LAZER KIRINIM YÖNTEMİ İLE ZEMİNLERİN TANE BÜYÜKLÜĞÜ DAĞILIMININ BELİRLENMESİ VE HİDROMETRE YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Mustafa ÖZER

DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2006
ANKARA

Mustafa ÖZER tarafından hazırlanan LAZER KIRINIM YÖNTEMİ İLE ZEMİNLERİN TANE BÜYÜKLÜĞÜ DAĞILIMININ BELİRLENMESİ VE HİDROMETRE YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet ORHAN
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Asuman G. TÜRKMENOĞLU

Üye : Prof. Dr. Reşat ULUSAY

Üye : Prof. Dr. Nail ÜNSAL

Üye : Doç. Dr. Atilla DORUM

Üye : Doç. Dr. Mehmet ORHAN (Danışman)

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

LAZER KIRINIM YÖNTEMİ İLE ZEMİNLERİN TANE BÜYÜKLÜĞÜ DAĞILIMININ BELİRLENMESİ VE HİDROMETRE YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Mustafa ÖZER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2006

ÖZET

Bu çalışmada, lazer kırınım ve hidrometre yöntemleri ile 200 no.lu elekten geçen zeminlerin tane büyüklüğü belirlenmiş ve bu iki yöntem karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ana konusunu oluşturan lazer kırınım yöntemiyle ilgili mevcut tek standart ISO 13320 (1999)'de sadece genel ilke ve kurallar bulunmaktadır. Söz konusu standartta zemin örneklerinin ölçümüne ilişkin her hangi bir bilgi veya öneri verilmediğinden, bu çalışmanın deneysel bulguları iki aşamada ele alınmıştır. Birinci aşamada, lazer kırınım analizlerinde uygulanacak genel bir yöntem ortaya konulmuş, ikinci aşamada ise 72 adet doğal zemin örneği üzerinde her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrileri ve kil yüzdeleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hidrometre yönteminin kil yüzdesini bazı örneklerde %29'a kadar daha yüksek belirlediği saptanmıştır. Bu farkın tane şekli ve mineralojisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bazı örnekler üzerinde yapılan XRD ve SEM analizleri bu düşünceyi desteklemektedir.

Bilim Kodu : **714.1.050**
Anahtar Kelimeler : **Lazer kırınım yöntemi, hidrometre deneyi, kil yüzdesi**
Sayfa Adedi : **183**
Tez Yöneticisi : **Doç. Dr. Mehmet ORHAN**

DETERMINATION OF SOIL PARTICLE SIZE DISTRUBUTION USING LASER DIFFRACTION METHOD AND ITS COMPARISON WITH HYDROMETER METHOD

(Phd. Thesis)

Mustafa ÖZER

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

January 2006

ABSTRACT

In this study, the particle size distribution of soils passing from No.200 sieve using hydrometer and laser diffraction methods, and the results obtained from both methods were also compared. The only standard related to the laser diffraction method, which is the main subject of this study, is ISO 13320 (1999). In this standard, only the general principles and rules are given. Because the ISO 13320 (1999) standard does not include any information and suggestion for the measurement of particle size distribution of soils, the experimental results of this study was assessed in two stages. In the first stage of the study, a general method for the application of laser diffraction method to soil samples is suggested. In the second stage, particle size distribution curves and clay percentage determined by the two methods were compared. Based on the test results, it was determined that hydrometer overestimates the clay percentage up to 30% in some samples. It was considered that this difference is probably due to the grain shape and mineralogy. The XRD and SEM analyses performed on some of the samples support this idea.

Science Code : 714.1.050
Key Words : Laser diffraction method, hydrometer test, clay percentage
Page Number: 183
Adviser : Ass. Prof. Dr. Mehmet ORHAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Mehmet ORHAN'a, tez çalışması boyunca tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. Mustafa Yılmaz KILINÇ'a ve Doç. Dr. Atilla DORUM'a, manevi desteğini esirgemeyen hocam Prof. Dr. M. Haluk ÇELİK'e, kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle tezin bilimsel temellere oturtulmasında önemli katkılar sağlayan Hacettepe Ünv. Jeoloji Müh. Bölümünden Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a ve ODTÜ Jeoloji Müh. Bölümünden Prof. Dr. Asuman G. TÜRKMENOĞLU'na, manevi desteğini her zaman yanımda hissetiğim çok değerli arkadaşım Arş. Gör. Jeoloji Yük. Müh. Nihat S. IŞIK'a içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışmanın yürütülebilmesi için maddi destek aldığım Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğüne (Proje no. 07/2004-22) ve çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET …… iii

ABSTRACT …….. ….iv

TEŞEKKÜR …….. …..v

İÇİNDEKİLER …….. ….vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ …….. ….ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ……...…..x

RESİMLERİN LİSTESİ ……...xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR ……... ...xiv

1. GİRİŞ ……..... …..1

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI ….……..... …..5

2.1. Lazer Kırınım Yönteminin Temel İlkeleri …….…… …..5

2.2. Stokes Yasası ve Hidrometre Deneyinin Genel İlkeleri …… …10

2.2.1. Tane çapının belirlenmesi ……...……. …10

2.2.2. Tane yüzdelerinin belirlenmesi …….……..……....…16

2.2.3. Stokes yasasının dayandığı varsayımlar …….……..……... …21

2.3. Lazer Kırınım ve Hidrometre/Pipet Yöntemlerinin Karşılaştırılması Üzerine Yapılmış Başlıca Çalışmalar …….…. …28

2.4. Lazer Kırınım Yöntemi Üzerine Yapılmış Başlıca Çalışmalar …… …39

2.4.1. Örnek alınması veya azaltılması ……. …39

2.4.2. Analizlerde kullanılan suyun niteliği …….. …40

2.4.3. Optik kuram …… …41

2.4.4. Optik parametreler (saptırma indisi ve emme katsayısı) …… …43

Sayfa

2.4.5. Zemin örneklerinin ayrıştırılması ……46

2.4.6. Tane şeklinin analiz sonuçları üzerindeki etkisi …….....49

3. MALZEME VE YÖNTEM ……... …53

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Alet ve Cihazlar ……..…53

3.2. Deneyde Kullanılan Örnekler …… …56

3.3. Deneysel Çalışmada Uygulanan Yöntem ……..... …58

4. LAZER KIRINIM YÖNTEMİYLE İLGİLİ DENEYSEL BULGULAR ……. …61

4.1. Örnek Alma ve/veya Azaltma Yöntemi ……61

4.2. Lazer Kırınım Cihazıyla Yapılan Ölçümlerin Tekrarlanabilirliği …… …63

4.3. Analizlerde Kullanılan Suyun Niteliği ……. …63

4.4. Optik Kuram (Fraunhofer Yaklaşımı ve Mie Kuramı) ……. …64

4.5. Saptırma İndisi ve Emme Katsayısı …….. …66

4.5.1. Saptırma indisi ……66

4.5.2. Emme katsayısı …….. …70

4.6. Zemin Örneklerinin Ayrıştırılması ……... …72

4.6.1. Ultrasonik enerjiyle ayrıştırma …….. …73

4.6.2. Doğrudan ilave etme yöntemiyle ayrıştırma ……..... …73

4.6.3. Önceden bekletme yöntemiyle ayrıştırma ……. …75

4.6.4. Ultrasonik enerji uygulama süresi ve topaklanma sorunu …… …79

5. TANE BÜYÜKLÜĞÜ DAĞILIM EĞRİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI . …83

5.1. Tane Şeklinin Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi ……... …83

5.2. Tane Mineralojisinin Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi ……. …87

5.3. Lazer Kırınım ve Hidrometre Yöntemleriyle Belirlenen Tane Büyüklüğü Dağılım Eğrileri Arasındaki İlişkinin Açıklanması ……... …89

Sayfa

5.3.1. Birinci grup örnekler ……89

5.3.2. İkinci grup örnekler ……. …91

5.3.3. Üçüncü grup örnekler …….. …93

5.3.4. Dördüncü grup örnekler ……... …94

6. KİL YÜZDELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI ……. …98

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER …….....107

KAYNAKLAR …….. .111
EKLER …….. .116
EK – 1. Her İki Yöntemle Belirlenen Tane Büyüklüğü Dağılım Eğrilerinin Büyük Bir Bölümünün Üst Üste Çakışık Olduğu Örnekler ……..116
EK – 2. Her İki Yöntemle Belirlenen Tane Büyüklüğü Dağılım Eğrilerinin Küçük Bir Bölümünün Üst Üste Çakışık Olduğu Örnekler ……. ..122
EK – 3. Hidrometre Yönteminin Bütün Tane Çaplarını Daha Yüksek Belirlediği Örnekler ……..132
EK – 4. Her İki Yöntemle Belirlenen Tane Büyüklüğü Dağılım Eğrilerinin Değişik Tane Çaplarında Kesiştiği Örnekler ……... ..135
EK – 5. Bazı Örneklerin SEM Görünümleri ……. ..153
EK – 6. Bazı Örneklerin XRD Analiz Sonuçları …….. ..163
EK – 7. Lazer Kırınım Yöntemiyle Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Belirlenmesi ……. ..178
ÖZGEÇMİŞ ……... ..183

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Şekil 2.5'de görülen tanelerin hesaplanan hızları ……... …14

Çizelge 2.2. Şekil 2.5'de görülen tanelerin belirli zamanlardaki teorik çökme mesafeleri …….……..…15

Çizelge 2.3. Bazı zemin tiplerinin ve minerallerinin özgül ağırlıkları ……27

Çizelge 2.4. Lazer kırınım ve pipet yöntemleriyle belirlenen kil yüzdeleri arasında kurulan ilişkiler ……38

Çizelge 2.5. Bazı zemin minerallerinin saptırma indisleri ……..…44

Çizelge 3.1. Lazer kırınım cihazın teknik özellikleri ……..…54

Çizelge 3.2. Lazer kırınım cihazın ölçüm mercekleri ……. …54

Çizelge 3.3. MSX 17 örnek ünitesinin teknik özellikleri ……...…… …55

Çizelge 3.4. Deney örneklerinin alındıkları yerler ve tanımları ……..…56

Çizelge 4.1. Optik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan örneklerin indeks özellikleri ve mineralojik bileşimleri …….. …66

Çizelge 4.2. Saptırma indisi, n_r = 148 ve 1,74 için hesaplanan kil yüzdeleri ve aralarındaki farklar ….. …68

Çizelge 4.3. Emme katsayısının 0,01, 0,1 ve 0,2 değerleri için hesaplanan kil yüzdeleri ……...…71

Çizelge 4.4. Ayrıştırma yönteminin belirlenmesinde kullanılan Örneklerin indeks özellikleri ……..…77

Çizelge 5.1. Çeşitli şekil oranlarına göre hesaplanan tane çapları …….. …86

Çizelge 5.2. Çeşitli özgül ağırlık değerleri için hesaplanan tane büyüklüğü ve geçen yüzde değerleri ……... …88

Çizelge 6.1. Örneklerin lazer kırınım ve hidrometre deneyleriyle belirlenen kil yüzdeleri ve diğer indeks özellikleri ……. …98

Çizelge 6.2. Kil yüzdesinin tahmin edilmesi için yapılan çoklu regresyon analizlerinin sonuçları …….. ..104

Çizelge 6.3. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri arasında yapılan çoklu regresyon analizlerinin sonuçları ……..106

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Lazer kırınım cihazının genel kurulumu ……..….6

Şekil 2.2. Tanelerin büyüklüğü ile ışınların kırılma açıları arasındaki ters orantı ilişkisi …… …..7

Şekil 2.3 Küre şeklindeki bir taneye çarpan ışınların dağılımı ……... …..9

Şekil 2.4. Sıvı içerisinde çöken küreye etkiyen kuvvetler ……..……. …11

Şekil 2.5. Sedimantasyon işleminin şematik gösterimi ……..…..……14

Şekil 2.6. Hidrometrenin süspansiyon içerisindeki şematik görünümü ve ilgili kavramlar ……..…..…17

Şekil 2.7. Elipsoidin şematik görünümü …….. …23

Şekil 2.8. Düzensiz şekle sahip bir tane, çökmeye karşı en fazla direnç gösterdiğinde çapı 236 μm olan küre ile, en az direnç gösterdiğinde ise çapı 277 μm olan küre ile aynı hızda çöker. Böyle bir tane laminar akım şartlarında rastgele konumda çöker ve tane çapı ortalama, yaklaşık 236+277 = 257 μm olarak ölçülür……. …26

Şekil 2.9. Lazer kırınım ve pipet yöntemleriyle belirlenen kil yüzdeleri arasındaki ilişki ……... …28

Şekil 2.10. Fraunhofer ve Mie kuramları kullanarak belirlenmiş lazer kırınım ve pipet kil yüzdelerinin karşılaştırılması ……. …29

Şekil 2.11. Lazer kırınım ve pipet yöntemleriyle belirlenen kil (<2μm) yüzdeleri arasındaki ilişki……...…30

Şekil 2.12. Organik maddelerden ve organik madde+demirden arındırılmış örnekler üzerinde elde edilmiş lazer-kil ve pipet-kil yüzdeleri arasındaki ilişki …… …32

Şekil 2.13. Lazer kırınım ve elek analizi-hidrometre yöntemleriyle belirlenmiş tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin karşılaştırılması ……... …33

Şekil 2.14. Lazer kırınım ve pipet yöntemleriyle belirlenen kil yüzdelerinin karşılaştırılması ……... …35

Şekil 2.15. Van der Merwe tarafından şişme potansiyelinin belirlenmesi için önerilen abak ……. …37

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.16. Saptırma indisinin kil yüzdesi üzerindeki etkisi ……..... …45

Şekil 2.17. Topaklanmanın tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisi ……48

Şekil 2.18. Düzgün küre şeklinde olmayan bir taneyi ölçmek için uygulanan eşdeğer küreler ……..……...…. …49

Şekil 4.1. Aynı örekten alınmış 15 adet alt-örnek üzerinde yapılan analizlerin sonuçları ……... …62

Şekil 4.2. Farklı tarihlerde yapılan lazer kırınım analizlerinin sonuçları ……..…63

Şekil 4.3 Su niteliğinin analiz sonuçları üzerindeki etkisi ……..... …64

Şekil 4.4. Optik kuramın analiz sonuçları üzerindeki etkisi …… …65

Şekil 4.5. Farklı saptırma indisleriyle hesaplanan tane büyüklüğü dağılımları ... …67

Şekil 4.6. Kil yüzdesinin saptırma indisinin değişimine olan duyarlılığı …… …68

Şekil 4.7. Emme katsayısının tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisi …….... …70

Şekil 4.8. Kil yüzdesinin emme katsayısının değişimine olan duyarlılığı …….... …70

Şekil 4.9. Zemin örneklerinin ayrıştırılmasında kullanılan ultrasonik enerjinin etkisi ……73

Şekil 4.10. Doğrudan ilave etme yönteminde Calgon çözeltisi miktarının analiz sonuçları üzerindeki etkisi ……... …74

Şekil 4.11. Önceden bekletme yönteminde Calgon çözeltisi miktarının analiz sonuçları üzerindeki etkisi ……... …75

Şekil 4.12. Ayrıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması …….. …76

Şekil 4.13. Doğrudan ilave ve önceden bekletme yöntemleriyle elde edilen kil yüzdelerinin karşılaştırılması …….. …77

Şekil 4.14. Tane büyüklüğü dağılımlarının zamanla değişimi ve yeniden topaklanmanın belirlenmesi ……. …79

Şekil 4.15. Zamanla birlikte kil ve iri silt yüzdelerinde meydana gelen değişim .. …80

Şekil 4.16. Ayrışma süresinin ve topaklanmanın ön-izleme penceresi gözlenerek belirlenmesi ……..…82

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.1. Çeşitli şekil oranlarına göre disk varsayımıyla hesaplanan tane büyüklüğü dağılımları ……... …86

Şekil 5.2. Çeşitli özgül ağırlık değerleriyle hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı eğrileri ……. …88

Şekil 5.3. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin her ikisinin de hemen hemen aynı sonucu verdiği bir örnek ……... …90

Şekil 5.4. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin belirli bir tane çapına kadar aynı sonucu verdiğini gösteren bir örnek ……... …91

Şekil 5.5. Hidrometre yönteminin bütün taneleri lazer kırınım yöntemine göre daha küçük ölçtüğünü gösteren bir örnek …… …93

Şekil 5.6. Tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin belirli bir tane çapında kesiştiklerini gösteren bir örnek ……..…95

Şekil 5.7. Tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin belirli bir tane çapında kesiştiklerini gösteren bir başka örnek ……... …96

Şekil 6.1. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleri ile belirlenen kil yüzdeleri arasındaki doğrusal regresyon analizi ……...101

Şekil 6.2. Aktivitesi 0,75'den büyük ve eşit olan örnekler arasında yapılan regresyon analizi ……...102

Şekil 6.3. Aktivitesi 0,75'den büyük olan örnekler arasında yapılan regresyon analizi ……...102

Şekil 6.4. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri arasındaki regresyon analizi ……...105

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Bu çalışmada kullanılan Malvern Master SizerX-Long Bed Lazer kırınım cihazı ……..…53

Resim 3.2. Bu çalışmada kullanılan elektrikli örnek bölme cihazı ……....…55

Resim 3.3. Elek analizi ve lazer kırınım – hidrometre deneyi yapılacak malzemelerin konulduğu kaplar ……... …59

Resim 4.1. Lazer kırınım analizi için alt-örnek alınması ……....…61

Resim 5.1. Şekil oranının SEM fotoğrafı üzerinden yaklaşık olarak belirlenmesi …….....…84

Resim 5.2. Örnek-1'in çeşitli ölçeklerde çekilmiş SEM fotoğrafları ……. …90

Resim 5.3. Örnek-23'ün çeşitli ölçeklerde çekilmiş SEM fotoğrafı …….. …92

Resim 5.4. Örnek-34'ün çeşitli ölçeklerde çekilmiş SEM fotoğrafı ……...…94

Resim 5.5. Örnek-53'ün iki farklı ölçekte çekilmiş SEM fotoğrafı ……95

Resim 5.6. Örnek-60'ın iki farklı ölçekte çekilmiş SEM fotoğrafı …… …96

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklama**
λ	Lazer ışınlarının dalga boyu (nm veya μm)
d	Tane çapı (mm veya μm)
η	Suyun dinamik viskozitesi, g/cm.sn (poise)
U	Kürenin hızı, cm/sn
D	Kürenin çapı, cm
$\mathbf{m_w}$	Suyun kütlesi, g
$\mathbf{m_s}$	Kürenin kütlesi, g
ρ_w	Suyun yoğunluğu, g/cm^3
ρ_s	Kürenin yoğunluğu, g/cm^3
g	Yerçekimi ivmesi; 980,7 cm/sn^2
L	Etkin derinlik, cm
T	Geçen zaman, dk.
$\mathbf{G_s}$	Zemin tanelerinin özgül ağırlığı
n_r	Tanelerin refraktif indisi
n_i	Tanelerin absorbsiyon katsayısı

Kısaltmalar	**Açıklama**
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
LL	Likit limit
PI	Plastisite indisi
A	Aktivite

1. GİRİŞ

Zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi bazı zemin sorunlarının çözümünde önemli aşamalardan birisini oluşturmaktadır. Bunlardan birkaçını; zemin sınıflandırması, zemin enjeksiyonu, yol veya toprak dolgu baraj yapımında dolgu malzemesi seçimi, mekanik stabilizasyon yoluyla zemin iyileştirmesi, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi vb. şeklinde sıralamak mümkündür. Örneğin; bir toprak dolgu baraj yapımında baraj gövdesinin farklı bölgelerinde belirli tane büyüklüğü karakteristiklerine sahip malzemelerin kullanılması gerektiği bilinmektedir (1). En uygun enjeksiyon işlemi veya yönteminin belirlenmesinde yine zeminin tane büyüklüğü karakteristikleri önemli ölçütlerden birisini oluşturmaktadır (2). İnce tane yüzdesi (<0,075 mm) zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (3). Çin ölçütüne göre sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde ise, 0,005 mm'den küçük tanelerin yüzdesi önem taşımaktadır (4). Bunların yanı sıra, zeminin porozitesini, permeabilitesini, konsolidasyonunu, makaslama ve hacim değişimi davranışlarını etkilediğinden (5), tane büyüklüğü dağılımının zeminlerin birçok mekanik ve mühendislik özellikleri açısından önemli olduğunu söylemek mümkündür. Zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi için uygulanan standart yöntemler, elek analizi ve sedimantasyon (hidrometre ve pipet) yöntemleridir (6,7). ASTM D 422-1998'e (6) göre taneleri 0,075 mm'den büyük olan zeminlerin tane büyüklüğü dağılımı elek analizi ile belirlenirken, 0,075 mm'den küçük zeminlerin ise hidrometre deneyi ile belirlenmektedir. Stokes yasasına dayanan hidrometre deneyinde, zemin tanesi ile aynı özgül ağırlığa sahip olup su içerisinde tane ile aynı hızda çöken eşdeğer kürenin çapı, tane çapı olarak belirlenmektedir. Hidrometre deneyi, Stokes yasasından kaynaklanan bazı varsayımlara dayanmaktadır. Bunlar; (i) taneler düzgün küre şeklindedir, (ii) tanelerin hepsi aynı özgül ağırlığa sahiptir (özgül ağırlıkları eşittir), (iii) çökme esnasında taneler birbirleri ile temas halinde değildir ve birbirlerinden etkilenmezler, (iv) tanelerin su içerisindeki hareketleri laminar akım koşullarına uygun olup, türbülans yoktur (1,2). Zemin tanelerinin ve özellikle kil boyutundaki tanelerin genellikle levhamsı veya yapraksı yapıya sahip olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, yukarıdaki varsayımlardan deney sonuçları üzerinde en çok etkiye sahip

olan “küre” varsayımıdır. Lerman vd., 1974 (8) ve Lu vd., 2000 (9) küre varsayımının deney sonuçları üzerindeki etkisini inceleyen kuramsal ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Ancak, her ne kadar doğruluğu tartışılsa da, hidrometre deneyi ASTM D 422, 1998 (6) ve BS 1377:Part 2, 1990’da (7) halen standart yöntem olarak yer almaktadır. Hidrometre deneyinin; uzun zaman alması (en az 24 saat), nispeten fazla miktarda örnek gerektirmesi (yaklaşık 30 g) ve uygulayıcı hatalarına açık olması gibi dezavantajlarının yanı sıra, ucuz ve kolay uygulanabilir olması gibi avantajları da bulunmaktadır. Son yıllarda hidrometre deneyine alternatif bazı yeni ölçüm teknikleri geliştirilmiş olup, bunlardan bazıları, elektrodirenç tane sayımı (coulter counter), fotometrik teknikler (hidrophotometer), X-ışınları azalımı ve lazer kırınım (Microtrac, Malvern Laser Sizer, Coulter LS) yöntemleridir (10). Bu yöntemlerin arasında en yaygın olarak kullanılanı lazer kırınım yöntemidir (5). 1970’li yılların sonlarında uygulanmaya başlanan lazer kırınım yöntemi günümüzde ileri teknolojiye ulaşmış olup, seramik, kum, kil, çimento, aşındırma, gıda, ilaç ve kozmetik gibi çeşitli mühendislik ve endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (11). Taneler ile lazer ışınlarının etkileşimine dayanan bu yöntemde, su içerisinde hareket halinde bulunan tanelerin üzerine lazer ışınları gönderilmekte ve tanelere çarparak kırılan ışınların kırılma açılarından tane büyüklüğü, bu ışınların yoğunluğundan ise tane yüzdeleri belirlenmektedir. 1999 yılında lazer kırınım yöntemi ile ilgili iki bölümden oluşan ISO 13320 (12) “Particle size analysis – Laser diffraction methods” yürürlüğe girmiş olup, birinci bölümde yöntem ile ilgili genel ilkeler (Part 1: General principles), ikinci bölümde ise yöntemin teorisi ve matematik dönüşümler ile ilgili bilgiler (Part 2: Validation of inversion procedures) yer almaktadır. Lazer kırınım yöntemi geniş bir kullanım alanına sahip olduğundan ISO 13320-1’de (12) her mühendislik veya endüstri alanı ile ilgili malzemelerin, örneğin zemin numunelerinin ölçümüne ilişkin detaylı bilgiler bulunmamaktadır. Buna rağmen, 1980’li yıllardan bu yana lazer kırınım yöntemi zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde kullanılmakta ve bu konu üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan başlıcalarını; McCave vd., 1986 (13), Loizeau vd., 1994 (14), Konert ve Vandenberghe, 1997 (15), Muggler vd., 1997 (16), Vitton ve Sadler, 1997 (17), Beuselinck vd., 1998 (10), Eshel vd., 2004 (18), Wen vd., 2002 (5), Buurman vd., 1997 (19), Chappel, 1998 (20) şeklinde sıralamak mümkündür. Bu

çalışmalarda, lazer kırınım yöntemi ile zemin örneklerinin ölçümüne ilişkin benzer uygulamalar olduğu kadar, birbirinden farklı uygulamalara da rastlanmıştır. Bu farklılıklar kısaca, kullanılan lazer kırınım cihazlarının marka ve modeli, dolayısıyla optik tasarımı, analizlerde uygulanan optik kuram ve optik parametreler, örnek alınması ve/veya azaltılması, örnek hazırlanması ve ayrıştırılması, ultrasonik enerji uygulanması gibi lazer kırınım yöntemine ilişkin deneysel değişkenlerdir. Lazer kırınım yöntemi ile zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi için henüz standart bir yöntem olmadığından, neredeyse her araştırmacı kendi çalışmasında farklı bir yol izlemiştir. Temelde lazer kırınım ve hidrometre yöntemleri ile belirlenen tane büyüklüğü dağılımı eğrilerinin karşılaştırılmasına dayanan bu çalışmada, öncelikle lazer kırınım deney sonuçları üzerinde etkili olduğu düşünülen ve çeşitli araştırmacılar tarafından farklı uygulamalara başvurulan bazı konular ele alınıp, deneysel bulgulara dayanarak bu çalışmada uygulanacak genel bir yöntem ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda elde edilen bulguların, lazer kırınım yöntemi ile zeminlerin tane büyüklüğü dağılımını belirlemek isteyen diğer uygulamacılara da referans teşkil edecek nitelikte olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmalar, tezin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Zemin mekaniği uygulamalarında giderek yaygınlaşan lazer kırınım yönteminin hidrometre ve pipet gibi standart yöntemlere göre bir çok avantajı bulunmaktadır. Bunlar; (i) Lazer kırınım yöntemi son derece hızlı olup, bu yöntem ile bir örneğin analizi yaklaşık 10-15 dakika sürmektedir. Bu süreye sonuçların hesaplanması ve yazıcıdan çıktı alınması da dahildir. Hidrometre deneyinin, örnek hazırlanması ile birlikte 2 gün sürdüğü hatırlanacak olursa, bunun önemli bir avantaj olduğu görülecektir, (ii) Lazer kırınım analizi için örnek hazırlanması son derece kolaydır. Bunun için lazer kırınım cihazı ile bağlantılı çalışan örnek (hazırlama) ünitesi bulunmaktadır. Örneklerin ayrıştırılmasında, örnek ünitesinin ultrasonik enerji özelliği son derece etkili ve başarılı olduğundan, hidrometre deneyinde olduğu gibi, örnekleri deneyden önce bir gece boyu (yaklaşık 16 saat) ayrıştırma maddesi içerisinde bekletmek çoğunlukla gerekmemektedir. Uygun miktardaki ayrıştırma maddesinin (örneğin Calgon çözeltisi) analiz sırasında doğrudan örnek haznesine ilave edilmesi yeterli olmaktadır, (iii) Lazer kırınım yönteminde 0,1 – 0,5 g gibi çok

az bir örnek kullanılmaktadır. Hidrometre deneyinde 25 – 30 g kadar örnek gerektiği düşünülürse, örneğin yetersiz olduğu bazı hallerde bunu bir avantaj olarak görmek mümkündür, (iv) Lazer kırınım yöntemi hem hızlı, hem de çok az örnek gerektirdiğinden, istenildiği taktirde aynı örneğin analizini birkaç dakika içinde tekrar etmek mümkündür, (v) Lazer kırınım cihazı bilgisayar ile kontrol edilen elektronik bir cihaz olduğundan, deney sonuçlarını bilgisayar ortamında saklamak ve depolamak mümkündür. Bütün bu avantajlarının yanı sıra, lazer kırınım yönteminin tek dezavantajı cihazının son derece pahalı olmasıdır.

Tüm bu avantajlarından ötürü zemin mekaniği konusunda çalışanların ilgisini çeken lazer kırınım yöntemi ile ilgili en çok merak edilen ve üzerinde çalışılan konu, sonuçlarının hidrometre ve pipet gibi standart yöntemlerin sonuçları ile uyumlu olup olmadığı ve özellikle her iki yöntemle belirlenen kil yüzdeleri arasında kabul görebilir bir ilişkinin geliştirilip geliştirilemeyeceğidir. Bu konu, bu çalışmanın da temelini oluşturmaktadır. Malvern Master SizerX-Long Bed lazer kırınım cihazının sonuçları ile standart hidrometre deney sonuçlarının karşılaştırıldığı bu çalışmada, Türkiye'nin ve Ankara'nın farklı bölgelerinden alınmış 72 adet doğal zemin örneği kullanılmıştır. Bu örnekler, 110 ^{0}C etüvde kurutulduktan sonra 200 no.lu (0,075 mm) elekten kuru eleme yöntemi ile iki kısma ayrılmış ve 0,075 mm'den büyük olan kısma elek analizi, 0,075 mm'den küçük olan kısma ise hem hidrometre deneyi, hem de lazer kırınım analizi uygulanmıştır. Tane büyüklüğü dağılım analizlerinin yanı sıra, bütün örneklerin likit limit ve plastik limitleri de belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, hidrometre deneyi kil (< 2 μm) yüzdesini lazer kırınım analizine göre genellikle daha yüksek belirlemiştir. Bunun nedenleri tane mineralojisi ve tane morfolojisi açısından ele alınarak tartışılmıştır. Bu bağlamda, bazı örneklerin ayrıntılı XRD analizleri yaptırılmış ve SEM görüntüleri alınmıştır. Lazer kırınım ve hidrometre deneyleri ile belirlenen 2 μm ve 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri arasındaki ilişkiyi yansıtan bir eşitliğin geliştirilmesi için ikili ve çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Çoklu regresyon analizlerinde likit limit, plastisite indeksi, silt yüzdesi ve aktivite değerleri kullanılmıştır.

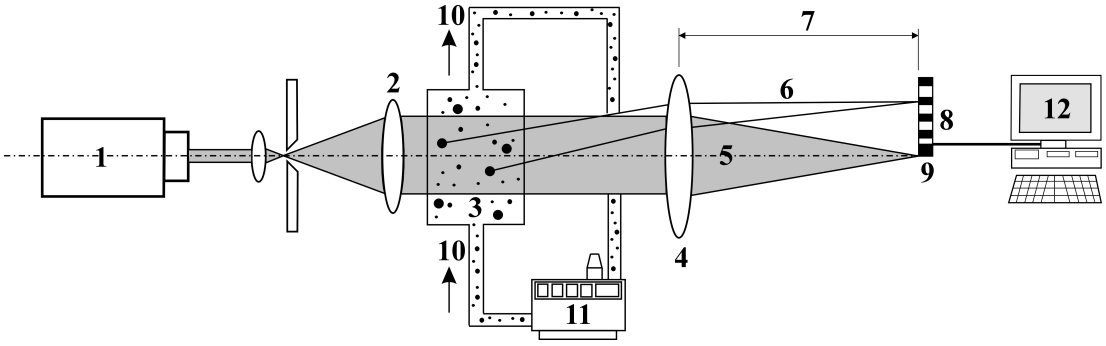
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölüm, dört alt bölümden oluşmaktadır. Birinci alt bölümde, lazer kırınım yönteminin temel ilkeleri, ikinci alt bölümde hidrometre deneyinin temel ilkeleri, üçüncü alt bölümde lazer kırınım ve hidrometre/pipet yöntemlerinin karşılaştırılması üzerine yapılmış başlıca çalışmalar, dördüncü alt bölümde ise lazer kırınım yöntemi üzerine yapılmış başlıca çalışmalar ele alınmıştır.

2.1. Lazer Kırınım Yönteminin Temel İlkeleri

Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde lazer kırınım yönteminin kullanılması 1970'li yıllarda başlamış olup, bu alandaki ilk ticari cihazlar Fransa'da CILAS, İngiltere'de MALVERN ve Amerika'da Leeds and Northrup (Micratrac) tarafından geliştirilmiştir (21). Sonraki yıllarda bunları Coulter, Fritsch, Horiba, Sympatec, Shimadzu ve Seishin gibi üreticiler takip etmiştir (11). Çeşitli firmaların ürettiği cihazlar, kullandığı lazer ışınlarının dalga boyu (λ), dedektör dizilimi ve sayısı, merceklerinin odak uzaklığı gibi teknik donanım ve yazılım açısından birbirinden farklılık gösterseler de, bu cihazlar genellikle bir lazer ünitesi, örnek hazırlama ünitesi ve bilgisayar olmak üzere üç ana parçadan meydana gelmektedir. Lazer ünitesinde, tek-renkli, yoğun ve paralel ışınlar üretmek için bir lazer kaynağı (genellikle He-Ne lazeri), ışın genişletici, ölçüm hücresi, Fouruier merceği ve dedektör bulunmaktadır (Şekil 2.1). Bu elemanların görevleri aşağıda belirtilmiştir. Işın genişletici; lazer kaynağından yaklaşık 1 mm çapında çıkan ışınların çapını 18 mm'ye yükseltmektedir. 1 mm çapındaki ışınlar doğrudan analizde kullanılacak olursa, analizde bulunan tanelerin çok az bir kısmına çarpacağından, ışınlarının daha fazla tane ile çarpışmasını ve elde edilen sonucun örneği daha iyi temsil etmesini sağlamak için ışın çapını genişletilmektedir (22). Ölçüm hücresi; su ile karışmış haldeki örneğin (süspansiyonun) lazer ışınlarının önünden geçmesini sağlamaktadır. Bunun için, lazer ışınlarının tam önüne yerleştirilmiş olup, ön ve arka yüzünde dairesel kesitli saydam ve temiz cam pencereler bulunmaktadır. Ayrıca, birisi giriş, diğeri çıkış olmak üzere iki hortum aracılığıyla örnek haznesine bağlıdır. Örnek haznesinde su ile karışmış haldeki örnek (süspansiyon), ölçüm hücresinin içerisine

pompalanır. Böylece örneğin lazer ışınlarının önünden geçmesi sağlanır. Fourier merceği; ölçüm hücresinin hemen arkasında yer alır ve tanelere çarpıp, belli bir açıyla kırılan ışınları yine belli bir açıyla dedektörün üzerine odaklar. Dedektör; mercekten gelen ışınları toplar. Dedektöre ulaşan ışınlar analog-dijital dönüştürücüde işlendikten sonra bilgisayara aktarılır. Ayrıca, dedektörün tam merkezinde hiçbir taneye çarpmadan doğruca gelen ışınları toplamak ve değerlendirmek için merkezi dedektör yer almaktadır. Bu elemanlar ve bir lazer kırınım cihazının genel kurulumu şematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



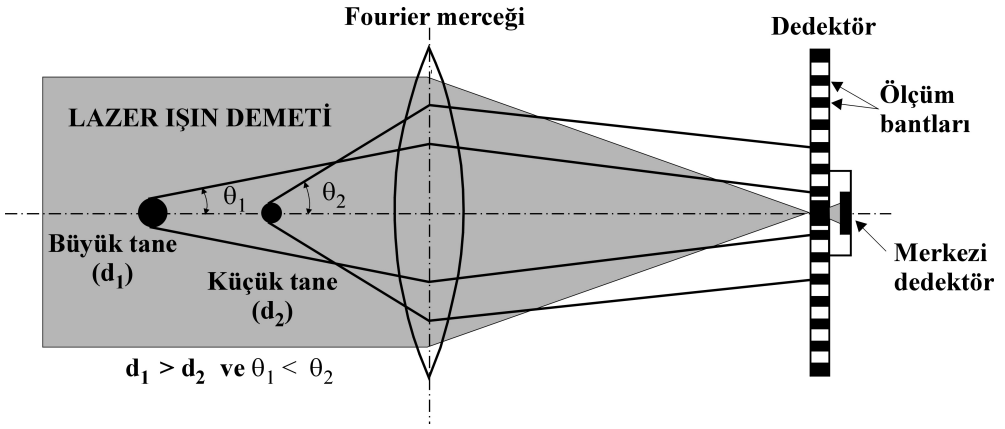
Şekil 2.1. Lazer kırınım cihazının genel kurulumu (1. Lazer kaynağı, 2. Işın genişletici, 3. Ölçüm hücresi, 4. Fourier merceği, 5. Herhangi bir taneye çarpmayan ışın demeti, 6. Aynı büyüklükteki tanelere çarparak kırılan ışınlar, 7. Merceğin odak uzaklığı, 8. Çok elemanlı dedektör, 9. Merkezi dedektör, 10. Süspansiyonun akış yönü, 11. Örnek ünitesi, 12. Bilgisayar) (ISO 13320'den (12) yararlanılarak oluşturulmuştur)

Örnekleri deneye hazır hale getirmek için kullanılan örnek ünitesinin, üretici firmalara göre değişiklik göstermekle birlikte, genellikle 1 litre hacminde haznesi ve bu haznenin içerisinde hızı ayarlanabilen mekanik karıştırıcı, pompa ve ultrasonik enerji uygulama mekanizması bulunmaktadır. Bu elemanlardan, pompa, haznenin içerisinde bulunan süspansiyonu ölçüm hücresinin içerisine pompalayarak sürekli sirkülasyon yapmasını sağlamaktadır. Karıştırıcı, iri tanelerin dibe çökmesini engelleyerek süspansiyonun analiz süresince homojen kalmasını sağlarken, ultrasonik enerji ise, süspansiyonun içerisinde yüksek frekanslı ses titreşimleri oluşturarak hem mekanik olarak zemin topaklarının dağılmasını, hem de taneleri titreştirerek akış istikametine göre belli bir konum almalarını önlemektedir (22).

Cihaza bağlı bulunan bilgisayar ise, hem cihazı kontrol etmek hem de dedektörden gelen sinyalleri değerlendirip tane büyüklüğü dağılımını hesaplamak için kullanılmaktadır.

Lazer kırınım yönteminde, su içerisinde hareket halinde bulunan tanelerin üzerine lazer ışınları gönderilmekte ve tanelere çarparak belli bir açıyla kırılan ışınlar bir dedektör aracılığıyla toplanmaktadır. Dedektörün üzerine düşen ışınlar bilgisayara bağlı analog-dijital dönüştürücü vasıtasıyla sayısallaştırılarak, ışınların kırılma açısından tane büyüklüğü, yoğunluğundan ise hacimce tane yüzdeleri ilgili bilgisayar yazılımı tarafından hesaplanmaktadır (23). Tanelere çarparak belirli açılarla kırılan ışınlar, öncelikle Fourier merceğinin üzerine düşmektedir. (Bkz. Şekil 2.1). Fourier merceğinin en önemli özelliği, tanelerden aynı açı ile kırılıp gelen ışınları dedektörün aynı noktası üzerine odaklamasıdır (14). Fourier merceğinin bu özelliği sayesinde, taneler ışın demetinin neresinde olursa olsun kararlı bir kırılma deseni meydana getirmektedir (13). Başka bir ifadeyle, taneler süspansiyon içerisinde hareket halinde olsalar bile ışın kırılma deseni sabit olmaktadır (24).

Lazer kırınım yönteminde, tanelerin büyüklüğü ile tanelere çarparak kırılan ışınların kırılma açısı arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır (25). Büyük taneler ışınları küçük açıyla, küçük taneler ise daha büyük bir açıyla kırarlar (26). Şekil 2.2'de bu durum şematik olarak gösterilmiştir.



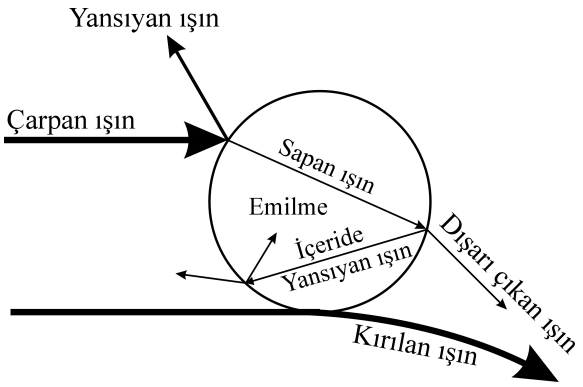
Şekil 2.2. Tanelerin büyüklüğü ile ışınların kırılma açıları arasındaki ters orantı ilişkisi (Malvern el kitabından (24) yararlanılarak oluşturulmuştur)

Lazer kırınım deneyinde, örnek haznesinde su ile karışmış halde bulunan süspansiyon, pompa aracılığıyla lazer ışınlarının önüne pompalanmakta ve analiz süresince sürekli dolaşım yapması sağlanmaktadır. Bu dolaşım sırasında lazer ışınlarının önünden geçen tanelere çarpan ışınlar, büyüklüklerine göre farklı açılarda kırılıp Fourier merceğinden geçerek dedektöre ulaşmaktadır (Bkz. Şekil 2.2). Dedektörün üzerinde her biri farklı bir ölçüm sınırına sahip ölçüm bantları yer almaktadır. Bu ölçüm bantlarının her birinin üzerine ancak belirli açılarla kırılıp gelen ışınlar odaklanmaktadır. Hangi büyüklükteki tanenin, ışınları hangi açı ile kıracağı elektromanyetik kurama göre (örneğin Mie veya Fraunhofer kuramı) belli olduğundan, belirli büyüklükteki tanelerden kırılan ışınların dedektörün hangi bandı üzerine odaklanacağı kullanılan yazılım tarafından bilinmektedir. Örneğin A bandının üzerine, büyüklüğü sadece 3,49 – 4,30 μm arasındaki tanelerden kırılan ışınlar odaklanmaktadır. Başka bir ifadeyle 3,49 – 4,30 μm arasındaki tanelerden kırılan ışınlar dedektörün sadece A bandı üzerine odaklanmaktadır. Böylece, ölçüm bantlarının üzerine düşen ışınların hangi büyüklükteki tanelerden geldiği bilinmekte ve bu sayede tane büyüklüğü hesaplanabilmektedir. Dedektörün üzerine düşen ışınların yoğunluğundan ise, hacimce tane yüzdeleri hesaplanmaktadır.

Lazer kırınım yönteminin en önemli özelliklerinden birisi, tane büyüklüğü dağılımını tanelerin hacmini esas alınarak hesaplamasıdır (24). Elek analizi ve sedimantasyon (hidrometre ve pipet) gibi standart yöntemlerde ise, tanelerin ağırlığı esas alınarak, ağırlıkça tane büyüklüğü dağılımı hesaplanmaktadır. Ancak, analizi yapılan tanelerin yoğunluğu sabit ise, ağırlık ve hacim değerlerine göre hesaplanan tane büyüklüğü dağılımları birbiri ile aynı olmaktadır (27).

Lazer kırınım yönteminde, tane büyüklüğü dağılımı iki farklı optik kurama göre hesaplanabilmektedir. Bunlar, Fraunhofer ve Mie kuramlarıdır. Fraunhofer kuramında, tanelerin ışık geçirmeyen (mat) iki boyutlu dairesel siyah disk şeklinde, Mie kuramında ise, saydam ve küre şeklinde olduğu kabul edilmektedir (26). Zemin örneklerinin ölçümünde hangi kuramın daha uygun olduğu Bölüm 2.4.3'de ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Küre şeklindeki bir taneye ışın çarptığı zaman, bu ışınların bir kısmı tanenin yüzeyine çarparak belli bir açıyla kırılır ve ileri yönde yoluna devam eder, bir kısmı geri yönde yansır, bir kısmı ise tanenin içerisine girer (23). Tanenin içerisine girerken belli bir sapma açısı ile kırılan ışınların bir kısmı yine belli bir sapma açısı ile kırılarak tanenin dışına çıkar, bir kısmı ise tanenin içinde geri yönde yansıdıktan sonra dışarı çıkar ve/veya tane tarafından emilir (23). Bu kavramlar Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Küre şeklindeki bir taneye çarpan ışınların dağılımı (23)

Tane büyüklüğü hesaplamalarında, tanelerin yüzeyine temas ederek kırılan ışınlar dikkate alınmakta olup, kırılan ışınlar, tanenin büyüklüğüne ve şekline bağlı olarak çok farklı yönlerde yayılabilir. Pratikte ışınların yayılması oldukça karmaşıktır ve lazer ışınlarının polarizasyonuna, tanelerin optik özelliklerine ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır (28).

Lazer kırınım yöntemi ile zemin örneklerinin analiz edilmesinde başvurulacak bir standart henüz bulunmadığından, bu yöntem ile zemin örneklerinin ölçümünde uygulanacak optik kuram, optik parametreler, örnek alınması veya azaltılması ve örneklerin ayrıştırılması gibi henüz netlik kazanmamış bazı konular bulunmaktadır. Lazer kırınım yöntemi ile zemin örneklerinin analiz edilmesin üzerine çalışan başlıca araştırmacıların, yukarıda bahsedilen konular üzerindeki bulgularına ve görüşlerine Bölüm 2.4'de ayrıntılı bir şekilde değinilmiştir.

