartılıp kaydedilir. Numunenin altına kuru filtre kâğıdı (isteğe bağlı) ve havada kurumuş gözenekli disk konularak hücreye yerleştirilir. Numune, hücresiyle birlikte şişme deney aletine bağlanır.

Deneye hemen başlanmayacaksa, numuneden, buharlaşmayı önlemek için üzeri örtülmelidir.

Numunenin üzerinde en az 1 kPa'lık basınç değeri olmalıdır (genelde gözenekli disk ve numune üzerindeki ağırlıklar bu değeri sağlarlar). Komparatör sıfırlanır ve numunenin üzerini örtecek kadar damıtık su eklenir.

Şişme - oturma değerleri yaklaşık 0,1, 0,3, 0,5, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 120, 240, 480, 1440, 2880, ... dakikalarda okunarak kaydedilir.

Okuma değeri ile bir önceki okunan değer arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar az (ana şişme tamamlanmış) ise, deney durdurulur. En son okunan değer, şişme - oturma değeri ΔH 'dir.

Şişme tamamlandıktan sonra tek yönlü konsolidasyon deneyi (isteğe bağlı olarak), ilk numune yüksekliğine ulaşıncaya kadar, Madde 18.2.1.3'te verilen yükleme sırasıyla (12,5; 25 50; 100; 200; 400; 800; 1600; 3200 kPa) basınç uygulanır. Aynı şekilde, Madde 18.2.1.3'te belirtilen şartlarda deneye devam edilir.

Deney sonunda numune aletten çıkarılır ve yaş numune ile kalıp ağırlığı tartılır. İstenirse, numune (105 ± 10) °C'luk etüvde 24 saat kurutulur. Etüvden çıkarılan numune ile kalıp uygun ortamda soğutularak tartılır.

Deneyden elde edilen veriler "Şişme deneyleri formu" na kaydedilir.

11.2.1.3 Hesaplamalar

Şişme yüzdesi aşağıdaki eşitliklerden birisi kullanılarak hesap edilir:

$$\frac{\Delta H}{H_0} \times 100 = \left(\frac{e - e_0}{1 + e_0} \right) \times 100 = \left(\frac{\gamma_{kuru,0}}{\gamma_{kuru}} - 1 \right) \times 100$$

Burada;

H_0 İlk numune yüksekliği,

ΔH Deney sonunda şişme - oturma miktarı,

e Deney sonu boşluk oranı,

e_0 Deney başlangıcı boşluk oranı,

γ_{kuru} Deney sonu kuru birim ağırlık,

$\gamma_{kuru,0}$ Deney başlangıcı kuru birim ağırlık

tır.

11.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Deneyin başlangıcındaki numunenin maruz kaldığı basınç kg/cm^2 olarak en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak veya kPa olarak en yakın 1 hanesine yuvarlatılarak,
- En yakın 0,1 hanesinde yuvarlatılarak hesap edilmiş şişme yüzdesi değeri,
- Her bir basınç kademesinde şişme - oturma değeri (şişme yüzdesi deneyini takiben tek yönlü konsolidasyon deneyi yapılmışsa),
- İstenirse, sonuçlar, zaman logaritmik olarak yatay eksene, deformasyonlar ise, milimetrik olarak düşey eksene çizilir.

11.2.2 ASTM D 4546 Yöntem A'ya göre şişme yüzdesi deneyi talimatı

ASTM D 4546 Yöntem A'ya göre şişme yüzdesi deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır.

11.2.3 USBR 5705'e göre şişme yüzdesi deneyi talimatı

USBR 5705'e göre şişme yüzdesi deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır.

11.2.4 BS 1377 Madde 4.4'e göre şişme yüzdesi deneyi talimatı

BS 1377 Madde 4.4'e göre şişme yüzdesi deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır.

11.3 Şişme yüzdesi deneyinin belirsizlik hesabı**11.3.1 Şişme yüzdesi deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Şişme yüzdesi deneyleri ile ilgili yapılan karşılaştırma deneyleri Çizelge 11.1'de verilmiştir.

Çizelge 11.1 - Laboratuvar içi karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Şişme Yüzdesi
Veri sayısı, n	5
En büyük, %	4,33
Ortanca, %	4,20
En küçük, %	3,71
Ortalama, %, $\bar{x}$	4,14
Standart sapma, σ_{Std} , %	0,25
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$, %	0,11

Şişme yüzdesi deneyi için toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele (SY)}} = \% 0,11$

11.3.2 Şişme yüzdesi deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

11.3.2.1 Şişme yüzdesi eşitliğinin türevleri

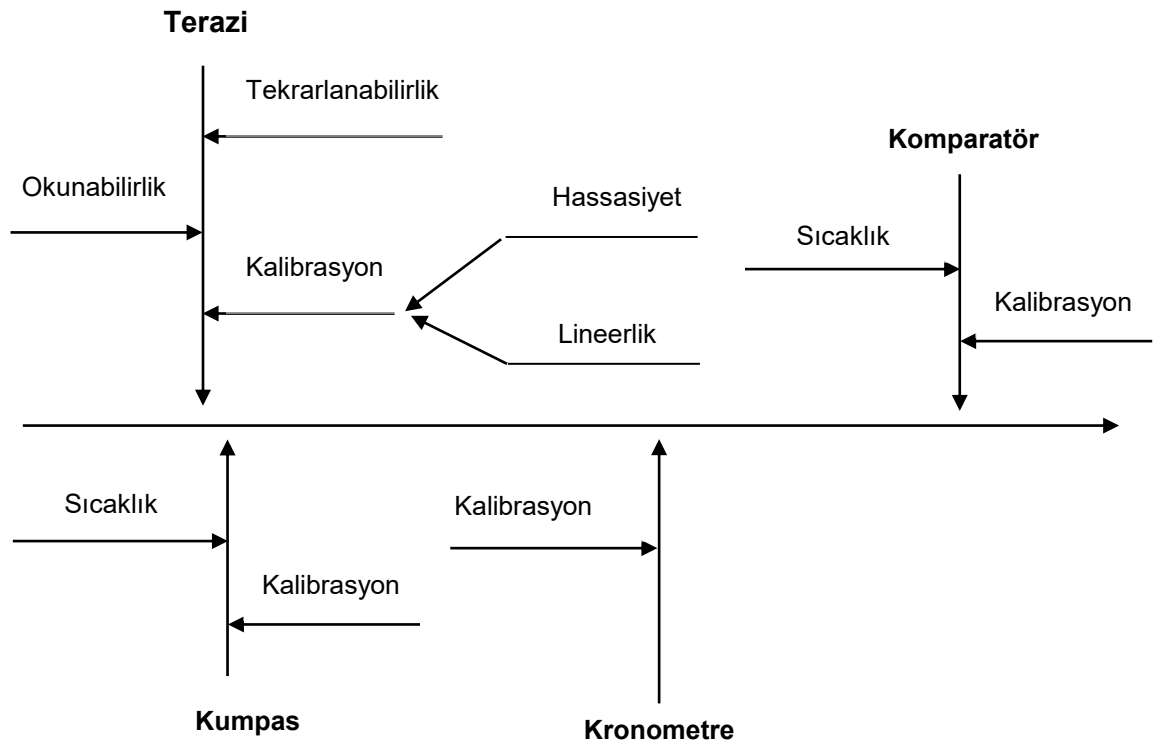
$$SY = \frac{\Delta H}{H_0} * 100$$

$$\frac{\partial(SY)}{\partial \Delta H} = \frac{100}{H_0}$$

$$\frac{\partial(SY)}{\partial H_0} = - \frac{100 \Delta H}{H_0^2}$$

11.3.2.2 Şişme yüzdesi deneyinin kılçık diyagramı

Şişme yüzdesi deneyinin kılçık diyagramı Şekil 11.1'de verilmiştir.



Şekil 11.1 - Şişme yüzdesi deneyinin kılçık diyagramı

11.3.2.3 Şişme yüzdesi deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

11.3.2.3.1 Terazi

11.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Şişme yüzdesi deneyinde CHYO MP-3000 marka terazi kullanılmaktadır. Terazinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$CHYO MP-3000 \quad U_{Kalibrasyon} = \pm (0,02 + 1,7 \cdot 10^{-4} W) \text{ g} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{Kalibrasyon} = \pm (0,01 + 8,5 \cdot 10^{-5} W) \text{ g}$$

11.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$CHYO MP-3000 \text{ için} \quad 0,01 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,01 / \sqrt{3} = 0,00577$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

11.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

CHYO MP-3000 model terazide 100 g ağırlığındaki zemin numunesi tartılmaktadır. İstatistiki analizi Çizelge 11.2'de verilmiştir.

Çizelge 11.2 - Deneyde kullanılan terazinin elde edilen belirsizlik değerleri

	CHYO MP-3000
Ölçüm sayısı, n	37
Ortalama, $\bar{x}$	99,57
Standart sapma, σ_{Std}	0,02
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,0037

11.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$U_{Terazi} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

11.3.2.3.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

11.3.2.3.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları $(2,5 \pm 0,1)$ mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı $2,5$ mm'den büyük göz açıklığına sahip $(4,75 \pm 0,2)$ mm ve $2,5$ mm'den küçük göz açıklığına sahip $(6 \pm 0,005)$ mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmasına çalışılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki Çizelge 11.3'te verilmiştir.

Çizelge 11.3 - Elek göz açıklığının şişme yüzdesi deneyi üzerine etkisi

	2,5 ± 0,1	No 4 4,75 ± 0,2	6 ± 0,005
Ölçüm sayısı, n	5	5	5
Ortalama, $\bar{x}$	0,69	0,61	0,68
Standart sapma, σ_{Std}	0,020	0,067	0,024
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,009	0,030	0,011
Fark			

Çizelge 11.3'ten de anlaşılacağı gibi sonuçlar rastgele dağılmaktadır $(4,75 \pm 0,2)$ elek üzerinde herhangi bir belirsizliği yoktur. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

11.3.2.3.3 Kumpas

Numune çapı ve yüksekliği her deney öncesi ölçülmektedir. Ancak hesaplarda çap olduğu için belirsizlikte çap değeri kullanılmıştır. Kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

MITUTOYO (0-150 mm)

$$U_{Kumpas} = \pm (0,0143 \text{ mm} + 0,00001 \cdot L \text{ mm}) \rightarrow k = 2$$

$$U_{Kumpas} = \pm (0,00715 \text{ mm} + 0,000005 \cdot L \text{ mm}) = \pm (0,000715 \text{ cm} + 0,0000005 \cdot L \text{ cm})$$

11.3.2.3.4 Komparatör saati

Deneyde kullanılan komparatör saatinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{MITUTOYO (0-25,4 mm)} \quad U_{Komparatör} = \pm 5 \text{ } \mu\text{m} = \pm 0,005 \text{ mm} \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{Komparatör} = 0,005 / 2 = 0,0025$$

11.3.2.3.5 Kronometre

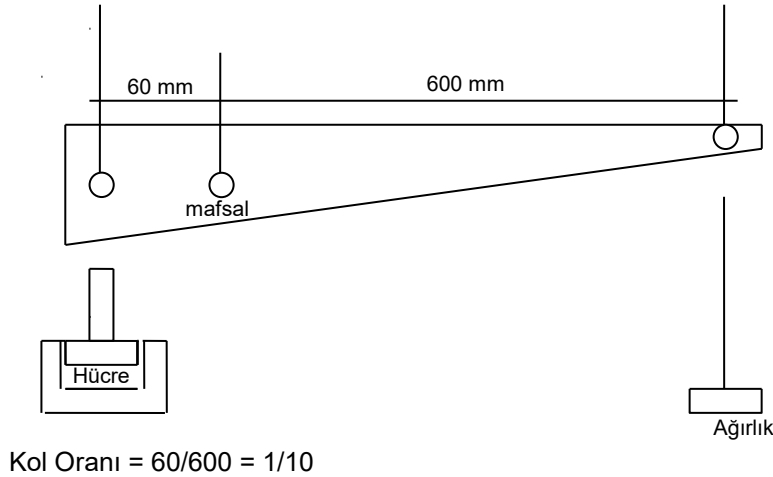
Deneyde kullanılan kronometrenin kalibrasyon sertifikasında belirtilen belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$U_{\text{Kronometre}} = \pm 0,5 \text{ s} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kronometre}} = 0,5 / 2 = 0,25$$

11.3.2.3.6 Kol oranı

Şişme yüzdesi aletinin yapıldığı frezenin okunabilirliği 0,02 mm (1/50) olduğundan ve freze kalibresi olmadığından, belirsizlik olarak frezenin belirsizliği alınmıştır. Kol oranı Şekil 11.2'de gösterilmiştir.

$$U_{\text{Kol}} = 0,02 \text{ mm} = 0,002 \text{ cm}$$



Şekil 11.2 - Şişme yüzdesi deneyinde kol oranı

11.3.2.4 Sistemik belirsizliklerin toplamı

Şişme yüzdesi deneyinin sistemik belirsizliklerin toplamı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$U_{\text{Sistemik (SY)}} = \left[\left(\frac{\partial SY}{\partial \Delta H} u_{\Delta H} \right)^2 + \left(\frac{\partial SY}{\partial H_0} u_{H_0} \right)^2 \right]^{0,5}$$

11.3.3 Şişme yüzdesi deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistemik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistemik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

11.4 Şişme yüzdesi deneyinin çözümlü örneği

11.4.1 Şişme yüzdesi deneyinden elde edilen veriler

Şişme deneyinde elde edilen veriler Çizelge 11.4'te verilmiştir ($G_s = 2,55$).

Çizelge 11.4 - Şişme yüzdesi deneyinden elde edilen veriler

Ring no	1	Ring kesit alanı (cm ²)	20,109
Ring ağırlığı (g)	40,1	Ring hacmi (cm ³)	34,477
Ring çapı (mm)	50,6	Numune başlangıç yüksekliği (mm)	17,145

	Deney öncesi	Deney sonrası	Zaman Dakika	Okuma değeri	Kabarma mm	Şişme %
Ring + yaş numune ağırlığı (g)	106,2	109,3	1		0,180	1,05
Ring + kuru numune ağırlığı (g)	96,4	96,4	2		0,270	1,57
Su ağırlığı (g)	9,8	12,9	10		0,460	2,68
Kuru numune ağırlığı (g)	56,3	56,3	30		0,530	3,09
Su içeriği (%)	17,4	22,9	60		0,580	3,38
Yaş birim hacim ağırlık (g/cm ³)	1,92	1,94	180		0,600	3,50
Kuru birim hacim ağırlık (g/cm ³)	1,63	1,58	360		0,610	3,56
Not:			1440		0,617	3,60
			2880		0,623	3,63

11.4.2 Şişme yüzdesi deneyinin hesaplamaları**11.4.2.1 Şişme yüzdesi****11.4.2.1.1 Eşitlik 1**

$$SY = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 = \left(\frac{e - e_0}{1 + e_0} \right) \times 100 = \left(\frac{\gamma_{kuru,0}}{\gamma_{kuru}} - 1 \right) \times 100$$

$$SY = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 = \frac{0,623}{17,145} \times 100 = \% 3,63$$

11.4.2.1.2 Eşitlik 2

$$e_0 = G_s (1 + w_n) / \gamma_n = 2,55 (1 + 0,174) / 1,92 = 0,562$$

$$e = G_s (1 + w_n) / \gamma_n = 2,55 (1 + 0,229) / 1,94 = 0,618$$

$$\text{Şişme yüzdesi} = \frac{e - e_0}{1 + e_0} = \frac{0,618 - 0,562}{1 + 0,618} = \% 3,63$$

Not - Rakamların yuvarlatılmasından dolayı rakamlar değişebilir

11.4.2.1.3 Eşitlik 3

$$\gamma_{kuru,0} = 1,63 \text{ g/cm}^3 \text{ (Çizelge 11.4'ten)}$$

$$\gamma_{kuru} = 1,58 \text{ g/cm}^3 \text{ (Çizelge 11.4'ten)}$$

$$\text{Şişme yüzdesi} = \frac{\gamma_{kuru,0}}{\gamma_{kuru}} - 1 = \frac{1,63}{1,58} - 1 = \% 3,63$$

Not - Rakamların yuvarlatılmasından dolayı rakamlar değişebilir

11.4.2.2 Şişme yüzdesi deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}}(SY) = 0,11$ (karşılaştırma deneylerinden)

11.4.2.3 Şişme yüzdesi deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial(SY)}{\partial \Delta H} = \frac{100}{H_0} = \frac{100}{17,145} = 5,833$$

$$\frac{\partial(SY)}{\partial H_0} = -\frac{100 \Delta H}{H_0^2} = -\frac{100 * 0,623}{17,145^2} = -0,212$$

$$U_{\text{Sistemik (SY)}} = \left[\left(\frac{\partial(SY)}{\partial \Delta H} u_{\text{Komparatör}} \right)^2 + \left(\frac{\partial(SY)}{\partial H_0} u_{\text{Komparatör}} \right)^2 \right]^{0,5} = \left[(5,833 * 0,0025)^2 + (-0,212 * 0,0025)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistemik (SY)}} = 0,015$$

11.4.2.4 Şişme yüzdesi deneyinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,11 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,015

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(0,11)^2 + (0,015)^2]^{0,5} = 0,00202 \end{aligned}$$

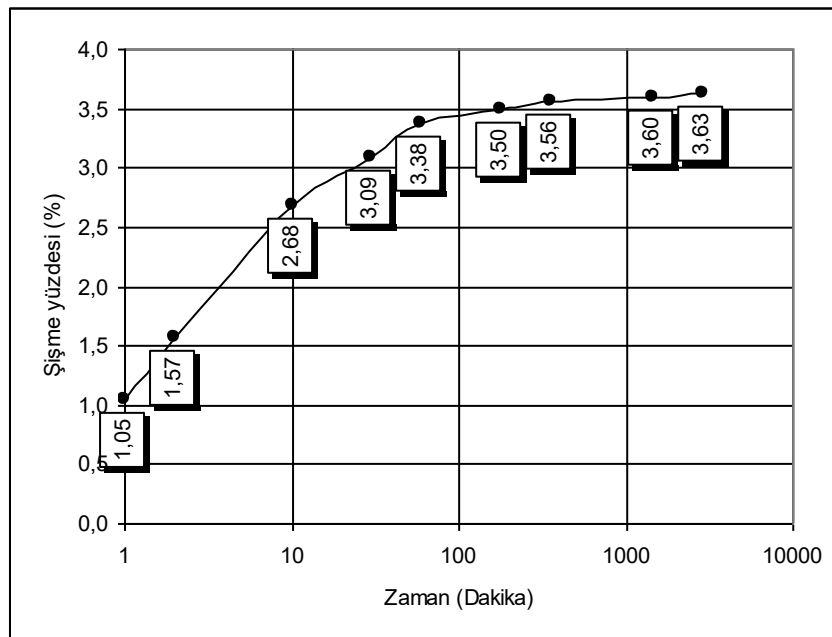
Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

11.4.3 Sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam (SY)}} = 2 * 0,11 = \% 0,22$

Şişme yüzdesi = % $(3,63 \pm 0,22)$

Ayrıca, zamana karşı şişme yüzdeleri Şekil 11.3'te gösterilmiştir.



Şekil 11.3 - Zamana karşı şişme yüzdesi

11.5 İlgili standartlar

ASTM D 4546: 2003. Test Method for one dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, Vol. 04.08.

BS 1377, Part 5: 1990. Compressibility, permeability and durability tests, 4.4 Measurement of swelling, page 8.

TS 1900-2/T1: 2007. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.8.1 Şişme yüzdesi deneyi.

USBR 5705: 1989. Procedure for determining the one dimensional expansion properties of soils, Vol. 2.

12 Şişme basıncı deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

12.1 Kapsam

Bu talimatta TS 1900-2/T1, ASTM D 4546 (Yöntem C), BS 1377 (Madde 4.3) ve USBR 5715'e göre şişme basıncı deneyi anlatılmaktadır.

Bu deney ile örselenmiş veya örselenmemiş bir zemin numunesinin suya boğulduktan sonraki şişme basıncı bulunur.

11.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

12.2.1 TS 1900-2/T1'e göre şişme basıncı deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.8.2 Şişme basıncı deneyine göre yapılmaktadır.

Bu deney ile örselenmiş veya örselenmemiş bir zemin numunesinin en az 1 kPa basınç altında suya boğulduktan sonraki tek yönlü şişmenin olmaması için uygulanması gereken basınç bulunur.

12.2.1.1 Gerekli araçlar

Şişme basıncı ve yüzdesi aleti, Tek yönlü konsolidasyon deneyinde belirtilene benzer,

Deney halkası (kalıbı),

Etüv, sürekli olarak (105 ± 10) °C doğrulukla sıcaklık sağlayabilen,

Komparatör saati, en az 0,004 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Kronometre, en az 0,1 s doğrulukla ölçme yapabilen,

Ağırlıklar,

Gözenekli disk,

Süzgeç kâğıdı,

Elek, 4,75 mm göz açıklıklı (No 4) göz açıklıklı,

Numune sıkıştırma cihazları,

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

Kumpas, 0,01 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune tıraşlama cihazları,

Damıtık su

12.2.1.2 Deneyin yapılışı

Deney halkasındaki numunenin yükseklik çap oranı 1:2,5 ilâ 1:3,5 olmalıdır.

Örselenmiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için çeyreklemeye yoluyla elde edilen temsili numune 4,75 mm göz açıklıklı elekten elenir. Deney numunesi, halkaya istenilen sıkılığa ve su içeriğine göre Madde 2.3'e göre hazırlanır.

Örselenmemiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için deney numunesi, blok veya tüp içerisinde laboratuvara getirilen numuneden Madde 2.4'e göre tıraşlanarak deney halkasına yerleştirilir.

Sıkıştırma (veya yerleştirme) işleminden sonra, kalıbın içindeki numunenin yüksekliği ölçülür (H_0) ve kaydedilir.

Kalıp ile numune ağırlığı tartılıp kaydedilir. Numunenin altına kuru filtre kâğıdı (isteğe bağlı) ve havada kurumuş gözenekli disk konularak hücreye yerleştirilir. Numune, hücresiyle birlikte şişme deney aletine bağlanır. Deneye hemen başlanmayacaksa, numuneden, buharlaşmayı önlemek için üzeri örtülmelidir.

Numunenin üzerinde en az 1 kPa'lık basınç değeri olmalıdır (genelde gözenekli disk ve numune üzerindeki ağırlıklar bu değeri sağlarlar). Komparatör sıfırlanır ve numunenin üzerini örtecek kadar damıtık su eklenir.

Numune şişme gösterdiğinde, bu şişmeyi engelleyecek miktarda ağırlık aletin kefesine konur. Numunede herhangi bir şişme gözlenmiyorsa, deney durdurulur.

İstenirse, tek yönlü konsolidasyon deneyi (Madde 18.2.1.3) gerçekleştirilir.

Deney sonunda numune aletten çıkarılır ve yaş numune ile kalıp ağırlığı tartılır. İstenirse, numune (105 ± 10) °C'luk etüvde 24 saat kurutulur. Etüvden çıkarılan numune ile kalıp uygun ortamda soğutularak tartılır.

Deneyden elde edilen veriler "Şişme deneyleri formu" na kaydedilir.

12.2.1.3 Hesaplamalar

Şişme durduğunda, numune kefesindeki ağırlıklar tartılır ve kol oranı ile çarpıldıktan sonra, numune kesit alanına bölünmesiyle şişme basıncı elde edilir:

$$SB = \frac{\text{Kütle} * \text{Kol oranı}}{\text{Alan}} = \frac{FL}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4FL}{\pi D^2}$$

Burada;

SB Şişme basıncı (kN/m² veya kg/cm²)

F Numuneye uygulanan yük (kN veya kg),

L Kol oranı,

A Numunenin kesit alanı (m² veya cm²),

D Numunenin çapı (cm)

dir.

12.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Deneyin başlangıcındaki numunenin maruz kaldığı basınç kg/cm² olarak en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak veya kPa olarak en yakın 1 hanesine yuvarlatılarak,
- En yakın 0,01 hanesinde yuvarlatılarak hesap edilmiş şişme basıncı değeri,
- Her bir basınç kademesinde şişme - oturma değeri (tek yönlü konsolidasyon deneyi yapılmışsa).

12.2.2 ASTM D 4546 Yöntem C'ye göre şişme basıncı deneyi talimatı

ASTM D 4546 Yöntem C'ye göre şişme basıncı deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır.

12.2.3 USBR 5715'e göre şişme basıncı deneyi talimatı

USBR 5715'e göre şişme basıncı deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır.

12.2.4 BS 1377 Madde 4.3'e göre şişme basıncı deneyi talimatı

BS 1377 Madde 4.3'e göre şişme basıncı deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır.

12.3 Şişme basıncı deneyinin belirsizlik hesabı**12.3.1 Şişme basıncı deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Şişme basıncı deneyleri ile ilgili yapılan karşılaştırma deneyleri Çizelge 12.1'de verilmiştir.

Çizelge 12.1- Laboratuvar içi karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Şişme basıncı
Veri sayısı, n	5
En büyük, kg/cm ²	0,68
Ortanca, kg/cm ²	0,62
En küçük, kg/cm ²	0,50
Ortalama, $\bar{X}$, kg/cm ²	0,61
Standart sapma, σ_{Std}	0,07
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$, kg/cm ²	0,03

Şişme basıncı deneyi için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (SB) = 0,03$

12.3.2 Şişme basıncı deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

12.3.2.1 Şişme basıncı eşitliğinin türevleri

$$SB = \frac{\text{Kütle} * \text{Kol oranı}}{\text{Alan}} = \frac{FL}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4FL}{\pi D^2}$$

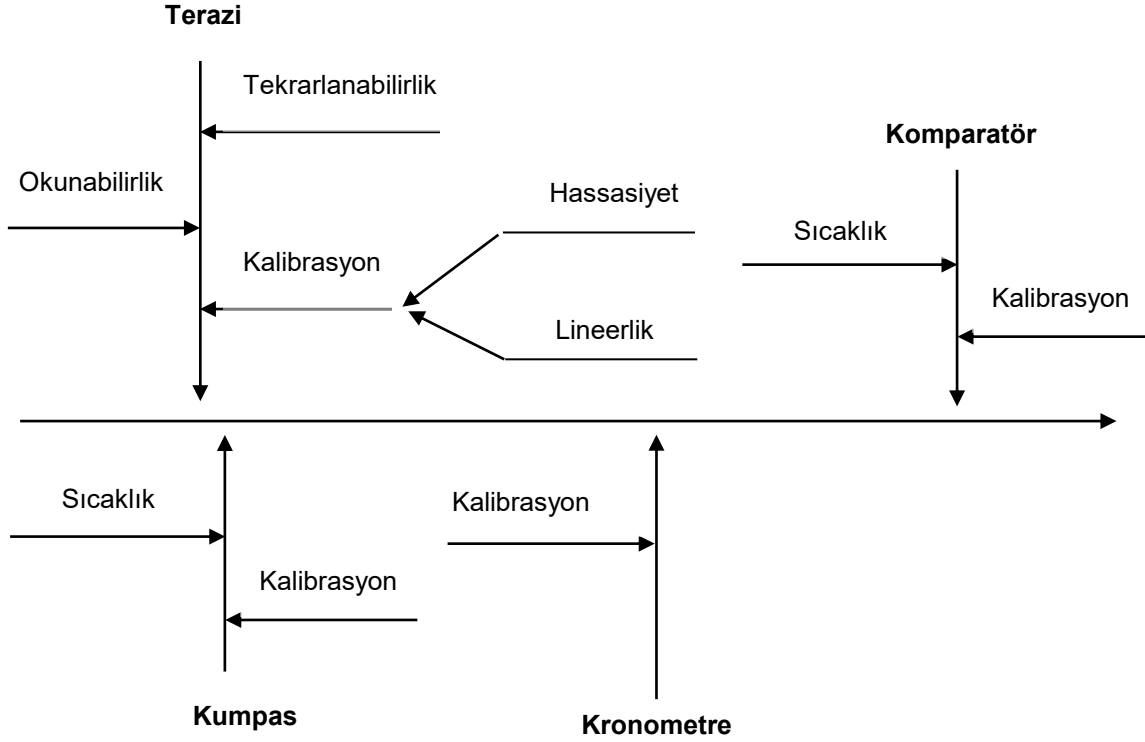
$$\frac{\partial(SB)}{\partial F} = \frac{4L}{\pi D^2}$$

$$\frac{\partial(SB)}{\partial L} = \frac{4F}{\pi D^2}$$

$$\frac{\partial(SB)}{\partial D} = -2 \frac{4FL}{\pi D^3} = -\frac{8FL}{\pi D^3}$$

12.3.2.2 Şişme basıncı deneyinin kılçık diyagramı

Şişme yüzdesi deneyinin kılçık diyagramı Şekil 12.1'de verilmiştir.



Şekil 12.1 - Şişme basıncı deneyinin kılçık diyagramı

12.3.2.3 Şişme basıncı deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

12.3.2.3.1 Terazı

12.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Şişme yüzdesi deneyinde Deneyde CHYO MP-3000 marka terazi kullanılmaktadır. Terazinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{CHYO MP-3000} \quad u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,02 + 1,7 \cdot 10^{-4} W) \text{ g} \rightarrow k = 2 \rightarrow U = \pm (0,01 + 8,5 \cdot 10^{-5} W) \text{ g}$$

12.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$\text{CHYO MP-3000 için} \quad 0,01 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,01 / \sqrt{3} = 0,00577$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

12.3.2.3.1.3 Tekerlanabilirlik

CHYO MP-3000 model terazide 100 g ağırlığındaki zemin numunesi tartılmaktadır. İstatistiki analizi Çizelge 12.2'de verilmiştir.

Çizelge 12.2 - Deneyde kullanılan terazilerden elde edilen belirsizlik değerleri

	CHYO MP-3000
Ölçüm sayısı, n	37
Ortalama, $\bar{x}$	99,57
Standart sapma, σ_{Std}	0,02
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,0037

12.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$U_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

12.3.2.3.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

12.3.2.3.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları $(2,5 \pm 0,1)$ mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı $2,5$ mm'den büyük göz açıklığına sahip $(4,75 \pm 0,2)$ mm ve $2,5$ mm'den küçük göz açıklığına sahip $(1,18 \pm 0,0579)$ mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki Çizelge 12.3'te verilmiştir.

Çizelge 12.3 - Elek göz açıklığının şişme basıncı deneyi üzerine etkisi

	2,5 ± 0,1	No 4 4,75 ± 0,2	6 ± 0,005
Ölçüm sayısı, n	5	5	5
Ortalama, $\bar{x}$	0,69	0,61	0,68
Standart sapma, σ_{Std}	0,020	0,067	0,024
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,009	0,030	0,011

Çizelge 11.3'ten de anlaşılacağı gibi sonuçlar rastgele dağılmaktadır $(4,75 \pm 0,2)$ elek üzerinde herhangi bir belirsizliği yoktur. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

12.3.2.3.3 Kumpas

Numune çapı ve yüksekliği her deney öncesi ölçülmektedir. Ancak hesaplarda çap olduğu için belirsizlikte çap değeri kullanılmıştır. Kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$MITUTOYO (0-150) \quad U_{\text{Kumpas}} = \pm (0,0143 \text{ mm} + 0,00001 \cdot L \text{ mm}) \rightarrow k=2$$

$$U_{\text{Kumpas}} = \pm (0,00715 \text{ mm} + 0,000005 \cdot L \text{ mm}) = \pm (0,000715 \text{ cm} + 0,0000005 \cdot L \text{ cm})$$

12.3.2.3.4 Komparatör saati

Deneyde kullanılan komparatör saatinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$MITUTOYO (0-25,4 \text{ mm}) \quad U_{\text{Komparatör}} = \pm 5 \mu\text{m} = \pm 0,005 \text{ mm} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kompataör}} = 0,005 / 2 = 0,0025$$

Not - Komparatör saati, numunenin şişmesini veya oturmasını kontrol amacıyla kullanıldığından, deney belirsizliğine doğrudan etkisi yoktur.

12.3.2.3.5 Kronometre

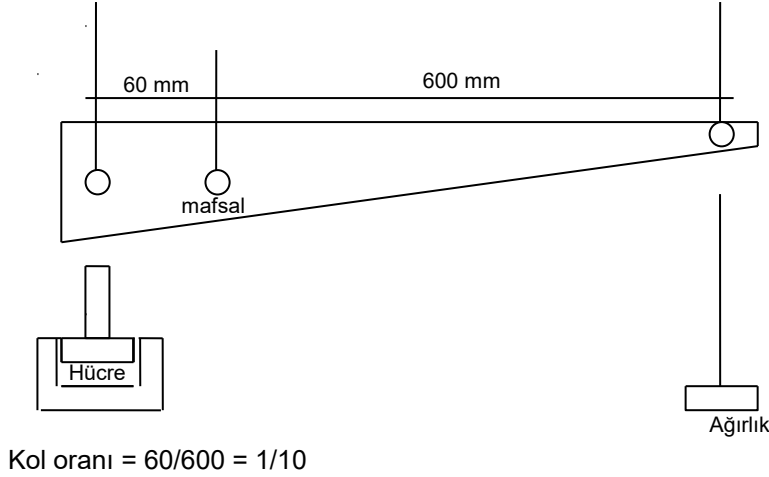
Deneyde kullanılan kronometrenin kalibrasyon sertifikasında belirtilen belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$U_{\text{Kronometre}} = \pm 0,5 \text{ s} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kronometre}} = 0,5 / 2 = 0,25 \text{ s}$$

12.3.2.3.6 Kol oranı

Şişme yüzdesi aletinin yapıldığı frezenin okunabilirliği 0,02 mm (1/50) olduğundan ve freze kalibresi olmadığından, belirsizlik olarak frezenin belirsizliği alınmıştır. Kol oranı Şekil 12.2'de gösterilmiştir.

$$U_{Kol} = 0,02 \text{ mm} = 0,002 \text{ cm}$$



Şekil 12.2 - Şişme yüzdesi deneyinde kol oranı

12.3.2.4 Şişme basıncı deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Şişme yüzdesi deneyinin sistematik belirsizliklerin toplamı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$U_{Sistemik (SB)} = \left[\left(\frac{\partial SB}{\partial F} u_F \right)^2 + \left(\frac{\partial SB}{\partial L} u_L \right)^2 + \left(\frac{\partial SB}{\partial D} u_D \right)^2 \right]^{0,5}$$

12.3.3 Şişme basıncı deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

12.4 Şişme basıncı deneyinin çözümlü örneği**12.4.1 Şişme basıncı deneyinden elde edilen veriler**

Şişme deneyinde çapı 50,46 mm olan ring ile kol oranı 1/10 olan cihazda deney yapılmıştır. Deney numunesini dengede tutmak için toplam 1248,4 g ağırlık konulmuştur.

12.4.2 Şişme basıncı deneyinin hesaplamaları**12.4.2.1 Şişme basıncı**

$$D = 50,46 \text{ mm} \Rightarrow A = \pi D^2/4 \Rightarrow A = 3,14159 * 5,046^2/4 \cong 20 \text{ cm}^2$$

$$SB = \frac{FL}{A} = \frac{1,2484 * 10}{20} = 0,62 \text{ kg/cm}^2$$

12.4.2.2 Şişme basıncı deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele (SB)} = 0,03$ (karşılaştırma deneylerinden)

12.4.2.3 Şişme basıncı deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial(SB)}{\partial F} = \frac{4L}{\pi D^2} = \frac{4 * 10}{\pi * 5,046^2} = 0,5$$

$$\frac{\partial(SB)}{\partial L} = \frac{4F}{\pi D^2} = \frac{4 * 1,2484}{\pi * 5,046^2} = 0,0624$$

$$\frac{\partial(SB)}{\partial D} = -2 \frac{4FL}{\pi D^3} = -\frac{8FL}{\pi D^3} = -\frac{8 * 1,2484 * 10}{\pi * 5,046^3} = -0,247$$

$$U_{\text{Terazi}} = \pm \{ [(0,01 + 8,5 * 10^{-5} W * 1248,4) / 1000]^2 + 0,00577^2 + 0,0037^2 \}^{0,5} = 0,0069$$

$$U_{\text{Kol}} = 0,002$$

$$U_{\text{Kumpas}} = \pm (0,000715 \text{ cm} + 0,0000005 * L \text{ cm}) = \pm (0,000715 + 0,0000005 * 5,046) = 0,000715$$

$$U_{\text{Sistemik (SB)}} = \left[\left(\frac{\partial(SB)}{\partial F} U_{\text{Terazi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial(SB)}{\partial L} U_{\text{Kol}} \right)^2 + \left(\frac{\partial(SB)}{\partial D} U_{\text{Kumpas}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistemik (SB)}} = \left[(0,5 * 0,0069)^2 + (0,0624 * 0,002)^2 + (-0,247 * 0,000715)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistemik (SB)}} = 0,0035$$

12.4.2.4 Şişme basıncı deneyinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,03 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,0035

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(0,03)^2 + (0,0035)^2]^{0,5} = 0,03 \end{aligned}$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

12.4.3 Şişme basıncı deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında k = 2 olduğundan $k U_{\text{Toplam (SB)}} = 2 * 0,03 = 0,06 \text{ kg/cm}^2$

Şişme basıncı = $(0,62 \pm 0,06) \text{ kg/cm}^2$

12.5 İlgili standartlar

ASTM D 4546: 2003. Test Method for one dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, Vol. 04.08.

BS 1377: Part 5: 1990. Compressibility, permeability and durability tests, 4.3 Measurement of swelling pressure, page 8.

TS 1900-2/T1: 2007. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.8.2 Şişme yüzdesi deneyi.

USBR 5715: 1989. Procedure for determining the one dimensional uplift properties of soils, Vol. 2.

13 İğne deliği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

13.1 Kapsam

Bu talimatta TS 1900-2/T1, ASTM D 4647, USBR 5410 ve BS 1377'ye göre iğne deliği deneyi anlatılmaktadır.

13.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

13.2.1 TS 1900-2/T1'e göre iğne deliği deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.7.1, iğne deliği deneyine göre yapılmaktadır.

İğne deliği deneyi, örselenmiş (sıkıştırılmış) veya örselenmemiş deney numunesine açılan küçük delikten akım geçen killi zeminlerin dispersif özelliğinin belirlendiği, doğrudan, fiziksel ve nitelik (büyüklük) deneyidir.

Bu deney, 0,005 mm'den geçen miktar % 12 den daha az ve plastisite indeksi 4'ten küçük olan numunelerde uygulanmaz.

13.2.1.1 Gerekli araçlar

İğne deliği aleti ve kılavuzu (huni), Şekil 13.1'de gösterilene uygun,

Sabit seviyeli damıtık su tankı,

Cam tüp, çapı en az 3 mm,

Mezür, kapasitesi 10 mL 25 mL ve 50 mL olan,

Elek teli, göz açıklığı yaklaşık 2 mm'den daha küçük olan,

İğne, çapı $(1,0 \pm 0,1)$ mm, uzunluğu 50 mm ilâ 75 mm olan,

Temiz kum, dane çapı yaklaşık 2 mm ile 4,75 mm arasında değişen temiz yıkanmış kum,

Kronometre, 0,1 s doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune sıkıştırma cihazları,

Elek, 2 mm göz açıklığına sahip (No 10),

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

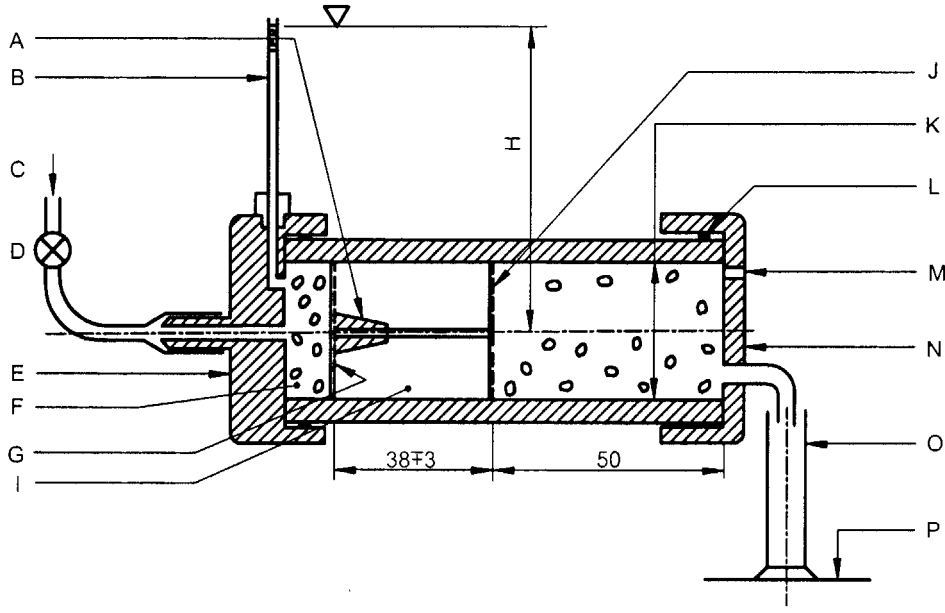
Kumpas, 0,01 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune tıraşlama cihazları,

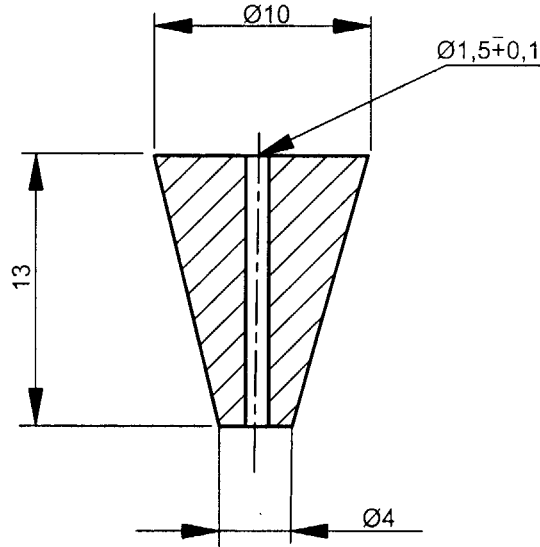
Damıtık su.

Not - İğne deliğinin dış çapı ve yönlendirme kılavuzunun iç çapı düzenli aralıklarla veya her deney öncesi ölçülüp ilgili forma kaydedilmelidir.

Ölçüler mm'dir

**Açıklamalar:**

A	Kılavuz	I	Deney numunesi
B	Cam tüp	J	Elek teli (iki dane)
C	Sabit seviyeli tanktan su girişi	K	Silindir çapı (çapı yaklaşık 43 mm)
D	Vana	L	Su sızdırmazlık için conta
E	Üst başlık	M	Hava çıkış deliği
F	Temiz kum	N	Alt başlık
G	Elek teli	O	Mezûv
H	Su yükü (5 cm, 18 cm, 38 cm)	P	Beyaz kâğıt

a) İğne deliği aleti**b) Kılavuz****Şekil 13.1 - İğne deliği aleti ve kılavuzu**

13.2.1.2 Deneyin yapılışı

Örselenmiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için çeyreklemeye yoluyla elde edilen temsili numune 2 mm göz açıklıklı elekten elenir. Deney numunesi istenilen sıklığa ve su içeriğine Madde 2.3'e göre hazırlanır ve numune ile iğne deliği aletinin kenarından su sızıntısı olmayacak şekilde sıkıştırılır.

Örselenmemiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için deney numunesi, blok veya tüp içerisinde laboratuvara getirilen numuneden Madde 2.4'e göre tıraşlanarak elde edilir ve numune ile iğne deliği aletinin kenarından su sızıntısı olmayacak şekilde yerleştirilir.

Kılavuz zemin numunesinin ortasına yerleştirilir. İğnenin, huni içerisinde el ile durmaksızın itilmek ve çevrilmek suretiyle zeminin diğer tarafından çıkması sağlanır ve iğne sokma istikametinin tersine doğru geri çıkarılır.

Zeminin her iki tarafına elek teli yerleştirilir ve numunenin her iki tarafına temiz kum doldurulur ve düzlenir. İğne deliği aletinin parçaları birleştirilir ve yatayla hizalanır. Deney sırasında su yükü 5 cm, 18 cm ve 38 cm olacak şekilde ayarlanır. Her dakikada toplanan suya yandan ve üstten bakılarak bulanık olup olmadığı kaydedilir. Toplanan suyun temiz olduğu sadece üstten kontrol edilmelidir.

İlk 5 dakikada su yükü 5 cm ye ayarlanır. Geçen debi 1,0 mL/s (60 mL) ile 1,4 mL/s (84 mL) arasında; toplanan suya bakıldığında koyu veya bulutlu ise, deney durdurulur. Mümkün ise, zemin numunesi iğne deliği aletinden çıkarıldıktan sonra delik çapı ölçülür. Zemin **D1** olarak sınıflandırılır.

5 cm su yükü altında, toplanan su koyu, bulutlu, hafif bulutlu veya temiz; debi 1 mL/s (60 mL) yi 5 dakika sonunda aşmaz ise, deneye 5 cm'lik su yükünde 5 dakika daha devam edilir.

10 dakika sonunda, 5 cm su yükü altında, geçen debi 0,8 mL/s (48 mL) ile 1,4 mL/s (84 mL) arasında; toplanan su koyu, bulutlu veya hafif bulutlu ise, deney durdurulur. Mümkün ise, zemin numunesi iğne deliği aletinden çıkarıldıktan sonra delik çapı ölçülür. İkinci 5 dakikada 5 cm su yükü altında, geçen debi 0,8 mL/s (48 mL) ile 1,0 mL/s (60 mL) arasında ise, **ND4**; geçen debi 1,0 mL/s (60 mL) ile 1,4 mL/s (84 mL) arasında ise, **D2** olarak sınıflandırılır.

10 dakika içinde debi 0,0 mL/s ile 0,2 mL/s (12 mL) arasında ise, delik yeniden açılarak deneye tekrar başlanır. 10 dakika içinde debi 0,0 mL/s ile 0,2 mL/s (12 mL) arasında olması halinde, delik 3. kez tekrar açılarak deneye başlanır. Bu durum yeniden oluşması halinde, deney durdurulur ve numune şişme potansiyeli olan zemin olarak adlandırılır.

5 dakika ile 10 dakika içinde, toplanan su temiz ve hafif bulutlu, 5 cm su yükü altında debi 0,2 mL/s (12 mL) ile 0,8 mL/s (48 mL) arasında ise, su yükü 18 cm ye yükseltilir.

15 dakika sonunda, 18 cm su yükü altında debi 1,2 mL/s (72 mL) ile 2,8 mL/s (168 mL) arasında; toplanan suya bakıldığında bulutlu veya hafif bulutlu ise, deney durdurulur. Mümkün ise, zemin numunesi iğne deliği aletinden çıkarıldıktan sonra delik çapı ölçülür. Geçen debi 1,2 mL/s (72 mL) ile 2,0 mL/s (120 mL) arasında ise, **ND3**; geçen debi 2,0 mL/s (120 mL) ile 2,8 mL/s (168 mL) arasında ise, **ND4** olarak sınıflandırılır.

10 dakika ile 15 dakika içinde, 18 cm su yükü altında toplanan su açık ve hafif bulutlu, debi 0,6 mL/s (36 mL) ile 1,2 mL/s (72 mL) arasında ise, su yükü 38 cm ye yükseltilerek deneye 5 dakika daha devam edilir.

15 dakika ile 20 dakika içinde, 38 cm su yükü altında debi 0,8 mL/s (48 mL) ile 1,6 mL/s (96 mL) arasında ise, **ND1**; 1,6 mL/s (96 mL) ile 2,4 mL/s (144 mL) arasında ise, **ND2**; 2,4 mL/s (144 mL) ile 3,2 mL/s (192 mL) arasında ise, **ND3** olarak sınıflandırılır.

10 dakika ile 15 dakika içinde, debi 0,0 mL/s (0 mL) ile 0,6 mL/s (36 mL) arasında ve 15 dakika ile 20 dakika içinde, debi 0,0 mL/s (0 mL) ile 0,8 mL/s (48 mL) arasında ise, numune şişme potansiyeli olan zemin diye adlandırılır.

Deney sırasında elde edilen veriler, "Dispersibilite deneyi formu" veya "İğne deliği deneyi" formuna kaydedilir.

13.2.1.3 Hesaplamalar

Deney numunesi içinden her dakikada geçen damıtık su hacmi mezvü ile ölçülür ve akım değeri mL/s olarak hesaplanır.

13.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Zamana karşı çizilen en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak akış (mL/s) grafiği,
- Deneyden elde edilen sınıf (ND1, ND2, ND3, ND4, D1, D2) ve sonucu (dispersif zemin, ara zemin, dispersif olmayan zemin).

13.2.2 ASTM D 4647'ye göre iğne deliği deneyi talimatı

ASTM D 4647 Yöntem C'ye göre iğne deliği deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır. Farklı olan yerler aşağıda belirtilmiştir.

Bu deney ile killi zemin numunesi içine açılan delikten akan suyun sebep olduğu dağılma ve çok ince malzemelerin (kolloid) oyulmaları, doğrudan veya nitelik olarak bulunur.

Burada uygulanan yöntem ile bulunan zeminin dağılganlığı, zemin numunesi içinden akarak toplanan suyun bulanıklığı; zemin içine açılan iğnenin son çapı; 20 dakika boyunca her dakikada toplanan suyun miktarı ile bulunur.

Bu deney, kil miktarı % 12 den daha az ve plastisite indeksi 4 e eşit veya küçük olan numunelerde uygulanmaz.

13.2.3 USBR 5410'a göre iğne deliği deneyi talimatı

USBR 5410'a göre iğne deliği deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır. Farklı olan yerler aşağıda belirtilmiştir.

Deney, 0,005 mm'den geçen miktar % 12 den daha az ve plastisite indeksi 8'den küçük olan numunelerde uygulanmaz.

13.2.4 BS 1377'ye göre iğne deliği deneyi talimatı

BS 1377'ye göre iğne deliği deneyinin yapılışı, ASTM D 4647 ile aynıdır. Ancak, sıkıştırılan numune boyu için ASTM D 4647 "38 mm" belirtmesine rağmen, BS 1377 numune boyunun "(38 ± 2) mm" olarak belirtmektedir. Benzer şekilde 50 mm, 180 mm ve 180 mm su yüksekliklerinde ASTM D 4647 herhangi bir tolerans belirtmezken, BS 1377 tüm su yüksekliklerinde ± 5 mm tolerans tanımaktadır.

13.3 İğne deliği deneyinin belirsizlik hesabı

11.3.1 İğne deliği deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği

Rastgele belirsizlik istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. İğne deliği deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri Çizelge 13.1'de verilmiştir.

Çizelge 13.1- Laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri sonuçları

	Laboratuvar içi	
	1. Karşılaştırma Deneyleri	2. Karşılaştırma Deneyleri
Veri sayısı	7	12
En büyük	2,3	1,83
Ortanca	1,4	1,68
En Küçük	0,7	1,58
Ortalama, $\bar{x}$	1,4	1,696
Standart sapma, σ_{Std}	0,095	0,088
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,036	0,030

İğne deliği deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değer yaklaşık % 100 artırılarak (emniyetli tarafta kalmak için) aşağıda verilen değer alınmıştır.

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele}$ (iğne deliği) = 0,05

13.3.2 İğne deliği deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

13.3.2.1 İğne deliği eşitliğinin türevleri

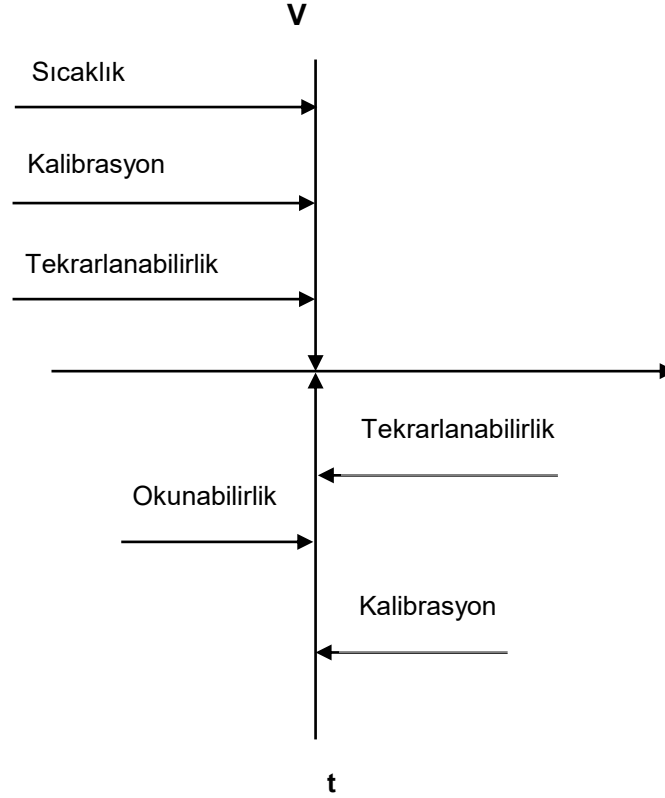
$$q = \frac{V}{t}$$

$$\frac{\partial q}{\partial V} = \frac{1}{t}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{V}{t^2}$$

13.3.2.2 Kılçık diyagramı

Sadece cihazların gösterildiği, iğne deliği deneyinin kılçık Şekil 13.2'de verilmiştir.