2.2. Stokes Yasası ve Hidrometre Deneyinin Genel İlkeleri

Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde ölçülmesi veya hesaplanması gereken iki parametre olup, bunlar "tane büyüklüğü" ve "tane yüzdesi"dir. Sedimantasyon yöntemleri ile tane büyüklüğü Stokes yasasına göre belirlenirken, tane yüzdeleri ise kullanılan araca göre iki farklı yöntemle belirlenebilmektedir. Bunlar "hidrometre" ve "pipet" yöntemleridir. Pipet, süspansiyonun 10 cm derinliğinden belli bir miktar örnek (örneğin 10 cm^3) almaya yarayan bir araçtır. Hidrometrenin ise iki farklı tipi bulunmaktadır. Bunlar; süspansiyonun belli bir derinlikteki ortalama yoğunluğunu ölçen 151 H hidrometresi ve süspansiyonun belli bir derinliğe kadar olan kısmında bulunan örneğin ortalama ağırlığını veren 152 H hidrometresidir. Her iki hidrometrenin de ölçüleri aynı olup, sadece sap kısmındaki okuma bölmeleri birbirinden farklıdır. ASTM D 422, 1998 (6)'de sadece hidrometre yöntemi yer alırken, BS 1377: Part 2, 1990 (7)'de ise hem pipet hem de hidrometre yöntemi yer almakta, ancak herhangi bir öncelik sıralamasından bahsedilmemektedir. Zemin mekaniği çalışmalarında dünyada ve ülkemizde genellikle hidrometre yöntemi uygulandığından, bu çalışmada da hidrometre yöntemi uygulanmış ve süspansiyonun yoğunluğunu ölçen 151 H hidrometresi kullanılmıştır. Bu metnin bundan sonraki bölümlerinde, aksi belirtilmedikçe "hidrometre" kelimesi yoğunluk ölçen 151 H hidrometresi anlamında kullanılacaktır. 151 H hidrometresi ile tane çapı ve yüzdesinin belirlenmesi ayrı başlıklar halinde ayrıntılı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

2.2.1. Tane çapının belirlenmesi

Küre şeklindeki bir tanenin durgun bir sıvı içerisindeki çökme hızı ile tane büyüklüğü arasındaki matematiksel ilişki ilk kez George Gabriel Stokes, 1891 (29) tarafından ortaya konmuştur. Stokes yasasına göre, özgül ağırlığı taneler ile aynı olup, sıvı (su) içerisinde taneler ile aynı hızda çöken eşdeğer kürenin çapı tane çapı olarak belirlenmektedir (2). Stokes yasasına göre durgun bir sıvı içerisinde sabit hızla çöken küre şeklindeki bir taneye üç farklı kuvvet etki etmektedir (1). Bunlar; sürtünme kuvveti veya direnci, sıvının kaldırma kuvveti ve yerçekimi kuvvetidir (1).

Bu kuvvetler sırasıyla Eş. 2.1; 2.1 ve 2.1'de, kuvvetlerin doğrultuları ve yönleri ise Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

Sürtünme kuvveti : $F_f = - 3\pi\eta UD$ [2.1]

Kaldırma kuvveti : $F_b = - m_w g = - \left(\frac{1}{6}\pi D^3\right)\rho_w g$ [2.2]

Yerçekimi kuvvetidir : $Fg = + m_s g = + \left(\frac{1}{6}\pi D^3\right)\rho_s g$ [2.3]

Yukarıdaki eşitliklerde;

η : Suyun dinamik viskozitesi, g/cm.sn (poise)

U : Kürenin hızı, cm/sn

D : Kürenin çapı, cm

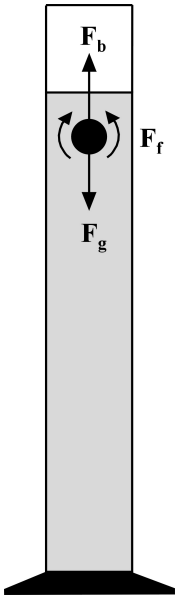
m_w : Suyun kütlesi, g

m_s : Kürenin kütlesi, g

ρ_w : Suyun yoğunluğu, g/cm^3

ρ_s : Kürenin yoğunluğu, g/cm^3

g : Yerçekimi ivmesi; 980,7 cm/sn^2



Şekil 2.4. Sıvı içerisinde çöken küreye etkiyen kuvvetler

Su içerisinde çöken taneler çok kısa bir sürede ve mesafede sabit hıza ulaşırlar (1). Taneler sabit hıza ulaştıklarında kuvvetler birbirini dengeler ve bu durumda aşağıdaki eşitlik yazılabilir (2).

$$\frac{1}{6}\pi D^3 g \rho_s - \frac{1}{6}\pi D^3 g \rho_w - 3\pi\eta U D = 0 \qquad [2.4]$$

Eş. 2.4 kürenin hızını verecek şekilde tekrar düzenlenirse, aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$U = \frac{1}{18}\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\eta} D^2 \qquad [2.5]$$

Eş. 2.5, Stokes yasasına göre durgun bir su içinde sabit hızla çöken küre şeklindeki bir tanenin hızını vermektedir. Bu bağıntı, "*yol = hız x zaman*" denkleminde yerine konduğunda,

$$H = \frac{1}{18}\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\eta} D^2 T \qquad [2.6]$$

eşitliği elde edilir. Eş. 2.6 tane çapını verecek şekilde tekrar düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir,

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_s - \rho_w)}\frac{H}{T}} \qquad \text{(cm)} \qquad [2.7]$$

ASTM D 422, 1998 (6)'ye göre hidrometre deneyinde geçen zaman dakika olarak ölçülmekte, tane çapı ise mm olarak hesaplanmaktadır. Bunu sağlamak için Eş. 2.7 üzerinde gerekli birim dönüştürmeleri yapılıp yeniden düzenlenirse, Eş. 2.8 elde edilir.

$$D = \sqrt{\frac{30\,\eta}{980{,}7\,(\rho_s - \rho_w)}\,\frac{L}{T}} \qquad \text{(mm)} \qquad [2.8]$$

Eş. 2.8'de suyun viskozitesi yine g/cm.sn (poise), tanelerin ve suyun yoğunluğu g/cm^3 olarak, geçen zaman ise dakika olarak alınmıştır. Eş. 2.7'de görülen "H" sembolünün yerini Eş. 2.8'de "L" sembolü almıştır. 151 H hidrometreleri süspansiyonun yüzeyinden itibaren ağırlık merkezinin bulunduğu derinlikteki yoğunluğu ölçmekte ve bu derinlik ASTM D 422, 1998 (6)'de "etkin derinlik" olarak adlandırılmaktadır. "L" sembolü etkin derinlik için kullanılmıştır. Yukarıda verilen birimler ile birlikte etkin derinliğin birimi de "cm" olarak alınırsa Eş. 2.8 ile hesaplanan tane çapının birimi "mm" olmaktadır.

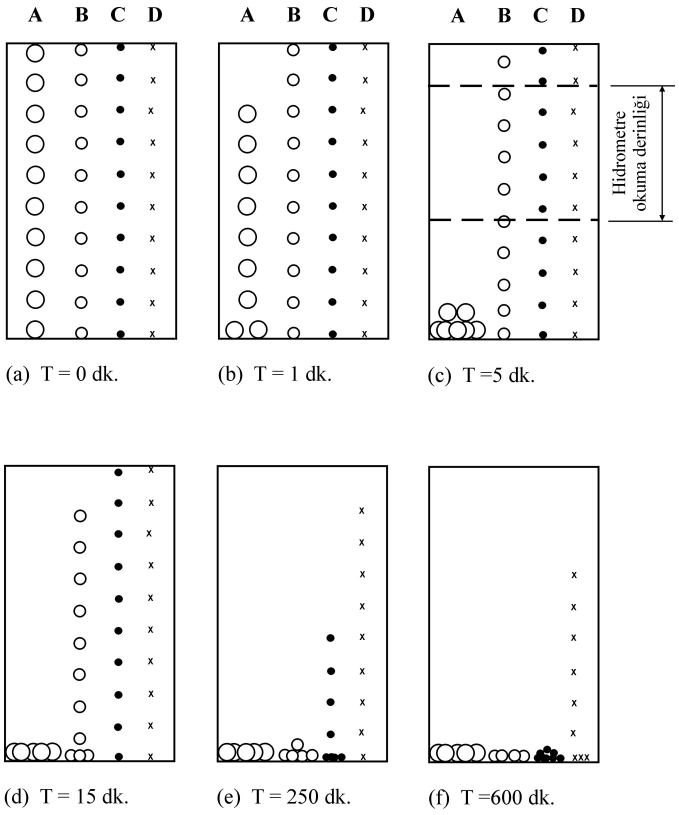
Stokes eşitliği olarak da anılan Eş. 2.7 veya 2.8 ile durgun bir su içerisinde çöken küre şeklindeki tanelerin çapı hesaplanmaktadır. Bazı kaynaklarda buna "Stokes çapı" da denilmektedir. Eş. 2.6'dan görüleceği gibi, suyun viskozitesi ve yoğunluğu tanelerin çökme hızları üzerinde etkilidir. Suyun viskozitesi ve yoğunluğu ise, sıcaklığa bağlıdır ve bir çok kaynakta bulunabilecek sabit değerlerdir. Bu durumda Eşitlik 2.8'de sabit değerlerden oluşan birinci terim kök dışına çıkartılıp "K" sembolü ile gösterilecek olursa;

$$D = K\sqrt{\frac{L}{T}} \qquad [2.9]$$

eşitliği elde edilir. Burada "K" suyun sıcaklığına ve tane yoğunluğuna bağlı bir katsayı olup, ASTM D 422, 1998 (6)'de çizelge halinde verilmiştir.

Çeşitli büyüklükteki tanelerin su içerisinde zamanla ne kadar yol aldıklarını ve çökme hareketlerini göstermek için Şekil 2.5'de bir model sunulmuştur (2). Bu modelde iri, orta ve ince silt ile birlikte kil boyutunu temsil etmek için 4 farklı büyüklükte tane grubu ele alınmış ve bunların 35 cm yüksekliğindeki bir silindirin içerisinde çöktükleri kabul edilmiştir. Gerçekte, zeminlerin çok çeşitli büyüklükteki

tanelerden meydana geldiği bilinmektedir. Ancak Şekil 2.5'de sunulan model çeşitli zaman aralıklarında çöktürme silindirinde neler olduğunu anlamak için yararlı bulunmuştur. Söz konusu modelde kullanılan zeminlerin tane çapları ve Eş. 2.5 ile hesaplanan hızları Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Hesaplamalarda, suyun viskozitesi η=0,01 g/cm.sn (poise), yoğunluğu ρ_w = 1,0 g/cm^3, tane yoğunluğu ρ_s = 2,65 g/cm^3 ve yerçekimi ivmesi g = 980,7 cm/sn^2 alınmıştır.



Şekil 2.5. Sedimantasyon işleminin şematik gösterimi (2)

Çizelge 2.1. Şekil 2.5'de görülen tanelerin hesaplanan hızları (2)

Taneler	Tane çapı (μm)	Hız (cm/sn)
A: İri silt	35	0,1101
B: Orta silt	12	0,0129
C: İnce silt	4	0,0014
D: Kil	2	0,0004

Süspansiyonu homojen hale getirmek için deneyden hemen önce çöktürme silindiri çalkalandığından dolayı, T = 0 anında taneler süspansiyonun bütün derinliği boyunca eşit olarak dağılmıştır (Şekil 2.5.a). 1 dakika sonra iri silt taneleri 6,6 cm, orta silt taneleri ise 0,8 cm çökmüşlerdir (Şekil 2.5.b). 5 dakika sonra iri silt taneleri 33 cm yol almış olduklarından hemen hemen tamamı dibe çökmüş olacaktır. Hidrometre ile süspansiyonun yaklaşık 5-19 cm arasındaki kısmının ortalama yoğunluğunun ölçüldüğü kabul edilecek olursa (Şekil 2.5.c), 5 dakika sonra okuma derinliğinde 35 μm'den daha büyük tanelerin kalmadığı, başka bir deyişle okuma derinliğinde bulunan bütün tanelerin 35 μm'den küçük olduğu söylenebilir. 15 dakika sonra orta silt taneleri 12,7 cm yol alırken, kil taneleri ise sadece 0,3 cm yol almışlardır (Şekil 2.5.d). 250 dakika sonra ise orta silt tanelerinin de tamamı dibe oturmuş, ince silt taneleri ise 21,6 cm yol almış olacaklardır (Şekil 2.5.e). Yani süspansiyonun yukarıdan itibaren 21,6 cm'lik kısmında 4 μm'den daha büyük tane kalmamış olacaktır. 600 dakika sonra silt tanelerinin tamamı dibe çökmüş iken, kil taneleri ise sadece 12,9 cm yol almış olacaklardır. Modelde sunulan tanelerin belirtilen zamanlarda aldıkları mesafeler Çizelge 2.2'de toplu halde sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Şekil 2.5'de görülen tanelerin belirli zamanlardaki teorik çökme mesafeleri

Tane çapı (μm)	Tanelerin çökme mesafeleri, cm					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	T = 0 dk.	T = 1dk.	T = 5 dk.	T = 15 dk.	T = 250 dk	T = 600 dk
35	0	6,6	33,0	-	-	-
12	0	0,8	3,9	12,7	-	-
4	0	0,09	0,4	1,3	21,6	-
2	0	0,02	0,1	0,3	5,4	12,9

Yukarıdaki modelde kil ve silt olarak adlandırılan tanelerin küre şeklinde olduklarının kabul edildiği unutulmamalıdır. Gerçek zemin taneleri küre şeklinde olmadığından, gerçek bir zemin örneği ile yapılacak bir deneyde yukarıda hesaplanan çökme hızları ve mesafeleri geçerli olmayacaktır. Küre şeklinde olmayıp, belirli

geometriye sahip tanelerin (örneğin elipsoit) çökme hızlarının hesaplandığı bazı çalışmalar bulunmaktadır (öreğin Lerman vd., 1974 (8), Lu vd., 2000 (9)).

2.2.2. Tane yüzdelerinin belirlenmesi

Şekil 2.5'de gösterilen modelden de anlaşıldığı gibi, Stokes yasası ile "H" derinliğinde bulunan tanelerin kaç milimetreden küçük oldukları hesaplanmaktadır. Belirli bir tane çapından küçük olan bu tanelerin yüzdesi ise 151 H hidrometresi ile süspansiyonun "H" derinliğindeki yoğunluğu ölçülerek belirlenebilmektedir. Bir hidrometre, süspansiyon içerisine daldırıldığında, hidrometrenin ağırlığı (W_h) süspansiyonun kaldırma kuvveti tarafından dengelenir. Archimedes prensibine göre, hidrometreye taşırdığı süspansiyonun ağırlığı kadar kaldırma kuvveti uygulanır. Hidrometre, süspansiyona batan kısmının (ıslanan kısmının) hacmi kadar süspansiyon taşıracağına göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir (1);

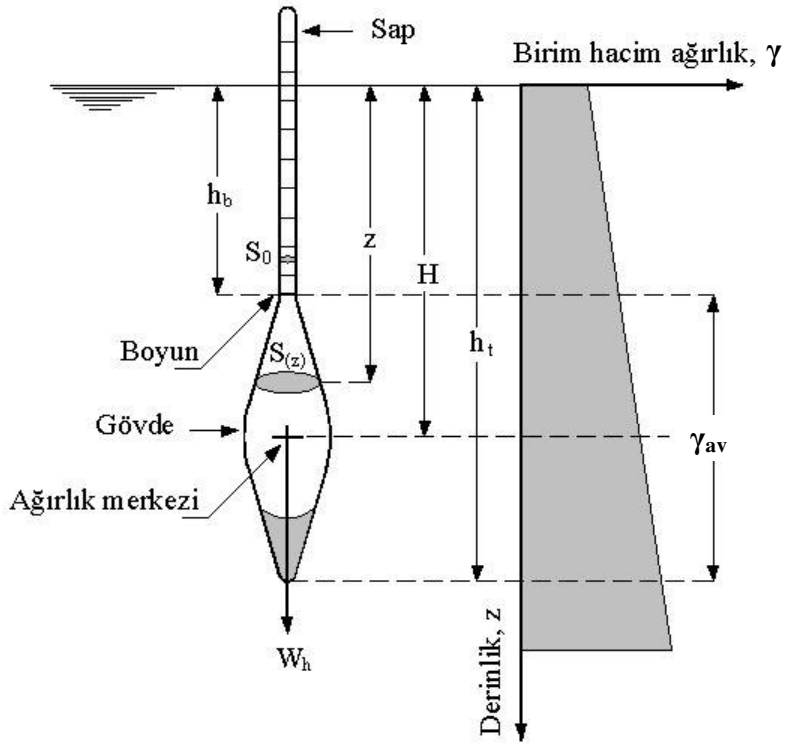
$$W_h = \int_0^{h_t} S(z)\,\gamma(z)\,dz \qquad [2.10]$$

Eş. 2.10 hidrometrenin ağırlığını dengeleyen kuvveti, veya hidrometreye etki eden kaldırma kuvvetini vermektedir. Eş. 2.10'da; z: süspansiyonun yüzeyinden itibaren derinlik, S(z): hidrometrenin "z" derinliğindeki en-kesit alanı, $\gamma(z)$: süspansiyonun "z" derinliğindeki birim hacim ağırlığı, h_t: hidrometrenin "t" anında suya batan (ıslanan) kısmının uzunluğudur. Bu kavramlar ve semboller Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Hidrometre "gövde" ve "sap" olmak üzere iki kısım halinde değerlendirilecek olursa, Eş. 2.10'u iki kısma ayırmak mümkündür. Bu durumda;

$$W_h = \int_{h_b}^{h_t} S(z)\,\gamma(z)\,dz \;+\; S_0 \int_0^{h_b} \gamma(z)\,dz \qquad [2.11]$$

eşitliği elde edilir. Eş. 2.11'de birinci terim gövde, ikinci terim ise sap kısmından kaynaklanan kaldırma kuvvetini temsil etmekte ve h_b : hidrometrenin boyun kısmının

yüzeyden itibaren bulunduğu derinliği veya sapın ıslanan kısmının uzunluğunu, S_0 ise sap kısmının en-kesit alanını simgelemektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Hidrometrenin süspansiyon içerisindeki şematik görünümü ve ilgili kavramlar (1)

Hidrometrenin sap kısmının hacmi, gövde kısmının hacmi ile karşılaştırıldığında çok daha küçük olduğundan, esasında hidrometreyi dengeleyen kaldırma kuvvetinin hidrometrenin gövdesinin hacmi kadar süspansiyonun ağırlığına eşit olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır (1). Bu nedenle, hesaplarda kolaylık olması bakımından, sap kısmının katkısı ihmal edilmektedir. Sedimantasyon işleminin başladığı andan itibaren süspansiyonun birim hacim ağırlığı her derinlikte farklı olduğundan, hidrometreyi dengede tutan kuvvet, gövdesinin bulunduğu bölgedeki süspansiyonun oluşturduğu kaldırma kuvvetidir. Bu bölge Şekil 2.6'da "$h_b - h_t$" arası olarak gösterilmiştir. Süspansiyonun "$h_b - h_t$" arasındaki birim hacim ağırlığı zamanla birlikte azaldıkça, hidrometre dengede kalmak için daha çok batacaktır. İşte bu ilişkiden yararlanarak hidrometrenin sap kısmı süspansiyonun yoğunluğunu ölçecek şekilde bölümlendirilmiştir. Bu durumda, yoğunluk hidrometreleri (151 H),

gövde kısmının bulunduğu bölgedeki ($h_b - h_t$) süspansiyonun ortalama birim hacim ağırlığını ölçmektedir (1). O halde süspansiyonun "$h_b - h_t$" arasındaki ortalama birim hacim ağırlığını (γ_{av}) belirlemek için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\gamma_{av} = \frac{1}{\int_{h_b}^{h_t} S(z)\,dz} \int_{h_b}^{h_t} S(z)\,\gamma(z)\,dz \qquad [2.12]$$

Eş. 2.12'de paydada bulunan terim hidrometrenin gövde kısmının hacmini (V_b), payda bulunan terim ise gövdenin bulunduğu bölgedeki süspansiyonun ($h_b - h_t$) ağırlığını vermektedir. Eşitlik 2.12 tekrar düzenlenip aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\gamma_{av} = \frac{1}{V_b} \int_{h_b}^{h_t} S(z)\,\gamma(z)\,dz \qquad [2.13]$$

Süspansiyonun "$h_b - h_t$" arasındaki kısmının ortalama birim hacim ağırlığının yaklaşık olarak bu iki kesitin orta noktasında bulunan bir derinlikteki birim hacim ağırlığa eşit olduğunu söylemek mümkündür. Bu derinlik Şekil 2.7'de "H" ile gösterilmiştir ve hidrometrenin ağırlık merkezinin bulunduğu derinliğe karşılık gelmektedir. Hidrometrenin ağırlık merkezi gövde kısmının tam ortasında yer almaktadır (Bkz. Şekil 2.6). O halde özetlemek gerekirse, zeminlerin tane büyüklüğü dağılımını belirlemekte kullanılan standart bir yoğunluk hidrometresi (151 H), ağırlık merkezinin bulunduğu derinlikteki süspansiyonun ortalama yoğunluğu ölçmektedir denilebilir. Süspansiyonun yoğunluğundan tane yüzdesinin nasıl hesaplandığı ise aşağıda anlatılmıştır.

Zemin taneleri ve suyun karışımından meydana gelen süspansiyonun toplam ağırlığı iki farklı şekilde ifade edilebilir. Birincisi;

$$V \times \gamma_{av} \qquad [2.14]$$

İkincisi ise;

$$x + (V - \frac{x}{\gamma_s})\,\gamma_w \qquad [2.15]$$

Eş. 2.14 ve 2.15'de; V: süspansiyonun toplam hacmini; γ_{av}: süspansiyonun ortalama birim hacim ağırlığını; x: tanelerin ağırlığını; γ_s: tanelerin birim hacim ağırlığını; γ_w: suyun birim hacim ağırlığını göstermektedir. Eş. 2.14 ve 2.15'in her ikisi de süspansiyonun toplam ağırlığını verdiğine göre, bunlar birbirine eşitlenebilir.

$$V\,\gamma_{av} = x + (V - \frac{x}{\gamma_s})\,\gamma_w \qquad [2.16]$$

Eş. 2.16 süspansiyonda bulunan tanelerin ağırlığını verecek şekilde tekrar düzenlenir ve $G_s = \gamma_s / \gamma_w$ yazılırsa,

$$x = \frac{G_s}{G_s - 1}\,(\gamma_{av} - \gamma_w)\,V \qquad [2.17]$$

elde edilir. Eş. 2.17 ile ortalama birim hacim ağırlığı bilinen (ölçülen) bir süspansiyonda bulunan tanelerin ağırlığının hesaplanabileceği görülmektedir. Hidrometre, süspansiyonun "H" derinliğindeki ortalama birim hacim ağırlığı ölçtüğüne göre Eş. 2.17 ile süspansiyonun yüzeyden itibaren "H" derinliğine kadar olan kısmında bulunan tanelerin yaklaşık ağırlığı hesaplanabilmektedir. Süspansiyonun yüzeyden itibaren "H" derinliğine kadar olan kısmında bulunan tanelerin yüzdesini hesaplamak için Eş. 2.17 ile elde edilen değerin hidrometre deneyinde kullanılan toplam kuru numune ağırlığına (M) bölünüp 100 ile çarpılması gerekmektedir. Bu durumda Eş. 2.18 elde edilir.

$$P' = \frac{1}{M}\,\frac{G_s}{G_s - 1}\,(\gamma_{av} - \gamma_w)\,V\;100 \quad (\%) \qquad [2.18]$$

Eş. 2.18'de görülen γ_{av} hidrometre ile ölçülmektedir. Ancak gerçek bir deneyde hidrometre ile alınan yoğunluk okuması üzerinde menisküs, sıcaklık ve ayrıştırıcı madde düzeltmesi yapılması gerekmektedir. Bu düzeltmeler yapıldıktan sonraki hidrometre okuması "R" ile gösterilip, Eş. 2.18'deki γ_{av} sembolü "R" ile değiştirilirse ve suyun birim hacim ağırlığı da, $\gamma_w = 1$ g/cm^3 kabul edilirse, deneyde kullanılan süspansiyonun toplam hacmi, V = 1000 cm^3 olduğuna göre Eş. 2.18 aşağıdaki şekle dönüşür.

$$P' = \frac{100\,000}{M}\,\frac{G_s}{G_s - 1}\,(R - 1) \qquad (\%) \qquad [2.19]$$

Böylece, süspansiyonun "H" derinliğine kadar olan kısmında bulunan ve Eşitlik 2.9 ile hesaplanan "D" çapından küçük olan tanelerin yüzdesi de Eş. 2.19 ile hesaplanmaktadır. Eş. 2.19 ile hesaplanan yüzdelerin elek analizinin sonuçları ile birleştirilmesi için elek analizi ile hesaplanan en son geçen yüzde değeri 100'e bölünerek Eş. 2.19 ile çarpılmalıdır. Elek analizinde kullanılan en son elek 0,075 mm (200 no.lu elek) olduğuna göre, aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$P = \frac{100\,000}{M}\,\frac{G_s}{G_s - 1}\,\frac{P_{200}}{100}\,(R - 1) \quad (\%) \qquad [2.20]$$

Eş. 2.20'de P_{200}: 200 no.lu elekten geçen yüzde değerini göstermektedir. Eş. 2.20'de gerekli sadeleştirmeler yapılıp tekrar düzenlendiğinde, nihai olarak Eş. 2.21 elde edilir.

$$P = \frac{G_s}{M\,(G_s - 1)}\,1000\;P_{200}\,(R - 1) \quad (\%) \qquad [2.21]$$

Özetle belirtilecek olursa, sedimantasyon işleminde tane çapı Stokes yasasına göre Eş. 2.8 ile, geçen yüzdeler ise yoğunluk hidrometresi kullanıldığında Eş. 2.19 ile, hidrometrenin sonuçları elek analizinin sonuçları ile birleştirileceğinde ise Eş. 2.21 ile hesaplanmaktadır.

2.2.3. Stokes yasasının dayandığı varsayımlar

Stokes yasasına dayanan sedimantasyon işlemi ile zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi bazı varsayımlara dayanmaktadır. Sonuçların doğruluğunu etkileyebilecek bu varsayımlar ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

1) *Taneler küre şeklindedir:* Stokes yasası tanelerin küre şeklinde olduğunu varsaymakta ve zemin tanesi ile aynı özgül ağırlığa sahip olup, su içerisinde aynı hızda çöken eşdeğer kürenin çapını zemin tanesinin çapı olarak hesaplamaktadır. Ancak, gerçek zemin tanelerinin küre şeklinde olmadığı iyi bilinmektedir. Örneğin, halloyizit silindirik, montmorillonit ve illit yapraksı, kaolinit ise levhamsı şekildedir (30).

2) *Bütün tanelerin özgül ağırlığı aynıdır:* Özgül ağırlık değeri tane çapının ve tane yüzdelerinin hesaplandığı eşitliklerde (Bkz. Eş. 2.9 ve 2.19) bir parametre olarak yer almakta ve bu eşitliklere sadece tek bir özgül ağırlık değeri girilebilmektedir. Bu nedenle numune içerisindeki bütün tanelerin özgül ağırlığının aynı olduğu kabul edilmektedir. Ancak, bir zemin örneği genellikle farklı minerallerin bileşiminden meydana gelmekte ve zemin minerallerinin özgül ağırlıkları da birbirinden farklı olabilmektedir (30).

3) *Tanelerin durgun su içerisinde çökmesi laminar akım koşullarına uygundur ve türbülans yoktur:* Süspansiyonda türbülans veya laminar akım koşullarının oluşması tane büyüklüğüne ve tanelerin çökme hızına bağlı olan Reynolds sayısı ile ifade edilmektedir (Eş.2.22) (23).

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_f \; U \, D}{\eta} \qquad [2.22]$$

Bu eşitlikte, ρ_f: sıvının yoğunluğunu; U: tanenin çökme hızını; D: tanenin çapını; η: sıvının viskozitesini göstermektedir. Laminar akım koşulunun

sağlanması için Reynolds sayısının 1'den küçük (R_e<1), bunun için ise tane çapının yaklaşık 0,1 mm'den (100 μm) küçük olması gerekir (1). Hidrometre deneyi yapılacak örnekler 0,075 mm elekten (200 no.lu elek) elendiği için, bu varsayım bir sorun oluşturmamaktadır. Ayrıca mikrometre düzeyindeki taneler için laminar akım varsayımının genellikle doğru olduğunu gösteren çalışmalar yapılmıştır (örneğin Myseles, 1959 (31), Clift vd., 1978 (32).

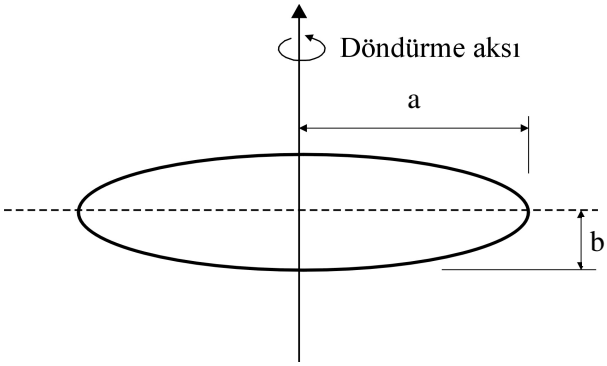
4) *Taneler çökme sırasında birbirlerinden ve çöktürme silindirinin kenarlarından etkilenmezler (wall effect):* Deneyde kullanılan örnek miktarı ile bu durum kontrol edilebilmektedir. 1 litre süspansiyonda 50 gramdan daha fazla örnek kullanılmadıkça, tanelerin birbirinden etkilenmesinin ve çöktürme silindirinin çevreleme etkisinin önemli olmadığı gösteren çalışmalar bulunmaktadır (örneğin, Weatherly, 1929 (33)). Hidrometre deneyinde 30 – 35 g numune kullanıldığından, bu varsayım da herhangi bir sorun oluşturmamaktadır.

5) Taneler çok kısa bir sürede ve mesafede sabit hıza ulaşırlar ve çökme hızları çok düşüktür (2).

Bazı araştırmacıların, yukarıda bahsedilen varsayımlardan, küre varsayımının ve özgül ağırlık varsayımının hidrometre/pipet deneylerinin sonuçları üzerindeki etkilerine ilişkin görüşlerine aşağıda ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

Küre varsayımı

Küre varsayımının hidrometre deney sonuçları üzerindeki etkisini inceleyen en güncel çalışmalardan birisi Lu vd., 2000 (9) tarafından yapılmıştır. Lu vd., 2000 (9) sonuçlar üzerinde en çok etkili olan varsayımın küre varsayımı olduğunu belirtmiş ve kaolinit gibi levhamsı şekle sahip tanelerin disk şeklindeki elipsoide, halloizit gibi silindirik şekle sahip tanelerin ise çubuk şeklindeki elipsoide benzetilerek analiz edilebileceğini ifade etmişlerdir. Söz konusu araştırmacıların elipsoit tanımlaması Şekil 2.7'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.7. Elipsoidin şematik görünümü (Elipsoidin kağıt düzlemine dik boyutu "a" ile aynıdır ve düşey eksen etrafında döndürüldüğünde üç boyutlu görüntü elde edilmektedir. Şekil oranı, E = b/a) (9)

Lu vd., 2000 (9), elipsoit şeklindeki tanelerin hidrodinamik özelliklerinin akışkanlar mekaniğinin klasik konularından olduğunu ifade etmişler ve bazı araştırmacılar tarafından (Öreğin Barr, 1931 (34), Rouse, 1946 (35) ve Payne ve Pell, 1960 (36)) disk şeklindeki elipsoit tanelerin bir sıvı içerisindeki çökme hızlarının, rastgele konumda çöktükleri kabulü ile Eş. 2.23'de görüldüğü gibi tanımlandığını belirtmişlerdir.

$$U = \frac{2}{9}\frac{ab}{\Delta_a}\frac{E(\rho_s - \rho_f)g}{\eta} \qquad [2.23]$$

Yukarıdaki eşitlikte;

U: elipsoidin çökme hızı

a: elipsoidin yarıçapı (Şekil 2.7)

b: elipsoidin yarı kalınlığı (Şekil 2.7)

ρ_s : elipsoit ile aynı hızda çöken kürenin yoğunluğu

ρ_f : sıvının (suyun) yoğunluğu

g : yerçekimi ivmesi,

η: sıvının (suyun) viskozitesi

E: elipsoidin şekil oranı, E = b/a (Şekil 2.7)

Δ_a ise Eşitlik 2.24'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Δ_a'nın hesaplanmasında hesap makinesi radyana getirilmelidir).

$$\Delta_a = \frac{\sqrt{1 - E^2}}{\cos^{-1} E} \qquad [2.24]$$

Lu vd., 2000 (9), elipsoit şeklindeki tanelerin çökme hızını veren eşitlik (Eş.2.23) ile küre şeklindeki tanelerin çökme hızını veren Stokes eşitliğini (Eş.2.5) birbirine eşitleyip, gerekli düzenlemeleri yaparak, aynı hızda çöken kürenin yarıçapı ile disk şeklindeki elipsoidin yarıçapı arasındaki ilişkiyi elde etmişlerdir. Bu ilişki Eş. 2.25'de görüldüğü gibidir.

$$a^* = a\sqrt{\frac{E}{\Delta_a}} \qquad [2.25]$$

Eşitlik 2.25'de, a* kürenin yarıçapını, a ise elipsoidin yarıçapını ifade etmektedir. Lu vd., 2000 (9), verdikleri bir örnekte, 100 μm çapında (a=50 μm) ve küre şeklindeki bir tanenin 20 ^{0}C su içerisindeki çökme hızı yaklaşık 1 cm/s olarak hesaplanırken, çapı yine 100 μm (a=50 μm) ve şekil oranı 0,01 olan disk şeklindeki bir tanenin Eş. 2.23 ile hesaplanan çökme hızının ise 0,02 cm/s olarak hesaplandığını belirtmiştir (50 kat daha yavaş). Lu vd., 2000 (9), verdikleri bir başka örnekte ise, şekil oranı E = 0,1 olan disk şeklinde bir kil tanesi için, yarıçap oranının (a*/a) = 0,38 olarak hesaplanacağını ve aynı hızda çöken disk çapı ile küre çapı arasındaki farkın 2,6 olacağını ifade etmiştir. Sayısal değerler vererek bu örnek daha somut hale getirilecek olursa, 5,3 μm çapında ve 0,53 μm kalınlığında (E= 0,1) levhamsı şekle sahip bir kil tanesi, elipsoit gibi düşünüldüğünde, yarıçap oranı Eş. 2.25 ile (a*/a) = 0,38 olarak hesaplanmaktadır. Bu kil tanesinin eşdeğer küre çapı ise yine Eş. 2.25 ile 2 μm (a* = 1 μm) olarak hesaplanır. Daha yalın bir ifadeyle, çapı 5,3 μm olan (E= 0,1) levhamsı şekle sahip bir kil tanesi, Stokes eşitliği ile 2 μm çapında küre şeklinde bir tane gibi hesaplanmaktadır. Bu basit örnek, hidrometre yönteminin tane şeklinden hangi düzeyde etkilendiğini ve kil yüzdesini neden daha yüksek belirlediğini

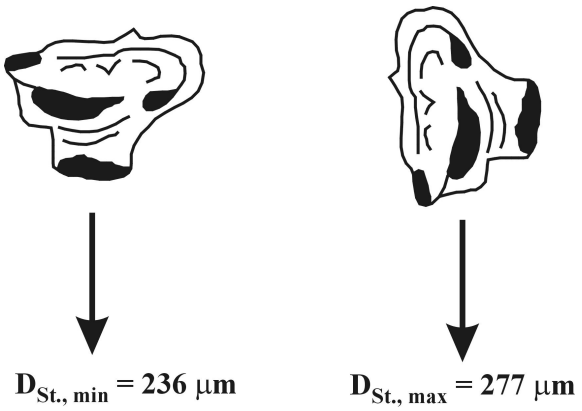
göstermektedir. Ayrıca bu örnekte şekil oranının 0,1 varsayıldığı da unutulmamalıdır. Zira Lu vd., 2000 (6), iyi kristallenmiş tipik bir kaolinit kil mineralinin şekil oranının yaklaşık 0,01 olduğunu ve bu durumda elipsoit ve küre çapları arasıdaki farkın 8 katına çıkacağını söylemiştir. Bu durumda, Stokes eşitliği ile 2 μm çapında küre gibi hesaplanan levhamsı şekle sahip kaolinit kil tanesinin aslında gerçek çapı (disk varsayımı ile) yaklaşık 16 μm olmaktadır.

Lerman vd., 1974 (8) ise, bir sıvı içerisinde geniş yüzeyi boyunca çöken disk çeklindeki bir tanenin çökme hızını Eşitlik 2.26'da görüldüğü gibi tanımlamıştır. Lerman vd., 1974 (8), aynı disk dar kenarı boyunca çöktüğünde, Eş.2.26'da görülen sabit sayının (0,238) yerine 0,356'nın geleceğini belirtmişlerdir.

$$U = \frac{0{,}238\, g\, (\rho_s - \rho_f)\, a^{1/3}\, r_e^{\,2}}{\eta\, h} \qquad [2.26]$$

Yukarıdaki eşitlikte, U diskin çökme hızını, g yerçekimi ivmesini, ρ_s tane yoğunluğunu, ρ_f sıvının yoğunluğu, a: diskin yarıçapını, r_e disk ile aynı hacimdeki kürenin yarıçapını, η sıvının viskozitesini, h ise diskin kalınlığını göstermektedir.

Allen, 1997 (23), düzensiz şekle sahip tanelerin laminar akım bölgesinde rastgele konumda çöktüklerini ve tek bir tanenin hesaplanan eşdeğer çapının çökme konumuna bağlı olduğunu ifade etmiştir. Adı geçen araştırmacı, düzensiz şekle sahip bir tanenin Stokes eşitliği ile hesaplanan eşdeğer küre çapının ise, çeşitli konumlarda çöktüğünde hesaplanacak tane çaplarının ortalaması olacağını belirtmiştir (Şekil 2.8). Allen, 1997 (23), laminar akım bölgesinin dışında, tanenin çökmeye karşı en fazla direnç gösterecek şekilde konum alacağını ve hesaplanan çökme çapının ortalama tane çapına göre daha küçük olacağını ileri sürmüştür. Bu tür tanelerin hesaplanan ortalama tane çapının, en küçük tane çapından daha büyük olacağı açıktır.



Şekil 2.8. Düzensiz şekle sahip bir tane, çökmeye karşı en fazla direnç gösterdiğinde çapı 236 μm olan küre ile, en az direnç gösterdiğinde ise çapı 277 μm olan küre ile aynı hızda çöker. Böyle bir tane laminar akım şartlarında rastgele konumda çöker ve tane çapı yaklaşık (236+277)/2 = 257 μm olarak ölçülür (23)

Özgül ağırlık varsayımı

Zeminlerin bileşiminde bulunan minerallerin özgül ağırlıkları birbirinden farklı olmasına karşın Stokes eşitliği ile yapılan hesaplamalarda sadece tek bir özgül ağırlık değeri kullanılmaktadır. Bazı araştırmacılar (Örneğin, Wen vd., 2002 (5), Beuselinck vd., 1998 (10), Konert ve Vandenberghe, 1997 (15), Eshel vd., 2004 (18)), hesaplamalarda kullanılan özgül ağırlık değerinin, minerallerin gerçek özgül ağırlığından sapmasının sonuçları etkileyeceğini öne sürmüşlerdir. Çizelge 2.3'de bazı zemin tiplerinin ve minerallerin özgül ağırlıkları görülmektedir.

Yukarıda adı geçen araştırmacılar, hidrometre ve pipet gibi klasik sedimantasyon yöntemleri tanelerin özgül ağırlığına bağlı iken, lazer kırınım yönteminin tanelerin özgül ağırlığından bağımsız olduğunu ve her iki yöntemle belirlenen sonuçlar arasındaki farkın nedenlerinden birisinin de bu olduğunu öne sürmüşlerdir. Örneğin, Wen vd., 2002 (5), hidrometre yöntemi ile belirlenen tane büyüklüğü dağılımının tane yoğunluğuna bağlı olduğunu ve her iki yöntem ile belirlenen sonuçlar arasındaki farkın taneler arasındaki yoğunluk değişiminden kuvvetle etkilendiğini öne

sürmüşlerdir. Beuselinck vd., 1998 (10), çeşitli büyüklükteki tanelerin yoğunlukları (özgül ağırlıkları) farklı olduğu taktirde her iki yöntem ile belirlenen sonuçlar arasında da bir fark beklenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Konert ve Vandenberghe, 1997 (15), minerallerin özgül ağırlığının pipet yöntemi ile belirlenen sonuçları etkilediğini belirtmiş ve tane şekli küreden uzaklaştığı ve tane yoğunluğu (özgül ağırlığı) heterojen olduğu sürece lazer kırınım yöntemi ile pipet yönteminin sonuçlarının daima farlı olacağını öne sürmüşlerdir. Eshel vd., 2004 (18) ise, lazer kırınım analizinin tane yoğunluğundan bağımsız olduğunu, sedimantasyona dayalı yöntemlerde ise tane büyüklüğü dağılımının tane yoğunluğuna bağlı olduğunu ve hesaplarda ortalama tane yoğunluğunun kullanıldığını belirtmiş ve kabul edilen ortalama yoğunluğun tanelerin gerçek yoğunluktan sapmasının sedimantasyona dayalı yöntemlerin sonuçlarında hata meydana getirdiğini öne sürmüştür.

Çizelge 2.3. Bazı zemin tiplerinin ve minerallerinin özgül ağırlıkları (28,37,38)

Zemin veya mineral tipi	Özgül ağırlık (G_s)
Kaolinit*	2,60 – 2,68
Halloyizit*	2,55 – 2,56
Montmorillonit*	2,35 – 2,70
İllit*	2,60 – 3,00
Kum**	2,65 – 2,67
Siltli kum**	2,67 – 2,70
İnorganik kil**	2,70 – 2,80
Mika veya demir içeren zeminler**	2,75 – 3,00
Kalsit***	2,70
Kuvars***	2,65

* Mitchell (1976)'dan alınmıştır (28)

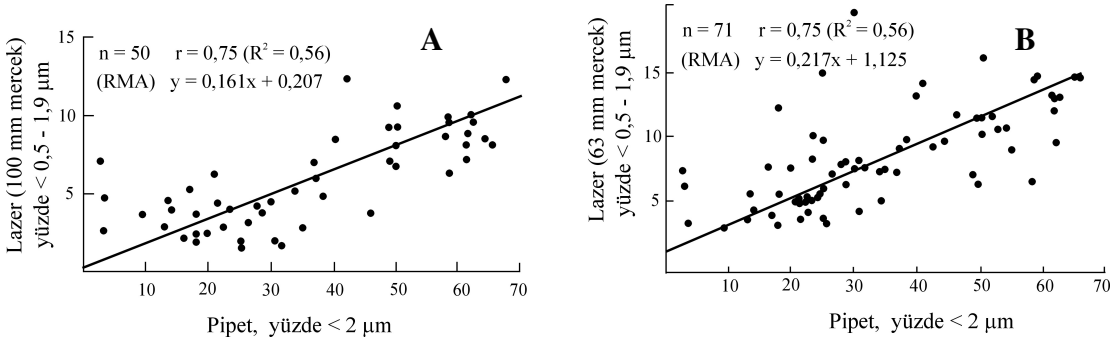
** Bowles (1992)'den alınmıştır (37)

*** Handbook of chemistry and physics (CRC press, 2002)'den alınmıştır (38)

2.3. Lazer Kırınım ve Hidrometre/Pipet Yöntemlerinin Karşılaştırılması Üzerine Yapılmış Başlıca Çalışmalar

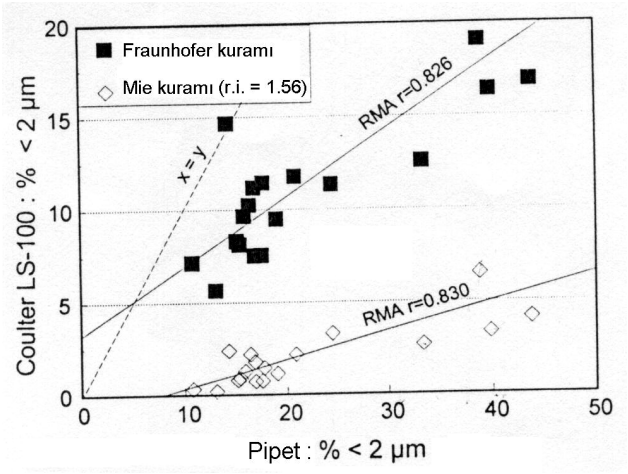
Konu ile ilgili yapılmış önceki çalışmaların başlıcaları, kronolojik sırayla aşağıda sunulmuştur. Bu çalışmalarda, araştırmacıların kullandığı lazer kırınım cihazının marka ve modeli, cihazın teknik özellikleri, sedimantasyon yöntemi (hidrometre veya pipet), örneklerinin kökeni ve elde ettikleri sonuçlar verilmiştir.

Mc Cave vd., 1986 (13), doğal sedimanlar üzerinde, Malvern marka, 3600 E model cihaz ve pipet yöntemiyle elde ettikleri kil yüzdelerini karşılaştırmışlardır. 3600 E modeli Malvern'in eski modellerinden olup, $\lambda = 0{,}633$ µm dalga boyuna sahip He-Ne lazeri kullanarak, odak uzaklığı 300, 100 ve 63 mm olan üç farklı mercek ile ölçüm yapabilmektedir. 63 mm merceğin ölçüm sınırları 1,2 – 118 µm, 100 mm merceğin 1,9 – 188 µm, 300 mm merceğin ise 5,8 – 560 µm'dir. Cihazın, veri toplama dedektörü 15 elemanlı olup, tane büyüklüğü dağılımını 15 sınıfa ayırarak belirlemektedir. Araştırmacılar, Calgon çözeltisi içerisinde 5 dakika boyunca ultrasonik enerji uygulayarak ayrıştırdıkları örneklerini 63 µm elekten eleyerek hazırlamışlardır. Daha sonra, 71 adet örneği 100 mm mercek, 50 adet örneği ise 63 mm mercek kullanarak ölçmüşler ve elde ettikleri kil yüzdelerini, pipet yöntemi ile elde ettikleri kil yüzdeleri ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmadan elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.9'da sunulmuştur.