Şekil 13.2 - İğne deliği deneyinin kılçık diyagramı

13.3.2.3 İğne deliği deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

13.3.2.3.1 Terazî

İğne deliği deneyi hem örselenmiş hem de örselenmemiş deney numunelerinde gerçekleştirilebildiği ve tüpten çıkan numunede ağırlılığının önemi olmadığı (numune tüpten hafif veya ağır çıksa deney yapılır) için **terazi belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

13.3.2.3.2 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

13.3.2.3.3 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları ($2 \pm 0,2$ mm) dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı ($2,5 \pm 0,1$ mm, ($4,75 \pm 0,2$) mm ve ($6,3 \pm 0,005$) mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Çizelge 13.2'de verilmiştir.

Çizelge 13.2 - İğne deliği deneyinde eleğin etkisi

	2,5 ± 0,1	No 4 4,75 ± 0,2	6,3 ± 0,005
Ölçüm sayısı, n	5	12	5
Ortalama, $\bar{x}$	1,42	1,70	1,50
Standart sapma, σ_{Std}	0,026	0,088	0,1
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,01	0,03	0,05

Yukarıda verilen Çizelgeden görüleceği üzere, sonuçlar rastgele dağılmaktadır. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

13.3.2.3.4 Hacim (mezûv)

Deneyde kullanılan mezûvün kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizlik miktarı aşağıda verilmiştir.

$$u_{\text{Hacim}} = 0,05 \text{ mL} \rightarrow k = 2 \text{ olduğundan} \rightarrow U = 0,05 / 2 = 0,025$$

13.3.2.3.5 Kronometre

Deneyde kullanılan mezûvün kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizlik miktarı aşağıda verilmiştir.

$$u_{\text{Kronometre}} = 0,5 \text{ s} \rightarrow k = 2 \text{ olduğundan} \rightarrow U = 0,5 / 2 = 0,25$$

13.3.2.4 İğne deliği deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

İğne deliği deneyinin sistematik belirsizliklerin toplamı, aşağıda verilmiştir:

$$\text{Sistematik belirsizliklerin toplamı, } U_{\text{Sistematik (iğne deliği)}} = \left[\left(\frac{\partial q}{\partial V} * u_{\text{Hacim}} \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} * u_{\text{Kronometre}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

13.3.3 İğne deliği deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

13.4 İğne deliği deneyinin çözümlü örneği**13.4.1 İğne deliği deneyinden elde edilen veriler**

İğne deliği deneyinden Çizelge 13.3'te verilen deney sonuçları elde edilmiştir. Hesaplamalarda, sadece 16. dakika için olan hesaplamalar gösterilmiştir.

Not - İğne deliği deneyi 5 dakikalık deney sürelerinde belirlendiği için deneyin tamamlandığı 5 dakikadaki beş noktanın en büyük belirsizlik değeri, deneyin toplam belirsizliği olarak alınmalıdır.

Çizelge 13.3 - İğne deliği deneyinde elde edilen sonuçlar

Su yükü (cm)	5									
Zaman (Dakika)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Akım (mL)	29	29	26	25	24	24	23	23	22	22
Debi (mL/s)	0,48	0,48	0,43	0,42	0,40	0,40	0,38	0,38	0,37	0,37

Su yükü (cm)	18					38				
Zaman (Dakika)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Akım (mL)	43	43	43	42	41	86	84	84	82	81
Debi (mL/s)	0,72	0,72	0,72	0,70	0,68	1,43	1,40	1,40	1,37	1,35

13.4.2 İğne deliği deneyinin hesaplamaları**13.4.2.1 Debi**

$$q = \frac{V}{t} = 86 / 60 = 1,43 \text{ mL/s}$$

13.4.2.2 İğne deliği deneyinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}} (\text{iğne deliği}) = 0,05$ (karşılaştırma deneylerinden)

13.4.2.3 İğne deliği deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial q}{\partial V} = \frac{1}{t} = \frac{1}{60} = 0,0167$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{V}{t^2} = -\frac{86}{60^2} = -0,0238$$

$$U_{\text{Sistematik}} (\text{iğne deliği}) = [\left(\frac{\partial q}{\partial V} * u_{\text{Hacim}} \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial t} * u_{\text{Kronometre}} \right)^2]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik}} (\text{iğne deliği}) = [(0,0167*0,025)^2 + (-0,0238*0,25)^2]^{0,5} = [(0,174 + 35,4)*10^{-6}]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik}} (\text{iğne deliği}) = 0,00596 \cong 0,006$$

13.4.2.4 İğne deliği deneyinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,05 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,006

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(0,05)^2 + (0,006)^2]^{0,5} = 0,05 \end{aligned}$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

13.4.3 İğne deliği deneyinden elde edilen sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam}} (\text{iğne deliği}) = 2 * 0,05 = 0,10$

16. dakika için $q = (1,43 \pm 0,10)$ mL

Diğer noktalar için hesaplanan değerler Çizelge 13.4'te verilmiştir. Sınıfının bulunduğu aralıktaki en yüksek belirsizlik değeri deneyin toplam belirsizliği olarak alınır.

Ayrıca, deney sonucu Şekil 13.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 13.4 - İğne deliği deneyinin belirsizlik hesabı

Zaman Dakika	Hacim mL	Akım mL/s	Terazi kalibrasyonu	Terazi belirsizliği	$dq/dV=1/t$	$dq/dt = -V/t^2$	$U_{Sistemlik}$	$U_{Rastgele}$	U_{Toplam}	kU_{Toplam}
1	29	0,48	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0081	0,0021	0,050	0,05	0,1
2	29	0,48	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0081	0,0021	0,050	0,05	0,1
3	26	0,43	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0072	0,0019	0,050	0,05	0,1
4	25	0,42	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0069	0,0018	0,050	0,05	0,1
5	24	0,40	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0067	0,0017	0,050	0,05	0,1
6	24	0,40	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0067	0,0017	0,050	0,05	0,1
7	23	0,38	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0064	0,0017	0,050	0,05	0,1
8	23	0,38	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0064	0,0017	0,050	0,05	0,1
9	22	0,37	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0061	0,0016	0,050	0,05	0,1
10	22	0,37	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0061	0,0016	0,050	0,05	0,1
11	43	0,72	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0119	0,0030	0,050	0,05	0,1
12	43	0,72	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0119	0,0030	0,050	0,05	0,1
13	43	0,72	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0119	0,0030	0,050	0,05	0,1
14	42	0,70	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0117	0,0029	0,050	0,05	0,1
15	41	0,68	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0114	0,0029	0,050	0,05	0,1
16	86	1,43	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0239	0,0060	0,050	0,05	0,1
17	84	1,40	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0233	0,0058	0,050	0,05	0,1
18	84	1,40	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0233	0,0058	0,050	0,05	0,1
19	82	1,37	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0228	0,0057	0,050	0,05	0,1
20	81	1,35	0,0270	0,0279	0,0167	-0,0225	0,0056	0,050	0,05	0,1

13.5 İlgili standartlar

ASTM D 4647: 2006. Standard test for identification and classification of dispersive clay soil by the pinhole test, Vol 04.08.

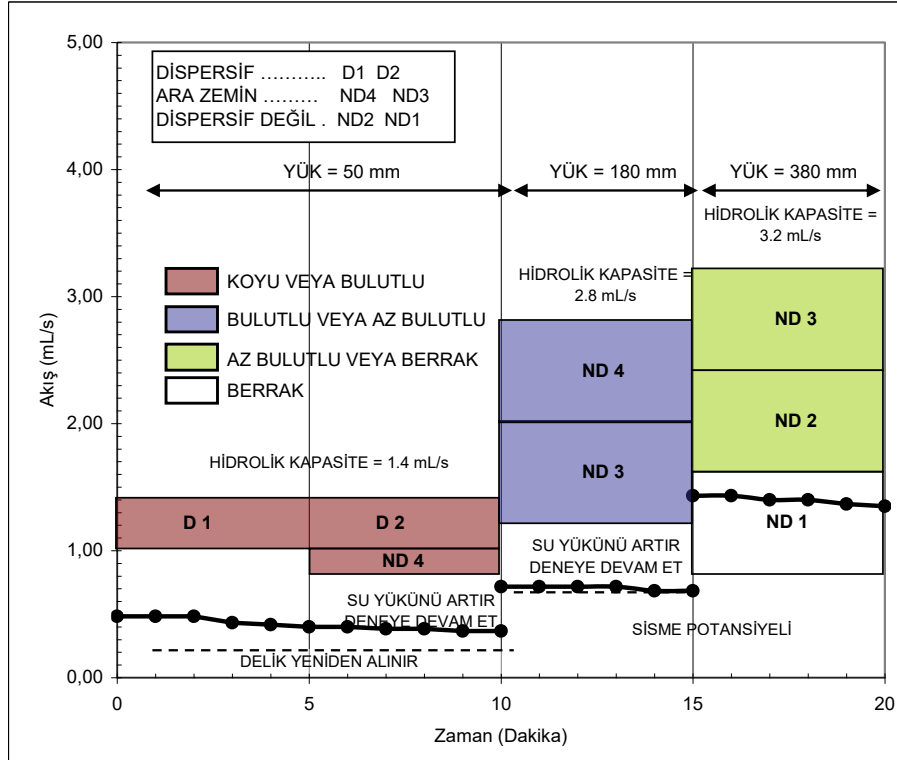
BS 1377: Part 5: 1990. Soils for civil engineering purposes, Part 5, Compressibility, permeability and durability tests, 6.2 Pinhole method, page 14.

USBR 5410: 1989. Procedure for determining dispersibility of clayey soils by the pinhole test method, Vol. 2, page 425 - 437.

TS 1900-2/T1: 2007. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.7.1 İğne deliği deneyi.

İĞNE DELİĞİ DENEYİ

Numune no	-	Deney başlama tarihi	12.08.2005
Kuyu/sondaj no	-	Deney bitiş tarihi	12.08.2005
Deney standardı	USBR 5410-89 "İğne Delik Deneyi"	Kullanılan elek	4,75 mm



Su yükü (cm)	5									
Zaman (Dakika)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hacim (mL)	29	29	26	25	24	24	23	23	22	22
Akım (mL/s)	0,48	0,48	0,43	0,42	0,40	0,40	0,38	0,38	0,37	0,37
Belirsizlik	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Su yükü (cm)	18					36				
Zaman (Dakika)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Hacim (mL)	43	43	43	41	41	86	84	84	82	81
Akım (mL/s)	0,72	0,72	0,72	0,68	0,68	1,43	1,40	1,40	1,37	1,35
Belirsizlik	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Dispersibilite grubu	ND 1
Sonuç	Dispersif değil

Şekil 13.3 - İğne deliği deneyinden elde edilen verilerin gösterilmesi

14 Dağılma deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

14.1 Kapsam

Bu talimatta TS 1900-2/T1, ASTM D 6572, USBR 5400 ve BS 1377'ye göre dağılma (Crumb) deneyi anlatılmıştır.

14.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

14.2.1 TS 1900-2/T1'e göre dağılma deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.7.2, dağılma deneyine göre yapılmaktadır.

Dağılma deneyi, örselenmiş (sıkıştırılmış) veya örselenmemiş deney numunesinin dispersif özellikte olup olmadığının belirlendiği, görsel nitelik deneyidir.

Bu deney, 0,005 mm'den geçen miktar % 12'den daha az ve plastisite indeksi 8'den küçük olan numunelerde uygulanmaz. Bu deney İğne deliği deneyi ile birlikte yapılmalıdır. Etüv kurusu numuneler ile bu deney yapılmamalıdır.

14.2.1.1 Gerekli araçlar

Porselen kap, yaklaşık 250 mL kapasiteli,

Kronometre, 0,1 s doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune sıkıştırma cihazları,

Elek, 2 mm göz açıklığına sahip (No 10),

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

Kumpas, 0,01 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune tıraşlama cihazları,

Damıtık su,

Termometre, 0 °C ile 50 °C arasında, 0,1 °C hassasiyetli,

Maşa.

14.2.1.2 Deneyin yapılışı

Örselenmiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için çeyreklemeye yoluyla elde edilen temsili numune 2 mm göz açıklıklı elekten elenir. Deney numunesi, bir kenarı yaklaşık 15 mm olan bir küp şeklinde istenilen sıklığa ve su içeriğine göre Madde 2.3'e göre hazırlanır.

Örselenmemiş zemin numunesinden deney numunesi elde etmek için deney numunesi, blok veya tüp içerisinde laboratuvara getirilen numuneden, hacmi örselenmiş olarak elde edilen deney numunesine yaklaşık eşit olacak şekilde, Madde 2.4'e uygun küp olarak elde edilir.

Kullanılan porselen kap dokunulduğunda en az 6 saat boyunca hareket etmeyecek sabit tezgahlar üzerine konulur. Porselen pota içindeki su yüksekliği, deney numunesi pota dibine yerleştirildiğinde, deney numunesinin yüksekliğinin iki katı kadar olmalıdır. Yaklaşık 250 mL damıtık su porselen kap içine konulur ve su sıcaklığının değişmeyen sıcaklığa gelmesi beklenir. Deney başlangıcında su sıcaklığı kaydedilir. Deney süresince su sıcaklığı (20 ± 6) °C arasında olmalıdır. Hazırlanan deney numunesi maşa yardımıyla porselenin tabanına gerekli özen gösterilerek yavaşça yerleştirilir. Deney sırasında porselen içindeki numune başka yere taşınmamalı veya dokunulmamalıdır.

Deney sırasında elde edilen veriler, "Dispersibilite deneyi formu" na kaydedilir.

Deney numunesinin damıtık su içindeki dağılma derecesi 10 dakika, 1 saat ve 6 saatte gözlemlenir ve kaydedilir. Ayrıca, belirtilen aralıklarda su sıcaklıkları da ölçülerek kaydedilmelidir (su sıcaklığı ölçümü sırasında deney numunesine dokunmamaya dikkat edilmelidir). Deney numunesinin damıtık su ile olan reaksiyonuna bakılarak (Şekil 14.1) reaksiyon derecesi Çizelge 14.1'e göre belirlenmelidir.



Şekil 14.1 - Zeminlerin reaksiyon dereceleri (soldan sağa doğru: 1. Derece, 2. Derece, 3. Derece, 4. Derece)

Çizelge 14.1 - Dağılma deneyinin değerlendirilmesi

Reaksiyon Derecesi	Numunede Oluşan Belirtiler
1. Derece (dispersif değil)	Reaksiyon yok. Çözelti içindeki çok ince danelerin (kolloid) neden olduğu bulanıklık görülmez.
2. Derece (ara zemin)	Çok az reaksiyon. Zemin numunesi yüzeyindeki suda çok az bulanıklık görülür. Bulanıklık kolayca görülüyorsa, 3. Derece olarak, bulanıklık sadece bir bölgede çok az görülüyorsa, 1. Derece olarak sınıflandırılmalıdır.
3. Derece (dispersif)	Orta reaksiyon. Özellikle potanın dibindeki ince yığılma çok ince malzemelerin oluşturduğu gözle görülür bulut meydana gelir. Bulutun genişliği 10 mm'ye kadar çıkabilir.
4. Derece (dispersif)	Kuvvetli reaksiyon. Özellikle çok ince malzemelerin oluşturduğu bulut, genellikle deney kabının tabanını ince bir tabaka halinde kaplar. Aşırı durumlarda deney kabındaki su tamamen bulanık hale gelir.

14.2.1.3 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Reaksiyon derecesi ve dispersibilite durumu.

14.2.2 ASTM D 6572'ye göre dağılma deneyi talimatı

ASTM D 6572'ye göre dağılma deneyi, TS 1900-2/T1'de belirtilen ile aynıdır. Farklı olan yerler aşağıda belirtilmiştir.

Bu deney, 0,005 mm'den geçen miktar % 12 den daha az ve plastisite indeksi 8'den küçük olan numunelerde uygulanmaz.

Dağılma deneyinde, dispersif zeminler bazen dispersif olmayan davranış gösterirler. Arazide dispersif davranış gösteren kaolinite içerikli zeminler dispersif olmayan davranış gösterebilirler. Ancak dağılma deneyinin sonucunda sonuç dispersif çıktı ise, büyük ihtimalle dispersiftir.

Etüv kurusundan elde edilen deney numunesi kullanılmamalıdır.

Dağılma deneyi; iğne deliği deneyi ve/veya çifte hidrometre deneyi ile birlikte yapılmalıdır.

Bu deney hem tabii olarak elde edilmiş zemin numunelerine hem de sıkıştırılarak elde edilmiş zemin numunelerine uygulanır.

Damıtık su, $5,5 < \text{pH} < 7,0$

$(21 \pm 6) ^\circ\text{C}$ arasında olmalıdır.

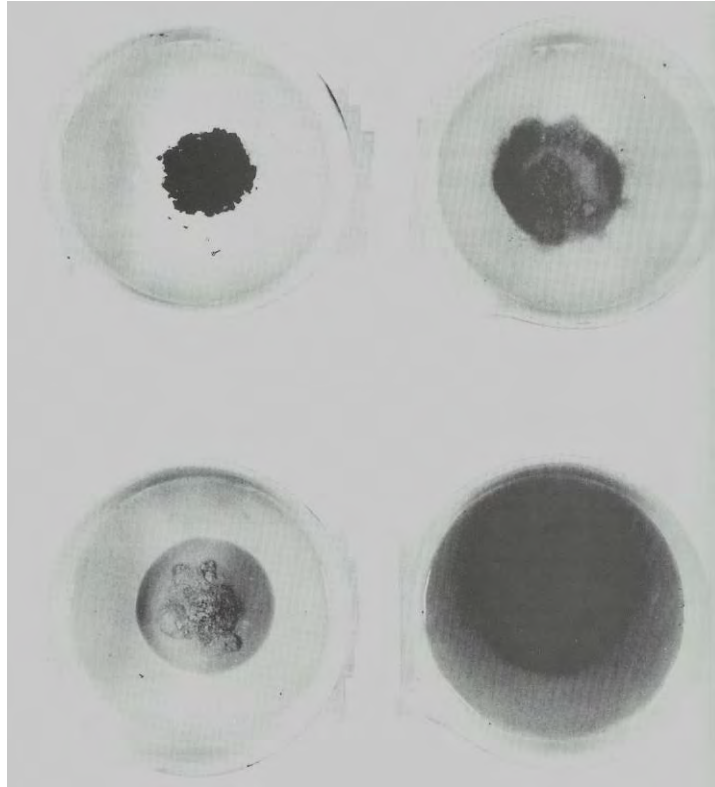
Deney numunesinin damıtık su içindeki dağılma derecesi 2 dakika, 1 saat ve 6 saatte gözlemlenir

14.2.3 USBR 5400'e göre dağılma deneyi talimatı

USBR 5400'e göre dağılma deneyi, ASTM D 6572'de belirtilen dağılma deneyi yöntemi ile aynıdır. Ancak ASTM D 6572'de 2 mm göz açıklıklı (No 10) elek kullanılmasına rağmen USBR 5400'de 4,75 mm göz açıklıklı (No 4) elek kullanılmaktadır.

Dağılma deneyi çifte hidrometre deneyi ve iğne deliği deneyi ile birlikte kullanılmalıdır. Bazı durumlarda, iğne deliği, dağılma deneyi ve çifte hidrometre deneyi birbirini destekleyen sonuçlar vermez. İğne deliği deneyi doğrudan, fiziksel ve nitelik (büyüklük) deneyidir. Dağılma deneyi ve çifte hidrometre deneyleri ise, nitelik (özellik) deneyleri olduğundan, kullanımında bazı sınırlamalar vardır. Bundan dolayı etüt aşamasında dağılma özelliğinin saptanmasında iğne deliği deneyi esas deney, dağılma deneyi ise, yardımcı deney olarak kullanılırlar.

Deney numunesinin damıtık su ile olan reaksiyonuna bakılarak (Şekil 14.2), reaksiyon derecesi Çizelge 14.2'den bulunur.



Şekil 14.2 Zeminlerin reaksiyon dereceleri (Sol üst: 1. Derece, sağ üst: 2. Derece, Sol alt: 3. Derece, Sağ alt: 4. Derece)

Çizelge 14.2 - USBR 5400'e göre dağılma deneyinin reaksiyon derecesi

Reaksiyon Derecesi	Numunede Oluşan Belirtiler
1. Derece: Reaksiyon Yok	Zemin numunesi potanın dibinde sıg bir yığın şeklini alır. Çözelti içindeki çok ince danelerin (koloid) neden olduğu bulanıklık görülmez.
2. Derece: Az Reaksiyon	Zemin numunesi yüzeyindeki suda çok az bulanıklık görülür.
3. Derece: Orta reaksiyon	Özellikle potanın dibindeki ince yığında çok ince malzemelerin oluşturduğu gözle görülür bulut meydana gelir.
4. Derece: Kuvvetli Reaksiyon	Özellikle çok ince malzemelerin oluşturduğu bulut, genellikle deney kabının tabanını ince bir tabaka halinde kaplar. Aşırı durumlarda deney kabındaki su tamamen bulanık hale gelir.

1. Derece reaksiyon gösteren zeminler “Dağılma özelliği (dispersif) olmayan zemin”,
2. Derece reaksiyon gösteren zeminler “Ara zemin”,
3. Derece ve 4. Derece reaksiyon gösteren zeminler “Dağılma özelliği (dispersif) olan zemin” olarak adlandırılır.

14.2.4 BS 1377'ye göre dağılma deneyi talimatı

BS 1377'ye göre dağılma deneyi, ASTM D 6572'de belirtilen dağılma deneyi yöntemi ile aynıdır. Ancak, bazı farklar aşağıda verilmiştir:

Zemin numunesinin içine konulduğu damıtık suya, ASTM D 6572'de herhangi bir kimyasal katılmazken, BS 1377'de 1 L çözelti elde etmek için 0,04 g sodyum hidroksit eklenir (0,001 M, her litrede 1 mili eşitlikte).

BS 1377'ye göre dağılma deneyi, % 10 dan daha az kil ihtiva eden ve plastik indeksi 4 ve 4'ten küçük olan zeminlerde uygulanmaz.

Zemin numunesi yüksekliği 1,0 cm, genişliği ve derinliği 1,5 cm olan dikdörtgen şeklinde sıkıştırılır.

Sodyum hidroksit çözeltisi, zemin numunesinin üzerinde yüksekliğinin 2/3 ünü örtecekmiş gibi porselen kaplara doldurulur. Sıkıştırılan zemin numunesinin sodyum hidroksit çözeltisi ile yaptığı reaksiyon 5 ile 10 dakika boyunca gözlemlenir. Bu standartta ara zemin sınıflaması yoktur.

Zemin numunesinin sodyum hidroksit çözeltisi ile olan reaksiyonuna bakılarak (Şekil 14.1), reaksiyon derecesi Çizelge 14.3'ten bulunur.

Çizelge 14.3 - USBR 5400'e göre dağılma deneyinin reaksiyon derecesi

Reaksiyon Derecesi	Numunede Oluşan Belirtiler
1. Derece: Reaksiyon Yok	Zemin numunesi potanın dibinde sıg bir yığın şeklini alır. Çözelti içindeki çok ince danelerin (koloid) neden olduğu bulanıklık görülmez.
2. Derece: Az Reaksiyon	Zemin numunesi yüzeyindeki suda çok az bulanıklık görülür.
3. Derece: Orta reaksiyon	Özellikle potanın dibindeki ince yığında çok ince malzemelerin oluşturduğu gözle görülür bulut meydana gelir.
4. Derece: Kuvvetli Reaksiyon	Özellikle çok ince malzemelerin oluşturduğu bulut, genellikle deney kabının tabanını ince bir tabaka halinde kaplar. Aşırı durumlarda deney kabındaki su tamamen bulanık hale gelir.

1. Derece ve 2. Derece reaksiyon gösteren zeminler “Dağılma özelliği (dispersif) olmayan zemin,
 3. Derece ve 4. Derece reaksiyon gösteren zeminler “Dağılma özelliği (dispersif) olan zemin,
- olarak adlandırılır.

14.3 Dağılma deneyinin belirsizlik hesabı

Dağılma deneyi nitelik (özellik) deneyi olduğundan herhangi bir belirsizliği yoktur.

14.4 İlgili standartlar

ASTM D 6572: 2006. Standard test methods for determining dispersive Characteristics of clayey soils by the Crumb test

BS 1377: 1990. Soils for civil engineering purposes, Part 5, Compressibility, permeability and durability tests, 6.3 Crumb method, page 16.

TS 1900-2/T1: 2007. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.7.2, Dağılma deneyi.

USBR 5400: 1989. "Procedure for determining dispersibility of clayey soils by the crumb test method", Vol. 2, page 414 - 418.

15 Serbest (tek eksenli) basınç dayanımı deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

15.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-2, ASTM D 2166, CEN ISO/TS 17892-7, USBR 5720, BS 1377'ye göre tek eksenli basınç dayanımı deneyi anlatılmıştır.

15.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

15.2.1 TS 1900-1'e göre serbest basınç dayanımı deneyi talimatı

Bu deney, "TS 1900-2: 2006 ile TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.3, Deney 3: Serbest (tek eksenli) basınç dayanımının tayini" ne göre yapılmaktadır.

Bu deney ince daneli zeminlerin örselenmemiş veya sıkıştırılmış haldeki serbest basma dayanımının bulunması ile ilgilidir. Deney, çapı en az 50 mm, yüksekliği ise, çapının iki katı olan silindir şeklinde, doygun ve kılcal çatlak içermeyen kohezyonlu deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilmelidir. Zorunlu durumlarda, raporda belirtilmek şartıyla, deney çapı 35 mm olan numuneler üzerinde gerçekleştirilebilir. Bu deney, kumlu zeminler için elverişli değildir.

15.2.1.1 Gerekli araçlar

Çelik numune alıcılar, doğal veya sıkıştırılmış zeminden numune alabilecek, iç çapı 50 mm dış çapı ise, en fazla 56 mm olan (zeminde iri daneler varsa, numune alıcı çapı en iri dane çapının 6 katından büyük olmalıdır),

Numune itici, numuneyi tüpten çıkarmaya yarayan,

Kalıp, tüpten çıkan numuneyi korumak ve tıraşlamak için istenilen çap ve yükseklikte, iki parçalı,

Çelik kıl testere, numuneyi tıraşlamada kullanılacak,

Kumpas, verniyeli,

Kronometre,

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

Basma presi, motorla hidrolik veya mekanik olarak hareket ettirilebilen, uygulanan eşdeğer kuvveti 10 kPa doğrulukla gösterebilir özellikte olan. Cihaz 100 kPa'a kadar dayanımlar için 1 kPa, bundan dirençli numuneler için 5 kPa doğrulukta olacaktır,

Komparatör saati, 0,01 mm doğrulukla ölçüm yapabilen, kapasitesi en az numune yüksekliğinin % 20'si kadar olan,

Kuvvet (yük) halkası, deney numunesine uygulanan eksenel kuvveti 5 kPa doğrulukla ölçebilen.

Ayrıca, "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda belirtilen araçlar.

15.2.1.2 Deneyin yapılışı

Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler deneye "Madde 2 Deneyler için numune hazırlama talimatı" na göre hazırlanır.

Deney numunesi 0,01 g doğrulukla tartılır ve boyutları 0,1 mm doğrulukla ölçülür.

Numune presin alt platformuna merkezlenerek oturtulduktan sonra üst başlık numune üst yüzüne rahatça ve tam değecek şekilde indirilir. Boy değişmeyi ölçen komparatör saati, alt ve üst başlıklar arasına yerleştirilerek sıfırlanır.

Yüklemeye numunede dakikada % (0,5 - 2) arası birim boy kısalması oluşturacak biçimde yapılır. Kuvvet ve boy değiştirme okumaları uygun aralıklarda kaydedilir. Her durumda deney süresi 10 dakikayı geçmemelidir. Deney, numunede kesin göçme (kırılma) elde edilene, en büyük dayanımın belirlendiği yumuşak killerde ise, % 20 birim boy kısalmasına kadar sürdürülür.

Deney sona erdiğinde numunenin göçme şekli çizilerek, ölçülebiliyorsa, yatayla yaptığı açı bulunur.

Numune tekrar tartılarak "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" na göre su içeriği bulunur.

Deneyden elde edilen değerler "Dayanım deneyleri formu" na yazılır.

15.2.1.3 Hesaplamalar

Serbest basınç dayanımı q_u (kPa veya kg/cm²) aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$q_u = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\varepsilon}} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\frac{\Delta H}{H_0}}} = \frac{F}{\frac{A_0}{\frac{H_0 - \Delta H}{H_0}}} = \frac{F(H_0 - \Delta H)}{A_0 H_0}$$

Burada;

F	Numuneye uygulanan kuvvet (kN veya kg)
A	Numuneye uygulanan kuvvet anındaki numunenin kesit alanı (cm ²),
A ₀	Numunenin başlangıçtaki eksene dik alanı (cm ²),
ε	Birim şekil değiştirme (ΔH/H ₀),
H ₀	Numunenin başlangıçtaki uzunluğu (cm),
ΔH	Numunenin alanı A olduğu andaki boy kısalması (cm)

dır.

Eşitlikten hesaplanan göçme anındaki en büyük q_u değeri numunenin serbest basınç değeri olarak alınır.

15.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Numune boyutları, numunenin nasıl hazırlandığı (örselenmemiş, sıkıştırılmış), birim hacim ağırlık, su içeriği, serbest basınç dayanımı q_u (kPa veya kg/cm²) ile buna karşılık olan birim şekil değiştirme ve dikkate değer diğer gözlemler,
- Hesaplamalardan sonra gerilme (Mohr) daireleri ve birim şekil değiştirme - serbest basınç değerlerinin "Tek eksenli kesme deneyi" formuna çizimi.

15.2.2 ASTM D 2166'ya göre serbest basınç dayanımı deneyi talimatı

ASTM D 2166'ya göre serbest basınç dayanımı deneyinin yapılması, TS 1900-2'de belirtilen serbest basınç dayanımı deneyi ile aynıdır.

Ancak, deney numunesinin boyunun çapa oranı TS 1900-2'de 2 olması istenirken, ASTM D 2850'de bu oran 2 ile 2,5 arasında herhangi bir değer seçilebileceği belirtilmektedir.

ASTM D 2166'ya göre en küçük deney numunesi çapı 30 mm ve deney numunesi içindeki en büyük dane çapı deney numunesi çapının 1/10'u kadar olmalıdır. Deney numunesi çapı 72 mm'den büyük ise, deney numunesi içindeki en büyük dane çapı deney numunesi çapının 1/6'sı kadar olmalıdır

15.2.3 CEN ISO/TS 17892-7'ye göre serbest basınç dayanımı deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-7'ye göre tek eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılması, TS 1900-2'de belirtilen tek eksenli basınç dayanımı deneyi ile aynıdır.

Ancak, CEN ISO/TS 17892-7'de numune kesit alanının daire veya kare olabileceği, en küçük kesit alanının 1000 mm² (en küçük çap > 65,68 mm, karenin kenarı > 31,62 mm) olması gerektiği, silindirik şeklindeki numuneler için boyunun çapa oranı 1,8 ilâ 2,5, kare numuneler için 2 ilâ 2,8 olması, deney numunesi içindeki en büyük dane çapının deney numunesi çapının veya uzunluğunun 1/6'sı kadar olması gerektiği belirtilmektedir.

15.2.4 USBR 5720'ye göre serbest basınç dayanımı deneyi talimatı

USBR 5720'e göre tek eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılması, ASTM D 2850'de belirtilen üç eksenli basınç dayanımı deneyi ile aynıdır.

15.2.5 BS 1377'ye göre serbest basınç dayanımı deneyi talimatı

BS 1377'ye göre tek eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılması, TS 1900-2'de belirtilen tek eksenli basınç dayanımı deneyi ile aynıdır.

15.3 Serbest basınç dayanımı deneyinin belirsizlik hesabı

15.3.1 Serbest basınç dayanımı deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği

Rastgele belirsizlik istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Serbest basınç dayanımı deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi karşılaştırma deneyleri Çizelge 15.1'de verilmiştir.

Çizelge 15.1 - Laboratuvar içi karşılaştırma deneyleri sonuçları

	q_u kg/cm ²	ε %
Veri sayısı, n	5	5
En büyük	4,00	3,90
Ortanca	3,53	3,10
En Küçük	3,42	3,00
Ortalama, $\bar{x}$	3,614	3,280
Standart sapma, σ_{std}	0,242	0,363
Belirsizlik, $\sigma_{std}/\sqrt{n}$	0,11	0,16

Serbest basınç dayanımı deneyinin rastgele belirsizlik değeri, deney sayılarının az olmasından dolayı laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinden, q_u için elde edilen en yüksek değer olan 0,11 ve ε için elde edilen % 0,16 değerleri yerine emniyetli tarafta kalmak amacıyla bu iki değer artırılarak aşağıda verilen değerler alınmıştır.

Serbest basınç dayanımı değeri için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele (q_u)} = 0,15$

Birim şekil değişimi için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele (\varepsilon)} = 0,002 = \% 0,2$

15.3.2 Serbest basınç dayanımı deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizlik

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

15.3.2.1 Serbest basınç dayanımı eşitliğinin türevleri

Serbest basınç dayanımı deneyinin sistematik belirsizlikle ilgili elemanlarının kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$q_u = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\varepsilon}} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\frac{\Delta H}{H_0}}} = \frac{F}{\frac{A_0}{\frac{H_0 - \Delta H}{H_0}}} = \frac{F(H_0 - \Delta H)}{A_0 H_0} = \frac{F(H_0 - \Delta H)}{\frac{\pi D_0^2}{4} H_0} = \frac{4F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^2 H_0} = \frac{4F}{\pi D_0^2} - \frac{4F\Delta H}{\pi D_0^2 H_0}$$

ve

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial F} = \frac{4(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^2 H_0}$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial D_0} = -2 \frac{4F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^3 H_0} = \frac{-8F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^3 H_0}$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial H_0} = \frac{4F\Delta H}{\pi D_0^2 H_0^2}$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial \Delta H_0} = \frac{-4F}{\pi D_0^2 H_0}$$

ve

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta H} = \frac{1}{H_0}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial H_0} = -\frac{\Delta L}{H_0^2}$$

15.3.2.2 Serbest basınç dayanımı deneyinin kılçık diyagramı

Serbest basınç dayanımı deneyinin kılçık diyagramı Şekil 15.1'de verilmiştir.

15.3.2.3 Serbest basınç dayanımı deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları**15.3.2.3.1 kuvvet halkası**

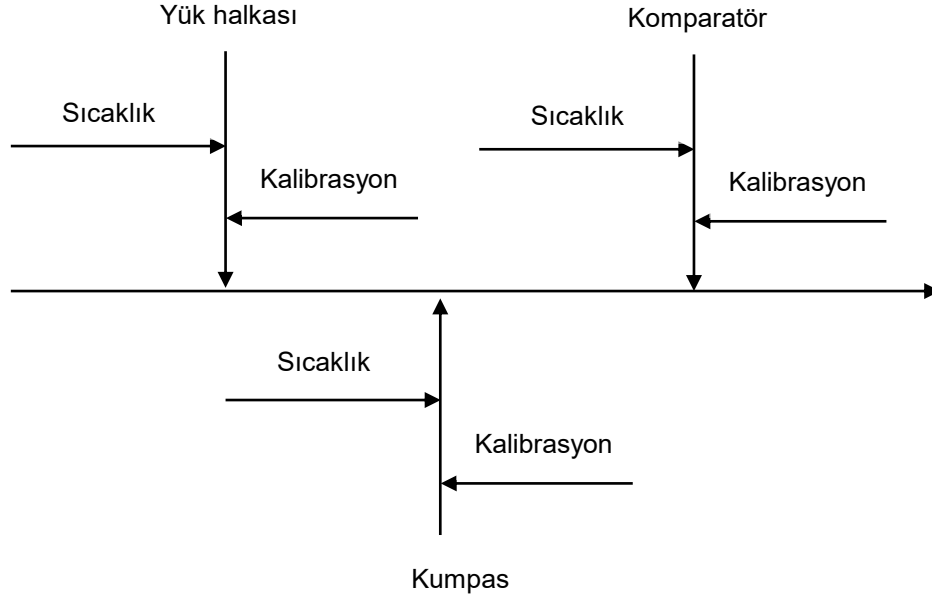
Kalibrasyon sertifikasında belirtilen en büyük belirsizlik miktarı kuvvet halkasının belirsizliği olarak alınmıştır. Örneğin:

$$3370 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 0,79 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0079 \cdot F / 2 = 0,00395F$$

$$3372 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 0,52 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0052 \cdot F / 2 = 0,0026F$$

$$3373 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 0,52 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0052 \cdot F / 2 = 0,0026F$$

$$3374 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 1,49 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0149 \cdot F / 2 = 0,00745F$$



Şekil 15.1 - Serbest basınç dayanımı deneyinin kılçık diyagramı

15.3.2.3.2 Kumpas

Numune çapı ve yüksekliği her deney öncesi ölçülmektedir. Ancak q_u hesabında çap olduğu için belirsizlikte çap değeri kullanılmıştır. Kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{MITUTOYO} \quad u_{\text{Kumpas}} = \pm (0,0120 \text{ mm} + 0,00001 * L \text{ mm}) \rightarrow k=2$$

$$u_{\text{Kumpas}} = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 * L \text{ mm}) = \pm (0,0006 \text{ cm} + 0,0000005 * L \text{ cm})$$

15.3.2.3.3 Komparatör

Deneyde kullanılan komparatör saatinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{MITUTOYO (0-25,4 mm)} \quad u_{\text{Komparatör}} = \pm 2 \mu\text{m} = \pm 0,002 \text{ mm} \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Komparatör}} = 0,002 / 2 = 0,001$$

15.3.2.3.4 Sıcaklık

Çelik bir malzemenin genleşme katsayısı $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ olduğundan, laboratuvarında oluşacak 15°C 'luk bir ısı farkı:

$$10^{-6} 15 = 1,5 * 10^{-5} \text{ mm}$$

olacağından, sıcaklık bütün hesaplamalarda ihmal edilerek **belirsizlik değeri sıfır alınmıştır**.

15.3.2.3.5 Terazi

Bu deney boyu çapının iki misli olan 3,8 cm ile 20 cm arasında değişen çaplı numunelerde yapılabildiği ve tüpten çıkan numunede ağırlığının önemi olmadığı (numune tüpten hafif veya ağır çıksa da deney yapılır) için terazi belirsizliği sıfır alınmıştır.

15.3.2.3.6 Etüv

Etüvün deneye etkisi yoktur çünkü örselenmiş numuneler deney sonrası su içeriği bulunması için etüve konulmaktadır. Ancak, su içeriğinin belirsizlik hesabı, "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda anlatılmıştır.

15.3.2.3.7 Elek

Örselenmemiş numuneler tüpten çıkarıldıktan sonra elenmediği için eleğin etkisi yoktur. Örselenmiş numune üzerinde ise, elek etkisi standart sıkıştırma (2,5 kg'lık tokmak kullanarak) deneyinde hesaba katıldığı için tekrar katılması gerekmez. Ayrıca DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda aynı araştırma numuneleri üzerinde farklı kişiler (6,3 ± 0,005) mm, (4,75 ± 0,2) mm ve (2,5 ± 0,1) mm göz açıklıklı eleklerle yaptığı çalışmalarda, üç eksenli basınç dayanımı deneyinden elde edilen değerler rastgele değiştiğinden (eleklerin etkisi hissedilmemiştir) örselenmiş numunelerde elek **belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır**.

15.3.2.3.8 Basma hızı

TS 1900-2 "Eksenel kısalma hızı, numunenin yaklaşık olarak (5 - 10) dakikalık bir sürede kopacağı biçimde seçilir" denildiği için **basma cihazının hız belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır**.

15.3.2.4 Serbest basınç dayanımı deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Serbest basınç dayanımı deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı aşağıda verilmiştir:

$$U_{\text{Sistematik}}(q_u) = \left[\left(\frac{\partial q_u}{\partial F} u_F \right)^2 + \left(\frac{\partial q_u}{\partial D_0} u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_u}{\partial H_0} u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_u}{\partial \Delta H} u_{\text{Komparatör}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

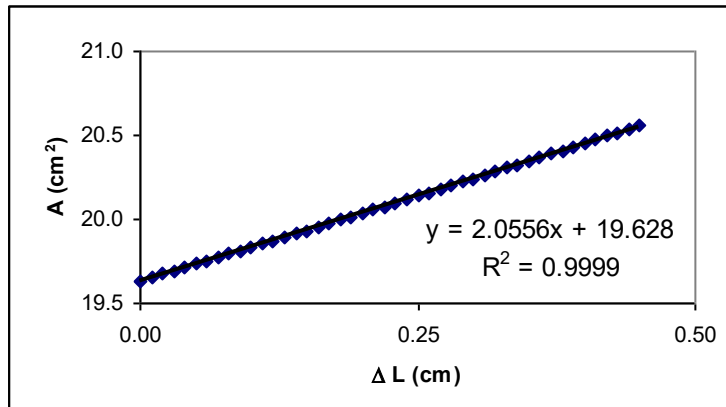
$$U_{\text{Sistematik}}(\varepsilon) = \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta H} * u_{\text{Komparatör}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial H_0} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

15.3.3 Serbest basınç dayanımı deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

Not - ΔH (cm) ile A (cm²) arasında bir ilişki olabileceği düşünülse, bile A yerine eşit olduğu değerler yazıldığı için ilişkinin belirsizlik hesabına katılmasına gerek yoktur. Şekil 15.2'de çapı 5 cm olan silindirik bir numunenin ΔH ile A arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 15.2 - Çapı 5 cm olan silindirik bir numunenin ΔH ile A arasındaki ilişki

15.4 Serbest basınç dayanımı deneyinin çözümlü örneği

15.4.1 Serbest basınç dayanımının (q_u) çözümlü örneği

15.4.1.1 Serbest basınç dayanımı deneyinden elde edilen veriler

Serbest basınç deneyinden elde edilen özet bilgiler Çizelge 15.2'de, kullanılan cihazların belirsizlikleri ise, Çizelge 15.3'te verilmiştir. Deneyde 3373 nolu kuvvet halkası kullanılmıştır.

Çizelge 15.2 - Serbest basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar

	F kg	ΔH cm	ε	A cm²	q_u kg/cm²
1. numune	69,40	0,33	0,0330	20,305	3,42

Çizelge 15.3 - Deneyde kullanılan cihazların belirsizlikleri (k = 2'ye bölünmüş)

Kuvvet halkası belirsizliği, U _F mm	0,0026F
Kumpas belirsizliği, U _{Kumpas} cm	0,0006 cm + 0,0000005*L cm
Komparatör belirsizliği, U _{Komparatör} mm	0,001

15.4.1.2 Serbest basınç dayanımı deneyinin hesaplamaları**15.4.1.2.1 Serbest basınç dayanımı değerinin hesaplanması**

$$q_u = \frac{4F(L_0 - L)}{\pi D_0^2 L_0} = \frac{4 * 69,4 * (10 - 0,33)}{\pi * 5^2 * 10} = 3,418 \text{ kg/cm}^2$$

15.4.1.2.2 Serbest basınç dayanımının rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, U_{Rastgele} (q_u) = 0,15 (karşılaştırma deneylerinden)

15.4.1.2.3 Serbest basınç dayanımının sistematik belirsizliği

Belirsizlik değerinin hesaplanması aşağıda gösterilmiştir:

$$U_F = 0,0026 * 69,4 = 0,18044$$

$$U_{Kumpas} = 0,0006 + 0,0000005 * 10 = 0,0006025$$

$$U_{Komparatör} = 0,001$$

Toplam belirsizlik, ilk deney için belirsizliklerin hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial q_u}{\partial F} = \frac{4(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^2 H_0} = \frac{4 * (10 - 0,33)}{\pi * 5^2 * 10} = 0,049$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial D_0} = \frac{-8F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^3 H_0} = - \frac{8 * 69,4 * (10 - 0,33)}{\pi * 5^3 * 10} = - 1,367$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial H_0} = \frac{4F\Delta H}{\pi D_0^2 H_0^2} = \frac{4 * 69,4 * 0,33}{\pi * 5^2 * 10^2} = 0,012$$

$$\frac{\partial q_u}{\partial \Delta H_0} = \frac{-4F}{\pi D_0^2 H_0} = - \frac{4 * 69,4}{\pi * 5^2 * 10} = -0,353$$

$$U_{Sistematik} (q_u) = [(0,049 * 0,18044)^2 + (-1,367 * 0,0006025)^2 + (0,012 * 0,0006025)^2 + (-0,353 * 0,001)^2]^{0,5}$$

$$U_{Sistematik} (q_u) = [(7,817 + 0,069 + 0,000 + 0,012) * 10^5]^{0,5} = (0,00007898)^{0,5}$$

$$U_{Sistematik} (q_u) = 0,00889 \cong 0,01$$

15.4.1.2.4 Serbest basınç dayanımının toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,15 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,01

Deneyin toplam belirsizliği, $U_{\text{Toplam}} = [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistemik belirsizlik})^2]^{0,5}$

$$= [(0,15)^2 + (0,01)^2]^{0,5} = 0,15$$

15.4.1.3 Serbest basınç dayanımı deneyinden elde edilen verilerin gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam}}(q_u) = 2 \cdot 0,15 = 0,30 \text{ kg/cm}^2$

Serbest basınç dayanımı, $q_u = (3,42 \pm 0,30) \text{ kg/cm}^2$

15.4.2 Birim şekil değiştirmenin (ε) çözümlü örneği**15.4.2.1 Deneyden elde edilen veriler**

Deneyden aşağıda verilen değer elde edilmiştir:

$$\varepsilon = 0,0330$$

15.4.2.2 Birim şekil değiştirmenin hesaplamaları**15.4.2.2.1 Birim şekil değiştirme değerinin hesaplanması**

Birim şekil değiştirme doğrudan deneyden $\varepsilon = 0,0330$ olarak elde edilmiştir.

15.4.2.2.2 Birim şekil değiştirme değerinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}}(\varepsilon) = 0,002 = \% 0,2$ (karşılaştırma deneylerinden)

15.4.2.2.3 Birim şekil değiştirme değerinin sistemik belirsizliği

$$\frac{\partial \varepsilon}{\Delta L} = \frac{1}{L_0} = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{L_0} = -\frac{\Delta L}{L_0^2} = -\frac{0,33}{10^2} = -0,0033$$

$$U_{\text{Sistemik}} = [(0,1 \cdot 0,001)^2 + (-0,0033 \cdot 0,0006025)^2]^{0,5} = 0,0001$$

15.4.2.2.4 Birim şekil değiştirme değerinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,002 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,0001

Deneyin toplam belirsizliği, $U_{\text{Toplam}} = [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistemik belirsizlik})^2]^{0,5}$

$$= [(0,002)^2 + (0,0001)^2]^{0,5} = 0,002$$

15.4.2.3 Birim şekil değiştirme sonuçlarının gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan, $kU_{\text{Toplam}}(\varepsilon) = 2 \cdot 0,002 = 0,004$

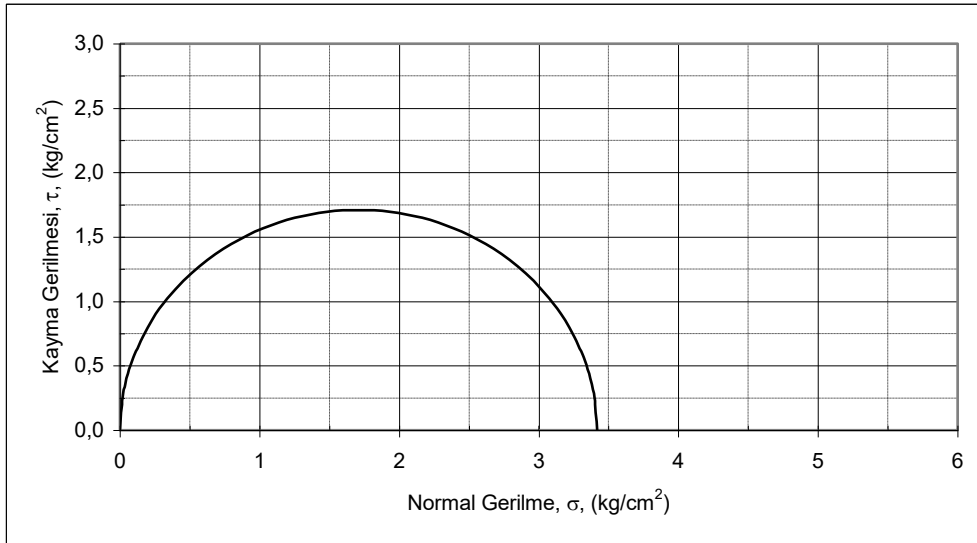
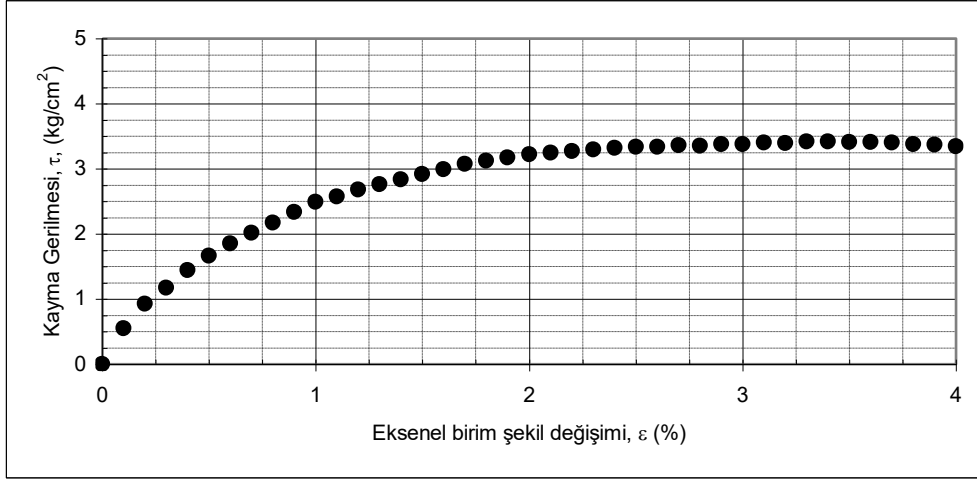
$$\varepsilon = \% (3,30 \pm 0,40)$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistemik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistemik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

Serbest basınç dayanımının deney sonucu Şekil 15.3'te gösterilmiştir.

SERBEST (TEK EKSENLİ) BASINÇ DENEYİ (*)

Numune no	-	Deney başlama tarihi	-
Kuyu / sondaj no	-	Deney bitiş tarihi	-
Deney standardı	TS 1900-2		
Deney numunesinin şekli	Silindir	Deney numunesinin yüksekliği, cm	10
Yükleme hızı (mm/dakika)	0,5	Deney numunesinin çapı, cm	5



q_u (kg/cm ²) =	3,42	±	0,30	ε (%) =	3,30	±	0,40
-------------------------------	------	---	------	---------------------	------	---	------

Şekil 15.3 - Serbest basınç dayanımı deneyinden elde edilen verilerin gösterilmesi

14.5 İlgili standartlar

ASTM D 2166: 2006. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, Vol. 04.08.

BS 1377; Part 7: 1990. Soils for civil engineering purposes, page 19, 7 Determination of unconfined compressive strength.

CEN ISO/TS 17892-7: 2004. "Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 7: Unconfined compression test on fine grained soils.

TS 1900-2: 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Deneyler, Madde 5.3 Deney 3: Serbest (tek eksenli) basınç dayanımının tayini.

USBR 5720: 1989. Procedure for performing unconfined compressive strength testing of soils, Vol. 2.

16 Üç eksenli basınç dayanımı (UU tipi) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

16.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-2, ASTM D 2850, CEN ISO/TS 17892-8, USBR 5745 ve BS 1377'ye göre üç eksenli hücrede boşluk suyu basıncı ölçülmeden konsolidasyonsuz - drenajsız (Unconsolidated - Undrained) olarak gerçekleştirilen üç eksenli basınç dayanımı deneyi anlatılmıştır.

16.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

16.2.1 TS 1900-1'e göre üç eksenli basınç dayanımı (UU tipi) deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2: 2006 ile TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Deneyler, 5.4 Deney 4: Kayma direncinin üç eksenli hücrede (konsolidasyonsuz - drenajsız) boşluk suyu basıncı ölçülmeden tayinine göre yapılmaktadır.

Bu deney, suya doygun kohezyonlu bir zeminin basınç dayanımının üç eksenli kesme cihazında, hücre basıncı belirli bir değerde tutularak ve su içeriğinin değişmesi önlenerek ölçülmesi ile ilgilidir. Bu deney örselenmemiş ve sıkıştırılmış numunelere uygulanır.

Deney, çapı en az 50 mm, yüksekliği ise, çapının iki katı olan silindirik deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilir. Zorunlu durumlarda, raporda belirtilmek şartıyla, deney, çapı 35 mm olan numuneler üzerinde gerçekleştirilebilir.