Şekil 2.9. Lazer kırınım ve pipet yöntemleriyle belirlenen kil yüzdeleri arasındaki ilişki A) 100 mm mercek kullanılarak elde edilen lazer kil (~ 0,5 – 1,9 µm) yüzdesi, B) 63 mm mercek kullanılarak elde edilen lazer kil (~ 0,5 – 1,9 µm) yüzdesi (13)

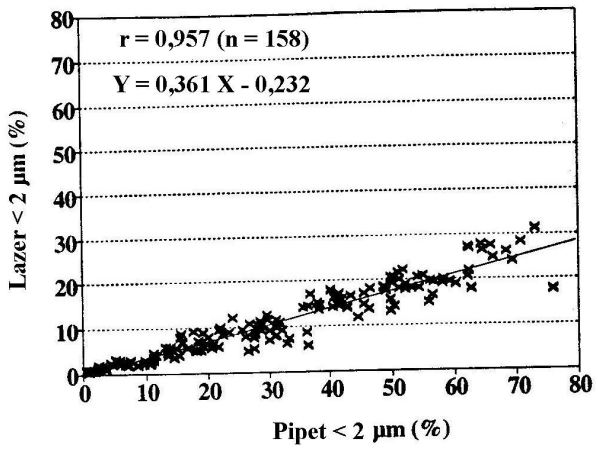
Loizeau vd., 1994 (14), 18 adet ince taneli gölsel sediman örneği üzerinde Coulter marka, LS-100 model lazer kırınım cihazı ve pipet yöntemiyle elde ettikleri kil yüzdelerini karşılaştırmışlardır. Coulter LS-100 cihazı 4 mW gücünde ve λ= 0,750 µm dalga boyunda lazer ışınları üreterek düşük, orta ve yüksek açılı ışınları değerlendirebilecek üç ayrı dedektör dizilimi ile mercek değiştirmeksizin bir seferde 0,4 ile 900 µm aralığındaki taneleri ölçebilmektedir. Söz konusu araştırmacılar, örneklerini, 50 ^{0}C etüvde 48 saat boyunca beklettikten sonra 10 ml deiyonize su içerisine boşaltıp, 5 dakika boyunca ultrasonik enerji uygulayarak ayrıştırmışlar ve lazer kırınım analizlerinde, havası alınmış çeşme suyu kullanmışlardır. Loizeau vd., 1994 (14)'nin hem Fraunhofer hem de Mie kuramına göre belirledikleri lazer kırınım kil yüzdesi ile pipet kil yüzdelerinin karşılaştırılmasından elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.10'da görülmektedir. Adı geçen araştırmacılar, Mie kuramına göre yapılan hesaplamalarda, saptırma indisi için 1,56 değerini kullanmışlar, ancak emme katsayısını kaç aldıklarını belirtmemişlerdir.



Şekil 2.10. Fraunhofer ve Mie kuramları kullanılarak belirlenmiş lazer kırınım ve pipet kil yüzdelerinin karşılaştırılması (14)

Loizeau vd., 1994 (14), Şekil 2.10'da görülen karşılaştırma sonucunda, Mie kuramı ile hesaplanan kil yüzdesi ile pipet kil yüzdesi arasında ilişkinin belirleme katsayısını R^2 = 0,69, Fraunhofer kuramı ile hesaplanan kil yüzdesi ile pipet kil yüzdesi arasındaki ilişkinin belirleme katsayısını ise R^2 = 0,68 olarak elde etmişlerdir. Adı geçen araştırmacılar, her iki yöntem arasındaki ilişkiyi gösteren eşitliği ise vermemişlerdir.

Konert vd., 1997 (15), 158 adet akarsu, göl ve "aeolian" kökenli sediman örnekleri üzerinde Frtisch marka, A22 model cihaz ile pipet yönteminin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Frtisch A22 cihazı, odak uzaklığı 9 ve 474 mm olan iki mercek ile 0,16–1250 µm aralığındaki taneleri ölçebilmektedir (15). Söz konusu araştırmacılar, tane büyüklüğü ölçümlerinden önce, örneklerine önişlem uygulayarak, karbonattan ve organik maddelerden arındırmışlar ve lazer kırınım analizlerinde havası alınmış deiyonize su kullanmışlardır. Konert vd., 1997 (15) 'nin lazer kırınım ve pipet yöntemleri ile belirlenen kil yüzdelerinin karşılaştırılmasından elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Lazer kırınım ve pipet yöntemleriyle belirlenen kil (< 2 µm) yüzdeleri arasındaki ilişki (15)

Konert vd., 1997 (15) tarafından, her iki yöntem ile belirlenen kil yüzdeleri arasındaki ilişki Y = 0,361X – 0,232, bu ilişkiyi yansıtan belirleme katsayısı ise R^2 = 0,915 olarak belirlenmiştir. Adı geçen araştırmacılar, lazer kırınım ve pipet yöntemleri ile belirlenen kil yüzdeleri arasındaki farkı, tane morfolojisine dayandırmışlardır. Söz konusu araştırmacılar, levha şeklindeki kil tanelerinin, su içerisinde, küre şeklindeki bir taneye göre daha yavaş çöktüğünü belirtmişler ve levha şeklindeki tanelerin olduğundan daha küçük ölçüldüğünü ileri sürmüşlerdir. Konert vd., 1997 (15), disk şeklindeki tanelerin bir sıvı içerisindeki çökme hızını veren Lerman vd., 1974 (8)'nin önerdiği eşitlikleri (Bkz. Eş, 2.26), su içerisinde aynı hızda çöken disk ve küre şeklinde tanelerin yarıçapları arasındaki oranı verecek şekilde tekrar düzenlemişlerdir. Bu eşitlikler aşağıda görüldüğü gibidir.

$$\frac{r}{a} = 0{,}94\sqrt{R} \qquad [2.27]$$

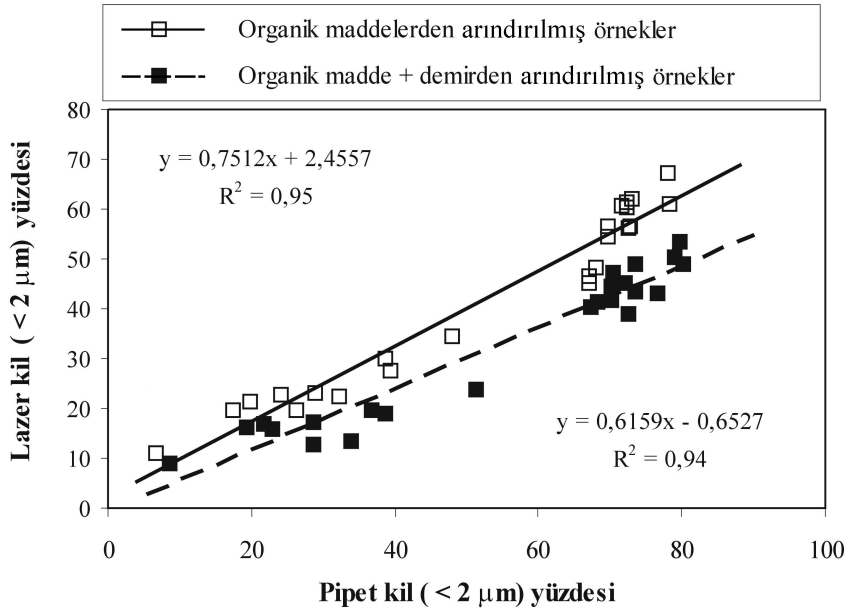
$$\frac{r}{a} = 1{,}15\sqrt{R} \qquad [2.28]$$

Yukarıdaki eşitliklerde, r : kürenin yarıçapı, a: diskin yarıçapı, R ise şekil oranını (kalınlık / yarıçap) ifade etmektedir. Eşitlik 2.27, su içerisinde geniş yüzeyi boyunca (geniş yüzey hareket yönüne dik) çöken, Eşitlik 2.28 ise yanlamasına (dar kenarı boyunca) çöken disk şeklindeki taneler için geçerlidir (15).

Konert vd., 1997 (15), bir örneğin SEM fotoğrafından, yaklaşık 10 µm çapında (a = 5 µm) ve 0,36 µm kalınlığında levha şeklindeki bir kil tanesinin kalınlık oranını R = 0,072 olarak, Eşitlik 2.27 ile r/a oranını ise 0,252 olarak hesaplamışlardır. Daha sonra, 2 µm çapındaki bir kürenin 7,9 µm çapında ve 0,29 µm kalınlığında levha şeklindeki bir tane ile aynı hızda çökeceğini hesaplamışlardır. Aynı kil levhasının yanlamasına (dar kenarı boyunca) düştüğünde ise Eşitlik 2.28 ile, 2 µm çapındaki bir kürenin 6,5 µm çapında ve 0,23 µm kalınlığındaki kil levhasına karşılık geldiğini hesaplamışlardır. Konert vd., 1997 (15), pipet yönteminin lazer kırınım yöntemine göre kil yüzdesini daha yüksek belirlemesinin bu hesaplamalar ile birlikte açıklandığını ifade etmişlerdir. Konert vd., 1997 (15), tane morfolojisinin yanı sıra, tane yoğunluğunun da pipet yönteminin sonuçlarını etkilediğini belirtmişlerdir. Adı geçen araştırmacılar, tane şekli küreden uzaklaştığı ve tane yoğunluğu heterojen olduğu sürece, lazer kırınım yöntemi ile ölçülen tane büyüklüğünün, pipet yöntemi ile ölçülenden daima faklı olacağını ileri sürmüşlerdir.

Muggler vd., 1997 (16), Coulter marka, LS 230 model lazer kırınım cihazıyla elde ettikleri kil yüzdesini, pipet kil yüzdesiyle karşılaştırmışlardır. Coulter LS 230 cihazı 5 mW gücünde ve λ = 0,750 µm dalga boyunda lazer ışınları üretmektedir. Söz konusu araştırmacılar, analizlerinde Mie kuramını uygulamışlar ve zemin tanelerinin saptırma indisi için 1,56, ışın emme katsayısı için ise 0,15 değerlerini kullanmış olup, örneklerini normal çeşme suyu kullanarak analiz etmişlerdir. Adı geçen

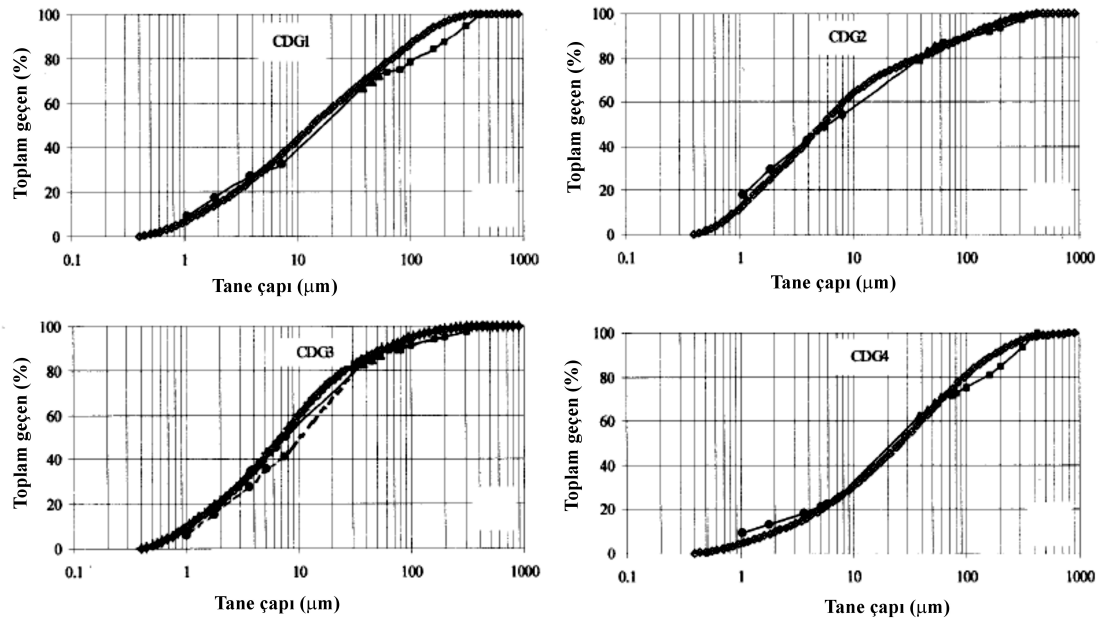
araştırmacılar, çalışmalarında, aynı jeolojik kökenden alınmış 23 adet zemin örneğini hava şartlarında kurutup ufaladıktan sonra 2 mm elekten geçirip iki farklı yöntemle ön-işlem uygulamışlardır. Birinci yöntemde, örneklerini organik maddelerden, ikinci yöntemde ise, organik maddelerden ve demirden arındırmışlardır. Bu işlemlerden sonra, 30 ml ayrıştırma maddesi (%5'lik sodyum pirofosfat) içerisinde gece boyu çalkalayarak örneklerin ayrışmasını sağlamışlardır. Muggler vd., 1997 (16)'nin organik maddelerden ve organik madde + demirden arındırarak hazırladıkları örnekleri üzerinde elde ettikleri lazer-kil ve pipet-kil yüzdelerinin karşılaştırılması Şekil 2.12'de verilmiştir.



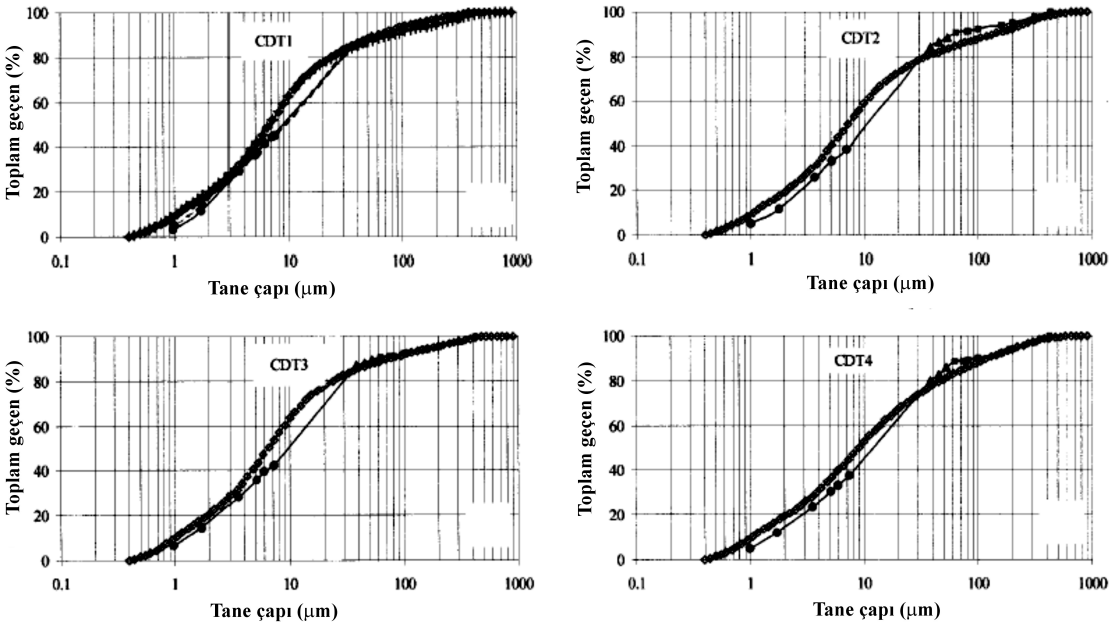
Şekil 2.12. Organik maddelerden ve organik madde + demirden arındırılmış örnekler üzerinde elde edilmiş lazer-kil ve pipet-kil yüzdeleri arasındaki ilişki (Muggler vd., 1997'nin çizelge halinde sundukları verilerden yararlanılarak hazırlanmıştır) (16)

Muggler vd., 1997 (16)'nin, Organik maddelerden arındırılmış örnekler üzerinde elde ettikleri lazer-kil ve pipet-kil ve yüzdeleri arasındaki ilişkinin belirleme katsayısı R^2 = 0,95, organik madde + demirden arındırılmış örnekler üzerinde elde ettikleri belirleme katsayısı R^2 = 0,94'dür. Adı geçen araştırmacılar, aynı jeolojik kökenden alınan örnekler üzerinde her iki yöntem ile belirlenen kil yüzdeleri arasındaki ilişkinin temsil edici olmasının beklenen bir sonuç olduğunu ifade etmişlerdir.

Wen vd., 2002 (5), 8 adet örnek üzerinde, Coulter marka, LS-100 model lazer kırınım cihazının sonuçlarıyla elek analizi ve hidrometre yöntemlerinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Araştırmacıların çalışmasında kullandığı örneklerin, dört tanesi tamamen ayrışmış, killi, orta ve kaba taneli granit, diğer dört tanesi ise, tamamen ayrışmış ince taneli küldür. Wen vd., 2002 (5), hidrometre deneyi yapılacak örnekleri, 425 µm elekten ıslak olarak eleyip, elek altına geçen malzemeyi 4 gr/l sodyum hegzametafosfat (Calgon) çözeltisi içerisinde bir gece boyu beklettikten sonra 425 ve 63 µm eleklerden yıkayarak tekrar elemişler ve 63 µm eleğin altına geçen malzemeye hidrometre deneyi uygulamışlardır. Adı geçen araştırmacılar, lazer kırınım analizi yapılacak örnekleri ise, 425 µm elekten ıslak olarak eleyip, elek altına geçen malzemeyi sodyum hegzametafosfat çözeltisi içerisinde 30 dakika boyunca beklettikten sonra, bu örnekleri, 5 dakika boyunca karıştırıp, örnek haznesinin içerisine boşaltmışlardır. Wen vd., 2002 (5)'nin 8 adet örnek üzerinde yaptıkları bu karşılaştırmadan elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.13 a ve b'de verilmiştir.

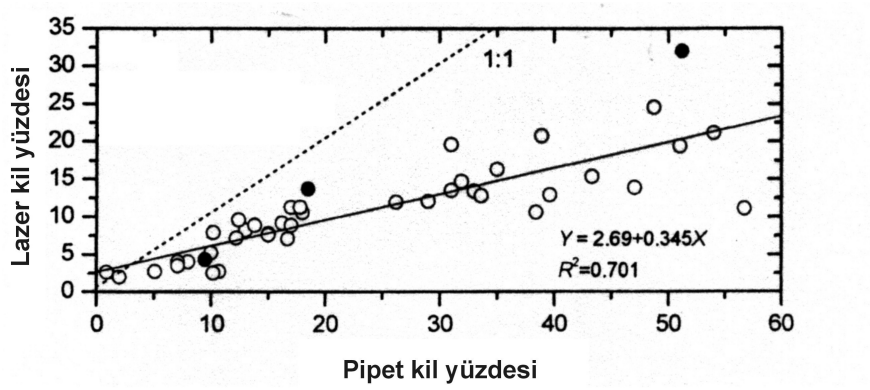


Şekil 2.13. a) Ayrışmış granit numuneleri üzerinde, lazer kırınım ve elek analizi – hidrometre yöntemleri ile belirlenmiş tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin karşılaştırılması (Semboller: ◇ Lazer kırınım yöntemi; ● Hidrometre yöntemi) (5)



Şekil 2.13. b) İnce taneli kül numuneleri üzerinde, lazer kırınım ve elek analizi – hidrometre yöntemleri ile belirlenmiş tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin karşılaştırılması (Semboller: ◇ Lazer kırınım yöntemi; ● Hidrometre yöntemi) (5)

Eshel vd., 2004 (18), Kaliforniya (ABD)'dan alınmış 42 adet zemin örneği üzerinde Coulter marka, LS-230 model lazer kırınım cihazının sonuçları ile pipet yönteminin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, lazer kırınım analizlerinde Mie kuramını uygulamışlar ve zemin tanelerinin saptırma indisi için 1,50, emme katsayısı için 0,2 değerlerini seçmişlerdir. Söz konusu araştırmacılar, pipet deneyi yapılacak örnekleri, bir gece boyu 50 g/l sodyum hegzametafosfat çözeltisi içerisinde bekletilmişler ve ardından 53 µm elekten yıkama yoluyla eleyerek kum tanelerinden arındırmışlardır. Lazer kırınım analizi yapılacak örnekleri ise, 20 ml hacmindeki ışık titreşmesi uygulayan bir şişenin (scintillation vial) içerisinde 10 ml sodyum hegzametafosfat çözeltisi (50-g/l) ile birlikte bir gece boyu bekletilmişler ve ardından örnek haznesine boşaltıp 1 dakika boyunca ultrasonik enerji uygulayarak ayrışmasını sağlamışlardır. Adı geçen araştırmacılar, lazer kırınım analizlerinde deiyonize su kullanmışlardır. Eshel vd., 2004 (18)'nin lazer kırınım ve pipet yöntemleri ile elde ettikleri kil yüzdelerinin karşılaştırılması Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Lazer kırınım ve pipet yöntemleriyle belirlenen kil yüzdelerinin karşılaştırılması (18)

Eshel vd., 2004 (18), 42 adet zemin örneği üzerinde, lazer kırınım ve pipet yöntemleri ile belirlenen kil yüzdeleri arasındaki ilişkiyi Y = 0,345X + 2,69 olarak, belirleme katsayısını ise R^2 = 0,70 olarak elde etmişlerdir. Bu eşitlikte, Y, lazer kil yüzdesini, X ise pipet kil yüzdesini ifade etmektedir. Adı geçen araştırmacılar, lazer kırınım ve sedimantasyona dayalı yöntemler (hidrometre ve pipet) ile belirlenen sonuçlar arasındaki farkları aşağıda sıralanan nedenlere dayandırmışlardır: (i) her iki yöntemin kendi doğasından kaynaklanan hatalar, (ii) sedimantasyona dayalı yöntemler tanelerin yoğunluğuna bağlı iken, lazer kırınım yönteminin tanelerin yoğunluğundan bağımsız olması, (iii) Tane morfolojisi.

Eshel vd., 2004 (18), zeminlerin değişik yoğunluğa sahip tanelerden meydana gelmesine karşın, sedimantasyona dayalı yöntemlerde tane büyüklüğü hesaplanırken ortalama bir tane yoğunluğu kullanıldığını ve tanelerin gerçek yoğunluğunun kabul edilen bu ortalama yoğunluktan sapmasının, meydana gelen hataların temel kaynaklarından birisi olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle, yöntemler arasındaki farklılığı meydana getiren birinci etkenin, zeminlerin saptırma indisini ve tane yoğunluğunu etkileyen mineralojik bileşenler olduğunu ileri sürmüşlerdir. Adı geçen araştırmacılar, diğer bir etkenin ise tane morfolojisi olduğunu ve tanelerin küre şeklinden uzaklaşmalarının sonuçları etkileyeceğini belirtmişlerdir.

Van Dongen, 1989 (39) ise, 68 adet zemin örneği üzerinde, Malvern Master Sizer lazer kırınım cihazının sonuçları ile pipet yönteminin sonuçlarını karşılaştırmış ve

her iki yöntem ile belirlediği kil yüzdeleri arasındaki ilişkiyi Y = 0,185X + 0,6619 şeklinde elde etmiştir. Bu ilişkinin belirleme katsayısını ise R^2 = 0,72 olarak elde etmiştir. Adı geçen araştırmacı lazer kırınım analizlerinde Mie kuramını uygulamıştır.

Yukarıda adı geçen çalışmalarda genellikle pipet yönteminin kullanıldığı ve pipet kil yüzdesinden, lazer kırınım kil yüzdesinin tahmin edilmesi için regresyon analizlerinin yapılmış olduğu görülmektedir. Bu regresyon analizleriyle ortaya konulan eşitliklerin iki pratik yararının olduğu düşünülmektedir. Bunlar, (i) son derece pahalı bir cihaz olan, ancak buna karşın pipet/hidrometre yöntemlerine göre daha doğru sonuç verdiği düşünülen lazer kırınım cihazına sahip olmayan uygulayıcılar, söz konusu eşitlikleri kullanılarak lazer kırınım kil yüzdesini belli bir doğrulukla tahmin edilebileceklerdir, (ii) literatürde, klasik sedimantasyon yöntemleri ile belirlenen kil (< 2 μm) yüzdesini veya 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesini içeren çeşitli regresyon eşitlikleri, bağıntılar, abaklar veya ölçütler bulunmasına karşın, lazer kırınım yöntemi ile belirlenen kil yüzdesi ile diğer zemin parametreleri arasında geliştirilmiş bir ilişki henüz ortaya konulmamıştır. Bu nedenle, kil yüzdesini lazer kırınım yöntemiyle belirlemiş olup, literatürde mevcut bulunan eşitlik, bağıntı, abak veya ölçütleri kullanmak isteyen uygulamacılar, her iki yöntem arasında geliştirilmiş olan eşitlikleri kullanarak, lazer kırınım yöntemi ile belirledikleri kil yüzdesini yaklaşık bir doğrulukla pipet veya hidrometre kil yüzdesine dönüştürerek söz konusu eşitlik, bağıntı, abak veya ölçütleri kullanabileceklerdir.

Yukarıda belirtilen eşitlik, ölçüt ve abaklara birkaç örnek verilecek olursa, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için Andrews ve Martin, 2000 (40) tarafından önerilen ölçütte, değerlendirilen parametreler likit limit ve kil (< 2 μm) yüzdesidir.

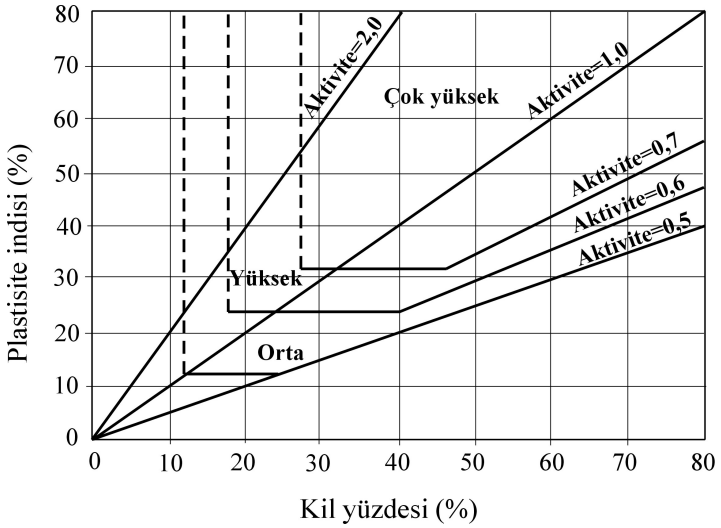
Yine zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan ölçütlerden birisi olan Çin ölçütünde, likit limit, doğal su içeriği ve sıvılaşma indisinin yanı sıra, parametrelerden birisi de 0,005 mm'den küçük tanelerin yüzdesidir (4).

Bir başka örnek, zeminlerin şişme potansiyelini tahmin etmek için Seed vd., 1962 (41)'nin önermiş olduğu eşitlik (Eş. 2.29) gösterilebilir. Bu eşitlikte, kil yüzdesi bir parametre olarak yer almaktadır.

$$S = (3{,}6x10^{-5}) \times (A^{2,44}) \times (C^{3,44}) \qquad [2.29]$$

Eş. 2.28'de, S şişme potansiyelini, A aktiviteyi ve C kil (< 2 μm) yüzdesini göstermektedir.

Diğer bir örnek ise, Van der Merwe, 1964 (42) tarafından zeminlerin şişme potansiyelini tahmin etmek için geliştirilmiş olan ve kil yüzdesinin bir parametre olarak yer aldığı abak (Şekil 2.15) verilebilir.



Şekil 2.15. Van der Merwe, (1964) tarafından şişme potansiyelinin belirlenmesi için önerilen abak (42)

Lazer kırınım ve pipet yöntemleri ile belirlenen kil yüzdelerinin karşılaştırılması üzerine çalışan başlıca araştırmacıların, çalışmalarında kullandıkları lazer kırınım cihazı ve sedimantasyon yöntemi, uyguladıkları optik kuram ve optik parametreler, karşılaştırmada kullandıkları örnek sayısı, karşılaştırma sonucunda elde ettikleri eşitlikler ve belirleme katsayıları (R^2) toplu halde Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Lazer kırınım ve pipet yöntemleri ile belirlenen kil yüzdeleri arasında kurulan ilişkiler

Araştırmacı	lazer kırınım cihazı	Sedimantasyon yöntemi	Optik kuram	Optik parametreler	Örnek sayısı (n)	Eşitlik Y: Lazer kil (%) X : Pipet/hid. kil (%)	Belirleme katsayısı (R^2)
Mc Cave vd., 1986 (13)	Malvern 3600 E	Pipet	---	---	n = 50	Y = 0,161X + 0,207 (RMA) (100 mm mercek)	R^2 = 0,56
					n = 71	Y = 0,217X + 1,125 (RMA) (63 mm mercek)	R^2 = 0,56
Van Dongen, 1989 (39)	Malvern Maser Sizer	Pipet	Mie	---	n = 68	Y = 0,185X + 0,6619	R^2 = 0,72
Loizeau vd., 1994 (14)	Coulter LS 100	Pipet	Mie	n_r = 1,56	n = 18	---	R^2 = 0,69
Loizeau vd., 1994 (14)	Coulter LS 100	Pipet	Fraunhofer	---	n = 18	---	R^2 = 0,68
Konert vd., 1997 (15)	Frtisch A22	Pipet	---	---	n = 158	Y = 0,361X – 0,232	R^2 = 0,92
Muggler vd., 1997 (16)	Coulter LS 230	Pipet	Mie	n_r = 1,56 n_i = 0,15	n = 23	Y = 0,7512X +2,4557 Y = 0,6159X – 0,6527	R^2 = 0,95 R^2 = 0,94
Eshel vd., 2004 (18)	Coulter LS 230	Pipet	Mie	n_r = 1,50 n_i = 0,20	n = 42	Y = 0,345X + 2,69	R^2 = 0,70

2.4. Lazer Kırınım Yöntemi Üzerine Yapılmış Başlıca Çalışmalar

Lazer kırınım yöntemi ile zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde, örnek alınması veya azaltılması, analizde kullanılan suyun niteliği, analizde uygulanacak optik kuram, Mie kuramı uygulandığında gerekli olan optik parametreler, örneklerin ayrıştırılması ve tane şekli gibi, deney sonuçlarını etkileyebilecek bazı konular bulunmaktadır. Bahsedilen bu konular, bu çalışmada uygulanacak deney yönteminin belirlenmesi bakımından önemli görüldüğünden, bu konular üzerine yapılmış başlıca çalışmalar ve ileri sürülmüş bazı görüşler aşağıda ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

2.4.1. Örnek alınması veya azaltılması

Lazer kırınım analizlerinde örnek miktarı tartılarak değil, lazer ışınlarının azalma oranına göre belirlenmektedir. Sistemde örnek yokken, lazer ışınlarının tamamı merkezi dedektöre odaklanmakta (Bkz. Şekil 2.1) ve yoğunluğu ölçülmektedir. Örnek, sisteme dahil edildikten sonra lazer ışınlarının bir kısmı taneler tarafından yayıldığından ve/veya emildiğinden (22) merkezi dedektöre ulaşan ışınların yoğunluğu azalmaktadır. Sistem tarafından ışınların azalma oranı hesaplanmakta ve buradan sistemde bulunan örnek miktarı belirlenmektedir. Sağlıklı bir ölçüm yapılabilmesi için ışın azalma oranının %10 – 30 arasında olması gerekmektedir (22). Bunun için gereken örnek miktarı ise yaklaşık 0,1 ile 0,5 g arasında değişmektedir. Bu kadar az miktardaki örneğin, bütünü temsil edecek şekilde alınması veya azaltılması gerekmektedir. Bu konuda karşılaşılan en büyük güçlük ise, örnek miktarının ancak sisteme dahil edildikten sonra, ışın azalma oranına göre belirleniyor olmasıdır.

Yapılan kaynak araştırması sonucunda, lazer kırınım yöntemi ile tane büyüklüğü ölçümü üzerine çalışan bazı araştırmacıların (örneğin, McCave vd., 1986 (13), Konert ve Vandenberghe, 1997 (15), Chappel, 1998 (20), Eshel vd., 2004 (18)) örnek alma veya azaltma yöntemine yeterince değinmediği, bazılarının ise uyguladıkları yöntemi yeterince açıklamadıkları saptanmıştır. Örneğin, Loizeau vd., 1994 (14),

örneklerini kuru bölme yöntemi ile elde ettiklerini ifade etmişler, ancak çok az bir örneği bölmek için nasıl bir araç kullandıklarını belirtmemişlerdir. Vitton ve Sadler, 1997 (17), yeterli örnek elde edinceye kadar bölgeçleme yöntemini uyguladıklarını ifade etmişler ancak, 0,1 – 0,5 gram gibi az bir örneği nasıl bir bölgeç kullanarak elde ettiklerini belirtmemişlerdir.

Örnek alma ve/veya azaltma yönteminin öneminden bahseden Burman vd., 1997 (19) ise, çok küçük miktardaki bir örneğin bütünü temsil etmesinin sorgulanabilir nitelikte olduğunu ifade etmişlerdir. Burman vd., 1997 (19), ıslak veya süspansiyon halindeki bir örnekten lazer kırınım analizi için temsili alt-örnek alınmasının uygun bir yöntem olmadığını ifade etmişler ve killi bir zemin örneğinden kuru veya nemli durumda iken alt-örnek alınmasının daha uygun olacağını ileri sürmüşlerdir. Adı geçen araştırmacılar, kuru haldeki örneğin kap içerinde gruplanmış olma ihtimaline karşı, alt-örnek alınmadan önce dikkatli bir şekilde karıştırılarak, homojen hale getirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Söz konusu araştırmacılar, kap içerisinde bulunan örneklerin, mekanik olarak veya uygun bir araç yardımı ile karıştırılmak suretiyle homojen hale getirilebileceğini belirtmişler ve kendilerinin elektrikli karıştırıcı kullanarak tekrar edilebilir sonuçlar veren alt-örnekler elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

2.4.2. Analizde kullanılan suyun niteliği

Lazer kırınım yöntemi ile zemin örneklerinin analiz edilmesinde bazı araştırmacıların farklı niteliklerde su kullandıkları saptanmıştır. Örneğin, Buurman vd., 1997 (19) ile Mugler vd., 1997 (16), çeşme suyu kullanırken, Chappel, 1998 (20), hem çeşme suyu hem de damıtık su kullanmış, Eshel vd., 2004 (18) deiyonize su, Konert ve Vandenberghe, 1997 (15) havası alınmış deiyonize su, Beuselinck vd., 1998 (10) havası alınmış damıtık su kullanmışlardır. Loizeau vd., 1994 (14) ise havası alınmış çeşme suyu kullanmışlardır. Loizeau vd., 1994 (14), çeşme suyunun kalitesine bağlı olarak, karıştırma esnasında çapı 150 – 500 μm arasında değişen hava kabarcıklarının oluşabileceğini belirterek havası alınmış su kullanılmasının gerekçesini açıklamıştır. Chappel, 1998 (20) ise, çeşme suyu kullanarak yaptığı analizlerde, damıtık su

kullanarak yaptığı analizlere oranla, öreklerin daha iyi ayrıştığını belirlemiş ve analizlerde çeşme suyu kullanılmasının daha uygun olacağını ifade etmiştir. Söz konusu araştırmacı, basınç altında tutulan çeşme suyunun hava kabarcıkları oluşturabileceğini de ifade ederek, suyu numune haznesine yavaşça ilave etmek suretiyle bu sorunun en aza indirilebileceğini belirtmiştir. Malvern kullanıcı el kitabında ise (22), ölçülecek örnek, hazneye ilave edilmeden önce su içerisinde bulunan hava kabarcıklarının çıkmasını sağlamak için pompa ve karıştırıcı %50, ultrasonik enerji ise %100 seviyede çalıştırılarak birkaç dakika beklenilmesi tavsiye edilmiştir. Buurman vd., 1997 (19), kalsiyum bikarbonat bakımından doygun çeşme suyu kullanıldığında örneklerde topaklanma riskinin olduğunu, ancak bir ayrıştırma maddesi ile birlikte ultrasonik enerji uygulandığında bu riskin ortadan kaldırılabileceğini öne sürmüşlerdir.

2.4.3. Optik kuram

Lazer kırınım yönteminde, dedektörün üzerine düşen ışınların yoğunluğundan (ve kırılma açısından) tane büyüklüğü dağılımının hesaplanması için iki farklı optik kuram bulunmakta olup (10), bunlar Fraunhofer yaklaşımı ve Mie kuramıdır. İlk optik modelin temelini oluşturan Fraunhofer yaklaşımı, adını Alman bilim adamı Joseph von Fraunhofer (1787-1826)'dan almıştır (43). Fraunhofer yaklaşımında, bütün tanelerin lazer ışınlarının dalga boyundan büyük ($d>>\lambda$), iki boyutlu, ince, dairesel disk şeklinde olduğu, Mie kuramında ise, bütün tanelerin saydam ve küre şeklinde olduğu kabul etmektedir (12). ISO 13320-1, 1999'de (12) Fraunhofer yaklaşımının, çapı ışınların dalga boyundan 40 kat daha büyük olan taneler için ($d > 40\ \lambda$) geçerli olduğu belirtilmiştir. Fraunhofer yaklaşımı ile Mie kuramı arasındaki en önemli farklardan birisi de, Mie kuramında, ölçümü yapılacak tanelerin ve içerisinde bulundukları ortamın (zeminler için su) optik özelliklerinin bilinmesine gerek duyulurken, Fraunhofer yaklaşımında bunlara gerek duyulmamasıdır. Bir malzemenin optik özellikleri, söz konusu malzemenin ışınları saptırma indisini (n_r) ve emme katsayısını (n_i) ifade etmektedir (44). Saptırma indisinin ve emme katsayısının ne olduğunu kavramak için aşağıdaki örnek açıklayıcı olmaktadır. Saptırma indisi 1,498 ve emme katsayısı 0,0 olan şeffaf cam küreler, saptırma indisi

yine 1,498 ve emme katsayısı 0,0 olan benzen içerisine atılırsa cam küreler görünmezler. Bu bir indis eşleşmesi durumudur. Tanelerin saptırma indisi, içerisinde bulundukları ortamın saptırma indisinden ne kadar büyük olursa daha çok ışın kırılmaktadır (45).

Hesseman, 2002 (26), lazer kırınım cihazlarının geliştirildiği 1970'li yıllarda bilgisayarların gücünün Mie kuramını kullanmaya yeterli olmadığını ve bu nedenle bir çok üreticinin Fraunhofer yaklaşımını kullandığını, ancak günümüzde buna devam etmenin haklı bir gerekçesinin kalmadığını ifade etmiştir. Adı geçen araştırmacı, Fraunhofer yaklaşımında tanelerin ışık geçirmeyen, iki boyutlu, dairesel siyah diskler olarak modellendiğini belirtmiş ve Fraunhofer yaklaşımının, tane büyüklüğü lazer ışınlarının dalga boyundan daha büyük olduğunda ($d>>\lambda$) uygulanabileceğini ifade etmiştir. Söz konusu araştırmacı, tane büyüklüğü lazer ışınlarının dalga boyuna yaklaştığında ($d \approx \lambda$) veya tanelerin saptırma indisi, içinde bulundukları ortamın saptırma indisine yakın olduğunda Mie kuramının en iyi çözümü verdiğini belirtmiştir.

Lazer kırınım yöntemi ile zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaların bazılarında Fraunhofer yaklaşımı kullanılırken (5,10), bazılarında ise Mie kuramı kullanıldığı saptanmıştır (16,18,19). Konert ve Vandenberghe, 1997 (15), Fraunhofer yaklaşımının küre şeklinde olmayan kil taneleri için daha uygun olduğunu ifade etmesine karşın, Loizeau vd., 1994 (14) çalışmasında, hem Fraunhofer yaklaşımını hem de Mie kuramını uygulamış olup, tanelerin çapı, lazer ışınlarının dalga boyuna yakın olduğunda Fraunhofer yaklaşımının uygun olmadığını belirtmiştir. Planz, 1984 (46), tanelerin büyüklüğü, lazer ışınının dalga boyuna yakın veya daha küçük olduğunda kırınım deseninin karmaşık bir hale geleceğini ve bu durumda tane büyüklüğü dağılımının tahmin edilmesi için Mie kuramının daha uygun olduğunu ifade etmiştir.

Bu görüşler ile birlikte, Hoff ve Bott, 1999 (47), 10 µm'nin altında Mie kuramının daha kesin sonuçlar verdiğini, Rawle, 2003 (25), Fraunhofer yaklaşımının $d=5\lambda$'dan daha büyük tanelere uygulanabileceğini, Bayvel ve Jones, 1981 (48), Fraunhofer

yaklaşımıyla yapılan ölçümlerde, d =10 λ'nın altında gittikçe artan bir şekilde hata meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Birçok bilimsel çalışmada yaygın olarak kullanılan Coulter LS ve Malvern cihazlarının ürettiği lazer ışınlarının dalga boyu sırasıyla λ = 0,750 μm ve λ = 0,633 μm'dir. Bu çalışmada kullanılan Malvern cihazının ürettiği lazer ışınlarının dalga boyu dikkate alındığında, Fraunhofer yaklaşımı ile ölçülecek tanelerin ISO 13320-1, 1999 (12)'e göre en az 0,633 x 40 = 25 μm'den, Bayvel ve Jones, 1981 (48)'a göre 0,633 x 10 = 6,3 μm'den, Rawle, 2003 (25)'a göre ise 0,633 x 5 = 3,2 μm'den büyük olması gerekmektedir. Ayrıca, Bayvel & Jones, 1981 (48), De Boer vd., 1987 (43) ve Buurman vd., 1997 (19), Fraunhofer yaklaşımı ile kil boyutundaki tanelerin yüzdesinin doğru belirlenmesinin mümkün olmadığını öne sürmüşlerdir.

2.4.4. Optik parametreler (saptırma indisi ve emme katsayısı)

Saptırma indisi

Lazer kırınım analizlerinde Mie kuramı uygulanacağında bilgisayar programına, ölçülecek tanelerin saptırma indisinin ve emme katsayısının ve tanelerin içinde bulunduğu ortamın saptırma indisinin girilmesi gerekmektedir. Zemin örnekleri genellikle su içerisinde ölçülmekte ve suyun saptırma indisi 1,33 olarak alınmaktadır (12). Bazı minerallerin saptırma indisleri ise Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6'dan görüldüğü gibi, minerallerin saptırma indisleri birbirinden farklıdır ve hematit hariç diğerlerininki 1,48 – 1,74 aralığında değişmektedir. Zemin örnekleri, genellikle birkaç mineralin bileşiminden meydana gelmesine karşın, bilgisayara sadece tek bir saptırma indisi girilebilmektedir. Bu durumda, zemin örneğini temsil edecek tek bir saptırma indisi seçme zorunluluğu doğmaktadır. Bunun için, lazer kırınım analizinden önce, XRD analizi yapılarak örneklerin mineral bileşenlerinin belirlenmesi gerektiği gibi bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Ancak, oldukça pahalı olduğundan, lazer kırınım analizi yapılacak her örneğe önceden XRD analizinin yapılmasının mümkün ve gerçekçi olmadığı ortadadır. Üstelik, XRD

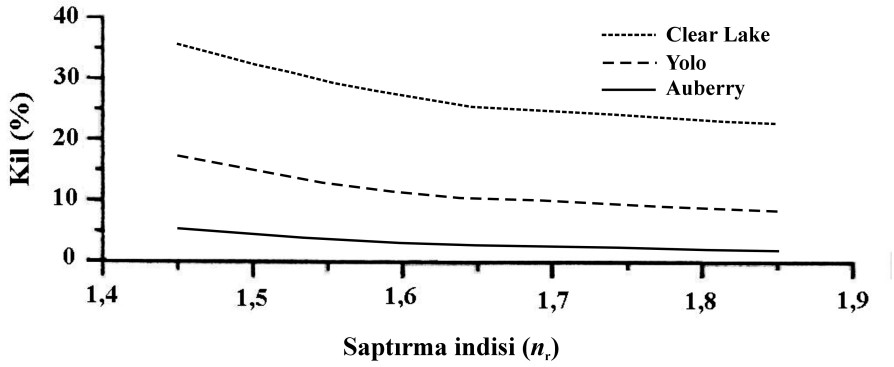
analizi yapılsa bile, zemin örnekleri genellikle birden fazla mineralin bileşiminden meydana geldiğinden, yine örneği temsil edecek tek bir refraktif indisin seçilmesi gerekecektir.

Çizelge 2.5. Bazı minerallerin saptırma indisleri (12,22)

Mineral	Saptırma indisi (n_r)	
	ISO 13320-1 (12)	Malvern (22)
Albit	–	1,53 – 1,54
Andezin	–	1,54 – 1,56
Anortit	–	1,58 – 1,59
Apatit	1,63 – 1,67	–
Brusit	1,56 – 1,60	–
Kalsit	1,49 – 1,74	1,49 – 1,74
Dolomit	1,50 – 1,68	–
Gibsit	1,56 – 1,60	–
Jips	1,52 – 1,53	1,52 – 1,53
Hematit	2,90 – 3,20	2,94 – 3,22
Illit	1,54 – 1,61	1,54 – 1,61
Kaolinit	1,53 – 1,57	1,53 – 1,58
Mika	1,53 – 1,70	1,53 – 1,70
Montmorillonit	–	1,48 – 1,64
Kuvars	1,54 – 1,55	1,54 – 1,55

Konu üzerine çalışan araştırmacıların, lazer kırınım analizlerinde minerallerin genelini yaklaşık bir doğrulukla temsil edecek ortalama bir saptırma indisi kullandıkları belirlenmiştir. Örneğin Loizeau vd., 1994 (14), Buurman vd., 1997 (19) ve Muggler vd., 1997 (16), saptırma indisi için 1,56 değerini seçerken, Eshel vd., 2004 (18) ise 1,50 değerini almıştır. Saptırma indisinin analiz sonuçları üzerinde etkili olup olmadığı konusunda, bazı araştırmacıların birbiri ile çelişen ifadeleri olduğu saptanmıştır. Örneğin, Buurman vd., 1997 (19), zemin örneklerinin genellikle kil minerallerinden ve kuvarstan meydan geldiğini ve Deer vd., 1962 (49)'nin verdiği değerlere (smektit: 1,48 – 1,61, illit: 1,54 – 1,57, kaolinit: 1,55 – 1,56, vermikülit: 1,52 – 1,56 ve kuvartz: 1,54) dayanarak bu minerallerin saptırma indislerinin dar bir aralıkta değiştiğini ifade etmiştir. Buurman vd., 1997 (19), saptırma indisinin bu aralıktaki değişiminin, hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ileri sürmüştür. Jillavenkatesa vd., 2001 (28) ise

saptırma indisinin, hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisinin önemli olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Eshel vd., 2004 (18), saptırma indisinin, hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisini araştıran deneyler yapmış ve üç farklı bölgeden alınmış zemin örnekleri üzerinde, saptırma indisi arttıkça kil yüzdesinin azaldığını göstermiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Saptırma indisinin (n_r) kil yüzdesi üzerindeki etkisi (18)

Eshel vd., 2004 (18), Şekil 2.16'da görülen bulgularında dayanarak, saptırma indisinin 1,65'den küçük değerlerinde kil yüzdesinin saptırma indisinden daha çok etkilendiğini belirtmişlerdir. Adı geçen araştırmacılar, lazer kırınım yöntemi, küre şeklinde olmayan tanelerin büyüklüğünü olduğundan fazla ölçtüğünden (Jonasz, 1991 (50)), saptırma indisinin öngörülenden bir miktar daha düşük alınabileceğini ifade etmişlerdir.