16.2.1.1 Gerekli araçlar

Kalıp, hazırlanacak numunenin boyutlarına uygun

Tıraşlama bıçağı,

Cetvel,

Tel testere,

Üç eksenli deney cihazı, TS 1900-2'ye uygun,

Lastik kılıf (membran),

Kılıf germe cihazı,

Lastik halkalar,

Terazi 0,01 g doğrulukla tartım yapabilen,

Örselenmemiş numuneye şekil vermek için gerekli araçlar,

Numuneyi tüpten çıkarmaya yarayan aletler,

Üç eksenli hücresi, deney numunesi boyutlarına uygun, 700 kPa ye kadar uygulanacak iç basınçlara dayanıklı,

Basınç sistemi, hücreyi dolduran akışkana istenilen basıncı 5 kPa doğrulukla uygulayabilecek ve bu basıncı belirli bir düzeyde tutabilecek,

Basma cihazı, deney numunesi, dakikada 0,01 mm ile 7,5 mm arasında değişebilen belirli bir hızla eksenel olarak sıkıştırılabilecek,

Komparatör, 0,01 mm doğrulukla ölçüm yapabilen, kapasitesi en az numune yüksekliğinin % 20'si kadar olan,

Kuvvet (yük) halkası, deney numunesine uygulanan ek basıncı 5 kPa doğrulukla verebilecek.

Ayrıca, “Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı” nda belirtilen araçlar.

16.2.1.2 Deneyin yapılışı

Örselenmiş ve örselenmemiş deney numuneleri “Madde 2 Deneyler için numune hazırlama talimatı” na göre hazırlanmalıdır.

Deney numunesi, alt başlık üzerine oturtulur; diğer başlık da numunenin üzerine yerleştirilir. Kılıf germe cihazı kullanılarak numunenin üzerine bir lastik kılıf geçirilir ve kılıf ile başlıklar arasının geçirimsizliği lastik halkalarla sağlanır.

Deney numunesi üç eksenli basınç cihazının hücresi tabanının ortasına oturtulur. Hücrenin parçaları yerlerine takılır; basma pistonunun bu işlem sırasında deney numunesinin üst başlığına düşmemesini sağlamak gerekir. Bundan sonra hücre, eksenel basmaya hazır duruma getirilir ve çevre basıncı için kullanılacak akışkan hücreye doldurulur. Hücre basıncı istenilen değere yükseltilir.

Basma cihazı, pistonun ucu numunenin üst başlık yatağından çok az yukarıda kalacak biçimde ayarlanır ve kuvvet ölçme göstergesinin ilk değeri kaydedilir. Bundan sonra basma cihazı, pistonun ucu numunenin üst başlık yatağına değecek şekilde ayarlanır ve numunenin eksenel şekil değiştirmesini ölçen komparatörün ilk değeri kaydedilir.

Eksenel şekil değiştirme hızı, numunenin yaklaşık olarak (5 - 10) dakikalık bir sürede göçeceği biçimde seçilir. Bundan sonra, basınç uygulanmaya başlanır ve gerilme - birim eksenel şekil değiştirme bağlantısını belirlemeye yetecek sayıda kuvvet halkası değeri okumaları ve bunlara karşılık olan eksenel şekil değiştirme okumaları alınır. Deney, en büyük eksenel gerilme değeri aşıldıktan veya eksenel birim şekil değiştirme % 20'ye ulaşıncaya kadar sürdürülür. Bundan sonra numune üzerindeki kuvvet kaldırılır ve kuvvet halkasının üzerindeki son okuma, ilk okumayı denetlemek amacıyla alınır.

Deney sırasında elde edilen değerler “Dayanım deneyleri formu” na yazılır.

Hücredeki akışkan boşaltılır ve hücre açılarak deney numunesi yerinden alınır. Numunenin üzerindeki kılıf çıkarılır ve numunenin son şekli resmedilir. Deney numunesi tartılır ve “Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı” na göre su içeriği hesaplanır.

15.2.1.1 Hesaplamalar

Eksenel asal gerilme farkı ($\sigma_1 - \sigma_3$) ve eksenel birim şekil değiştirme (ε) aşağıda verilen eşitliklerden hesaplanır:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{A_0}{1 - \varepsilon}} = \frac{F}{\frac{A_0}{1 - \frac{\Delta H}{H_0}}} = \frac{F}{\frac{A_0}{\left(\frac{H_0 - \Delta H}{H_0}\right)}} = \frac{F(H_0 - \Delta H)}{\frac{\pi D_0^2}{4} H_0} = \frac{4F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^2 H_0} = \frac{4F}{\pi D_0^2} - \frac{4F\Delta H}{\pi D_0^2 H_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

Burada;

$\sigma_1 - \sigma_3$ Asal gerilme farkı (kPa veya kg/cm²),

ε Eksenel birim şekil değiştirme ($\Delta H/H_0$),

F Numuneye uygulanan kuvvet (kN veya kg),

A_0 Numunenin deney başlangıcındaki kesit alanı (cm²),

A Boy değişikliği anındaki eksene dik alan (cm²),

H_0 Numunenin deney başlangıcındaki uzunluğu (cm),

ΔH Numunenin alanı A olduğu andaki boy kısalması (cm)

dır.

Deneyin herhangi bir safhasında asal gerilme farkı ($\sigma_1 - \sigma_3$), eksenel kuvveti, ilgili A alanına bölünerek bulunur.

Lastik kılıfın numune üzerindeki kısıtlayıcı etkisini hesaba katmak için düzeltme miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\Delta (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{4Et\varepsilon}{D}$$

Burada;

$\Delta (\sigma_1 - \sigma_3)$ Membran düzeltme miktarı (kg/cm² veya kPa),

E Membranın basınç modülü (tipik lateks membran için 14 kg/cm² veya 1400 kPa),

t Membran kalınlığı, (mm),

ε En büyük asal gerilme farkına karşılık olan eksenel birim boy değişimi,

D Numune çapı (mm)

dır.

Bu düzeltme miktarı, ölçülmüş olan en büyük asal gerilme farkından çıkarılarak, en büyük asal gerilme farkının düzeltilmiş değeri elde edilir.

16.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Numune boyutları, numunenin nasıl hazırlandığı (örselenmemiş, sıkıştırılmış), birim hacim ağırlık, su içeriği, çevre basıncı, en büyük asal gerilme farkı (kPa veya kg/cm²) ile buna karşılık olan birim şekil değiştirme ve dikkate değer diğer gözlemler,
- Hesaplamalardan sonra gerilme (Mohr) daireleri ve birim şekil değiştirme - asal gerilme farkı değerlerinin "Üç eksenli deneyi (UU tipi)" formuna çizimi.

16.2.2 ASTM D 2850'ye göre üç eksenli basınç dayanımı deneyi talimatı

ASTM D 2850'ye göre üç eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılması, TS 1900-2'de belirtilen üç eksenli basınç dayanımı deneyi ile aynıdır. Ancak, deney numunesinin boyunun çapa oranı TS 1900-2'de 2 olması istenirken, ASTM D 2850'de bu oran 2 ile 2,5 arasında herhangi bir değer seçilebileceği belirtilmektedir.

16.2.3 CEN ISO/TS 17892-8'e göre üç eksenli basınç dayanımı deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-8'e göre üç eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılması, TS 1900-2'de belirtilen üç eksenli basınç dayanımı deneyi ile aynıdır.

16.2.4 USBR 5745'e göre üç eksenli basınç dayanımı deneyi talimatı

USBR 5745'e göre üç eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılması, ASTM D 2850'de belirtilen üç eksenli basınç dayanımı deneyi ile aynıdır.

16.2.5 BS 1377'ye göre üç eksenli basınç dayanımı deneyi talimatı

BS 1377'ye göre üç eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılması, TS 1900-2'de belirtilen üç eksenli basınç dayanımı deneyi ile aynıdır.

Lastik kılıfın numune üzerindeki kısıtlayıcı etkisini hesaba katmak için düzeltme miktarı aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir:

$$\Delta (\sigma_1 - \sigma_3) = (-40\varepsilon^2 + 18\varepsilon) \frac{38}{D} \frac{t}{0,2} \frac{1}{10000} \quad (\varepsilon \text{ yüzde değildir})$$

16.3 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin belirsizlik hesabı**16.3.1 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Üç eksenli basınç dayanımı deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri Çizelge 16.1, Çizelge 16.2 ve Çizelge 16.3'te verilmiştir.

Çizelge 16.1 - Laboratuvar içi (1.) karşılaştırma deneyleri sonuçları

	$\sigma_1 - \sigma_3$								C	ϕ
	0,5 kg/cm ²	ε %	1 kg/cm ²	ε %	2 kg/cm ²	ε %	4 kg/cm ²	ε %		
Veri sayısı, n			18	17	18	17	17	17	15	17
En büyük			5,8	9,4	6,7	17,5	9,2	18,8	1,8	22,8
Ortanca			5,2	7,2	6,2	11,0	7,9	12,8	1,5	18,9
En Küçük			3,6	4,0	4,4	7,5	7,0	10,5	0,9	16,0
Ortalama, $\bar{x}$			4,79	7,14	5,96	11,66	7,85	12,92	1,410	19,529
Standart sapma, σ_{std}			0,77	1,25	0,63	2,54	0,54	1,94	0,3168	1,7382
Belirsizlik, $\sigma_{std}/\sqrt{n}$			0,18	0,30	0,15	0,62	0,13	0,47	0,08	0,42

Çizelge 16.2 - Laboratuvar içi (2.) karşılaştırma deneyleri sonuçları

	$\sigma_1 - \sigma_3$								C	ϕ
	0,5 kg/cm ²	ε %	1 kg/cm ²	ε %	2 kg/cm ²	ε %	4 kg/cm ²	ε %		
Veri sayısı, n	8	8	15	15	15	15	15	15	15	15
En büyük	4,05	9,50	4,38	12,30	4,78	14,90	5,37	16,50	1,70	13,00
Ortanca	3,41	6,40	3,66	8,80	4,04	11,40	4,89	13,70	1,40	8,20
En Küçük	3,16	5,20	3,30	6,00	3,67	9,90	4,08	11,50	1,15	5,90
Ortalama, $\bar{x}$	3,545	6,988	3,719	9,040	4,151	11,667	4,779	13,940	1,428	8,923
Standart sapma, σ_{std}	0,319	1,776	0,329	1,763	0,375	1,401	0,408	1,336	0,184	2,106
Belirsizlik, $\sigma_{std}/\sqrt{n}$	0,11	0,63	0,08	0,46	0,10	0,36	0,11	0,34	0,05	0,54

Çizelge 16.3 - Laboratuvarlar arası karşılaştırma deneyleri sonuçları

	$\sigma_1 - \sigma_3$								C	ϕ
	0,5 kg/cm ²	ε %	1 kg/cm ²	ε %	2 kg/cm ²	ε %	4 kg/cm ²	ε %		
Veri sayısı, n	4	3	8	5	8	5	8	5	8	8
En büyük	4,6	20,9	5,1	18,6	5,7	16,6	6,3	17,0	2,0	17,5
Ortanca	3,1	11,3	4,0	9,6	4,5	14,1	5,2	13,6	1,5	11,0
En Küçük	2,7	3,6	2,9	6,6	3,2	7,8	4,0	8,3	0,9	3,0
Ortalama, $\bar{x}$	3,4	11,9	3,9	11,0	4,5	13,8	5,1	13,2	1,5	10,5
Standart sapma, σ_{std}	0,83	8,63	0,82	4,71	0,93	3,60	0,97	3,37	0,35	4,53
Belirsizlik, $\sigma_{std}/\sqrt{n}$	0,42	4,98	0,29	2,10	0,33	1,61	0,34	1,51	0,12	1,60

Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinden ($\sigma_1 - \sigma_3$) için elde edilen en büyük değer olan 0,18 değeri ile ε için elde edilen % 0,63 değeri alınmıştır (karışıklığa neden olmamak için bütün asal gerilmeler için aynı değer alınmıştır). İlk karşılaştırma deneylerinde karşılaştırma deney sayıları az olduğundan, değerler yüksek olarak hesaplanmıştır. Özet veriler Çizelge 16.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 16.4 - Karşılaştırma deneylerinde elde edilen $U_{Rastgele}$ değerleri

	$\sigma_1 - \sigma_3$								C	ϕ
	0,5 kg/cm ²	ε %	1 kg/cm ²	ε %	2 kg/cm ²	ε %	4 kg/cm ²	ε %		
Laboratuvar içi (1.)			0,18	0,30	0,15	0,62	0,13	0,47	0,08	0,42
Laboratuvar içi (1.)	0,11	0,63	0,08	0,46	0,10	0,36	0,11	0,34	0,05	0,54
Laboratuvarlar arası	0,42	4,98	0,29	2,10	0,33	1,61	0,34	1,51	0,12	1,60
Rastgele belirsizlik	0,18	0,63	0,18	0,63	0,18	0,63	0,18	0,63		

Not - TS 1900-2'de C ve ϕ 'nin hesaplanması zorunlu olmadığından, bu değerler raporlarda bilgi amaçlı verilmektedir.

16.3.2 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

16.3.2.1 Üç ekseli basınç dayanımı eşitliğinin türevleri

Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin sistematik belirsizlikle ilgili elemanlarının kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\varepsilon}} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\frac{\Delta H}{H_0}}} = \frac{F}{\frac{A_0}{\left(\frac{H_0 - \Delta H}{H_0}\right)}} = \frac{F(H_0 - \Delta H)}{\frac{\pi D_0^2}{4} H_0} = \frac{4F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^2 H_0} = \frac{4F}{\pi D_0^2} - \frac{4F\Delta H}{\pi D_0^2 H_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial F} = \frac{4(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^2 H_0}$$

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial D_0} = -2 \frac{4F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^3 H_0} = -\frac{8F(H_0 - \Delta H)}{\pi D_0^3 H_0}$$

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial H_0} = \frac{4F\Delta H}{\pi D_0^2 H_0^2}$$

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \Delta H} = -\frac{4F}{\pi D_0^2 H_0}$$

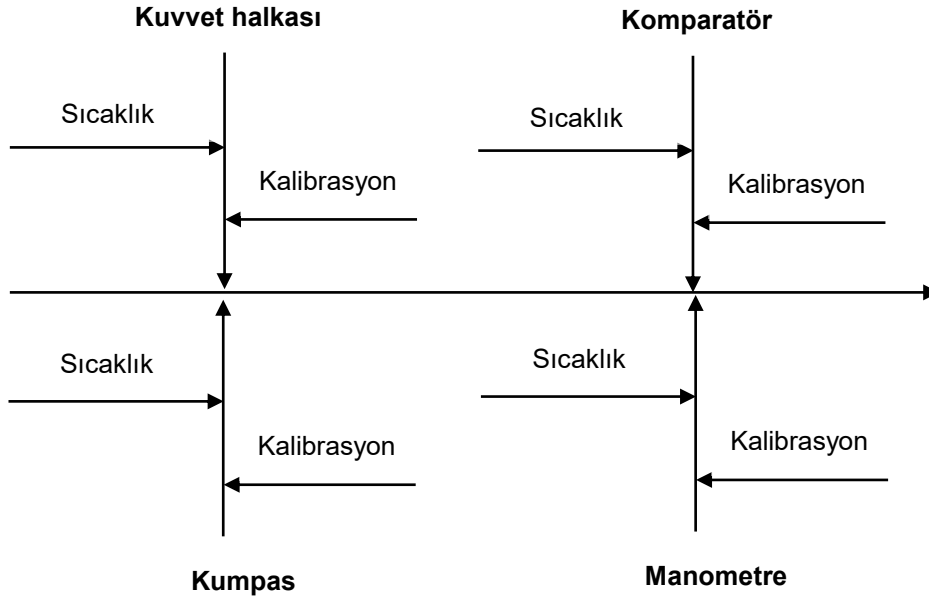
ve

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta H} = \frac{1}{H_0}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial H_0} = -\frac{\Delta H}{H_0^2}$$

16.3.2.2 Kılçık diyagramı

Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin kılçık diyagramı Şekil 16.1'de verilmiştir.



Şekil 16.1 - Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin kılçık diyagramı

16.3.2.3 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

16.3.2.3.1 Kuvvet halkası

Kalibrasyon sertifikasında belirtilen en büyük belirsizlik miktarı kuvvet halkasının belirsizliği olarak alınmıştır. Örneğin:

$$3370 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 0,79 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0079 \cdot F / 2 = 0,00395F$$

$$3372 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 0,52 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0052 \cdot F / 2 = 0,0026F$$

$$3373 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 0,52 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0052 \cdot F / 2 = 0,0026F$$

$$3374 \text{ nolu kuvvet halkası } u_F = \% 1,49 \cdot F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,0149 \cdot F / 2 = 0,00745F$$

16.3.2.3.2 Kumpas

Numune çapı ve yüksekliği her deney öncesi ölçülmektedir. Ancak σ_1 - σ_3 eşitliğinde çap olduğu için belirsizlikte çap değeri kullanılmıştır. Kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{MITUTOYO (0-300 mm)} \quad u_{\text{Kumpas}} = \pm (0,0120 \text{ mm} + 0,00001 \cdot L \text{ mm}) \rightarrow k=2$$

$$u_{\text{Kumpas}} = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 \cdot L \text{ mm}) = \pm (0,0006 \text{ cm} + 0,0000005 \cdot L \text{ cm})$$

16.3.2.3.3 Komparatör

Deneyde kullanılan komparatör saatinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{MITUTOYO (0-25,4 mm)} \quad u_{\text{Komparatör}} = \pm 2 \mu\text{m} = \pm 0,002 \text{ mm} \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Komparatör}} = 0,002 / 2 = 0,001$$

16.3.2.3.4 Manometre

Deneyde kullanılan komparatör saatinin kalibrasyon sertifikasında belirtilen toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir. Ancak, manometre belirsizliği sadece numuneye verilen çevre basınçlarında kullanılmalıdır.

$$\text{Standard test gauge (Budenberg)} \quad u_{\text{Manometre}} = \pm (0,0142 + 0,000041 \cdot \sigma_3) \rightarrow k = 2$$

$$u_{\text{Manometre}} = \pm (0,00765 + 0,0000205 \cdot \sigma_3)$$

16.3.2.3.5 Sıcaklık

Çelik bir malzemenin genleşme katsayısı $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ olduğundan, Laboratuvarında oluşacak 15°C 'luk bir ısı farkı $10^{-6} \cdot 15 = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ olacağından, sıcaklık bütün hesaplamalarda ihmal edilerek **belirsizlik değeri 0 (sıfır) alınmıştır**.

16.3.2.3.6 Terazı

Üç eksenli basınç dayanımı deneyi, boyu çapının iki misli olan 3,8 cm ile 20 cm arasında değişen çaplı numunelerde yapılabildiği ve tüpten çıkan numunede ağırlığının önemi olmadığı (numune tüpten hafif veya ağır çıksa deney yapılır) için **terazi belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır**.

16.3.2.3.7 Etüv

Etüvün deneye etkisi yoktur çünkü numuneler deney sonrası su içeriği bulunması için etüve atılmaktadır. Su içeriğinin belirsizlik hesabı ise, "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda anlatılmıştır.

16.3.2.3.8 Elek

Örselenmemiş numuneler tüpten çıkarıldıktan sonra elenmediği için eleğin etkisi yoktur. Örselenmiş numune üzerinde ise, elek etkisi standart sıkıştırma (2,5 kg'lık tokmak kullanarak) deneyinde hesaba katıldığı için tekrar katılması gerekmez. Ayrıca DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda aynı araştırma numuneleri üzerinde farklı kişilerin ($6,3 \pm 0,005$) mm, ($4,75 \pm 0,2$) mm ve ($2,5 \pm 0,1$) mm göz açıklıklı eleklerle yaptığı çalışmalarda, üç eksenli basınç dayanımı deneyinden elde edilen değerler rastgele değiştiğinden (eleklerin etkisi hissedilmemiştir) örselenmiş numunelerde **elek belirsizliği sıfır alınmıştır**.

16.3.2.3.9 Basma hızı

TS 1900-2 “Eksenel kısalma hızı, numunenin yaklaşık olarak 5-10 dakikalık bir sürede göçeceği biçimde seçilir” denildiği için **basma cihazının hız belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

16.3.2.4 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliklerin toplamı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$U_{\text{Sistematik } (\sigma_1 - \sigma_3)} = \left[\left(\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial F} * u_F \right)^2 + \left(\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial D_0} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial L_0} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \Delta L} * u_{\text{Komparatör}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

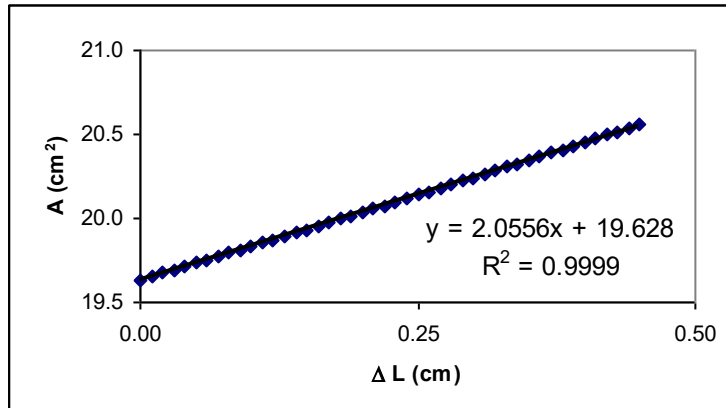
$$U_{\text{Sistematik } (\varepsilon)} = \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta L} * u_{\text{Komparatör}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial L_0} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

16.3.3 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

Not - ΔL (cm) ile A (cm²) arasında bir ilişki olabileceği düşünülse, bile A yerine eşit olduğu değerler yazıldığı için ilişkinin belirsizlik hesabına katılmasına gerek yoktur. Şekil 16.2’de, çapı 5 cm olan silindirik bir numunenin ΔL ile A arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 16.2 - Çapı 5 cm olan silindirik bir numunenin ΔL ile A arasındaki ilişki

16.4 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinin çözümlü örneği**16.4.1 Asal gerilme farkının ($\sigma_1 - \sigma_3$) çözümlü örneği****16.4.1.1 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinden elde edilen veriler**

3374 nolu kuvvet halkası kullanılarak gerçekleştirilen konsolidasyonsuz - drenajsız (UU) deneyinden elde edilen veriler Çizelge 16.5’te verilmiştir. Deneyde 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde silindirik deney numuneleri kullanılmıştır. Deneyde kullanılan cihazların belirsizlikleri Çizelge 16.6’da verilmiştir.

Çizelge 16.5 - Deneyden elde edilen sonuçlar

	σ_3 kg/cm ²	F kg	ΔH cm	ε	A cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{memb}$ kg/cm ²	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ kg/cm ²	σ_1 kg/cm ²
1. numune	0,50	76,40	0,53	0,0530	20,734	3,685	0,006	3,679	4,179
2. numune	1,00	83,05	0,88	0,0880	21,530	3,857	0,010	3,848	4,848
3. numune	2,00	96,89	1,30	0,1300	22,569	4,293	0,015	4,278	6,278
4. numune	4,00	122,36	1,65	0,1650	23,515	5,203	0,018	5,185	9,185

Çizelge 16.6 - Deneyde kullanılan cihazların belirsizlikleri (k = 2'ye bölünmüş)

Yük halkası belirsizliği, U_F kg/cm ²	0,00745F
Kumpas belirsizliği, U_{Kumpas} cm	0,0006 cm + 0,0000005*L cm
Komparatör belirsizliği, $U_{Komparatör}$ cm	0,0001
Manometre belirsizliği, $U_{Manometre}$ kg/cm ²	0,00765 + 0,0000205*p

16.4.1.2 Asal gerilme farkının hesaplamaları**16.4.1.2.1 Asal gerilme farkı**

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{4F(L_0 - L)}{\pi D_0^2 L_0} = \frac{4 * 76,4 * (10 - 0,53)}{\pi * 5^2 * 10} = 3,685 \text{ kg/cm}^2$$

16.4.1.2.2 Asal gerilme farkının rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,18$ (karşılaştırma deneylerinden)

16.4.1.2.3 Asal gerilme farkının sistematik belirsizliği

İlk deney numunesine ait belirsizliklerin hesaplanma metodu aşağıda gösterilmiştir.

$$U_F = 0,00745 * 76,4 = 0,5692$$

$$U_{Kumpas} = 0,0006 + 0,0000005 * 5 = 0,0006025$$

$$U_{Komparatör} = 0,0001 \text{ cm}$$

$$U_{Manometre} = 0,00765 + 0,0000205 * 0,5 = 0,00766$$

Diğer numuneler için cihazlardan gelen belirsizlik değerleri Çizelge 16.7'de verilmiştir.

Çizelge 16.7 - Cihazlardan gelen belirsizlik

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
U_F	0,56921	0,61870	0,72182	0,91156
U_{Kumpas}	0,0006025	0,0006025	0,0006025	0,0006025
$U_{Komparatör}$	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
$U_{Manometre}$	0,007660	0,007671	0,007691	0,007732

Toplam belirsizliğin ilk deney numunesi için hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial F} = \frac{4(L_0 - \Delta L)}{\pi D_0^2 L_0} = \frac{4 * (10 - 0,53)}{\pi * 5^2 * 10} = 0,04823$$

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial D_0} = -\frac{8F(L_0 - \Delta L)}{\pi D_0^3 L_0} = -\frac{8 * 76,4 * (10 - 0,53)}{\pi * 5^3 * 10} = -1,4739$$

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial L_0} = \frac{4F\Delta L}{\pi D_0^2 L_0^2} = \frac{4 * 76,4 * 0,53}{\pi * 5^2 * 10^2} = 0,00206$$

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \Delta L} = -\frac{4F}{\pi D_0^2 L_0} = -\frac{4 * 76,4}{\pi * 5^2 * 10} = -0,3891$$

$$U_{\text{Sistemik } (\sigma_1 - \sigma_3)} = [(0,0482 * 0,56921)^2 + (-1,474 * 0,0006025)^2 + (0,021 * 0,0006025)^2 + (-0,389 * 0,0001)^2]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistemik } (\sigma_1 - \sigma_3)} = [(75,27 + 0,0789 + 0,00000 + 0,00015) * 10^5]^{0,5} = (0,00007536)^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistemik } (\sigma_1 - \sigma_3)} = 0,027$$

16.4.1.2.4 Asal gerilme farkının toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,18 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,027

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistemik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(0,18)^2 + (0,027)^2]^{0,5} = 0,182 \end{aligned}$$

16.4.1.3 Asal gerilme farkı sonuçlarının gösterilmesi

% 95 güven aralığında k = 2 olduğundan $k U_{\text{Toplam } (\sigma_1 - \sigma_3)} = 2 * 0,182 = 0,364 \text{ kg/cm}^2$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (3,68 \pm 0,36) \text{ kg/cm}^2$$

Tüm deney numuneleri için sonuçlar Çizelge 16.8'de verilmiştir.

Çizelge 16.8 - Asal gerilme farkının ve belirsizlik değerleri

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{4F(L_0 - L)}{\pi D_0^2 L_0}$	3,685	3,857	4,293	5,203
$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial F} = \frac{4(L_0 - \Delta L)}{\pi D_0^2 L_0}$	0,0482	0,0464	0,0443	0,0425
$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial D_0} = -\frac{8F(L_0 - \Delta L)}{\pi D_0^3 L_0}$	-1,474	-1,543	-1,717	-2,081
$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial L_0} = \frac{4F\Delta L}{\pi D_0^2 L_0^2}$	0,021	0,037	0,064	0,103
$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \Delta L} = -\frac{4F}{\pi D_0^2 L_0}$	-0,389	-0,423	-0,493	-0,623
$U_{\text{Rastgele } (\sigma_1 - \sigma_3)}$	0,180	0,180	0,180	0,180
$U_{\text{Sistemik } (\sigma_1 - \sigma_3)}$	0,027	0,029	0,032	0,039
$U_{\text{Toplam } (\sigma_1 - \sigma_3)}$	0,182	0,182	0,183	0,184
$k U_{\text{Toplam } (\sigma_1 - \sigma_3)}$	0,364	0,364	0,366	0,368

16.4.2 Birim şekil değiştirmenin (ε) çözümlü örneği

16.4.2.1 Deneyden elde edilen veriler

Deneyden aşağıda verilen değer elde edilmiştir:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{0,53}{10} = 0,053$$

16.4.2.2 Birim şekil değiştirmenin hesaplamaları

16.4.2.2.1 Birim şekil değiştirme değerinin hesaplanması

Birim şekil değiştirme doğrudan deneyden $\varepsilon = 0,053$ olarak elde edilmiştir.

16.4.2.2.2 Birim şekil değiştirme değerinin rastgele belirsizliği

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{\text{Rastgele}}(\varepsilon) = 0,0063 = \% 0,63$ (karşılaştırma deneylerinden)

16.4.2.2.3 Birim şekil değiştirme değerinin sistematik belirsizliği

İlk deney numunesine ait belirsizliklerin hesaplanma metodu aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta L} = \frac{1}{L_0} = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial L_0} = -\frac{\Delta L}{L_0^2} = -\frac{0,53}{10^2} = -0,0053$$

$$U_{\text{Sistematik}}(\varepsilon) = [(0,1 * 0,001)^2 + (-0,0053 * 0,0006025)^2]^{0,5} = 0,0001$$

16.4.2.2.3 Birim şekil değiştirme değerinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,0063 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,0001

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam}} &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(0,0063)^2 + (0,0001)^2]^{0,5} = 0,0063 \end{aligned}$$

16.4.2.3 Birim şekil değiştirme sonuçlarının gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k=2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam}}(\varepsilon) = 2 * 0,0063 = 0,0126 = \% 1,26$

$$\varepsilon = \% (5,30 \pm 1,26)$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

Tüm deney numuneleri için sonuçlar Çizelge 16.9'da verilmiştir.

Çizelge 16.9 - Birim şekil değiştirmenin belirsizlik değerleri

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
ε	0,053	0,088	0,13	0,165
$\frac{\partial \varepsilon}{\Delta L} = \frac{1}{L_0}$	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
$\frac{\partial \varepsilon}{L_0} = -\frac{\Delta L}{L_0^2}$	-0,0053	-0,0088	-0,0130	-0,0165
$U_{Rastgele}(\varepsilon)$	0,00630	0,00630	0,00630	0,00630
$U_{Sistemik}(\varepsilon)$	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010
$U_{Toplam}(\varepsilon)$	0,006	0,006	0,006	0,006
$kU_{Toplam}(\varepsilon)$	0,013	0,013	0,013	0,013

16.4.3 Manometrenin belirsizliği

Manometre okumasının elde edildiği herhangi bir eşitlik bulunmamakta doğrudan cihazdan yapılmaktadır. Manometreden ayarlanan ilk değer 0,5 kg/m³ tür. Kalibrasyon sertifikasından okunan değer aşağıda verilmiştir:

$$U_{Toplam}(\sigma_3) (= u_{Manometre}) = 0,00765 + 0,0000205 * 0,5 = 0,00766$$

$$\% 95 \text{ güven aralığında } k = 2 \text{ olduğundan } kU_{Toplam}(\sigma_3) = 2 * 0,00766 = 0,0153$$

Tüm deney numuneleri için sonuçlar Çizelge 16.10'da verilmiştir.

Çizelge 16.10 - Manometre okumalarının belirsizlik değerleri

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
$U_{Toplam}(\sigma_3) (= u_{Manometre})$	0,007660	0,007671	0,007691	0,007732
$k U_{Toplam}(\sigma_3)$	0,0153	0,0153	0,0154	0,0155

16.4.4 Çevre basıncının çözümlü örneği

Çevre basıncının doğrudan manometre ile belirlendiğinden, çevre basıncının belirsizliği Madde 16.4.3'te belirtilen manometre belirsizliği ile aynıdır.

16.4.5 Eksenel basıncın çözümlü örneği

Eksenel basınç (σ_1), çevre basıncı (σ_3) ile asal gerilme farkının ($\sigma_1 - \sigma_3$) toplamına eşittir.

Deneyde ayarlanan ilk çevre basıncı (σ_3) 0,5 kg/cm²; bu değere karşı elde edilen asal gerilme farkının ($\sigma_1 - \sigma_3$) 3,68 kg/cm² olduğundan, eksenel değer aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,5 + 3,68 = 4,18 \text{ kg/cm}^2$$

Eksenel basıncın belirsizlik değeri basit olması için çevre basıncı (σ_3) ile asal gerilme farkının ($\sigma_1 - \sigma_3$) karelerinin toplamının kareköküne eşit olarak hesaplanmıştır.

$$U_{Toplam}(\sigma_1) = [(0,007660)^2 + 0,182]^2 = 0,182$$

$$\% 95 \text{ güven aralığında } k=2 \text{ olduğundan } kU_{Toplam}(\sigma_1) = 2 * 0,182 = 0,364$$

Tüm deney numuneleri için sonuçlar Çizelge 16.11'de verilmiştir.

Not - $U_{Toplam}(\sigma_1)$ in belirsizliği Ek B'de verilen yöntem kullanılarak da hesaplanabilirdi.

Çizelge 16.11 - Manometre okumalarının belirsizlik değerleri

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
$U_{\text{Toplam}} (\sigma_3)$	0,007660	0,007671	0,007691	0,007732
$U_{\text{Toplam}} (\sigma_1 - \sigma_3)$	0,182	0,182	0,183	0,184
$U_{\text{Toplam}} (\sigma_1)$	0,182	0,182	0,183	0,184
$kU_{\text{Toplam}} (\sigma_1)$	0,364	0,365	0,366	0,369

Not - Eksenel basınç (σ_1), çevre basıncı (σ_3) ile asal gerilme farkının ($\sigma_1 - \sigma_3$) toplamına eşittir olduğundan, belirsizlik değerinin hesaplanmasında Ek B'de verilen "Belirsizlik hesaplamalarının birleştirilmesinde kısa bir yol, Toplama ve çıkarma işlemleri" nde belirtilen yöntem de kullanılabilir.

Sonuç olarak, üç eksenli hücrede boşluk suyu basıncı ölçülmeden konsolidasyonsuz - drenajsız (Unconsolidated - Undrained) olarak gerçekleştirilen üç eksenli basınç dayanımı deneyinden elde edilen veriler ve belirsizlik değerleri özet olarak Çizelge 16.12'de verilmiş, örnek bir deney sonucu Şekil 16.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 16.12 - Üç eksenli basınç dayanımı deneyinden elde edilen veriler ve belirsizlik değerleri

σ_3 (kg/cm ²)	0,50	1,00	2,00	4,00
$U_{\text{Toplam}} (\sigma_3)$	0,02	0,02	0,02	0,02
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kg/cm ²)	3,68	3,86	4,29	5,20
$U_{\text{Toplam}} (\sigma_1 - \sigma_3)$	0,36	0,36	0,37	0,37
σ_1 (kg/cm ²)	4,18	4,86	6,29	9,20
$U_{\text{Toplam}} (\sigma_1)$	0,36	0,36	0,37	0,37

16.5 İlgili standartlar

ASTM D 2850: 2003. Standard test method for unconsolidated, undrained compressive strength of cohesive soils triaxial compression, Vol. 04.08.

BS 1377; Part 7: 1990. Soils for civil engineering purposes, page 22, 8 Determination of undrained shear-in triaxial compression without measurement of pore pressure (definitive method).

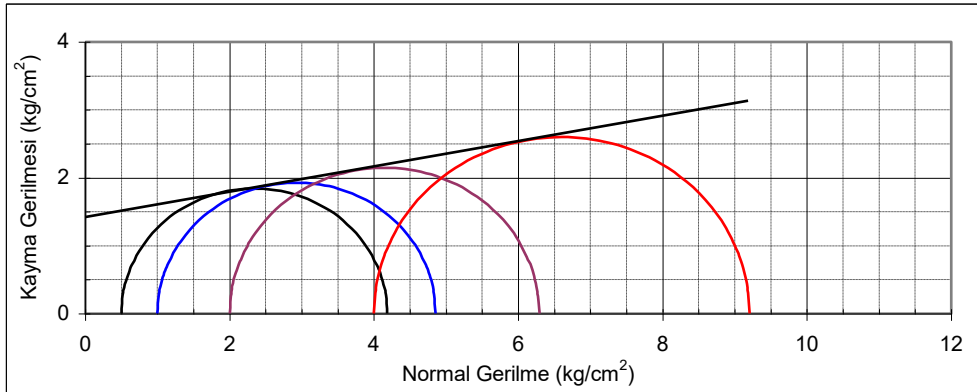
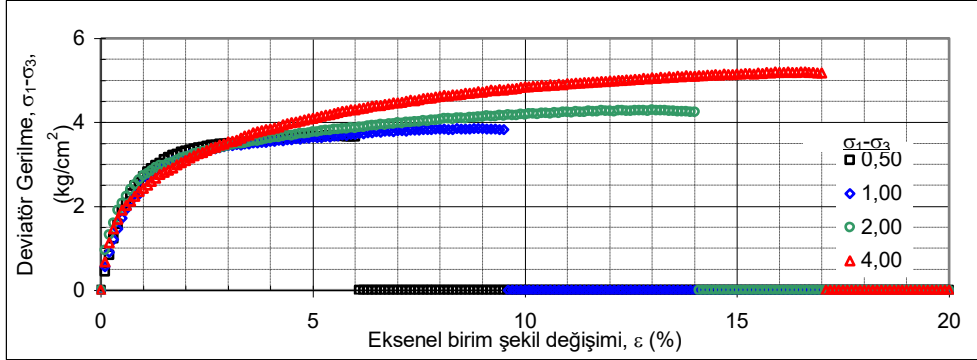
CEN ISO/TS 17892-8: 2004. "Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 8: Unconsolidated - undrained triaxial test.

TS 1900-2: 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Deneyler, 5.4 Deney 4: Kayma direncinin üç eksenli hücrede (konsolidasyonsuz - drenajsız) boşluk suyu basıncı ölçülmeden tayini.

USBR 5355: 1989. Procedure for performing unconsolidated - undrained triaxial shear testing of soils, Vol. 2.

ÜÇ EKSENLİ DENEYİ (UU TİPİ) (*)

Numune no	-	Deney başlama tarihi	-
Kuyu/sondaj no	-	Deney bitiş tarihi	-
Deney standardı	TS 1900-2		
Deney numunesinin şekli	Silindir	Kullanılan elek	No 4
Deney numunesinin boyu, cm	10	Yükleme hızı, mm/dakika	0,5
Deney numunesinin çapı, cm	5		



Toplam gerilmeye göre					Bilgi için	
σ_3 (kg/cm ²)	0,50	1,00	2,00	4,00	C, kg/cm ²	1,42
Belirsizlik	0,02	0,02	0,02	0,02	ϕ °	10,60
$\sigma_1 - \sigma_3$ (kg/cm ²)	3,68	3,85	4,28	5,18		
Belirsizlik	0,36	0,36	0,37	0,37		
σ_1 (kg/cm ²)	4,18	4,85	6,28	9,18		
Belirsizlik	0,36	0,36	0,37	0,37		
ε (%)	5,30	8,80	13,00	16,50		
Belirsizlik	1,26	1,26	1,26	1,26		

Şekil 16.3 - Üç eksenli basınç dayanımı (UU tipi) deneyinden elde edilen verilerin gösterilmesi

17 Kesme kutusu (direkt kesme) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

17.1 Kapsam

Bu talimatta, TS 1900-2, ASTM D 3080, CEN ISO/TS 17892-10, USBR 5725 ve BS 1377'ye göre kesme kutusu (direkt kesme) deneyi anlatılmıştır.

17.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

17.2.1 TS 1900-2'ye göre kesme kutusu deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2: 2006 ile TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.6 Deney 6: Kayma direncinin kesme kutusu ile tayini, ne göre yapılmaktadır

Deney en az üç numunenin farklı normal gerilmelerde konsolide edilmesinden sonra (veya konsolide edilmeden toplam gerilmeye göre) kesilmesi ile gerçekleştirilir. Buradan gelen sonuçlarla zeminin göçme doğrusu çizilir ve efektif gerilme parametreleri c' ve ϕ' ile kalıntı parametreler c_r ve ϕ_r bulunur

17.2.1.1 Gerekli araçlar

Kesme kutusu, TS 1900-2'ye uygun,

Gözenekli diskler, numunenin konsolidasyon ve kesme sırasında drenajını sağlayacak, ancak zemin danelerini geçirmeyecek, iki adet, kesme kutusu ebadında,

Çelik numune alıcılar, zemin numunelerin blok veya tüpten kesme kutusu boyutunda kesilip alınması için keskin uçlu, çelikten yapılmış halka,

Komparatör (düşey hareketi ölçmek için), numunenin konsolidasyon ve kesme aşamasında kabarma/çökmesini 0,004 mm doğrulukla ölçebilen mekanik komparatör saati veya elektronik transduser,

Komparatör (yatay hareketi ölçmek için), kesme aşamasında kesme kutusunun iki yarısı arasındaki hareketi 0,01 mm doğrulukla ölçebilen ve hareket kapasitesi 10 mm'den az olmayan mekanik komparatör saati ve/veya elektronik transduser ve okuyucusu,

Kuvvet (yük) ölçme aleti, çelik kuvvet halkası ve/veya kuvvet ölçer transduser ve okuyucusu, kapasitesi denenecek numunenin direncine uygun,

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

Kronometre, kesme hızını ölçmede kullanılır,

Silikon gresi, numune alıcıyı yağlamada kullanılır,

Ayrıca, "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" nda belirtilen araçlar.

Not - Desikatör içinde bulunan susuz silika jelin orijinal rengi değişme gösterdiğinde değiştirilmelidir

17.2.1.2 Deneyin yapılışı

Deneyin gerçekleştirildiği süre boyunca ortamın en büyük ve en düşük sıcaklıkları kaydedilmelidir. Deney ortamına mümkün olduğu kadar doğrudan güneş ışığına maruz kalmamalıdır.

Deney numunesinin içerdiği en büyük dane çapı, yüksekliğinin dörtte birinden büyük olmamalıdır.

Aynı zemin numunesi üzerinde üçten az sayıda deney yapılmamalıdır.

Deneylerde kesilen malzemenin bir başka deneyde kullanılmasından kaçınmak gereklidir.

Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler, Madde 2: Deneyler için numune hazırlama talimatı'na göre hazırlanır.

Deney numunesi kesme kutusunun içine yerleştirilir.

Kesme kutusunun parçaları birbirine bağlanır. Tutucular kesme yönüne ters olarak yerleştirilir.

Düşey kuvvet üzengisi çelik başlığın üzerindeki çelik bilyenin üzerine oturtulur

Deney başlangıç durumuna getirilir ve yatay hareket ölçer sıfırlanarak yerine konur.

Eksenel şekil değiştirmesi ölçer saat yerine takılıp yapılacak deney için aşağı ve yukarı yeterli hareket mesafesi sağlanarak sıfırlanır

Ağırlıklar konur (ağırlıklar hesaplanırken numune üzerine etki eden elemanların ağırlıkları göz önüne alınarak, mevcut ağırlıklardan çıkarılmalıdır) ve vidalar sıkılıp gevşetilir.

Kesme hızı deneyin (5 - 10) dakikada tamamlanacağı gibi uygulanır.

Kesme kutusunun iki yarısını bağlayan vidalar gevşetilerek alınır.

Deney sırasında sürtünmemeleri için kesme kutusunun iki yarısı üzerindeki ayar vidaları kullanılarak parçaların birbirinden 1 mm'yi geçmeyecek kadar ayrılması sağlanır.

Deneye başlamadan yatay hareket, düşey hareket ve kesme kuvveti sıfır okumaları kaydedilir

Deney sırasında kesme kutusunun iki parçasının ötelenmeleri gözlemlenir. Bağlı hareketin beklenenden fazla olduğu tespit edilirse, kesme hızı azaltılır.

En büyük yatay kuvvete erişildikten sonra da okumalara bir süre devam edilir. En büyük okumadan düşme olmazsa, kutunun en büyük hareketine erişildiğinde deney durdurulur

Bu işlemler istenen veya eşit aralıkta en az üç defa tekrarlanır.

Deney sonunda "Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" talimatına uygun olarak su içeriği belirlenir.

Deneyden elde edilen değerler "Dayanım deneyleri formu" na yazılır.

Gerilmeler numuneye % 1,5 doğrulukla uygulanır.

17.2.1.3 Hesaplamalar

Numune üzerine uygulanacak normal gerilme miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\sigma_n = \frac{F_v}{A}$$

Burada;

F_v Cihaza uygulanan ağırlıklardan elde edilen normal kuvvet (N veya kg)

A Deney numunesinin ilk kesit alanı (m^2 veya cm^2)

dir.

Yatay yönde oluşan kesme gerilmesi:

$$\tau = \frac{F(=F_h)}{A}$$

Burada;

F_h Yük halkasından elde edilen yatay yönde uygulanan kuvvet (N veya kg),

A Deney numunesinin ilk kesit alanı (m^2 veya cm^2)

dır.

Her deney sonunda bulunan σ_n değerlerine karşılık τ_{mak} değerleri çizilir.

İçsel sürtünme açısı ϕ elde edilen doğrunun x-ekseni ile yaptığı açıdan (tercihan en iyi kareler yöntemi kullanılarak), kohezyon C ise, doğrunun y-eksenini kestiği noktadan bulunur.

17.2.1.4 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Deney standardı ve kesme kutusu deneyinin hangi tipte yapıldığı (drenajlı, drenajsız),
- Numune boyutları, numunenin nasıl hazırlandığı (örselenmemiş, sıkıştırılmış), birim hacim ağırlık g/cm^3 olarak en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak, yüzde olarak su içeriği değerleri en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak, her deneyde numuneye uygulanmış normal gerilme ve buna karşılık gelen en büyük kayma direnci (kg/cm^2 olarak en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak veya kPa olarak en yakın 1 hanesine yuvarlatılarak), $mm/dakika$ olarak numuneye uygulanan basma makinası hızı,
- Her numune için boy kısalmasına (ΔL) karşılık kesme gerilme grafiği (τ) (aynı grafikte gösterilebilir), her numune için normal gerilmeye (σ_n) karşı en büyük kayma gerilmesi değerleri (τ_{mak}) grafiği (aynı grafikte gösterilebilir),
- Tercihan en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanan kayma direnci açısı ϕ en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak, kohezyon C ise, en yakın 1 kPa (veya 0,01 kg/cm^2) hanesine yuvarlatılarak belirtilir.

17.2.2 ASTM D 3080'e göre kesme kutusu deneyi talimatı

ASTM D 3080'e göre kesme kutusu deneyi, TS 1900-2'de belirtilen yöntem ile aynıdır. Ancak bazı farklılıklar aşağıda verilmiştir:

- Deney % 15 ile % 20 arasında yanal birim şekil değiştirmede sonlandırılmalıdır.
- Deney numunesi hem kare hem de dairesel kesitli olabilir.
- En küçük numune çapı veya kenar uzunluğu 50 mm veya en büyük dane çapının 10 katından daha düşük olmamalıdır (hangisi büyük ise).
- En küçük numune yüksekliği 12 mm ancak en büyük dane çapının 6 katından daha az olmamalıdır.
- En küçük çap/yükseklik veya kenar/yükseklik oranı 2:1 olmalıdır.
- Numune üzerine uygulanan en küçük normal gerilme 0,07 kg/cm^2 (7 kPa) olmalıdır.

17.2.3 CEN ISO/TS 17892-10'a göre kesme kutusu deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-10'a göre kesme kutusu deneyi, TS 1900-2'de belirtilen yöntem ile aynıdır. Ancak bazı farklılıklar aşağıda verilmiştir:

- Numune kesiti kare (kenar uzunluğu 60 mm) veya dairesel (çapı 70 mm) olabilir.
- Deney en büyük kesme gerilmesinde veya % 20 yanal birim şekil değiştirmede sonlandırılmalıdır.
- En küçük numune yüksekliği 10 mm ancak en büyük dane çapının 5 katından daha az olmamalıdır.
- En küçük çap/yükseklik veya kenar/yükseklik oranı en fazla 3:1 olmalıdır.

17.2.4 USBR 5725'e göre kesme kutusu deneyi talimatı

USBR 5725'e göre kesme kutusu deneyi, TS 1900-2'de belirtilen yöntemi ile aynıdır. Ancak, 4,75 mm göz açıklıklı (No 4) elekten geçen numuneler kullanılmalıdır.

17.2.5 BS 1377'ye göre kesme kutusu deneyi talimatı

BS 1377'ye göre kesme kutusu (direkt kesme) deneyi, TS 1900-2'de belirtilen yöntem ile aynıdır. Ancak bazı farklılıklar aşağıda verilmiştir:

- Numune kare şeklinde kenar uzunluğu 60 mm ilâ 100 mm, yüksekliği ise, 20 mm ilâ 25 mm olmalıdır.
- Deney sıcaklık değişimi ± 4 °C arasında olmalıdır.

17.3 Kesme kutusu deneyinin belirsizlik hesabı**17.3.1 Kesme kutusu deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Kesme kutusu deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi deneyleri Çizelge 17.1'de verilmiştir.

Çizelge 17.1 - Laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinden elde edilen en büyük kesme (τ_{mak}) değeri sonuçları

	σ_n								C	ϕ
	0,5 kg/cm ²	ΔL cm	1 kg/cm ²	ΔL cm	2 kg/cm ²	ΔL cm	4 kg/cm ²	ΔL cm		
Veri sayısı, n	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
En büyük	1,24	0,34	1,60	0,50	1,99	0,61	2,68	0,97	1,08	21,81
Ortanca	1,22	0,34	1,54	0,34	1,81	0,38	2,60	0,85	1,06	21,09
En Küçük	0,95	0,29	1,48	0,26	1,68	0,31	2,50	0,57	1,02	19,66
Ortalama, $\bar{X}$,	1,158	0,325	1,538	0,350	1,826	0,404	2,584	0,812	1,058	21,034
Standart sapma, σ_{std}	0,139	0,024	0,043	0,095	0,113	0,120	0,074	0,154	0,023	0,848
Belirsizlik, $\sigma_{std}/\sqrt{n}$	0,07	0,01	0,02	0,04	0,05	0,05	0,03	0,06	0,01	0,38

Kesme kutusu deneyinin rastgele belirsizlik değeri, deney sayılarının az olmasından dolayı, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinden her bir normal gerilme (σ_n) değeri için elde edilen en büyük kesme (τ_m) değeri olan 0,07 ve ΔL için elde edilen 0,06 değerleri yerine emniyetli tarafta kalmak amacıyla bu iki değer artırılarak aşağıda verilen değerler (karışıklığa neden olmamak için bütün normal gerilmeler için aynı değer) alınmıştır.

En büyük kesme değeri için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele}(\tau) = 0,1$

Yanal şekil değiştirme için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele}(\Delta L) = 0,06$

Benzer şekilde, normal gerilme (σ_n) değerinin belirsizliğine kollara konan ağırlıkların ölçme belirsizliği etkili olduğundan, doğrulama kartlarından tüm ağırlıkların ölçümünde elde edilen en büyük belirsizlik değeri alınmıştır.

Normal gerilme için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele (\sigma_n)} = 0,05$

17.3.2 Kesme kutusu deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

17.3.2.1 Kesme kutusu eşitliğinin türevleri

Kesme kutusu deneyi için ilgili elemanların kısmi türevleri aşağıda verilmiştir:

$$\sigma_n = \frac{\text{Kütle}}{\text{Alan}} = \frac{L_{1/1}W_{1/1}}{a^2} + \frac{L_{1/5}W_{1/5}}{a^2} = \frac{L_{1/1}W_{1/1} + L_{1/5}W_{1/5}}{a^2} \Rightarrow \sigma_n = \frac{L_{1/1}W_{1/1} + L_{1/5}W_{1/5}}{a^2}$$

$$\tau = \frac{\text{Yük}}{\text{Alan}} = \frac{F}{a^2}$$

ve

$$\text{Uzunluk} = \Delta L$$

Burada;

σ_n Normal gerilme (kPa veya kg/cm²),

$L_{1/1}$ Değeri 1 olan kol oranı,

$W_{1/1}$ 1/1 kola konan ağırlık miktarı (N veya kg),

$L_{1/5}$ Değeri 5 olan kol oranı,

$W_{1/5}$ 1/5 kola konan ağırlık miktarı (N veya kg),

a Kare şeklindeki numunenin bir kenar uzunluğu (cm),

τ Kesme gerilmesi (kPa veya kg/cm²),

F Uygulanan kuvvet (N veya kg),

ΔL Yatay olarak boy kısalması (cm)

dir.

$$\sigma_n = \frac{L_{1/1}W_{1/1} + L_{1/5}W_{1/5}}{a^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial L_{1/1}} = \frac{W_{1/1}}{a^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial W_{1/1}} = \frac{L_{1/1}}{a^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial L_{1/5}} = \frac{W_{1/5}}{a^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial W_{1/5}} = \frac{L_{1/5}}{a^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial a} = \frac{-2(L_{1/1}W_{1/1} + L_{1/5}W_{1/5})}{a^3}$$

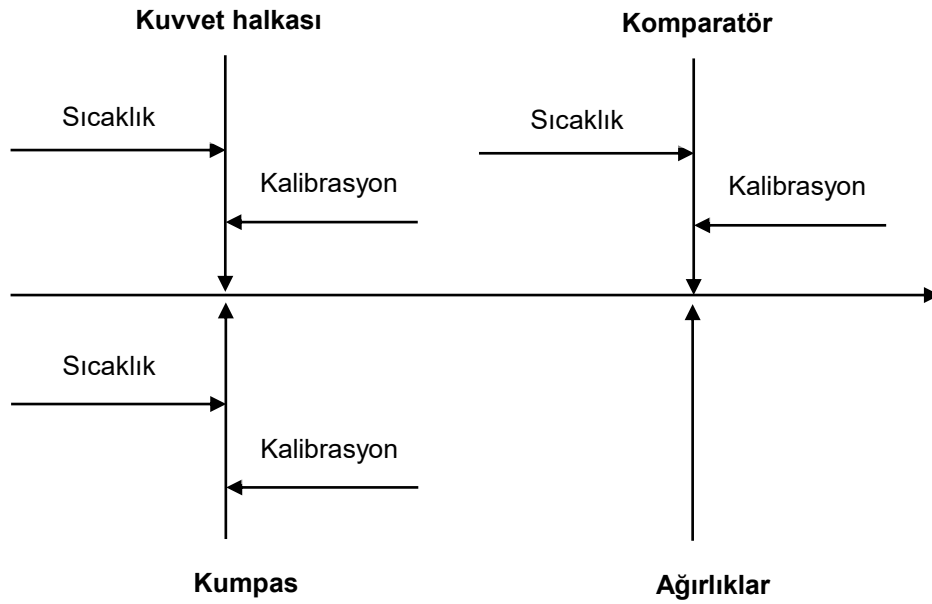
$$\tau = \frac{F}{a^2}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial F} = \frac{1}{a^2}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial a} = \frac{-2F}{a^3}$$

17.3.2.2 Kesme kutusu deneyinin kılçık diyagramı

Kesme kutusu deneyinin kılçık diyagramı Şekil 17.1'de verilmiştir.



Şekil 17.1 - Kesme kutusu deneyinin kılçık diyagramı

17.3.2.3 Kesme kutusu deneyinin sistematik belirsizlik kaynakları

17.3.2.3.1 Terazî

Deneyde iki farklı terazî kullanılmaktadır. Deney numunelerini tartmak için AND FX 3200 ve ağırlıklarını tartmak için ise, SARTORIUS QA60FEG-S kullanılmaktadır.

Bu deney farklı kenar uzunluklarına sahip örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirildiğinden, farklı kenar uzunluklarına sahip ve tüpten çıkan numunede ağırlılığının önemi olmadığı (numune tüpten hafif veya ağır çıksa deney yapılır) için numunelerin tartıldığı **terazi belirsizliği sıfır alınmıştır**. Ancak normal gerilmelerin hesaplandığı SARTORIUS QA60FEG-S marka terazisinin belirsizliğinin nasıl hesaplanacağı aşağıda verilmiştir.

17.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Kesme kutusu ağırlıkları ise, en fazla 35 kg'a kadardır. Bu terazinin toplam belirsizliği:

$$\text{SARTORIUS QA60FEG-S} \quad u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (8,16 + 1,93 * W) * 10^{-4} \text{ (W ve sonuçlar kg cinsinden)} \rightarrow k = 2$$

$$u_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (4,08 + 0,965 * W) * 10^{-4} \text{ (W ve sonuçlar kg cinsinden)}$$

17.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

SARTORIUS QA60FEG-S için 1 g = 0,001 kg (yük kg olarak belirsizliğe gireceği için okunabilirlik kg alınmıştır)

$$\rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,001 / \sqrt{3} = 0,0005774$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

17.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

SARTORIUS QA60FEG-S marka terazinin tekrarlanabilirlik değerleri elimizde olmadığından CHYO MP 3000 terazinin 10 katı olan 0,1 alınmıştır.

Not - Belirsizlik hesaplamalarına 0,0001 kg olarak alınmalıdır çünkü ilgili terazinin kalibrasyon sertifikasında belirsizlik miktarı kg cinsinden verilmiştir.

CHYO MP 3000 model terazide 100 g ağırlığındaki zemin numunesi tartılmaktadır. İstatistiki analiz Çizelge 17.2'de verilmiştir.

Çizelge 17.2 - Deneyde kullanılan terazilerden elde edilen belirsizlik değerleri

	CHYO MP 3000
Ölçüm sayısı, n	63
Ortalama, $\bar{x}$	99,91
Standart sapma, σ_{Std}	0,08
Belirsizlik, $\sigma_{\text{Std}} / \sqrt{n}$	0,01

17.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$\text{Terazinin toplam belirsizliği, } u_{\text{Terazi}} = [(\text{kalibrasyon})^2 + (\text{okunabilirlik})^2 + (\text{tekrarlanabilirlik})^2]^{0,5}$$

17.3.2.3.2 kuvvet halkası

Kalibrasyon sertifikasında belirtilen en büyük belirsizlik miktarı kuvvet halkasının belirsizliği olarak alınmıştır. Örneğin:

$$\text{Marutu 10852S nolu kuvvet halkası (100 kg) } u_F \cong \% 0,5F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,005F / 2 = 0,0025F$$

$$\text{Marutu 10855S nolu kuvvet halkası (200 kg) } u_F \cong \% 0,2F \rightarrow k = 2 \rightarrow u_F = 0,002F / 2 = 0,001F$$

17.3.2.3.3 Kumpas

Numune çapı ve yüksekliği her deney öncesi ölçülmektedir. Kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$\text{MITUTOYO} \quad u_{\text{Kumpas}} = \pm (0,0120 \text{ mm} + 0,00001 * L \text{ mm}) \rightarrow k = 2$$

$$u_{\text{Kumpas}} = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 * L \text{ mm}) = \pm (0,0006 \text{ cm} + 0,0000005 * L \text{ cm})$$

17.3.2.3.4 Komparatör (yatay ve düşey)

Komparatör (yatay ve düşey Mitutoyo marka komparatör saatlerinin en büyük belirsizlik değeri 3,4 µm olmasına karşı, emniyetli tarafta kalmak için 5 µm olarak alınmıştır:

$$\text{MITUTOYO (0-25,4 mm)} \quad u_{\text{Komparatör}} = \pm 5 \mu\text{m} = \pm 0,005 \text{ mm} \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Komparatör}} = 0,005 / 2 = 0,0025$$

Deneyde kullanılan OSIO marka komparatör saatinin belirsizlik değeri 4,5 µm olmasına karşı, emniyetli tarafta kalmak için 5 µm olarak alınmıştır:

$$\text{OSIO (0-10 mm)} \quad u_{\text{Komparatör}} = \pm 5 \mu\text{m} = \pm 0,005 \text{ mm} \rightarrow k = 2 \rightarrow u_{\text{Komparatör}} = 0,005 / 2 = 0,0025$$

17.3.2.3.5 Sıcaklık

Çelik bir malzemenin genleşme katsayısı $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ olduğundan, Laboratuvarda oluşacak 15 °C'luk bir ısı farkı:

$10^{-6} \cdot 15 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ mm olacağından, sıcaklık bütün hesaplamalarda ihmal edilerek **belirsizlik değeri sıfır alınmıştır**.

17.3.2.3.6 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

17.3.2.3.6 Elek

Örselenmemiş numuneler tüpten çıkarıldıktan sonra elenmediği için eleğin etkisi yoktur. Örselenmiş numune üzerinde ise, elek etkisi Madde 14'te anlatılan standart sıkıştırma (2,5 kg'lık tokmak kullanarak) deneyinde hesaba katıldığı için tekrar katılması gerekmez. Ayrıca DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda aynı araştırma numuneleri üzerinde farklı kişilerin (6,3 ± 0,005) mm, (4,75 ± 0,2) mm ve (2,5 ± 0,1) mm göz açıklıklı eleklerle yaptığı çalışmalarda, üç eksenli basınç dayanımı deneyinden elde edilen değerler rastgele değiştiğinden (eleklerin etkisi hissedilmemiştir) örselenmiş numunelerde elek katılmamıştır.

17.3.2.3.8 Basma cihazının hızı

TS 1900-2 "... numunenin yaklaşık olarak (5-10) dakikalık bir sürede göçeceği biçimde seçilir" denildiği için basma cihazının hızı sıfır alınmıştır.

17.3.2.3.9 Ağırlıkların etkisi

Kesme kutusu (direkt kesme) deneyi bir kenarı 6 cm olan kare şeklindeki numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Kesme kutusu (direkt kesme) cihazında, numune üzerine uygulanmak istenilen basınç değeri üç farklı kol oranı ile numuneye uygulanmaktadır. Bunlar kolun kendi ağırlığı, 1/1 kol oranı ve 1/5 kol oranı olup, basınç değerlerine göre uygulanması gerekli ağırlıklar Çizelge 17.3'te verilmiştir:

Çizelge 17.3 - Kol oranına göre uygulanması gereken ağırlıklar

İstenilen basınç kg/cm ²	Kol ağırlığı kg	1/1 kol	1/5 kol	Toplam kg
0,5	7,5	1 adet 0,5 kg = 0,5 kg 2 adet 1 kg = 2 kg 2 adet 4 kg = 8 kg	-	7,5+0,5+2+8 = 18
1	25	1 adet 1 kg = 1 kg	1 adet 2 kg = 10 kg	25+1+10 = 36
2	25	1 adet 2 kg = 2 kg	2 adet 4 kg = 40 kg 1 adet 1 kg = 5 kg	25+2+40+5 = 72
3	25	1 adet 3 kg = 3 kg	1 adet 16 kg = 80 kg	25+3+80 = 108
4	25	1 adet 4 kg = 4 kg	1 adet 16 kg = 80 kg 1 adet 4 kg = 20 kg 3 adet 1 kg = 15 kg	25+4+80+20+15 = 144

17.3.2.3.10 Kol oranı etkisi

Konsolidasyon aletinin yapıldığı frezenin okunabilirliği 0,02 mm (1/50) olduğundan ve freze kalibresi olmadığından, belirsizlik olarak aşağıda verilen değer alınmıştır:

$$U_{Kol} = 0,02$$

17.3.2.4 Kesme kutusu deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliklerin toplamı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$U_{Sistematik (\tau)} = \left[\left(\frac{\partial \tau}{\partial F} * u_F \right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial a} * u_{kumpas} \right)^2 \right]^{0,5}$$

$$U_{Sistematik (\Delta L)} = U_{Komparatör}$$

17.3.3 Kesme kutusu deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

17.4 Kesme kutusu deneyinin çözümlü örneği**17.4.1 Normal gerilmenin (σ_n) çözümlü örneği****17.4.1.1 Kesme kutusu deneyinden elde edilen veriler**

10852S nolu kuvvet halkası kullanılarak gerçekleştirilen kesme kutusu deneyinden elde edilen veriler Çizelge 17.4'te verilmiştir. Deney numunesi bir kenarı 6 cm olan kare şeklindedir. Yüksekliği ise, 2 cm'dir. Deneyde kullanılan cihazların belirsizlikleri Çizelge 17.5'te verilmiştir.

Çizelge 17.4 - Deneyden elde edilen sonuçlar

	σ_n kg/cm ²	F kg	τ kg/cm ²	ΔL cm	1/1 Kol ağırlığı kg	1/5 Kol ağırlığı kg
1. numune	0,50	44,22	1,23	0,37	18	0
2. numune	1,00	54,91	1,53	0,28	26	2
3. numune	2,00	65,22	1,81	0,43	27	9
4. numune	4,00	94,34	2,62	0,95	29	23

Çizelge 17.5 - Deneyde kullanılan cihazların belirsizlikleri (k = 2'ye bölünmüş)

Yük halkası belirsizliği, u_F	0,0025F
Kumpas belirsizliği, u_{kumpas} cm	0,0006 cm + 0,0000005*L cm
Komparatör belirsizliği, $u_{Komparatör}$ mm	0,0025
Terazi belirsizliği, u_{Terazi} kg 1/1 kola konan ağırlıklardan 1/5 kola konan ağırlıklardan	$[(4,08 \cdot 10^{-4} + 0,965 \cdot 10^{-4} \cdot 18)^2 + (0,001 / \sqrt{3})^2 + 0,0001^2]^{0,5} = 0,0022$ 0

$$U_F = 0,0025 * 44,22 = 0,11055$$

$$U_{kumpas} = 0,0006 + 0,0000005 * 6 = 0,000605$$

$$U_{Komparatör} = 0,0025$$

$$U_{Terazi (W), 1/1} = 0,0022$$

$$U_{Kol oranı (L), 1/1} = 0,02$$

$$U_{Terazi (W), 1/5} = 0$$

$$U_{Kol oranı (L), 1/5} = 0,02$$

17.4.1.2 Normal gerilmenin hesaplamaları

17.4.1.2.1 Normal gerilme

Belirsizlik değerleri ilk numune için belirsizliklerin hesaplanması aşağıda gösterilmiş, diğer numuneler için Çizelge 17.6'da verilmiştir.

$$\sigma_n = \frac{L_{1/1} W_{1/1} + L_{1/5} W_{1/5}}{a^2} = \frac{1 * 18 + 5 * 0}{6^2} = 0,5 \text{ kg/cm}^2$$

17.4.1.2.2 Normal gerilmenin rastgele belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı $U_{Rastgele (\sigma_n)} = 0,05$ (karşılaştırma deneylerinden)

17.4.1.2.3 Normal gerilmenin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial L_{1/1}} = \frac{W_{1/1}}{a^2} = \frac{18}{6^2} = 0,5$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial W_{1/1}} = \frac{L_{1/1}}{a^2} = \frac{1}{6^2} = 0,0278$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial L_{1/5}} = \frac{W_{1/5}}{a^2} = \frac{0}{6^2} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial W_{1/5}} = \frac{L_{1/5}}{a^2} = \frac{5}{6^2} = 0,1389$$

$$\frac{\partial \sigma_n}{\partial a} = \frac{-2(L_{1/1} W_{1/1} + L_{1/5} W_{1/5})}{a^3} = \frac{-2(1 * 18 + 5 * 0)}{6^3} = -0,1667$$

$$U_{Sistematik (\sigma_n)} = [(0,5 * 0,02)^2 + (0,0278 * 0,0022)^2 + (0 * 0,02)^2 + (0,1389 * 0)^2 + (-0,1667 * 0,000605)^2]^{0,5}$$

$$= [(10,00 + 0,0004 + 0 + 0 + 0,0001) * 10^5]^{0,5} = (0,00007536)^{0,5} = 0,01$$

17.4.1.2.4 Deneyin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,05 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,01

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam } (\sigma_n)} = [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5}$$

$$= [(0,05)^2 + (0,01)^2]^{0,5} = 0,05$$

17.4.2.3 Sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam } (\sigma_n)} = 2 * 0,05 = 0,1 \text{ kg/cm}^2$

$$\sigma_n = (0,5 \pm 0,1) \text{ kg/cm}^2$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

Bütün deney numuneleri için belirsizlik değerleri Çizelge 17.6'da verilmiştir.

Çizelge 17.6 - Normal gerilme değeri için belirsizlik hesabı

$\sigma_n = \frac{L_{1/1}W_{1/1} + L_{1/5}W_{1/5}}{a^2}$	0,50	1,00	2,00	4,00
$\frac{\partial \sigma_n}{\partial L_{1/1}} = \frac{W_{1/1}}{a^2}$	0,500000	0,722222	0,750000	0,805556
$\frac{\partial \sigma_n}{\partial W_{1/1}} = \frac{L_{1/1}}{a^2}$	0,027778	0,027778	0,027778	0,027778
$\frac{\partial \sigma_n}{\partial L_{1/5}} = \frac{W_{1/5}}{a^2}$	0,000000	0,055556	0,250000	0,638889
$\frac{\partial \sigma_n}{\partial W_{1/5}} = \frac{L_{1/5}}{a^2}$	0,138889	0,003858	0,003858	0,003858
$\frac{\partial \sigma_n}{\partial a} = \frac{-2(L_{1/1}W_{1/1} + L_{1/5}W_{1/5})}{a^3}$	-0,166667	-0,333333	-0,666667	-1,333333
$U_{L1/1}$	0,020	0,020	0,020	0,020
$U_{W1/1}$	0,002224	0,002975	0,003070	0,003260
$U_{L1/5}$	0,020	0,020	0,020	0,020
$U_{W1/5}$	0,000000	0,000839	0,001404	0,002692
U_a	0,000603	0,000603	0,000603	0,000603
$U_{\text{Rastgele } (\tau)}$	0,050000	0,050000	0,050000	0,050000
$U_{\text{Sistematik } (\tau)}$	0,010001	0,014489	0,015817	0,020579
$U_{\text{Toplam } (\tau)}$	0,0510	0,0521	0,0524	0,0541
$k U_{\text{Toplam } (\tau)}$	0,10	0,10	0,10	0,11

17.4.2 Kesme gerilmesinin (τ) çözümlü örneği

17.4.2.1 Deneyden elde edilen veriler

Madde 17.4.1.1'de verilmiştir.

17.4.2.2 Kesme gerilmesinin hesaplamaları

17.4.2.2.1 Kesme gerilmesi

Belirsizlik değerleri ilk numune için belirsizliklerin hesaplanması aşağıda gösterilmiş, diğer numuneler için Çizelge 17.7'de verilmiştir.

$$\tau = \frac{F}{a^2} = \frac{44,22}{6^2} = 1,23 \text{ kg/cm}^2$$

17.4.2.2.2 Kesme gerilmesinin rastgele belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı $U_{\text{Rastgele } (\tau)} = 0,1$ (karşılaştırma deneylerinden)

17.4.2.2.3 Kesme gerilmesinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial \tau}{\partial F} = \frac{1}{a^2} = \frac{1}{6^2} = 0,02778$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial a} = \frac{-2F}{a^3} = \frac{-2 * 44,22}{6^3} = -0,4094$$

$$U_F = 0,0025 * 44,22 = 0,11055$$

$$U_{\text{kumpas}} = 0,0006 + 0,0000005 * 6 = 0,000603$$

$$U_{\text{Sistemik } (\tau)} = [(0,0278 * 0,11055)^2 + (-0,4094 * 0,000603)^2]^{0,5} = [(0,945 + 0,0061) * 10^5]^{0,5} = 0,0031$$

17.4.2.2.4 Kesme gerilmesinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,1 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistemik belirsizliklerin toplamı = 0,0031

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam } (\tau)} &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(0,1)^2 + (0,0031)^2]^{0,5} = 0,1 \end{aligned}$$

17.4.2.3 Sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $kU_{\text{Toplam } (\tau)} = 2 * 0,10 = 0,20 \text{ kg/cm}^2$

$$\tau = (1,23 \pm 0,20) \text{ kg/cm}^2$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

Bütün deney numuneleri için belirsizlik değerleri Çizelge 17.7'de verilmiştir.

Çizelge 17.7 - Kesme gerilmesi değeri için belirsizlik hesabı

$\tau = \frac{F}{a^2}$	1,228	1,525	1,812	2,620
$\frac{\partial \tau}{\partial F} = \frac{1}{a^2}$	0,0278	0,0278	0,0278	0,0278
$\frac{\partial \tau}{\partial a} = \frac{-2F}{a^3}$	-0,4094	-0,5084	-0,6039	-0,8735
U_F	0,1106	0,1373	0,1631	0,2358
U_a	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
$U_{Rastgele} (\tau)$	0,1200	0,1200	0,1200	0,1200
$U_{Sistemati} (\tau)$	0,0031	0,0038	0,0045	0,0066
$U_{Toplam} (\tau)$	0,1200	0,1201	0,1201	0,1202
$k U_{Toplam} (\tau)$	0,24	0,24	0,24	0,24

17.4.3 Boy değişiminin çözümlü örneği**17.4.3.1 Deneyden elde edilen veriler**

Madde 17.4.1.1'de verilmiştir.

17.4.3.2 Boy değişiminin hesaplamaları**17.4.3.2.1 Boy değişimi**

Belirsizlik değerleri ilk numune için belirsizliklerin hesaplanması aşağıda gösterilmiş, diğer numuneler için Çizelge 17.8'de verilmiştir.

$$\Delta L = 0,37 \text{ (} U_{Komparatör} = 0,0025 \text{ mm} = 0,00025 \text{ cm)}$$

17.4.3.2.2 Boy değişiminin rastgele belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,06 (karşılaştırma deneylerinden)

17.4.3.2.3 Boy değişiminin sistematik belirsizliği

Sistematik belirsizliklerin toplamı, $U_{Sistemati} (\Delta L) = 0,37 * 0,00025 = 0,0000925$

17.4.3.2.4 Boy değişiminin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = 0,06 (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = 0,00009

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{Toplam} (\Delta L) &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(0,06)^2 + (0,000091)^2]^{0,5} = 0,06 \end{aligned}$$

17.4.3.3 Sonuçların gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k=2$ olduğundan $kU_{Toplam} (\Delta L) = 2 * 0,06 = 0,12$

$$\Delta L = (0,37 \pm 0,12) \text{ cm}$$

Not - Hesaplamalardan görüleceği gibi, sistematik belirsizlik değerini rastgele belirsizlik değeri ile karşılaştırdığımızda, sistematik belirsizlik değerinin (cihazlardan gelen) ihmal edilebilecek mertebede olduğu gözükmemektedir.

Bütün deney numuneleri için belirsizlik değerleri Çizelge 17.8'de verilmiştir.

Çizelge 17.8 - Boy kısalma değeri için belirsizlik hesabı

ΔL (cm)	0,37	0,28	0,43	0,95
$U_{Rastgele} (\Delta L)$	0,060	0,060	0,060	0,060
$U_{Sistemik} (\Delta L)$	0,0000925	0,0000700	0,0001075	0,0002375
$U_{Toplam} (\Delta L)$	0,060	0,060	0,060	0,060
% 95 güven aralığında	0,120	0,120	0,120	0,120

Kesme kutusu deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 17.4'te gösterilmiştir.

17.5 İlgili standartlar

ASTM D 3080: 2004 Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.

BS 1377; Part 7: 1990. Soils for civil engineering purposes, page 4, 4 Determination of shear strength by direct shear (small shear box apparatus).

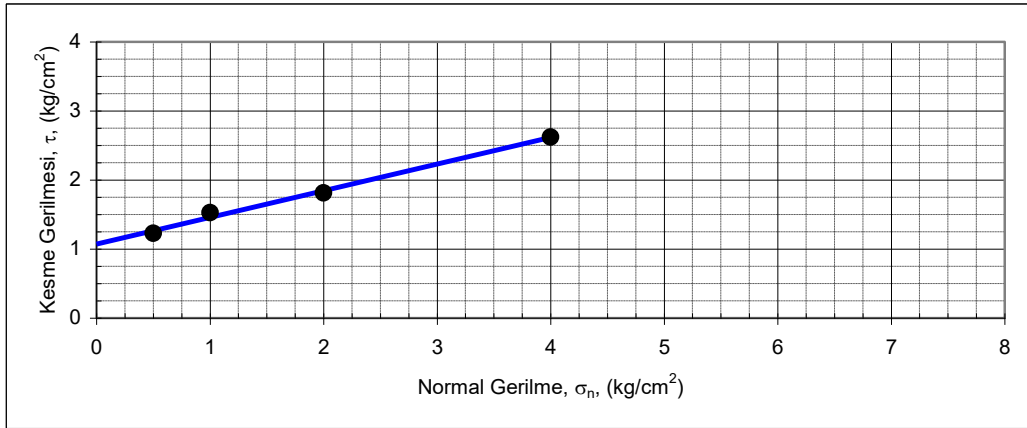
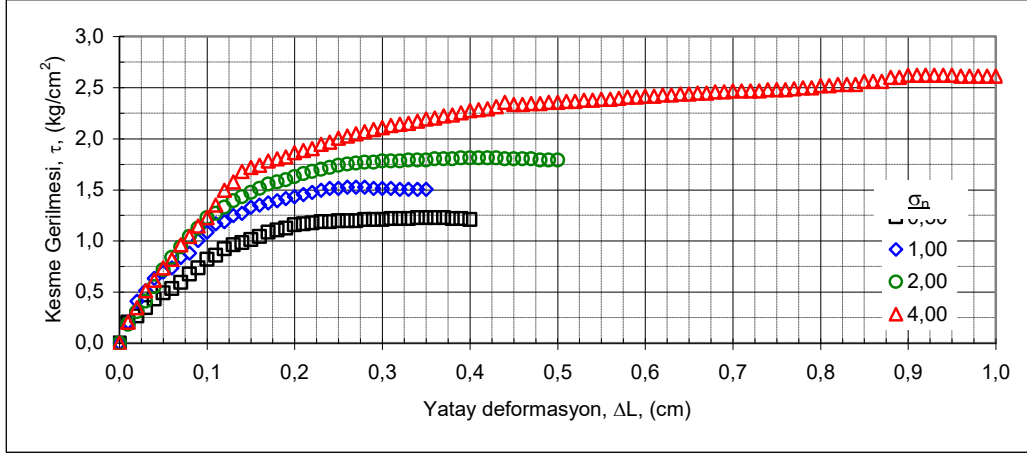
CEN ISO/TS 17892-10: 2004 "Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 10: Direct shear tests.

TS 1900-2: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.6 Deney 6: Kayma direncinin kesme kutusu ile tayini.

USBR 5725: 1989. Procedure for performing direct shear testing of soils, Vol.2.

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune no	Araştırma Numunesi	Deney başlama tarihi	14.04.2006
Kuyu / sondaj no	-	Deney bitiş tarihi	17.04.2006
Deney standardı	TS 1900-2		
Numunenin şekli	Kare	Numune uzunluğu, cm	6,00
Değerlendirme	Toplam gerilme	Numune yüksekliği, cm	2,80



Toplam Gerilmeye Göre (Bilgi için)		σ_n (kg/cm^2)	0,50	1,00	2,00	4,00
C (kg/cm^2)	1,07	Belirsizlik	0,10	0,10	0,10	0,11
ϕ ($^\circ$)	21,09	τ_{mak} (kg/cm^2)	1,23	1,53	1,81	2,62
Yükleme hızı (mm/dakika)	0,50	Belirsizlik	0,20	0,20	0,20	0,20
		ΔL (cm)	0,37	0,28	0,43	0,95
		Belirsizlik	0,12	0,12	0,12	0,12

Şekil 17.4 - Kesme kutusu deney sonucunun gösterilmesi

18 Tek yönlü konsolidasyon deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

18.1 Kapsam

Bu talimatta TS 1900-2, ASTM D 2435, CEN ISO/TS 17892-5, USBR 5700 ve BS 1377'ye göre tek yönlü konsolidasyon deneyi anlatılmıştır.

18.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

18.2.1 TS 1900-1'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2: 2006 ile TS 1900-2/T1, 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini Madde 5.2 Deney 2: Tek yönlü konsolidasyon özelliklerinin tayinine göre yapılmaktadır.

Bu deney ile yanal deformasyonu önlenmiş olan, suya doymuş disk biçiminde örselenmiş veya örselenmemiş bir zemin numunesinin, alt ve üst yüzeyinden drenaj sağlanarak, düşey ve eksenel bir basınç altında konsolidasyon miktarı ve hızı ölçülür.

Bu deney uniform kumlar ve kaba siltlere uygulanmaz.

18.2.1.1 Gerekli araçlar

Konsolidasyon halkası (ringi), halkanın yüksekliği, iç çapının üçte biri ile dörtte biri arasında ve iç yüzeyi sürtünmeyi azaltmak amacıyla pürüzsüz bir biçimde parlatılmış. Özellikleri aşağıda verilmiştir:

- İnce siltler ve killer için kullanılacak konsolidasyon halkasının iç çapı, örselenmemiş tüp numunesinin çapından en az 6 mm daha küçük olmalıdır; böylece numunenin çevresinden, numune alma işlemi sırasında örselenmiş olması muhtemel en az 3 mm kalınlığında zeminin tıraşlanıp atılması sağlanmış olur.
- Az miktarda kil ihtiva eden, iri silt ve kumlar, içerisinde çok miktarda küçük taş veya katı parçacıklar bulunan zeminler (örneğin taşlı kil, marn ve tebeşir gibi) bir de, numune tüpünden çıkarılırken kırılan veya çok deforme olan zeminler için, konsolidasyon halkasının iç çapının, tüp numunesinin çapına yakın olması, bu tür zeminleri tıraşlamanın güçlüğü bakımından tercih edilmelidir.

Poroz taşı, numunenin alt ve üst yüzeyine yerleştirilmek üzere, 80 KVA zımpara taşından (6 - 13) mm veya 3 mm kalınlıkla sinterlenmiş bronzdan yapılmış, gözenekli diskler. Bunlar, uygun geçirgenlik, sağlamlık ve alt-üst yüzeyleri düz olmalı,

Süzgeç kâğıdı, numune ile poroz taşına konulmak üzere,

Konsolidasyon hücresi,

Komparatör, 0,004 mm hassasiyetli ve en az 25 mm kapasitede,

Basma cihazı, istenilen basıncı % 1 doğrulukla uygulayabilen,

Cam plaka,

Kumpas,

Kronometre,

Su tankı, oda sıcaklığında,

Termometre,

Silikon gresi,

Örselenmemiş numuneyi tüpten çıkarmaya ve halkaya yerleştirmeye yarayan aletler

Ayrıca, “Su içeriği deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı” nda belirtilen araçlar.

18.2.1.2 Numunelerin deneye hazırlanması

18.2.1.2.1 Örselenmemiş numunelerin deneye hazırlanması

Zeminin en az bir bölümü kriko yardımıyla tüpten çıkarılır.

Uygun boyutlarda bir konsolidasyon halkası ile bir saat camı veya metal tepsi iyice temizlenir, kurulanır ve 0,1 g doğrulukla ayrı ayrı tartılır. Halkanın içi silikon gresiyle hafifçe yağlanır. Numunenin tüpten taşan bölümü, ince pir piyano teli veya zemberek teli testeresi veya ince bir bıçakla tüpün ağzıyla bir düzeyde kesilir.

İnce siltler ve killer için tüpteki numunenin, konsolidasyon halkasının yüksekliğinden az uzun bir bölümü tüpten çıkarılıp kesilir. Bu işlem sırasında, elde edilen disk biçimindeki numunenin iki yüzeyinin birbirine paralel olmasına rağmen özen gösterilmelidir.

Laboratuvara getirilen örselenmemiş numune, elle kesilip alınmış bir blokta, konsolidasyon halkası boyutlarından az büyük, iki yüzeyi birbirine paralel bir disk kesilip hazırlanır. Bu işlem sırasında, diskin paralel yüzeylerinin, zeminin arazideki durumuna göre, arazideki sıkışma yönüne dik olmalarına özen gösterilmelidir.

Konsolidasyon halkası kılavuz olarak kullanılarak, diskin kenarları özenle tıraşlanır. Tıraşlama işlemi, konsolidasyon halkası numuneye yavaşça ve düzgün bir biçimde bastırılarak geçirilirken, diskin çevresinde halkanın kesici ucunun sıyracağı ince bir kat kalana kadar sürdürülür. Böylece halkanın iç yüzeyi ile numune arasında olağandışı boşluklar kalması önlenmiş olur. Diskin alt ve üst yüzeyi, halkanın alt ve üst ucundan dışarıda kalmalı, piyano, teli testeresi veya ince ağızlı tıraşlama bıçağı ve çelik cetvel yardımıyla halkanın alt ve üst ucu düzlemlerine gelene kadar tıraşlanıp düzlenmelidir.

Arada, zeminde belirebilecek küçük bir taşın tıraşlama işlemine engel olması durumunda, bu taş çıkarılıp boşalan yere tıraşlama sırasında kesilip alınan zeminden doldurulmalıdır. Hazırlama sırasında, numunenin su içeriğinde herhangi bir değişiklik olmamasına özen gösterilmelidir.

Konsolidasyon numunesinin kalınlığı ölçülür ve halka ile içindeki numune bir saat camı (veya metal tepsi) üzerine konup vakit kaybetmeden tartılır.

Yukarıda anlatılanların dışında, zeminde taş veya kum bulunmadığı durumda: konsolidasyon halkasının rijit tutabilecek özel bir cihaz, tüpün ucuna takılır ve numune tüpten çıkarılırken doğrudan konsolidasyon halkası içine itilir. Bu işlem sırasında numune, halkanın kesici ucundan girip diğer ucundan taşacak biçimde çıkabilmelidir. Numunenin halka içine iletilmesi sırasında, halkanın dış yüzeyine olan sürtünmeyi azaltmak amacıyla, halkanın çevresinden taşan malzeme tıraşlanmalıdır. Halka içindeki numune kesilip alınır, alt ve üst yüzeyleri tıraşlanır ve yukarıda anlatılan işlemler uygulanır.

Az killi, iri silt ve kumlar, içerisinde çok miktarda küçük taş veya katı parçacıklar bulunan zeminler de ise, numunenin deneye elverişli bir bölümü, numune tüpünde doğrudan doğruya, bu tüpün çapına olabildiğince yakın çapta bir konsolidasyon halkası içine itilir. Bundan sonra numune kesilir, alt ve üst yüzeyleri tıraşlanır ve tartılır.

18.2.1.2.2 Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması

Örselenmiş numuneler Madde 2.3'e göre deneye hazırlanır.

18.2.1.3 Deneyin yapılışı

Alt gözenekli disk, kuru olarak, konsolidasyon hücresi içine, yerleştirilir. Halka içindeki numune, alt ve üstüne birer süzgeç kâğıdı konarak gözenekli diskin ortasına yerleştirilir. Yumuşak, hassas ve normal konsolide olmuş zeminler için kullanılacak süzgeç kâğıtları nemli olabilirse, de, sert zeminler, özellikle aşırı konsolide zeminler için süzgeç kâğıtları kuru olmalıdır. Üst gözenekli disk ve yükleme plakası numunenin ortasına yerleştirilir.

Bundan sonra ödometre yükleme cihazındaki yerine oturtulur ve dengelenmiş yükleme kolu, yatay duruma getirilip yükü numuneye aktaran parçası yükleme plakasına değecek biçimde ayarlanır. Göstergeli mikrometre, konsolidasyon hücresinin tabanı ile yükleme plakası arasındaki bağıl hareketi ölçecek biçimde tespit edilir. Göstergeli mikrometre, az bir miktar şişmeyi ölçebilecek, ancak kapasitesinin çoğu oturmalari kaydetmekte kullanılabilecek biçimde ayarlanmalıdır.

Deney süresince yükleme sırası: $\Delta\sigma = 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 \text{ kg/cm}^2$ (12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa) dizisini takip etmelidir (üst sınır o zemine gelebilecek en yüksek basınç miktarına göre belirlenmelidir).

Komparatör sıfırlanır. Uygulanacak ilk basınç, zemin türüne bağlı olup, numunenin şişmesini önleyecek düzeyde olmalıdır.

İlk basınç numuneye hissettirilir hissettirilmez, konsolidasyon hücresi suyla doldurulur ve kronometre çalıştırılır. Belirli süreler sonunda gösterge okumaları alınır ve kaydedilir. Bunlar 0,1 (6 saniye), 0,3 (18 saniye), 0,5 (30 saniye), 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 1440 dakikadır. Okuma süreleri 0; 6; 18; 30 saniye; 1; 2,25; 4; 6,25; 9; 16; 25; 36; 49; 64; 81; 100; 121 dakika; 4, 9 ve 24 saat gibi karekökü rahat alınabilir sayılar olması durumunda grafiğe daha rahat yerleştirilebilir.

Basınç, deney sırasında elde edilen eğriden, zeminin birincil sıkışması sona erdiği görülene kadar değiştirilmez; bu amaç genellikle 24 saatlik bir süre uygun ve yeterlidir. Bu 24 saatlik sürenin sonunda gösterge ve kronometre okumaları alınır ve aynı süre içinde odanın en yüksek ve en düşük sıcaklıkları kaydedilir. Sıkışmaların ihmal edilecek düzeye düşmediği özel durumlarda süre 48 saate kadar uzatılabilir.

Bundan sonra, numune üzerine etkiyen basıncı, yukarıda verilen dizideki bir üst değere artıracak biçimde bir ağırlık eklenir ve okuma alma işlemi tekrarlanır. Deneyde, yeterli sayıda, (en az) yükleme basamağı kullanılmalı ve numuneye uygulanan en yüksek basınç, zeminin arazide etkisine uğrayacağı maksimum efektif düşey basıncı aşmalıdır. Bu basınç, numunenin alındığı noktadaki efektif düşey ve tasarlanan yapının aynı noktada yaratacağı gerilme artışının toplamına eşittir.

Uygulanmış en yüksek konsolidasyon basıncı altındaki gösterge okumaları tamamlandıktan sonra, numunenin boşaltma eğrisi istenirse, yükler yükleme kademelerine uygun olarak boşaltılır. Ancak istenirse, boşaltma, bir önceki basıncın dörtte biri olmak üzere de yapılabilir. Genellikle kabartma süresi, aynı basınç altında birincil konsolidasyon için gerekenden kısadır.

Deney sırasında elde edilen değerler "Konsolidasyon deneyi formu" na yazılır.

18.2.1.4 Hesaplamalar

Hesaplamalar "Konsolidasyon katsayıları formu" üzerinde yapılır.

Her yükleme başlangıcındaki numune yüksekliği H ilk numune yüksekliğinden toplam oturma miktarı çıkarılarak bulunur.

Her bir yükleme başındaki ve sonundaki numune yüksekliğinin ortalaması bulunur, H_{ort} .

Katı danelerin eşdeğer yüksekliği H_0 aşağıda verilen eşitlikten bulunur:

$$H_0 = \frac{W_s}{G_s A}$$

Burada;

W_s Deney öncesi numunenin kuru ağırlığı, g;

G_s Katı danelerin bağıl yoğunluğu,

A Numune kesit alanı (cm^2)

dır.

Boşluk oranı e aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$e = \frac{H - H_0}{H_0}$$

Ortalama boşluk oranları aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$e_{\text{ortalama}} = \frac{(e_i - e_{i+1})}{2}$$

Boşluk oranları farkı aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$\Delta e = e_i - e_{i+1}$$

Basınç artırımı oranları aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$\Delta \sigma = \sigma_i - \sigma_{i-1}$$

Sıkışma katsayısı aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$a = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma}$$

Hacimsel sıkışma katsayısı m_v aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır (1 kg/cm² lık bir basınç artışının numunede yaratacağı sıkışma miktarı):

$$m_v = \frac{a}{1 + e_{\text{ortalama}}}$$

m_v değerleri 10⁻² cm²/kg olarak ifade edilir.

Konsolidasyon katsayısı C_v karekök - zaman yöntemi veya logaritma - zaman yöntemi kullanılarak hesaplanır

18.2.1.4.1 Karekök - zaman yöntemi

Oturma miktarı zamanın kareköküne karşılık milimetrik "Oturma - karekök zaman grafiği" ne çizilir.

Dört veya beş noktadan doğru geçecek şekilde (bu dört veya beş nokta oturma miktarının ilk % 50 si içindedir) doğru çizilir.

Bu doğrunun Y eksenini kestiği nokta olan d_0 belirlenir.

Bu doğrunun X eksenini kestiği nokta 1,15 ile çarpılır. Bulunan bu nokta ile d_0 birleşecek şekilde ikinci bir doğru çizilir.

İkinci doğru ile "Oturma - karekök zaman" eğrisinin kesiştiği nokta d_{90} ile $\sqrt{t_{90}}$ değeri bulunur.

d_{100} ve d_{50} şu eşitlikten hesaplanır:

$$d_{100} = d_s + \frac{10}{9} (d_{90} - d_s) \quad d_{50} = \frac{d_s + d_{100}}{2}$$

Konsolidasyon katsayısı C_v aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır:

$$C_v = \frac{0,848 \left(\frac{H_{ort}}{2} \right)^2}{t_{90}}$$

Burada;

H_{ort} Ortalama numune yüksekliği [$(H_{i+1} + H_i) / 2$] (mm),

t_{90} Zaman (saniye)

dir.

Not - H_{ort} en uzun drenaj yolunun ortalama mesafesidir; hem alt ve hem de üstten drenaj oluyorsa, 1/2, tek taraftan drenaj olursa, 1 ile çarpılır. Sonuç 10^{-3} cm²/s olarak ifade edilir.

C_v değerleri her $\Delta\sigma$ aralığı için hesaplanır.

Etkime süresinin kareköküne göre, ilk sıkışma oranı, r_0 ; birincil sıkışma oranı, r_p ; ikincil sıkışma oranı r_s aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır:

$$r_0 = \frac{d_0 - d_s}{d_0 - d_f}$$

$$r_p = \frac{10(d_s - d_{90})}{9(d_0 - d_f)}$$

$$r_s = \frac{d_{100} - d_f}{d_s - d_f} = 1 - (r_0 + r_p)$$

Burada;

d_s Düzeltilmiş sıfır sıkışma noktasındaki gösterge okuması,

d_{90} Birincil sıkışmanın % 90'ındaki gösterge okuması,

d_{100} Birincil sıkışmanın % 100'ündeki gösterge okuması,

d_0 Deney başlangıcında alınan gösterge okuması,

d_f Deney sonunda alınan gösterge okuması (bir sonraki aşamada ($d_f = d_0$))

dır.

18.2.1.4.2 Logaritma - zaman yöntemi

Oturma miktarı zamana karşılık yatay eksen logaritmik, düşey eksen milimetrik olan "Oturma - logaritma zaman grafiği" ne veya çizilir.

$t = 1$ dakika civarında, çizilen zaman-oturma grafiğinde bir nokta seçilir (t_1).

$t_2 = 4t_1$ olacak şekilde, t_2 noktası işaretlenir.

t_1 ve t_2 arasındaki düşey mesafe (y) bulunur.

t_1 'den itibaren üstte ve altta olmak üzere, düşey eksen (y) mesafesi işaretlenir ve üstteki noktaya d_0 denir.

Zaman-oturma grafiğinde dönüşün (grafiğin iç bükeyden dış bükeye geçtiği) noktadan grafiğe teğet çizilir.

İkincil konsolidasyon eğrisi aynı eğimle uzatılarak, çizilen teğeti kestirilir. Kestiği noktanın yatay eksenini kestiği nokta t_{100} değerini, düşey eksenini kestiği nokta ise, d_{100} değerini verir. d_{50} değeri aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$$

Bu değerle düşey eksenden girilerek, grafik kestirilir ve yatay eksende t_{50} değeri bulunur.

Konsolidasyon katsayısı C_v aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$C_v = \frac{0,197 \left(\frac{H_{ort}}{2} \right)^2}{t_{50}}$$

Burada;

H_{ort} Ortalama numune yüksekliği (mm),

t_{90} Zaman (saniye)

dir.

Not - H_{ort} en uzun drenaj yolunun ortalama mesafesidir; hem alt ve hem de üstten drenaj oluyorsa, 1/2, tek taraftan drenaj olursa, 1 ile çarpılır.

Sonuç $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ olarak ifade edilir. C_v değerleri her $\Delta\sigma$ aralığı için hesaplanır.

Etkime süresinin logaritmasına göre, ilk sıkışma oranı, r_0 ; birincil sıkışma oranı, r_p ; ikincil sıkışma oranı r_s aşağıdaki formüllerden hesaplanır.

$$r_0 = \frac{d_0 - d_s}{d_0 - d_f}$$

$$r_p = \frac{d_s - d_{100}}{d_0 - d_f}$$

$$r_s = 1 - (r_0 + r_p)$$

Burada;

d_s Düzeltilmiş sıfır sıkışma noktasındaki gösterge okuması,

d_{90} Birincil sıkışmanın % 90'ındaki gösterge okuması,

d_{100} Birincil sıkışmanın % 100'ündeki gösterge okuması,

d_0 Deney başlangıcında alınan gösterge okuması,

d_f Deney sonunda alınan gösterge okuması (bir sonraki aşamada ($d_f = d_0$))

dir.

Her yükleme arasındaki geçirgenlik katsayısı (k) aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$k = C_v m_v \gamma_w$$

Zeminin arazideki sıcaklığı biliniyorsa, hesaplanmış bulunan konsolidasyon katsayısı değerlerine bir sıcaklık düzeltmesi yapılmalıdır. Düzeltilmiş konsolidasyon katsayısı, hesaplanmış bulunan değeri ilgili düzeltme katsayısı ile çarpılarak elde edilir.

Not - Eşitlik ile hesaplanan k katsayısı basınç altındaki geçirgenlik katsayısı olduğundan mühendislik hesapları yapılırken dikkat edilmelidir.

Basınç (σ) - boşluk oranı (e) grafiği yarı logaritmik "Basınç - boşluk grafiği" ne çizilir. Bu grafik üzerindeki yükleme sayısı kadar noktadan bir eğri, son iki yükleme değerinden bir doğru ve yükleme dönüşündeki noktalardan ise, ikinci bir doğru çizilir.

İlk doğrunun eğimi sıkışma indisini (C_c) verir:

$$C_c = \frac{e_{i-1} - e_i}{\log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}}\right)}$$

Not - Bilgisayar programında, sıkışma indisi $\sigma = 8 \text{ kg/cm}^2$ ile $\sigma = 16 \text{ kg/cm}^2$ arasında ki eğimden hesaplanmıştır.

İkinci doğrunun eğimi şişme indisini (C_s) verir ve hesaplanma şekli sıkışma indisi gibidir.

Not - Bilgisayar programında, şişme indisi $\sigma = 16 \text{ kg/cm}^2$ ile $\sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$ arasında ki eğimden hesaplanmıştır.

Numune örselenmiş ise, önkonsolidasyon basıncı (P_0) aşağıda verilen işlem basamakları uygulanarak bulunmalıdır:

1. Sıkışma indisi doğrusu aynı eğimle yukarı doğru uzatılır.
2. Çizilen eğrinin üzerindeki en yüksek eğrilik noktası bulunur ve bu noktadan bir teğet çizilir.
3. Eğri ile teğetin kesiştiği noktadan yataya paralel bir doğru çizilir.
4. Yatayda çizilen bu paralel ile teğetin açısı ortayı bulunur.
5. Açısı ortayı ile sıkışma indisi doğrusunun kesim noktasının X eksenindeki σ değeri P_0 değerini verir.

18.2.1.5 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Her bir yük kademesine göre oturma - karekök zaman (veya oturma - logaritma zaman) grafikleri,
- Her bir yük kademesinde C_v ve m_v katsayıları (müşterinin istemesi durumunda k katsayısı),
- Basınç - boşluk oranı grafiği,
- Sıkışma indisi, şişme indisi ve varsa ön konsolidasyon basıncı.

18.2.2 ASTM D 2435'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyi talimatı

ASTM D 2435'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyi, TS 1900-2'de belirtilen yöntem ile aynıdır. Ancak bazı farklılıkları vardır.

ASTM D 2435'de, kenarlarından genişlemesi engellenmiş ve sadece eksenel olarak drene olabilen zemin numunelerinin konsolidasyon değeri ve hızı, birbirini takip eden kontrollü gerilmeler ile belirlenme yöntemi anlatılmaktadır. Aşağıdaki iki yöntemden birisi ile yapılabilir:

- Her 24 saat boyunca sabit yükleme ve 24 saat sonra ilkinin katı olan yükleme yapılarak, zamana karşı oturma miktarları ölçülür. Ölçümler en az iki yüklemede alınmalıdır.
- Zemin numunesi birincil konsolidasyon % 100 olduktan sonra yükleme yapılır. Zamana karşı oturma okumaları her yüklemede alınır.

Bu deney örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilir.

18.2.2.1 Gerekli araçlar

Gerekli araçlar TS 1900-2'de belirtilen cihazlar ile aynıdır.

Ancak, TS 1900-2'den farklı olarak:

- En küçük numune çapı: 50 mm olmalıdır,
- En küçük numune yüksekliği: en küçük ilk numune yüksekliği 12 mm olmalı ancak en büyük dane çapının 10 katından daha küçük olmamalıdır,
- En küçük numune çapının yüksekliğe oranı: 2,5 olmalıdır,
- Çevre şartları: deney, sıcaklık değişimi ± 4 °C'tan daha küçük ve doğrudan güneş ışığı düşmeyen ortamda yapılmalıdır.

18.2.2.2 Örselenmemiş / örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması

Örselenmemiş numunelerin deneye hazırlanması Madde 18.2.1.2'de açıklanmıştır.

Örselenmiş numuneler 4,75 mm göz açıklıklı elekten elenerek, "Standart sıkıştırma (2,5 kg tokmak kullanarak) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" na göre bulunan $\gamma_{k,max} - W_{opt}$ 'a göre sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilir.

Numunelerin su içeriğinin kaybolmaması için çabucak hazırlanmalı, cihaza yerleştirilmeli ve deneye tâbi tutulmalıdır.

18.2.2.3 Deneyin yapılışı

Deneyin yapılışı TS 1900-2'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyinin yapılışı ile aynıdır.

18.2.2.4 Hesaplamalar

Hesaplamalar TS 1900-2'ye göre tek yönlü konsolidasyon deneyinde açıklanan yöntem ile aynıdır.

18.2.3 CEN ISO/TS 17892-5'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-5'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyi, TS 1900-2'de belirtilen yöntem ile aynıdır.

18.2.4 USBR 5700'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyi talimatı

USBR 5700'e göre tek yönlü konsolidasyon deneyi, TS 1900-2'de belirtilen yöntem ile aynıdır. Farklı yönleri aşağıda belirtilmiştir.

Bu deney ile örselenmemiş veya $\gamma_{k,max} - W_{opt}$ 'a göre belirli hacme sıkıştırılan örselenmiş numunelerin birincil konsolidasyondan dolayı gerçekleşen konsolidasyon hızı ve miktarı belirlenir.

Kumlar veya kırık zeminler üzerinde gerçekleştirilen tek yönlü konsolidasyon deneyleri, homojen kohezyonlu zeminler üzerinde gerçekleştirilen zeminler kadar güvenilir sonuç göstermez.

Ayrıca bu deney ile basınç altında zeminlerin yaklaşık geçirgenlik kat sayısı da bulunur.

Örselenmemiş veya sıkıştırılmış zemin numunesi, kenarları sabit ancak eksenel yönde hareket edebilecek şekilde konsolidasyon hücresine yerleştirilir. Normal olarak 0,07 kg/cm² lik basınç uygulanarak (poroz taşı ve yükleme kolunun ağırlığı bu basınç için yeterlidir) numune ilk yüksekliği ölçülür. Önceden belirlenen basınç artışları, birincil konsolidasyon oturmaları tamamlanana kadar uygulanır.

Her basınç kademesinde belirli zaman aralıklarında numune yüksekliği ölçülür. İstenirse, numune istenilen basınçta suya boğulur (kaplanır). Seçilen basınç artış kademeleri tamamlandıktan sonra, basınç değerleri daha önceden belirlenen miktarlar kadar düşürülür ve numune yükseklikleri ölçülür. Deney sonrası katsayılar hesaplanır.

Notlar

- Numunenin konulduğu halkaların iç yüzeyi temiz ve düz olmalıdır. Halkalar bronz veya paslanmaz çelikten imal edilmelidir.
- Numuneler tıraşlanırken, büyük taş parçası çıkan yerler ince malzeme ile özenle doldurulmalıdır.
- Yükseklik/çap oranı 1:2,5 ilâ 1:3,5 arasında olmalıdır.
- Poroz taşları temiz olmalı ve yatayda düzgün olacak şekilde numunenin alt ve üstüne konulmalıdır.
- Numuneye uygulanan basınç 42 kg/cm² yi geçerse, sinterlenmiş delikli bronz plakalar da kullanılabilir.

18.2.4.1 Gerekli araçlar

Konsolidasyon cihazı,

Konsolidasyon halkası,

Poroz plakaları,

Yükleme plakaları,

Terazi, 0,1 g doğrulukla tartım yapabilen,

Komparatör, 25 mm kapasiteli ve 0,003 mm doğrulukla ölçebilen,

Etüv, (105 ± 10) °C arasında sıcaklık sağlayan,

Kronometre, 1 saniye hassasiyetli,

Numune hazırlama donanımı,

Numune sıkıştırma donanımı,

Damıtık su, içinde asit, alkali veya yağ bulunmayan, içmeye elverişli

Elek, 4,75 mm göz (No 4) açıklıklı elek

18.2.4.2 Örselenmemiş / örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması

Örselenmemiş numunelerin deneye hazırlanması Madde 18.2.1.2'de açıklanmıştır.

Örselenmiş numuneler 4,75 mm göz açıklıklı elekten elenerek, "Standart sıkıştırma (2,5 kg tokmak kullanarak) deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı" na göre bulunan $\gamma_{k,mak} - W_{opt}$ 'a göre sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilir.

Numunelerin su içeriğinin kaybolmaması için çabucak hazırlanmalı, cihaza yerleştirilmeli ve deneye tâbi tutulmalıdır.

18.2.4.3 Deneyin yapılışı

Deneyin yapılışı TS 1900-2'ye göre tek yönlü konsolidasyon deneyinde açıklanan yöntem ile aynıdır.

TS 1900-2'den farklı olarak USBR 5700, tek yönlü konsolidasyon deneyinin numuneyi suya boğmadan da yapılabileceğini belirtmektedir.

18.2.4.4 Hesaplamalar

Hesaplamalar TS 1900-2'ye göre tek yönlü konsolidasyon deneyinde açıklanan hesaplamalarla aynıdır.

18.2.5 BS 1377'ye göre tek yönlü konsolidasyon deneyi talimatı

BS 1377, Bölüm 5, Madde 3'te anlatılan tek yönlü konsolidasyon deneyi TS 1900-2 ile aynıdır.