Emme katsayısı

Mie kuramı uygulanacağında, gerekli olan optik parametrelerin bir diğeri de tanelerin ışınları emme katsayısıdır (n_i). Bir malzemenin saptırma indisini belirlemek nispeten kolay olsa da, emme katsayısını belirlemek çok daha zordur (28). Bu nedenle, ilgili kaynaklarda zemin minerallerinin emme katsayıları ne yazık ki bulunmamaktadır (19). Ancak, ISO 13320-1, 1999 (12)'de bir çok malzemenin emme katsayısının 0,01 – 0,1 arasında değiştiği belirtilmiştir.

Analizlerinde Mie kuramını uygulayan çeşitli araştırmacıların, emme katsayısı için farklı değerler tercih ettikleri belirlenmiştir. Örneğin, Eshel vd., 2004 (18), emme katsayısı için n_i = 0,2 değerini, Muggler vd., 1997 (16), n_i = 0,15 değerini seçmiştir. Loizeau vd., 1994 (14) ise, saptırma indisini n_r = 1,56 aldığını ifade etmiş, ancak emme katsayısını kaç aldığını belirtmemiştir. Saptırma indisinde olduğu gibi, emme katsayısının da, hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerinde etkili olup olmadığı konusunda bazı araştırmacıların birbiri ile çelişen ifadeleri olduğu saptanmıştır. Örneğin, Eshel vd., 2004 (18), hesaplanan tane büyüklüğü dağılımının emme katsayısından, saptırma indisine oranla daha az etkilendiğini ifade etmiştir. Buurman vd., 1997 (19) ise, emme katsayısının hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisinin (saptırma indisine oranla) çok daha güçlü olduğunu ileri sürmüştür. Benzer şekilde Jillavenkatesa vd., 2001 (28) de, emme katsayısının hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisinin önemli olduğunu öne sürmüştür.

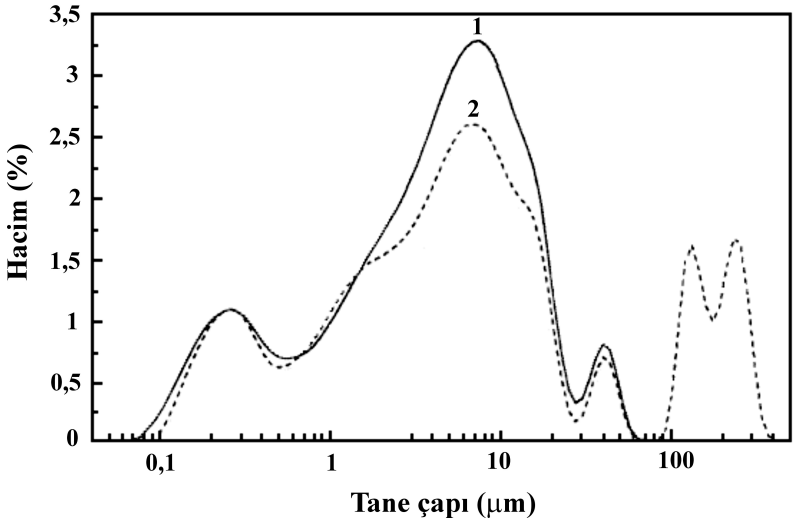
2.4.5. Zemin örneklerinin ayrıştırılması

Hidrometre ve pipet deneyleri için, zemin örneklerinin nasıl ayrıştırılacağı ASTM D 422, 1998 (6) ve BS 1377: Part 2, 1990 (7)'de açıkça belirtilmiştir. Her iki standartta da, 40 g sodyum hegzametafosfatın (Calgon) 1 litre su içerisinde eritilmesi ile hazırlanan çözeltiden her bir deney için 125 ml kullanılması önerilmiştir. Ancak, lazer kırınım deneyinde, zemin örneklerinin ayrıştırılması için uygulanan standart bir yöntem henüz bulunmamaktadır. Malvern kullanıcı el kitabında (22), ultrasonik enerjinin malzemelerin mekanik olarak ayrışmasını sağladığı belirtilmiş, ancak ayrıştırılması zor malzemeler (örneğin killi zeminler) için bir ayrıştırma maddesi (örneğin Calgon çözeltisi) kullanılması tavsiye edilmiştir. Ancak, bu çözeltiden ne kadar ve ne şekilde kullanılması gerektiği belirtilmemiştir. Bazı araştırmacılar (McCave vd., 1986 (13), Chappell, 1998 (20)), Calgon çözeltisi ile birlikte ultrasonik enerji uygulandığında, zemin örneklerinde belli bir süre sonra ayrışmanın tersine dönerek topaklanma meydana geldiğini saptamışlar ve bu nedenle ultrasonik enerji uygulama süresinin kritik olduğunu belirtmişlerdir. Adı geçen araştırmacılar, topaklanmanın meydana gelme nedenleri üzerinde durmamışlardır.

Hidrometre deneyinde topaklanma üzerinde çalışan Nettleship vd., 1997 (51), kil tanelerinin topaklanmasını anlamak için, bir sıvı içerisinde bulunan tanelerin yüzey yüklerinin rolünün anlaşılması gerektiğini belirtmiş ve kil taneleri su içerisine konulduğunda, kil kristalinin yüzeyleri ve kenarlarındaki zıt yüklerin bitişik tanelerin topaklanmasına neden olduğunu ifade etmiştir. Adı geçen araştırmacılar, birbirine bitişik tanelerin yüzeyleri arasında, kısa mesafede van der Waals, uzun mesafede ise elektrostatik çekim kuvvetlerinin, tanelerin su içerisinde birbirine yapışmasına sebep olduğunu ve bunun "topaklanma" olarak adlandırıldığını ifade etmişlerdir. Nettleship vd., 1997 (51), ayrıştırma maddesinin, tanelerin yüzeyini kaplayarak aynı yüzey yüküyle yüklediğini ve böylece birbirine bitişik tanelerin yüzeyleri arasında güçlü bir elektrostatik itme kuvveti meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Söz konusu araştırmacılar, topaklanmanın geniş bir pH aralığında meydana geldiğini, ancak, sadece yüksek pH değerlerinde kil tanelerinin kenarlarının negatif yükle yüklendiğini ve böylece ayrışmanın sağlandığını ileri sürmüşlerdir. Adı geçen araştırmacılar, sodyum karbonat ve sodyum hidroksit gibi maddelerin hem yüzey yüklerini hem de pH'ı arttırarak kil tanelerinin kenarlarının negatif yükle yüklenmesini ve böylece ayrışmalarını sağladığını belirtmişler ve kalsiyum ve magnezyum gibi maddelerin ise yüzey yüklerini azaltarak topaklanmaya sebep olduğunu öne sürmüşlerdir.

Buurman vd., 1997 (19) ise, ön işlem uygulanmadığında ve kalsiyum bikarbonat bakımından doygun çeşme suyu kullanıldığında, killi zeminlerde topaklanma meydana gelme riskinin bulunduğunu ifade etmişlerdir. Adı geçen araştırmacılar, analizden önce veya analiz sırasında ultrasonik enerji uygulayarak topaklanma sorununun üstesinden gelinebileceğini ileri sürmüşlerdir. Buurman vd., 1997 (19), organik karbon ve demirden arındırdıkları bir zemin örneğini, çeşme suyu ile herhangi bir ayrıştırma maddesi kullanmadan ve ultrasonik enerji uygulamadan analiz ettiklerinde lazer kırınım cihazının 100 – 400 μm aralığında taneler tespit ettiğini (Şekil 2.17, 1 no.lu eğri), örnek haznesine 50 ml sodyum pirofosfat ilave edip, ultrasonik enerji uyguladıklarında ise 100 – 400 μm aralığında görünen bu tanelerin kaybolduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.17, 2 no.lu eğri). Adı geçen araştırmacılar, bir başka deneyde ise, 50 μm elekten eledikleri kaolinitik bir örneği, bikarbonat bakımından zengin su içerisinde analiz ettiklerinde 60 – 350 μm ve 500 –

800 μm topaklar tespit ettiklerini belirtmişler ve örnek haznesine pirofosfat ilave edip, ultrasonik enerji uyguladıklarında bu topakların kaybolduğunu ifade etmişlerdir. Söz konusu araştırmacılar, yukarıda bahsedilen deneylerinin sonucunda, killi örneklerin analizinde ultrasonik enerji ve ayrıştırma maddesi kullanılmasının gerekli olduğunu öne sürmüşlerdir.



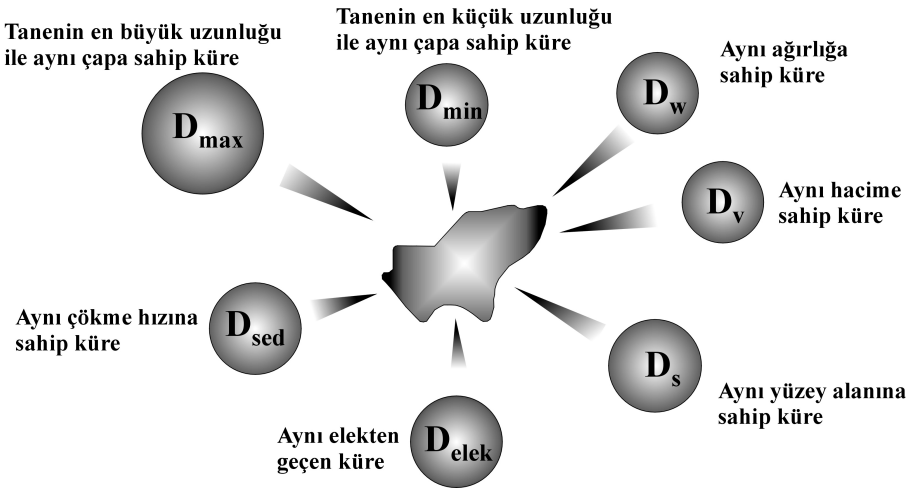
Şekil 2.17. Topaklanmanın tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisi. (Eğri 1: Sodyum pirofosfat ve ultrasonik enerji uygulanmış; Eğri 2: Herhangi bir ayrıştırma etkeni uygulanmamış) (19)

Bazı araştırmacıların, zemin örneklerinin ayrıştırılmasında ultrasonik enerji ve ayrıştırma maddesi uygulama şekli bakımından farklı yöntemler izledikleri belirlenmiştir. Örneğin, McCave vd., 1986 (13), örneklerini Calgon çözeltisi içerisinde ultrasonik enerji uygulayarak ayrıştırmıştır. Loizeau vd., 1994 (14), 10 ml deiyonize su içerisinde bulunan örneklerini 5 dakika boyunca ultrasonik enerji uygulayarak ayrıştırmıştır. Muggler vd., 1997 (16), 30 ml %5'lik sodyum pirofosfat çözeltisi içerisindeki örneklerini bir gece boyu çalkalayarak ayrıştırmıştır. Beuselinck vd., 1998 (10), örneklerini 50 ml Calgon çözeltisi içerisinde 5 dakika boyunca kaynattıktan sonra 24 saat bekletip analizden önce manyetik olarak karıştırarak ayrıştırmıştır. Wen vd., 2002 (5), örnekleri Calgon çözeltisi içerisinde 30 dakika bekletip, analizden önce 5 dakika boyunca karıştırarak ayrıştırmıştır. Eshel vd., 2004 (18) ise, örneklerini 10 ml Calgon (50 g/litrelik) çözeltisi içerisinde bir gece boyu bekleterek ayrıştırmışlardır.

2.4.6. Tane şeklinin analiz sonuçları üzerideki etkisi

Tane büyüklüğünün ölçülmesindeki en büyük güçlük, düzensiz şekle sahip tanelerin büyüklüğünün "çap" kavramı ile ifade edilmesidir. Oysa, çap kavramı düzgün bir daire veya küre için kullanılabilecek bir kavramdır. Düzensiz şekle sahip tanelerin büyüklüğünün "çap" kavramı ile ifade edilmesinin nedeni, belki de büyüklüğü sadece tek bir sayı ile ifade edilebilen tek nesnenin küre olmasıdır. Zira 50 µm'lik küre dendiği zaman, bunun ne ifade ettiği açıkça ortadadır. Fakat aynı şey bir küp için söylendiği taktirde, 50 µm, küpün herhangi bir kenarının veya köşegeninin uzunluğu olabilir (25).

Tane büyüklüğü çap kavramı ile ifade edildiği sürece, tane büyüklüğünü belirleyen her yöntem, tanenin belirli bir fiziksel özelliğinden yola çıkarak küre ile eşleştirmek durumundadır. Örneğin, çapı, tanenin en büyük uzunluğu ile aynı olan küre (D_{max}), çapı, tanenin en küçük uzunluğu ile aynı olan küre (D_{min}), tane ile aynı ağırlığa sahip olan küre (D_w), tane ile aynı yüzey alanına sahip olan küre (D_s), çapı, tanenin geçtiği en küçük eleğin göz açıklığı ile aynı olan küre (D_{elek}), tane ile aynı hacme sahip olan küre (D_v) ve bir sıvı içerisinde tane ile aynı hızda çöken küre (D_{sed}) (25). Bu kavramlar Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Düzgün küre şeklinde olmayan bir taneyi ölçmek için uygulanan eşdeğer küreler (25)

Lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin her ikisi de tanelerin küre şeklinde olduğunu varsaymaktadır. Hidrometre yönteminde, tane ile aynı özgül ağırlığa sahip olup, su içerisinde tane ile aynı hızda çöken eşdeğer kürenin çapını, tane çapı olarak belirlenmektedir (2). Lazer kırınım yönteminde ise, tanenin hangi fiziksel özelliğinden yola çıkılarak küre ile eşleştirildiği konusunda çeşitli araştırmacıların görüşleri aşağıda belirtildiği gibidir. Beuselinck vd., 1998 (10) ve Loizeau vd., 1994 (14), lazer kırınım yönteminin eşdeğer kürenin en-kesit çapını tane çapı olarak ölçtüğünü ifade etmiştir. Konert ve Vandenberghe, 1997 (15), lazer kırınım cihazlarının taneleri iki boyutlu nesneler olarak gördüğünü ve tane büyüklüğünün, tanelerin en-kesit alanının bir fonksiyonu olduğunu ifade etmiş ve lazer kırınım yönteminin, tane ile aynı kırılma desenin veren eşdeğer kürenin çapını tane çapı olarak ölçtüğünü öne sürmüştür. Eshel vd., 2004 (18), ışın demeti içerisinde bulunan tanelerin özel en-kesit alanının tane büyüklüğünün hesaplanmasında kullanıldığını ifade etmiştir. Jonasz, 1991 (50) ise, küre şeklinde olmayan bir tanenin mümkün tüm konumları ile lazer ışınlarının önünde oluşturacağı izdüşüm alanlarının ortalama en-kesit çapının, tane çapı olarak ölçüldüğünü belirtmiştir. Bu ifadeler göz önüne alındığında, lazer kırınım yönteminin, "bir zemin tanesinin mümkün her konumu ile lazer ışınlarının önünde oluşturacağı izdüşüm alanlarının ortalamasına karşılık gelen, eşdeğer kürenin en-kesit çapını tane çapı olarak ölçmektedir" denilebilir. Lazer kırınım cihazlarında, sayısı kullanıcı tarafından ayarlanabilmek koşulu ile yüzlerce kez alınan veriler değerlendirilerek tane büyüklüğü dağılımı hesaplanmaktadır. Bu durumda, her hangi bir zemin tanesinin mümkün her konumu ile ölçüldüğünden emin olunabilir. ISO 13320-1, 1999 (12)'de tipik bir veri toplama sayısının 1000 olabileceği belirtilmektedir. Bu sayı ne kadar arttırılırsa elde edilen ölçümün hassasiyeti de o kadar artmaktadır.

Yukarıdaki açıklamalardan, lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinde, tanelerin farklı fiziksel özelliklerinden yararlanılarak küre ile eşleştirildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, tanelerin küre şeklinde olmaması bu yöntemler ile belirlenen sonuçları farklı düzeylerde etkileyeceği ortadadır. Düzensiz şekle sahip tanelerin büyüklüğünü küre ile eşleştirmek belli bir miktar hatayı da beraberinde getireceğinden, aslında tane büyüklüğünün belirlendiği hiçbir yönteme ne doğru ne de yanlış demek mümkün

değildir. Ancak, tanenin hangi fiziksel özelliğinden yararlanılarak küreyle eşleştirildiğine ve bu eşleştirmenin doğruluğunu etkileyen faktörlere bakarak hangi yöntemin daha doğru sonuç verdiği tartışılabilir.

Lazer kırınım yönteminde, tanelerin yüzeyine temas ederek kırılan ışınlar dikkate alınmakta ve ışınların yayılma yönü tanenin büyüklüğü ve şeklinin yanı sıra, lazer ışınlarının polarizasyonuna, tanelerin optik özelliklerine ve yüzey pürüzlülüğüne de bağlıdır (28). Bu nedenle, tane şeklinin etkisini kuramsal olarak değerlendirmek mümkün değil gibi görünmektedir. Ancak, lazer kırınım yönteminin tane şeklinden etkilenmesi konusunda çalışan bazı araştırmacıların görüşleri aşağıda belirtildiği gibidir. Buurman vd., 1997 (19), lazer kırınım yöntemiyle levhamsı tanelerin olduğundan daha büyük ölçüldüğünü ifade etmiştir. Jonasz, 1991 (50), küre şeklinde olmayan bir tanenin mümkün tüm konumları ile lazer ışınlarının önünde oluşturacağı izdüşüm alanlarının ortalama en-kesit çapının, tane ile aynı hacimdeki kürenin çapından büyük olacağını öne sürmüştür. Xu ve Di Guida, 2003 (52), küre şeklinde olmayan tanelerin sirkülasyon esnasında farklı konumları ile lazer ışınlarının önünde bulunacağını ve kırılma deseninin tanelerin tüm konumlarının ortalamasını vereceğini, ancak bu ortalamada tanenin uzun boyutunun daha ağır basacağını ifade etmiş ve çubuk şeklindeki taneler gibi büyük şekil oranına (uzunluk/genişlik) sahip tanelerin lazer kırınım yöntemiyle olduğundan daha büyük ölçüldüğünü öne sürmüştür. Hayton vd., 2001 (53), levhamsı şekle sahip tanelerin (örneğin mika gibi) lazer kırınım yöntemi ile olduğundan daha büyük ölçüleceğini belirmiştir. ISO 13320-1, 1999 (12)'de ise küre şeklinde olmayan tanelerin faklı konumlarda farklı en-kesit çapı vereceği belirtilmiş ve küre şeklinde olmayan tanelerin mümkün tüm konumları ile ölçüldüğü, bunun da tane büyüklüğü dağılımını iri tanelere doğru ötelediği belirtilmiştir.

Bazıları deneysel bulgulara dayanan yukarıdaki çalışmaların birleştikleri ortak nokta, lazer kırınım yönteminin büyük şekil oranına sahip, örneğin çubuksu veya levhamsı taneleri olduğundan bir miktar daha büyük ölçtüğü şeklinde özetlenebilir. Ancak bu görüşlerin aksine, Pye ve Blott, 2004 (54), üçüncü boyutu diğer iki boyutundan uzun ve oldukça köşeli taneleri lazer kırınım yönteminin olduğundan daha küçük

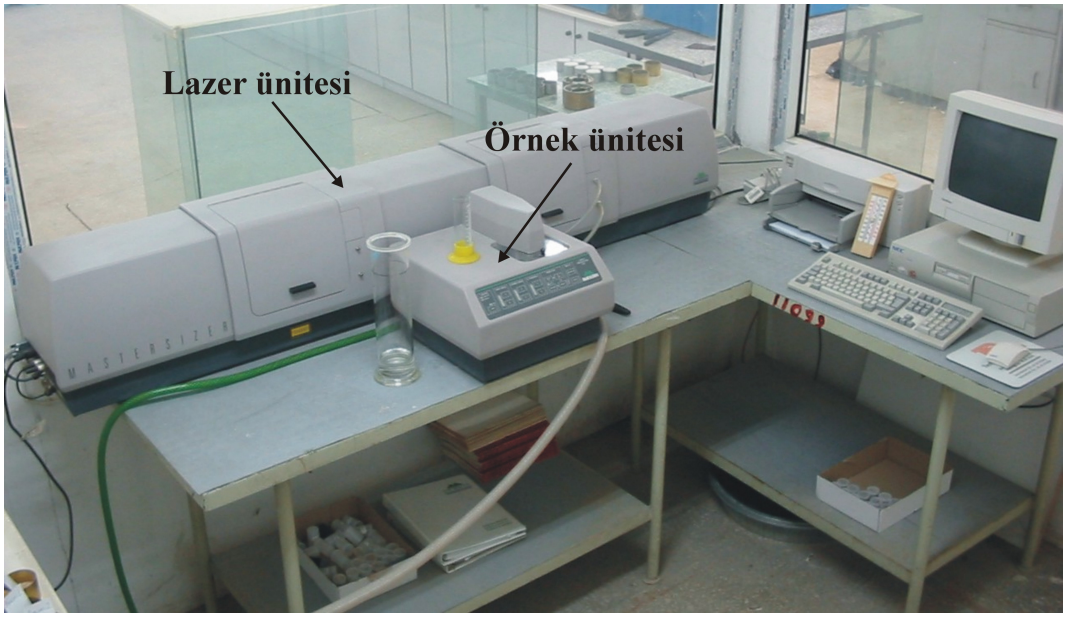
ölçtüğünü öne sürmüştür. Ma vd., 2000 (11) ise, taneler küre şeklinde olmadığında, gerçekte olmamasına rağmen sanki iri taneler varmış gibi, yada büyük açı ile kırılan ışınlardan dolayı gerçekte olmamasına rağmen sanki küçük taneler varmış gibi sonuç elde edilebileceğini öne sürmüştür.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan alet ve cihazların teknik özellikleri, deney örneklerinin alındıkları yerler ve tanımlamaları ile deneylerin yapılmasında uygulanan yöntemler açıklanmıştır.

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Alet ve Cihazlar

Bu çalışmada, Gazi Ünv. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan Malvern Master SizerX (long bed) lazer kırınım cihazı kullanılmıştır. Resim 3.1'de fotoğrafı görülen bu cihaz, genel olarak lazer ünitesi, örnek hazırlama ünitesi ve bilgisayar olmak üzere üç ana parçadan meydana gelmektedir. Lazer ünitesinde; bir lazer üreteci, optik düzenekler ve veri toplama dedektörü yer almaktadır.



Resim 3.1. Bu çalışmada kullanılan Malvern Master SizerX (long bed) Lazer kırınım cihazı

Bu cihaz ile hem Fraunhofer, hem de Mie kuramına göre tane büyüklüğü dağılımı hesaplanabilmektedir. Cihazın başlıca teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Lazer kırınım cihazın teknik özellikleri (22)

Lazer ışını	2 mW He-Ne lazer, dalga boyu : λ = 633 nm (0,633 µm) ışın çapı : 18 mm
Işınların kırılma açısı aralığı	0,01 – 50 derece (4 mercek ile birlikte)
Dedektör	31 elemanlı
Ölçüler	Uzunluk : 1853 mm Yükseklik : 335 mm Genişlik : 290 mm
Ağırlık	66 kg

Malvern Master SizerX (long bed) lazer kırınım cihazı, 4 farklı mercekle 0,1 – 2000 µm arasındaki taneleri ölçebilmektedir. Bu merceklerin odak uzaklıkları ve ölçüm sınırları Çizelge 3.2'de verilmiştir. Ölçülecek örneklerin tane büyüklüğüne göre bu merceklerden uygun olan bir tanesi seçilerek ölçüm gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 3.2. Lazer kırınım cihazın ölçüm mercekleri (22)

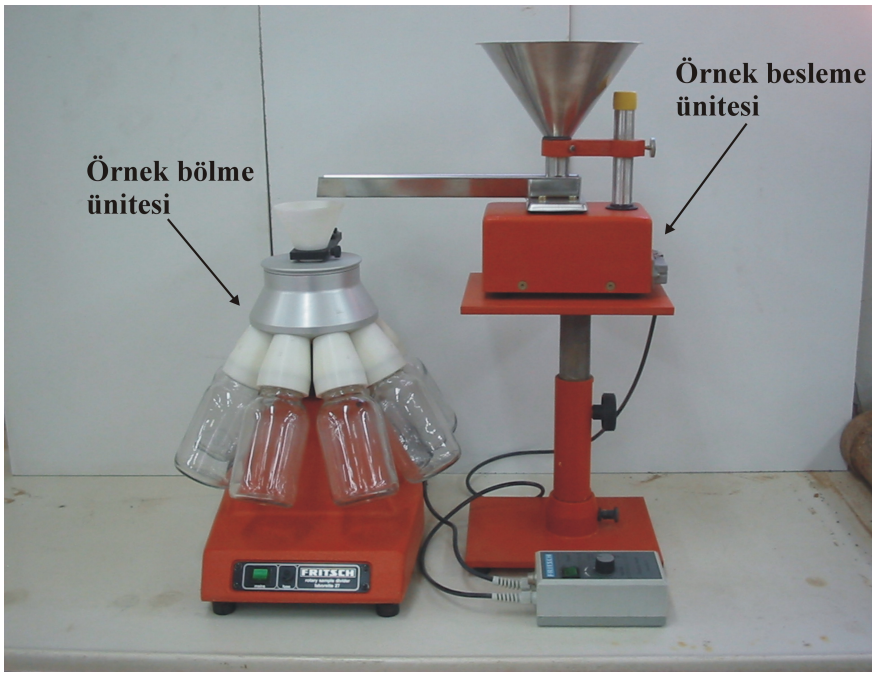
Kurulum	Odak uzaklığı (mm)	Ölçüm aralığı (µm)
Ters Fourier	45	0,1 – 80
Fourier	100	0,5 – 180
Fourier	300	1,2 – 600
Fourier	1000	4,0 – 2000

Lazer kırınım cihazı ile birlikte kullanılan örnek hazırlama ünitesi Malvern'in MSX 17 modelidir. Örnek ünitesinde, pompa, mekanik karıştırıcı ve ultrasonik enerji gibi özellikler bulunmaktadır. Pompa, deney süresince süspansiyonun sirkülasyonunu sağlamakta, mekanik karıştırıcı iri tanelerin dibe çökmesini engellemekte ve analiz boyunca süspansiyonun homojen kalmasını sağlamakta, ultrasonik enerji ise ses titreşimleri ile tanelerin ayrışmasını sağlamaktadır. Çizelge 3.3'de örnek ünitesinin bazı teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. MSX 17 örnek ünitesinin teknik özellikleri (22)

Ultrasonik enerji gücü	0 – 50 Watt giriş (değişken) 40 kHz nominal frekans
Pompa tipi	Santrifüjlü Hızı : değişken, yaklaşık 0 – 3100 d/dk.
Karıştırıcı hızı	Değişken : yaklaşık 0 – 2400 d/dk.
Hazne kapasitesi	1 litre (yaklaşık)
Giriş basıncı (su / yıkama)	133 – 800 kN/m^2

Hidrometre deneylerinde ASTM D 422, 1998 (6)'de tanımlanan 151 H yoğunluk hidrometresi kullanılmıştır. Likit limit deneyleri, ASTM 4318, 2000 (55)'de belirtilen Casagrande likit limit cihazı ile yapılmıştır. Örnekleri gruplara ayırmak için elektrikli örnek bölme cihazı (Fritsch rotary sample divider) kullanılmıştır (Resim 3.2). Örnek besleme ve örnek bölme olmak üzere iki ayrı üniteden meydana gelen bu cihazın, örnek bölme ünitesinde 8 adet kavanoz bulunmaktadır. Örnek besleme ünitesinden belli bir hızla gelen örnekler, sabit hızla dönen kavanozların içerisine dökülmekte ve böylece hassas bir şekilde 8 eşit parçaya bölünmektedir.



Resim 3.2. Bu çalışmada kullanılan elektrikli örnek bölme cihazı

Bazı örneklerin SEM fotoğraflarının çekilmesinde, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme Anabilim Dalında bulunan JEOL JSM – 6060 LV model SEM cihazı kullanılmıştır. Örneklerin XRD analizleri ve değerlendirmeleri ise, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'nde yaptırılmıştır.

3.2. Deneyde Kullanılan Örnekler

Bu çalışmada, Ankara'nın Etimesgut, Kazan, Mamak, Temelli, Balgat, Beşevler, Beytepe, Bilkent, Çukurambar, Eğmir, Güvercinlik, Ostim ve Solfasol gibi değişik semtlerinden ve Elazığ, Düzce, İzmir, Kaman, Salihli ve Yozgat gibi birkaç il ve ilçeden alınan örnekler kullanılmıştır. Bu örneklere verilen numaralar, alındıkları yerler ve tanımlamaları Çizelge 3.4'de sunulmuştur. Örneklerin büyük çoğunluğu jeoteknik etüt amaçlı sondaj kuyularından örselenmemiş (UD) örnek alma tüpleri veya standart penetrasyon testi (SPT) ile çeşitli derinliklerden alınmış olup, tamamı doğal zemin örneğidir.

Çizelge 3.4. Deney örneklerinin alındıkları yerler ve tanımları

Örnek No.	Alındığı yer	Örnek tanımı
Örnek 1	Hacettepe Ünv. Beytepe kampüsü	Ufalanmış kireçtaşı
Örnek 2	Yozgat maden ocağı	Ufalanmış marl
Örnek 3	Etimesgut konut inşaatları	Killi zemin
Örnek 4	Güvercinlik, askeri alan	Killi zemin
Örnek 5	İzmir, konut inşaatları	Siltli zemin
Örnek 6	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 7	Salihli, organize sanayi bölgesi	Siltli zemin
Örnek 8	Salihli, organize sanayi bölgesi	Siltli zemin
Örnek 9	Kazan, maden işletmesi	Siltli zemin
Örnek 10	Kazan, maden işletmesi	Siltli zemin
Örnek 11	Temelli, yeni imar bölgesi	Yağlı kil
Örnek 12	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 13	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 14	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 15	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin

Çizelge 3.4. (Devam) Deney örneklerinin alındıkları yerler ve tanımları

Örnek No.	Alındığı yer	Örnek tanımı
Örnek 16	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 17	Düzce, deprem konutları inş.	Killi zemin
Örnek 18	Düzce, deprem konutları inş.	Killi zemin
Örnek 19	Düzce, deprem konutları inş.	Killi zemin
Örnek 20	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 21	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 22	Balgat, konut inş.	Ankara kili
Örnek 23	Çukurambar, ATO ek bina inş.	Ankara kili
Örnek 24	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 25	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 26	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 27	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 28	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 29	Elazığ, Güney çevre yolu inş.	Killi zemin
Örnek 30	Kazan, maden işletmesi	Siltli kil
Örnek 31	Eğmir gölü kenarı	Yağlı kil
Örnek 32	Eğmir gölü kenarı	Yağlı kil
Örnek 33	Eğmir gölü kenarı	Yağlı kil
Örnek 34	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 35	Beşevler, Gazi hast. otopark inş.	Killi zemin
Örnek 36	İzmir, konut inş.	Siltli kil
Örnek 37	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 38	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 39	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 40	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 41	Etimesgut, konut inş.	Killi zemin
Örnek 42	Düzce, deprem konutları inş.	Siltli kil
Örnek 43	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 44	Temelli, yeni imar bölgesi	Killi zemin
Örnek 45	Düzce, deprem konutları inş.	Siltli kil
Örnek 46	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 47	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 48	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 49	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin

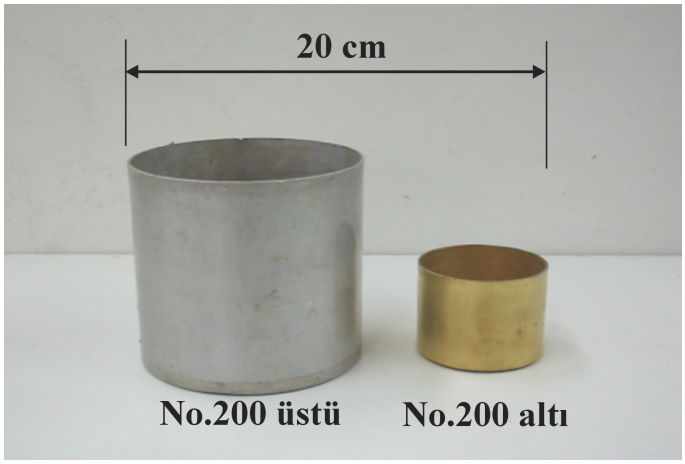
Çizelge 3.4. (Devam) Deney örneklerinin alındıkları yerler ve tanımları

Örnek No.	Alındığı yer	Örnek tanımı
Örnek 50	Güvercinlik, askeri alan	Siltli kil
Örnek 51	Düzce, deprem konutları inş.	Siltli kil
Örnek 52	Mamak konut inş.	Killi zemin
Örnek 53	Etimesgut, konut inş.	Killi zemin
Örnek 54	Balgat, konut inş.	Ankara kili
Örnek 55	Beşevler, Gazi hast. otopark inş.	Siltli kil
Örnek 56	Güvercinlik, askeri alan	Siltli kil
Örnek 57	Balgat, konut inş.	Ankara kili
Örnek 58	Elazığ, Güney çevre yolu inş.	Siltli kil
Örnek 59	Solfasol mah. konut inş.	Ayrışmış andezit
Örnek 60	Bilkent kavşağı, metro inş.	Killi zemin
Örnek 61	Ostim, organize sanayi bölgesi	Killi zemin
Örnek 62	Elazığ, Güney çevre yolu inş.	Killi zemin
Örnek 63	Kaman, konut inş.	Siltli kil
Örnek 64	Hacettepe Ünv. Beytepe kampüsü	Ayrışmış grovak
Örnek 65	İzmir, konut inş.	Siltli kil
Örnek 66	Kaman, konut inş.	Siltli kil
Örnek 67	Solfasol mah. konut inş.	Ayrışmış andezit
Örnek 68	Sinop heyelan bölgesi	Siltli kil
Örnek 69	Elazığ, Güney çevre yolu inş.	Siltli kil
Örnek 70	Kazan, maden işletmesi	Siltli kil
Örnek 71	İzmir, konut inş.	Siltli kil
Örnek 72	Kazan, maden işletmesi	Siltli kil

3.3. Deneysel Çalışmada Uygulanan Yöntem

Araziden getirilen örnekler bir tepsi içerisine konulup 110 ± 5 ^{0}C etüvde kurutulduktan sonra lastik tokmakla zemin topakları hafifçe ezilip ufalanmıştır. Ezme esnasında münferit zemin tanelerinin kırılmamasına dikkat edilmiştir. Daha sonra elektrikli örnek bölme cihazı kullanılarak sekiz eşit parçaya bölünmüştür. Bölünen örneklerin bir kısmı likit ve plastik limit deneyleri, bir kısmı XRD, bir kısmı SEM, bir kısmı ise tane büyüklüğü dağılımı analizleri için ayrılmıştır. Tane

büyüklüğü dağılımı analizi için ayrılan örnek 200 no.lu (0,075 mm) elekten kuru olarak elenmiş ve eleğin üzerinde kalan malzeme elek analizi yapılmak üzere büyük bir silindirik kaba, altına geçen malzeme ise lazer kırınım analizi ve hidrometre deneyleri yapılmak üzere daha küçük bir silindirik kaba (Resim 3.3) boşaltılmıştır. Lazer kırınım analizi ve hidrometre deneyleri yapılacak olan malzemenin 30 – 35 g arasında olmasına dikkat edilmiştir.



Resim 3.3. Elek analizi ve lazer kırınım – hidrometre deneyi yapılacak malzemelerin konulduğu kaplar

Elek analizi yapılacak olan malzemenin üzerine ASTM D 422, 1998 (6)'ye göre hazırlanmış Calgon çözeltisinden bir miktar dökülüp karıştırıldıktan sonra bir gece boyu bekletilmiştir. Bu örnek, ertesi gün bir müddet daha karıştırıldıktan sonra 200 no.lu eleğin üzerine boşaltılmış ve su ile yıkanarak elenmiştir. Eleğin üzerinde kalan malzeme yine aynı kabın içerisine boşaltılarak 110 ± 5 ^{0}C etüvde kurutulmuş ve ardından 19,0; 9,5; 4,75; 2,0; 0,600; 0,425; 0,300; 0,150 ve 0,075 mm eleklerden elenerek elek analizi yapılmıştır. Kuru eleme sonucunda 200 no.lu elekten geçen 30 – 35 g arasındaki malzemeye ise, önce lazer kırınım analizi, daha sonra ise kapta kalan malzemenin tamamına hidrometre deneyi yapılmıştır. Lazer kırınım analizi ve hidrometre deneylerinin her ikisinin de aynı malzeme üzerinde yapılmasıyla deney sonuçları arasındaki örnekleme etkisinin ortadan kaldırılmış olduğu düşünülmektedir. Hidrometre deneyinin yapılmasında ASTM D 422, 1998 (6)'de belirtilen esaslara uyulmuştur.

Lazer kırınım analizleri için uygulanan yöntemde ise; lazer kırınım cihazı açılıp, sistemin durağan hale gelmesi için yaklaşık yarım saat beklendikten sonra ölçüm için gerekli optik ayarlamalar yapılmıştır. Ardından, örnek haznesi su ile doldurulup, içerisine 100 ml Calgon çözeltisi ilave edilmiştir. Bütün analizlerde çeşme suyu kullanılmış ve hava kabarcıklarının oluşmaması için çeşme suyu hazneye yavaşça doldurulmuştur. Daha sonra, mekanik karıştırıcı, pompa ve ultrasonik enerji çalıştırılarak geri plan ölçümü alınmıştır. Geri plan ölçümünün ardından silindirik kabın içerisindeki örnek, spatula ile iyice karıştırılıp homojen hale getirildikten sonra, spatulanın ucuyla bir miktar örnek (alt-örnek) alınıp, ışın azalma oranı %15 – 30 arasında olacak miktarda azar azar haznenin içerisine boşaltılmıştır. Daha sonra, ultrasonik enerji ve mekanik karıştırıcının etkisiyle örneğin ayrışması için bir süre (5 – 10 dak.) beklenmiş ve ölçüm gerçekleştirilmiştir. Lazer kırınım yöntemiyle zemin örneklerinin analiz edilmesi daha ayrıntılı bir şekilde Ek-7'de sunulmuştur.

Analizlerde odak uzaklığı 45 mm olan ters Fourier merceği kullanılmış olup, bu merceğin ölçüm sınırları 0,1 – 80 μm'dir. Analizlerde, veri toplama sayısı (number of sweeps) 5000, tekrar sayısı (number of experiments) 2 olarak seçilmiştir. Böylece tane büyüklüğü dağılımı hesaplamaları toplam 10000 adet veri değerlendirilerek yapılmıştır. Hesaplamalarda Mie kuramı kullanılmış ve tanelerin saptırma indisi için n_r = 1,55, emme katsayısı için n_i = 0,1 ve suyun saptırma indisi için ise n_r = 1,33 değerleri alınmıştır.

4. LAZER KIRINIM YÖNTEMİYLE İLGİLİ DENEYSEL BULGULAR

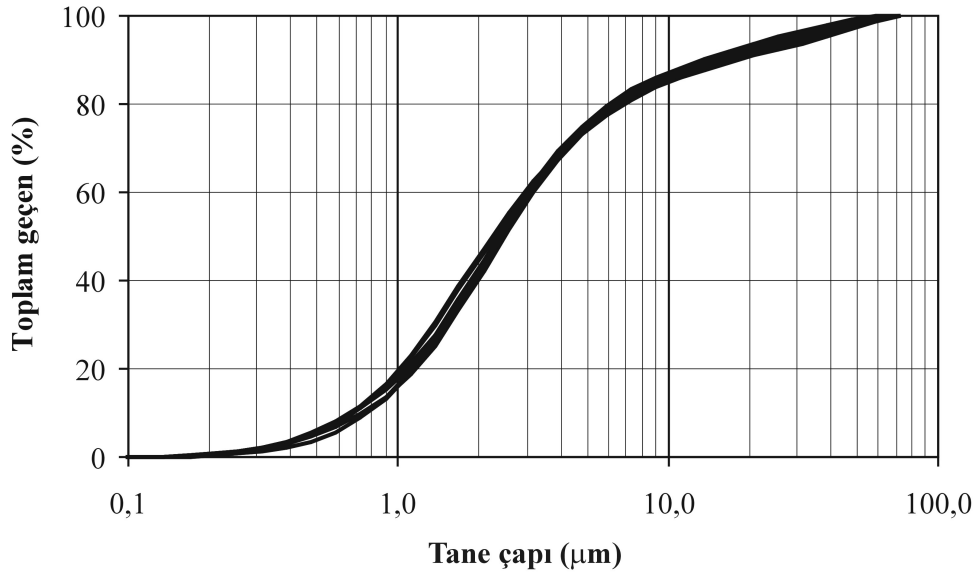
Bu çalışmada, lazer kırınım analizlerinde uygulanacak yöntemin belirlenmesi için Bölüm 2.4'de ele alınan bazı konular üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

4.1. Örnek Alma ve/veya Azaltma Yöntemi

Bu çalışmada önerilen ve uygulanan örnek hazırlama ve azaltma yöntemi aşağıdaki gibidir. 110 ± 5 ^{0}C etüvde kurutulup münferit taneleri kırmayacak şekilde lastik tokmakla hafifçe ezilip ufalanan örnekler, 200 no.lu elekten elenmiş ve eleğin altına geçen örnekler küçük bir silindirik bir kabın içerisine boşaltılmıştır. Eleğin altına geçen örnek miktarı, ince tane yüzdesine ve tokmakla ezme süresine bağlı olmakla birlikte genellikle 10 – 30 g arasında değişmektedir. Bu çalışmada, hidrometre deneyi de yapılacağından 30 – 35 g arasında örnek elde edilmiştir. Kabın içerisindeki örnekten, lazer kırınım analizi için 0,1 – 0,5 g arasında alt-örnek almak için küçük bir spatula kullanılmıştır. Kabın içerisindeki örnek spatulayla iyice karıştırılıp homojen hale getirildikten sonra, spatulanın ucuyla bir miktar alt-örnek alınmış ve bilgisayar ekranından ışın azalma oranı gözlenerek azar azar haznenin içerisine boşaltılmıştır (Resim 4.1).

Resim 4.1. Lazer kırınım analizi için alt-örnek alınması

Yukarıda belirtildiği ve Resim 4.1'de gösterildiği gibi uygulanan örnek alma veya azaltma yönteminin güvenilir olabilmesi için spatulanın ucu ile alınan 0,1 – 0,5 g arasındaki alt-örneğin, kabın içerisinde bulunan örneği temsil ediyor olması gerekir. Bunu belirlemek için kapta bulunan örnekten yukarıda belirtildiği şekilde 15 kez alt-örnek alınmış ve her biri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bütün analizlerde 100 ml Calgon çözeltisi kullanılmış ve bu çözelti su ile birlikte doğrudan örnek haznesine boşaltılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.1'de sunulmuştur.

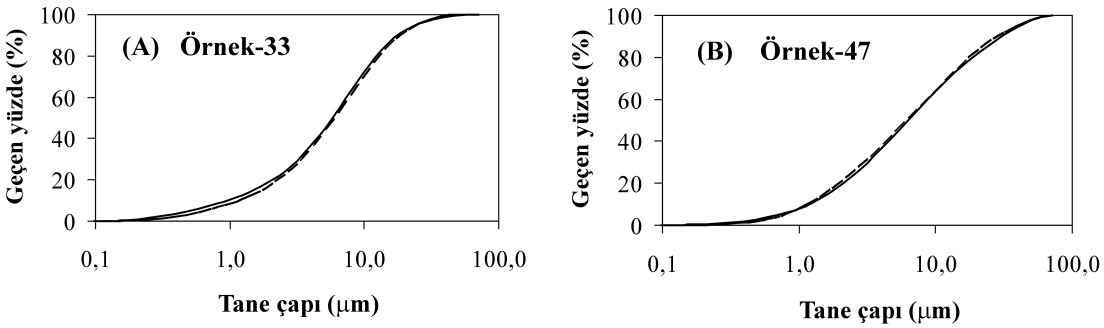


Şekil 4.1. Aynı örnekten alınmış 15 adet alt-örnek üzerinde yapılan analizlerin sonuçları (Örnek -23)

Şekil 4.1'den görüldüğü gibi, aynı örnekten alınmış alt-örnekler üzerinde elde edilen tane büyüklüğü dağılım sonuçları birbirine oldukça yakındır. Ölçüt olarak kil yüzdesi ele alınacak olursa, 15 adet analiz sonucunda elde edilen en düşük ve en yüksek kil yüzdeleri arasındaki fark sadece % 4'dür. Bir çok zemin mekaniği uygulaması için bu farkın önemsiz olduğu düşünülmektedir. Bu sonuçlara göre, kap içerisindeki örneği iyice karıştırdıktan sonra, spatulanın ucu ile alınan alt-örneğin, kaptaki örneğin bütününü yeterli ölçüde temsil ettiğini ve böylece önerilen yöntemin örnek almak veya azaltmak için uygun olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca, önerilen yöntemin herhangi bir cihaz gerektirmemesi, son derece basit ve pratik olması gibi avantajları da bulunmaktadır.

4.2. Lazer Kırınım Cihazıyla Yapılan Ölçümlerin Tekrarlanabilirliği

Bu çalışmada kullanılan lazer kırınım cihazı ile yapılan ölçümlerin tekrarlanabilirliğini belirlemek için, iki örneğin (Örnek 33 ve 47) analizleri farklı tarihlerde tekrar edilmiş ve alınan sonuçlar Şekil 4.2'de sunulmuştur. Şekil 4.2.A'da görülen Örnek 33'ün analizi yaklaşık 7,5 ay arayla, Şekil 4.2.B'de görülen Örnek 47'nin analizi ise yaklaşık 16 ay arayla tekrar edilmiştir. Örnek 33'de iki ölçümden elde edilen kil yüzdeleri arasındaki fark % 1,78, Örnek 47'de ise % 1,84'dür. Bu farkların zemin mekaniği uygulamaları açısından önemsiz olduğu düşünülmektedir. Aynı zemin örneklerinin farklı tarihlerde yapılan analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın çıkması, lazer kırınım cihazının günden güne değişiklik göstermeyen birbiri ile son derece uyumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir.