18.3 Tek yönlü konsolidasyon deneyinin belirsizlik hesabı

Tek yönlü konsolidasyon deneyinde; konsolidasyon katsayısı C_v (cm^2/s), hacimsel sıkışma katsayısı m_v (cm^2/kg), sıkışma indisi C_c (%) ve şişme indisi C_s (%) değerleri hesaplandığı için her bir katsayının belirsizlik hesaplaması aşağıda verilmiştir.

18.3.1 Rastgele (A Tipi) belirsizlik

Rastgele belirsizlikler istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir.

18.3.1.1 Konsolidasyon katsayısının (C_v) rastgele belirsizliği

Konsolidasyon katsayısının C_v ($10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$) belirsizliği amacıyla yapılan karşılaştırma deneyi sonuçları her bir basınç kademesi için Çizelge 18.1'de verilmiştir.

Çizelge 18.1 - Konsolidasyon katsayısı C_v ($10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$) için laboratuvar içi karşılaştırma deney sonuçları

Basınç (kg/cm^2)	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Veri sayısı, n				5	5	5	5
En büyük				6,82	6,14	5,70	4,33
Ortanca				6,76	6,09	5,32	4,25
En küçük				6,38	5,78	4,51	3,11
Ortalama, $\bar{x}$				6,69	6,03	5,21	3,99
Standart sapma, σ_{Std}				0,18	0,15	0,44	0,51
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$				0,08	0,07	0,20	0,23

Konsolidasyon katsayısı C_v ($10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$) için rastgele belirsizlik değeri, hesaplamalarda kolaylık sağlamak amacıyla Çizelge 18.1'de elde edilen en büyük değer, bütün basınç kademeleri için aynı değer olarak alınmış ve aşağıda verilmiştir:

Konsolidasyon katsayısı için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele}(C_v) = 0,23$

18.3.1.2 Hacimsel sıkışma katsayısının (m_v) rastgele belirsizliği

Hacimsel sıkışma katsayısının m_v (10^{-2} cm²/kg) belirsizliği amacıyla yapılan karşılaştırma deneyi sonuçları her bir basınç kademesi için Çizelge 18.2'de verilmiştir.

Çizelge 18.2 - Hacimsel sıkıştırma katsayısı m_v (10^{-2} cm²/kg) için laboratuvar içi karşılaştırma deney sonuçları

Basınç (kg/cm ²)	0,25	0,5	1	2	4	8	16	4	1
Veri sayısı, n				5	5	5	5	5	5
En büyük				1,39	1,70	1,33	0,83	0,45	0,83
Ortanca				1,20	1,39	1,21	0,78	0,17	0,80
En küçük				1,11	1,33	1,16	0,71	0,16	0,33
Ortalama, $\bar{x}$				1,23	1,48	1,23	0,77	0,23	0,71
Standart sapma, σ_{Std}				0,10	0,17	0,08	0,05	0,13	0,22
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$				0,05	0,08	0,03	0,02	0,06	0,10

Hacimsel sıkışma katsayısının m_v (10^{-2} cm²/kg) için rastgele belirsizlik değeri, hesaplamalarda kolaylık sağlamak amacıyla Çizelge 18.2'de elde edilen en büyük değer, bütün basınç kademeleri için aynı değer olarak alınmış ve aşağıda verilmiştir:

Hacimsel sıkışma katsayısı için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (m_v) = 0,1$

18.3.1.3 Sıkışma indisi (C_c) ve şişme indisinin (C_s) rastgele belirsizliği

Sıkışma indisi C_c ve şişme indisi C_s değerlerinin belirsizliği için yapılan karşılaştırma deneyi sonuçları Çizelge 18.3'te verilmiştir.

Çizelge 18.3 - Sıkışma indisi C_c (%) ve şişme indisi C_s (%) değerlerinin laboratuvar içi karşılaştırma sonuçları

	C_c %	C_s %
Veri sayısı, n	5	5
En büyük	30,20	5,30
Ortanca	29,00	5,20
En küçük	26,70	4,90
Ortalama, $\bar{x}$	28,46	5,18
Standart sapma, σ_{Std}	1,66	0,16
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,74	0,07

Sıkışma indisi C_c ve şişme indisi C_s değerlerinin rastgele belirsizlik değeri Çizelge 18.3'te verilen en büyük değerler alınmış ve aşağıda verilmiştir:

Sıkışma indisi için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (C_c) = 0,0074 = \% 0,74$

Şişme indisi için toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele} (C_s) = 0,00070 = \% 0,07$

18.3.2 Sistemik (B Tipi) belirsizlik

Sistemik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

18.3.2.1 Tek yönlü konsolidasyon deney eşitliklerinin türevleri**18.3.2.1.1 Konsolidasyon katsayısı (C_v) eşitliğinin türevleri**

$$C_v = \frac{0,848 \left(\frac{H_{ort}}{2} \right)^2}{t_{90}} = \frac{0,212 H_{ort}^2}{t_{90}} = \frac{0,212 \left(\frac{H_i + H_{i+1}}{2} \right)^2}{t_{90}}$$

$$C_v = \frac{0,053 (H_i + H_{i+1})^2}{t_{90}} \Rightarrow C_v = \frac{0,053 (H_i^2 + 2H_i H_{i+1} + H_{i+1}^2)}{t_{90}}$$

$$\frac{\partial C_v}{\partial H_i} = \frac{0,106 H_i + 0,106 H_{i+1}}{t_{90}} = 0,106 \frac{H_i + H_{i+1}}{t_{90}} \Rightarrow \frac{\partial C_v}{\partial H_i} = 0,106 \frac{H_i + H_{i+1}}{t_{90}}$$

$$\frac{\partial C_v}{\partial H_{i+1}} = \frac{0,106 H_i + 0,106 H_{i+1}}{t_{90}} \Rightarrow \frac{\partial C_v}{\partial H_{i+1}} = 0,106 \frac{H_i + H_{i+1}}{t_{90}}$$

$$\frac{\partial C_v}{\partial t_{90}} = - \frac{2 * 0,212 \left(\frac{H_i + H_{i+1}}{2} \right)^2}{t_{90}^2} \Rightarrow \frac{\partial C_v}{\partial t_{90}} = -0,106 \left(\frac{H_i + H_{i+1}}{t_{90}} \right)^2$$

18.3.2.1.2 Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) eşitliğinin türevleri

$$m_v = \frac{a}{1 + e_{ort}} = \frac{\frac{\Delta e}{\Delta \sigma}}{1 + \frac{e_i + e_{i+1}}{2}} = \frac{\frac{e_i - e_{i+1}}{\sigma_{i+1} - \sigma_i}}{1 + \frac{e_i + e_{i+1}}{2}} = \frac{\frac{\frac{H_i - H_0}{H_0} - \frac{H_{i+1} - H_0}{H_0}}{\frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\frac{H_i - H_0}{H_0} + \frac{H_{i+1} - H_0}{H_0}}}{1 + \frac{\frac{H_i - H_0}{H_0} + \frac{H_{i+1} - H_0}{H_0}}{2}}$$

$$m_v = \frac{\frac{H_i - H_0 - H_{i+1} + H_0}{H_0(\sigma_{i+1} - \sigma_i)}}{1 + \frac{H_i - H_0 + H_{i+1} - H_0}{2H_0}} = \frac{\frac{H_i - H_{i+1}}{H_0(\sigma_{i+1} - \sigma_i)}}{1 + \frac{H_i + H_{i+1} - 2H_0}{2H_0}} = \frac{\frac{H_i - H_{i+1}}{H_0(\sigma_{i+1} - \sigma_i)}}{\frac{2H_0 + H_i + H_{i+1} - 2H_0}{2H_0}}$$

$$m_v = \frac{\frac{H_i - H_{i+1}}{(\sigma_{i+1} - \sigma_i)}}{\frac{H_i + H_{i+1}}{2}} \Rightarrow m_v = \frac{2(H_i - H_{i+1})}{[(\sigma_{i+1} - \sigma_i)(H_i + H_{i+1})]}$$

$$\sigma = \frac{\text{Yük}}{\text{Alan}} = \frac{(\text{Yük})(\text{Kol.oranı})}{\text{Ring.alanı}} = \frac{WL}{\frac{\pi D_0^2}{4}} = \frac{4WL}{\pi D_0^2}$$

$$m_v = \frac{2(H_i - H_{i+1})}{\left[\left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} - \frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) (H_i + H_{i+1}) \right]} = \frac{2(H_i - H_{i+1})}{\left[\frac{4L}{\pi D_0^2} (W_{i+1} - W_i) (H_i + H_{i+1}) \right]}$$

$$m_v = \frac{\pi D_0^2 (H_i - H_{i+1})}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial H_i} = \frac{(\pi D_0^2)[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))] - (\pi D_0^2)(H_i - H_{i+1})2L(W_{i+1} - W_i)}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial H_i} = \frac{2L(\pi D_0^2)(W_{i+1} - W_i)[(H_i + H_{i+1}) - (H_i - H_{i+1}))]}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2} = \frac{2L(\pi D_0^2)(W_{i+1} - W_i)(2H_{i+1})}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial H_i} = \frac{4LH_{i+1}(\pi D_0^2)(W_{i+1} - W_i)}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial H_{i+1}} = \frac{-(\pi D_0^2)[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))] - (\pi D_0^2)(H_i - H_{i+1})2L(W_{i+1} - W_i)}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial H_{i+1}} = -\frac{2L(\pi D_0^2)(W_{i+1} - W_i)[(H_i + H_{i+1}) + (H_i - H_{i+1}))]}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2} = -\frac{2L(\pi D_0^2)(W_{i+1} - W_i)(2H_i)}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial H_{i+1}} = -\frac{4LH_i(\pi D_0^2)(W_{i+1} - W_i)}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial W_i} = \frac{-(\pi D_0^2)(H_i - H_{i+1})(-2L)(H_i + H_{i+1}))}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2} \Rightarrow \frac{\partial m_v}{\partial W_i} = \frac{(\pi D_0^2)(H_i - H_{i+1})2L(H_i + H_{i+1}))}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial W_{i+1}} = \frac{-(\pi D_0^2)(H_i - H_{i+1})2L(H_i + H_{i+1}))}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial D_0} = \frac{2\pi D_0 (H_i - H_{i+1})}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]}$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial L} = \frac{-(\pi D_0^2)(H_i - H_{i+1})2(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))}{[2L(W_{i+1} - W_i)(H_i + H_{i+1}))]^2}$$

18.3.2.1.3 Sıkışma indisi (C_c) ve şişme indisi (C_s) eşitliklerinin türevleri

Sıkışma indisi C_c ve şişme indisini C_s eşitliği aynı olduğundan aşağıda sadece bir danesi gösterilmiştir:

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)} = \frac{\frac{H_i - H_0}{H_0} - \frac{H_{i+1} - H_0}{H_0}}{\log \sigma_{i+1} - \log \sigma_i} = \frac{\frac{H_i - H_{i+1}}{H_0}}{(\log \sigma_{i+1} - \log \sigma_i)} \Rightarrow C_c = \frac{H_i - H_{i+1}}{H_0(\log \sigma_{i+1} - \log \sigma_i)}$$

$$\sigma = \frac{\text{Yük}}{\text{Alan}} = \frac{(\text{Yük})(\text{Kol.oranı})}{\text{Ring.alanı}} = \frac{WL}{\pi D_0^2} = \frac{4WL}{\pi D_0^2}$$

$$H_0 = \frac{W_s}{G_s A} \quad A = \frac{\pi D_0^2}{4}$$

$$C_c = \frac{H_i - H_{i+1}}{\frac{W_s}{G_s} \frac{\pi D_0^2}{4} \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]} = \frac{H_i - H_{i+1}}{\frac{4W_s}{\pi G_s D_0^2} \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}$$

$$C_c = \frac{\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1})}{4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial G_s} = \frac{\pi D_0^2 (H_i - H_{i+1})}{4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}$$

$$y = \log_a f(x) \quad \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{f'(x)}{f(x) \ln(a)}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial D_0} = \frac{2\pi G_s D_0 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right] - \pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{-\frac{8W_{i+1}L}{\pi D_0^3}}{\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \log(10)} - \frac{-\frac{8W_iL}{\pi D_0^3}}{\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial D_0} = \frac{2\pi G_s D_0 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right] - \pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[-\frac{2}{D_0 \log(10)} + \frac{2}{D_0 \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial D_0} = \frac{2\pi G_s D_0 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial H_i} = \frac{\pi G_s D_0^2}{4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial H_{i+1}} = \frac{-\pi G_s D_0^2}{4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial W_s} = -\frac{\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1})}{4W_s^2 \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial W_i} = \frac{-\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{-\frac{4L}{\pi D_0^2}}{\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial W_i} = \frac{-\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{-1}{W_i \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2} \Rightarrow \frac{\partial C_c}{\partial W_i} = \frac{\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{1}{W_i \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial W_{i+1}} = \frac{-\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{\frac{4L}{\pi D_0^2}}{\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

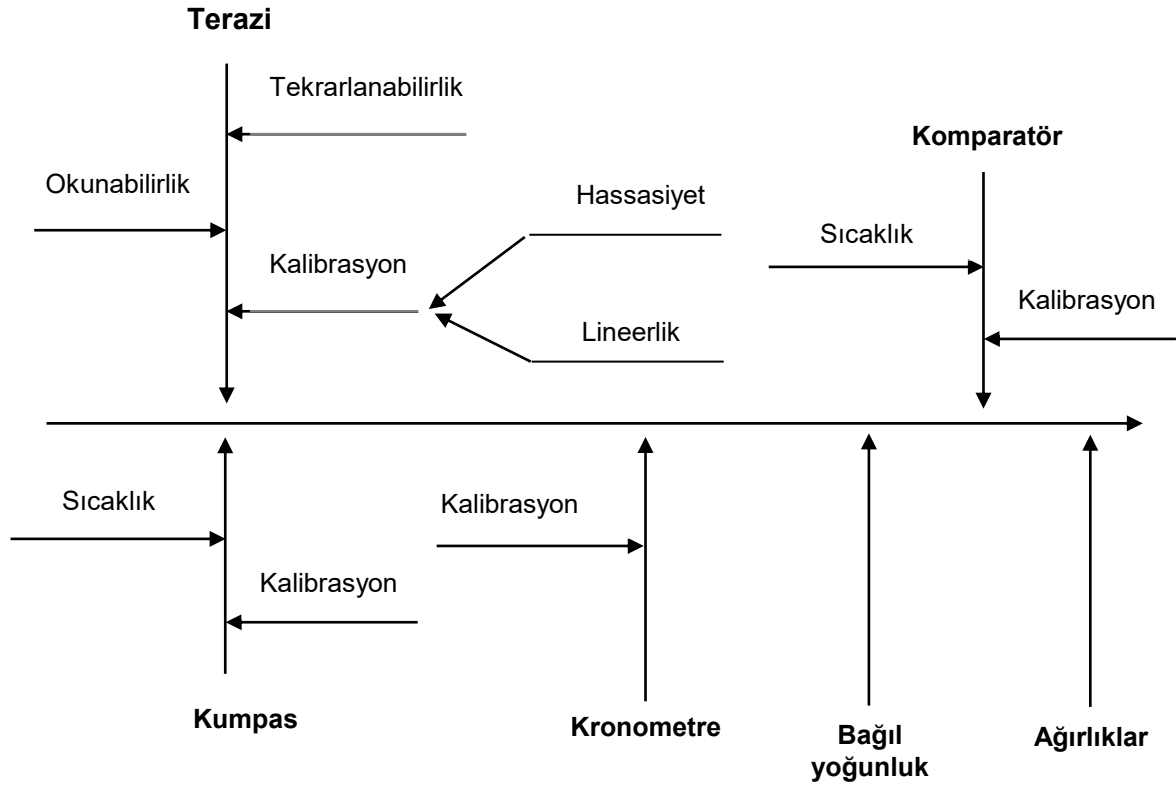
$$\frac{\partial C_c}{\partial W_{i+1}} = \frac{-\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{1}{W_{i+1} \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial L} = \frac{-\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{\frac{4W_{i+1}}{\pi D_0^2}}{\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \log(10)} - \frac{\frac{4W_i}{\pi D_0^2}}{\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2}$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial L} = \frac{-\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1}) 4W_s \left[\frac{1}{L \log(10)} - \frac{1}{L \log(10)} \right]}{\left\{ 4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1} L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_i L}{\pi D_0^2} \right) \right] \right\}^2} = 0$$

18.3.2.2 Kılçık diyagramı

Sadece cihazların gösterildiği, tek yönlü konsolidasyon deneyinin kılçık diyagramı Şekil 18.1'de gösterilmiştir.



Şekil 18.1 - Tek yönlü konsolidasyon deneyi kılçık diyagramı

18.3.2.3 Sistematik belirsizlik kaynakları

18.3.2.3.1 Terazı

Tek yönlü konsolidasyon deneyin de iki farklı terazı kullanılmaktadır. Numuneleri tartmak için CHYO MP-3000, konsolidasyon ağırlıklarının tartmak için ise, SARTORIUS QA60FEG-S kullanılmaktadır.

18.3.2.3.1.1 Kalibrasyon

Tek yönlü konsolidasyon deneyinde kullanılan zemin numunesinin en büyük ağırlığı 500 g ilâ 750 g, konsolidasyon ağırlıkları ise, en fazla 35 kg'a kadardır. Bu terazilerin toplam belirsizliği:

$$\text{CHYO MP-3000} \quad U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,02 + 1,7 \cdot 10^{-4}W) \text{ g} \rightarrow k = 2 \rightarrow$$

$$U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm (0,01 + 8,5 \cdot 10^{-5}W) \text{ g}$$

$$\text{SARTORIUS QA60FEG-S} \quad U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm 7,15 \text{ g} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{\text{Kalibrasyon}} = \pm 3,575 \text{ g} = \pm 0,003575 \text{ kg}$$

18.3.2.3.1.2 Okunabilirlik

$$\text{CHYO MP-3000 için } 0,01 \text{ g} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,01/\sqrt{3} = 0,00577$$

$$\text{SARTORIUS QA60FEG-S için } 1 \text{ g} = 0,001 \text{ kg (yük kg olarak belirsizliğe gireceğİ için okunabilirlik kg alınmıştır)} \rightarrow \text{Dikdörtgen dağılım kabul edildiğinden} \rightarrow 0,001/\sqrt{3} = 0,0005774$$

Not - Dijital göstergeli terazinin okunabilirlikten gelen belirsizliği bulunurken, okunabilirlik değeri 2'ye bölünmelidir. Ancak, emniyetli tarafta kalmak için 2'ye bölünmemiştir.

18.3.2.3.1.3 Tekrarlanabilirlik

CHYO MP-3000 model terazide 1000 g ağırlığındaki zemin numunesinin tartım değerleri Çizelge 18.4'te verilmiştir.

Çizelge 18.4 - Deneyde kullanılan dijital terazinin tekrarlanabilirlik verileri

	CHYO MP-3000	SARTORIUS QA60FEG-S
Veri sayısı, n	37	
Ortalama, $\bar{X}$	999,57	
Standart sapma, σ_{Std}	0,06	
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	0,01	(CHYO MP-3000)*10 = 0,1 g = 0,0001 kg

SARTORIUS QA60FEG-S marka terazinin tekrarlanabilirlik CHYO MP-3000 terazinin 10 katı alınmıştır

18.3.2.3.1.4 Terazinin toplam belirsizliği

Terazinin toplam belirsizliği her bir terazi için verilen kalibrasyon, okunabilirlik ve tekrarlanabilirlikten gelen belirsizliklerin karelerin toplamının kareköküne eşittir:

$$U_{Terazi} = [(kalibrasyon)^2 + (okunabilirlik)^2 + (tekrarlanabilirlik)^2]^{0,5}$$

18.3.2.3.2 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları (4,75 ± 0,2) mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı 4,75 mm'den büyük göz açıklığına sahip (6,3 ± 0,005) mm ve 4,75 mm'den küçük göz açıklığına sahip (2,5 ± 0,1) mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmasına çalışılmıştır.

Deneyler sonunda farklı kişilerin farklı eleklerle elde ettiği C_v , m_v , C_c ve C_s değerlerin karşılaştırılması sonucunda, elde edilen değerlerin rastgele dağıldığı yani elek çaplarından bağımsız olduğu görülmüştür. Bundan dolayı (4,75 ± 0,2) mm göz açıklıklı eleğin sonuçlar üzerinde bir etkisi olamayacağı sonucuna varılmıştır. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

18.3.2.3.3 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

18.3.2.3.4 Kumpas

Numune çapı ve yüksekliği her deney öncesi ölçülmektedir. Ancak hesaplarda çap olduğu için belirsizlikte çap değeri kullanılmıştır. Kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$MITUTOYO (0-150 \text{ mm}) \quad U_{Kumpas} = \pm (0,0143 \text{ mm} + 0,00001 \cdot L \text{ mm}) \rightarrow k = 2$$

$$U_{Kumpas} = \pm (0,00715 \text{ mm} + 0,000005 \cdot L \text{ mm}) = \pm (0,000715 \text{ cm} + 0,0000005 \cdot L \text{ cm})$$

18.3.2.3.5 Komparatör

Deneyde kullanılmakta olan komparatör saatinin kalibrasyon sertifikasından alınan toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$MITUTOYO (0-25,4 \text{ mm}) \quad U_{Komparatör} = \pm 5 \mu\text{m} = \pm 0,0005 \text{ cm} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{Komparatör} = 0,0005 / 2 = 0,00025$$

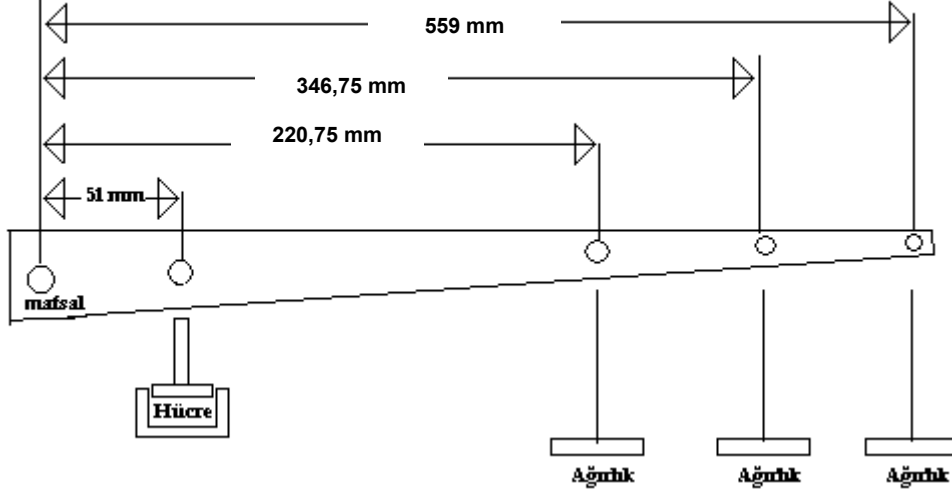
18.3.2.3.6 Kronometre

Deneyde kullanılmakta olan kronometrenin kalibrasyon sertifikasından alınan toplam belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$U_{Kronometre} = \pm 0,5 \text{ s} \rightarrow k = 2 \rightarrow U_{Kronometre} = 0,5 / 2 = 0,25 \text{ s}$$

18.3.2.3.7 Ağırlıkların etkisi

Konsolidasyon aletinde üç farklı çapta halka mevcut ve bu halkalara istenilen basınçlar belli kol oranları ile verilmektedir (ağırlıklar kol oranı kadar daha küçüktür). Ağırlıklar ile kol oranı arasındaki ilişki Şekil 18.2'de gösterilmiş ve Çizelge 18.5'te verilmiştir. Ayrıca, çapı 76,2 cm olan halka ve kol oranı 11 olan cihaz için gerekli ağırlık miktarları Çizelge 18.6'da verilmiştir.



Şekil 18.2 - Ağırlıklar ile kol oranı arasındaki ilişki

Çizelge 18.5 - Laboratuvarlar arası karşılaştırma sonuçları (değerler % yığılımlı değerlerdir)

Hücre Çapı (mm)	48	60	76,2
Hücre Alanı (cm ²)	18,1	28,27	45,6
Yük Kol Uzunluğu (mm)	221	344	561
Baskı Kolu Uzunluğu (mm)	51	51	51
Kol (Kaldıraç) Oranı	$51/220,75 = 4,328$	$51/346,75 \cong 6,8$	$51/559=10,961 (\cong 1/11)$

Çizelge 18.6 - D = 76,2 cm ve kol oranı = 11 için gerekli ağırlık miktarları

Sıra No	1	2	3	4	5	6	7
Basınç (kg/cm ²)	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Ağırlık (g)	518	1036	2073	4146	8292	16583	33164
Toplam Ağırlık (g)	1036	2073	4146	8292	16583	33164	66328

TS 1900-2'de gerilmelerin % 1,5 doğrulukla uygulanabileceği belirtildiği için Çizelge 18.7'de % 1,5 doğrulukla gerilmeleri elde edebilmek amacıyla her halka çapı ve kol oranı için gerekli en büyük ve en küçük yük miktarları hesaplanarak son iki kolonda verilmiştir. Bu değerlerin eldeki ağırlıklarla karşılaştırıldığında, % 1,5 hassasiyet içinde kaldığı görülecektir.

Çizelge 18.7 - D = 76,2 mm, A = 45,6 cm², kol oranı = 10,961 ($\approx 1/11$)

Gerilme kg/cm ²	Gerekli ağırlık g	Önceki ağırlık g	Toplam ağırlık g	% 1'lik basınç hassasiyeti için $\pm$ yük miktarı g	En büyük yük g	En küçük yük g
0,25	1.040,1		1.040,1	10,4	1.050,5	1.029,7
0,5	2.080,3	1.040,1	1.040,1	20,8	2.101,1	2.059,5
1	4.160,5	2.080,3	2.080,3	41,6	4.202,1	4.118,9
2	8.321,1	4.160,5	4.160,5	83,2	8.404,3	8.237,9
4	16.642,1	8.321,1	8.321,1	166,4	16.808,6	16.475,7
8	33.284,3	16.642,1	16.642,1	332,8	33.617,1	32.951,4
16	66.568,6	33.284,3	33.284,3	665,7	67.234,3	65.902,9

Konsolidasyon deneylerinin yapıldığı halka çapları:

Büyük halka için [7,581 ilâ 7,644] mm

Orta halka için [5,972 ilâ 6,020] mm

Küçük halka için [4,765 ilâ 4,800] mm

Yükseklik D/3 ile D/4 arasında olması istendiğinden:

Büyük halka için $7,62/4 = 1,905 \text{ mm} < D < 7,62/3 = 2,54 \text{ mm}$

Orta halka için $6,00/4 = 1,5 \text{ mm} < D < 6,00/3 = 2,00 \text{ mm}$

Küçük halka için $4,80/4 = 1,2 \text{ mm} < D < 4,8/3 = 1,6 \text{ mm}$

Arasında olması tavsiye edilmektedir. Ancak, ilgili en küçük yükseklik şartı sağlandıktan sonra, yüksekliğin fazla olması sadece suyun numuneden drenaj zamanını artıracak için konsolidasyon süresini artıracaktır. Zaten her yükleme için 24 saat beklenildiği için bu drenaj süresi fazlasıyla sağlanmasından dolayı, deneyde daha yükseklikte bir zemin numunesi kullanılabilir.

Ağırlıkların kontrol değerleri ile Çizelgelerin son iki kolonundaki veriler karşılaştırıldığında, tüm ağırlıkların en büyük ve en küçük değerler arasında olduğu görülecektir. **Bundan dolayı ağırlıkların belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

18.3.2.3.8 Kol oranı etkisi

Konsolidasyon aletinin yapıldığı frezenin okunabilirliği 0,02 mm (1/50) olduğundan ve freze kalibresi olmadığından, belirsizlik olarak aşağıda verilen değer alınmıştır:

$$U_{\text{Kol}} = 0,02 \text{ mm} = 0,002 \text{ cm}$$

18.3.2.4 Sistemik hataların toplam belirsizliği

Tek yönlü konsolidasyon deneyinde dört dane katsayı verildiğinden her birinin belirsizliği farklı hesaplanmalıdır.

18.3.2.4.1 Konsolidasyon katsayısı C_v (cm²/s)

$$U_{\text{Sistemik}}(C_v) = \left[\left(\frac{\partial C_v}{\partial H_i} * u_{\text{Komparatör}(i)} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_v}{\partial H_{i+1}} * u_{\text{Komparatör}(i+1)} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_v}{\partial t_{g0}} * u_{\text{Kronometre}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

18.3.2.4.2 Hacimsel sıkışma katsayısı m_v (cm²/kg)

$$U_{\text{Sistemik (mv)}} = \left[\left(\frac{\partial m_v}{\partial H_i} * u_{\text{Komparatör (i)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_v}{\partial H_{i+1}} * u_{\text{Komparatör (i+1)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_v}{\partial W_i} * u_{\text{Terazi (1)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_v}{\partial W_{i+1}} * u_{\text{Terazi (2)}} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial m_v}{\partial D_0} * u_{\text{Komparatör}} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_v}{\partial L} * u_{\text{Kol}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

18.3.2.4.3 Sıkışma indisini C_c (%) ve Şişme indisini C_s (%)

$$U_{\text{Sistemik (Cc veya Cs)}} = \left[\left(\frac{\partial C_c}{\partial G_s} * u_{G_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_c}{\partial D_0} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_c}{\partial H_i} * u_{\text{Komparatör (i)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_c}{\partial H_{i+1}} * u_{\text{Komparatör (i+1)}} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial C_c}{\partial W_s} * u_{\text{Terazi (Ws)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_c}{\partial W_i} * u_{\text{Terazi (1)}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_c}{\partial W_{i+1}} * u_{\text{Terazi (2)}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

18.3.3 Deneyin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistemik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

18.4 Tek yönlü konsolidasyon deneyinin çözümlü örneği**18.4.1 Konsolidasyon katsayısının (C_v) çözümlü örneği****18.4.1.1 Tek yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen veriler**

No 4 elekten elenerek sıkıştırılan örselenmiş deney numunesi üzerinde yapılan tek yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen veriler Çizelge 18.8'de verilmiştir. Deney numunesinin deney başında ve sonunda ölçülen su içeriği değerleri Çizelge 18.9'da verilmiştir.

Deney numunesinin Bağıl yoğunluğu 2,55

Deney numunesinin çapı = 7,62 cm

Deney numunesinin yüksekliği = 21,336 mm

Çizelge 18.8 - Tek yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen veriler

Yükler	0,25 kg/cm2	0,5 kg/cm2	1 kg/cm2	2 kg/cm2	4 kg/cm2	8 kg/cm2	16 kg/cm2	4 kg/cm2	1 kg/cm2
Zaman Dakika									
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,399	1,008	2,021	3,157	2,732
0,1	0,138	0,133	0,179	0,286	0,637	1,475	2,350		
0,3	0,138	0,138	0,184	0,299	0,669	1,523	2,380		
0,5	0,133	0,140	0,187	0,307	0,693	1,546	2,397		
1		0,141	0,189	0,317	0,722	1,577	2,423		
2		0,140	0,190	0,329	0,760	1,607	2,451		
5			0,190	0,344	0,803	1,649	2,501		
10			0,190	0,353	0,838	1,686	2,546		
20			0,188	0,360	0,865	1,730	2,603		
30				0,366	0,883	1,755	2,648		
40				0,370	0,897	1,769	2,677		
60				0,374	0,910	1,798	2,722		
80				0,377	0,923	1,815	2,775		
100				0,378	0,933	1,830	2,803		
150				0,383	0,948	1,866	2,874		
200				0,384	0,959	1,899	2,929		
300				0,387	0,972	1,930	2,990		
500				0,390	0,984	1,970	3,055		
1440	0,133	0,140	0,188	0,399	1,008	2,021	3,157	2,732	2,241
Sıcaklık °C	18,0	18,0	18,0	18,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
				19,0	19,0	19,0	19,5	19,0	19,5
				19,0	19,0	19,0	19,5	19,5	19,5
	18,0	18,0	18,0	18,7	19,0	19,0	19,3	19,2	19,3

Çizelge 18.9 - Deney numunesinin deney başında ve sonunda ölçülen su içeriği değerleri

	Deney başında	Deney sonunda
Halka No	28	28
Halka + yaş numune ağırlığı, g	271,7	272
Halka + kuru numune ağırlığı, g	239,4	239,4
Su miktarı, g	32,3	32,6
Halka ağırlığı, g	85,7	85,7
Kuru zemin ağırlığı, g	153,7	153,7
Su içeriği, %	21,0	21,2

18.4.1.2 Konsolidasyon katsayısının hesaplanması

18.4.1.2.1 Konsolidasyon katsayısı

18.4.1.2.1.1 Konsolidasyon katsayısının karekök zaman yöntemi ile hesaplanması

Deneyden elde edilen veriler kullanılarak çizilen oturma - karekök zaman grafikleri Şekil 18.3, Şekil 18.4, Şekil 18.5 ve Şekil 18.6'da gösterilmiştir. t_{90} değerleri kullanılarak, konsolidasyon katsayısının hesaplanması Çizelge 18.10'da gösterilmiştir. Ayrıca, basınç - boşluk oranı grafiği de Şekil 18.7'de verilmiştir.

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda, konsolidasyon katsayısının hesaplanmasında, aksi istenmedikçe oturma - karekök zaman yöntemi kullanılmaktadır.

18.4.1.2.1.2 Konsolidasyon katsayısının logaritma zaman yöntemi ile hesaplanması

Deneyden elde edilen veriler kullanılarak çizilen bütün basınç kademelerine ait oturma - logaritma zaman grafiği Şekil 18.8'de gösterilmiştir.

Ancak, DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda, konsolidasyon katsayısının hesaplanmasında, aksi istenmedikçe oturma - karekök zaman yöntemi kullanıldığından, t_{50} değerleri kullanılarak, konsolidasyon katsayısının hesaplanması gösterilmemiştir.

18.4.1.2.2 Konsolidasyon katsayısının rastgele belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı $U_{\text{Rastgele}} (C_v) = 0,23$ (karşılaştırma deneylerinden)

18.4.1.2.3 Konsolidasyon katsayısının sistematik belirsizliği

Sadece karekök zaman yöntemine göre sistematik belirsizlik hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 18.11'de gösterilmiştir.

18.4.1.2.4 Konsolidasyon katsayısının toplam belirsizliği

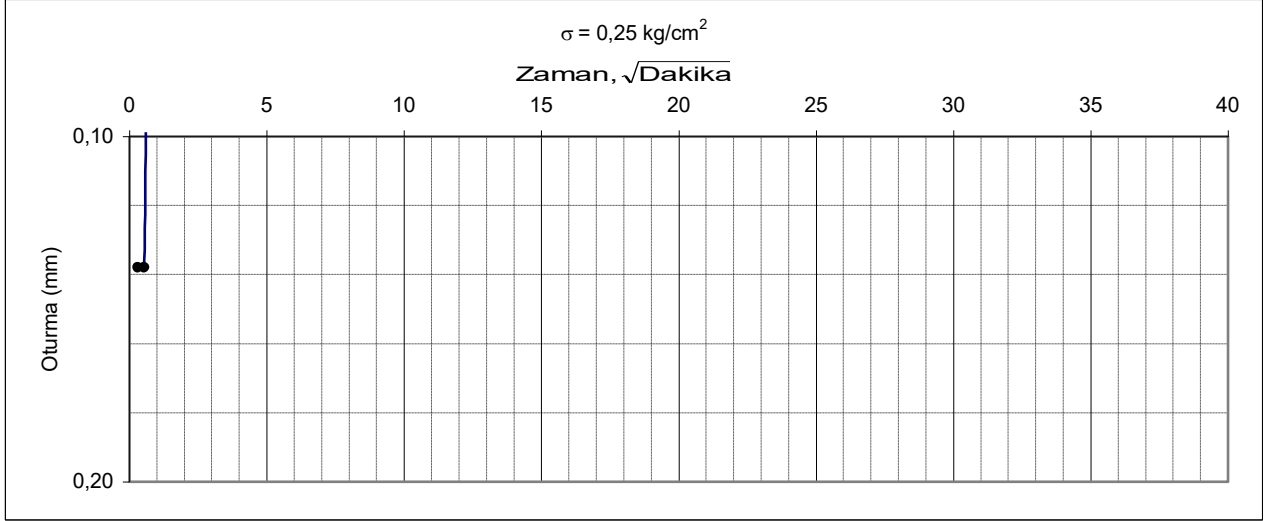
Sadece karekök zaman yöntemine göre sistematik belirsizlik hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 18.11'de gösterilmiştir.

18.4.1.3 Konsolidasyon katsayısı değerlerinin gösterilmesi

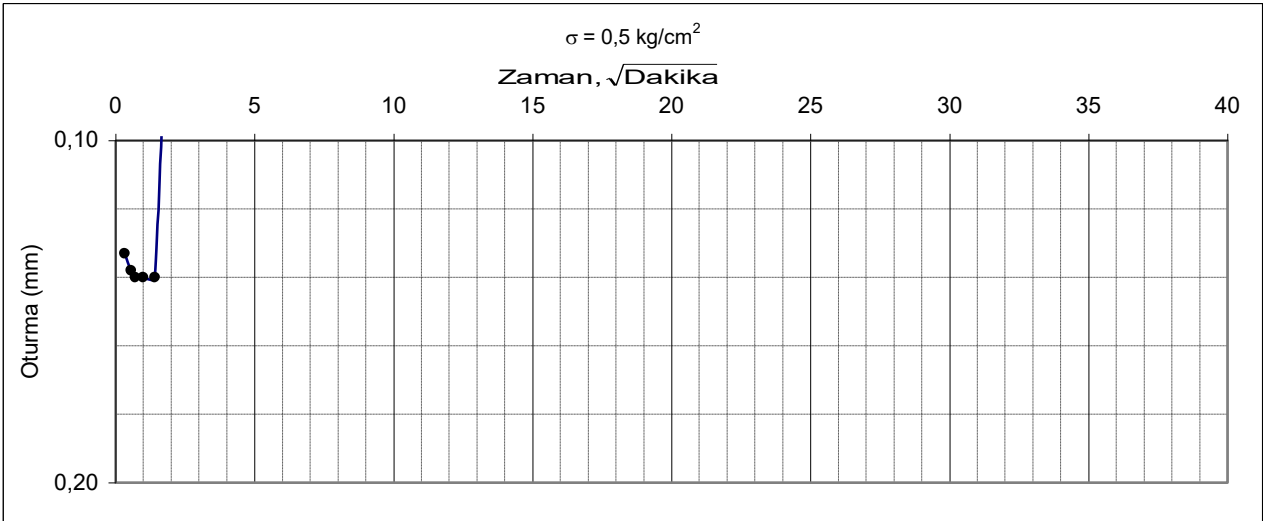
Sadece karekök zaman yöntemine göre sistematik belirsizlik hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 18.11'de gösterilmiştir.

OTURMA-KAREKÖK ZAMAN GRAFİĞİ

Numune no	-	Deney başlama tarihi	-
Kuyu/sondaj no	İzotop Lâboratuvarı arkası	Deney bitiş tarihi	-
Deney standardı	TS 1900-2		



$H_{\text{ort}} (\text{mm}) = 21,267 \pm 0,005$	$\sqrt{t_{90}} = 0,00$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) = - \pm -$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) = - \pm -$
---	------------------------	--	---

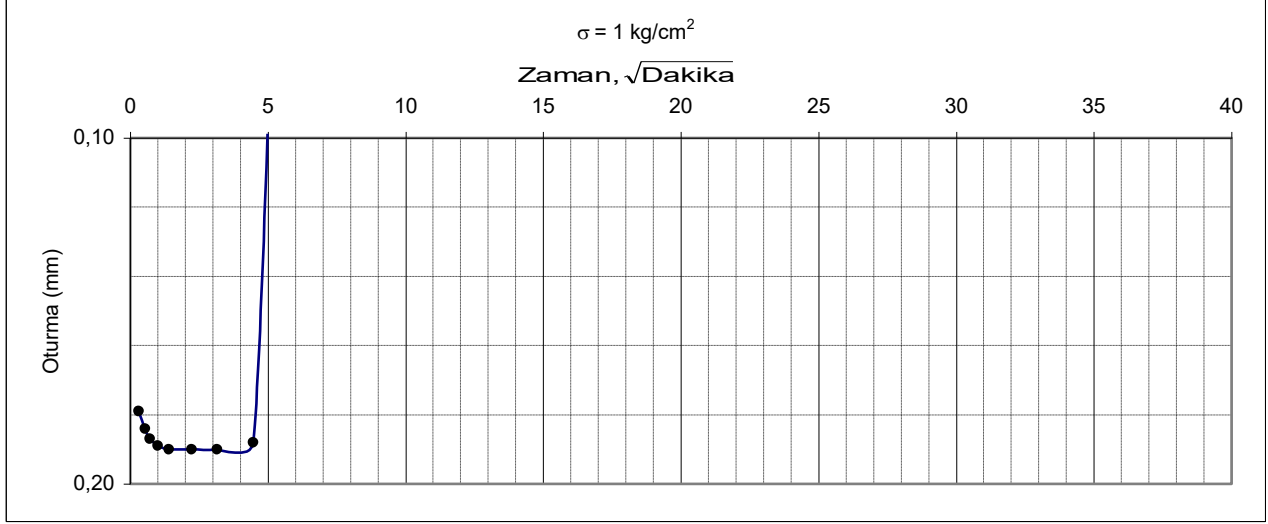


$H_{\text{ort}} (\text{mm}) = 21,197 \pm 0,005$	$\sqrt{t_{90}} = 0,00$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) = - \pm -$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) = - \pm -$
---	------------------------	--	---

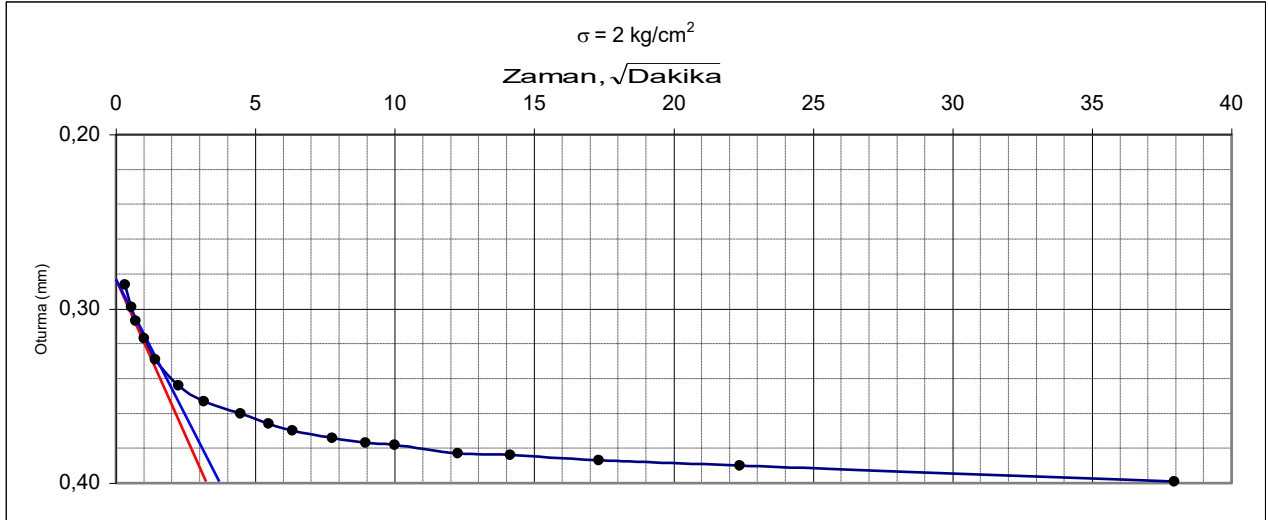
Şekil 18.3 - 0,25 kg/cm² ve 0,50 kg/cm² basınç altında oturma - karekök zaman grafikleri

OTURMA-KAREKÖK ZAMAN GRAFİĞİ

Numune no	-	Deney başlama tarihi	-
Kuyu/sondaj no	İzotop Lâboratuvarı arkası	Deney bitiş tarihi	-
Deney standardı	TS 1900-2		



$H_{ort} \text{ (mm)} = 21,171 \pm 0,005$	$\sqrt{t_{90}} = 0,00$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) = - \pm -$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) = - \pm -$
---	------------------------	--	---

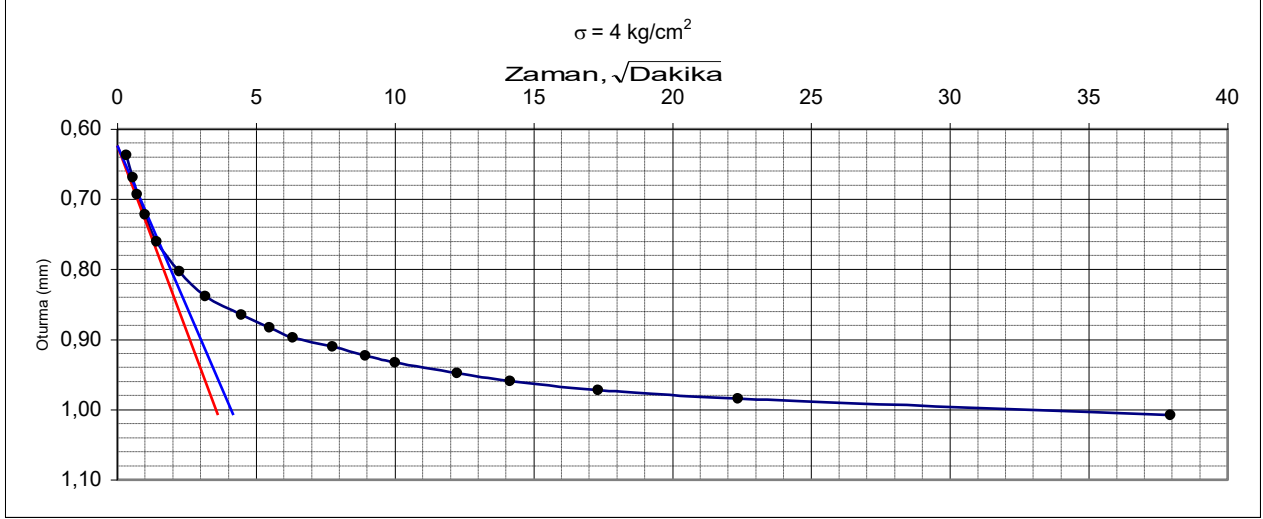


$H_{ort} \text{ (mm)} = 21,042 \pm 0,005$	$\sqrt{t_{90}} = 1,60$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) = 0,99 \pm 0,35$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) = 6,11 \pm 0,17$
---	------------------------	--	---

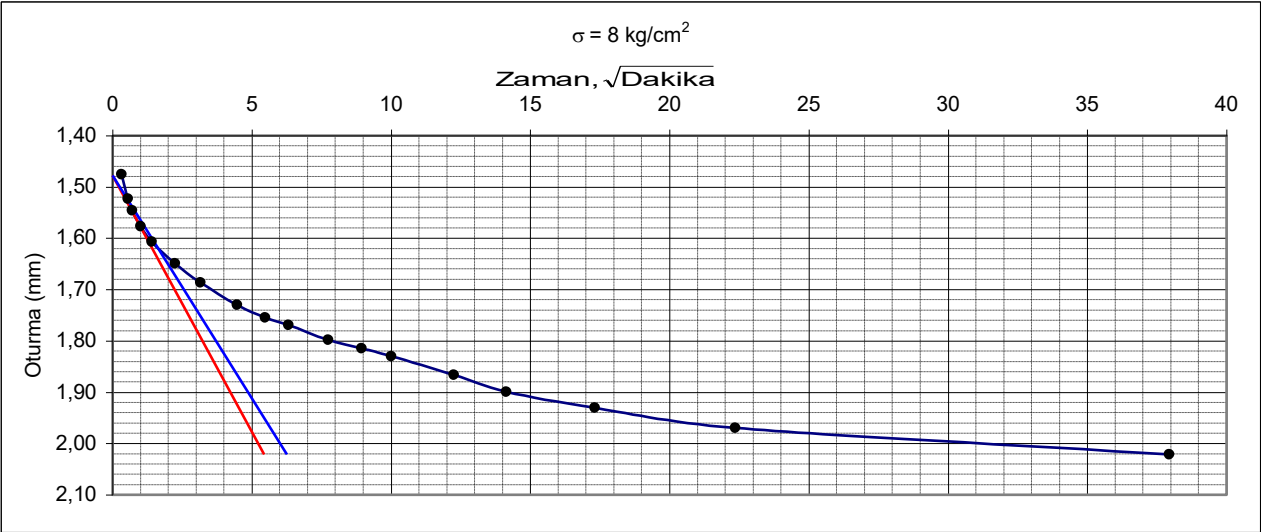
Şekil 18.4 - 1 kg/cm² ve 2 kg/cm² basınç altında oturma - karekök zaman grafikleri

OTURMA-KAREKÖK ZAMAN GRAFİĞİ

Numune no	-	Deney başlama tarihi	-
Kuyu/sondaj no	İzotop Lâboratuvarı arkası	Deney bitiş tarihi	-
Deney standardı	TS 1900-2		



$H_{\text{ort}} (\text{mm}) = 20,633 \pm 0,005$	$\sqrt{t_{90}} = 1,60$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) = 1,48 \pm 0,23$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) = 5,88 \pm 0,15$
---	------------------------	--	---

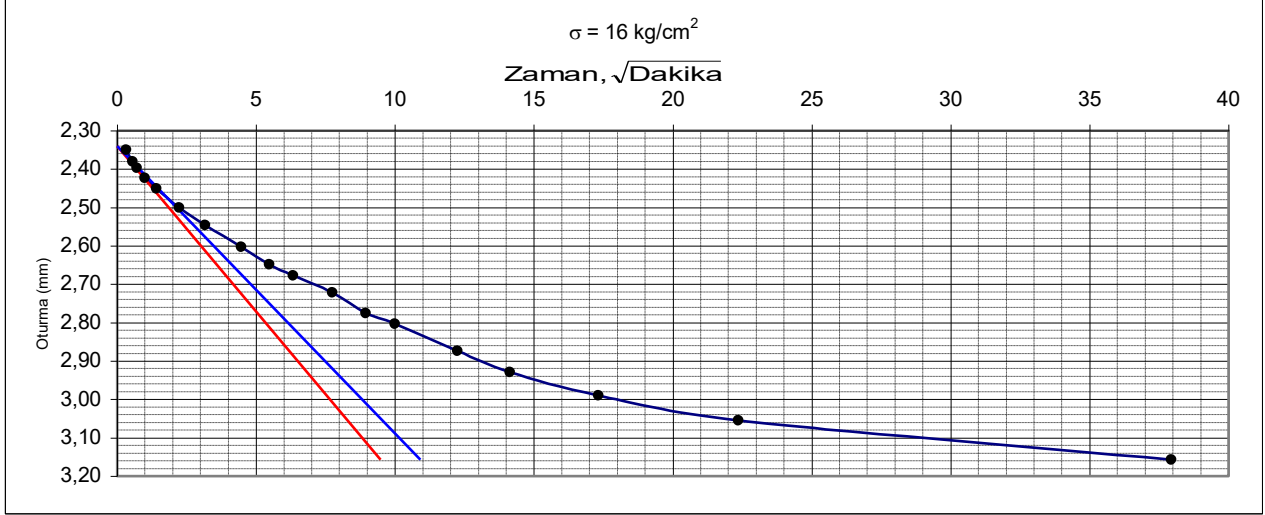


$H_{\text{ort}} (\text{mm}) = 19,822 \pm 0,005$	$\sqrt{t_{90}} = 1,60$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) = 1,28 \pm 0,11$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) = 5,42 \pm 0,40$
---	------------------------	--	---

Şekil 18.5 - 4 kg/cm² ve 8 kg/cm² basınç altında oturma - karekök zaman grafikleri

OTURMA-KAREKÖK ZAMAN GRAFİĞİ

Numune no	-	Deney başlama tarihi	-
Kuyu/sondaj no	İzotop Lâboratuvarı arkası	Deney bitiş tarihi	-
Deney standardı	TS 1900-2		



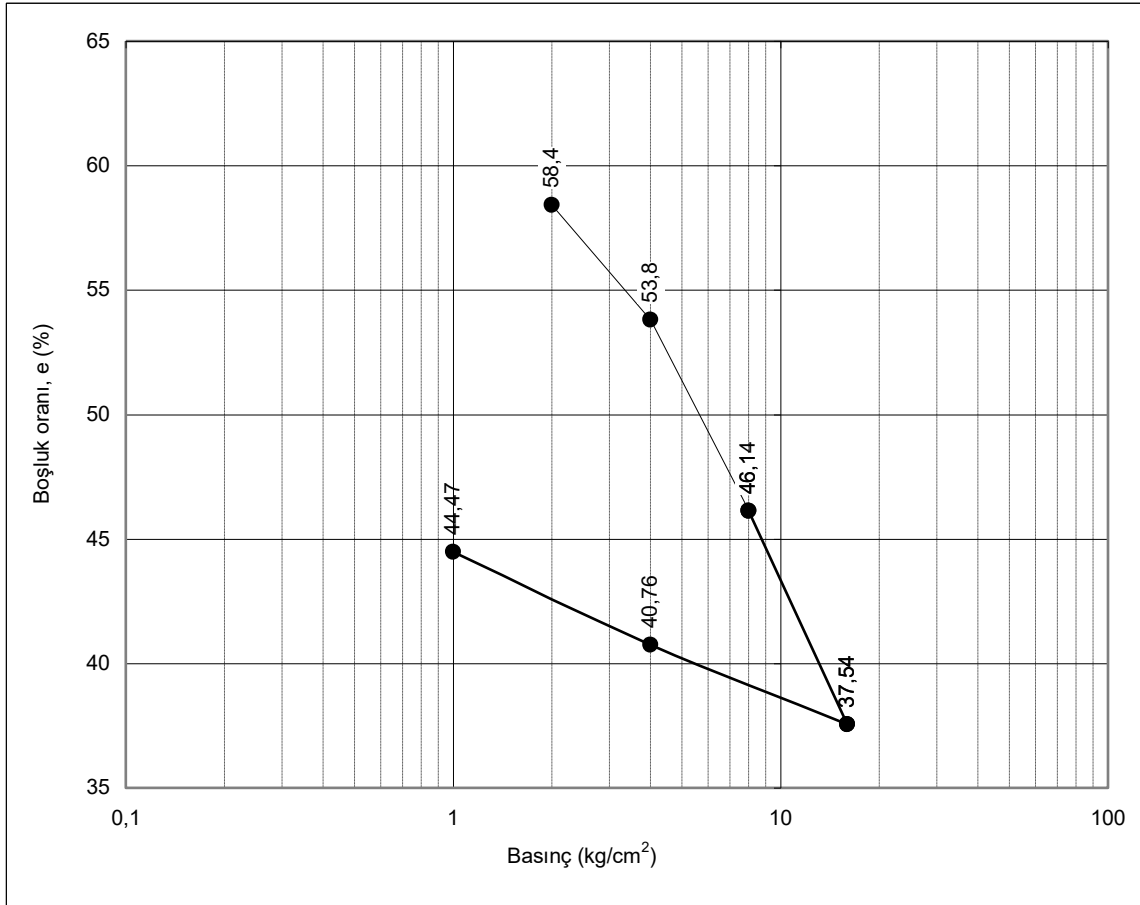
$H_{\text{ort}} (\text{mm}) = 18,747 \pm 0,005$	$\sqrt{t_{90}} = 1,80$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) = 0,76 \pm 0,06$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) = 3,83 \pm 0,46$
---	------------------------	--	---

Şekil 18.6 - 16 kg/cm² basınç altında oturma - karekök zaman grafikleri

BASINÇ - BOŞLUK GRAFİĞİ

Numune no	-	Deney başlama tarihi	-
Kuyu/sondaj no	İzotop Lâboratuvarı arkası	Deney bitiş tarihi	-
Deney standardı	TS 1900-2		

Sıkışma oranı, Cc, %	28,6 ± 2,6
Kazanım oranı, Cs, %	5,8 ± 0,5
Ön konsolidasyon katsayısı, P_0 (kg/cm ²)	

**Şekil 18.7 - Basınç - boşluk oranı grafiği**

Çizelge 18.10 - Konsolidasyon katsayısının hesaplanması (C_v değeri oturma - karekök zaman yönteminden elde edilen t_{90} değeri kullanılarak)

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



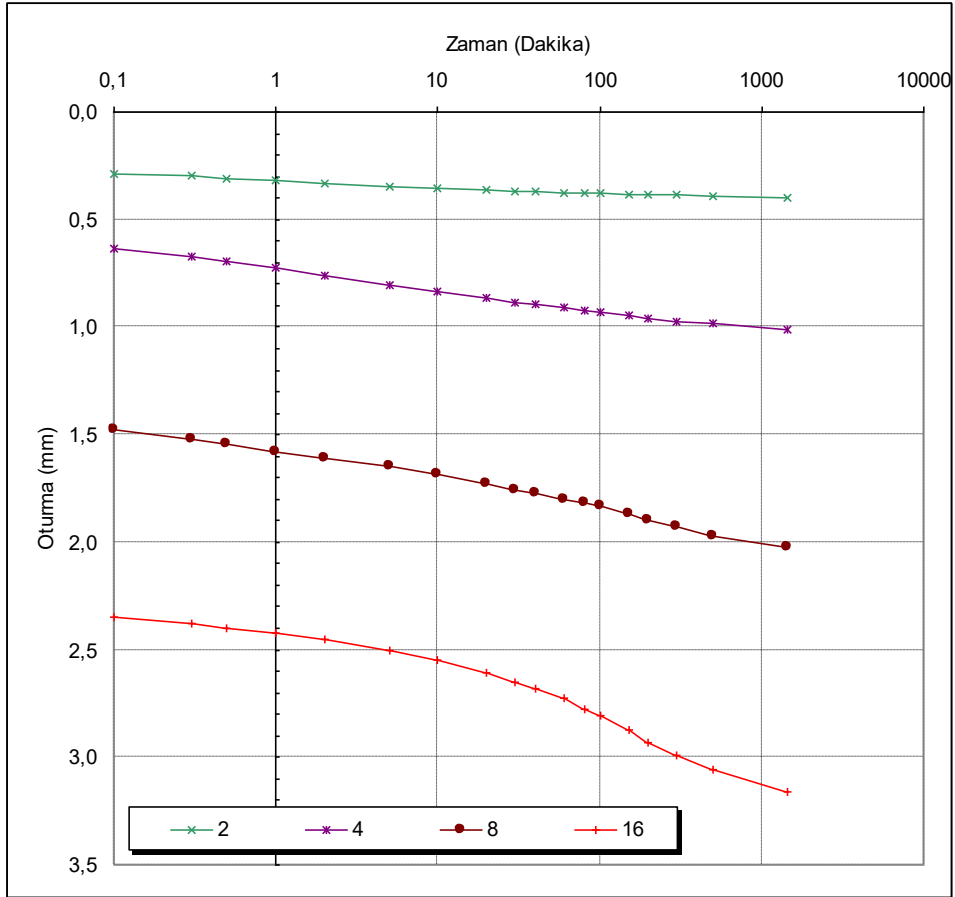
KONSOLIDASYON KATSAYILARI FORMU

Lâb. no	-	Ring çapı, cm	7,62
Gönderen	-	Ring kesit alanı, cm ²	45,604
Ait olduğu proje	Araştırma	Ring yüksekliği, mm	21,336
Kuyu/sondaj no	İzotop Laboratuvarı arkası	Kabarma miktarı, mm	0
Numune no	-	Son numune yüksekliği, H, mm	21,336
Numune tipi	Örselenmiş	Özgül ağırlık, Gs	2,55
Kullanılan elek	No 4 (4,75 mm)	Kuru toprak ağırlığı, g	153,7
Deney standardı	TS 1900-2	Katı danelerin eşdeğer yüksekliği, mm	13,217
Numune kabul tarihi	-	Şişme yüzdesi, %	0,00
Deney başlama tarihi	21.9.04	Deneyi yapan	-
Deney bitiş tarihi	1.10.04	Kontrol eden	-

HESAPLAMALAR

Yükler	Oturma mm	H mm	H _{ort} mm	e	e _{ortalama}	Δe	Δσ kg/cm ²	a=Δe/Δσ cm ² /kg	m _v =a/(1+e _{ort}) 10 ⁻² cm ² /kg	t ₉₀ s	C _v 10 ⁻³ cm ² /s	k cm/s
0	0,000	21,336		0,6143								
			21,267		0,6091	0,0104	0,25	0,0418	-	0,0	-	-
0,25	0,138	21,198		0,6038								
			21,197		0,6038	0,0002	0,25	0,0006	-	0,0	-	-
0,5	0,140	21,196		0,6037								
			21,171		0,6018	0,0038	0,5	0,0076	-	0,0	-	-
1	0,190	21,146		0,5999								
			21,042		0,5920	0,0158	1	0,0158	0,99	153,6	6,11	6,07E-08
2	0,399	20,937		0,5841								
			20,633		0,5611	0,0461	2	0,0230	1,48	153,6	5,88	8,67E-08
4	1,008	20,328		0,5380								
			19,822		0,4997	0,0766	4	0,0192	1,28	153,6	5,42	6,93E-08
8	2,021	19,315		0,4614								
			18,747		0,4184	0,0859	8	0,0107	0,76	194,4	3,83	2,90E-08
16	3,157	18,179		0,3754								
			18,392		0,3915	-0,0322	-12	0,0027	0,19			
4	2,732	18,604		0,4076								
			18,850		0,4262	-0,0371	-3	0,0124	0,87			
1	2,241	19,095		0,4447								

	0,250 kg/cm ²	0,500 kg/cm ²	1,000 kg/cm ²	2,000 kg/cm ²	4,000 kg/cm ²	8,000 kg/cm ²	16,000 kg/cm ²
d ₀	0,000	0,133	0,140	0,188	0,399	1,008	2,021
d _s	0,000	0,000	0,000	0,283	0,624	1,478	2,340
d ₉₀	0,360	0,600	0,920	1,370	2,000	2,900	3,157
d _r	0,133	0,140	0,188	0,399	1,008	2,021	3,157
İlk sıkışma oranı, r ₀	0,000	-19,000	-2,917	0,450	0,369	0,464	0,281
Birinci sıkışma oranı, r _p	3,008	95,238	21,296	5,724	2,511	1,560	0,799
İkinci sıkışma oranı, r _s	-2,008	-75,238	-17,380	-5,174	-1,880	-1,024	-0,080



Şekil 18.8 - Her basınç kademesinde elde edilen değerlerin logaritma zamana göre çizilmesi

Çizelge 18.11 - Konsolidasyon katsayısının (C_v) belirsizlik değeri hesaplanması

H_i , cm	2,1336	2,1203	2,1196	2,1148	2,0937	2,0328	1,9315	1,8179
σ_i , kg/cm ²	0	0,25	0,5	1	2	4	8	16
t_{90} , saniye	-	-	-	153,6	153,6	153,6	194,4	
C_v (cm ² /s)	-	-	-	6,11E-03	5,88E-03	5,42E-03	3,83E-03	
$\frac{\partial C_v}{\partial H_i}$	-	-	-	2,90E-03	2,85E-03	2,74E-03	2,04E-03	
$\frac{\partial C_v}{\partial H_{i+1}}$	-	-	-	2,90E-03	2,85E-03	2,74E-03	2,04E-03	
$\frac{\partial C_v}{\partial t}$	-	-	-	-7,96E-05	-7,65E-05	-7,06E-05	-3,94E-05	
$U_{\text{komparator}}$	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	
$U_{\text{kronometre}}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
U_{Rastgele}	-	-	-	1,99E-05	1,92E-05	1,77E-05	9,88E-06	
$U_{\text{Sistematik}}$	4,00E-05	4,00E-05	4,00E-05	8,00E-05	7,00E-05	2,00E-04	2,30E-04	
U_{Toplam}	-	-	-	8,24E-05	7,26E-05	2,01E-04	2,30E-04	
$k*U_{\text{toplam}}$	-	-	-	1,65E-04	1,45E-04	4,02E-04	4,60E-04	
C_v (10 ⁻³ cm ² /s)	-	-	-	6,11	5,88	5,42	3,83	
$k*U_{\text{toplam}}$ (10 ⁻³ cm ² /s)	-	-	-	0,16	0,15	0,40	0,46	
Oran ($k*U_{\text{toplam}}/C_v$)	-	-	-	2,7	2,5	7,4	12,0	

18.4.2 Hacimsel sıkışma katsayısının (m_v) çözümlü örneği**18.4.2.1 Tek yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen veriler**

Madde 18.4.1.1'de verilmiştir

18.4.2.2 Hacimsel sıkışma katsayısının hesaplanması**18.4.2.2.1 Hacimsel sıkışma katsayısı**

Deneyden elde edilen veriler kullanılarak hacimsel sıkışma katsayısının hesaplanması Çizelge 18.10'da gösterilmiştir.

18.4.2.2.2 Hacimsel sıkışma katsayısının rastgele belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı $U_{\text{Rastgele}}(m_v) = 0,1$ (karşılaştırma deneylerinden)

18.4.2.2.3 Hacimsel sıkışma katsayısının sistematik belirsizliği

Hacimsel sıkışma katsayısının sistematik belirsizliği hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 18.12'de gösterilmiştir.

18.4.2.2.4 Hacimsel sıkışma katsayısının toplam belirsizliği

Hacimsel sıkışma katsayısının toplam belirsizliği Çizelge 18.12'de gösterilmiştir.

18.4.2.3 Hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin gösterilmesi

Hacimsel sıkışma katsayısının değerleri ile belirsizlikleri Çizelge 18.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 18.12 - Hacimsel sıkışma katsayısının (m_v) belirsizlik değeri hesaplanması

H_i , cm	2,1336	2,1203	2,1196	2,1148	2,0937	2,0328	1,9315	1,8179	1,8604	1,9095
σ_i , kg/cm ²	0	0,25	0,5	1	2	4	8	16	4	1
Yük, kg	0,000	1,036	1,040	2,084	4,161	8,280	16,561	33,1830	16,6010	4,1600
Σ Yük, kg	0,000	1,036	2,076	4,160	8,321	16,601	33,162	66,345	16,601	4,160
Teorik m_v (cm ² /kg)	0,02501	0,00132	0,00453	0,01003	0,01476	0,01278	0,00757	0,00193	0,00868	
Ağırlık m_v (cm ² /kg)	0,02502	0,00132	0,00451	0,00999	0,01478	0,01279	0,00757	0,00193	0,00868	
$\frac{\partial m_v}{\partial H_i}$	-	-	-	0,47280	0,23995	0,12351	0,06486	0,04600	0,17973	
$\frac{\partial m_v}{\partial H_{i+1}}$	-	-	-	0,47280	0,23995	0,12351	0,06486	0,04600	0,17973	
$\frac{\partial m_v}{\partial W_i}$	-	-	-	0,00241	0,00179	0,00078	0,00023	0,00004	0,00070	
$\frac{\partial m_v}{\partial W_{i+1}}$	-	-	-	0,00241	0,00179	0,00078	0,00023	0,00004	0,00070	
$\frac{\partial m_v}{\partial D_0}$	-	-	-	0,00263	0,00389	0,00337	0,00199	0,00051	0,00229	
$\frac{\partial m_v}{\partial L}$	-	-	-	0,00091	0,00135	0,00117	0,00069	0,00018	0,00079	
$U_{\text{komparatör}}$	-	-	-	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	
U_{Terazi}	-	-	-	0,00362	0,00362	0,00362	0,00362	0,00362	0,00362	
U_{Kumpas}	-	-	-	0,00072	0,00072	0,00072	0,00072	0,00072	0,00072	
$U_{L \text{ kol}}$	-	-	-	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	
$U_{\text{sistematik}}$	-	-	-	0,00017	0,00009	0,00004	0,00002	0,00002	0,00006	
U_{Rastgele}	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00080	0,00030	0,00020	0,00060	0,00100	
U_{Toplam}	-	-	-	0,00053	0,00080	0,00030	0,00020	0,00060	0,00100	
$k \cdot U_{\text{toplam}}$	-	-	-	0,00105	0,00161	0,00061	0,00040	0,00120	0,00200	
m_v (10 ⁻² cm ² /kg)	-	-	-	1,00	1,48	1,28	0,76	0,19	0,87	
$k \cdot U_{\text{toplam}}$ (10 ⁻² cm ² /kg)	-	-	-	0,11	0,16	0,06	0,04	0,12	0,20	
Oran	-	-	-	10,5	10,9	4,7	5,3	62,3	23,1	

18.4.3 Sıkışma indisi (C_c) ve şişme indisinin (C_s) çözümlü örneği

18.4.3.1 Tek yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen veriler

Madde 18.4.1.1'de verilmiştir

18.4.3.2 Sıkışma indisi ve şişme indisinin hesaplanması

18.4.3.2.1 Sıkışma indisi ve şişme indisi

Deneyden elde edilen veriler kullanılarak hacimsel sıkışma katsayısının hesaplanması Çizelge 18.13'te gösterilmiştir.

18.4.3.2.2 Sıkışma indisi ve şişme indislerinin rastgele belirsizliği

$U_{Rastgele}(C_c) = 0,0074 = \% 0,74$ (karşılaştırma deneylerinden)

$U_{Rastgele}(C_s) = 0,0007 = \% 0,070$ (karşılaştırma deneylerinden)

18.4.3.2.3 Sıkışma indisi ve şişme indislerinin sistematik belirsizliği

Sıkışma indisi ve şişme indislerinin sistematik belirsizlikleri hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 18.13'te gösterilmiştir.

18.4.3.2.4 Sıkışma indisi ve şişme indislerinin toplam belirsizliği

Sıkışma indisi ve şişme indislerinin toplam belirsizlikleri Çizelge 18.13'te gösterilmiştir.

18.4.3.3 Sıkışma indisi ve şişme indislerinin değerlerinin gösterilmesi

Sıkışma indisi ve şişme indislerinin değerleri ile belirsizlikleri Çizelge 18.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 18.13 - Sıkışma indisini C_c (%) ve Şişme indisini C_s (%) belirsizlik değeri hesaplanması

	C_c	C_s	
H_i , mm	1,9315	1,8179	1,9095
σ_i , kg/cm ²	8	16	1
Yük, kg	16,561	33,1830	4,1600
Σ Yük, kg	33,162	66,345	4,160
$C_c = \frac{H_i - H_{i+1}}{H_0(\log \sigma_{i+1} - \log \sigma_i)}$	0,2855	0,0576	
$C_c = \frac{\pi G_s D_0^2 (H_i - H_{i+1})}{4W_s \left[\log \left(\frac{4W_{i+1}L}{\pi D_0^2} \right) - \log \left(\frac{4W_iL}{\pi D_0^2} \right) \right]}$	0,2854	-0,0576	
$\frac{\partial C_c}{\partial G_s}$	0,1119	0,0226	
$\frac{\partial C_c}{\partial D_0}$	0,0749	0,0151	
$\frac{\partial C_c}{\partial H_i}$	2,5122	-0,6291	
$\frac{\partial C_c}{\partial H_{i+1}}$	-2,5122	0,6291	
$\frac{\partial C_c}{\partial W_s}$	-0,0019	-0,0004	
$\frac{\partial C_c}{\partial W_i}$	0,0286	-0,0007	
$\frac{\partial C_c}{\partial W_{i+1}}$	-0,0143	0,0115	
U_{Gs}	0,0500	0,0500	
U_{kumpas}	0,0007	0,0007	
$U_{komparator}$	0,0025	0,0025	
U_{terazi}	0,0231	0,0231	
$U_{Terazi (ağırlık, W)}$	0,0036	0,0036	
$U_{Sistemik}$	0,0105	0,0025	
$U_{Rastgele}$	0,0074	0,0007	
U_{Toplam}	0,0128	0,0026	
$k \cdot U_{toplam}$	0,0257	0,0052	

$$C_c = \% (28,55 \pm 2,57) \cong \% (28,6 \pm 2,6)$$

$$C_s = \% (5,76 \pm 0,52) \cong \% (5,8 \pm 0,5)$$

18.5 İlgili standartlar

ASTM D 2435: 2004. Standard test method for one dimensional consolidation properties of soils, Vol. 04.08.

BS 1377; Part 1: 1990. Soils for civil engineering purposes, page 2, 3. Determination of the one-dimensional consolidation properties.

CEN ISO/TS 17892-5: 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 5: Incremental loading oedometer test

TS 1900-2: 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini
5.2 Deney 2: Tek yönlü konsolidasyon özelliklerinin tayini.

USBR 5700: 1989. Procedure for determining the one dimensional consolidation properties of soils, (incremental stress), Vol.2.

19 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi talimatı ve belirsizlik hesabı

19.1 Kapsam

Bu talimatta TS 1900-2/T1, ASTM D 5856 ve CEN ISO/TS 17892-11'e göre düşen seviyeli geçirgenlik deneyi anlatılmıştır. Ayrıca, düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin DIN 18130-1'de sayısal olarak çözülmüş örneği mevcuttur.

19.2 Standartlarda deneyin gerçekleştirilme yöntemleri

19.2.1 TS 1900-2/T1'e düşen seviyeli geçirgenlik deneyi talimatı

Bu deney, TS 1900-2/T1: 2007, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.9 Deney 9: Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi'ne göre yapılmaktadır.

Bu deney ile örselenmiş veya örselenmemiş ince ve orta daneli zeminlerin geçirgenlik katsayısı bulunur.

Örselenmemiş numunede geçirgenlik deneyinin yapılabilmesi için kalıp boyutlarına uygun karot alınması zorunludur. Aksi takdirde kalıp ile numune arasından su kaçacağı için geçirgenlik deneyi yapılamaz.

19.2.1.1 Gerekli araçlar

Kalıp, çapı en az 5 cm, boyu en az 6 cm olan,

Su seviyesi göstergesi, cam tüplerin düşey olarak sabitlendiği ve şerit metre monte edilmiş,

Cam tüp, çapı en az 3 mm olan ve su seviyesi değişimlerinin kolayca izlenebilen,

Şeffaf plastik hortum,

Elek, 4,75 mm göz açıklığına sahip (No 4),

Şerit metre, 0,1 mm doğrulukla ölçme yapabilen ve uygun uzunlukta olan,

Kumpas, 0,01 mm doğrulukla ölçme yapabilen,

Kronometre, 0,1 s doğrulukla ölçme yapabilen,

Numune sıkıştırma cihazları,

Terazi, 0,01 g doğrulukla tartma yapabilen,

Numune tıraşlama cihazları,

Gözenekli disk, geçirgenlikleri 10^{-4} cm/s'den büyük veya zemin numunesinin geçirgenliklerinden en az 10 kat daha büyük olan,

Damıtık su.

19.2.1.2 Numunelerin deneye hazırlanması

19.2.1.2.1 Örselenmemiş numunelerin deneye hazırlanması

Deney numunesi, blok veya tüp içerisinde laboratuvara getirilen numuneden Madde 2.4'e göre tıraşlanarak deney kalıbına yerleştirilir. Deney sırasında numune ile kalıp arasından su sızıntısı olmamalıdır.

19.2.1.2.2 Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması

Çeyrekleme yoluyla elde edilen temsili numune 4,75 mm göz açıklıklı elekten elenir. Deney numunesi, kalıba istenilen sıklığa ve su içeriğine göre Madde 2.3'e göre hazırlanır. Sıkıştırılan numune ile kalıp kenarından su sızıntısı olmayacak şekilde sıkıştırılır.

19.2.1.3 Deneyin yapılışı

Deneyin çalışma prensibi Şekil 19.1'de gösterilmiştir. Bu deneyde kullanılabilecek en büyük dane çapı, kalıp çapının 1:6 ile 1:12 arasında olmalıdır.

Numune içinden geçen akım zamanla değişmeyen akım şartlarına sahip olmalıdır. Deney sisteminde hava bulunmaması için havası alınmış damıtık su kullanılmalı ve gözenekli diskler su içerisinde bekletilmelidir.

Sıkıştırma (veya yerleştirme) işleminden sonra, numunenin altına ve üstüne gözenekli diskler yerleştirilir. Kalıbın alt ve üst başlıklarından sızıntı olmaması için lastik conta konularak kalıp yerleştirilir. Su kaçırmayacak şekilde somunları sıkılır. Kalıp ile su seviye göstergesinde bulunan cam tüp şeffaf plastik hortum ile birleştirilir.

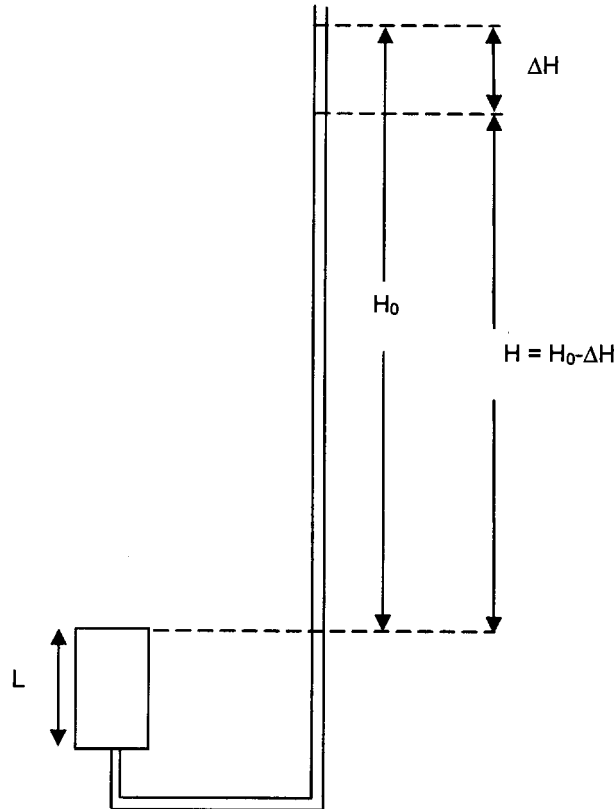
Kalıp yere dikey olarak yerleştirilir. Cam tüpün üst tarafından şeffaf plastik hortum su ile doldurulur. Hortum içinde hava kalmamasına özen gösterilmelidir. Suyun numune içinden geçerek kalıptan geçmesi beklenir. Su seviye göstergesinin sıfır noktası ile kalıbın üzerinden bulunan su çıkma deliği arasındaki dikey mesafe (H_0) ölçülür.

Su, numuneden geçerek kalıbın üstünden çıktıktan sonra su seviyesi, su seviye göstergesinin sıfır noktasına ayarlanır ve zaman (tarih, saat, dakika ve saniye olarak) kaydedilir.

Not - Su girişinin numune üzerinden olması tavsiye edilir.

Numunenin geçirgenlik durumuna göre (1 gün ilâ 10 gün) cam tüpteki düşüş miktarı (ΔH) kaydedilir.

Deney sırasında elde edilen veriler, örneğin numunenin geçirimsizlik durumuna göre belli bir zaman aralığında numuneden geçen suyun geçiş tarih ve saati, "Geçirgenlik deneyleri formu" na kaydedilir



Not - Raporda belirtilmek şartıyla, numuneye su giriş hortumu tepeden de bağlanabilir.

Şekil 19.1 - Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin prensibi

19.2.1.4 Hesaplamalar

Geçirgenlik katsayısı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log\left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H}\right)$$

Burada;

- a Su seviyesi düşüşünün izlendiği cam tüpün kesit alanı (cm²),
 L Sıkıştırılan numune yüksekliği (cm),
 A Silindirik kalıbın kesit alanı (cm²),
 t Deney süresi (s),
 H₀ Kalıbın üstündeki su çıkış deliği ile su seviye göstergesinin sıfır noktası arasındaki düşey mesafe (cm),
 ΔH t deney süresi sonunda cam tüpteki düşüş miktarı (cm)
 dır.

Aynı deney en az iki defa tekrarlanır ve yapılan deneylerin ortalaması alınarak geçirgenlik katsayısı bulunur.

Geçirgenlik katsayısına göre zeminlerin sınıflandırılması amacıyla Çizelge 19.1'de verilen değerler kullanılabilir.

Çizelge 19.1 - Geçirgenlik katsayısına göre zeminlerin sınıflandırılması

k (m/s)	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
Drenaj özellikleri	İyi						Zayıf		Drene edilemez		
Geçirgenlik derecesi	Yüksek			Orta		Düşük		Çok düşük		Teorik olarak geçirimsiz	
Genel zemin tipi	Çakıllar	Temiz kumlar		Fisürlü ve ayrılmış killer				Bozulmamış killer			
				Siltli kumlar							
Doğrudan deney tipi	Büyük boyutlu sabit seviyeli hücresi	Standart boyutlu sabit seviyeli hücresi			Düşen seviyeli hücresi						

19.2.1.5 Sonuçların gösterilmesi

Deney raporu, aşağıda verilenleri içerecek şekilde düzenlenmelidir:

- Deney numunesinin laboratuvara kayıt numarası, numuneyi gönderen, ait olduğu proje, numune tipi (örselenmiş veya örselenmemiş), numune no, örselenmemiş ise, kuyu ve/veya sondaj no,
- Deney standardı ve yılı,
- Kullanılan elek (örselenmiş ise),
- Numuneden suyun akış yönü (yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya),
- Geçirgenlik katsayısı cm/s (veya m/s) olarak en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak mühendislik gösterim ile (a,aa*10^{-a}).

19.2.2 ASTM D 5856'ya düşen seviyeli geçirgenlik deneyi talimatı

ASTM D 5856'da anlatılan düşen seviyeli geçirgenlik deneyi TS 1900-2/T1 ile aynıdır. Ancak, aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir.

Bu deney ile kenarları rijit bir molt içine sıkıştırılmış zemin numunesinin geçirgenlik katsayısı belirlenir.

Bu deney geçirgenli katsayısı 1×10^{-5} m/s'den küçük zeminler için uygundur. Bu değerden daha çok geçirgenlik katsayısına sahip zeminler için ASTM D 2434 uygulanmalıdır.

Bu deney tek yönlü laminar akım geçen zemin gibi geçirgen yapıdaki malzemelere uygulanır.

Geçirgenlik katsayısı, genellikle geçirgen malzeme içinde bulunan hava ile ters orantılıdır (hava miktarı arttıkça, geçirgenlik katsayısı azalır). Bundan dolayı, malzemede hiç veya çok az hava bulunmalıdır. Ancak, bu deney metodu ile deney numunesinin tamamen doygun olması beklenemez. Doymuş zeminlerde ASTM D 5084 uygulanmalıdır.

Deney sırasında zemin ile molt arasından suyun sızmasını önlemek için gerekli tedbirler alınmalıdır.

Geçirgenlik suyun dinamik viskozitesi ile ters orantılıdır. Dinamik viskozite ise, sıcaklığa bağlıdır. Geçirgenlik katsayısı genel olarak 20 °C için verilmektedir. Sıcaklık 20 °C den farklı olduğu zaman düzeltme yapmak gereklidir. t deney sıcaklığında suyun dinamik viskozitesi μ_t , bulunan geçirgenlik katsayısı k_t ise, 20 °C de geçirgenlik katsayısı aşağıdaki eşitlikten bulunur.

$$k_{20} = k_t \left(\frac{\mu_t}{\mu_{20}} \right) = k_T R_T$$

Burada;

μ_t Deneyi yapıldığı suyun dinamik viskozitesi olup, sıcaklığa bağlıdır. μ_t değerleri Ek A'dan alınabileceği gibi hesaplanmış R_T değerleri Çizelge 19.2'den de alınabilir.

dır.

Çizelge 19.2 - Çeşitli sıcaklıklardaki düzeltme katsayıları, R_T

Su sıcaklığı °C	R_T	Su sıcaklığı °C	R_T	Su sıcaklığı °C	R_T
1	1,723	18	1,051	35	0,719
2	1,664	19	1,025	36	0,705
3	1,611	20	1,000	37	0,692
4	1,560	21	0,976	38	0,678
5	1,511	22	0,953	39	0,665
6	1,465	23	0,931	40	0,653
7	1,421	24	0,910	41	0,641
8	1,379	25		42	0,629
9	1,339	26	0,869	43	0,618
10	1,301	27	0,850	44	0,607
11	1,265	28	0,832	45	0,598
12	1,230	29	0,814	46	0,585
13	1,197	30	0,797	47	0,575
14	1,165	31	0,780	48	0,565
15	1,135	32	0,764	49	0,556
16	1,106	33	0,749		
17	1,077	34	0,733		

19.2.3 CEN ISO/TS 17892-11'e düşen seviyeli geçirgenlik deneyi talimatı

CEN ISO/TS 17892-11'te anlatılan düşen seviyeli geçirgenlik deneyi TS 1900-2/T1 ile aynıdır. Ancak, aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir.

Akış yönü yukarı doğru hareket olacak şekilde numuneye su verilmelidir,

Piezometre tüpünün çapı, deneye tâbi tutulacak zemin numunesine göre seçilmelidir ($k=1 \cdot 10^{-6}$ m/s için en küçük çap 4 mm olmalıdır),

Sıkıştırılan numunenin alt ve üst tarafına konan poroz taşlarının geçirgenlikleri 10^{-2} m/s'den büyük olmalıdır veya zemin numunesinin geçirgenliklerinden en az 10 kat daha büyük olmalıdır.

Deney sisteminde hava bulunmamalıdır (havası alınmış damıtık su kullanılmalı, poroz taşları su içerisinde bekletilmeli, vb.).

19.3 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin belirsizlik hesabı**19.3.1 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin rastgele (A Tipi) belirsizliği**

Rastgele belirsizlik, istatistiksel yöntemler vasıtasıyla değerlendirilen belirsizliklerdir. Rastgele belirsizlik tahminleri deneysel işlemler esnasında yapılan ölçüm sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ilgilidir. Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi ile ilgili yapılan laboratuvar içi ve dışı karşılaştırma deneyleri Çizelge 19.3'te verilmiştir.

Çizelge 19.3 - Laboratuvar içi karşılaştırma sonuçları (değerler % yığılımlı değerlerdir)

	2. Karşılaştırma Deneyleri	Laboratuvar içi
Veri sayısı, n	12	4
En büyük	8,10E-08	8,26E-09
Ortanca	1,00E-08	8,07E-09
En küçük	2,62E-09	7,87E-09
Ortalama, $\bar{x}$	2,38E-08	8,07E-09
Standart sapma, σ_{Std}	2,59E-08	1,60E-10
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	7,49E-09	7,98E-11

Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin rastgele belirsizlik değeri, laboratuvar içi karşılaştırma deneylerinde elde edilen en yüksek değer olan $7,98 \cdot 10^{-11}$ cm/s değeri yaklaşık % 100 artırılarak (emniyetli tarafta kalmak için) aşağıda verilen değer alınmıştır:

Toplam rastgele belirsizlik, $U_{Rastgele(k)} = 1 \cdot 10^{-10}$ cm/s

19.3.2 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin sistematik (B Tipi) belirsizliği

Sistematik belirsizlik, her türlü deneysel cihazlardan, aletlerden veya ekipmanlardan kaynaklanan ölçüm belirsizliklerinin toplamıdır. Genellikle kalibrasyon işlemi sonunda elde edilir.

4.3.2.1 Düşen seviyeli geçirgenlik eşitliğinin türevleri

Sıkışma deneyleri ile elde edilen $\gamma_{k,mak}$ ve W_{opt} göre uygun şekilde sıkıştırılan deney numunesi içinden geçen suyun hızı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = 2,3 \frac{\frac{\pi d^2}{4} L}{\frac{\pi D^2}{4} t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = 2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = 2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} [\log(H_0) - \log(H)]$$

$$\frac{\partial k}{\partial d} = 4,6 \frac{dL}{D^2 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

$$\frac{\partial k}{\partial L} = 2,3 \frac{d^2}{D^2 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

$$\frac{\partial k}{\partial D} = -4,6 \frac{d^2 L}{D^3 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t^2} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

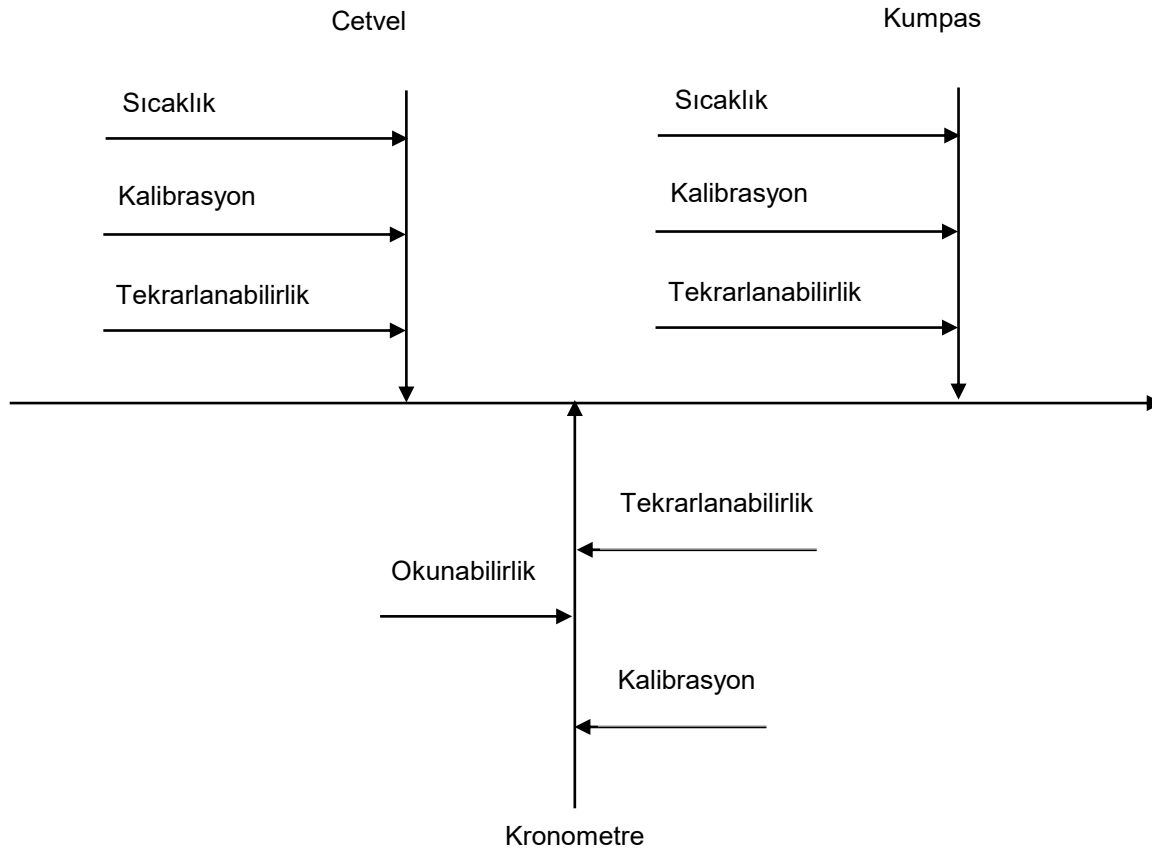
$$y = \log_a f(x) \quad \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{f'(x)}{f(x) \ln(a)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial H_0} = 2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} \frac{1}{H_0 \log(10)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial H} = -2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} \frac{1}{H \log(10)}$$

19.3.2.2 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin kılçık diyagramı

Sadece cihazların gösterildiği, iğne deliği deneyinin kılçık diyagramı Şekil 19.2'de verilmiştir.



Şekil 19.2 - Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi kılçık diyagramı

19.3.2.3 Sistematik belirsizlik kaynakları

19.3.2.3.1 Terazı

Geçirgenlik deneyinde, geçirgenlik katsayısı kalıba sıkıştırılan malzeme miktarına bağlı değildir. Bundan dolayı terazinin belirsizliği dâhil edilmemiştir.

19.3.2.3.2 Elek

Deneyde kullanılan elek göz açıklıkları $(4,75 \pm 0,2)$ mm'dir. Farklı eleğin deney üzerinde etkisinin olup olmadığı $6,3$ mm'den büyük göz açıklığına sahip No 4 $(4,75 \pm 0,2)$ mm ve $2,5$ mm'den küçük göz açıklığına sahip No 16 $(1,18 \pm 0,0579)$ mm elek aynı cihazda farklı kişilerin yaptığı deneylerle anlaşılmasına çalışılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki Çizelge 19.4'te verilmiştir.

Çizelge 19.4 - Deney sonuçları üzerinde farklı göz açıklıklarına sahip eleklerin etkisi olup olmadığına dair araştırma sonuçları

	$2,5 \pm 0,1$	No 4 $4,75 \pm 0,2$	$6,3 \pm 0,005$
Veri sayısı, n	5	5	5
Ortalama, $\bar{X}$	$9,20 \cdot 10^{-9}$	$7,38 \cdot 10^{-9}$	$9,78 \cdot 10^{-9}$
Standart sapma, σ_{Std}	$0,446 \cdot 10^{-9}$	$1,55 \cdot 10^{-9}$	$0,390 \cdot 10^{-9}$
Belirsizlik, $\sigma_{Std} / \sqrt{n}$	$0,199 \cdot 10^{-9}$	$0,690 \cdot 10^{-9}$	$0,175 \cdot 10^{-9}$

Çizelgeden de anlaşılacağı gibi sonuçlar rastgele dağılmaktadır $(4,75 \pm 0,2)$ mm elek üzerinde herhangi bir belirsizliği yoktur. **Bundan dolayı elek belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır.**

19.3.2.3.3 Etüv

Etüv belirsizliği 0 (sıfır) alınmıştır (Madde 3.3.2.3.2'ye bakınız).

19.3.2.3.4 Kronometre

Deney süresi uzun olduğundan, (en az 5 gün), okumaların çok hassas olması gerekmiyor. Bundan dolayı kronometre belirsizliği 100'e bölünmüştür.

$$U_{Kronometre} = 0,5 \text{ s} \rightarrow k = 2 \text{ olduğundan} \rightarrow U_{Kronometre} = (0,5 / 2) / 100 = 0,0025 \text{ s}$$

Not - İstenirse, kronometre belirsizliği 0 (sıfır) alınabilir.

19.3.2.3.5 Kumpas

Numune çapı ve yüksekliği her deney öncesi ölçülmektedir. Kumpasın belirsizliği aşağıda verilmiştir:

$$MITUTOYO (0-300 \text{ mm}) \quad U_{Kumpas} = \pm (0,0120 \text{ mm} + 0,00001 \cdot L \text{ mm}) \rightarrow k=2$$

$$U_{Kumpas} = \pm (0,006 \text{ mm} + 0,000005 \cdot L \text{ mm}) = \pm (0,0006 \text{ cm} + 0,0000005 \cdot L \text{ cm})$$

19.3.2.3.6 Sıkıştırma kalıp hacminin belirsizlik hesabı

Geçirgenlik deneyinde, geçirgenlik katsayısı kalıp şekline bağlı değildir. Bundan dolayı kalıp hacmi belirsizliği dahil edilmemiştir.

19.3.2.3.7 Su seviyesi düşüşünün gözlemlendiği cetvelin belirsizliği (H_0 ve H için)

Su seviyesi düşüşünün gözlemlendiği cetvel $0,1$ cm bölüntülü olduğundan, $0,1/2 = 0,05$ cm rahatlıkla okunduğundan, emniyetli tarafta kalmak için cetvel belirsizliği $0,05$ cm alınmıştır.

$$U_{Cetvel} = 0,05$$

19.3.3.4 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin sistematik belirsizliklerinin toplamı

Sistematik belirsizliğin toplamı düşen seviyeli geçirgenlik eşitliğinde bulunan her bir terimin, kendi belirsizliği ile çarpımından oluşmaktadır.

$$U_{\text{Sistematik (k)}} = \left[\left(\frac{\partial k}{\partial d} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial L} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial D} * u_{\text{Kumpas}} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial t} * u_{\text{Kronometre}} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial H_0} * u_{\text{Cetvel}} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial H} * u_{\text{Cetvel}} \right)^2 \right]^{0,5}$$

19.3.3 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin toplam belirsizliği

Deneyin toplam belirsizliği, rastgele belirsizlik ile sistematik belirsizlik değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir ve aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Deneyin toplam belirsizliği} = \sqrt{[\text{Rastgele belirsizlik (A Tipi)}]^2 + [\text{Sistematik belirsizlik (B Tipi)}]^2}$$

19.4 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin çözümlü örneği**19.4.1 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinden elde edilen veriler**

Çapı, D, 10,2 cm olan kalıba, yüksekliğinde L, 11,6 cm zemin numunesi (No 4 elekten elenerek alınan) sıkıştırılmıştır. Su seviyesi düşünün gözlemlendiği piezometre borusunun çapı, d, 1,1 cm dir. Su seviyesi, H₀, 260 cm ye ayarlanmıştır. Belirli süre sonunda gözlenen piezometredeki su seviyesi düşüşleri aşağıda verilmiştir. Geçirgenlik katsayısı ve belirsizliğinin hesaplanması Çizelge 19.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 19.5 - Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin elde edilen veriler

Ortalama su sıcaklığı (°C)	Süre (saniye)	ΔH (cm)	H (cm)
20	6 gün = 6*24*3600 = 518400	4,6	255,4
20	7 gün = 7*24*3600 = 604800	5,3	254,7
20	8 gün = 8*24*3600 = 691200	6,1	253,9

19.4.2 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin hesaplamaları**19.4.2.1 Düşen seviyeli geçirgenlik katsayısı**

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = 2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} [\log(H_0) - \log(H)] = 2,3 \frac{(1,1)^2 11,6}{(10,2)^2 (518400)} [\log(260) - \log(255,4)]$$

$$k = 4,64 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s } (= 4,64 \cdot 10^{-7} \text{ m/s})$$

19.4.2.2 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin rastgele belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı, $U_{\text{Rastgele (k)}} = 1 \cdot 10^{-10}$ (karşılaştırma deneylerinden)

19.4.2.3 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin sistematik belirsizliği

$$\frac{\partial k}{\partial d} = 4,6 \frac{dL}{D^2 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = 4,6 \frac{(1,1)(11,6)}{(10,2)^2 (518400)} \log\left(\frac{260}{255,4}\right) = 8,44 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}$$

$$\frac{\partial k}{\partial L} = 2,3 \frac{d^2}{D^2 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = 2,3 \frac{(1,1)^2}{(10,2)^2 (518400)} \log\left(\frac{260}{255,4}\right) = 4,00 \cdot 10^{-10} \text{ cm/s}$$

$$\frac{\partial k}{\partial D} = -4,6 \frac{d^2 L}{D^3 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = -4,6 \frac{(1,1)^2 (11,6)}{(10,2)^3 (518400)} \log\left(\frac{260}{255,4}\right) = -9,10 \cdot 10^{-10} \text{ cm/s}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t^2} \log\left(\frac{H_0}{H}\right) = -2,3 \frac{(1,1)^2 (11,6)}{(10,2)^2 (518400)} \log\left(\frac{260}{255,4}\right) = -4,64 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}$$

$$\frac{\partial k}{\partial H_0} = 2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} \frac{1}{H_0 \log(10)} = 2,3 \frac{(1,1)^2 (11,6)}{(10,2)^2 (518400) (260) \log(10)} = 2,30 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}$$

$$\frac{\partial k}{\partial H} = -2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} \frac{1}{H \log(10)} = -2,3 \frac{(1,1)^2 (11,6)}{(10,2)^2 (518400) (255,4) \log(10)} = -2,34 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}$$

$$U_{\text{Kumpas, d}} = \pm (0,0006 + 0,0000005 \cdot 1,1) = \pm 6,006 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

$$U_{\text{Kumpas, L}} = \pm (0,0006 + 0,0000005 \cdot 11,6) = \pm 6,058 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

$$U_{\text{Kumpas, D}} = \pm (0,0006 + 0,0000005 \cdot 10,2) = \pm 6,051 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

$$U_{\text{Sistematik (k)}} = [(8,44 \cdot 10^{-9} \cdot 6,006 \cdot 10^{-4})^2 + (4,00 \cdot 10^{-10} \cdot 6,058 \cdot 10^{-4})^2 + (-9,10 \cdot 10^{-10} \cdot 6,051 \cdot 10^{-4})^2 + (-4,64 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0025)^2 + (2,30 \cdot 10^{-9} \cdot 0,05)^2 + (2,34 \cdot 10^{-9} \cdot 0,05)^2]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik (k)}} = [2,57 \cdot 10^{-23} + 5,87 \cdot 10^{-26} + 3,03 \cdot 10^{-25} + 1,35 \cdot 10^{-22} + 1,32 \cdot 10^{-20} + 1,37 \cdot 10^{-20}]^{0,5} = [2,71 \cdot 10^{-20}]^{0,5}$$

$$U_{\text{Sistematik (k)}} = 1,65 \cdot 10^{-10}$$

19.4.2.4 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin toplam belirsizliği

Rastgele belirsizliklerin toplamı = $1 \cdot 10^{-10}$ (karşılaştırma deneylerinden)

Sistematik belirsizliklerin toplamı = $1,65 \cdot 10^{-10}$

$$\begin{aligned} \text{Deneyin toplam belirsizliği, } U_{\text{Toplam (k)}} &= [(\text{Toplam rastgele belirsizlik})^2 + (\text{Toplam sistematik belirsizlik})^2]^{0,5} \\ &= [(1,00 \cdot 10^{-10})^2 + (1,65 \cdot 10^{-10})^2]^{0,5} = 1,93 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

19.4.2 Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi sonuçlarının gösterilmesi

% 95 güven aralığında $k = 2$ olduğundan $k U_{\text{Toplam (k)}} = 2 \cdot 1,93 \cdot 10^{-10} = 3,86 \cdot 10^{-10} \text{ cm/s}$

$$k_1 = (4,64 \cdot 10^{-9} \pm 0,39 \cdot 10^{-9}) \text{ cm/s}$$

$$\text{Oran} = (3,86 \cdot 10^{-10} / 4,64 \cdot 10^{-9}) \cdot 100 = \% 8,3$$

Diğer hesaplamalar Çizelge 19.6'da verilmiştir.

$$k_{\text{ortalama}} = (4,62 \cdot 10^{-9} \pm 0,35 \cdot 10^{-9}) \text{ cm/s}$$

Çizelge 19.6 - Düşen seviyeli geçirgenlik deneyinin belirsizlik hesabı

	1. Deney	2. Deney	3. Deney
H_0 , cm	260		
D , cm	10,2		
A , cm ²	81,713		
d , cm	1,1		
a , cm ²	0,95		
L , cm	11,6		
ΔH , cm	4,6	5,3	6,1
H , cm	255,40	254,70	253,90
Su sıcaklığı, °C	20	20	20
Geçen süre, t, s	518400	604800	691200
$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$, cm/s	4,64E-09	4,59E-09	4,63E-09
$k_{ortalama}$, cm/s	4,62E-09		
$\frac{\partial k}{\partial d} = 4,6 \frac{dL}{D^2 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$	8,437E-09	8,343E-09	8,416E-09
$\frac{\partial k}{\partial L} = 2,3 \frac{d^2}{D^2 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$	4,000E-10	3,956E-10	3,990E-10
$\frac{\partial k}{\partial D} = -4,6 \frac{d^2 L}{D^3 t} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$	-9,099E-10	-8,998E-10	-9,076E-10
$\frac{\partial k}{\partial t} = -2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t^2} \log\left(\frac{H_0}{H}\right)$	4,640E-09	4,589E-09	4,629E-09
$\frac{\partial k}{\partial H_0} = 2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} \frac{1}{H_0 \log(10)}$	2,302E-09	1,973E-09	1,727E-09
$\frac{\partial k}{\partial H} = -2,3 \frac{d^2 L}{D^2 t} \frac{1}{H \log(10)}$	-2,344E-09	-2,009E-09	-1,758E-09
$U_{Kumpas, d}$	6,006E-04	6,006E-04	6,006E-04
$U_{Kumpas, L}$	6,058E-04	6,058E-04	6,058E-04
$U_{Kumpas, D}$	6,051E-04	6,051E-04	6,051E-04
$U_{Kronometre}$	2,500E-03	2,500E-03	2,500E-03
U_{Cetvel}	5,000E-02	5,000E-02	5,000E-02
$U_{Sistemlik (k)}$	1,647E-10	1,413E-10	1,238E-10
$U_{Rastgele (k)}$	10E-10	1E-10	1E-10
$U_{Toplam (k)}$	1,9271E-10	1,731E-10	1,592E-10
$k \cdot U_{Toplam (k)}$	3,854E-10	3,463E-10	3,183E-10
$(k \cdot U_{toplam})_{ortalama}$	3,500E-10		
$(k \cdot U_{toplam})_{ortalama} / (k_t)_{ortalama}$	8,3	7,5	6,9
Genel oran	7,6		

19.5 İlgili standartlar

ASTM D 2434 - 68: 2006. Standard test method for permeability of granular soils (constant head).

ASTM D 5084: 2003. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter

ASTM D 5856 - 95: 2002. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter, Method B: Test with constant tailwater level

CEN ISO/TS 17892-11: 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 11: Determination of permeability by constant and falling head, Part 4.2, Falling head, page 12.

DIN 18120-1, 1998. Laboratory test for determining the coefficient of permeability of soil, 8.2 Variable-head permeameter tests, page 18.

TS 1900-2/T1: 2007. İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini.