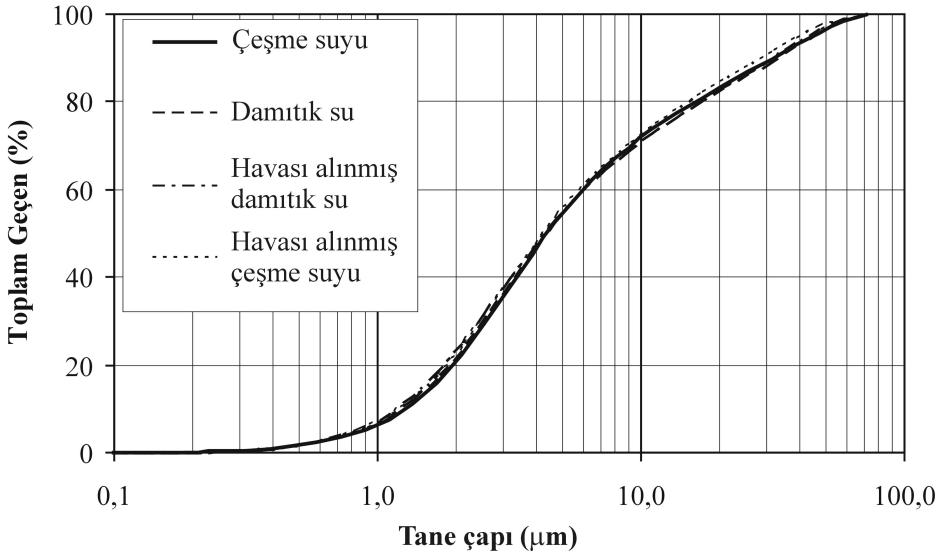


Şekil 4.2. Farklı tarihlerde yapılan lazer kırınım analizlerinin sonuçları. (A) 7,5 ay ara ile yapılan analiz sonuçları, (B) 16 ay ara ile yapılan analiz sonuçları

4.3. Analizlerde Kullanılan Suyun Niteliği

Analizlerde kullanılan suyun ölçüm sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek için, aynı zemin örneği (Örnek-60) çeşme suyu, havası alınmış çeşme suyu, damıtık su ve havası alınmış damıtık su kullanılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Damıtık suyun elde edilmesinde kaynatma ve soğutma ilkesine dayanan bir damıtma cihazı kullanılmış ve suyun havasını almak için vakum uygulanmıştır. Bütün analizlerde 100 ml Calgon çözeltisi kullanılmış ve bu çözelti su ile birlikte hazneye ilave edilmiştir. Çeşme suyu ile yapılan analizlerde hava kabarcıklarının oluşmasını en aza indirmek için Chappel, 1998 (20)'in önerdiği gibi su, örnek haznesine yavaşça ilave edilmiştir. Ayrıca, su

ilave edildikten sonra hava kabarcıklarının çıkmasını sağlamak için pompa ve mekanik karıştırıcı yarım kapasite, ultrasonik enerji ise %100 kapasitede çalıştırılarak yaklaşık 1 dakika beklenmiştir (22). Bu analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'de sunulmuştur.

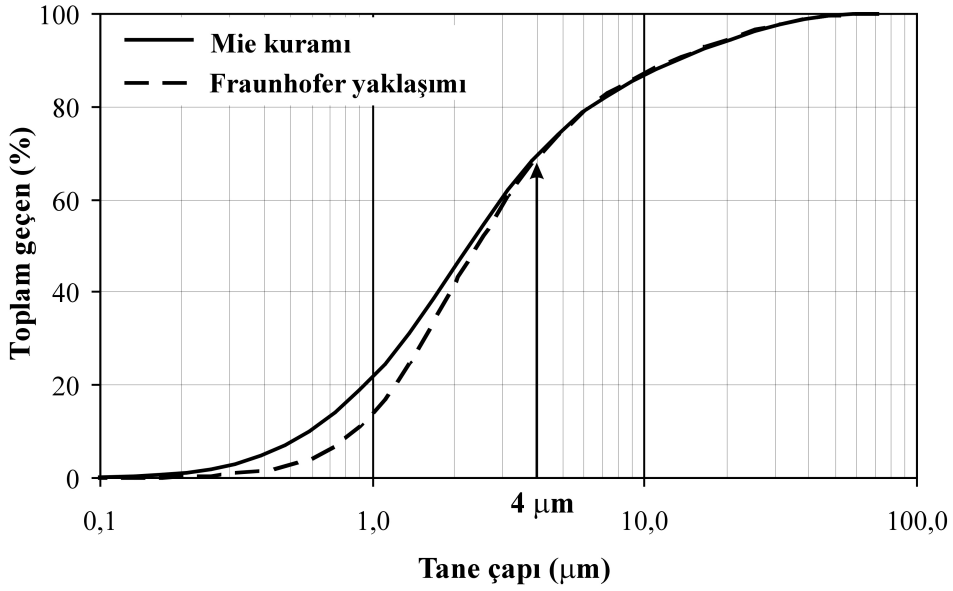


Şekil 4.3. Su niteliğinin analiz sonuçları üzerindeki etkisi (Örnek-60)

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, dört farklı nitelikte su kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları birbirine çok yakın çıkmış ve hatta neredeyse üst üste çakışmıştır. Farklı nitelikteki suların analiz sonuçları üzerinde ciddi bir etkisi olmadığından, ayrıca ucuz ve pratik olmasından dolayı analizlerde çeşme suyu kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir.

4.4. Optik Kuram (Fraunhofer Yaklaşımı ve Mie Kuramı)

Optik kuramın analiz sonuçları üzerindeki etkisini görmek için, bir zemin örneği (Örnek-23) analiz edildikten sonra hem Fraunhofer yaklaşımına, hem de Mie kuramına göre tane büyüklüğü dağılımları hesaplattırılmıştır. Mie kuramına göre yapılan hesaplarda, tanelerin saptırma indisi için 1,55, emme katsayısı için 0,1 ve suyun saptırma indisi için ise 1,33 alınmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'de sunulmuştur.



Şekil 4.4. Optik kuramın analiz sonuçları üzerindeki etkisi (Örnek-23)

Şekil 4.4'den görüldüğü gibi, Fraunhofer yaklaşımı ve Mie kuramına göre hesaplanan tane büyüklüğü dağılım eğrileri yaklaşık 4 μm tane çapına kadar aynı iken, 4 μm'den sonra Fraunhofer yaklaşımı tane yüzdelerini daha düşük hesaplamıştır. 4 μm tane çapı, kullanılan lazer ışınlarının dalga boyunun yaklaşık 6 katına ($d = 6\lambda$) karşılık gelmektedir. Başka örnekler üzerinde de benzer sonuçlar elde edilmiş, ancak metnin uzamaması için sonuçları burada verilmemiştir. Rawle, 2003 (25), Fraunhofer yaklaşımının $d = 5\lambda$'dan daha büyük tanelere uygulanabileceğini, Bayvel ve Jones, 1981 (48) ise, Fraunhofer yaklaşımıyla yapılan ölçümlerde $d = 10\lambda$'nın altında gittikçe artan bir şekilde hata meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuç, Rawle, 2003 (25) ile Bayvel ve Jones, 1981 (48)'un belirttiği sınırların arasında düşmektedir. Bu sonuçlar ile birlikte, Fraunhofer yaklaşımının kil yüzdesini Mie kuramına göre daha düşük belirlediği de Şekil 4.4'den görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, Bayvel ve Jones, 1981 (48), De Boer vd., 1987 (43) ve Buurman vd., 1997 (19)'nin de belirttiği gibi Fraunhofer yaklaşımının kil yüzdesinin belirlenmesinde uygun olmadığı düşünülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada Mie kuramı kullanılmıştır.

4.5. Saptırma İndisi (n_r) ve Emme katsayısı (n_i)

Çalışmanın bu bölümünde, ayrıntılı XRD analizleri de yapılan 5 farklı örnek üzerinde, saptırma indisinin ve emme katsayısının hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu örneklerin indeks özellikleri ve XRD analizleri ile belirlenen mineralojik bileşimleri Çizelge 4.1'de, XRD difraktogramları ise Ek-6'da verilmiştir.

Çizelge 4.1. Optik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan örneklerin indeks özellikleri ve mineralojik bileşimleri

Örnek no.	LL (%)	PL (%)	PI (%)	200 no.dan geçen (%)	USCS	Mineralojik bileşim (çoktan aza doğru sıralı)
ÖRNEK-1	29,0	15,0	14,0	63,9	CL	Kalsit, çok az kuvars
ÖRNEK-11	88,8	33,6	55,2	99,2	CH	Amorf madde, simektit (montmorillonit), kalsit, kuvars, feldispat, kaolinit, illit, karışık kil minerali
ÖRNEK-23	89,1	38,3	50,8	81,7	CH	Kuvars, kalsit, feldispat, amorf madde, simektit (montmorillonit)
ÖRNEK-34	87,9	30,2	57,7	95,6	CH	Ankerit, simektit (montmorillonit), kuvars, kalsit, feldispat, amorf madde, mika (muskovit), illit, kaolinit
ÖRNEK-60	41,5	24,9	16,6	62,8	CL	Simektit (montmorillonit), kuvars, amorf madde, kalsit, feldispat, illit

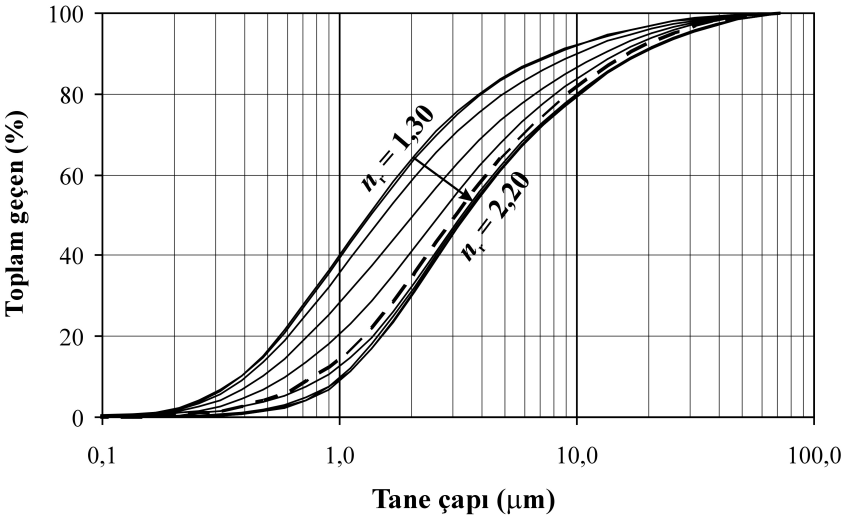
LL: likit limit, PL: plastik limit, PI: plastisite indisi, USCS: birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

Saptırma indisinin ve emme katsayısının hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisi aşağıda ayrı başlıklar halinde ele alınmıştır.

4.5.1. Saptırma indisi

Tane büyüklüğü dağılımının saptırma indisinin değişimine olan duyarlılığını belirlemek için Çizelge 4.1'de verilen örnekler analiz edildikten sonra, saptırma indisi sırasıyla 1,30; 1,35; 1,40; 1,45; 1,50; 1,55; 1,60; 1,70; 1,80 ve 2,00 ve 2,20 alınarak her birisi için ayrı ayrı tane büyüklüğü dağılımları hesaplattırılmıştır. Bu hesaplamalarda emme katsayısı için 0,1 değeri kullanılmıştır. 5 örneğin her biri için

yapılan bu analizlerin sonuçları birbirine benzerlik gösterdiğinden, Şekil 4.5'de sadece Örnek-23'ün sonuçları verilmiştir.

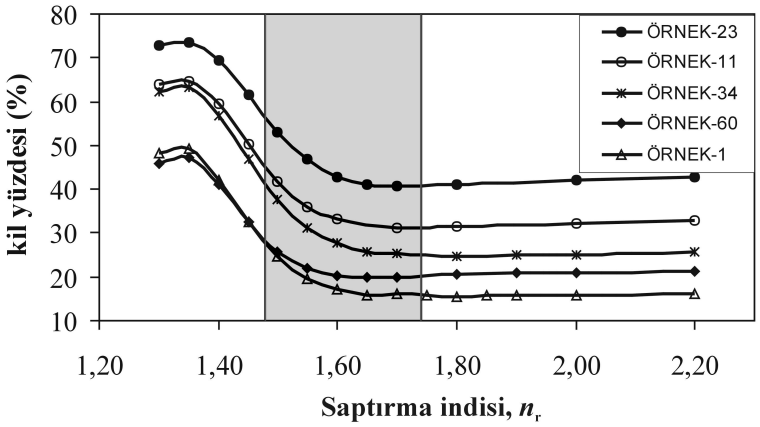


Şekil 4.5. Farklı saptırma indisleriyle hesaplanan tane büyüklüğü dağılımları (Kesikli çizgi n_r=1,55 değerini göstermektedir ve n_r=1,60–2,20 arasındaki değerler için hesaplanan eğriler üst üste çakışmıştır) (Örnek-23)

Şekil 4.5'den, saptırma indisi arttıkça tane büyüklüğü dağılımının aşağıya doğru (iri tanelere doğru) ötelendiği ve saptırma indisinin 1,35 – 1,55 arasındaki değişiminin tane büyüklüğü dağılımını önemli düzeyde etkilediği, 1,55'den sonraki değerlerde (n_r >1,55) ise daha az etkilediği ve görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, Eshel vd., 2004 (18)'in λ = 0,750 μm dalga boyuna sahip lazer ışınları üreten Coulter LS-230 lazer kırınım cihazı kullanarak elde ettiği sonuçlar ile uyumludur.

Jeoteknik araştırmalar için önemli bir yere sahip olan kil yüzdesi incelenecek olursa, saptırma indisi arttıkça kil yüzdesinin azaldığı görülmektedir (Şekil 4.5). Saptırma indisi 1,30 alındığında kil yüzdesi %63,9 olarak hesaplanırken, 2,20 alındığında ise %32,8 olarak hesaplanmıştır. Her iki kil yüzdesi arasıdaki fark ise %31,1'dir. Bu fark; Örnek 1'de %31,9, Örnek 11'de %30,6, Örnek 34'de %36,6 ve Örnek 60'da ise %24,6 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak bakıldığında saptırma indisinin 1,30 – 2,20 arasındaki değişiminin kil yüzdesini yaklaşık %25 ile % 35 arasında değiştirdiği görülmektedir. Kil yüzdesinin, saptırma indisinin değişimine olan duyarlılığını daha açık bir şekilde görebilmek için saptırma indisinin değişimine karşılık kil

yüzdesindeki değişimi gösteren bir grafik oluşturulmuştur (Şekil 4.6). Şekil 4.6'da 5 örneğin sonuçları da görülmekte ve gri tonlu bölge çoğu minerallerinin saptırma indislerinin değişim aralığını (1,48 – 1,74) göstermektedir.



Şekil 4.6. Kil yüzdesinin saptırma indisinin değişimine olan duyarlılığı (gri tonlu bölge n_r = 1,48 ile 1,74 aralığını göstermektedir)

Şekil 4.6'dan, saptırma indisinin 1,30 ile 1,60 arasındaki değişiminin kil yüzdesini önemli düzeyde etkilediği, 1,60'dan sonraki değerlerde ise daha az etkilediği görülmektedir. Hematit hariç, diğer minerallerin saptırma indisleri 1,48 – 1,74 aralığında değiştiğinden (Bkz. Çizelge 2.5) bu aralıktaki değişimin kil yüzdesi üzerindeki etkisini incelemek daha uygun olacaktır. Bu amaçla, saptırma indisi için 1,48 ve 1,74 değerleri kullanılarak hesaplanan kil yüzdeleri ve aralarındaki farklar Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Saptırma indisi, n_r = 1,48 ve 1,74 için hesaplanan kil yüzdeleri ve aralarındaki farklar

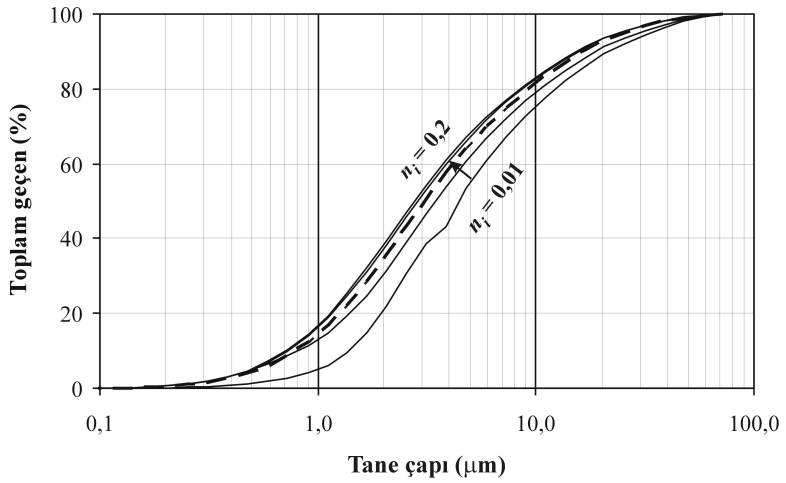
Numuneler	Hesaplanan kil yüzdesi		Kil yüzdeleri arasındaki fark
	(a)	(b)	(a) – (b)
	n_r = 1,48 için	n_r = 1,74 için	
ÖRNEK-23	56,5	40,8	15,7
ÖRNEK-11	45,3	31,3	14,0
ÖRNEK-34	41,2	25,0	16,2
ÖRNEK-60	28,4	20,2	8,2
ÖRNEK-1	27,7	15,9	11,8

Çizelge 4.2'den, saptırma indisinin 1,48 ile 1,74 aralığındaki değişiminin kil yüzdesinin yaklaşık % 8 ile %16 arasında değişmesine neden olduğu görülmektedir. Bunun önemli bir fark olduğu düşünülmektedir. Bu durumda, hesaplarda saptırma indisinin kaç alınması gerektiği gibi önemli bir soru ortaya çıkmaktadır. Ancak ne yazık ki, saptırma indisleri birbirinden farklı çeşitli minerallerin bileşiminden meydana gelen bir örneği, doğru temsil edecek tek bir saptırma indisinin seçilmesi için uygulanacak kesin bir kural bulunmamaktadır. Ancak, bazı ölçütlere göre fikir yürütülmesi mümkündür. Örneğin, zeminin bileşiminde en çok bulunan mineralin saptırma indisine yakın, ancak diğer minerallerin de saptırma indisleri aralığında bulunacak bir değer alınması mantıklı görünmektedir. Bu ölçüte göre örnek olarak, Örnek 23 incelenecek olursa, bu örneğin mineralojik bileşiminin çoktan aza doğru, kuvars, kalsit, feldispat ve montmorillonitten oluştuğu (Bkz. Çizelge 4.1) ve bu minerallerin saptırma indislerinin de feldispat hariç, kuvars 1,54 – 1,55, kalsit 1,49 – 1,74 ve montmorillonit ise 1,48 – 1,64 arasında olduğu görülmektedir (Bkz. Çizelge 2.5). Örnek 23'ün bileşiminde en çok bulunan mineral kuvars ve kuvarsın saptırma indisi de 1,55 olduğundan, bu örneği en iyi temsil edecek saptırma indisinin 1,55 olduğu öne sürülebilir.

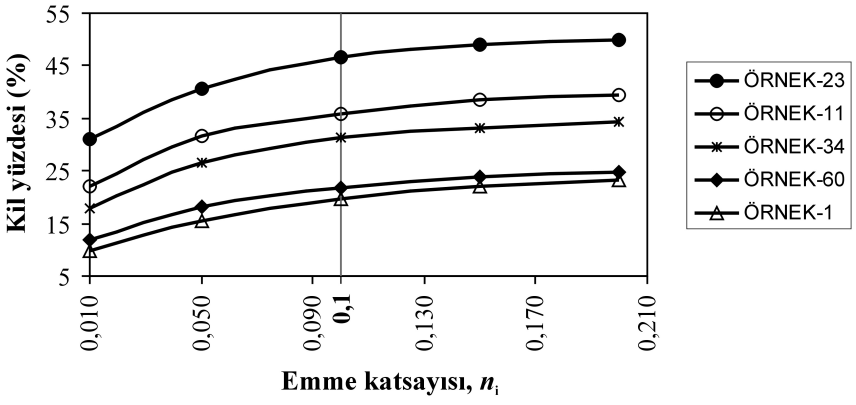
Diğer örneklerin Çizelge 4.1'den mineral bileşimleri, Çizelge 2.5'den ise bu minerallerin saptırma indisleri incelendiğinde, yukarıda verilen ölçüte göre bu örnekleri temsil edecek en uygun saptırma indisinin yine 1,55 olduğu görülmektedir. İzlenen bu yönteme göre, örneği temsil edecek doğru saptırma indisinin belirlenmesi için öncelikle XRD analizi yapılarak, örneğin mineralojik bileşiminin belirlenmesi ve ardından bu minerallerin saptırma indisleri incelenerek, örneği temsil edecek en uygun saptırma indisinin seçilmesi gerektiği gibi bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Ancak, bunun her zaman mümkün veya pratik bir yöntem olmadığı ortadadır. Bu durumda, zeminlerin genelini temsil eden en uygun saptırma indisinin seçilmesi ve hesaplarda bu değerin kullanılması gerekmektedir. İncelenen 5 örnekten edinilen bilgilere göre 1,55 değerinin aslında zeminlerin genelini ortalama bir doğrulukla temsil ettiğini ve bunun için en uygun değerin 1,55 olduğunu öne sürmek mümkündür. Ayrıca 1,55 değerinin, kuvarsın saptırma indisi olması ve kuvarsın da hemen hemen bir çok zemin türünde bulunması bu düşünceyi güçlendirmektedir.

4.5.2. Emme katsayısı

Emme katsayısının hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisini görmek için Çizelge 4.1'de verilen örnekler analiz edildikten sonra, emme katsayısı 0,01; 0,1; 0,15 ve 0,20 değerleri alınarak tane büyüklüğü dağılımları hesaplattırılmıştır. Bu hesaplamaların tamamında saptırma indisi için 1,55 değeri alınmıştır. 5 adet örneğin tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin emme katsayısına olan duyarlılığı birbirine benzerlik gösterdiğinden, sadece Örnek-23'ün sonuçları sunulmuştur (Şekil 4.7). Kil yüzdesinin emme katsayısı ile değişimini göstermek için ise 5 örnek üzerinde elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Emme katsayısının tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisi (Kesikli çizgi n_i=0,1'i göstermektedir ve n_i=0,1 ve 0,2 için hesaplanan eğriler üst üste çakışmıştır) (Örnek-23)



Şekil 4.8. Kil yüzdesinin emme katsayısının değişimine olan duyarlılığı

Emme katsayısının da tane büyüklüğü dağılımını etkilediği, emme katsayısı arttıkça tane büyüklüğü dağılımının ince tanelere doğru ötelendiği ve kil yüzdesinin arttığı Şekil 4.7 ve 4.8'den görülmektedir. Emme katsayısı 0,01; 0,1 ve 0,2 değerleri için hesaplanan kil yüzdeleri ve aralarındaki farklar Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Emme katsayısının 0,01; 0,1 ve 0,2 değerleri için hesaplanan kil yüzdeleri

Örnek No.	Hesaplanan kil yüzdesi			Kil yüzdeleri arasındaki fark	
	(a) $n_i = 0,01$	(b) $n_i = 0,1$	(c) $n_i = 0,2$	(a) – (b)	(b) – (c)
ÖRNEK-23	31,1	46,7	50,0	15,6	3,3
ÖRNEK-11	22,0	36,0	39,4	14,0	3,4
ÖRNEK-34	17,9	31,2	34,2	13,3	3,0
ÖRNEK-60	11,9	21,8	24,9	9,9	3,1
ÖRNEK-1	9,8	19,7	23,2	9,9	3,5

Çizelge 4.3'den görüldüğü gibi, emme katsayısının 0,01 ile 0,1 arasıdaki değişimi kil yüzdesinin yaklaşık %10 ile %15 arasında, 0,1 ile 0,2 arasındaki değişimi ise yaklaşık %3 artmasına neden olmuştur. Daha önceden de belirtildiği gibi literatürde zemin minerallerinin emme katsayıları bulunmamaktadır. ISO 13320, 1999 (12)'de ise emme katsayısı bilinmeyen malzemeler için 0,01 ile 0,1 arasında bir değer alınabileceği belirtilmektedir. Ancak Çizelge 4.3'den de görüldüğü, gibi emme katsayısının 0,01 ile 0,1 arasıdaki değişimi, kil yüzdesinin yaklaşık %10 ile %15 arasıda değişmesine neden olmaktadır. Bu durumda "zeminlerin analizinde emme katsayısı kaç alınmalıdır" sorusuna verilebilecek kesin bir yanıt yoktur. Ancak, emme katsayısının örneklerin saydamlığını yansıtan bir parametre ve tam saydam malzemelerin emme katsayısının 0,0 olduğunu, ayrıca zemin örneklerinin saydam olmadığını göz önünde tutarak ISO 13320 (1999)'de önerilen üst sınır değeri olan 0,1'in alınabileceği düşünülmektedir. Bazı araştırmacılardan Muggler vd., 1997 (16) emme katsayısı için 0,15 değerini alırken, Eshel vd., 2004 (18) ise 0,2 değerini tercih etmiştir. Çizelge 4.3'den görüldüğü gibi emme katsayısının 0,1 ile 0,2 arasındaki değişimi kil yüzdesini sadece % 3 düzeyinde etkilemektedir. Bu çalışmada emme katsayısı için 0,1 değeri seçilmiştir.

4.6. Zemin Örneklerinin Ayrıştırılması

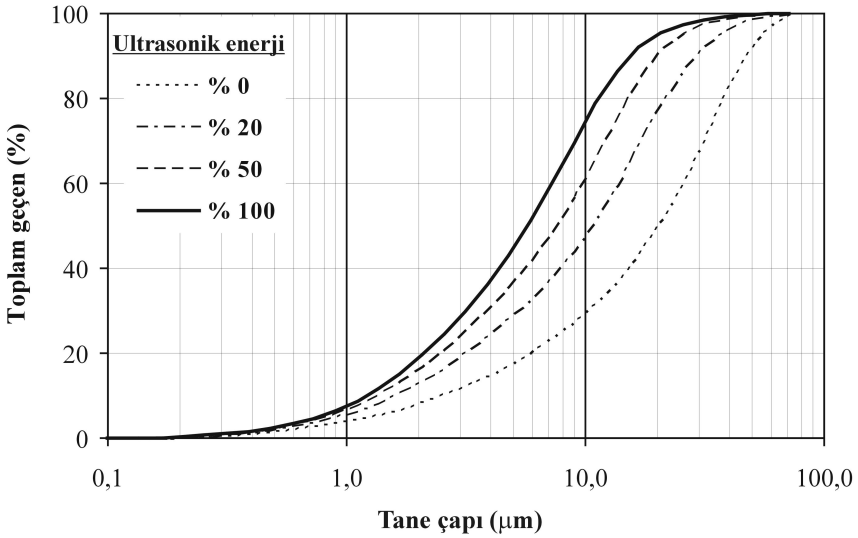
Lazer kırınım deneyinde, killi zeminlerin ayrıştırılması için genel bir yöntem belirlenmeden önce aşağıdaki soruların yanıtlanması gerekmektedir.

1. Ultrasonik enerji zemin örneklerinin ayrıştırılmasında ne kadar etkilidir ve tek başına yeterli midir?
2. Calgon çözeltisini analizde hemen önce doğrudan örnek haznesine ilave etmek örneklerin ayrıştırılması için yeterli midir (doğrudan ilave etme yöntemi), yoksa örnekleri analizden belli bir süre önce mi (örneğin 16 saat) Calgon çözeltisi içerisinde bekletmek gerekir (önceden bekletme yöntemi)?
3. Analizlerde kaç ml Calgon çözeltisi kullanılması gerekir?
4. Calgon çözeltisi ve ultrasonik enerji birlikte kullanıldığında, topaklanma olmadan örneklerin tam olarak ayrıştırılması için ne kadar süreyle ultrasonik enerji uygulanması gerekir ve bu sürenin belirlenmesi için dikkate alınabilecek pratik bir ölçüt var mıdır?

Lazer kırınım analizlerinde, Calgon çözeltisini iki farklı şekilde kullanmak mümkündür. Birincisinde, Calgon çözeltisi su ile birlikte doğrudan örnek haznesine ilave edilip, geri plan ölçümü alındıktan hemen sonra örnek ilave edilir ve ayrışması için birkaç dakika beklendikten sonra ölçüm alınıp analiz bitirilir. Bu yöntemde, zemin örneği sadece birkaç dakika süreyle Calgon çözeltisi ile temas etmiş olmaktadır. İkincisinde ise, zemin örneği analizden yaklaşık 16 saat önce Calgon çözeltisinin içerisine konulur ve bu sürenin sonunda Calgon çözeltisi ile birlikte haznenin içerisine boşaltılarak analiz edilir. Anlatım kolaylığı bakımından metnin bundan sonraki bölümlerinde birinci yöntem "doğrudan ilave yöntemi", ikinci yöntem ise "önceden bekletme yöntemi" olarak anılacaktır. Aşağıdaki bölümlerde, öncelikle ultrasonik enerjinin zemin örneklerinin ayrıştırılmasında ne denli etkili olduğu, doğrudan ilave etme ve önceden bekletme yöntemlerinde ne kadar Calgon çözeltisi kullanılması gerektiği, örneklerin ayrıştırılması için ne kadar süreyle ultrasonik enerji uygulanması gerektiği ve topaklanma sorunu ele alınmıştır. Calgon çözeltisi ASTM D422, 1998 (6)'de tanımlandığı gibi hazırlanmıştır.

4.6.1. Ultrasonik enerjiyle ayrıştırma

Ultrasonik enerji, süspansiyonun içerisinde yüksek frekanslı (40 kHz) ses titreşimleri oluşturarak, tanelerin titreşmesini ve böylece mekanik olarak ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Ultrasonik enerjinin zemin örneklerinin ayrıştırılması üzerindeki etkinliğini belirlemek için, Bölüm 4.1'de tarif edildiği gibi aynı örnekten 4 tane alt-örnek alınıp, birincisi hiç ultrasonik enerji uygulanmadan (%0), diğerleri ise %20, %50 ve %100 ultrasonik enerji uygulanarak analiz edilmiş ve sonuçları Şekil 4.9'da sunulmuştur. Bu analizlerde Calgon çözeltisi kullanılmamıştır.



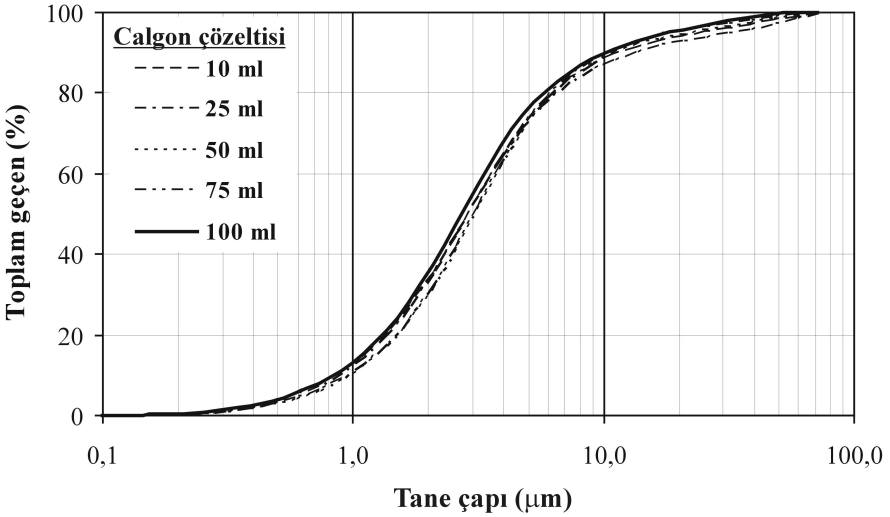
Şekil 4.9. Zemin örneklerinin ayrıştırılmasında ultrasonik enerjinin etkisi

Şekil 4.9'dan, ultrasonik enerjinin şiddeti arttırıldıkça tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin ince tanelere doğru ötelendiği ve örneklerin daha iyi ayrıştırıldığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre, ultrasonik enerjinin zeminlerin ayrıştırılmasında önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.

4.6.2. Doğrudan ilave etme yöntemiyle ayrıştırma

Doğrudan ilave yönteminde, örnek haznesi su ile doldurulurken Calgon çözeltisi doğrudan örnek haznesine ilave edilip, ultrasonik enerji, pompa ve mekanik karıştırıcı çalıştırıldıktan sonra geri plan ölçümü alınmıştır. Geri plan ölçümünün

ardından analiz edilecek olan örnek, haznenin içerisine boşaltılıp ultrasonik enerji ve Calgon çözeltisinin etkisi ile ayrıştırılması için birkaç dakika beklendikten sonra ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, örneğin tamamen ayrıştırılmasını sağlamak için ne kadar Calgon çözeltisi kullanılması gerektiğini belirlemek için, Örnek-23'den Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi, 5 tane alt-örnek alınmış ve her biri 10, 25, 50, 75 ve 100 ml Calgon çözeltisi kullanılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizlerde Calgon çözeltisi ile birlikte ultrasonik enerji de uygulanmış olup, örneklerin ayrıştırılması yaklaşık 4 – 5 dakika sürmüştür. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da sunulmuştur.



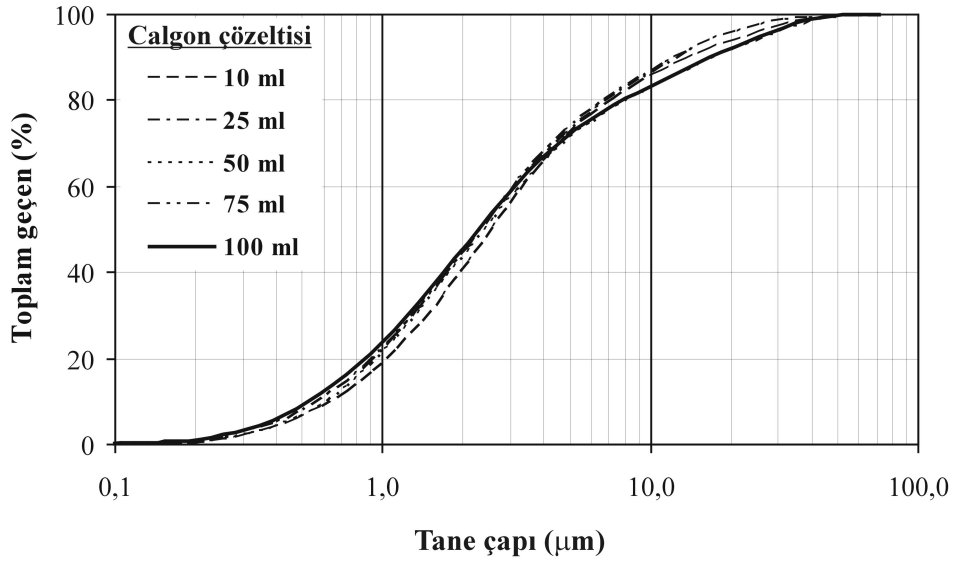
Şekil 4.10. Doğrudan ilave etme yönteminde Calgon çözeltisi miktarının analiz sonuçları üzerindeki etkisi (Örnek-23)

Şekil 4.10'dan, 10 ile 100 ml arasında kullanılan Calgon çözeltisinin örneğin ayrıştırılmasında belirgin bir fark meydana getirmediği ve en az 10 ml Calgon çözeltisinin ayrıştırmayı yeterli düzeyde sağladığı görülmektedir. ASTM D 422, 1998 (6)'ye göre hidrometre deneyi için yaklaşık 30 g ağırlığındaki örneğin ayrıştırılması için 125 ml Calgon çözeltisinin kullanılması gerektiği düşünülürse, 0,1 – 0,5 g kadar örneğin ayrıştırılmasında 10 ml Calgon çözeltisinin yeterli gelmesi mantıklı görünmektedir. Ancak, daha fazla Calgon çözeltisinin kullanılması analiz sonuçlarını olumsuz etkilemediğinden (hava kabarcıklarının oluşması vb. gibi) ve kil içeriği yüksek olan diğer örneklerde 10 ml Calgon çözeltisinin yetersiz kalabileceği

olasılığına karşılık, doğrudan ilave etme yöntemi ile killi zemin örneklerinin ayrıştırılmasında 100 ml Calgon çözeltisi kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir.

4.6.3. Önceden bekletme yöntemiyle ayrıştırma

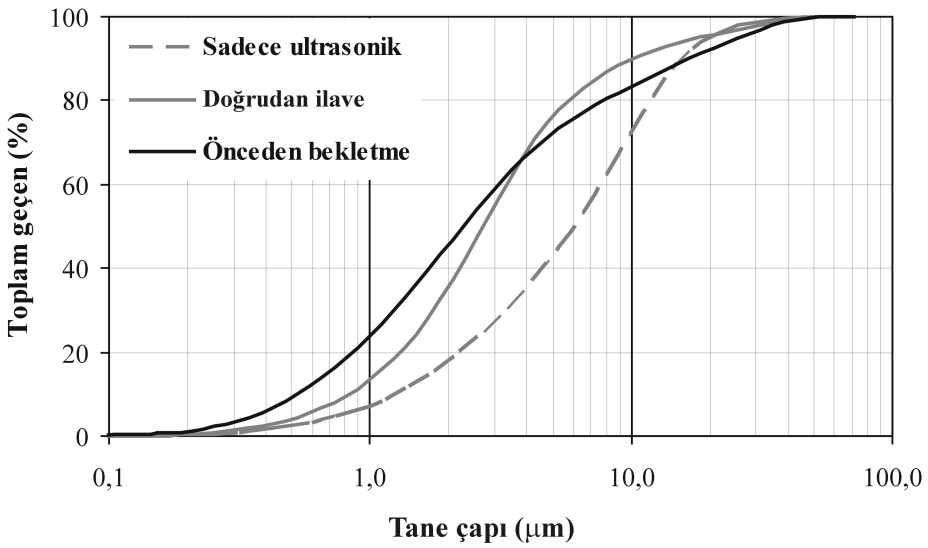
Önceden bekletme yönteminde, ne kadar Calgon çözeltisi kullanılası gerektiğini belirlemek için, yine Örnek-23'den Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi 5 tane alt-örnek alınmış ve her biri ayrı kapların içerisine konulmuştur. Bu örneklerin üzerine ayrı ayrı 10, 25, 50, 75 ve 100 ml Calgon çözeltisi boşaltılıp küçük bir spatulayla birkaç dakika karıştırıldıktan sonra, hidrometre deneyinde (ASTM D 422, 1998 (6)) olduğu gibi yaklaşık 16 saat çözeltinin içerisinde bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda, örnek haznesi su ile doldurulup geri plan ölçümü alındıktan sonra analiz edilecek örnek bir müddet daha karıştırılmış ve Calgon çözeltisi ile birlikte haznenin içerisine boşaltılmıştır. Örneğin, ultrasonik enerjinin de etkisi ile ayrıştırılması için birkaç dakika beklendikten sonra ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile örneklerin ayrıştırılması yaklaşık 1 – 2 dakika sürmüş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Önceden bekletme yönteminde Calgon çözeltisi miktarının analiz sonuçları üzerindeki etkisi (Örnek-23)

Öncen bekletme yönteminde de, 10 ile 100 ml arasında kullanılan Calgon çözeltisinin örneğin ayrıştırılmasında belirgin bir fark meydana getirmediği, ancak 100 ml Calgon çözeltisi kullanılarak yapılan analizde az da olsa örneğin daha iyi ayrıştırıldığı görülmektedir (Şekil 4.11). Bu nedenle önceden bekletme yönteminde de killi zemin örneklerinin ayrıştırılması için 100 ml Calgon çözeltisinin kullanılması uygun görülmektedir.

Örneklerin ayrıştırılmasında hangi yöntemin daha etkili olduğunu belirlemek için, her iki yöntemde de 100 ml Calgon çözeltisi kullanılarak yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya, hiçbir şekilde Calgon çözeltisi kullanılmadan sadece ultrasonik enerji uygulanarak yapılan ölçüm sonucu da dahil edilmiş olup sonuçları Şekil 4.12'de sunulmuştur.



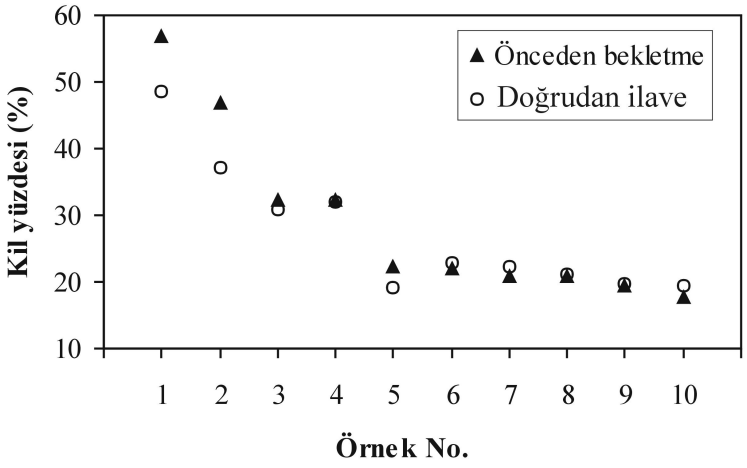
Şekil 4.12. Ayrıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması (Örnek-23)

Calgon çözeltisi kullanılarak yapılan analizlerin her ikisinde de, sadece ultrasonik enerji uygulanarak yapılan analize oranla daha iyi ayrıştırma sağlanmıştır (Şekil 4.12). Bununla birlikte, önceden bekletme yönteminin doğrudan ilave yöntemine göre daha iyi ayrıştırma sağladığı görülmektedir. Ayrıştırma ölçüsü olarak kil yüzdesi dikkate alınacak olursa, doğrudan ilave yönteminde kil yüzdesi % 37,2 iken, önceden bekletme yönteminde ise % 46,9 olarak belirlenmiştir (fark % 9,7). Sadece tek bir örnek üzerinde yapılan bu analizin sonuçlarını bütün örneklere genellemek

gerçekçi bir yaklaşım olmayacağından, benzer analizler Örnek-23 ile birlikte toplam 10 farklı örnek üzerinde tekrarlanmıştır. Bu örneklerin bazı indeks özellikleri ve her iki ayrıştırma yöntemi ile elde edilen kil yüzdeleri Çizelge 4.4'de, kil yüzdelerinin karşılaştırılması ise Şekil 4.13'de verilmiştir. On adet örneğin tamamının tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin verilmesi metni uzatacağından, hangi yöntemin daha iyi ayrıştırma sağladığını belirlemek için kil yüzdeleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.4. Ayrıştırma yönteminin belirlenmesinde kullanılan örneklerin indeks özellikleri

Örnek No.	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Zemin sınıfı (USCS)	Kil içeriği (%)		
					Önceden bekletme	Doğrudan ilave	Fark
1 (Örnek-40)	102,6	42,2	60,4	CH	56,7	48,4	8,3
2 (Örnek-23)	89,1	38,3	50,8	CH	46,9	37,2	9,7
3 (Örnek-48)	57,3	23,7	33,6	CH	32,3	30,8	1,5
4 (Örnek-34)	87,9	30,2	57,7	CH	32,2	31,9	0,3
5 (Örnek-60)	41,5	24,9	16,6	CL	22,4	19,2	3,2
6 (Örnek-1)	29,0	15,0	14,0	CL	22,0	22,8	-0,8
7 (Örnek-31)	76,4	28,0	48,4	CH	20,8	22,3	-1,5
8 (Örnek-52)	46,8	20,4	26,4	CL	20,9	21,0	-0,1
9 (Örnek-47)	47,8	25,6	22,2	CL	19,5	19,8	-0,3
10 (Örnek-68)	37,7	19,0	18,7	SC	17,8	19,5	-1,8



Şekil 4.13. Doğrudan ilave ve önceden bekletme yöntemleriyle elde edilen kil yüzdelerinin karşılaştırılması

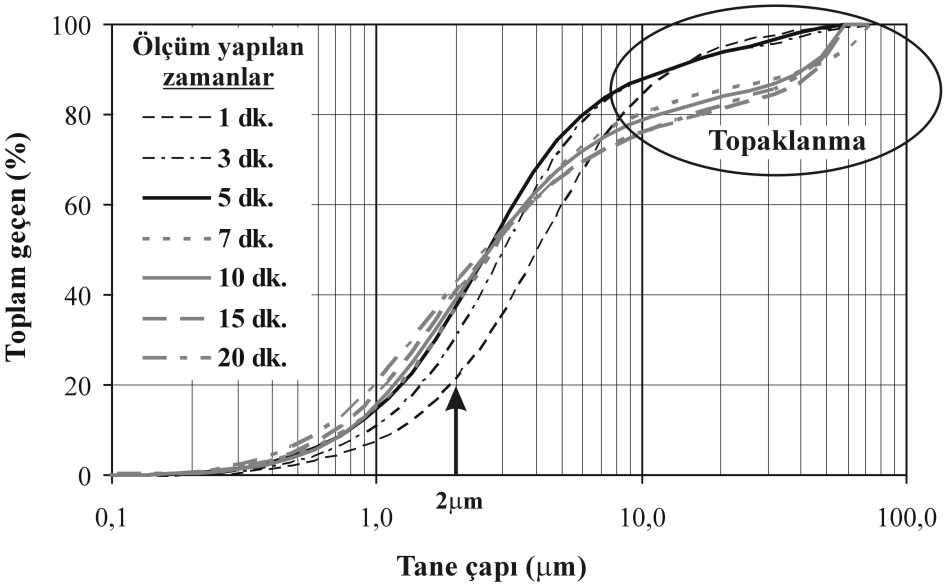
Çizelge 4.4 ve Şekil 4.13'den görüldüğü gibi, 8 örnekte (örnek-3 ile 10 arası) her iki ayrıştırma yöntemi ile belirlenen kil yüzdeleri arasında belirgin bir fark meydana gelmemiştir. Ancak, 2 örnekte (örnek-1 ve 2) önceden bekletme yönteminin daha iyi ayrıştırma sağladığı ve kil yüzdesini daha yüksek belirlediği görülmüştür (fark yaklaşık % 10). Bu örmeklerin, Çizelge 4.5'de verilen indeks özellikleri ve kil yüzdeleri incelendiğinde, örnek-1 ve 2'nin likit limitinin, özellikle kil yüzdesinin diğer örneklere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Kil yüzdesi için bir sınır belirlenecek olursa, örnek-1 ve 2'nin kil yüzdesinin %40'ın üzerinde olduğu, diğer örneklerin ise %40'ın altında olduğu görülmektedir. Bu durumda, kil yüzdesi düşük olan zeminlerde (yaklaşık < %40) her iki ayrıştırma yönteminin de yaklaşık aynı sonucu verdiğini, kil yüzdesi yüksek olan zeminlerde (yaklaşık > %40) ise önceden bekletme yönteminin daha iyi ayrıştırma sağladığını söylemek mümkündür. Bunun sebebini ortaya koymak için, ayrıştırma mekanizmasının ve ayrıştırma maddesinin rolünün bilinmesi gerekmektedir. Nettleship vd., 1997 (51), ayrıştırma maddesinin bütün tanelerin yüzeylerinin kaplayarak aynı yüzey yüklerine sahip olmasını sağladığını ve böylece birbirine bitişik tanelerin yüzeyleri arasında güçlü bir elektrostatik itme kuvveti meydana getirdiğini ifade etmiştir. Doğrudan ilave etme yönteminde, zemin örneği yaklaşık 5 dakika süreyle Calgon çözeltisiyle temas etmektedir. Kil yüzdesi yüksek olan örneklerde, bu sürenin, Calgon çözeltisinin bütün kil tanelerinin yüzeyini kaplaması için yeterli olmadığı ve bu nedenle ayrıştırmanın yeterli düzeyde gerçekleşmediği düşünülmektedir.

Önceden bekletme yönteminin pratikte uygulanmasında önemli bir sorunla karşılaşılmaktadır. Bu sorun, örnek miktarının belirlenmesinde ortaya çıkmaktadır. Lazer kırınım analizlerinde kullanılacak örnek miktarı, analiz sırasında ışın azalma oranına göre belirlendiğinden, bu miktarı önceden kestirmek zor olabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, söz konusu örnek, ilk önce doğrudan ilave etme yöntemiyle analiz edilip, ışın azalma oranının %15 – 30 arasında olmasını sağlayacak örnek miktarı belirlenmişi daha sonra aynı miktardaki örnek göz kararı ile yaklaşık tahmin edilerek alınıp, önceden bekletme işlemine tabi tutulmuştur. Ancak, bu miktarın tahmin edilmesi güç olduğundan, değişik miktarlarda birkaç tane alt-örnek alınmış ve analiz sırasında %15 – 30 arasında ışın azalma oranı sağlayan

örneğin sonuçları değerlendirilmeye alınmıştır. Önceden bekletme yönteminin bir diğer dezavantajı da, analiz süresini uzatmasıdır. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmadaki bütün örneklerin analizinde doğrudan ilave etme yöntemi uygulanmıştır.

4.6.4. Ultrasonik enerji uygulama süresi ve topaklanma sorunu

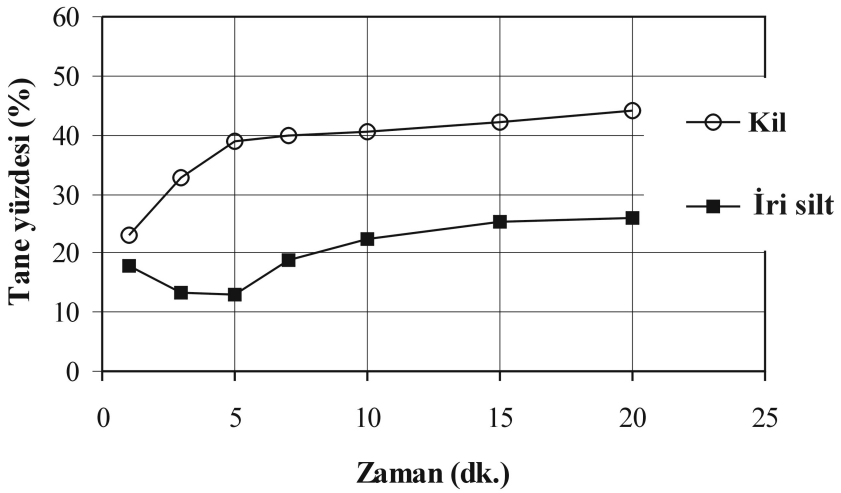
Gerek doğrudan ilave etme, gerekse önceden bekletme yönteminde, belli bir süre sonra örneklerde tekrar topaklanma meydana geldiği saptanmıştır. Bu sürenin belirlenmesi için, örnek haznesi su ve 100 ml Calgon çözeltisiyle doldurulup geri plan ölçümü alındıktan sonra (doğrudan ilave yöntemi) Örnek-23'den alınan bir alt-örnek haznenin içerisine boşaltılmış ve 20 dakika boyunca haznenin içerisinde tutulmuştur. Bu süre zarfında sürekli ultrasonik enerji uygulanmış olup 1, 3, 5, 7, 10, 15 ve 20 dakikaların sonunda tane büyüklüğü dağılımları hesaplattırılmış ve sonuçları Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.14. Tane büyüklüğü dağılımlarının zamanla değişimi ve yeniden topaklanmanın belirlenmesi (Örnek-23)

İri ve ince tane sınırı olarak 10 μm alınacak olursa, söz konusu örnekte, ilk 5 dakikaya kadar tane büyüklüğü dağılımının ince taneleri (< 10 μm) gösteren kısmının yukarıya doğru ötelendiği, 5 dakikadan sonra ise iri taneleri (> 10 μm) gösteren

kısmının aşağıya doğru ötelendiği görülmektedir (Şekil 4.14). Zamanla tane büyüklüğü dağılımının yukarıya doğru ötelenmesi ince tane, aşağıya doğru ötelenmesi ise iri tane yüzdesinin arttığını göstermektedir. O halde bu örnekte, ilk 5 dakikaya kadar ince tane yüzdesi artmış, 5 dakikadan sonra ise ince tane yüzdesi yaklaşık sabit kalırken iri tane yüzdesi artmaya başlamıştır. İnce tane yüzdesinin artması örneğin ayrıştığını gösterirken iri tane yüzdesinin artması ise topaklandığını göstermektedir. Çünkü iri tanelerin zamanla artması, örnekte topaklanma meydana gelmesi ile mümkündür. Ayrıştırmanın ve topaklanmanın daha açık bir şekilde değerlendirilebilmesi için kil ve iri silt yüzdelerinin zamanla değişimi de incelenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Zamanla birlikte kil ve iri silt (75 – 10 μm) yüzdelerinde meydana gelen değişim

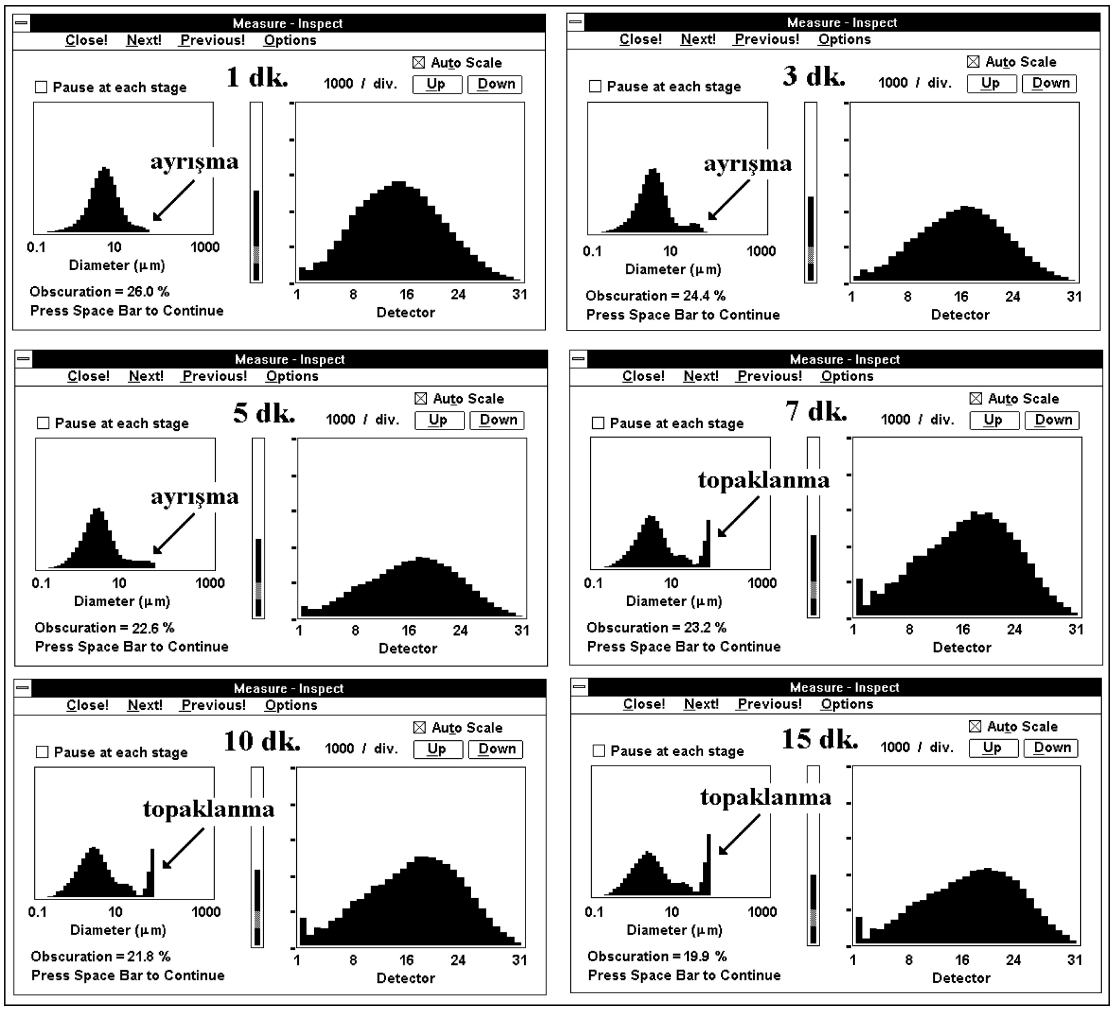
Şekil 4.15'den, ilk 5 dakikaya kadar kil yüzdesinin hızla arttığı, 5 dakikadan sonra ise daha yavaş bir şekilde artmaya devam ettiği, buna karşın iri silt yüzdesinin 5 dakikaya kadar azaldığı, 5 dakikadan sonra ise artmaya başladığı açık bir şekilde görülmektedir. İri silt yüzdesi azalırken kil yüzdesinin artması, iri silt büyüklüğündeki topakların zamanla dağılıp kil yüzdesine katkı sağladığını düşündürmektedir. Bu bakımdan ilk 5 dakikaya kadar söz konusu örnekte ayrıştırma meydana geldiğini söylemek mümkündür. 5 dakikadan sonra ise, iri silt yüzdesinin artması, ancak ince silt veya kil tanelerinin birbirine tutunarak iri silt büyüklüğünde topaklar meydana getirmesi ile mümkündür. Bu durum 5 dakikadan sonra örnekte

topaklanma meydana geldiğinin bir göstergesidir. Sonuç olarak, söz konusu örnekte, 5 dakikaya kadar ayrıştırma, 5 dakikadan sonra ise topaklanma meydana gelmiştir.

Tek bir örnek üzerinde elde edilen bu sonuçlar genelleştirilerek, bütün örneklerin ayrıştırılması için 5 dakika ultrasonik enerji uygulanmasının yeterli olduğunu, 5 dakikadan sonra ise topaklanmanın başlayacağını söylemek doğru değildir. Çünkü, kişisel deneyimler bazı örnekler için daha az, bazıları için ise daha fazla süreyle ultrasonik enerji uygulanması gerektiğini göstermiştir. Ancak, bütün örnekler için yukarıdaki gibi detaylı bir analiz yapılamayacağına göre, bu sürenin belirlenmesi için pratik bir yönteme gereksinim duyulmaktadır. Bunun için, analiz boyunca bilgisayar ekranından izlenebilen ve tane büyüklüğü dağılımını histogram şeklinde gösteren ön izleme penceresinde yararlanılabilmektedir.

Süspansiyon içerisinde merceğin üst ölçüm sınırından daha büyük taneler bulunduğunda, tane büyüklüğü dağılımının iri taneleri gösteren ucu, üst ekseni keskin bir hatla kesmektedir (Şekil 4.14, daire içinde gösterilen kısım). Böyle bir durumda, ön izleme penceresindeki histogramın iri taneleri gösteren kuyruğu da yatay ekseni kesin bir hatla kesmektedir. Bu ölçüte göre ayrıştırma ve topaklanma süresinin belirlenmesi için, Şekil 4.14'de sonuçları verilen ölçümlerin alındığı zamanlarda ön izleme penceresinin görüntüleri kaydedilmiş ve Şekil 4.16'da sunulmuştur. Topaklanmayı tespit etmek için histogramın iri taneleri gösteren kuyruğu gözlenmiş ve Şekil 4.16'da bu nokta ok ile gösterilmiştir. Analizin başlangıcından itibaren 1, 3 ve 5'nci dakikalarda histogramın iri taneleri gösteren kuyruğunun yatay eksene yumuşak bir şekilde indiği, 7, 10 ve 15'nci dakikalarda ise bu kuyruğun dik bir hatla kesildiği görülmektedir. Ön izleme penceresindeki histogramın iri taneleri gösteren kuyruğunun dik bir hatla kesilmesi, süspansiyonda merceğin üst ölçüm sınırından daha büyük taneler olduğunu göstermektedir. Ancak, analiz edilen örnek, başlangıçta 75 μm elekten elendiğine ve kullanılan merceğin üst ölçüm sınırı da 80 μm olduğuna göre, başlangıçta süspansiyon içerisinde merceğin üst ölçüm sınırdan daha büyük tanelerin olması söz konusu değildir. O halde, 5 dakikadan sonra bu örnekte topaklanma meydana gelmiş ve 7 dakikadan sonra bu topakların büyüklüğü merceğin üst ölçüm sınırlarını da geçecek boyuta ulaşmıştır.

Ancak, Şekil 4.16'da 7 dakika penceresinde görülen dik kısım bir anda meydana gelmemiş, 5 dakikadan sonra yavaş bir şekilde başlayıp, zamanla artarak 7 dakika penceresinde görülen hale gelmiştir. O halde, ön izleme penceresi sürekli gözlenip, histogramın iri taneleri gösteren kuyruğu dik bir hale gelmeden hemen önce ölçüm alınarak, örnekte topaklanma meydana gelmeden en iyi ayrıştırmanın yakalanması mümkündür. Önerilen bu yöntem bütün zemin örnekleri için geçerli olduğundan, örneklerin ayrıştırılması için standart bir süre uygulama zorunluluğu ortadan kalkmakta ve her örnek için en uygun ultrasonik enerji uygulama süresi ön izleme penceresi gözlenerek basit ve pratik bir şekilde belirlenebilmektedir.



Sekil 4.16. Ayrışma süresinin ve topaklanmanın ön-izleme penceresi gözlenerek belirlenmesi

5. TANE BÜYÜKLÜĞÜ DAĞILIMI EĞRİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

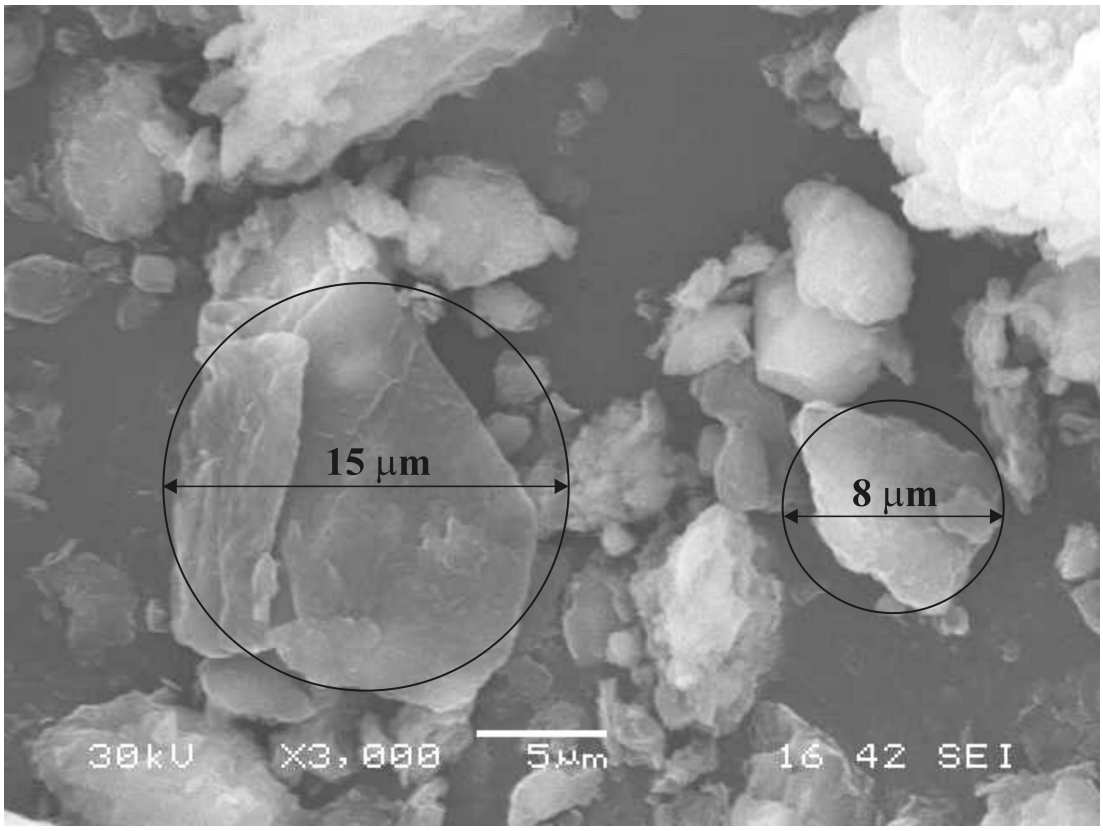
72 adet doğal zemin örneğinin lazer kırınım ve hidrometre yöntemleri ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrileri Ek-1 ile Ek-4 arasında verilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin birbirleri ile olan ilişkisi bakımından dört grupta ele alınabileceği görülmüştür. 10 adet örneğin yer aldığı birinci grupta, her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin büyük bir bölümü üst üste çakışmıştır (Ek-1). 20 adet örneğin yer aldığı ikinci grupta, tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümü üst üste çakışmıştır (Ek-2). Üçüncü grup olarak değerlendirilen 6 adet örnekte, hidrometre yöntemiyle bütün tane yüzdeleri daha yüksek belirlenmiştir (Ek-3). Dördüncü grupta yer alan 36 adet örnekte ise her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrileri değişik tane çaplarında birbirleri ile kesişmiştir (Ek-4). Dördüncü grupta yer alan örnekler, toplam örnek sayısının yarısını oluşturmaktadır.

Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin farklı olmasının başlıca nedeninin tane şekli olduğu, ancak tane mineralojisinin de etkili olduğu düşünülmektedir. Aşağıda, tane şeklinin ve mineralojisinin lazer kırınım ve hidrometre deney sonuçları üzerindeki etkisi ayrı bölümler halinde incelenmiştir. Daha sonraki bölümde ise, dört grupta değerlendirilen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin ilişkileri incelenmiştir.

5.1. Tane Şeklinin Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi

Tane şeklinin hidrometre deney sonuçları üzerindeki etkisini incelemek için Lu vd., 2000 (9)'nin verdiği eşitliklerden yararlanılmıştır. Lu vd., 2000 (9), levhamsı şekle sahip tanelerin disk şeklindeki elipsoide benzetilerek analiz edilebileceğini belirtmiş ve disk şeklindeki elipsoit ile aynı hızda çöken kürenin yarıçapları arasındaki oranı tanımlamıştır (Bkz. Eş. 2.25) Lu vd., 2000 (9)'nin kuramsal olarak verdiği bu eşitliklerin pratikte bir hidrometre deneyi üzerinde uygulanabilmesi için, deneyde kullanılan tanelerin şekil oranlarının (E = kalınlık / çap) bilinmesi gerekmektedir. Mikron büyüklüğündeki tanelerin şekil oranlarının SEM fotoğrafları ile

belirlenebileceği düşünülse de, SEM analizi ile iki boyutlu görüntü kaydedildiğinden tanelerin kalınlığını net olarak görmek mümkün olmamaktadır. Bu konudaki diğer bir güçlük ise, gerçekte disk şeklinde olmayan kil tanelerinin şeklini, SEM fotoğrafları üzerinden disk şekline benzetme konusunda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, kesin bir şekil oranı belirlemekten çok ancak bir fikir edinmek ve tahmin yürütmek mümkün olabilir. Ancak buna rağmen, tane şeklinin hidrometre deney sonuçları üzerindeki etkisini görmek için, SEM fotoğrafları çekilen bir örnek (Örnek-11) üzerinden yaklaşık olarak şekil oranları belirlenmiştir (Resim 5.1). Bu örneğe ait diğer SEM fotoğrafları Ek-5'de sunulmuştur.



Resim 5.1. Şekil oranının SEM fotoğrafı üzerinden yaklaşık olarak belirlenmesi (Örnek-11)

SEM fotoğrafından net olarak görünen iki adet zemin tanesinden birisinin çapı yaklaşık 15 μm, diğerinin ise yaklaşık 8 μm olarak ölçülmüştür (Resim 5.1). SEM fotoğrafından tanelerin kalınlığının kesin olarak saptamak mümkün olmamıştır. Ancak, tahmin üzerine 15 μm'lik tanenin kalınlığı 3 μm ve 2 μm kabul edilerek şekil

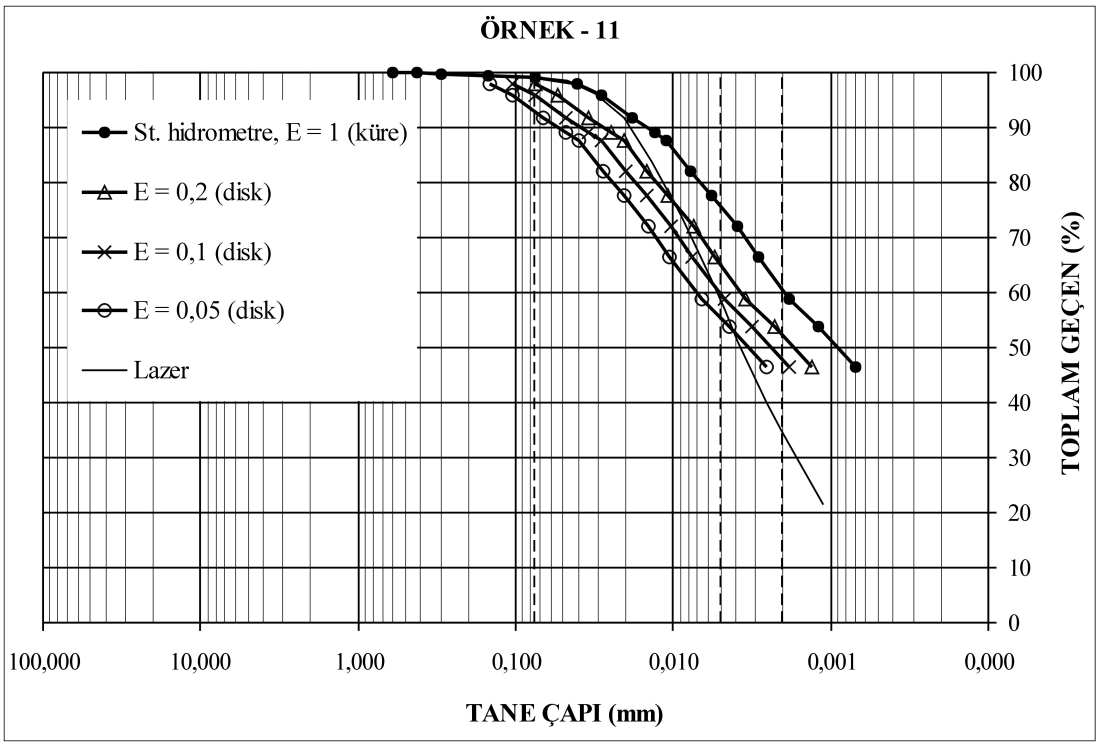
oranları (E) sırsıyla 0,2 ve 0,133 olarak hesaplanmıştır. 8 μm'lik tanenin kalınlığı ise 1 μm ve 0,4 μm kabul edilerek şekil oranları (E) sırasıyla 0,125 ve 0,05 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda söz konusu örneğin şekil oranının yaklaşık 0,05 ile 0,2 arasında değiştiği öne sürülebilir. Bu örneğin şekil oranının sırasıyla 0,05, 0,1 ve 0,2 olduğu varsayılarak Stokes eşitliği ile hesaplanan tane (küre) çapları Lu vd., 2000 (9)'nin verdiği eşitlilerle (Eş. 2.24 ve 2.25) disk çapına dönüştürülmüştür. Örnek olarak E = 0,05 için yapılan hesaplar aşağıda gösterilmiştir. E = 0,1 ve 0,2 için tane çapı dönüşümlerinde de benzer yol izlenmiştir.

E = 0,05 için $$\Delta_a = \frac{\sqrt{1-E^2}}{\cos^{-1} E} = \frac{\sqrt{1-0,05^2}}{\mathrm{Cos}^{-1}\, 0,05} = 0,6567$$

$$\frac{a^*}{a} = \sqrt{\frac{E}{\Delta_a}} \quad \Rightarrow \quad \frac{a^*}{a} = \sqrt{\frac{0,05}{0,6567}} = 0,2759239$$

$$a = \frac{a^*}{0,2759239}$$

Yukarıdaki eşitliklerde, a* Stokes eşitliği ile hesaplanan küre çapını, a küre ile aynı hızda çöken disk şeklindeki tanenin çapını ifade etmektedir. Bu şekilde hesaplanan tane büyüklüğü dağılımları Şekil 5.1'de, sayısal değerleri ise Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Disk varsayımıyla hesaplanan tane çaplarının, küre varsayımıyla (Stokes eşitliği) hesaplanan tane çaplarından daha büyük olduğu ve şekil oranı arttıkça disk çapıyla küre çapı arasındaki farkın daha da arttığı Şekil 5.1 ve Çizelge 5.1'den görülmektedir. Örneğin, Resim 5.1'de görülen yaklaşık 8 μm çapında ve 0,4 μm kalınlığındaki (E=0,05) levhamsı şekle sahip tane, Stokes eşitliğiyle 2,2 μm çapında küre şeklindeki bir tane gibi hesaplanmaktadır. Aynı tanenin kalınlığı 1 μm kabul edildiğinde ise (E=0,125) Stokes eşitliğiyle hesaplanan küre çapı 3,4 μm olmaktadır.



Şekil 5.1. Çeşitli şekil oranlarına göre disk varsayımıyla hesaplanan tane büyüklüğü dağılımları (Örnek-11)

Çizelge 5.1. Çeşitli şekil oranlarına göre hesaplanan tane çapları

Küre (Standart hidr.) E = 1		Disk E = 0,2		Disk E = 0,1		Disk E = 0,05	
D (mm)	% P	D (mm)	% P	D (mm)	% P	D (mm)	% P
0,0402	97,81	0,0761	97,81	0,1046	97,81	0,1458	97,81
0,0286	95,97	0,0541	95,97	0,0744	95,97	0,1037	95,97
0,0183	91,84	0,0346	91,84	0,0476	91,84	0,0663	91,84
0,0132	89,09	0,0250	89,09	0,0344	89,09	0,0479	89,09
0,0110	87,71	0,0207	87,71	0,0285	87,71	0,0397	87,71
0,0077	82,20	0,0145	82,20	0,0200	82,20	0,0279	82,20
0,0057	77,61	0,0108	77,61	0,0149	77,61	0,0207	77,61
0,0040	72,10	0,0075	72,10	0,0103	72,10	0,0143	72,10
0,0029	66,58	0,0055	66,58	0,0075	66,58	0,0105	66,58
0,0018	58,78	0,0035	58,78	0,0048	58,78	0,0066	58,78
0,0012	53,73	0,0023	53,73	0,0031	53,73	0,0044	53,73
0,0007	46,38	0,0013	46,38	0,0018	46,38	0,0025	46,38

Yukarıda verilen sayısal örnekler, hidrometre deneyinin tane şeklinden önemli ölçüde etkilendiğini ve levha şeklindeki tanelerin hidrometre yöntemiyle olduğundan

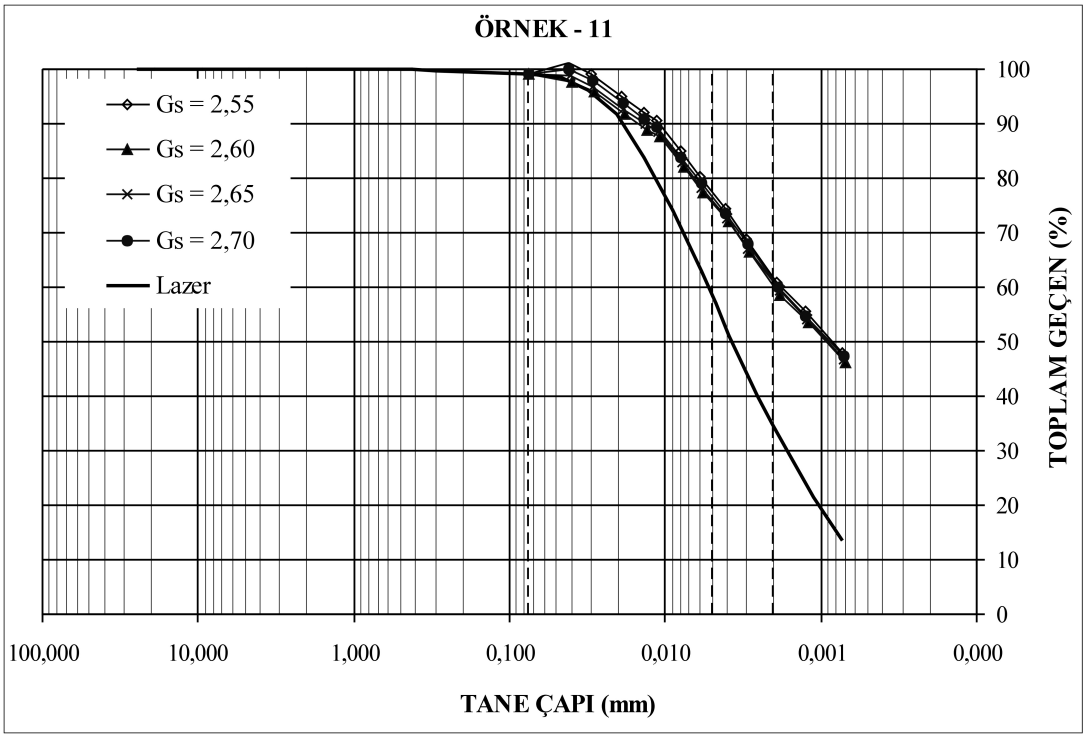
daha küçük hesaplandığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, çapı 2 μm'den büyük disk şeklindeki tanelerin Stokes eşitliği ile 2 μm çapındaki tanelermiş gibi hesaplandığı da ortaya konulmuştur. Bu sonuçlara göre, levhamsı tanelerden oluşan bir örneğin, hidrometre deneyiyle kil yüzdesinin olduğundan daha fazla hesaplandığı öne sürmek mümkündür.

Lazer kırınım yönteminin ise, levhamsı şekle sahip taneleri olduğundan bir miktar daha büyük ölçtüğü Bölüm 2.4.6'da ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştı. Özetlenecek olursa, hidrometre yöntemi levhamsı şekle sahip taneleri olduğundan daha küçük ölçerken, lazer kırınım yöntemi ise olduğundan daha büyük ölçmektedir. Bu nedenle, her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrileri arasındaki farkın başlıca nedenin tane şekli olduğu düşünülmektedir.

5.2. Tane Mineralojisinin Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi

Zeminlerin bileşiminde bulunan minerallerin özgül ağırlıklarının birbirinden farklı olmasına karşın, hidrometre deneyinde tane çapları ve geçen yüzdelerin hesaplanmasında sadece tek bir özgül ağırlık değeri kullanılmaktadır. Zeminlerin özgül ağırlığı piknometre deneyi ile belirlenmekte ve bu deney ortalama bir özgül ağırlık değeri vermektedir. Bazı araştırmacılar (5,10,15,18), hesaplarda kullanılan özgül ağırlığın, tanelerin gerçek özgül ağırlıktan sapmasının sonuçlar üzerinde etkili olduğunu ve lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen sonuçlar arasındaki farkların temel nedenlerinden birisinin de bu olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu nedenle, özgül ağırlık değerinin, dolaylı olarak da tane mineralojisinin hidrometre deney sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, Örnek-11'in tane büyüklüğü dağılım eğrisi 2,55 ile 2,70 arasında değişen farklı özgül ağırlık değerleri ile hesaplanmış ve sonuçları Şekil 5.2'de, sayısal değerleri ise Çizelge 5.2'de verilmiştir. Yapılan hesapların sonucunda, özgül ağırlık değerinin 2,55 ile 2,70 arasındaki değişiminin hidrometre deney sonuçlarını önemli ölçüde etkilemediği Şekil 5.2 ve Çizelge 5.2'den görülmektedir. Bu sonuçlara göre, bazı araştırmacılar (5,10,15,18) tarafından belirtilenin aksine, özgül ağırlık değerinin hidrometre (pipet)

yöntemi ile belirlenen tane büyüklüğü dağılımı üzerindeki etkisinin ihmale edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. Çeşitli özgül ağırlık değerleriyle hesaplanan tane büyüklüğü dağılımı eğrileri

Çizelge 5.2. Çeşitli özgül ağırlık değerleri için hesaplanan tane büyüklüğü ve geçen yüzde değerleri

Gs = 2,55		Gs = 2,60		Gs = 2,65		Gs = 2,70	
D (mm)	P (%)	D (mm)	P (%)	D (mm)	P (%)	D (mm)	P (%)
0,0420	101,09	0,0414	99,86	0,0407	98,69	0,0401	97,60
0,0299	99,20	0,0294	97,98	0,0290	96,84	0,0285	95,76
0,0191	94,92	0,0188	93,76	0,0185	92,67	0,0183	91,64
0,0138	92,08	0,0136	90,95	0,0134	89,89	0,0132	88,89
0,0114	90,65	0,0113	89,54	0,0111	88,50	0,0109	87,52
0,0080	84,96	0,0079	83,92	0,0078	82,94	0,0077	82,02
0,0060	80,21	0,0059	79,23	0,0058	78,30	0,0057	77,44
0,0041	74,52	0,0041	73,60	0,0040	72,74	0,0039	71,94
0,0030	68,82	0,0030	67,98	0,0029	67,18	0,0029	66,44
0,0019	60,75	0,0019	60,01	0,0019	59,31	0,0018	58,65
0,0013	55,53	0,0012	54,85	0,0012	54,21	0,0012	53,61
0,0007	47,94	0,0007	47,35	0,0007	46,80	0,0007	46,28

Tane mineralojisinin lazer kırınım deneyi üzerindeki etkisi ise, minerallerin farklı saptırma indisine sahip olmasından ve lazer kırınım sonuçlarının saptırma indisinin değişiminden önemli ölçüde etkilenmesinden kaynaklanmaktadır (Bkz. Şekil 4.5). Bölüm 4.5'de bu konu ayrıntılı bir şekilde incelenmişti. Her ne kadar hidrometre deney sonuçları tane mineralojisinden etkilenmese de, lazer kırınım sonuçları etkilendiğinden, her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrileri arasındaki farkların nedenlerinden birisinin de tane mineralojisi olduğu düşünülmektedir.

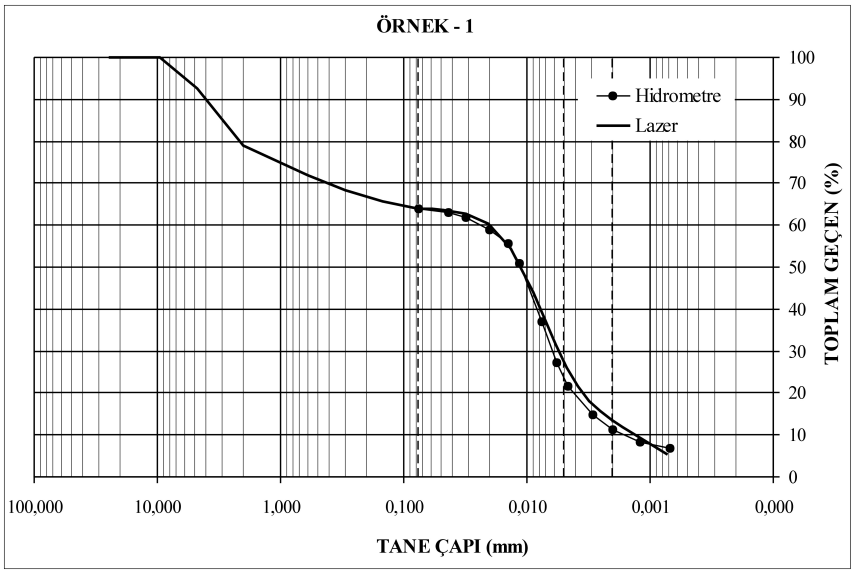
5.3. Lazer Kırınım ve Hidrometre Yöntemleriyle Belirlenen Tane Büyüklüğü Dağılım Eğrileri Arasındaki İlişkinin Açıklanması

Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin birbirleriyle olan ilişkisi bakımından dört grupta değerlendirilebileceği belirtilmişti. Bu grupların her birinden seçilen ve SEM fotoğrafları çekilen örnekler üzerinde, tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin birbirleri ile olan ilişkileri açıklanmaya çalışılmıştır.

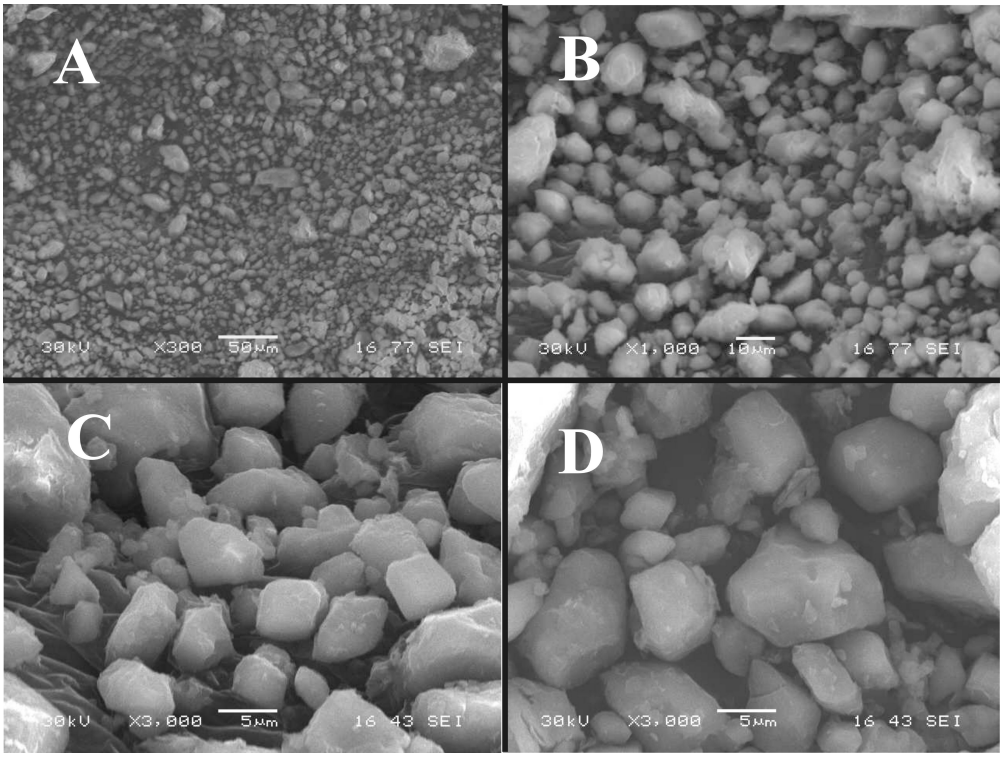
5.3.1. Birinci grup örnekler (10 adet)

Birinci grupta yer alan on adet örnekte, her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin büyük bir bölümü hemen hemen üst üste çakışmıştır (Ek-1). Bu örneklerin içerisinden Örnek-1'in tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin neredeyse tamamında her iki yöntem de hemen hemen aynı sonucu verdiğinden, incelemek için Örnek-1 seçilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre bu örneğin çoğunluğunu kalsit minerali oluşturmakta, örnek az miktarda kuvars minerali de içermektedir (Ek-6). Kalsitin saptırma indisi 1,49 – 1,74, kuvarsın ise 1,54 – 1,55 arasında (Bkz. Çizelge 2.6) olduğundan ve kuvars minerali çoğunlukta olduğundan, lazer kırınım analizlerinde saptırma indis için 1,54 değeri kullanılmıştır. Kalsitin özgül ağırlığı 2,70, kuvarsın ise 2,65'dir (Bkz. Çizelge 2.3). BS 1377: Part 2, 1990 (7)'ye göre yapılan piknometre deneyinin sonucunda örneğin özgül ağırlığı 2,68 bulunmuş ve hidrometre yöntemi için yapılan hesaplarda bu değer kullanılmıştır. Örnek-1'in her iki yöntemle belirlenmiş tane büyüklüğü dağılım eğrileri Şekil 5.3'de, dört farklı

ölçekte çekilmiş SEM fotoğrafları ise Resim 5.2'de sunulmuştur (örneğin SEM fotoğrafları daha geniş karelerle Ek-5'de sunulmuştur).



Şekil 5.3. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin her ikisinin de hemen hemen aynı sonucu verdiği bir örnek (Örnek-1)

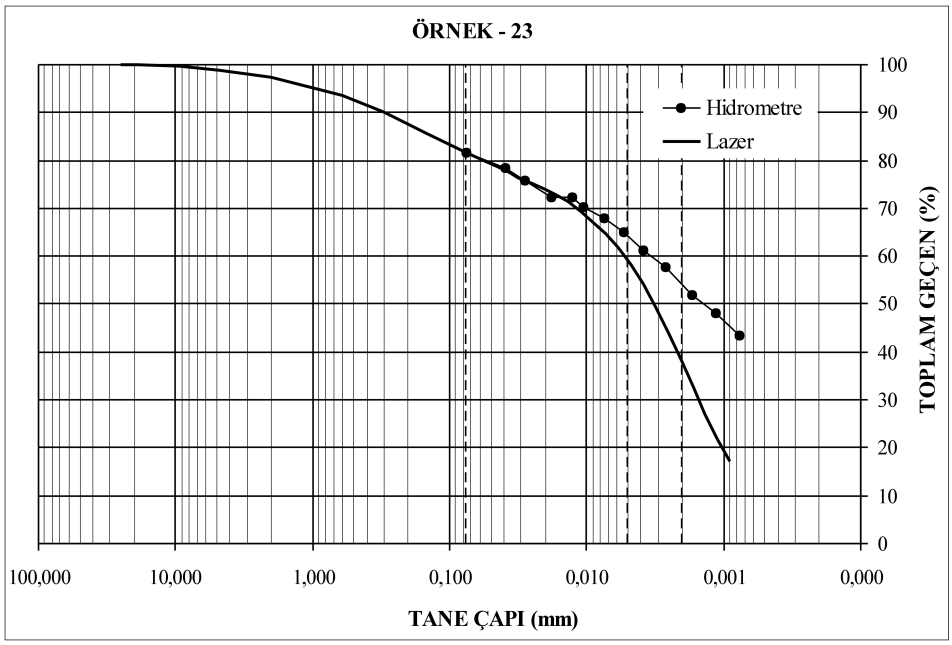


Resim 5.2. Örnek-1'in çeşitli ölçeklerde çekilmiş SEM fotoğrafları

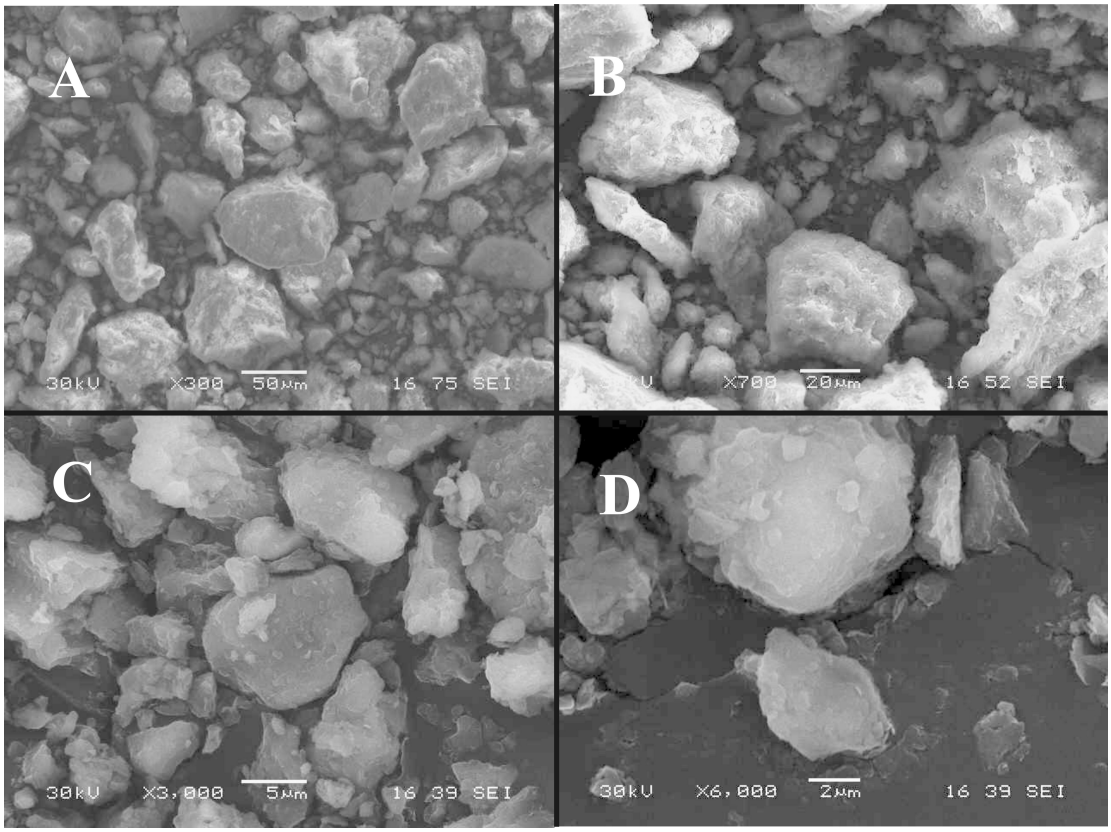
SEM fotoğrafları incelendiğinde (Resim 5.2) hemen hemen her büyüklükteki tanelerin yuvarlağımsı ve küre şekline yakın olduğu görülmektedir. Örnek-1'den alınan sonuçlara göre, tane şekli küreye yakın olduğunda ve mineralojik bileşim çok fazla çeşitlilik göstermediğinde, lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği öne sürülebilir.