Ek A

Sıcaklığa göre suyun yoğunluk ve viskozitesi

Çizelge A.1 - Çeşitli sıcaklıklardaki suyun yoğunluk ve viskozite ile sıcaklık düzeltme katsayısı

Sıcaklık °C	μ_w $\times 10^{-6}$ Nsm	γ_w g/cm ³	M_t	Sıcaklık °C	μ_w $\times 10^{-6}$ Nsm	γ_w g/cm ³	M_t
0,0	1,7921	0,99987		18,0	1,0559	0,99862	-0,34
0,5		0,99990		18,5		0,99853	-0,27
1,0	1,7313	0,99993		19,0	1,0299	0,99843	-0,19
1,5		0,99995		19,5		0,99833	-0,09
2,0	1,6278	0,99997		20,0	1,0050	0,99823	0,00
2,5		0,99998		20,5		0,99812	0,09
3,0	1,6191	0,99999		21,0	0,9810	0,99802	0,18
3,5		1,00000		21,5		0,99791	0,27
4,0	1,5674	1,00000		22,0	0,9579	0,99780	0,38
4,5		1,00000		22,5		0,99768	0,49
5,0	1,5188	0,99999		23,0	0,9358	0,99757	0,58
5,5		0,99998		23,5		0,99745	0,69
6,0	1,4728	0,99997		24,0	0,9142	0,99732	0,80
6,5		0,99995		24,5		0,99720	0,91
7,0	1,4284	0,99993		25,0	0,8937	0,99707	1,04
7,5		0,99990		25,5		0,99694	1,15
8,0	1,3860	0,99988		26,0	<u>0,875</u>	0,99681	1,27
8,5		0,99984		26,5		0,99668	1,40
9,0	1,3462	0,99981		27,0	<u>0,855</u>	0,99654	1,52
9,5		0,99977		27,5		0,99640	1,64
10,0	1,3077	0,99973	-1,24	28,0	<u>0,836</u>	0,99626	1,78
10,5		0,99968	-1,21	28,5		0,99612	1,90
11,0	1,2713	0,99963	-1,18	29,0	<u>0,818</u>	0,99597	2,06
11,5		0,99958	-1,13	29,5		0,99582	2,20
12,0	1,2363	0,99952	-1,09	30,0	<u>0,800</u>	0,99567	2,33
12,5		0,99947	-1,04	30,5		0,99553	2,48
13,0	1,2028	0,99940	-0,99	31,0	<u>0,783</u>	0,99537	2,63
13,5		0,99934	-0,94	31,5		0,99521	2,78
14,0	1,1709	0,99927	-0,85	32,0	<u>0,767</u>	0,99506	2,93
14,5		0,99920	-0,83	32,5		0,99490	
15,0	1,1404	0,99913	-0,76	33,0	<u>0,751</u>	0,99473	
15,5		0,99905	-0,71	33,5		0,99457	
16,0	1,1111	0,99897	-0,64	34,0	<u>0,736</u>	0,99440	
16,5		0,99889	-0,58	34,5		0,99423	
17,0	1,0828	0,99880	-0,50	35,0	<u>0,731</u>	0,99406	
17,5		0,99871	-0,42	35,5		0,99389	

Ek B

Belirsizlik hesaplamalarının birleştirilmesinde kısa bir yol

B.1 Toplama ve çıkarma işlemleri

Y değeri; a, b ve c elemanlarından hesap edilmektedir. Y değerini ve belirsizliğini U_y hesaplayınız.

$$Y = a + b - c$$

Burada;

a Belirsizliği U_a olan eleman,

b Belirsizliği U_b olan eleman,

c Belirsizliği U_c olan eleman

dır.

Y'nin birleştirilmiş belirsizliği, U_y aşağıdaki verilen yöntemlerden birisi kullanılarak hesaplanır.

B.1.1 Türev alma

$$\frac{\partial Y}{\partial a} = 1$$

$$\frac{\partial Y}{\partial b} = 1$$

$$\frac{\partial Y}{\partial c} = -1$$

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial a} U_a\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial b} U_b\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial c} U_c\right)^2}$$

B.1.2 Doğrudan

$$U_y = \sqrt{(U_a)^2 + (U_b)^2 + (U_c)^2}$$

B.1.3 Çözümlü örnek

$$a = 0,75 \quad U_a = \pm 0,02$$

$$b = 5,20 \quad U_b = \pm 0,03$$

$$c = 3,42 \quad U_c = \pm 0,05$$

$$Y = 0,75 + 5,20 - 3,42 = 2,53$$

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial a} U_a\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial b} U_b\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial c} U_c\right)^2}$$

İlgili türevler 1 olduğundan eşitlik aşağıdaki şekli alır ve her iki yöntemde aynı eşitlikten bulunur:

$$U_y = \sqrt{(U_a)^2 + (U_b)^2 + (U_c)^2}$$

$$U_y = \sqrt{(0,02)^2 + (0,03)^2 + (0,05)^2} = 0,062$$

$$Y = 2,53 \pm 0,06$$

Not - Doğrudan yöntem kullanılırken, fiziksel eşitliğin başına bulunabilecek rakam değerlerinin çarpan olarak kullanılması göz önünde tutulmalıdır. Örneğin $Y = a+3b-c$ ise, b'nin başında bulunan 3 rakamı dikkate alınmalıdır (türev alınarak yapılan belirsizlik hesaplamalarında bu değer doğrudan hesaplamalara katılmaktadır).

B.2 Çarpma ve bölme işlemleri

Y değeri; a, b ve c elemanlarından hesap edilmektedir. Y değerini ve belirsizliğini U_y hesaplayınız.

$$Y = \frac{ab}{c}$$

Burada;

a Belirsizliği U_a olan eleman,

b Belirsizliği U_b olan eleman,

c Belirsizliği U_c olan eleman

dır

Y'nin birleştirilmiş belirsizliği, U_y aşağıdaki verilen yöntemlerden birisi kullanılarak hesaplanır:

B.2.1 Türev alma

$$\frac{\partial Y}{\partial a} = \frac{b}{c}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial b} = \frac{a}{c}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial c} = -\frac{ab}{c^2}$$

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial a} U_a\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial b} U_b\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial c} U_c\right)^2}$$

B.2.2 Doğrudan

$$\frac{U_y}{Y} = \sqrt{\left(\frac{U_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{U_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{U_c}{c}\right)^2}$$

B.2.3 Çözümlü örnek

$$a = 5,20 \quad U_a = \pm 0,05$$

$$b = 0,0065 \quad U_b = \pm 0,0003$$

$$c = 2,76 \quad U_c = \pm 0,07$$

$$Y = \frac{5,20 * 0,0065}{2,76} = 0,01225$$

Türev alma

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial a} U_a\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial b} U_b\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial c} U_c\right)^2}$$

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{b}{c} U_a\right)^2 + \left(\frac{a}{c} U_b\right)^2 + \left(-\frac{ab}{c^2} U_c\right)^2}$$

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{0,0065}{2,76} 0,05\right)^2 + \left(\frac{5,20}{2,76} 0,0003\right)^2 + \left(-\frac{5,20 * 0,0065}{2,76^2} 0,07\right)^2}$$

$$U_y = \sqrt{1,387 * 10^{-8} + 31,947 * 10^{-8} + 9,647 * 10^{-8}} \cong 0,00066$$

Doğrudan

$$\frac{U_y}{0,01225} = \sqrt{\left(\frac{0,05}{5,20}\right)^2 + \left(\frac{0,0003}{0,0065}\right)^2 + \left(\frac{0,07}{2,76}\right)^2}$$

$$\frac{U_y}{0,01225} = \sqrt{9,246 * 10^{-5} + 2,13 * 10^{-3} + 6,432 * 10^{-4}}$$

$$U_y = (0,01225) (0,0535) = 0,00066$$

Sonuç

$$Y = 0,01225 \pm 0,00066$$

Madde B.1'deki Nota bakınız

B.3 Dört işlem

Y değeri; a, b, c, f ve g elemanlarından hesap edilmektedir. Y değerini ve belirsizliğini U_y hesaplayınız.

$$Y = \frac{(a+b)c}{(d+f)g}$$

Burada;

a Belirsizliği U_a olan eleman,

b Belirsizliği U_b olan eleman,

c Belirsizliği U_c olan eleman,

d Belirsizliği U_d olan eleman,

f Belirsizliği U_f olan eleman,

g Belirsizliği U_g olan eleman

dır.

Y'nin birleştirilmiş belirsizliği, U_y aşağıdaki verilen yöntemlerden birisi kullanılarak hesaplanır:

B.3.1 Türev alma

$$\frac{\partial Y}{\partial a} = \frac{c}{(d+f)g}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial b} = \frac{c}{(d+f)g}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial c} = \frac{a+b}{(d+f)g}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial d} = \frac{-(a+b)cg}{((d+f)g)^2}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial f} = \frac{-(a+b)cg}{((d+f)g)^2}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial g} = -\frac{(a+b)c}{(d+f)g^2}$$

B.3.2 Doğrudan

Önce toplama ve çıkarma işlemleri yapılır, Madde A.1. İşlem çarpım / bölüm şekline dönüştürülür ve Madde A.2'ye göre işleme devam edilir.

$$U_{ab} = [(U_a)^2 + (U_b)^2]^{1/2} \quad Q = a + b$$

$$U_{df} = [(U_d)^2 + (U_f)^2]^{1/2} \quad W = d + f$$

Yeni eşitlik aşağıda verilen şekle dönüşür:

$$Q.c / W.g$$

$$U_y/Y = [(U_{ab}/Q)^2 + (U_c/c)^2 + (U_{df}/W)^2 + (U_g/g)^2]^{1/2}$$

B.3.3 Çözümlü örnek

$$a = 16,7 \quad U_a = \pm 0,3$$

$$b = 12,3 \quad U_b = \pm 0,2$$

$$c = 0,065 \quad U_c = \pm 0,004$$

$$d = 620 \quad U_d = \pm 5$$

$$f = 930 \quad U_f = \pm 10$$

$$g = 10,6 \quad U_g = \pm 0,5$$

Türev alma

$$\frac{\partial Y}{\partial a} = \frac{c}{(d+f)g} = \frac{0,065}{(620+930)10,6} = 3,956 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial b} = \frac{c}{(d+f)g} = \frac{0,065}{(620+930)10,6} = 3,956 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial c} = \frac{a+b}{(d+f)g} = \frac{16,7+12,3}{(620+930)10,6} = 1,765 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial d} = \frac{-(a+b)cg}{((d+f)g)^2} = \frac{-(16,7+12,3)0,065 \cdot 10,6}{((620+930)10,6)^2} = -7,402 \cdot 10^{-8}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial f} = \frac{-(a+b)cg}{((d+f)g)^2} = \frac{-(16,7+12,3)0,065 \cdot 10,6}{((620+930)10,6)^2} = -7,402 \cdot 10^{-8}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial g} = -\frac{(a+b)c}{(d+f)g^2} = -\frac{(16,7+12,3)0,065}{(620+930)10,6^2} = -1,082 \cdot 10^{-5}$$

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial a} U_a\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial b} U_b\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial c} U_c\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial d} U_d\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial f} U_f\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial g} U_g\right)^2}$$

$$U_y = \sqrt{(3,956 \cdot 10^{-6} \cdot 0,3)^2 + (3,956 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2)^2 + (1,765 \cdot 10^{-3} \cdot 0,004)^2 + (-7,402 \cdot 10^{-8} \cdot 5)^2 + (-7,402 \cdot 10^{-8} \cdot 10)^2 + (-1,082 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5)^2}$$

$$U_y = \sqrt{1,408 \cdot 10^{-12} + 6,260 \cdot 10^{-13} + 4,984 \cdot 10^{-11} + 1,360 \cdot 10^{-13} + 5,479 \cdot 10^{-13} + 2,927 \cdot 10^{-11}}$$

$$U_y = \sqrt{8,183 \cdot 10^{-11}} = 9,046 \cdot 10^{-6}$$

Doğrudan

$$Q = 16,7 + 12,3 = 29,0$$

$$U_{ab} = [(0,3)^2 + (0,2)^2]^{1/2} = \pm 0,361$$

$$W = 620 + 930 = 1550$$

$$U_{df} = [(5)^2 + (10)^2]^{1/2} = \pm 11,2$$

$$Y = (16,7 + 12,3) \times 0,065 / (620 + 930) \times 10,6 = 1,147 \times 10^{-4}$$

$$U_y / 1,147 \times 10^{-4} = [(0,36 / 29)^2 + (0,004 / 0,065)^2 + (11,2 / 1550)^2 + (0,5 / 10,6)^2]^{1/2}$$

$$U_y / 1,147 \times 10^{-4} = [6,218 \times 10^{-3}]^{1/2}$$

$$U_y / 1,147 \times 10^{-4} = 0,0789$$

$$U_y = 9,045 \times 10^{-6}$$

Sonuç

$$Y = 1,147 \times 10^{-4} \pm 9,046 \times 10^{-6} = (1,15 \pm 0,09) \times 10^{-4}$$

Ek C

Belirsizlikle ilgili temel istatistiki bilgiler

C.1 Tanımlar ve kısaltmalar

Ölçüm sonucu (result of a measurement): Ölçülen büyüklüğün ölçüm sonucunda elde edilen değeri.

Ölçüm hatası (error of a measurement): Ölçüm sonucundan, ölçülen büyüklüğün (konvansiyonel) gerçek değerinin çıkarılmasıyla elde edilen sonuç.

Bağıl hata (relative error): Mutlak ölçüm hatasının ölçülen büyüklüğün (konvansiyonel) gerçek değerine oranı.

Rastgele hata (random error): Aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri esnasında önceden tahmin edilemeyecek şekilde değişen ölçüm hatası bileşeni.

Sistemik hata (systematic error): Aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri boyunca sabit kalan veya önceden tahmin edilebilen değişimler gösteren ölçüm hatası bileşeni.

Ölçüm belirsizliği (uncertainty of measremet): Ölçülen büyüklüğün gerçek değerini kapsayan değerler aralığını karakterize eden tahmini değer.

Standart belirsizlik (standard uncertainty): Standart sapma olarak hesaplanabilen bir ölçüm sonucunun belirsizliği.

A tipi belirsizlik hesabı (Type A evaluation of uncertainty): Gözlem serilerinin belirsizlik hesaplarının istatistiksel analiz yöntemi.

B tipi belirsizlik hesabı (Type B evaluation of uncertainty): Gözlem serilerinin belirsizlik hesaplarının diğer (istatistiksel olmayan) yöntemleri.

Bileşik standart belirsizlik (combined standard uncertainty): Bir ölçümün pek çok sayıda başka değerlerden elde edilmiş sonucunun standart belirsizliği, bu değerlerdeki değişimlerin ölçüm sonucunu nasıl etkilediği göz önüne alınarak hesaplanan varyans veya covaryans ifadeleri toplamının pozitif kare köküne eşittir.

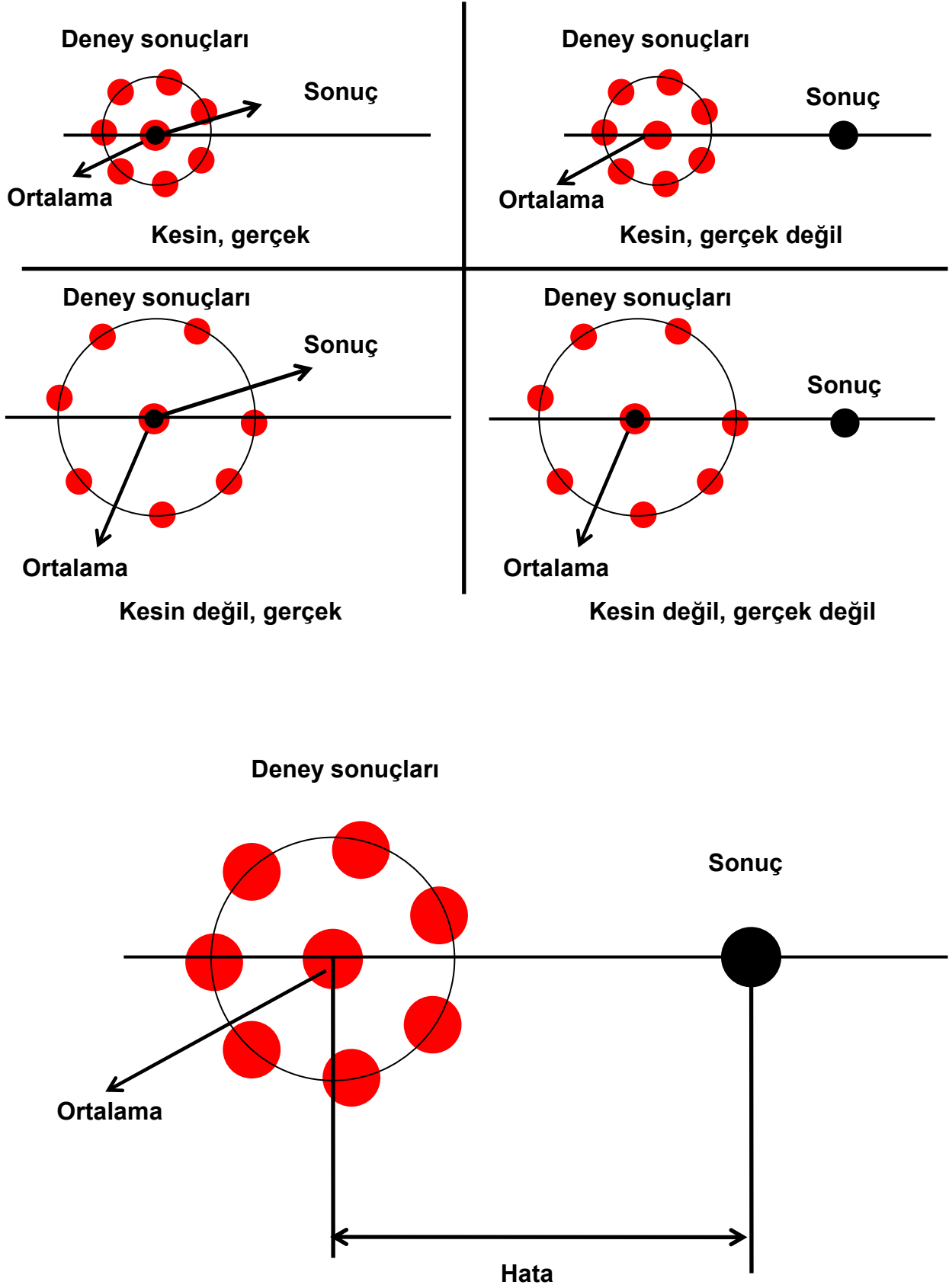
Genişletilmiş belirsizlik (expanded uncertainty): Ölçülen bir niceliğin beklentiye göre ölçüm sonucunu değerlerinin büyük bir kısmını içeren aralık olarak tanımlanır.

Kapsam faktörü (coverage factor): Genişletilmiş belirsizliği hesaplamak amacıyla bileşik belirsizlikle çarpılan sayısal faktör olarak tanımlanır. Pratikte, kapsam faktörünün değeri 2 ve 3 arasında bulunmaktadır.

Ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliği (repeatability of results of measurements): Aşağıdaki koşulların tümüne uyarak, aynı ölçülen büyüklüğe ait ardıl ölçüm sonuçları arasındaki uyuma yakınlığıdır.

- Aynı ölçüm metodu,
- Aynı gözlemci,
- Aynı ölçme cihazı,
- Aynı konum,
- Aynı kullanım koşulları,
- Kısa zaman aralığında tekrar.

Deney sonucu ile doğru sonuç Şekil C.1'de gösterilmiştir.



Şekil C.1 - Deney sonuçları ile kesinlik/gerçeklik ve sapmanın gösterilmesi

Ölçüm sonuçlarının tekrar gerçekleştirilebilirliği (reproducibility of results of measurements): Her bir ölçümün, aşağıdaki değişken koşullarda gerçekleştirildiği zaman, aynı ölçülen büyüklüğe ait ölçüm sonuçları arasındaki uyuma yakınlığıdır.

- Ölçüm metodu,
- Gözlemci,
- Ölçme cihazı,
- Konum,
- Kullanım koşulları,
- Zaman.

Toplam rastgele belirsizlik (precision): A tipi belirsizlik

Toplam sistematik belirsizlik (bias): B tipi belirsizlik

C.2 İstatistiksel kavramlar

Aritmetik ortalama, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

Numune standart sapması, $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$

Ortalamanın standart sapması, $S_x = \frac{s}{\sqrt{n}}$

Bağıl standart sapma, $RSD = \frac{s}{\bar{x}}$

Standart sapma (S) cinsinden belirsizlik, $U_{(x)} = S$

Bağıl standart sapma ($\frac{s}{\bar{x}}$) cinsinden belirsizlik, $U_{(x)} = x \left(\frac{s}{\bar{x}} \right)$

Varyasyon katsayısı cinsinden belirsizlik, $U_{(x)} = \frac{CV\%}{100} x$

C.3 Uygulamalar

C.3.1 Belirsizlik hesaplarının tahmininde tekrarlanabilirlik, uyarlık, bias (sapma) tahmini ve kontrol kartı kullanımı

C.3.1.1 Kontrol kartları

Kontrol kartı kullanımı ile ölçüm belirsizliğinin tahmininde belirleyici bazı unsurlar vardır. Bunlar aşağıda belirtilmiştir:

1. Kontrol deney numuneleri sertifikaya bu mümkün değilse bilinen veya kabul edilen değerlere sahip olmalıdır. Bu sayede ölçüm prosesinin biası ölçüm sonuçlarının hesaplanmasında tanımlanabilir ve düzeltilebilir veya ortadan kaldırılabilir. Sertifikalı referans veya referans malzemenin olmadığı durumlarda laboratuvarca hazırlanan kontrol numuneleri yalnızca kesinlik kontrolünde kullanılır.
2. Kontrol deney numunelerinin özellikleri rutin deneye tabi tutulan malzemelerin özelliklerine yakın olmalıdır. Deney sonuçlarının belirsizliği test seviyelerine bağlı olan deneylerde bu durum daha da önem kazanır.
3. Kontrol deney numunelerine uygulanan deney prosedürü ile rutin numunelere uygulanan deney prosedürleri aynı olmalıdır. Aksi takdirde ilave belirsizlik bileşenleri de göz önüne alınmalıdır.
4. Kontrol kartı tarafından gösterildiği şekilde ölçüm prosesi istatistiksel olarak kontrol altında olmalıdır. Gerek popülasyon standart sapmasının yeterince doğru olduğunun temin edilmesi gerekse prosesin istatistiksel olarak kontrol altında olup olmadığına karar verebilmek için önceden yeteri kadar deney sonucunun toplanmış olması gerekir. Genel kabul görmüş bir değer olmamakla birlikte her biri 4-5 deney içeren 20-25 seri deney yapılması ön belirleme için yeterli sayılabilir. Kontrol kartı gerektiği gibi oluşturmadan önce ölçüm prosesi kontrol altına alınmalıdır.

Ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan en basit yollardan biri olmasına karşın pek çok malzeme için sertifikalı referans malzemenin olmaması veya çok pahalı olması, deneyin çok pahalı olması, deneyin çok uzun sürmesi gibi nedenlerle çoğu zaman uygulanamayabilir. Bu konuda karar ilgili Şube Müdürlüğüne verilir.

C.3.1.2 Tekrarlanabilirlik, uyarlık, bias (sapma) tahmini

Kesinlik, belirlenmiş koşullar altında elde edilen bağımsız deney sonuçları arasındaki yakınlık derecesidir. Kesinlik rastgele hataların dağılımına bağlı olup ölçülen şeyin tanımlanmış veya gerçek değeri ile ilgili değildir. Kesinlik genellikle deney sonuçlarının standart sapması olarak hesaplanır. Düşük kesinlik yüksek standart sapma anlamına gelir.

Kesinliğin sayısal değeri, çok büyük oranda belirlenmiş koşullara bağlıdır. Tekrarlanabilirlik ve uyarlılık belirlenmiş koşullara ait özel örneklerdir.

Tekrarlanabilirlik, tekrarlanabilirlik koşulları (Madde C.1) altındaki kesinliktir. Kısa zaman aralığında aynı ekipmanı kullanan aynı laborant tarafından aynı numunede aynı metodu kullanarak bağımsız deney sonuçlarının elde edilmesi tekrarlanabilirlik koşullarına bir örnektir. Tekrarlanabilirlik standart sapması, tekrarlanabilirlik koşulları altında elde edilen standart sapmadır.

Uyarlık, uyarlık koşulları (Madde C.1) altındaki kesinliktir. Farklı laboratuvarlarda farklı laborant ve farklı cihaz kullanılarak aynı metotla aynı numune üzerinde yapılan deneylerden bağımsız deney sonuçlarının elde edilmesi uyarlık koşullarına örnektir.

Uyarlık standart sapması, uyarlık koşulları altında elde edilen standart sapmadır ve test sonuçlarının uyarlık koşulları altındaki dağılımının ölçüsünü gösterir. Uyarlılığın geçerli bir ifadesi hangi koşulun değiştiğinin bilinmesi ile mümkün olur.

“ISO 5725 Ölçme yöntemlerinin ve sonuçlarının doğruluğu (gerçeklik ve kesinlik)” e göre en önemli dört değişim faktörü personel, cihaz, kalibrasyon ve zamandır. Uyarlık ifade edilirken hangi faktörün değiştiği belirtilmelidir.

Gerçeklik, deney sonuçlarının büyük bir serisinden elde edilen ortalama değer ile kabul edilen referans değer arasındaki yakınlık derecesidir. Gerçeklik ölçümü genellikle bias (toplam sistematik hata) olarak ifade edilir.

Bias (toplam sistematik hata) deney sonuçlarından bulunan değer ile kabul edilen bir referans değer arasındaki farktır. Bias rastgele hatalara benzemeyen sistematik bir hatadır.

Laboratuvarlarımızda genellikle standart hazırlama kuruluşlarınca yöntem validasyon çalışmaları yapılmış yani laboratuvarlararası karşılaştırma deneyleri yapılarak kesinliği ve biası bulunmuş standart deney yöntemi kullanılmaktadır. Bu nedenle, ilgili standartta o deney yöntemin kesinlik ve mevcut olması durumunda bias (gerçeklik) ile ilgili bilgileri verilmektedir.

Yapı malzemeleri ile ilgili deneylerin pek çoğunda kabul edilmiş referans değerlerin olmaması nedeniyle ilgili deney standardında metodun biası verilememektedir.

Bu olgu henüz o malzeme ile ilgili sertifikalı referans malzemenin/referans malzemenin üretilmediğine ve laboratuvarlararası karşılaştırma deneylerinin düzenlenmediğine işaret eder.

Kesinlik ile ilgili bilgiler ise ya tekrarlanabilirlik ya da uyarlık cinsinden ilgili standartlarda genellikle verilmektedir. Kesinlik, AB yapı direktifleri kapsamında hazırlanmış TS/EN, EN standartlarında "r" tekrarlanabilirlik sınırı, "S_r" tekrarlanabilirlik standart sapması, "R" uyarlık, "S_R" uyarlık standart sapması; ASTM'lerde laboratuvarlararası standart sapma (S_R), laboratuvar içi standart sapma (S_r), tek operatör standart sapması, laboratuvarlararası varyasyon katsayısı, tek operatör varyasyon katsayısı vb şekillerde ifade edilmektedir.

Laboratuvarın belirsizlik tahminine başlayabilmesi için;

1. İlgili standart da verilmesi durumunda ölçüm metodunun biasının standart da verilen bias limitleri içinde olması,
2. Laboratuvar içi standart sapma olarak ifade edilen kesinlik değerinin standardda verilen laboratuvar içi standart sapma limitleri içinde olması gerekmektedir.

C.3.1.2.1 Bias kontrolü

Laboratuvar kendi ölçüm biaslarının uygun limitler içinde olup olmadığını belirlemek için iki yöntemden birini kullanır.

C.3.1.2.1.1 Sertifikalı referans malzeme kullanımı

Uygun referans. Standart veya malzeme kullanarak laboratuvar kopya deneyler yaparak kendi deney sonuçlarının ortalamasından referans standart veya malzemenin sertifikada verilen değerinin farkı olarak adlandırılan kendi laboratuvar biasını tahmin eder. Bu biasın mutlak değeri deney yönteminde kesinlik olarak verilen uyarlık standart sapmasının iki katından küçükse, biasın kontrol altında olduğu sonucuna varılabilir. Ancak, değerlendirme geçerli dokümanlara göre yapılmalıdır.

C.3.1.2.1.2 Laboratuvarlararası karşılaştırma deneyi

Laboratuvar, yeterlilik deney programlarına katılarak kendi deney sonuçlarını diğer laboratuvarların deney sonuçları ile karşılaştırarak kendi ölçüm sonuçlarının biasını tahmin edebilir. Kendi laboratuvar ortalamasının tüm laboratuvarlardan elde edilen büyük ortalama ile karşılaştırılması kendi biaslarının kontrol altında olup olmadığını gösterir.

C.3.1.2.2 Kesinlik kontrolü

Kesinliğin kontrol edilmesi için laboratuvar tekrarlanabilirlik koşulları altında pek çok sayıda deney yapar ve kendi tekrarlanabilirlik standart sapmasını (S_i) ilgili standartta deney metodu için verilen tekrarlanabilirlik standart sapması (S_r) ile karşılaştırır.

Örneğin, F-test gibi bir istatistiksel yöntem kullanılarak kendi laboratuvarına ait " S_i " değerini verilen " S_r " değeri ile karşılaştırarak kesinliğin kontrol altında olup olmadığına bakılır.

Laboratuvar kesinlik ve biasın kontrol altında olduğunu gösterdikten sonra bu değerleri kullanarak kendi ölçüm belirsizliğini hesaplamaya başlayabilir. Ancak, laboratuvar kesinliğin ve biasın sürekli kontrol altında olduğunu bundan sonraki süreçlerde de göstermelidir. Bunun için istatistiksel proses kontrolü yapılabilir ve kontrol kartları kullanılabilir. Uygun referans standart veya malzeme kullanarak bu doğrulama çalışmaları yapıldığında bunların deney seviyeleri laboratuvar rutin deneylerinde kullanılan ile aynı olmalıdır.

C.3.2 ISO Gum yöntemiyle belirsizlik hesabı

Ölçüm değeri (çıktı değeri) " Y " nin doğrudan olarak ölçülemediği durumlarda " Y " fonksiyonel ilişkiye göre pek çok sayıda (N) girdi değerinden (X_i) hesaplanabilir.

$$(X_i) (i = 1, 2, \dots, N)$$

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Model fonksiyonu " f " ölçüm prosedürlerini ve değerlendirme metodunu temsil eder ve çıktı değerlerini (Y), girdi değerlerinden (X_i) nasıl elde edildiğini tanımlar. Pek çok durumda model fonksiyon analitik bir ifadedir. Fakat sistematik etkiler için düzeltme veya düzeltme faktörleri içeren gruplarda bu ifadede yer alabilir. Bu durumda açık tek bir fonksiyon yazılmasıyla ifade edilemeyecek kompleks ilişkilerin tanımlanması gerekebilir. Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı laboratuvarlarında yapılan deneylerde standart deney yöntemleri kullanıldığından girdi değerleri ile çıktı değerleri arasındaki fonksiyon bellidir.

Girdi değerleri " X_i ", ölçümün değeri ve bu değer belirsizliğinin belirlenme şekline göre iki gruba ayrılır.

1. Birinci grupta ölçümün tahmini değeri ve bu değer belirsizliği doğrudan olarak yapılan ölçümlerden belirlenir. Bu değerler tek bir gözlem yapma, arka arkaya tekrar deneyler yapma veya deneyimlere dayanan yargılardan bulunabilir. Bu durumda cihaz okumalarından elde edilen değerlerin düzeltilmesi; sıcaklık, basınç, nem gibi ölçüm değerini etkileyen konulardaki düzeltmeler gerekebilir.
2. İkinci grupta ölçüm değeri ve bu değer belirsizliği kalibre edilmiş ölçüm standardı, sertifikalı referans malzeme veya örneğin El Kitabı gibi dış kaynaklardan bulunabilir. Ölçülen büyüklüğün (Y) tahmini çıktı ölçüm değeri " y ";

Girdi büyüklüklerinin (X_i) tahmini çıktı ölçüm değerleri " x_i " ise ölçüm sonucu $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ şeklinde verilebilir.

Rastgele değişimlerde, rastgele dağılımın varyansı veya onun pozitif kare kökü olan standart sapma, değerlerin dağılımının ölçüsü olarak kullanılır.

Ölçüm sonucu " y " nin tahmini standart belirsizliği $U(y)$, ölçülen büyüklüğün (Y) standart sapmasıdır. Bu değer, girdi büyüklüklerinin (X_i) tahmini değerleri (x_i) lerin ve onların belirsizliklerinden [$U(x_i)$] hesaplanır. Standart belirsizlikler, bulundukları tahmini değerlerle aynı birime sahiptir. Bazı durumlarda

ölçümün bağıl standart belirsizlikleri [$\frac{U(y)}{y}$] kullanılabilir. Bağıl standart belirsizlikler birimsizdir.

C.3.2.1 Tahmini girdi ölçümlerinin ölçüm belirsizliğinin bulunması

Girdi değerlerinin ölçüm belirsizlikleri, hesaplanma yöntemlerine göre tip "A" ve tip "B" olmak üzere iki yolla bulunur.

Standart belirsizliği "A" tipi belirlenmesi bir seri gözlem (deney) yapmayı ve bulunan sonuçlar üzerinde istatistiksel analiz yapmayı gerektirir. Bu durumda belirsizlik ortalamanın deneysel standart sapmasıdır ve ya ortalama alınarak yapılan işlemler sonrası yada uygun regresyon analizi yapılarak bulunur.

Standart belirsizliğin "B" tipi belirlenmesinde bir seri gözlem (deney) üzerinde istatistiksel analiz yapılması dışındaki yöntemler kullanılır. Bu durumda standart belirsizliğin tahmini diğer bazı bilgileri ve bilimsel verilerin varlığını gerektirir.

C.3.2.1.1 Standart belirsizliğin (A Tipi) hesaplanması

Standart belirsizliğin tip "A" olarak hesaplanması aynı ölçüm koşulları altında girdi değerlerinin biri için birkaç bağımsız gözlem (deney) yapıldığında uygulanır. Ölçüm projesinde yeterince çözünürlük varsa elde edilen değerlerde gözlemlenebilir bir dağılıma veya saçılma olacaktır.

Ardıl ölçümlerle bulunan girdi değeri X_i 'nin miktarı Q ise ve istatistiksel olarak " n " ($n > 1$) bağımsız gözlem yapılmış ise ve Q 'nun tahmin edilen niceliği $\bar{q}$ ise ($\bar{q}$, her bir bağımsız gözlem q_j nin aritmetik ortalamasıdır) ($j = 1, 2, \dots, n$). Aritmetik ortalama aşağıda verilen eşitlik ile elde edilir:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} = \sum_{j=1}^n q_j$$

$\bar{q}$ ile belirlenen ölçümün belirsizliği iki yolla belirlenir.

1. Olasılık dağılımının tahmin edilen varyansı deney varyansıdır.

$$s^2(q) = q_j \text{ lerin deneysel varyansı ise, } s^2(q); s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \text{ dan bulunur.}$$

Bunun pozitif karekökü "Deneysel Standart Sapma" olarak adlandırılır. Aritmetik ortalama $\bar{q}$ 'nin varyansının en iyi tahmini ortalamanın deneysel varyansıdır.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n}$$

Bunun pozitif karekökü "Ortalamanın Deneysel Standart Sapması" olarak adlandırılır. Standart belirsizliği [$U(\bar{q})$], ortalamanın deneysel standart sapmasıdır. Bu durumda;

$$U(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad \left[s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{n} \right]$$

2. Birleştirilmiş veya birleşik varyans durumunda,

$$s^2(\bar{q}) = \frac{Sp^2}{n} \text{ den hesaplanır.}$$

S^2p ise birleşik varyansıdır.

C.3.2.1.2 Standart belirsizliğin (B Tipi) hesaplanması

B tipi belirsizlik girdi değeri X_i 'nin tahmini olan X_i değerinin belirsizliğinin bir seri gözlem gerektiren istatistiksel analiz dışındaki yöntemlerle tahminini gerektirir. Standart belirsizlik $u(x_i)$ X_i 'nin olası değişimiyle ilgili, mevcut bilgileri esas alan bilimsel yaklaşımlardan bulunur. Bunlar aşağıda verilmiştir:

1. Önceki ölçümlerden elde edilen veriler,
2. Cihaz veya ilgili malzeme ile ilgili deneyimlerimizden ve bilgilerimizden elde edilenler,
3. İmalatçı firma spesifikasyonları,
4. Kalibrasyon sertifikasından gelen değerler,
5. İlgili el kitaplarında verilen değerler.

Bu şekilde hesaplanan $U^2(x_i)$ ve $U(x_i)$, B tipi varyans ve B tipi standart belirsizlik olarak adlandırılır.

Ölçümün standart belirsizliğinin B tipi hesaplanması için mevcut bilgilerin doğru kullanılması gerekir.

B tipi belirsizliğin hesaplanabilmesi için olasılık dağılımının bilinmesi gerekir.

C.3.2.1.2.1 Normal dağılım

Eğer tahmini x_i değerinin alındığı kaynaktan x_i 'nin belirsizliği olan $U(x_i)$ standart belirsizliği standart sapmanın belli bir çarpanı olarak veriliyorsa (örnek, belirsizlik 3 standart sapmada 200 mg; % 90 güvenirlilik seviyesinde 0,1 °C gibi) standart belirsizlik $U(x_i)$ söylenen değerin bu çarpana bölümü, kestirilen varyans $U^2(x_i)$ ise, bölme işlemi sonucunda elde edilen değerin karesidir.

$$U(x_i) = (\text{Standart belirsizlik}) / k$$

$k = 1,64$ % 90 güvenirlilik seviyesinde

$k = 1,96$ % 95 güvenirlilik seviyesinde ($k = 2$ olarak alınabilir)

$k = 2,58$ % 99 güvenirlilik seviyesinde

C.3.2.1.2.2 Dikdörtgen dağılım (üniform dağılım)

Sertifikalarda veya verilen diğer bilgilerde güven aralığı verilmemişse, (örneğin, pipet hacmi $(25 \pm 0,05)$ mL, olarak veriliyor. Bu toleransın hangi güven aralığında olduğu verilmemiş) gerçek değerin tanımlanmış iki limitin $(24,95 - 25,05)$ mL arasındaki herhangi bir yerde olabileceği düşünülebilir.

Bu durumda gerçek değerin iki limit arasındaki herhangi bir yerde olması eşit olasılıktır. Limitler içinde olasılık "1", dışında "0" olduğu kabul edilir. Standart belirsizlik aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$U(x_i) = \frac{\partial}{\sqrt{3}}$$

Burada, ∂ değişim limitidir (tolerans).

C.3.2.1.2.3 Üçgen dağılım

İki limit arasında yer alan değerlerin merkezde toplanma olasılığı güçlü ise, diğer bir deyiş ile bu dağılımın gerçek değerinin tanımlanmış iki limit arasında merkeze yakın bir yerde olduğu düşünülüyor ise, uygulanır bu durumda standart belirsizlik;

$$U(x_i) = \frac{\partial}{\sqrt{6}} \text{ dir.}$$

Burada, ∂ değişim limitidir (tolerans).

C.3.2.1.2.4 U dağılımı

Ölçülen değerlerin verilen limitlere (uçlara) doğru olma olasılığı fazla ise bu tür bir dağılım kullanılabilir. Örneğin, termostatlı ısıtıcılar, hassas olmayan klimalarla ısıtılan odalarda sıcaklık ayar değerine göre izin verilen limit değerlere gitme eğilimindedir. Bu durumda standart belirsizlik;

$$(x_i) = \frac{\partial}{\sqrt{2}} \text{ dir.}$$

Burada, ∂ değişim limitidir (tolerans).

C.3.2.2 Çıktı değerlerin standart belirsizliğinin hesaplanması (birleşik standart belirsizlik)

Bu ölçümün sonucunun birleştirilmiş standart belirsizliği, sonucu tahmin edilen standart sapmasını temsil etmek için bulunur ve “ U_c ” ile gösterilir. Bu değer, bir bireysel “ U_i ” lerin birleştirilmesi ile elde edilir. Bu yöntem belirsizliğin yayılma yasası (law of propagation of uncertainty) olarak adlandırılmakta ve standart sapmalar cinsinden belirlenen standart belirsizlik bileşenleri “kareler toplamının kare kökü (RSS)” yöntemi ile birleştirilmektedir.

C.3.2.2.1 Korelasyonsuz girdi nicelikleri durumunda bileşik belirsizliğin bulunması

Ölçülen büyüklük Y ve bunun tahmini değeri y , Y ’nin birleştirilmiş standart belirsizliği $U_c(y)$ ise girdi değerlerinin ($x_1, x_2, \dots, x_n$) standart belirsizliği aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 U^2(x_i)$$

$U(x_i)$, Tip A veya Tip B yöntemiyle hesaplanmış standart belirsizliklerdir.

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ kısmi türevleri hassasiyet katsayısı olarak adlandırılır ve “ C_i ” ile gösterilir. Bu, katsayı tahmini girdi değerleri x_i deki küçük değişimlere karşın fonksiyondaki (y) değişimi gösterir. Buna göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [C_i \cdot U(x_i)]^2$$

Hassasiyet katsayıları (C_i) “ f ” fonksiyonundan hesaplanabileceği gibi deneysel yöntemlerle de bulunabilir. Belirsizliklerin birleştirilmesindeki pratik yöntemler Ek B’de verilmiştir.

C.3.2.2.2 Korelasyonla girdi niceliklerinin olması durumunda birleşik belirsizliğin bulunması

Fonksiyonu oluşturan girdi değerleri bağımsız değilse veya ikisi arasında korelasyon varsa, bu korelasyon durumu belirsizlik hesaplamalarında ilaveten göz önüne alınmalıdır.

$$U(x_i, x_k) = U(x_i) U(x_k) r(x_i, x_k) \quad (i \neq k) \text{ dır.}$$

Korelasyon derecesi “Korelasyon katsayısı” “ r ” ile ifade edilir.

$$R(x_i, x_k) \quad i \neq k \text{ ve } |r| \leq 1$$

P ve Q iki nicelik ise ve bu iki nicelik için aynı anda gözlemlenmiş “ n ” adet bağımsız gözlem çifti varsa, $\bar{p}$ ve $\bar{q}$ aritmetik ortalamaları için kovaryans olarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$S(\bar{p} \text{ ve } \bar{q}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (p_j - \bar{p})(q_j - \bar{q})$$

Korelasyon durumunda C.3.2.1’de verilen $U^2(y)$ ’nin hesaplanma eşitliği modifiye edilmelidir.

$$U^2(y) = \sum_{i=1}^N C_i^2 U^2(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N C_i C_k U(x_i, x_k)$$

C_i ve C_k hassasiyet katsayıları olup aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$$U^2(y) = \sum_{i=1}^N U_i^2(y) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N U_i(y) U_k(y) r(x_i, x_k)$$

C.3.2.3 Ölçümün genişletilmiş belirsizliği

Genişletilmiş belirsizlik “U” tahmini veya “y” sonuç değerinin standart belirsizliği $U(y)$ nın bir “k” kapsam faktörü ile çarpılması sonucu bulunur.

$$U = k U(y)$$

k değeri ilgili standartlarda aksi bir hüküm yoksa, “2” olarak alınır. Bu sonucun % 95 güven aralığında verilmesi anlamına gelir.

Ek D Formlar

Numune kontrol ve kabul formu	245
Deney istek formu	246
Deney numunesi kartı	247
Deney adedi ve bedeli formu.....	248
Deney raporu.....	249
Su içeriği deneyi formu	250
Dane çapı dağılımı deneyi formu	251
Dane çapı dağılımı	252
Hidrometre deneyi formu.....	253
Bağıl yoğunluk (özgül ağırlık) deneyi formu	254
Tabii birim hacim ağırlık deneyi formu	255
Kıvam limitleri deneyi formu	256
Sıkıştırma deneyleri formu	257
Şişme deneyleri formu	258
Dispersibilite deneyi formu	259
İğne deliği deneyi.....	260
Dayanım deneyleri formu	261
Serbest (tek eksenli) basınç deneyi	262
Dayanım deneyleri hesap formu	263
Dayanım deneyleri hesap formu (devam).....	264
Üç eksenli basınç dayanımı deneyi (UU tipi).....	265
Kesme kutusu deneyi hesap formu.....	266
Kesme kutusu deneyi	267
Konsolidasyon deneyi formu	268
Konsolidasyon katsayıları formu	269
Oturma - karekök zaman grafiği.....	270
Oturma - logaritma zaman grafiği	271
Basınç - boşluk oranı grafiği.....	272
Geçirgenlik deneyleri formu	273
Etüv doğrulama kartı	274
Bağıl yoğunluk şişesi kontrol kartı.....	275
Damıtık su kontrol kartı	276
Konik penetrasyon deneyi formu.....	277
Konsolidasyon ağırlıkları kontrol kartı	278
Likit limit (Casagrande) cihazı kontrol kartı	279
Oluk açma bıçağı ve düşme yüksekliği ölçeği kontrol kartı	280

1. Numune kontrol ve kabul formu

	DSİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ TEKNİK ARAŞTIRMA VE KALİTE KONTROL DAİRESİ BAŞKANLIĞI ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI ŞUBE MÜDÜRLÜĞÜ							
NUMUNE KONTROL VE KABUL FORMU								
Numune kabul tarihi								
Laboratuvar kayıt no								
Yazının tarihi ve sayısı								
Yazıyı gönderen								
Proje adı								
Numunenin adedi								
Numunenin cinsi								
Rapor teslim süresi (en az)								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Numune(ler) deney(ler) için uygundur</td> <td style="width: 20%;"></td> </tr> <tr> <td>Numune(ler) deney(ler) için uygun değildir</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Uygun değilse, gerekçe</td> <td></td> </tr> </table>			Numune(ler) deney(ler) için uygundur		Numune(ler) deney(ler) için uygun değildir		Uygun değilse, gerekçe	
Numune(ler) deney(ler) için uygundur								
Numune(ler) deney(ler) için uygun değildir								
Uygun değilse, gerekçe								
..... Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'ne teslim ettiğim numunelerin alınması, muhafaza edilmesi, ambalajlanması ve nakledilmesi tarafımızdan yapıldığından, bu nedenlerle deney sonuçlarında çıkabilecek olumsuzluklardan Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'nün hiçbir sorumluluğu olmadığını teslim eden olarak kabul ve beyan ederim. <u>Teslim alan</u> <u>Teslim eden</u>								

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

2. Deney istek formu



DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



DENEY İSTEK FORMU

Lâboratuvar no		Numune cinsi	
Numuneyi gönderen		Sorumlu mühendis	
Ait olduğu proje		İstek tarihi	

Sıra No	Numune No	TANIMLAMA							Su içeriği, W_n	Tabii Birim Ağırlık	BASINÇ DAYANIMI			KONSOLIDASYON					DENEY SONUCU		
		Standard Proktor	Modifiye Proktor	İzafi Birim Ağırlık	Beğil yoğunluk	Elek Analizi	Hidrometre Analizi	Çift Hidrometre			Üç Eksenli	Tek Eksenli	Kesme Kutusu	Konsolidasyon	Düşen Seviyeli Perme.	Sabit Seviyeli Perme.	İğne Delikli+Dağılıma	Şişme Deneyleri	Boşluk Suyu Analizleri	Beğil yoğunluk	Proktor
											UU	CU	CD								
									LL	PL	RL										
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					

Deney numunesi kartı

DENEY NUMUNESİ KARTI	
Lâboratuvar no	
Numuneyi gönderen	
Ait olduğu proje	
Kuyu/sondaj no	
Numune no	
Derinlik, m	
Numune tipi	

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Deney adedi ve bedeli formu



DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



DENEY ADEDİ VE BEDELİ FORMU

Lâboratuvar no			
Gönderen kuruluş			
Şehir			
Proje adı			
İlgi yazının tarihi		Numune cinsi	
İlgi yazının sayısı		Rapor tarihi	

	YAPILAN DENEY		ADET	BİRİM FİYATI	TUTARI
TANIMLAMA	Numune hazırlama				
	Dane Dağılımı	Elek Analizi			
		Hidrometre Analizi			
		Çifte Hidrometre			
	Kıvam Limitleri	Likit Limit			
		Plastik Limit			
		Rötre Limit			
	Özgül Ağırlık (Bağıl Yoğunluk)				
	Tabii Birim Ağırlık (γ_n)				
	Sıkıştırma Deneyi	Standard			
		Modifiye			
		Titreşimli			
	En Küçük Birim Hacim Ağırlık				
	Su İçeriği (W_n)				
İndeks Değerleri	Sınıflandırma				
	e Hesabı				
	n Hesabı				
	S Hesabı				
DAYANIM	Üç Eksenli Kesme	UU Tipi			
		CU Tipi			
		CD Tipi			
	Tek Eksenli Kesme (Serbest Basınç)				
	Direk Kesme	UU Tipi			
		CU Tipi			
CD Tipi					
DİĞER MÜHENDİSLİK DENEYLERİ	Konsolidasyon	Deney			
		Oturma-Zaman Grafiği			
		Sıkışma İndisi (C_c)			
		Ön Konsolidasyon (P_o)			
	Permeabilite	Sabit Seviyeli			
		Düşen Seviyeli			
	İğne Deliği (Pinhole)				
	Dağılıma Deneyi				
	Şişme Deneyi	Şişme Basıncı			
		Şişme Yüzdesi			
				TOPLAM	
				% KDV	
				GENEL TOPLAM	

KONTROL:

08.FR.??

REV.NO/TARİHİ: 00/01.01.2007

Deney raporu

	DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü RAPOR Sayfa Sayfa / Toplam sayfa		
Numuneyi Gönderen :		Numune Kabul Tarihi :	
Proje Adı :		Deney Başlama Tarihi :	
Numune Cinsi ve Tarifi :		Deney Bitiş Tarihi :	
SORUMLU MÜHENDİS		ONAYLAYAN	
Notlar:			
DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücetepe/ANKARA, Tel : (312) 399 2796, Faks : (312) 399 2795, e-posta : takk@dsi.gov.tr Elektronik Ağ : www.dsi.gov.tr			

Su içeriği deneyi formu



DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



SU İÇERİĞİ DENEYİ FORMU

Laboratuvar no	
Numuneyi gönderen	
Ait olduğu proje	
Deney tarihi	

Sıra No	Numune No	Kap No	Kap W ₁ , g	Kap+yaş numune W ₂ , g	Kap+kuru numune W ₃ , g	Su miktar W ₂ -W ₃ , g	Kuru numune W ₃ -W ₁ , g	$w_n = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$ %	Düşünceler
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
DENEYİ YAPAN					KONTROL EDEN				

Dane çapı dağılımı

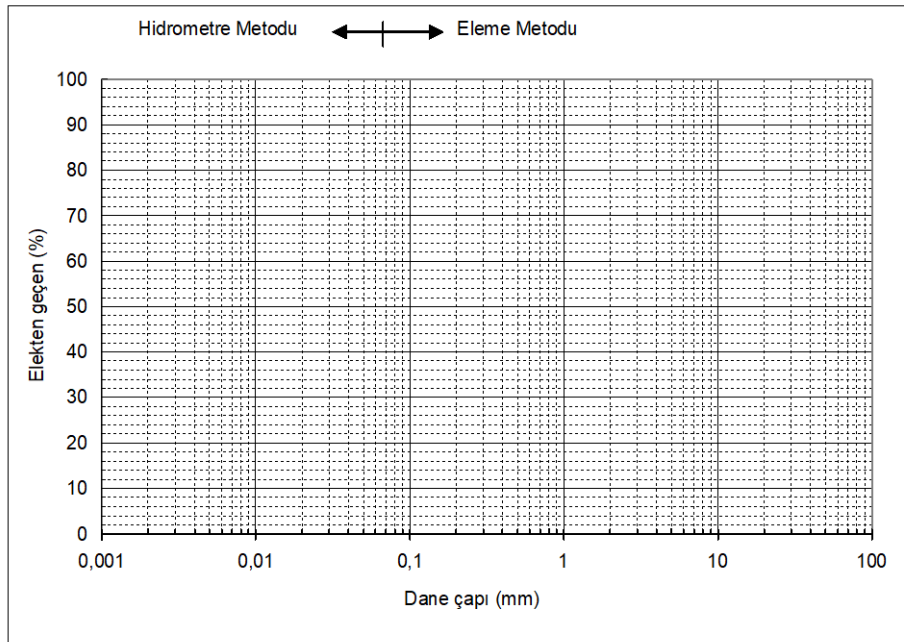
DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**DANE ÇAPI DAĞILIMI**

Lâboratuvar no		Numune kabul tarihi	
Numuneyi gönderen		Deney başlama tarihi	
Proje adı		Deney bitiş tarihi	
Kuyu/sondaj no		Deney standardı	
Numune no			
Numune cinsi			

D ₁₀ (mm)		Uniformluk katsayısı, $C_u = D_{60}/D_{10}$	
D ₃₀ (mm)		Süreklilik katsayısı, $C_r = (D_{30} D_{30}) / (D_{60} D_{10})$	
D ₆₀ (mm)			

Moloz, (%)		Çakıl, (%)		Kum, (%)		İnce, (%)	
------------	--	------------	--	----------	--	-----------	--



Elek							
Göz açıklığı, (mm)							
Kalan, (%)							
Toplam geçen, (%)							
Belirsizlik							

Elek				
Göz açıklığı, (mm)				
Kalan, (%)				
Toplam geçen, (%)				
Belirsizlik				

SORUMLU MÜHENDİS	ONAYLAYAN

Notlar:

06100 Yücetepe ANKARA Tel: (312) 399 2792 Faks: (312) 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.TARİHİ/NO : 00/01.01.2007



Bağıl yoğunluk (özellül ağırlık) deneyi formu

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



BAĞIL YOĞUNLUK (ÖZGÜL AĞIRLIK) DENEYİ FORMU

Laboratuvar no	
Numuneyi gönderen	
Ait olduğı proje	

Deneyi tarihi	
Deneyi yapan	
Kontrol eden	
γ_{20} (g/cm ³)	

Sıra No	Kuyu/sondaj No	Numune No	Sıcaklık t °C	γ_L g/cm ³	γ_w g/cm ³	W_1 g	W_2 g	W_3 g	W_4 g	G_s	G_s	G_{20} $G_s(\gamma_w/\gamma_{20})$	Düşünceler
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

W_1 : şişe ağırlığı, g

W_2 : şişe+kuru numune ağırlığı, g

W_3 : havası alınmış şişe+numune+su ağırlığı, g

W_4 : havası alınmış şişe+su ağırlığı, g

γ_L : kullanılan sıvının deney sıcaklığında özgül ağırlığı, g/cm³

γ_w : suyun deney sıcaklığında özgül ağırlığı, g/cm³

İnce daneler için

Orta ve iri daneler için

$$G_s = \frac{\gamma_L (W_2 - W_1)}{\gamma_w [(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]}$$

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)}$$

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.2007

Tabii birim hacim ağırlık deneyi formu

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Lâboratuvarı Şube Müdürlüğü

**TABİİ BİRİM HACİM AĞIRLIK DENEYİ FORMU**

Laboratuvar no	
Numuneyi gönderen	
Ait olduğu proje	
Deney tarihi	

Sıra no	Numune no	Sıcaklık, (°C)	Suyun yoğunluğu, γ_w (g/cm ³)	Numunenin havadaki ağırlığı, W (g)	Parafinli numunenin havadaki ağırlığı, W ₁ (g)	Parafinli numunenin saf su içindeki ağırlığı, W ₂ (g)	Parafinin ağırlığı, W _p =W ₁ -W (g)	Parafinin hacmi $V_p = W_p / \gamma_p$ ($\gamma_p = 0.92$ g/cm ³) (cm ³)	(Numune+Parafin) hacmi $V_{pn} = (W_1 - W_2) / \gamma_w$ (cm ³)	Numune hacmi, $V = V_{pn} - V_p$ (cm ³)	Tabii birim hacim ağırlık, $\gamma_n = W/V$ (g/cm ³)	Düşünceler
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
DENEYİ YAPAN						KONTROL EDEN						

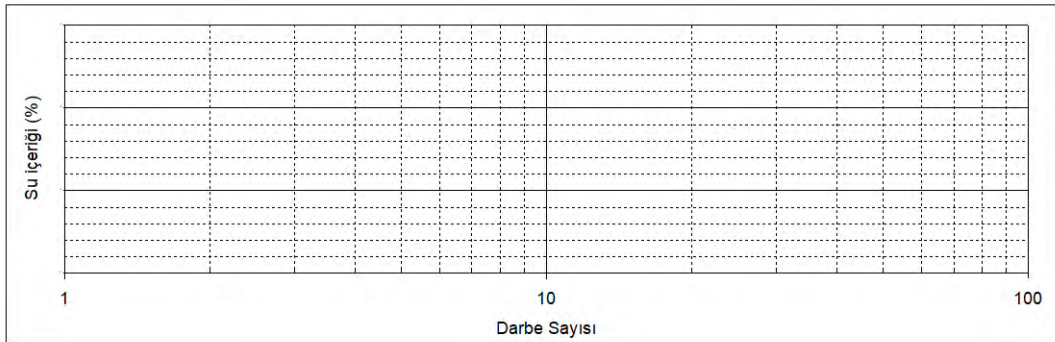
Kıvam limitleri deneyi formu



DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü
KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ FORMU



Lâb. no							Deney standardı			
Gönderen							Kurutma şekli			
Ait olduğu proje							Numune kabul tarihi			
Kuyu/sondaj no							Deney başlama tarihi			
Numune no							Deney bitiş tarihi			
LİKİT LİMİT			Beş Nokta						Tek Nokta	
			1	2	3	4	5	6		
	Kap No									
	Darbe Adedi									
	Yaş numune + kap, g									
	Kuru numune + kap, g									
	Su miktarı, g									
	Kap, g									
	Kuru numune g									
	Su içeriği %									
Likit limit, %										
PLASTİK LİMİT			1	2	3	4				
	Kap No									
	Yaş numune + kap, g									
	Kuru numune + kap, g									
	Su miktarı, g									
	Kap, g									
	Kuru numune g									
	Su içeriği %									
BÜZÜLMİ LİMİTİ	Hacimsel						Tek Eksenli			
	Kap No		Kap No				L ₀ (cm)			
	Yaş numune + kap, g		Civa + kap, g				L (cm)			
	Kuru numune + kap, g		Kap, g							
	Su miktarı, g		Civa, g							
	Kap, g		Malzeme hacmi, V, cm ³							
	Kuru numune W, g		Kap hacmi, V ₀ , cm ³							
	Su içeriği W _n , %		Büzülme limiti, RL=W _n (V ₀ -V)/W, %							



Likit Limit, %		Büzülme Limiti, %		Notlar:
Plastik Limit, %		Tek Eksenli Büzülme, %		
Plastisite indisi, %				
SORUMLU MÜHENDİS			ONAYLAYAN	

06100 Yücetepe ANKARA Tel: +90 312 399 2792 Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.2007

Sıkıştırma deneyleri formu

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**SIKIŞTIRMA DENEYLERİ**

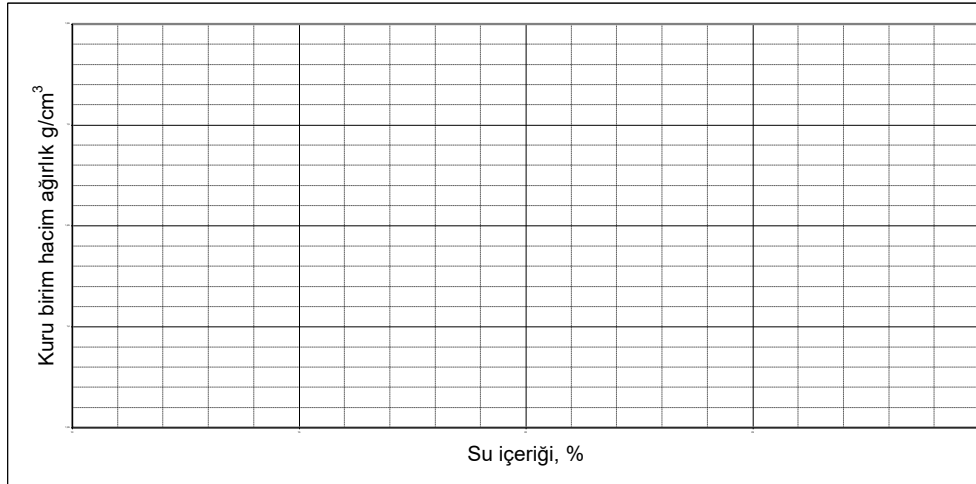
Lâboratuvar no		Numune kabul tarihi	
Gönderen		Deney tarihi	
Ait olduğu proje		Deney standardı	
Kuyu/sondaj no		Kalıp ağırlığı, g	
Numune no		Kalıbın hacmi, cm ³	
Derinlik, m		Bağıl yoğunluk	

Kuru birim hacim kütle, γ_K , g/cm³

	1	2	3	4	5	6
Kap + Sıkıştırılmış numune, g						
Kap ağırlığı g						
Sıkıştırılmış numune, g						
Yaş birim hacim ağırlık g/cm ³						
Kuru birim hacim ağırlık g/cm ³						

Su içeriği, w_n , %

	1	2	3	4	5	6
Kap No						
Yaş toprak + kap, g						
Kuru toprak + kap, g						
Su miktarı, g						
Kap, g						
Kuru toprak, g						
Su içeriği, (%)						



$\gamma_{k,max}$, g/cm ³		Elek göz açıklığı, mm	
W_{opt} , %		Kalıp çapı, mm	
20 mm lik elekte kalan, %		Kalıp yüksekliği, mm	
Tokmak kütlesi kg		Not	
SORUMLU MÜHENDİS		ONAYLAYAN	

06100 Yücetepe ANKARA Tel: +90 312 399 2792 Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Şişme deneyleri formu

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**ŞİŞME DENEYLERİ FORMU**

Laboratuvar no		Bağıl yoğunluk, Gs	
Gönderen		Deney metodu	
Ait olduğu proje		Numune kabul tarihi	
Kuyu / sondaj no		Deney başlama tarihi	
Numune No		Deney bitiş tarihi	
Numune tipi		Alet no	
Kullanılan elek			

Şişme Potansiyeli (%)

Ring no		Ring kesit alanı (cm ²)	
Ring ağırlığı (g)		Ring hacmi (cm ³)	
Ring çapı (mm)		Numune başlangıç yüksekliği (mm)	

	Deney öncesi	Deney sonrası	Zaman Dakika	Okuma Değeri	Kabarma Miktarı mm	Şişme %
Ring + yaş numune ağırlığı (g)						
Ring + kuru numune ağırlığı (g)						
Su ağırlığı (g)						
Kuru numune ağırlığı (g)						
Su içeriği (%)						
Yaş birim hacim ağırlık (g/cm ³)						
Kuru birim hacim ağırlık (g/cm ³)						
Not:						

Şişme Basıncı (kg/cm²)

Ring no		Ring kesit alanı (cm ²)	
Ring ağırlığı (g)		Ring hacmi (cm ³)	
Ring çapı (mm)		Numune başlangıç yüksekliği (mm)	

	Deney Öncesi	Deney Sonrası
Ring + yaş numune ağırlığı (g)		
Ring + kuru numune ağırlığı (g)		
Su ağırlığı (g)		
Kuru numune ağırlığı (g)		
Su içeriği (%)		
Yaş birim hacim ağırlık (g/cm ³)		
Kuru birim hacim ağırlık (g/cm ³)		
Kefeye konan ağırlık (g)		
Kol oranı		
Şişme basıncı (kg/cm ²)		
Not:		

DENEYİ YAPAN	KONTROL EDEN
06100 Yücelepe ANKARA Tet +90 312 399 2792	Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.2007

Dispersibilite deneyi formu



DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



DİSPERSİBİLİTE DENEYİ FORMU

Lâboratuvar no		Deneyi yapan	
Gönderen		Kontrol eden	
Ait olduğu proje		Deney tarihi	
Deney standardı			

Sıra no	Numune no	Zaman, Dakika	İĞNE DELİĞİ DENEYİ																				DAĞILMA	
			5 cm su yükü										18 cm su yükü					38 cm su yükü						
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
1		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						
2		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						
3		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						
4		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						
5		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						
6		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						
7		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						
8		Hacim, mL																						
		Debi, mL/s																						
		Bulanıklık																						

08.FR.??

REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

İğne deliği deneyi

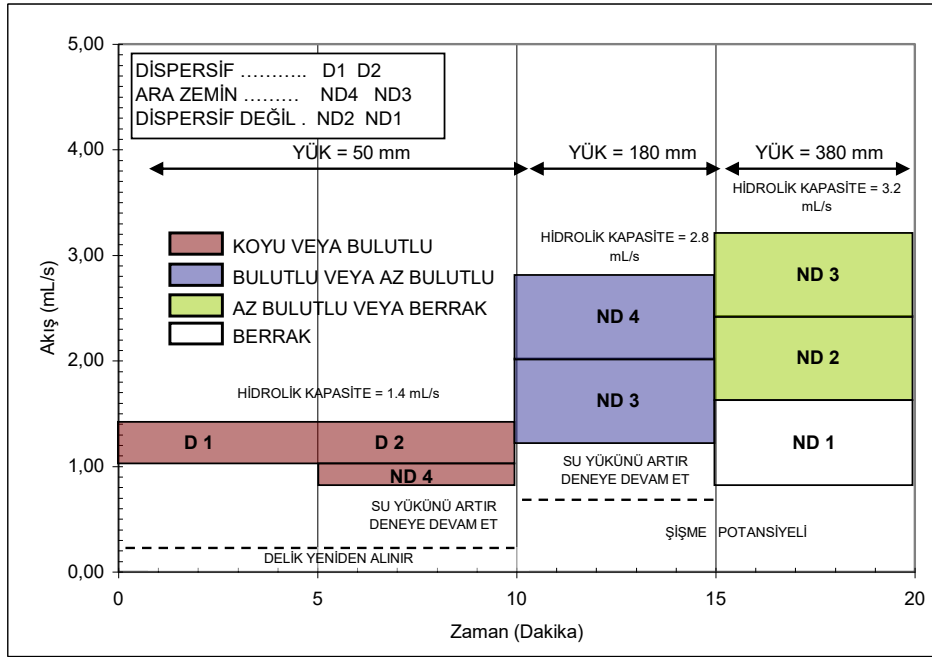


DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



İĞNE DELİĞİ DENEYİ

Lâboratuvar no		Numune kabul tarihi	
Gönderen		Deney başlama tarihi	
Proje adı		Deney bitiş tarihi	
Kuyu/sondaj no		Deney standardı	
Numune no		Kullanılan elek	
Numune cinsi		Deney standardı	



Su yükü (cm)	5									
Zaman (Dakika)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hacim (mL)										
Akım (mL/s)										
Belirsizlik										

Su yükü (cm)	18					36				
Zaman (Dakika)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Hacim (mL)										
Akım (mL/s)										
Belirsizlik										

Dispersibilite grubu	
Sonuç	

DENEYİ YAPAN	ONAYLAYAN
--------------	-----------

06100 Yücepete ANKARA Tel: +90 312 399 2792 Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.TARİHİ/NO : 00/01.01.200?

Dayanım deneyleri formu



DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



DAYANIM DENEYLERİ FORMU

Lâboratuvar no		Örselenmiş ise, elek no	
Numuneyi gönderen		Numune kabul tarihi	
Ait olduğu proje		Deney başlama tarihi	
Kuyu / sondaj no		Deney bitiş tarihi	
Numune no		Deneyi yapan	
Numune tipi		Kontrol Eden	

Numune boyu, cm		Ring No	
Numune çapı, cm		Ring Katsayısı	
Kesit alanı, cm ²		Numunenin ağırlık g	
Numune hacmi, cm ³		Yaş birim hacim ağırlık g/cm ³	
Çevre basıncı, kg/cm ²		Kuru birim hacim ağırlık g/cm ³	
Kesme hızı, mm/dakika			

Düşey okuma mm	Ring okuması	$\sigma_1 - \sigma_3$	Düşey okuma mm	Ring okuması	$\sigma_1 - \sigma_3$	Düşey okuma mm	Ring okuması	$\sigma_1 - \sigma_3$	Düşey okuma mm	Ring okuması	$\sigma_1 - \sigma_3$	Düşey okuma mm	Ring okuması	$\sigma_1 - \sigma_3$	Düşey okuma mm	Ring okuması	$\sigma_1 - \sigma_3$
0,10			2,60			5,10			7,60			10,10			12,60		
0,20			2,70			5,20			7,70			10,20			12,70		
0,30			2,80			5,30			7,80			10,30			12,80		
0,40			2,90			5,40			7,90			10,40			12,90		
0,50			3,00			5,50			8,00			10,50			13,00		
0,60			3,10			5,60			8,10			10,60			13,10		
0,70			3,20			5,70			8,20			10,70			13,20		
0,80			3,30			5,80			8,30			10,80			13,30		
0,90			3,40			5,90			8,40			10,90			13,40		
1,00			3,50			6,00			8,50			11,00			13,50		
1,10			3,60			6,10			8,60			11,10			13,60		
1,20			3,70			6,20			8,70			11,20			13,70		
1,30			3,80			6,30			8,80			11,30			13,80		
1,40			3,90			6,40			8,90			11,40			13,90		
1,50			4,00			6,50			9,00			11,50			14,00		
1,60			4,10			6,60			9,10			11,60			14,10		
1,70			4,20			6,70			9,20			11,70			14,20		
1,80			4,30			6,80			9,30			11,80			14,30		
1,90			4,40			6,90			9,40			11,90			14,40		
2,00			4,50			7,00			9,50			12,00			14,50		
2,10			4,60			7,10			9,60			12,10			14,60		
2,20			4,70			7,20			9,70			12,20			14,70		
2,30			4,80			7,30			9,80			12,30			14,80		
2,40			4,90			7,40			9,90			12,40			14,90		
2,50			5,00			7,50			10,00			12,50			15,00		

Su içeriği	Deney başlangıcı	Deney sonu	Numunenin göçme şekli	Notlar
Kap No				
Yaş numune + kap, g				
Kuru numune + kap, g				
Su miktarı, g				
Kap, g				
Kuru numune, g				
Su içeriği, %				

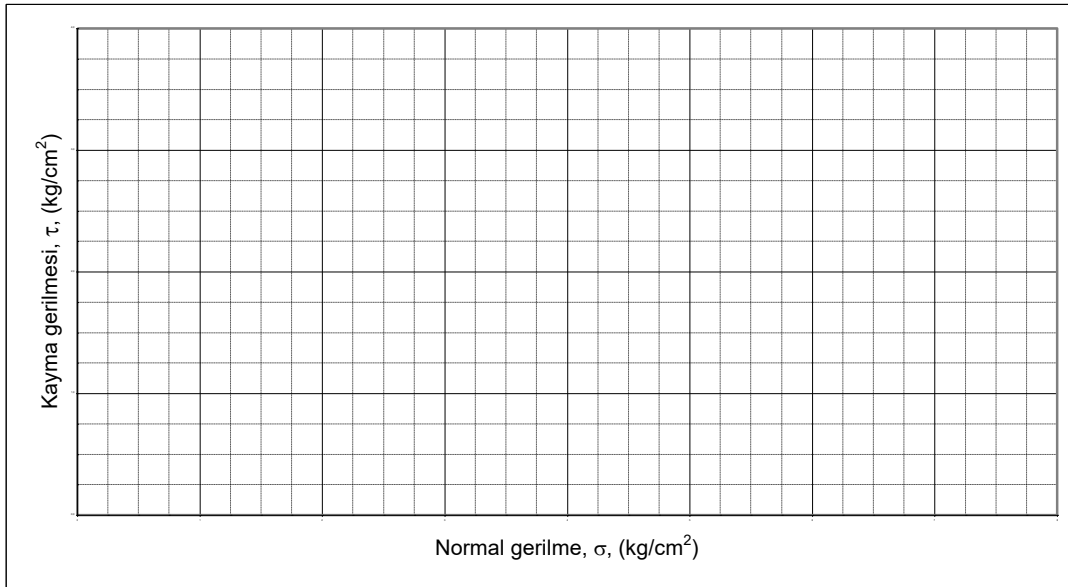
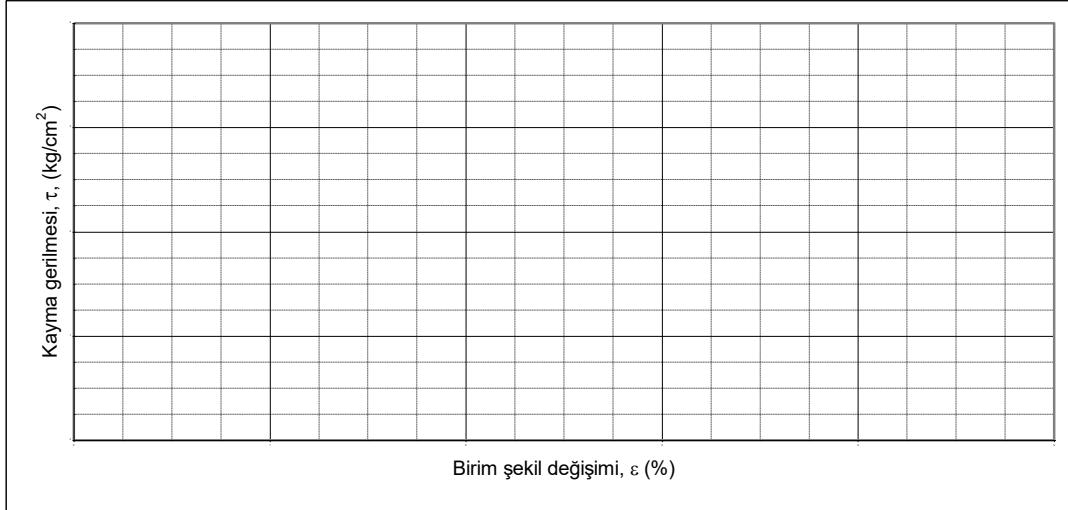
08.FR.?? REV.TARİHİ/NO : 00/01.01.200?

Serbest (tek eksenli) basınç deneyi

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**SERBEST (TEK EKSENLİ) BASINÇ DENEYİ**

Lâboratuvar no		Numune tipi	
Gönderen		Numune şekli	
Ait olduğu proje		Numune yüksekliği, cm	
Kuyu / sondaj no		Numune çapı, cm	
Numune no		Numune kabul tarihi	
Deney standardı		Deney tarihi	



Yükleme hızı (mm/dakika) =		q_u (kg/cm ²) =	±	ε (%) =	±
----------------------------	--	-------------------------------	---	---------------------	---

SORUMLU MÜHENDİS	ONAYLAYAN
06100 Yücetepe ANKARA Tel: +90 312 399 2792 Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr	

08.FR.?? REV.TARİHİ/NO : 00/01.01.200?

Dayanım deneyleri hesap formu (devam)

[illegible]

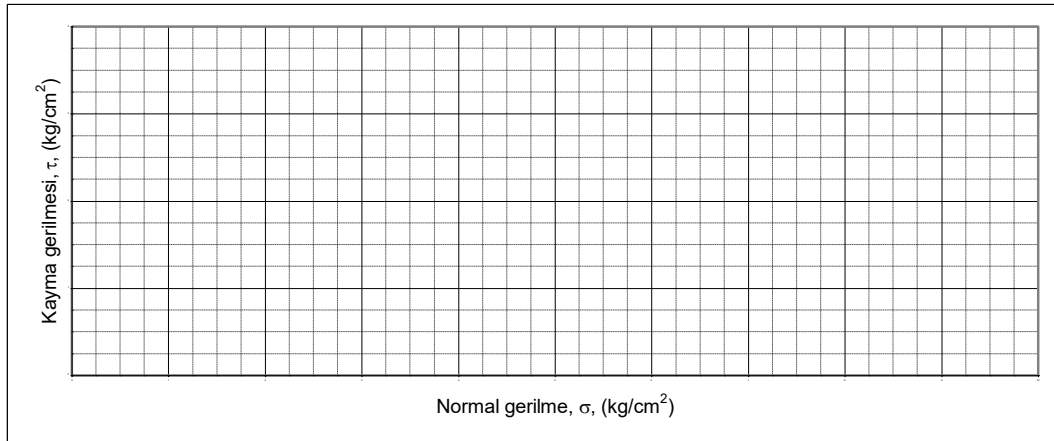
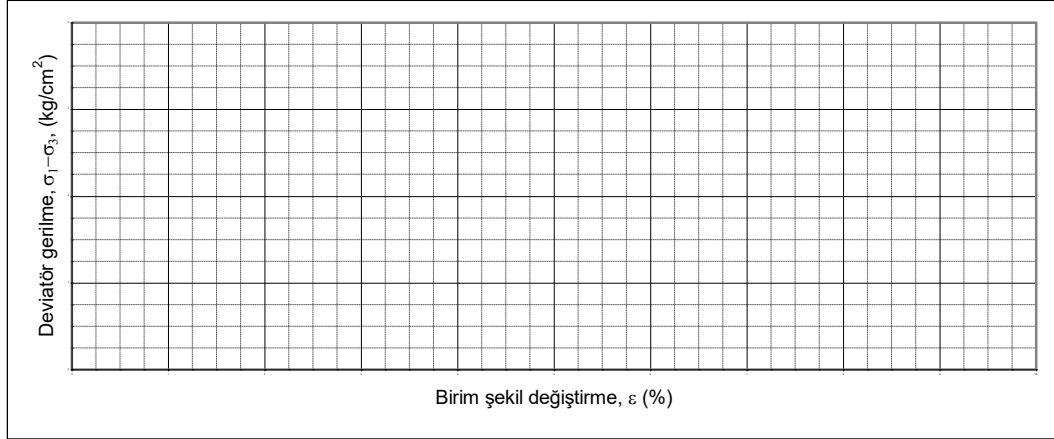
08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Üç eksenli basınç dayanımı deneyi (UU tipi)

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ (UU TİPİ) (*)**

Lâboratuvar no		Numune tipi	
Gönderen		Numune şekli	
Ait olduğu proje		Numune yüksekliği, cm	
Kuyu / sondaj no		Numune çapı, cm	
Numune no		Numune kabul tarihi	
Deney standardı		Deney tarihi	



Toplam gerilmeye göre					Bilgi için	
σ_3 (kg/cm ²)					C, kg/cm ²	
Belirsizlik					ϕ °	
σ_1 - σ_3 (kg/cm ²)						
Belirsizlik						
σ_1 (kg/cm ²)						
Belirsizlik						
ε (%)						
Belirsizlik						
SORUMLU MÜHENDİS				ONAYLAYAN		
06100 Yücetepe ANKARA				Tel: +90 312 399 2792		Faks: +90 312 399 2795
						E-posta: takk@dsi.gov.tr

06100 Yücetepe ANKARA Tel: +90 312 399 2792 Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

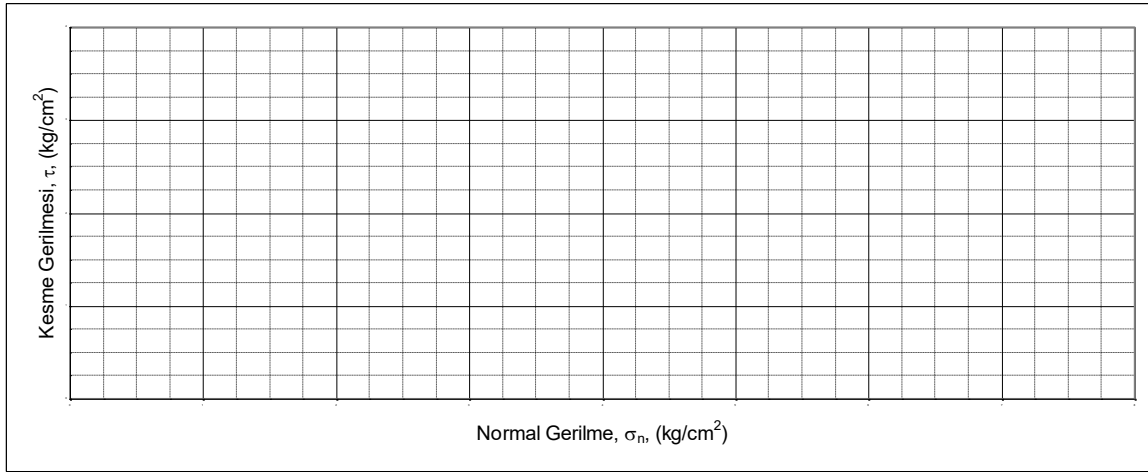
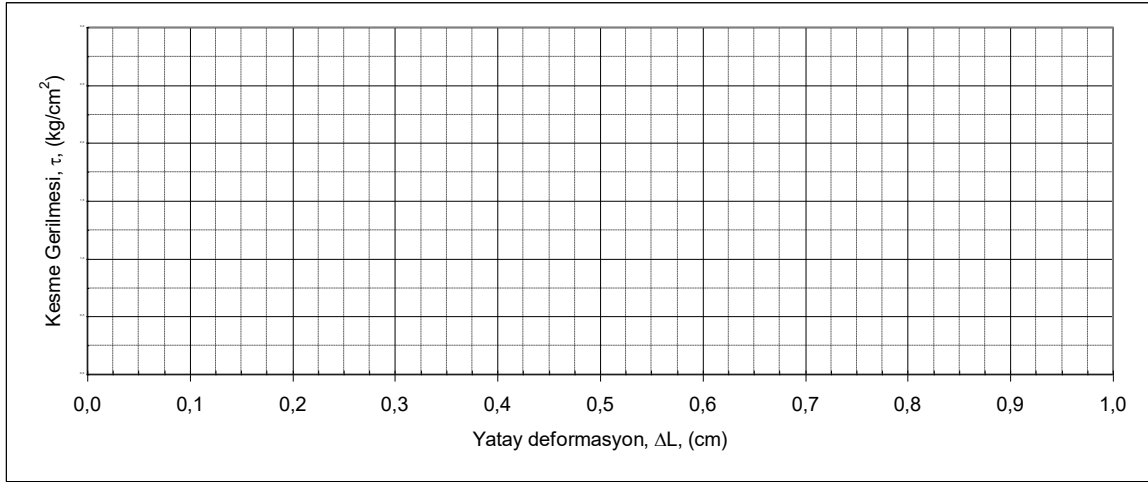
08.FR.?? REV.TARİHİ/NO : 00/01.01.200?

Kesme kutusu deneyi

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Lâboratuvarı Şube Müdürlüğü

**KESME KUTUSU DENEYİ**

Lâboratuvar no		Numune tipi	
Numuneyi gönderen		Numunenin şekli	
Ait olduğu proje		Numune uzunluğu, cm	
Kuyu / sondaj no		Numune yüksekliği, cm	
Numune no		Numune kabul tarihi	
Derinlik, m		Deney başlama tarihi	
Deney standardı		Deney bitiş tarihi	
Değerlendirme			



Toplam Gerilmeye Göre (Bilgi için)	
C (kg/cm ²)	
φ (°)	
Yükleme hızı (mm/dakika)	

σ _n (kg/cm ²)				
Belirsizlik				
τ _{mak} (kg/cm ²)				
Belirsizlik				
ΔL (cm)				
Belirsizlik				

SORUMLU MÜHENDİS	ONAYLAYAN
06100 Yücetepe ANKARA Tel: +90 312 399 2792	Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.NO/TARİH:00/01.01.200?

Konsolidasyon deneyi formu

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Lâboratuvarı Şube Müdürlüğü

**KONSOLİDASYON DENEYİ FORMU**

Lâb. no		Bağıl yoğunluk, Gs	
Gönderen		Alet No	
Ait olduğu proje		Ring Cinsi	
Kuyu/sondaj no		Ring çapı, cm	
Numune no		Ring kesit alanı, cm ²	
Numune tipi		Ring yüksekliği, mm	
Kullanılan elek		Kabarma miktarı, mm	
Numune kabul tarihi		Son numune yüksekliği, H, mm	
Deney başlama tarihi		Deney standardı	
Deney bitiş tarihi			

	Deney başında	Deney sonunda
Ring No		
Ring+yaş numune ağırlığı, g		
Ring+kuru numune ağırlığı, g		
Su miktarı, g		
Ring ağırlığı, g		
Kuru toprak ağırlığı, g		
Su muhtevası, %		

DENEY OKUMALARI, mm

Yükler	0,25 kg/cm ²	0,5 kg/cm ²	1 kg/cm ²	2 kg/cm ²	4 kg/cm ²	8 kg/cm ²	16 kg/cm ²	4 kg/cm ²	1 kg/cm ²
Zaman Dakika									
0									
0,1									
0,3									
0,5									
1									
2									
5									
10									
20									
30									
40									
60									
80									
100									
150									
200									
300									
500									
1440									
Sıcaklık °C									

DENEYİ YAPAN	ONAYLAYAN
06100 Yücetepe ANKARA Tel: +90 312 399 2792 Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr	

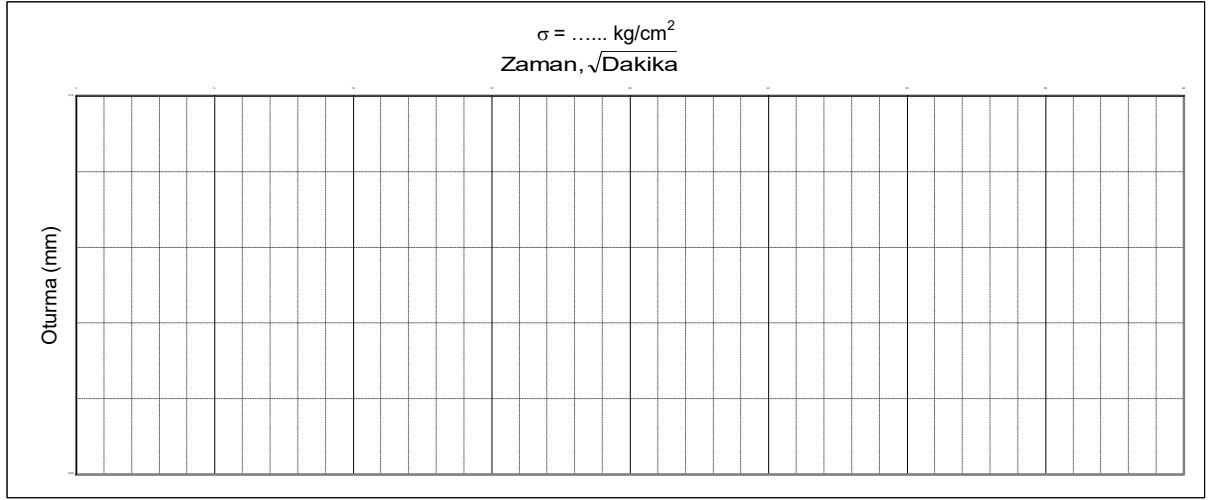
08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Oturma - karekök zaman grafiği

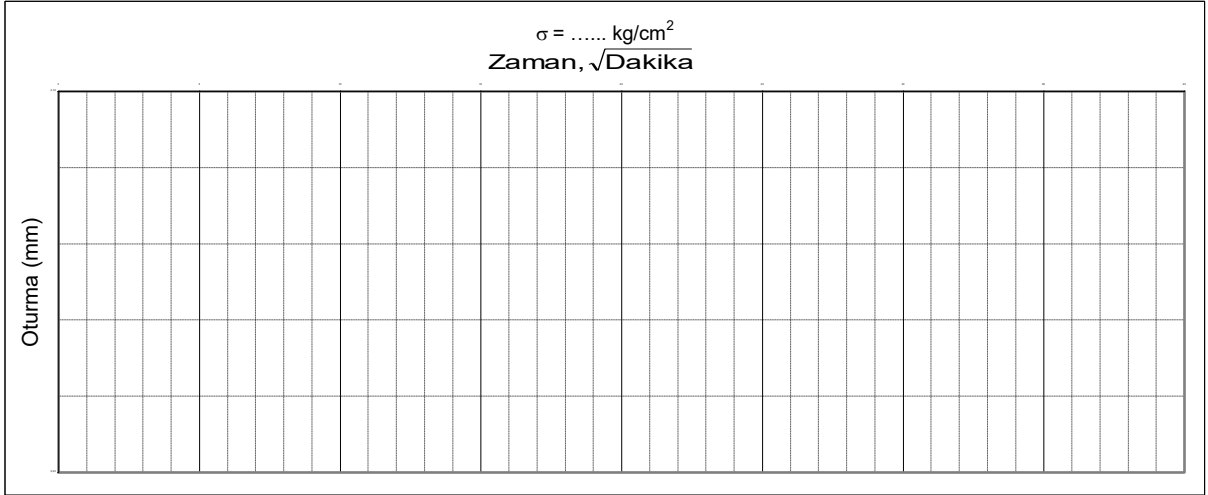
DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**OTURMA - KAREKÖK ZAMAN GRAFİĞİ**

Laboratuvar no		Numune tipi	
Gönderen		Kullanılan elek	
Ait olduğu proje		deney standardı	
Kuyu/sondaj no		Numune kabul tarihi	
Numune no		Deney başlama tarihi	
		Deney bitiş tarihi	



$H_{\text{ort}} \text{ (mm)} =$	$\pm$	$\sqrt{t_{90}} =$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) =$	$\pm$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) =$	$\pm$
---------------------------------	-------	-------------------	--	-------	---	-------



$H_{\text{ort}} \text{ (mm)} =$	$\pm$	$\sqrt{t_{90}} =$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) =$	$\pm$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) =$	$\pm$
---------------------------------	-------	-------------------	--	-------	---	-------

SORUMLU MÜHENDİS	ONAYLAYAN
06100 Yücetepe ANKARA	Tel: +90 312 399 2792
	Faks: +90 312 399 2795
	E-posta: takk@dsi.gov.tr

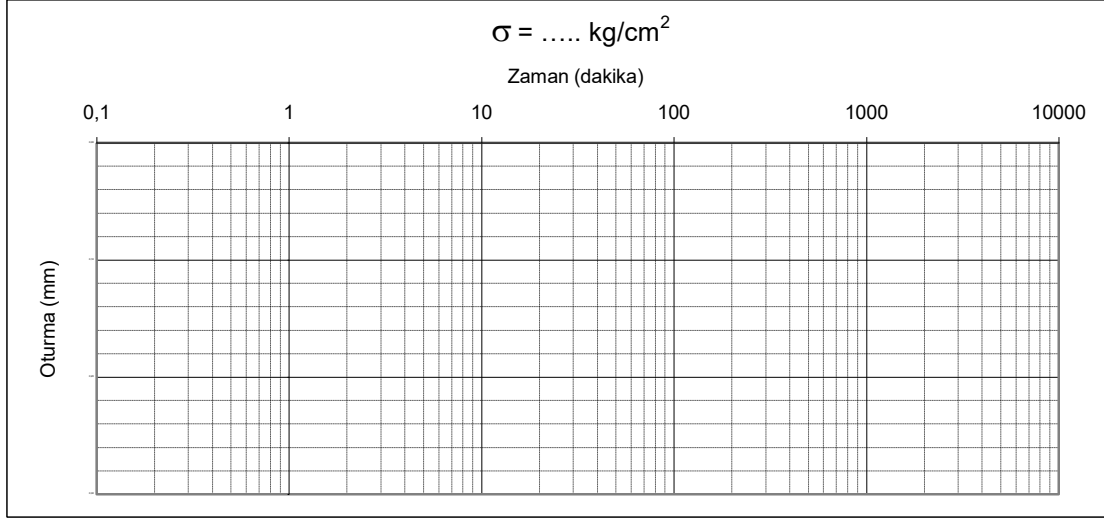
08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Oturma - logaritma zaman grafiği

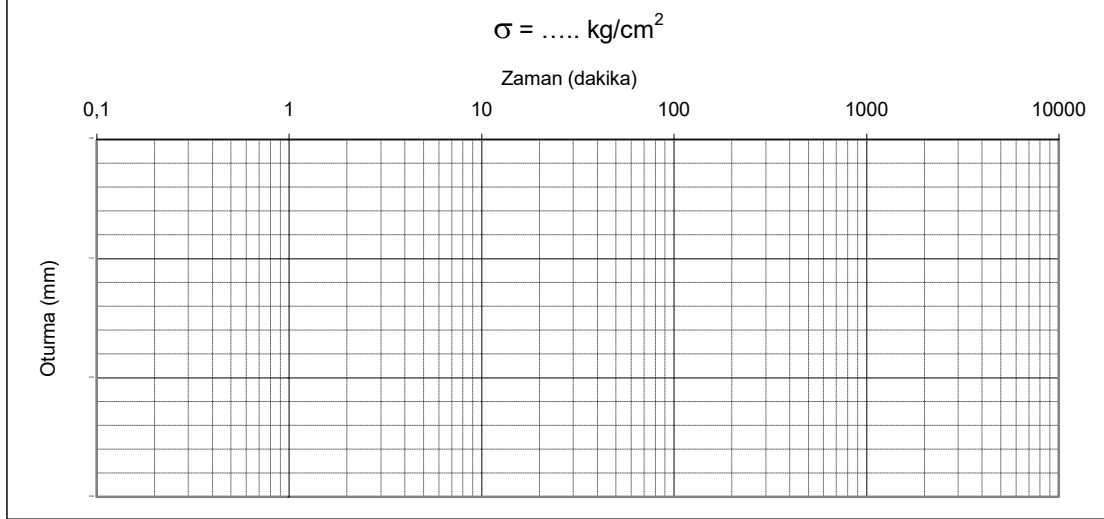
DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**OTURMA - LOGARİTMA ZAMAN GRAFİĞİ**

Laboratuvar no		Numune tipi	
Gönderen		Kullanılan elek	
Ait olduğu proje		deney standardı	
Kuyu/sondaj no		Numune kabul tarihi	
Numune no		Deney başlama tarihi	
		Deney bitiş tarihi	



$H_{ort} \text{ (mm)} =$		$t_{50} =$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) =$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) =$
--------------------------	--	------------	--	---



$H_{ort} \text{ (mm)} =$		$t_{50} =$	$m_v (10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kg}) =$	$C_v (10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}) =$
--------------------------	--	------------	--	---

SORUMLU MÜHENDİS	ONAYLAYAN

06100 Yücetepe ANKARA Tel: +90 312 399 2792 Faks: +90 312 399 2795 E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

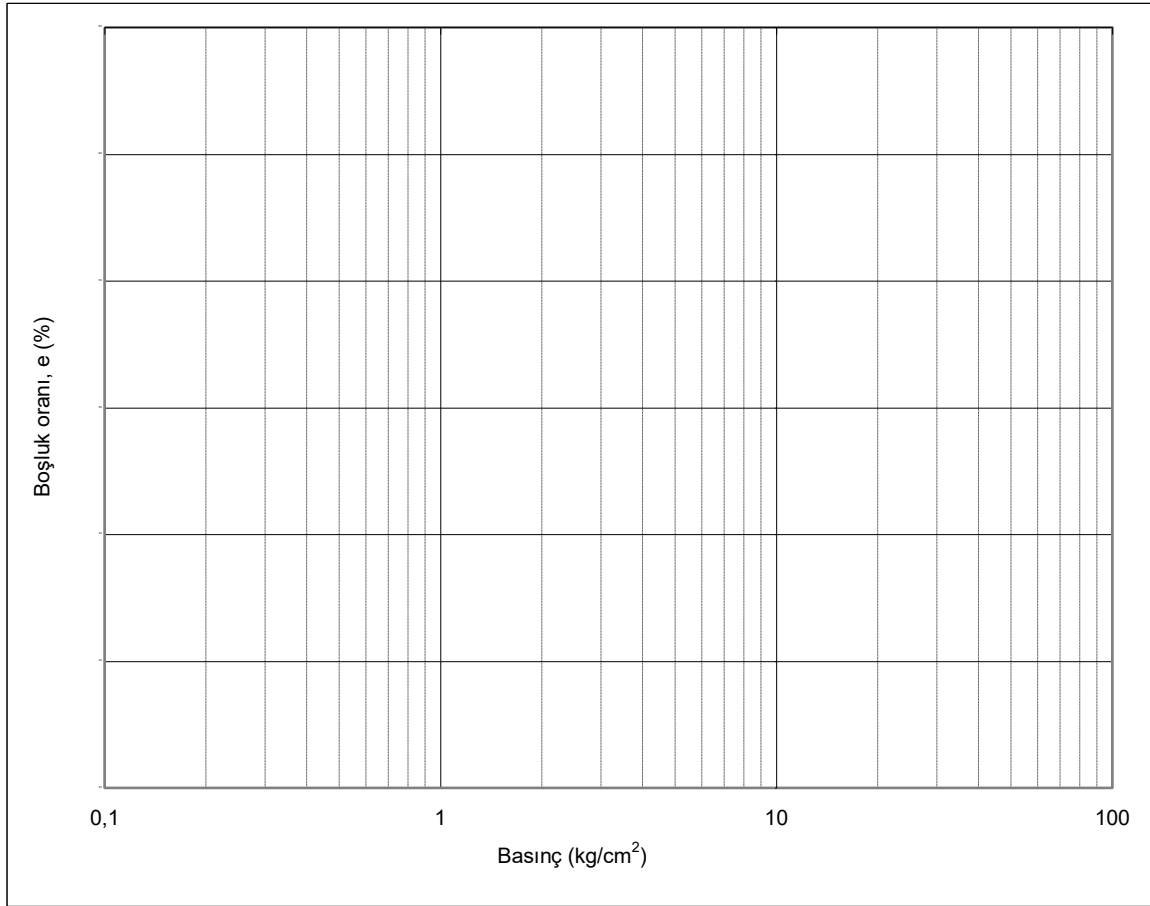
Basınç - boşluk oranı grafiği

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Lâboratuvarı Şube Müdürlüğü

**BASINÇ - BOŞLUK ORANI GRAFİĞİ**

Laboratuvar no		Numune tipi	
Gönderen		Kullanılan elek	
Ait olduğu proje		Deney standardı	
Kuyu/sondaj no		Numune kabul tarihi	
Numune no		Deney başlama tarihi	
		Deney bitiş tarihi	

Sıkışma oranı, C_c , %	28,6	±
Kazanım oranı, C_s , %	5,8	±
Ön konsolidasyon katsayısı, P_0 (kg/cm ²)		



SORUMLU MÜHENDİS	ONAYLAYAN
06100 Yücetepe ANKARA	Tel: +90 312 399 2792
	Faks: +90 312 399 2795
	E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Geçirgenlik deneyleri formu

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**GEÇİRGENLİK DENEYLERİ FORMU**

Lâboratuvar no		Numune tipi	
Numuneyi gönderen		Deney metodu	
Ait olduğu proje		Numune kabul tarihi	
Kuyu / sondaj no		Deney başlama tarihi	
Numune No		Deney bitiş tarihi	
μ_{20} , 10^{-6} Nsm	1,0050	Kullanılan elek	

Sabit Seviyeli Geçirgenlik Deneyi

H, cm =		L, cm =		D, cm =		A, cm ² =	
---------	--	---------	--	---------	--	----------------------	--

	İlk okuma Tarih, saat	Son okuma Tarih, saat	Su sıcaklığı (°C)	Süre t (s)	Hacim V (cm ³)	$k_t = \frac{VL}{Aht}$ (cm/s)	μ_t 10^{-6} Nsm	k_{20} $k_t (\mu_t / \mu_{20})$ (cm/s)
1								
2								
3								
							Ortalama	

H: Manometrelerdeki su seviyesi farkı, cm
D: Kalıp çapı, cm

L: Manometreler arasındaki mesafe, cm
A: Kalıp alanı, cm²

Düşen Seviyeli Geçirgenlik Deneyi

H, cm =		L, cm =					
D, cm =		A, cm ² =		d, cm =		a, cm ² =	

	İlk okuma Tarih, saat	Son okuma Tarih, saat	Su sıcaklığı (°C)	Süre t (s)	ΔH (cm)	k_t (cm/s)	μ_t 10^{-6} Nsm	k_{20} $k_t (\mu_t / \mu_{20})$ (cm/s)
1								
2								
3								
							Ortalama	

H: İlk su seviyesi, cm
D: Kalıp çapı, cm

L: Numune yüksekliği, cm
A: Kalıp alanı, cm²
a: Hortum alanı, cm²

d: Su düşüşü gözlenen borunun çapı, cm
 ΔH : İlk okuma ile son okuma arasındaki su seviyesi farkı, cm

$$k_t = \frac{2.3aL}{At} \log\left(\frac{H}{H - \Delta H}\right)$$

Not:

DENEYİ YAPAN	ONAYLAYAN

06100 Yücetepe ANKARA

Tel: +90 312 399 2792

Faks: +90 312 399 2795

E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.??

REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Etüv doğrulama kartı

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**ETÜV DOĞRULAMA KARTI**

Laboratuvar	
Etüv	

Sıra No	Tarih	Doğrulamayı Yapanın Adı Soyadı	İmzası	Ayarlanan Sıcaklık	Kriter	En Büyük Okunan Değer	En Küçük Okunan Değer
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							

Notlar :

Bağıl yoğunluk şişesi kontrol kartı

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Lâboratuvarı Şube Müdürlüğü

**BAĞIL YOĞUNLUK ŞİŞESİ KONTROL KARTI**

Doğrulama tarihi	
Şişe adı	
Şişe ağırlığı, g	
Şişe hacmi, mL	
Doğrulamayı yapan	

Sıcaklık	Su+şişe ağırlığı
°C	g
10,0	
10,5	
11,0	
11,5	
12,0	
12,5	
13,0	
13,5	
14,0	
14,5	
15,0	
15,5	
16,0	
16,5	
17,0	
17,5	
18,0	
18,5	
19,0	
19,5	
20,0	
20,5	
21,0	
21,5	
22,0	
22,5	
23,0	
23,5	
24,0	
24,5	
25,0	

Sıcaklık	Su+şişe ağırlığı
°C	g
25,5	
26,0	
26,5	
27,0	
27,5	
28,0	
28,5	
29,0	
29,5	
30,0	
30,5	
31,0	
31,5	
32,0	
32,5	
33,0	
33,5	
34,0	
34,5	
35,0	
35,5	
36,0	
36,5	
37,0	
37,5	
38,0	
38,5	
39,0	
39,5	
40,0	
40,5	

Damıtık su kontrol kartı

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**DAMITIK SU KONTROL KARTI**

	Tarih	Ad Soyad		Sıcaklık °C	pH 5,0<pH<7,5	EC EC < 0,5 mS/m	Yükseltgenebilir Madde, oksijen (O) muhtevası < 0,4 mg/L	Buharlaşma kalıntısı < 2 mg/kg
1			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
2			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
3			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
4			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
5			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
6			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
7			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
8			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
9			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
10			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
11			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
12			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
13			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
14			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
15			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
16			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
17			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					
18			Aritim öncesi					
			Aritim sonrası					

08.FR.??

REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

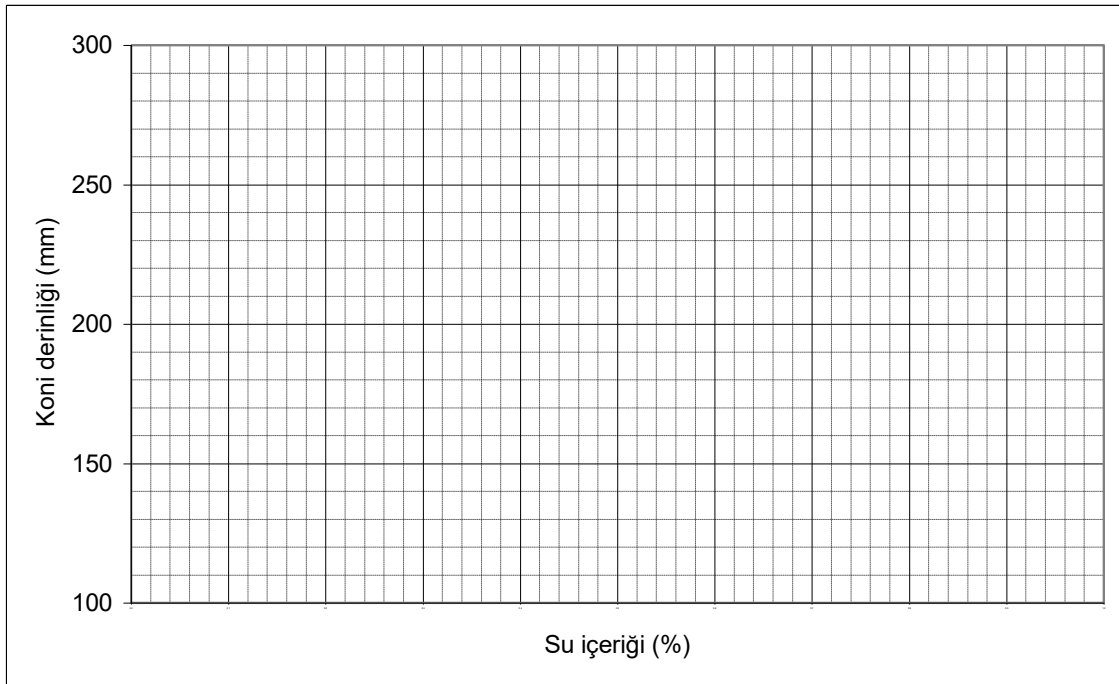
Konik penetrasyon deneyi formu

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü

**KONİK PENETRASYON DENEYİ FORMU**

Lâboratuvar no		Numune kabul tarihi	
Numuneyi gönderen		Deney başlama tarihi	
Proje adı		Deney bitiş tarihi	
Kuyu/sondaj no		Deney standardı	
Numune no		Kurutma şekli	
Numune cinsi		Konik ağırlığı, g	
		Konik açısı, °	

T I K I L		1	2	3	4	5	6	7
	Koni derinliği, mm							
	Kap no							
	Yaş zemin + kap, g							
	Kuru zemin + kap, g							
	Su miktarı, g							
	Kap, g							
	Kuru zemin g							
	Su içeriği %							



Likit limit, %	
DENEYİ YAPAN	KONTROL EDEN

06100 Yücetepe ANKARA

Tel: +90 312 399 2792

Faks: +90 312 399 2795

E-posta: takk@dsi.gov.tr

08.FR.??

REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Konsolidasyon ağırlıkları kontrol kartı



DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı
Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü



KONSOLIDASYON AĞIRLIKLARI KONTROL KARTI

Alet no	
---------	--

	Tarih	Sıcaklık	Ad Soyad	σ (kg/cm ²) P (g)	σ (kg/cm ²) P (g)	σ (kg/cm ²) P (g)	σ (kg/cm ²) P (g)	σ (kg/cm ²) P (g)	σ (kg/cm ²) P (g)	σ (kg/cm ²) P (g)	σ (kg/cm ²) P (g)
		°C									
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Likit limit (Casagrande) cihazı kontrol kartı



LİKİT LİMİT (CASAGRANDE) CİHAZI KONTROL KARTI

Cihaz adı	
-----------	--

[illegible]

NOTLAR

1. Ölçüler mm dir
2. A değeri kesik küre parçasından kürenin yarıçapının bulunduğu $A = \left[\frac{(d^2/4)}{h} + h \right] / 2$ formülü ile hesaplanmıştır.
08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?



Cihaz adı	
-----------	--

Not:

08.FR.?? REV.NO/TARİHİ:00/01.01.200?

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
Destek Hizmetleri Dairesi Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube Müdürlüğü'nde basılmıştır.

ISBN: 978-605-7599-89-6

PARA İLE SATILMAZ