5.3.2. İkinci grup örnekler (20 adet)

İkinci grupta yer alan 20 adet örnekte ise, tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin daha küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu belirtilmişti (Ek-2). Bu örneklerde belli bir tane çapına kadar her iki yöntem de aynı sonucu vermiş, sonrasında ise hidrometre yöntemi tane yüzdelerini daha yüksek belirlemiştir. Diğer bir ifadeyle belirli bir tane çapından sonra, hidrometre yöntemi tane çaplarını lazer kırınım yöntemine göre daha küçük belirlemiştir. Bu durumu açıklamak için, ikinci gruptan seçilen Örnek-23'ün tane büyüklüğü dağılımı Şekil 5.4'de, SEM fotoğrafları ise Resim 5.3'de verilmiştir (örneğin SEM fotoğrafları daha geniş karelerle Ek-5'de sunulmuştur).



Şekil 5.4. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin belirli bir tane çapına kadar aynı sonucu verdiğini gösteren bir örnek (Örnek-23)

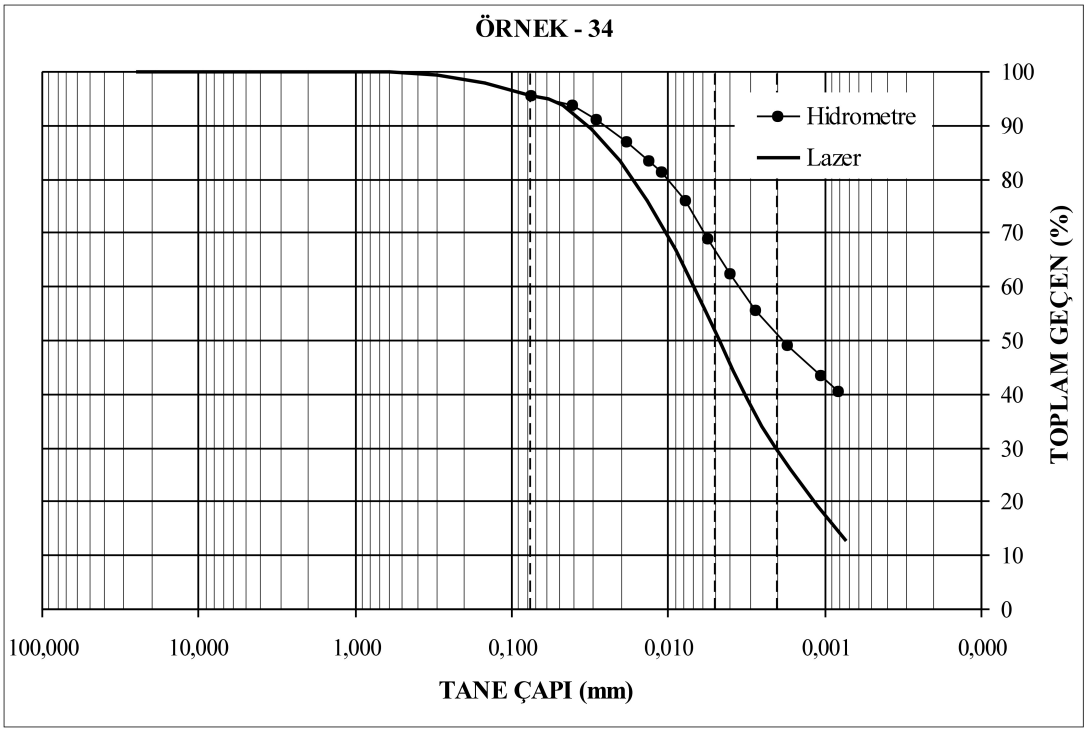


Resim 5.3. Örnek-23'ün çeşitli ölçeklerde çekilmiş SEM fotoğrafı

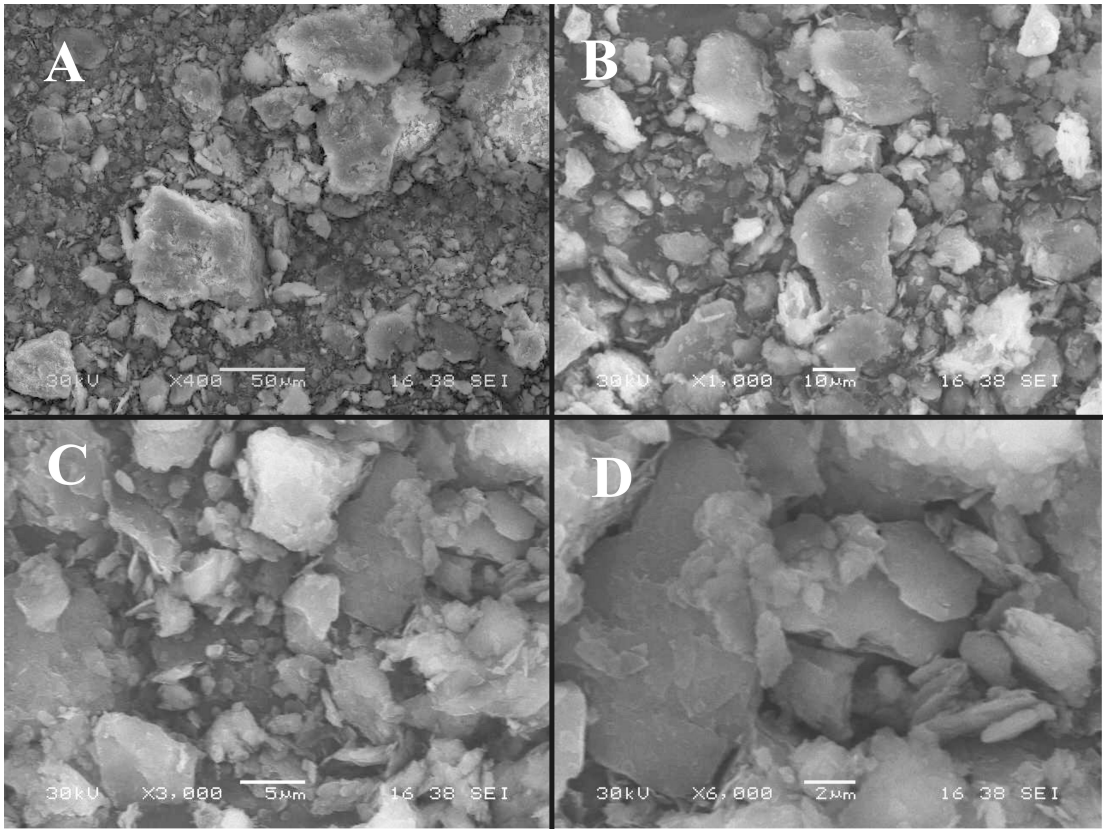
Yaklaşık 75 – 15 µm arasındaki taneleri her iki yöntem de yaklaşık aynı büyüklükte ölçmüş (Şekil 5.4), 15 µm'den küçük taneleri ise hidrometre yöntemi, lazer kırınım yöntemine göre daha küçük ölçmüştür. Örnek-23'ün SEM fotoğrafları incelendiğinde, 75 – 15 µm arasındaki tanelerinin yaklaşık yuvarlağımsı şekilde olduğu (Resim 5.3. A ve B kareleri), 15 µm'den küçük tanelerin ise nispeten levhamsı şekilde olduğu görülmektedir (Resim 5.3. C ve D kareleri). Tane şekli küreye yakın veya yuvarlağımsı olduğunda her iki yöntemin de birbirine yakın sonuçlar verebileceği Örnek-1 üzerinde gösterilmişti. Levhamsı taneleri hidrometre yönteminin olduğundan daha küçük, lazer kırınım yönteminin ise olduğundan daha büyük ölçtüğü Bölüm 5.1'de tartışılmıştı. Bu durumda, ikinci grupta yer alan diğer örneklerde de, her iki yöntemin de aynı büyüklükte ölçtüğü veya aynı tane yüzdesini verdiği tanelerin yaklaşık yuvarlağımsı olduğu, hidrometre yönteminin daha yüksek sonuç verdiği tanelerin ise yaklaşık levhamsı olduğu öne sürülebilir.

5.3.3. Üçüncü grup örnekler (6 adet)

Üçüncü grupta, bütün tanelerin yüzdesini hidrometre yönteminin daha yüksek belirlediği, diğer bir ifadeyle, hidrometre yönteminin taneleri daha küçük ölçtüğü örnekler yer almaktadır (Ek-3). Bölüm 5.1'de, hidrometre yönteminin levhamsı taneleri olduğundan daha küçük, lazer kırınım yönteminin ise olduğundan daha büyük ölçtüğü belirtilmişti. O halde ikinci grupta değerlendirilen altı adet örnekte bütün tanelerin levhamsı şekilde olması beklenmektedir. Bu örneklerin içinden seçilen Örnek-34 üzerinde öne sürülen bu düşünce tartışılmıştır. Örnek-34'ün tane büyüklüğü dağılımı Şekil 5.5'de, çeşitli ölçeklerde çekilmiş SEM fotoğrafları ise Resim 5.4'de verilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde Örnek-34'ün hemen hemen her büyüklükteki tanelerinin yaklaşık levhamsı şekilde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5. Hidrometre yönteminin bütün taneleri lazer kırınım yöntemine göre daha küçük ölçtüğünü gösteren bir örnek (Örnek-34)

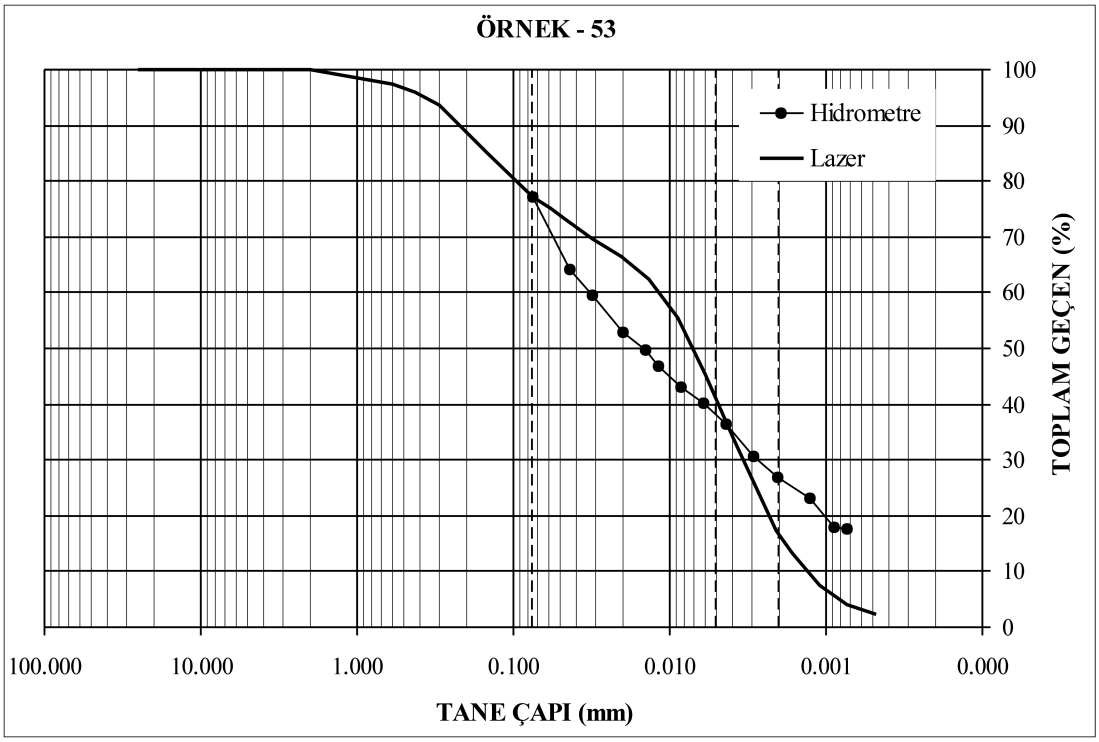


Resim 5.4. Örnek-34'ün çeşitli ölçeklerde çekilmiş SEM fotoğrafı

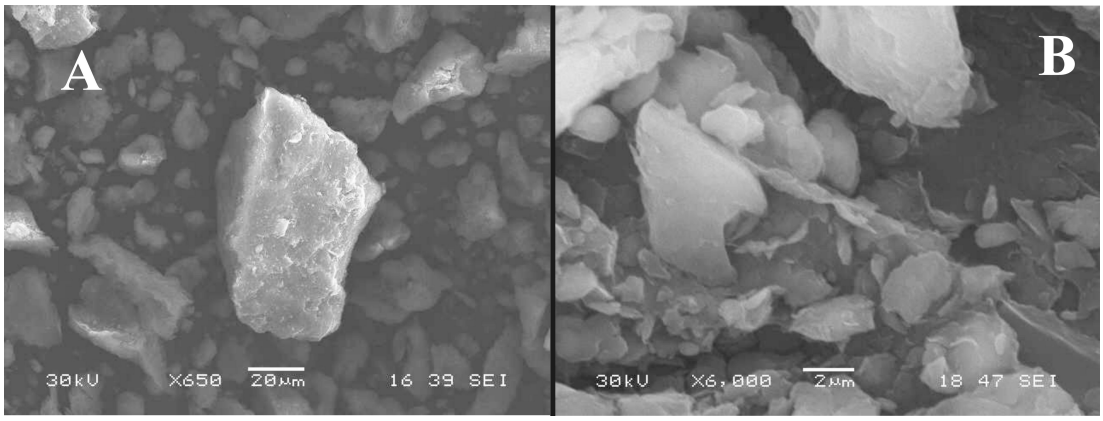
5.3.4. Dördüncü grup örnekler (36 adet)

Dördüncü grupta ise her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında birbirleriyle kesiştiği örnekler değerlendirilmiştir. İfadede kolaylık sağlaması bakımından, tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin kesiştiği tane çapı metnin bundan sonraki bölümünde "kritik çap (D_{kr})" olarak adlandırılacaktır. Bu grupta yer alan örneklerin arasından seçilen Örnek-53 ve Örnek-60 üzerinde tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin birbirleriyle kesişmesi açıklanmaya çalışılmıştır. Bu örneklerin tane büyüklüğü dağılım analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.6 ve 5.7'de, SEM fotoğrafları ise Resim 5.5 ve 5.6'da sunulmuştur (bu örneklerin SEM fotoğrafları daha geniş karelerle Ek-5'de verilmiştir). Tane büyüklüğü dağılım eğrileri incelendiğinde, her iki örnekte de kritik çapın yaklaşık 5 µm olduğu ve 5 µm'den büyük taneleri hidrometre yönteminin lazer kırınım yöntemine daha büyük ölçtüğü görülmektedir (Şekil 5.6 ve 5.7). Levhamsı tanelerde bunun tam tersi olması

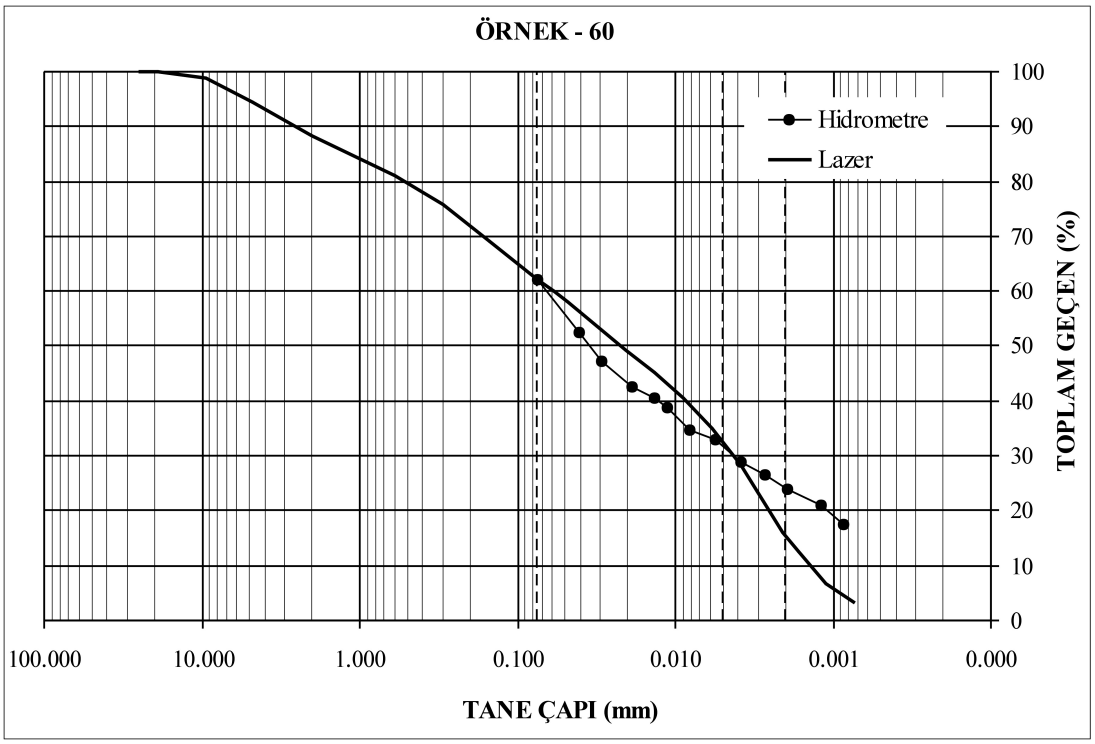
gerektiğine göre (Bkz. Bölüm 5.1), 5 μm'den büyük olan tanelerin levhamsı şekilde olması beklenmemektedir. Söz konusu örneklerin SEM fotoğrafları incelendiğinde 5 μm'den büyük olan tanelerin ne yuvarlağımsı, ne de levhamsı olmadığı görülmektedir (Resim 5.5 ve 5.6). Bu tanelerin şeklini uzun boyutlu ve köşeli olarak nitelendirmenin daha uygun olacağı düşünülmüştür.



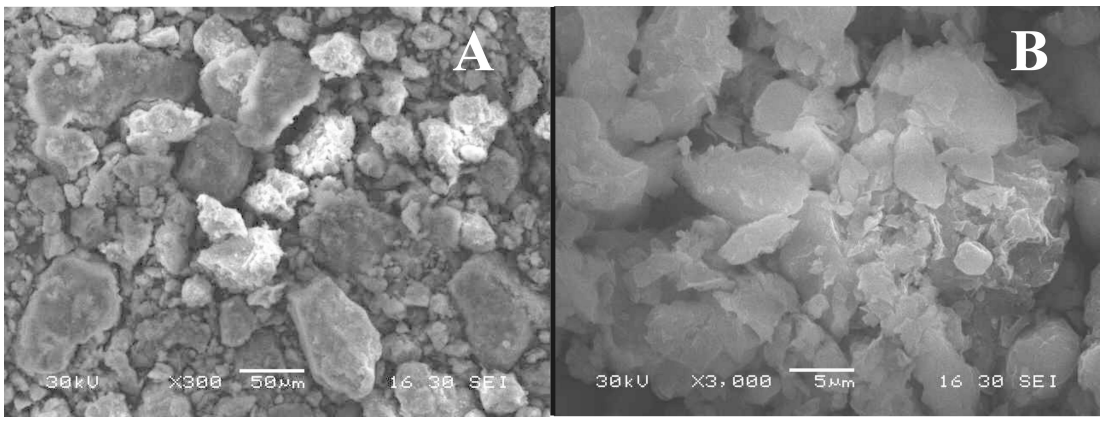
Şekil 5.6. Tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin belirli bir tane çapında kesiştiklerini gösteren bir örnek (Örnek-53)



Resim 5.5. Örnek-53'ün iki farklı ölçekte çekilmiş SEM fotoğrafı



Şekil 5.7. Tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin belirli bir tane çapında kesiştiklerini gösteren bir başka örnek (Örnek-60)



Resim 5.6. Örnek-60'ın iki farklı ölçekte çekilmiş SEM fotoğrafı

Düzensiz şekle sahip tanelerin Stokes eşitliği ile hesaplanan tane büyüklüğü, su içerisindeki çökme konumlarına göre değişmektedir (Bkz. Şekil 2.8). Düzensiz şekle sahip bir tanenin su içerisinde hangi konumda çöktüğü kesin olarak bilinmemekle

birlikte, Resim 5.5.A karesindeki gibi uzun boyutlu tanelerin uzun kenarı boyunca çöktüğü ve bu nedenle Stokes eşitliğiyle tane çapının olduğundan daha büyük hesaplandığı düşünülmektedir. Pye ve Blott, 2004 (54), lazer kırınım yöntemiyle üçüncü boyutu diğer iki boyutundan uzun ve köşeli tanelerin olduğundan daha küçük ölçüldüğünü öne sürmüştür.

Bu ifadelerin doğru olduğu varsayımıyla, uzun boyutlu ve köşeli taneleri hidrometre yönteminin olduğundan daha büyük, lazer kırınım yönteminin ise olduğundan daha küçük ölçtüğü öne sürülebilir. Bu sonuçlara göre, dördüncü grupta yer alan diğer örneklerde de, kritik çaptan büyük olan tanelerin uzun boyutlu ve köşeli, kritik çaptan küçük olan tanelerin ise levhamsı şekilde olduğu öne sürülebilir. Nitekim, incelemek için seçilen Örnek-53 ve Örnek-60'ın kritik çaptan küçük tanelerinin (< 5 μm) yaklaşık levhamsı şekilde olduğu, kritik çaptan büyük tanelerinin (> 5 μm) ise uzun boyutlu ve köşeli olduğu Resim 5.5 ve 5.6'dan görülmektedir.

6. KİL YÜZDELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmada kullanılan örneklerin, lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen kil yüzdeleri, likit ve plastik limitleri, plastisite indisleri, 40 ve 200 no.lu eleklerden geçen yüzdeleri, silt yüzdeleri, aktivite değerleri ve birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre zemin sınıfları toplu halde Çizelge 6.1'de sunulmuştur. Silt yüzdesinin hesaplanmasında hidrometre deneyi ile belirlenen kil yüzdesi dikkate alınmıştır. Aktivitenin hesaplanmasında ise aşağıdaki eşitlik (2) kullanılmıştır.

$$\text{Aktivite} = \frac{\text{Plastisite indisi}}{\text{Örneğin 40 no.lu elekten geçen kısmı içerisindeki kil yüzdesi}} \qquad [6.1]$$

Çizelge 6.1. Örneklerin lazer kırınım ve hidrometre deneyleriyle belirlenen kil yüzdeleri ve diğer indeks özellikleri

Örnek No.	LL (%)	PL (%)	PI (%)	No. 40 % P	No. 200 % P	Silt yüzdesi	Aktivite	USCS	Kil yüzdesi (< 2μm)		
									Hidr.	Lazer	Fark
Örnek 1	29,0	15,0	14,0	70,1	63,9	52,5	0,86	CL	11,4	13,0	-1,6
Örnek 2	52,7	26,4	26,3	100,0	99,1	61,4	0,70	CH	37,7	30,0	7,7
Örnek 3	72,2	31,1	41,1	99,5	97,4	56,1	0,99	CH	41,3	26,0	15,3
Örnek 4	40,1	19,4	20,7	96,9	77,7	53,5	0,83	CL	24,2	13,0	11,2
Örnek 5	44,5	20,8	23,7	86,9	76,2	46,1	0,68	CL	30,1	25,0	5,1
Örnek 6	71,5	28,6	42,9	76,4	65,3	41,8	1,39	CH	23,5	16,8	6,7
Örnek 7	0,0	0,0	0,0	92,5	50,4	42,5	0,00	ML	7,9	3,9	4,0
Örnek 8	0,0	0,0	0,0	96,5	56,0	47,6	0,00	ML	8,4	2,5	5,9
Örnek 9	30,8	0,0	0,0	67,9	38,9	25,3	0,00	SM	13,6	8,0	5,6
Örnek 10	33,2	23,8	9,4	53,5	25,9	17,2	0,58	SC	8,7	4,2	4,5
Örnek 11	88,8	33,6	55,2	100,0	99,2	38,9	0,92	CH	60,3	34,0	26,3
Örnek 12	75,2	25,0	50,2	99,7	98,4	47,0	0,97	CH	51,4	28,5	22,9
Örnek 13	114,0	38,4	75,6	98,3	95,0	30,0	1,14	CH	65,0	48,6	16,4
Örnek 14	90,7	28,2	62,5	96,2	89,7	44,8	1,34	CH	44,9	22,8	22,1
Örnek 15	114,2	36,5	77,7	98,0	96,0	51,9	1,73	CH	44,1	28,6	15,5
Örnek 16	97,4	33,8	63,6	94,9	89,0	28,9	1,00	CH	60,1	37,7	22,4

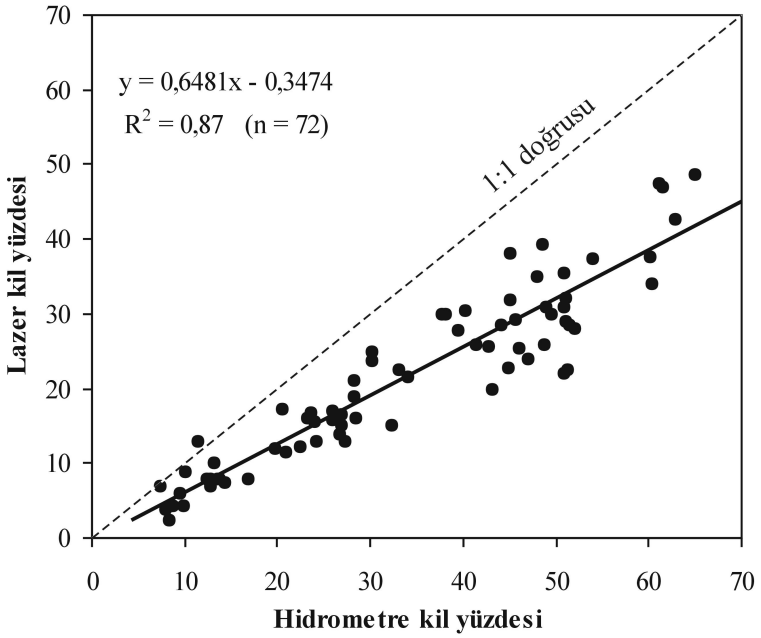
Çizelge 6.1. (Devam) Örneklerin lazer kırınım ve hidrometre deneyleriyle belirlenen kil yüzdeleri ve diğer indeks özellikleri

Örnek No.	LL (%)	PL (%)	PI (%)	No. 40 % P	No. 200 % P	Silt yüzdesi	Aktivite	USCS	Kil yüzdesi (< 2μm)		
									Hidr.	Lazer	Fark
Örnek 17	66,6	29,0	37,6	92,6	87,6	36,8	0,69	CH	50,8	31,0	19,8
Örnek 18	62,0	24,2	37,8	93,4	87,4	41,3	0,77	CH	46,1	25,4	20,7
Örnek 19	64,5	24,5	40,0	93,5	86,6	37,9	0,77	CH	48,7	25,8	22,9
Örnek 20	88,5	43,9	44,6	85,4	77,2	27,7	0,77	MH	49,5	30,0	19,5
Örnek 21	57,6	24,1	33,5	86,3	75,5	28,6	0,62	CH	46,9	24,0	22,9
Örnek 22	66,6	35,9	30,7	84,5	75,0	24,2	0,51	MH	50,8	35,4	15,4
Örnek 23	89,1	38,3	50,8	91,7	81,7	27,7	0,86	CH	54,0	37,5	16,5
Örnek 24	59,8	25,5	34,3	89,8	81,5	42,0	0,78	CH	39,5	27,8	11,7
Örnek 25	53,2	21,1	32,1	79,0	70,0	36,0	0,75	CH	34,0	21,5	12,5
Örnek 26	48,3	23,4	24,9	73,0	54,8	28,1	0,68	CL	26,7	14,0	12,7
Örnek 27	45,7	23,1	22,6	66,7	54,0	28,0	0,58	CL	26,0	15,8	10,2
Örnek 28	54,6	23,2	31,4	85,8	74,0	45,8	0,96	CH	28,2	21,2	7,0
Örnek 29	0,0	0,0	0,0	77,3	47,5	35,2	0,00	SM	12,3	8,0	4,3
Örnek 30	69,1	31,9	37,2	34,4	23,3	9,0	0,89	SC	14,3	7,5	6,8
Örnek 31	76,4	28,0	48,4	100,0	99,9	48,7	0,95	CH	51,2	22,5	28,7
Örnek 32	87,5	24,7	62,8	100,0	99,7	48,8	1,23	CH	50,9	22,0	28,9
Örnek 33	61,5	23,3	38,2	100,0	99,6	56,5	0,89	CH	43,1	20,0	23,1
Örnek 34	87,9	30,2	57,7	99,7	95,6	44,6	1,13	CH	51,0	29,0	22,0
Örnek 35	58,4	33,3	25,1	90,7	77,3	28,4	0,47	MH	48,9	31,0	17,9
Örnek 36	33,5	18,3	15,2	43,6	24,4	14,5	0,67	SC	9,9	4,3	5,6
Örnek 37	83,2	31,7	51,5	98,8	97,4	34,5	0,81	CH	62,9	42,7	20,2
Örnek 38	108,2	41,9	66,3	97,5	94,5	33,3	1,06	CH	61,2	47,5	13,7
Örnek 39	64,2	37,6	26,6	99,3	93,2	66,4	0,99	MH	26,8	15,0	11,8
Örnek 40	102,6	42,2	60,4	97,8	90,8	29,3	0,96	CH	61,5	47,0	14,5
Örnek 41	62,1	34,4	27,7	95,9	87,6	42,6	0,59	MH	45,0	31,8	13,2
Örnek 42	68,2	31,2	37,0	93,3	87,5	35,4	0,66	CH	52,1	28,0	24,1
Örnek 43	65,9	32,2	33,7	94,3	87,4	39,5	0,66	CH	47,9	35,0	12,9
Örnek 44	49,9	22,9	27,0	96,3	86,7	48,7	0,68	CL	38,0	30,0	8,0
Örnek 45	59,3	25,3	34,0	91,7	84,4	41,6	0,73	CH	42,8	25,7	17,1
Örnek 46	76,4	31,8	44,6	93,4	83,1	37,4	0,91	CH	45,7	29,3	16,4
Örnek 47	47,8	25,6	22,2	92,6	82,6	54,1	0,72	CL	28,5	16,0	12,5
Örnek 48	57,3	23,7	33,6	87,7	80,1	47,1	0,89	CH	33,0	22,5	10,5

Çizelge 6.1. (Devam) Örneklerin lazer kırınım ve hidrometre deneyleriyle belirlenen kil yüzdeleri ve diğer indeks özellikleri

Örnek No.	LL (%)	PL (%)	PI (%)	No. 40 % P	No. 200 % P	Silt yüzdesi	Aktivite	USCS	Kil yüzdesi (< 2μm)		
									Hidr.	Lazer	Fark
Örnek 49	82,2	37,5	44,7	88,8	79,3	28,3	0,78	MH	51,0	32,2	18,8
Örnek 50	39,4	20,9	18,5	97,4	78,7	56,2	0,80	CL	22,5	12,3	10,2
Örnek 51	44,4	21,5	22,9	90,6	78,6	50,4	0,74	CL	28,2	19,0	9,2
Örnek 52	46,8	20,4	26,4	85,6	78,0	45,8	0,70	CL	32,2	15,0	17,2
Örnek 53	57,5	31,2	26,3	94,6	76,6	49,8	0,93	MH	26,8	16,5	10,3
Örnek 54	65,1	33,6	31,5	85,4	76,1	27,5	0,55	MH	48,6	39,3	9,3
Örnek 55	74,2	41,3	32,9	85,2	75,6	35,3	0,70	MH	40,3	30,5	9,8
Örnek 56	34,9	20,0	14,9	96,1	75,2	55,4	0,72	CL	19,8	12,0	7,8
Örnek 57	70,4	31,0	39,4	84,1	74,4	29,4	0,74	CH	45,0	38,0	7,0
Örnek 58	50,3	23,5	26,8	83,4	68,2	38,0	0,74	CH	30,2	23,8	6,4
Örnek 59	51,3	32,0	19,3	84,8	63,6	50,4	1,24	MH	13,2	10,0	3,2
Örnek 60	41,5	24,9	16,6	79,2	62,8	38,9	0,55	CL	23,9	15,5	8,4
Örnek 61	45,0	17,2	27,8	99,3	60,7	33,4	1,01	CL	27,3	13,0	14,3
Örnek 62	34,6	20,8	13,8	82,9	60,0	39,5	0,56	CL	20,5	17,3	3,2
Örnek 63	51,1	24,9	26,2	74,5	57,9	31,9	0,75	CH	26,0	17,0	9,0
Örnek 64	34,8	22,2	12,6	77,6	55,4	42,7	0,77	CL	12,7	7,0	5,7
Örnek 65	29,5	16,6	12,9	88,6	55,0	34,1	0,55	CL	20,9	11,5	9,4
Örnek 66	37,8	19,3	18,5	78,4	54,0	30,7	0,62	CL	23,3	16,0	7,3
Örnek 67	54,7	31,2	23,5	80,0	53,3	43,2	1,86	MH	10,1	8,8	1,3
Örnek 68	37,7	19,0	18,7	76,6	44,8	27,9	0,85	SC	16,9	7,9	9,0
Örnek 69	23,4	19,3	4,1	72,5	43,9	36,6	0,41	SM-SC	7,3	7,0	0,3
Örnek 70	34,4	22,6	11,8	68,4	39,5	25,8	0,59	SC	13,7	8,0	5,7
Örnek 71	21,6	16,8	4,8	80,6	37,9	25,2	0,30	SM-SC	12,7	8,0	4,7
Örnek 72	32,8	24,8	8,0	68,0	35,7	26,2	0,57	SM	9,5	6,1	3,4

Yöntemlerden birisiyle belirlenen kil yüzdesinden diğerinin tahmin edilebilmesi için doğrusal regresyon analizli uygulanmış olup sonuçları Şekil 6.1'de verilmiştir. Hidrometre yönteminin, kil yüzdesini lazer kırınım yöntemine göre daha yüksek belediği (bazı örneklerde %29'a kadar) Çizelge 6.1'den ve Şekil 6.1'den görülmektedir (veri noktaları 1:1 doğrusunun altındadır).



Şekil 6.1. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen kil yüzdeleri arasındaki doğrusal regresyon analizi

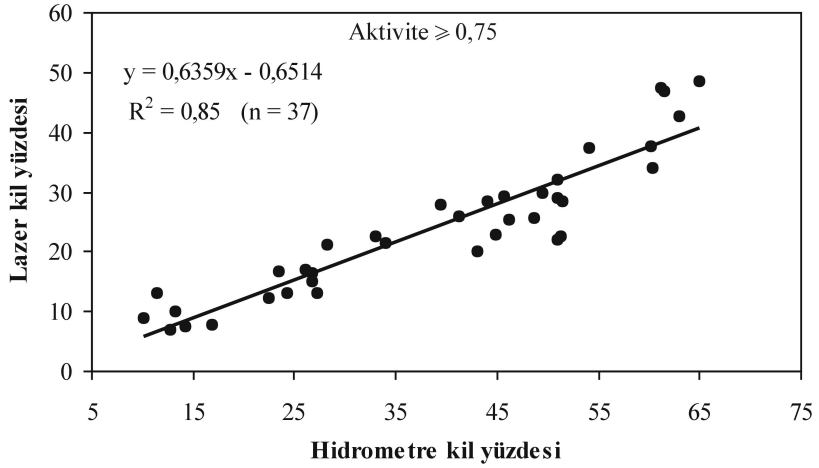
Her iki yöntemle belirlenen kil yüzdeleri arasında yapılan doğrusal regresyon analizinin sonucunda regresyon eşitliği ve belirleme katsayısı aşağıda verilmiştir.

$$KY_L = 0{,}6481\ KY_H - 0{,}3474 \qquad (R^2 = 0{,}87) \qquad [6.2]$$

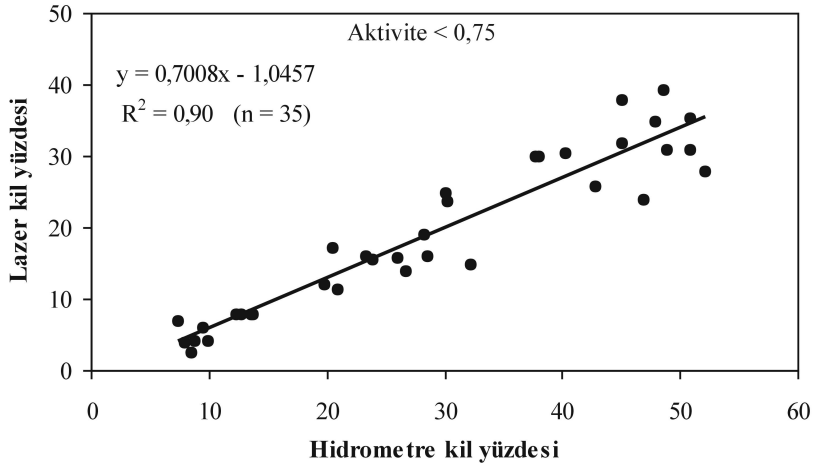
Bu eşitlikte, KY_L lazer kırınım yöntemiyle belirlenmiş kil yüzdesini, KY_H ise hidrometre yöntemiyle belirlenmiş kil yüzdesini ifade etmektedir.

Çizelge 6.1'den, lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen kil yüzdeleri arasındaki farkın, bazı örneklerde düşük bazılarında ise yüksek olduğu görülmektedir. Kil yüzdeleri arasındaki bu farkın, bazı parametrelere bağlı olup olmadığını belirlemek için, örnekler, likit limit, plastik limit, silt yüzdesi ve aktivite değerlerine göre gruplandırılıp, bu gruplara ayrı ayrı regresyon analizleri uygulanmıştır. Bu analizlerin sonucunda, kil yüzdeleri arasındaki farkı denetleyen parametrenin likit limit, plastik limit ve silt yüzdesi olmadığı belirlenmiştir. Örnekleri, aktivitesi 0,75'den büyük (ve eşit) ve 0,75'den küçük olacak şekilde iki

gruba ayırarak yapılan regresyon analizinin sonuçları ise Şekil 6.2 ve 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Aktivitesi 0,75'den büyük ve eşit olan örnekler için yapılan regresyon analizi



Şekil 6.3. Aktivitesi 0,75'den küçük olan örnekler için yapılan regresyon analizi

Aktivitesi 0,75'den büyük (ve eşit) ve 0,75'den küçük olan örnekler üzerinde elde edilen regresyon eşitlikleri ve belirleme katsayıları aşağıda verilmiştir.

A ≥ 0,75 olan örnekler için:

$$KY_L = 0{,}6359\ KY_H - 0{,}6514 \qquad (R^2 = 0{,}85) \qquad [6.3]$$

A < 0,75 olan örnekler için:

$$KY_L = 0{,}7008\ KY_H - 1{,}0457 \qquad (R^2 = 0{,}90) \qquad [6.4]$$

Aktivitesi 0,75'den büyük ve eşit olan örneklerin belirleme katsayısının Eş. 6.2'de verilen belirleme katsayısına oldukça yakın, 0,75'den küçük olan örneklerin belirleme katsayısının ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda, tüm örnekler kullanılarak belirlenen regresyon eşitliğine (Eş. 6.2) alternatif olarak, aktivitesi 0,75'den büyük olan örnekler için Eş. 6.3, aktivitesi 0,75'den küçük olan örnekler için ise Eş. 6.4'ün kullanılması önerilebilir. Ancak Eş. 6.3 ve 6.4'ün kullanılabilmesi için, zemin örneğinin likit limit ve plastik limit deneylerinin de yapılması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Aktiviteye göre yapılan gruplandırma sonucunda yüksek belirleme katsayısının elde edilmesi ve aktivitenin hem kil yüzdesini hem de likit ve plastik limit değerlerini içermesi, her iki yöntemle belirlenen kil yüzdeleri arasındaki farkın bu parametrelerle ilgili olabileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen parametreleri içeren çoklu regresyon analizleri yapılmış ve sonuçları Çizelge 6.2'de sunulmuştur. Çoklu regresyon analizlerinin her birinde hidrometre kil yüzdesine mutlaka yer verilmiş olup, diğer parametreler ise çeşitli kombinasyonlar oluşturacak şekilde kullanılmıştır.

Regresyon eşitliklerinin güvenirliğini değerlendirmek için belirleme katsayılarının yanı sıra standart hataları da kıyaslanmıştır. Standart hata, veri noktalarının regresyon doğrusu etrafındaki dağılımının bir ölçüsü olup, veri noktaları regresyon doğrusunun etrafında geniş dağıldığında büyük, noktalar doğruya daha yakın olduğunda ise daha küçük olmaktadır. Bu nedenle standart hatası küçük olan bir eşitliğin, ilgili parametreyi tahmin etme hatası da daha küçük olmaktadır. Standart hata aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$\text{Standart hata} = \sqrt{\frac{\sum (\text{lazer}_{\text{tahmin}} - \text{lazer}_{\text{ölçülen}})^2}{n-2}} \qquad [6.5]$$

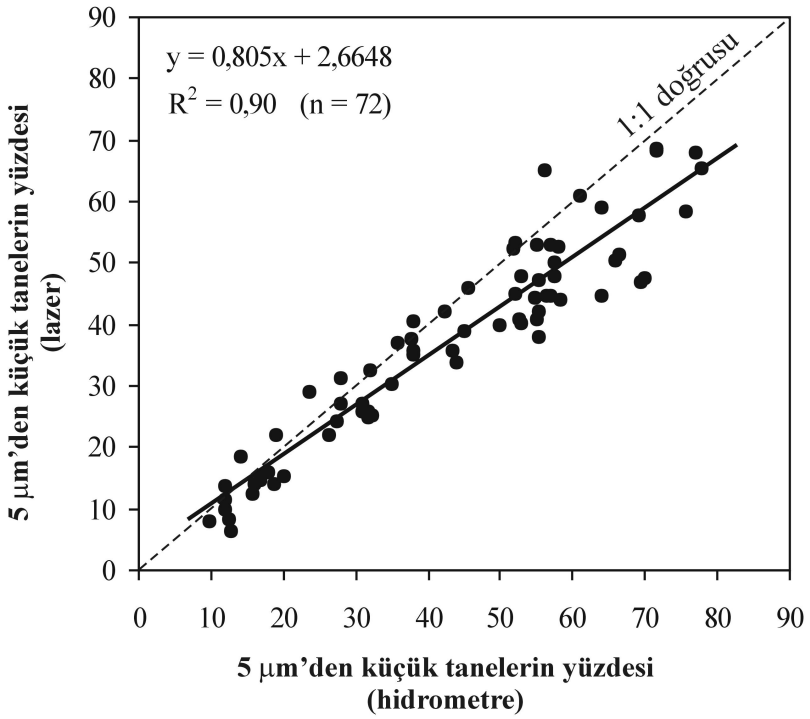
Çizelge 6.2. Kil yüzdesinin tahmin edilmesi için yapılan çoklu regresyon analizlerinin sonuçları

Eş. No.	Regresyon denklemi	R^2	Standart hata
Eş. 6.6	KY_L=0,649 KY_H + 0,224 LL – 0,309 PI – 3,65	0,89	3,932
Eş. 6.7	KY_L=0,609 KY_H + 0,242 LL – 0,276 PI – 1,998 A – 2,761	0,89	3,946
Eş. 6.8	KY_L=0,649 KY_H + 0,219 LL – 0,3 PI – 1,51x10^{-2} Silt – 2,981	0,89	3,957
Eş. 6.9	KY_L=0,525 KY_H + 0,12 LL – 4,847 A + 0,672	0,88	4,094
Eş. 6.10	KY_L=0,524 KY_H + 0,122 LL + 2,107x10^{-3} Silt – 4,92 A+ 0,611	0,88	4,125
Eş. 6.11	KY_L=0,723 KY_H – 9,66 x10^{-2} PI– 5,82x10^{-2} Silt+2,35 A+0,535	0,88	4,178
Eş. 6.12	KY_L=0,648 KY_H – 4,47x10^{-2} Silt + 1,374	0,87	4,148
Eş. 6.13	KY_L=0,612 KY_H + 2,859*10^{-2} LL – 0,753	0,87	4,162
Eş. 6.14	KY_L=0,684 KY_H – 3,89x10^{-2} PI – 0,363	0,87	4,163
Eş. 6.15	KY_L=0,614 KY_H + 2,67x10^{-2} LL – 4,32x10^{-2} Silt + 0,937	0,87	4,163
Eş. 6.16	KY_L=0,681 KY_H – 3,54x10^{-2} PI – 4,27x10^{-2} Silt + 1,282	0,87	4,165
Eş. 6.17	KY_L=0,653 KY_H – 0,731 A + 6,383x10^{-2}	0,87	4,173
Eş. 6.18	KY_L=0,650 KY_H – 4,25x10^{-2} Silt – 0,267 A + 1,441	0,87	4,178
Eş. 6.19	KY_L=0,698 KY_H – 5,94x10^{-2} PI + 0,774 A – 0,806	0,87	4,191

KY_L: lazer yönteminden belirlenen kil yüzdesi, KY_H: hidrometre yönteminden belirlenen kil yüzdesi, LL: likit limit, PI : plastisite indisi, Silt : silt yüzdesi, A: aktivite

Çoklu regresyon analizlerinin sonucunda, en yüksek belirleme katsayısı ve en düşük standart hata Eş. 6.6'da elde edilmiştir. İkili regresyon analiziyle belirlenen Eşitlik 6.2'nin standart hatası 4,15'dir. Çoklu regresyon analiziyle elde edilen Eş. 6.6'nın belirleme katsayısı Eş. 6.2'nin belirleme katsayısından daha yüksek, standart hatası ise daha düşüktür. Bu sonuçlara göre, yöntemlerin birisiyle bulunan kil yüzdesinden diğeri tahmin edilmek istendiğinde, eğer zemin örneğinin likit ve plastik limit deneyleri de yapılmış ise Eş. 6.6'nın, bu deneyler yapılmadığında ise Eş.6.2'nin kullanılması önerilmektedir.

Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleri ile belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri de karşılaştırılmış olup, bunun için yapılan regresyon analizinin sonuçları Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri arasındaki regresyon analizi

Bazı örneklerde, lazer kırınım yönteminin 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesini hidrometre yöntemine göre daha fazla tahmin ettiği Şekil 6.4'den görülmektedir. 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri arasındaki ilişkiyi gösteren eşitlik ve belirleme katsayısı aşağıda verilmiştir.

$$L_{<5\mu m\ (\%P)} = 0{,}805\ H_{<5\mu m\ (\%P)} + 2{,}6648 \qquad (R^2 = 0{,}90) \qquad [6.20]$$

Yukarıdaki eşitlikte, $L_{<5\mu m\ (\%P)}$ lazer kırınım yöntemiyle, $H_{<5\mu m\ (\%P)}$ ise hidrometre yöntemiyle belirlenmiş 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesini göstermektedir.

Her iki yöntemle belirlenmiş 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri için de çoklu regresyon analizleri yapılmış ve sonuçları Çizelge 6.3'de sunulmuştur. Çoklu regresyon analizlerinde yine likit limit, plastisite indisi, silt yüzdesi ve aktivite değerleri çeşitli kombinasyonlar oluşturacak şekilde kullanılmıştır.

Çizelge 6.3. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri arasında yapılan çoklu regresyon analizlerinin sonuçları

Eş. No.	Regresyon denklemi	R^2	Standart hata
Eş. 6.21	L = 0,888 H + 0,407 LL – 0,678 PI + 3,016 A – 5,504	0,93	4,423
Eş. 6.22	L = 0,823 H + 0,432 LL – 0,657 PI + 8,482x10^{-2} Silt – 7,459	0,93	4,441
Eş. 6.23	L = 0,849 H + 0,423 LL – 0,628 PI – 4,013	0,93	4,501
Eş. 6.24	L = 0,997 H – 0,295 PI – 7,33x10^{-2} Silt + 7,694 A + 0,412	0,91	5,181
Eş. 6.25	L = 0,947 H – 0,222 PI + 5,33 A – 0,699	0,91	5,184
Eş. 6.26	L = 0,88 H – 9,55x10^{-2} PI + 2,379	0,90	5,260
Eş. 6.27	L = 0,644 H + 0,178 LL + 0,136 Silt – 6,794 A – 0,612	0,90	5,260
Eş. 6.28	L = 0,877 H – 9,29x10^{-2} PI + 1,103x10^{-2} Silt + 2,006	0,90	5,297
Eş. 6.29	L = 0,765 H + 3,755*10^{-2} LL + 2,239	0,90	5,314
Eş. 6.30	L = 0,749 H + 4,843x10^{-2} LL – 4,437x10^{-2} Silt + 0,586	0,90	5,331
Eş. 6.31	L = 0,802 H + 2,668x10^{-2} Silt + 1,745	0,90	5,331
Eş. 6.32	L = 0,742 H + 7,182 x10^{-2} LL – 2,17 A + 2,95	0,90	5,332
Eş. 6.33	L = 0,804 H + 0,130 A + 2,599	0,90	5,339
Eş. 6.34	L = 0,803 H + 2,743x10^{-2} Silt – 0,114 A + 1,777	0,90	5,370

L: lazer yöntemiyle belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesi, H: hidrometre yöntemiyle belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesi, LL: likit limit, PI : plastisite indisi, Silt : silt yüzdesi, A: aktivite

5 μm'den küçük tanelerin yüzdeleri arasında yapılan çoklu regresyon analizlerinin sonucunda, en yüksek belirleme katsayısı ve en düşük standart hata Eş. 6.21'de elde edilmiştir (Çizelge 6.3). İkili regresyon analiziyle belirlenen Eşitlik 6.20'nin standart hatası 5,301'dir. Çoklu regresyon analiziyle elde edilen Eş. 6.21'in belirleme katsayısının Eş. 6.20'nin belirleme katsayısından daha yüksek, standart hatasının ise daha düşük olduğu Çizelge 6.3'den görülmektedir. Bu sonuçlara göre, yöntemlerin birisiyle bulunan 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesinden diğeri tahmin edilmek istendiğinde, eğer zemin örneğinin likit ve plastik limit deneyleri de yapılmış ise Eş. 6.21'in, bu deneyler yapılmadığında ise Eş.6.20'nin kullanılması önerilmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ana hatlarıyla aşağıda sunulmuştur.

i. Bu çalışmada önerilen yönteme göre aynı örnekten alınan 15 adet alt-örnek üzerinde yapılan analizler sonucunda, tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin hemen hemen üst üste çakıştığı ve en düşük ve en yüksek kil yüzdeleri arasındaki farkın sadece % 4 kadar olduğu görülmüştür. Buna göre, bu çalışmada önerildiği şeklide alınan alt-örneğin, bütünü yeterli düzeyde temsil ettiği belirlenmiş olup, önerilen örnek alma ve/veya azaltma yönteminin lazer kırınım analizlerinde uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca önerilen yöntemin herhangi bir cihaz veya makine gerektirmemesi gibi avantajı da bulunmaktadır.
ii. Çeşme suyu, havası alınmış çeşme suyu, damıtık su ve havası alınmış damıtık su kullanılarak yapılan analizler sonucunda, kullanılan suyun niteliğinin analiz sonuçlarını etkilemediği görülmüştür. Bu nedenle daha ucuz ve pratik olması bakımından, lazer kırınım analizlerde çeşme suyu kullanılmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
iii. Aynı örnekler üzerinde yapılan analizler sonucunda, Fraunhofer yaklaşımı ve Mie kuramının yaklaşık 4μm'ye kadar aynı sonucu verdiği, 4μm'den sonra ise Fraunhofer yaklaşımının tane yüzdelerini daha düşük belirlediği görülmüştür. Bu sonuçlara göre bir çok araştırmacının da ileri sürdüğü gibi, zemin örneklerinin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde Mie kuramının esas alınmasının daha uygun olduğu düşünülmektedir.
iv. Saptırma indisinin 1,3 ile 2,2 arasındaki değişiminin kil yüzdesinin % 25 ile 35 arasında değişmesine neden olduğu ve saptırma indisi arttıkça kil yüzdesinin azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, saptırma indisinin 1,30 ile 1,60 arasındaki değişiminin kil yüzdesinin daha çok etkilediği, 1,60'dan büyük değerlerinde ise daha az etkilediği görülmüştür. Hematit hariç, çoğu minerallerinin saptırma indisinin 1,48 ile 1,74 arasında değiştiği ve saptırma indisinin bu aralıktaki değişiminin ise kil yüzdesini %8 ile 16 düzeyinde etkilediği saptanmıştır.

v. Zemin örneğini doğru temsil edecek saptırma indisinin belirlenmesi için, öncelikle XRD analizi yapılarak örneğin mineralojik bileşiminin belirlenmesi ve ardından, kesin bir ölçüt olmamakla birlikte, örneğin bileşiminde en çok bulunan mineralin saptırma indisi öncelikle gözetilerek, diğer minerallerin de saptırma indisleri değişim aralığında bulunacak ortalama bir değer alınmasının uygun olduğu düşünülmektedir. Önerilen bu ölçüte göre, bu çalışmada kullanılan örnekler için en uygun değerin 1,55 olduğu görülmüştür. XRD analizinin yapılamadığı durumlarda ise, bir çok zeminin mineralojik bileşiminde bulunan kuvarsın saptırma indisi olması ve diğer minerallerin de saptırma indisleri değişim aralığında bulunması bakımından, zeminlerin genelini yaklaşık bir doğrulukla temsil edecek en uygun saptırma indisinin yine 1,55 olduğu düşünülmektedir.

vi. Emme katsayısının da tane büyüklüğü dağılımını önemli düzeyde etkilediği, emme katsayısı arttıkça tane büyüklüğü dağılımının ince tanelere doğru ötelendiği ve kil yüzdesinin arttığı görülmüştür. Emme katsayısının 0,01 ile 0,1 arasındaki değişiminin, kil yüzdesinin %10 ile 15 arasında değişmesine neden olduğu belirlenmiştir. Emme katsayısı, kil yüzdesi üzerinde bu kadar etkili olmasına rağmen, zemin mineralleri için hangi değerin alınması gerektiğine dair kesin bir ölçüt bulunmamaktadır. Ancak tam saydam malzemelerin emme katsayısının 0,0 olduğu ve zemin minerallerinin genellikle tam saydam olmadığı göz önüne alınarak, ISO 13320 (1999)'de belirtilen üst sınır değeri olan 0,1'in alınabileceği düşünülmektedir.

vii. Zemin örneklerinin ayrıştırılmasında ultrasonik enerjinin son derece etkili olduğu ve ultrasonik enerjinin gücü arttırıldıkça örneklerin daha iyi ayrıştığı ve tane büyüklüğü dağılımının ince tanelere doğru ötelendiği görülmüştür.

viii. Zemin örneklerinin ayrıştırılmasında ultrasonik enerji her ne kadar etkili ise de, tek başına yeterli olmadığı ve ultrasonik enerji ile birlikte Calgon çözeltisi kullanıldığında daha iyi ayrıştırma sağlandığı belirlenmiştir. Zemin örneklerinin ayrıştırılmasında uygulanan doğrudan ileve etme ve önceden bekletme yöntemlerinde kaç ml Calgon çözeltisi kullanılasının gerektiğini belirlemek için 10 – 100 ml arasında değişen miktarlarda Calgon çözeltisi kullanılarak yapılan analizler sonucunda, çözelti miktarı arttıkça örneklerin ayrıştırılmasında olumlu

veya olumsuz bir etki meydana gelmediği görülmüştür. Yüksek miktarda kil içeren ve ayrıştırılması zor olan bazı örneklerde, daha fazla Calgon çözeltisinin gerekmesi olasılığına karşın, her iki ayrıştırma yönteminde de en az 100 ml Calgon çözeltisinin kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir.

ix. Zemin örneklerinin ayrıştırılmasında hangi yönteminin daha etkili olduğunu belirlemek için 10 farklı örnek üzerinde yapılan analizler sonucunda, kil yüzdesi yüksek olan (> % 40) iki örnekte, önceden bekletme yönteminin daha iyi ayrıştırma sağladığı görülmüştür. Ancak, önceden bekletme yönteminde, ışın azalma oranının %15 – 30 arasında olmasını sağlayacak örnek miktarının belirlenmesinde bazı güçlükler ortaya çıktığından ve analiz süresini uzattığından bu çalışmada doğrudan ilave etme yöntemi uygulanmıştır.

x. Bazı örneklerin ayrıştırılmasında, belli bir süre sonra ayrışmanın tam tersine dönerek topaklanma meydana geldiği görülmüştür. Analiz boyunca bilgisayar ekranından eş-zamanlı olarak izlenebilen ön-izleme penceresi sürekli gözlenerek, topaklanmanın başladığı, dolayısı ile ayrışmanın tamamlandığı anı yakalamanın mümkün olduğu saptanmıştır.

xi. Lazer kırınım ve hidrometre yöntemleriyle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin farklı olmasının başlıca nedenlerinin, tane şekli ve tane mineralojisi olduğu ortaya konulmuştur.

xii. Analiz edilen tanelerin şekli yuvarlağımsı veya küreye yakın olduğunda, lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği, levhamsı tanelerden oluşan örneklerde ise, her iki yöntemle belirlenen sonuçların birbirinden uzaklaştığı ve hidrometre yönteminin tane yüzdelerini daha yüksek belirlediği saptanmıştır. Öne sürülen bu bulgular SEM fotoğraflarıyla desteklenmiştir.

xiii. Yöntemlerden birisiyle belirlenen kil yüzdesinden diğerini tahmin etmek için doğrusal regresyon analizleri yapılmış olup, ikili regresyon analizinin sonucunda R^2 = 0,87 olmak üzere, KY_L = 0,6481 KY_H – 0,3474 eşitliği elde edilmiştir. Çoklu regresyon analizinin sonucunda ise, R^2 = 0,89 olmak üzere, KY_L= 0,649 KY_H + 0,224 LL – 0,309 PI – 3,65 eşitliği elde edilmiştir. Bu eşitliklerde, KY_L lazer kırınım yöntemiyle, KY_H ise hidrometre yöntemiyle belirlenmiş kil yüzdesini, LL örneğin likit limitini, PI ise plastisite indisini göstermektedir.

xiv. Yöntemlerden birisiyle belirlenen 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesinden diğerini tahmin etmek için de regresyon analizleri yapılmış olup, ikili regresyon analizinin sonucunda, R^2 = 0,90 olmak üzere, $L_{<5\mu m(\%P)}$ = 0,805 $H_{<5\mu m(\%P)}$ + 2,6648 eşitliği elde edilmiştir. Çoklu regresyon analizinin sonucunda ise, R^2 = 0,93 olmak üzere, $L_{<5\mu m(\%P)}$ = 0,888 $H_{<5\mu m(\%P)}$ + 0,407 LL – 0,678 PI + 3,016 A – 5,504 eşitliği elde edilmiştir. Bu eşitliklerde, $L_{<5\mu m(\%P)}$ lazer kırınım yöntemiyle, $H_{<5\mu m(\%P)}$ ise hidrometre yöntemiyle belirlenmiş 5 μm'den küçük tanelerin yüzdesini, LL örneğin likit limitini, PI plastisite indisini, A ise aktivite değerini göstermektedir.

Öneriler :

i. Lazer kırınım analizlerinde tanelerin ışın emme katsayısı analiz sonuçlarının önemli ölçüde etkilemesine karşın, literatürde zemin minerallerinin emme katsayıları bulunmamaktadır. Bu nedenle, zemin minerallerinin emme katsayılarının belirlenmesi için daha çok çalışma yapılması gerektiği düşünülmektedir.
ii. Bazı örneklerde topaklanma meydana gelmesinin nedenlerinin ayrı bir çalışma kapsamında araştırılabileceği düşünülmektedir.
iii. Fraunhofer yaklaşımında, analiz edilecek örneklerin saptırma indisine gereksinim duyulmaması bir avantaj gibi görülebileceğinden, zemin örneklerinin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde Mie kuramının mı yoksa Fraunhofer yaklaşımının mı daha uygun olduğunun ortaya konulması için ayrıntılı bir çalışma yapılabileceği düşünülmektedir.
iv. Yapılan bu çalışma sonucunda, lazer kırınım yönteminin hidrometre yöntemine göre daha doğru sonuç verdiği, bu nedenle, lazer kırınım yönteminin, zemin örneklerinin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde uygulanan standart bir yöntem haline getirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Bardet, J. P., "Experimental Soil Mechanics", ***Prentice-Hall, Inc***., New Jersey, USA, 16, 31-39 (1997).

2. Head, K. H., "Manual of Soil Laboratory Testing, Second Edition", ***John Wiley & Sons, Inc***., Great Britain, 1: 169, 201-203 (1992).

3. Çetin, K. Ö. ve Unutmaz, B., "Zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı", ***Türkiye Mühendislik Haberleri, Geoteknik-1***, TMMOB İnşaat Müh. Odası, 430: 32 – 37 (2004).

4. Kramer, S. L., "Geotechnical Earthquake Engineering", ***Prentice-Hall, Inc***., New Jersey, USA, 354 (1996).

5. Wen, B., Aydın, A. and Aydın-Duzgoren, N.S., "A comparative study of particle size analysis by sieve-hydrometer and laser diffraction methods", ***Geotechnical Testing Journal***, 25 (4): 434 – 442 (2002).

6. ASTM D 422 (American Society for Testing and Materials), "Standart test method for particle-size analysis of soil", ***Annual Book of ASTM Standards***, 2–7 (1998).

7. BS 1377: "British standart methods of tests for soils for civil engineering purposes, Part 2, ***British Standart Institution***, İngiltere, 30–45, 27–29 (1990).

8. Lerman, A., Lal, D. and Dacey, M.F., "Stokes settling and chemical reactivity of suspended particles in naturel waters, In: Suspended Solids in Water, Ed.by R.J. Gibbs", ***Plenium Press***, New York, 17 – 47 (1974).

9. Lu, N., Ristow, G. H. and Likos, W. J., "The accuracy of hydrometer analysis for fine-grained clay particles", ***Geotechnical Testing Journal***, 23 (4): 487 – 495 (2000).

10. Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G. and Froyen, L., "Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method", ***Catena***, 32: 193 – 208 (1998).

11. Ma, Z., Merkus, H. G., de Smet, J.G.A.E., Heffels C. and Scarlett, B., "New developments in particle characterization by laser diffraction: size and shape", ***Powder Technology***, 111: 66 – 78 (2000).

12. ISO 13320 – 1, "Particle size analysis – laser diffraction methods, Part 1: general principles, Annex A; Theoritical background of laser diffraction", Geneve, Switzerland, 1,4,9,10,12,18 (1999).

13. McCave, I.N., Bryant, R.J., Cook, H.F. and Coughanowr, C.A., "Evaluation of laser-diffraction-size analyser for use with natural sediments", ***Journal of Sedimentary Petrology***, 56: 561 – 564 (1986).

14. Loizeau, J.-L., Arbouille, D., Santiago, S. and Vernet, J.-P., "Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments", ***Sedimentology***, 41: 353 – 361 (1994).

15. Konert, M. and Vandenberghe, J., "Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction", ***Sedimentology***, 44: 523–535 (1997).

16. Muggler, C. C., Pape, Th. and Buurman, P., "Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Aggregation and clay formation in some Brazilian Oxisols", ***Soil Science***, 162 (3): 219-228 (1997).

17. Vitton, S. J and Sadler, L. Y., "Particle size analysis of soils using laser light scattering and X-Ray absorption technology", ***Geotechnical Testing Journal***, 20 (1): 63 – 73 (1997).

18. Eshel, G., Levy, G.J., Mingelgrin, U. and Singer, M.J., "Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle–size distribution analysis", ***Soil Science Society of American Journal***, 68: 736 – 743 (2004).

19. Buurman, P., Pape, Th. and Muggler, C. C., "Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems", ***Soil Science,*** 162 (3): 211-218 (1997).

20. Chappell, A., "Dispersing sandy soil for the measurement of particle size distributions using optical laser diffraction", ***Catena***, 31: 271 – 281 (1998).

21. Barth, H. G., "in: Modern Methods of Particle Size Analysis", ***Wiley***, New York, 28 (1984).

22. Malvern, "Master SizerX Instrument Manuel", ***Malvern Instruments Ltd***, İngiltere, 1-10, 14-16 (1993).

23. Allen, T., "Particle Size Measurement, fifth edition", ***Chapman&Hall***, London, UK., 1: 46, 226, 405, 411. (1997).

24. Malvern, "Diffraction Reference," ***Malvern Instruments Ltd***, İngiltere, 2–7 (1993).

25. İnternet: Rawle, A., "The basic principles of particle size analysis" http://www.malvern.co.uk/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB000021/$file/Basic_principles_of_particle_size_analysis_MRK034-low_res.pdf (2003).

26. Hessemann, R., "Particle size analysis in ceramics manufacture", ***International Ceramics***", 1: 31 – 34 (2002).

27. Taylor, M. A., "Quantitative measures for shape and size of particles", ***Powder Technology***, 124: 94 – 100 (2002).

28. Jillavenkatesa, A., Dapkunas, S. J. and Lum, L.S.H., "Particle size characterization", ***National Institute of Standart and Technology (NISTS), Department of Commerce, Special Publication 960-1***, U.S.A, 93–111 (2001).

29. Stokes, G. G., "Mathematical and Physical Paper III" ***Cambridge University Press***, 32 – 35 (1891).

30. Mitchell, J. K., "Fundamentals of Soil Behavior", ***John Wiley & Sons***, Inc. U.S.A., 35 – 45 (1976).

31. Mysels, K. J., "Intoduction to Colloid Chemistry", ***Interscience Publishers***, New York, 142–145 (1959).

32. Clift, R., Grace, J. R., and Webber, M. E., "Bubbles, Drops and Particles" ***Academic Press***., New York, 57–61 (1978).

33. Weatherly, W. C., "The hydrometer method determining the grain size distribution curve of soils", Master of Science thesis, Department of Civil Engineering, ***Massachusett Institute of Technology*** (1929).

34. Barr, G., "A Monograph of viscometry", ***Oxford University Press.***, London, 75 – 77 (1931).

35. Rouse, H., "Elementary mechanics of fluids", ***John Wiley and Sons.***, New York, 162–168 (1946)

36. Payne, L.E. and Pell, W.H., ***Journal of fluid mechanics***, 7: 529 – 549 (1960).

37. Bowles, J. E., "Engineering Properties of Soils and Their Measurement", 4th Edition, ***Irwin McGraw-Hill***, 74 (1992).

38. CRC Press " Handbook of Chemistry and Physics, 83rd ed.", ***CRC Press***, Boca Raton FL., 358–359 (2002).

39. Van Dongen, W., "Bepaling korrelgrootteverdeling van waterbodems en zwevende stof. Ijking van de laserbuigingsmethode met de zeef-en pipet methode volgens NEN 5753", ***Aufstudeerverslag HLO-chemie, Rijkswaterstaad / RIZA, Lelystad*** , 12: 32 – 41 (1989).

40. Andrews, D.C.A., Martin, G. R., "Criteria for liquefaction of silty soils", ***12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings,*** Auckland, New Zealand, 112 – 123 (2000).

41. Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R., "Prediction of swelling potential of compacted clays", ***Journal of Soil Mechanics and Foundations Division-Proceeding of the American Society of Civil Engineers***, 88 (SM3): 53 – 87 (1962).

42. Van der Merwe, D. H., "The prediction of heave from the plasticity index and the percentage clay fraction", ***The civil engineer in South Africa***, 6 (6): 7 – 105 (1964).

43. De Boer, G.B.J., De Weerd, C., Thoenes, D. and Goossens, H.W.J., "Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer diffraction versus Mie scattering", ***Part. Charact***., 4: 14–19 (1987).

44. Murray, M. R., "Is laser particle size determination possible for carbonate-rich lake sediments?", ***Journal of Paleolimnology***, 27: 173 – 183 (2002).

45. İnternet : Wedd, M. W., "Determination of particle size distribution using laser diffraction", http://www.erpt.org/032Q/wedd-00.htm (2003).

46. Planz, P. E., "Particle-size Measurement from 1.0 to 1000 µm based on light scattering and diffraction, In: Modern Methods of Particle-size Analysis, H.G. Barth, Ed", ***Wiley***, New York, 173 – 209 (1984).

47. Hoff, E.V. & Bott, S.B., "Optical theory and refractive index: why it is important to particle size analysis", ***Coulter Technical Bulletin*** LS Series # 1010. Coulter Scientific Instruments, Hialeah, Florida, 15 – 23 (1999)

48. Bayvel, L.P. and Jones, A.R., "Electromagnetic scattering and its applications", ***Applied Science***, London, 289 (1981).

49. Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., "Rock Forming Minerals, vol. 3. Sheet Silicates". ***Longman***, London, 87–95 (1962).

50. Jonasz, M., "Size, shape, composition and structure of micro particles from light scattering, *In* J.P.M. Syvitske (ed) Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis", ***Cambridge Unv. Pres***., Cambridge, 143 – 162 (1991).

51. Nettleship, I., Cisko, L. and Vallejo, L.E., "Aggregation of the clay in the hydrometer test", ***Canadian Geotechnical Journal,*** 34: 621 – 626 (1997).

52. Xu, R. and Di Guida, O. A., "Comparison of sizing small particles using different technologies", ***Powder Technology***, 132: 145 – 153 (2003).

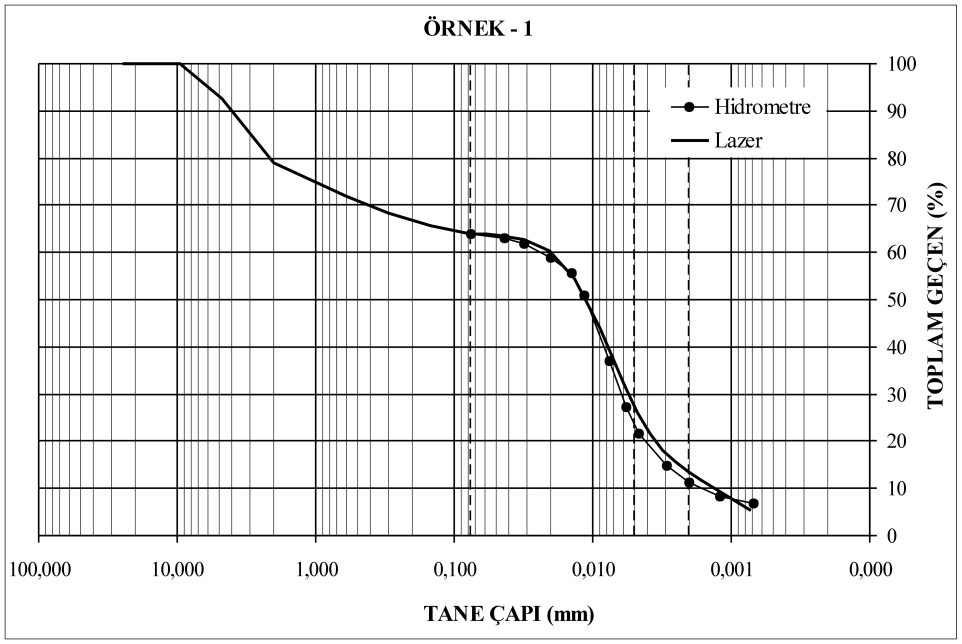
53. Hayton, S., Nelson, C.S., Ricketts, B.D., Cooke, S. and Wedd, M.W., "Effect of mica on particle-size analysis using the laser diffraction technique", ***J. Sediment. Res***., 71: 507 – 509 (2001).

54. Pye, K. and Blott, S.J., "Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry", ***Forensic Science International***, 144: 19–27 (2004).

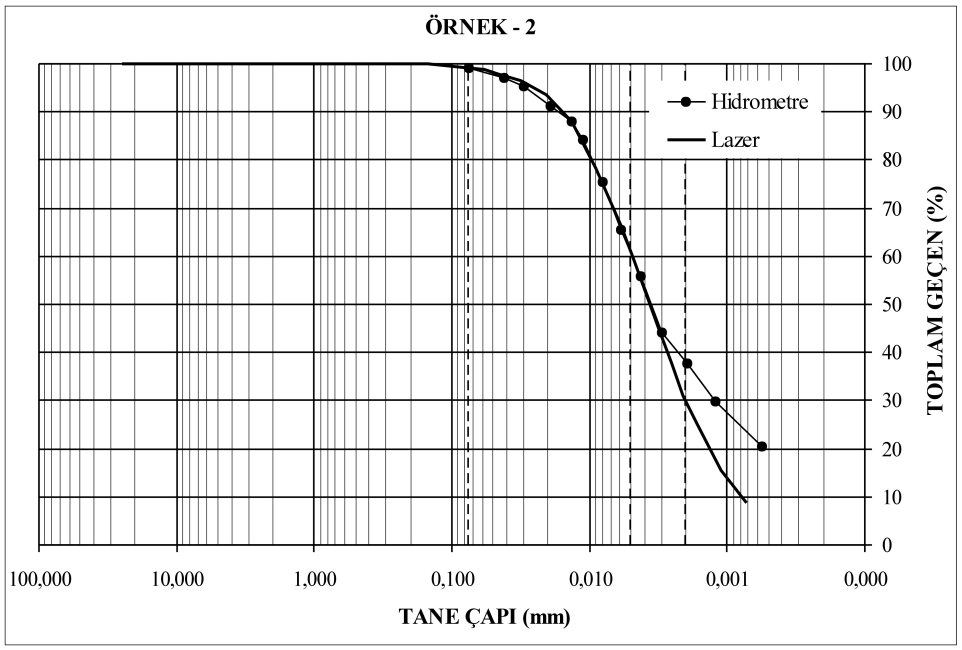
55. ASTM D 4318 (American Society for Testing and Materials), "Standart test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", ***Annual Book of ASTM Standards,*** 2 – 9 (2000).

EKLER

EK–1. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin büyük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

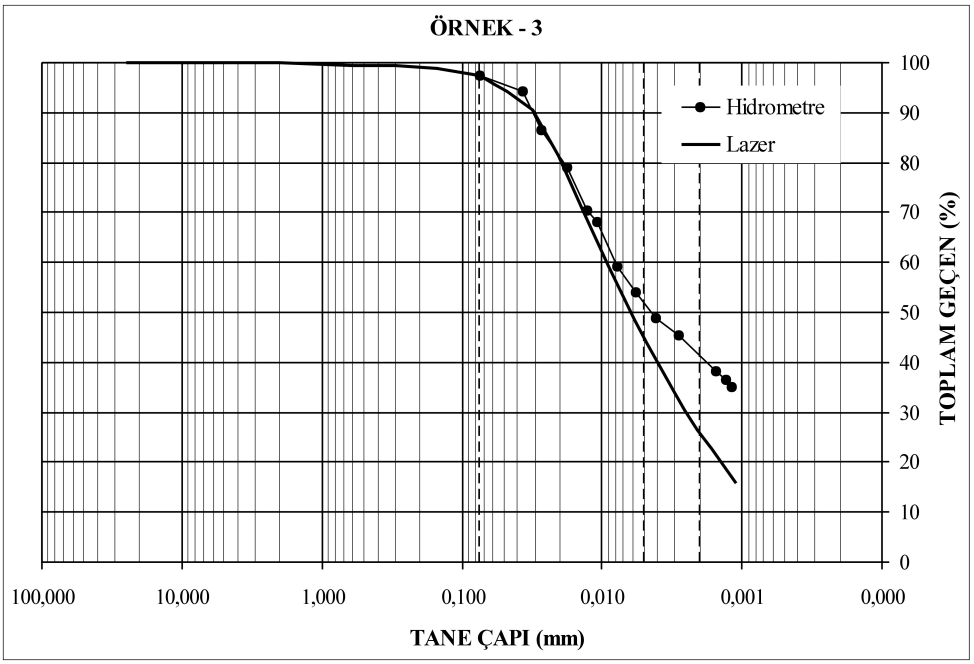


Şekil EK-1.1. Örnek-1 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

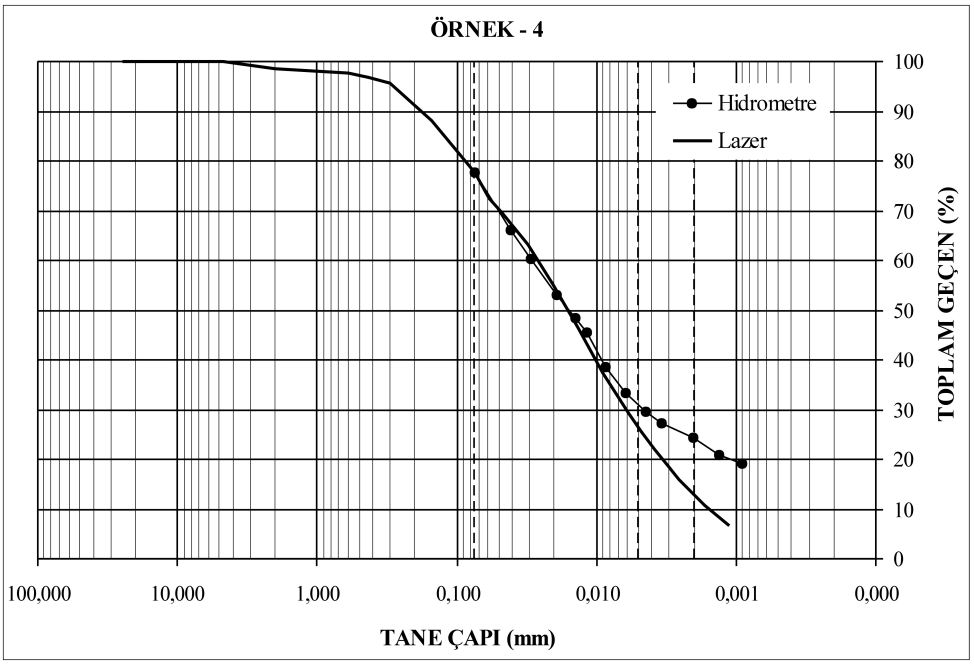


Şekil EK-1.2. Örnek-2 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK–1. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin büyük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

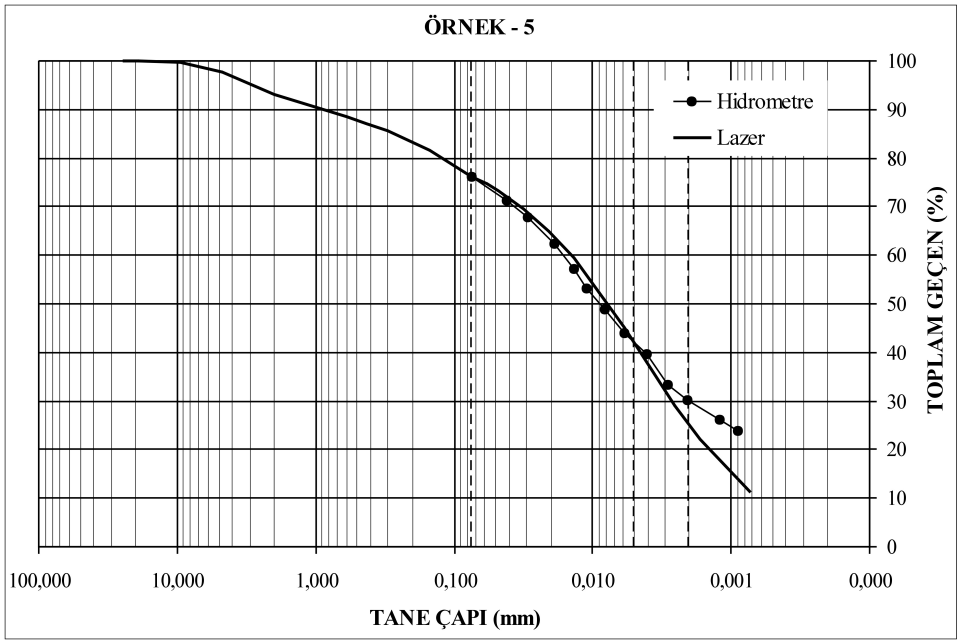


Şekil EK-1.3. Örnek-3 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

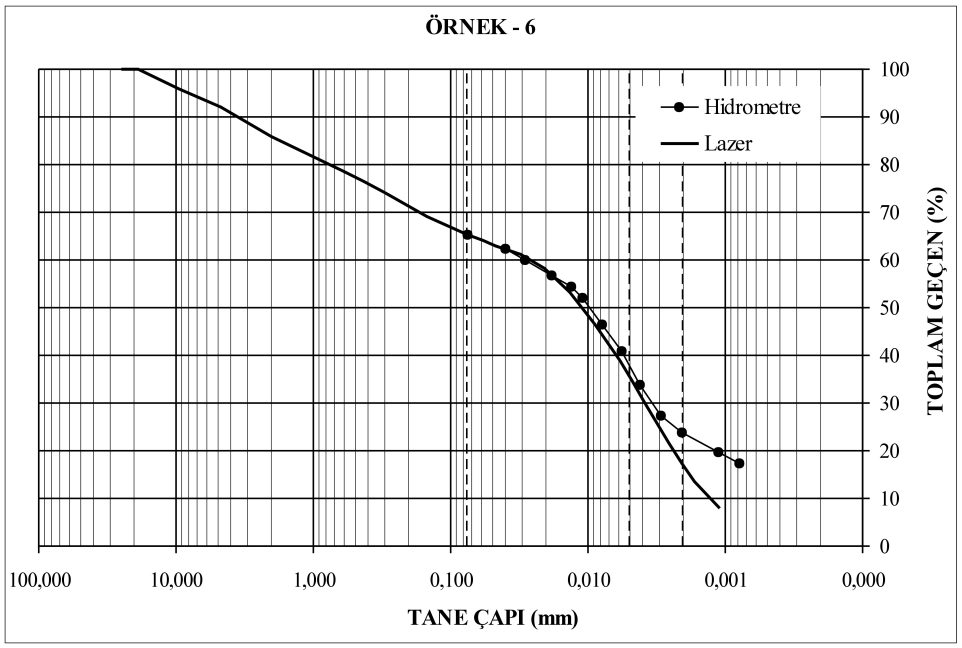


Şekil EK-1.4. Örnek-4 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK–1. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin büyük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

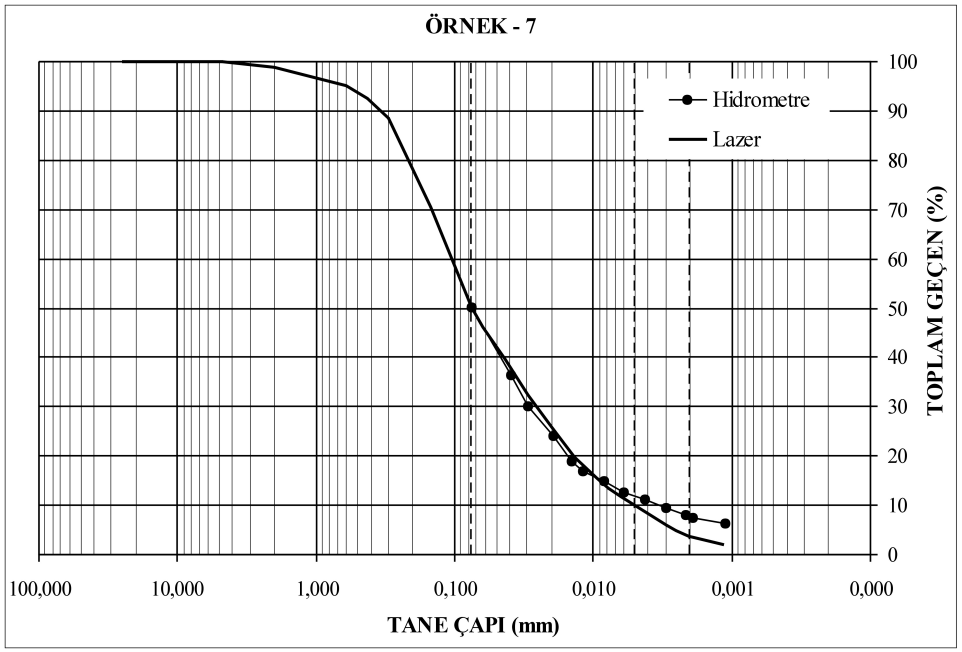


Şekil EK-1.5. Örnek-5 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

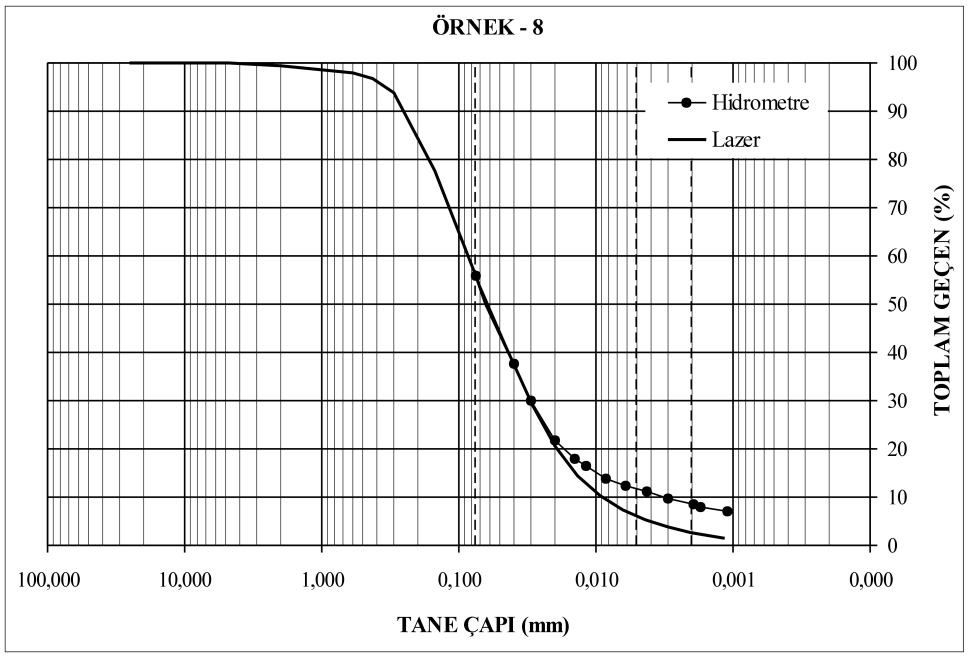


Şekil EK-1.6. Örnek-6 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK–1. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin büyük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

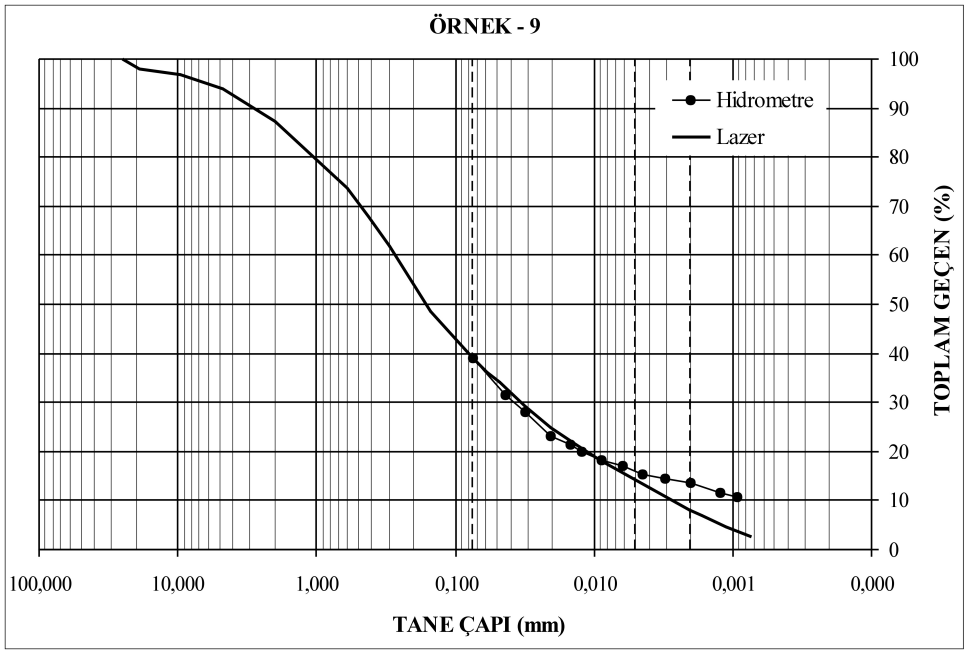


Şekil EK-1.7. Örnek-7 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

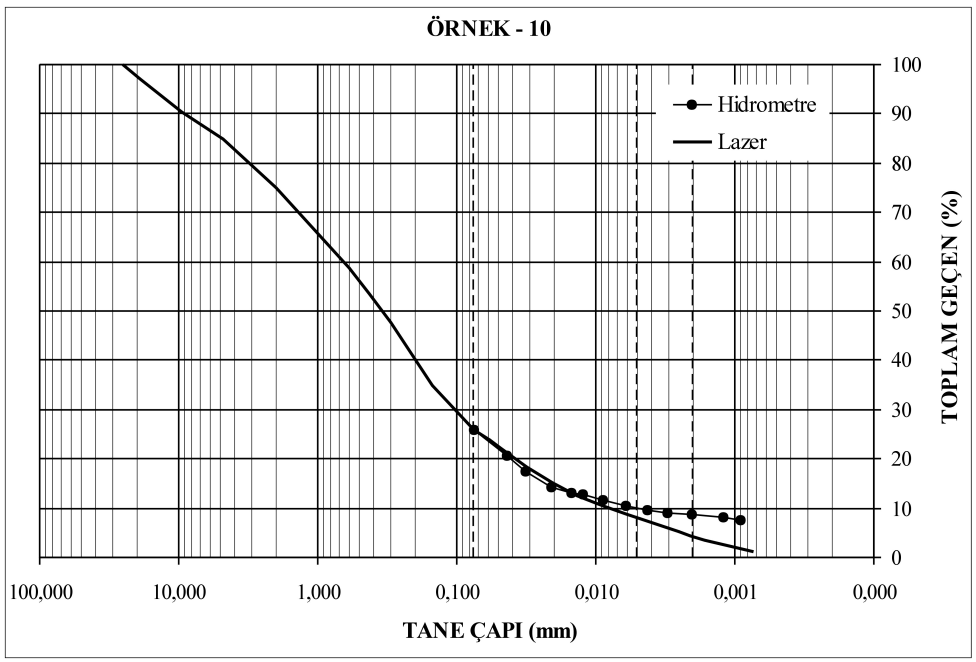


Şekil EK-1.8. Örnek-8 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK–1. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin büyük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

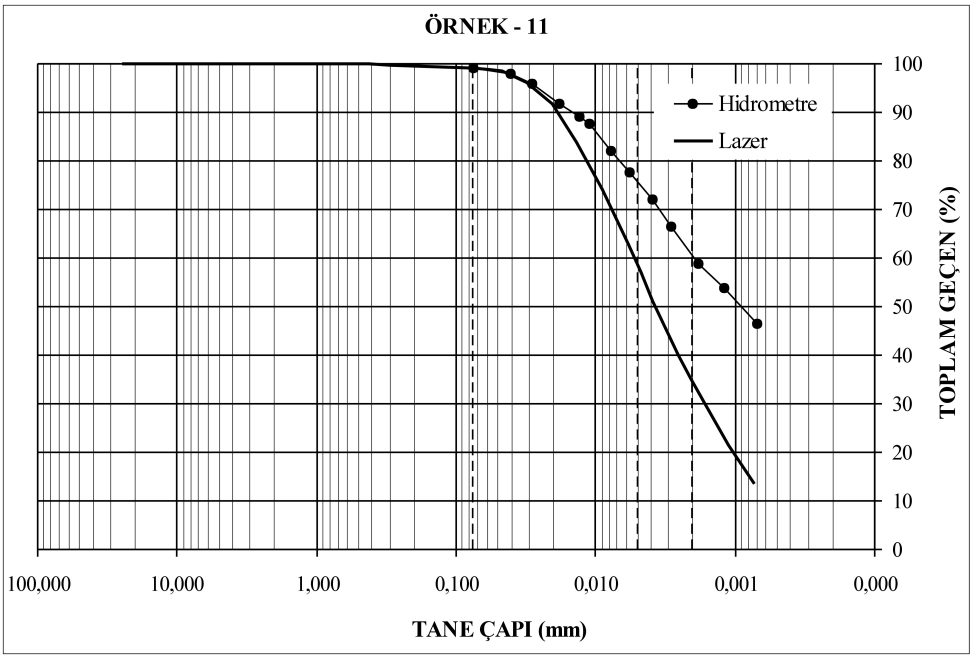


Şekil EK-1.9. Örnek-9 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

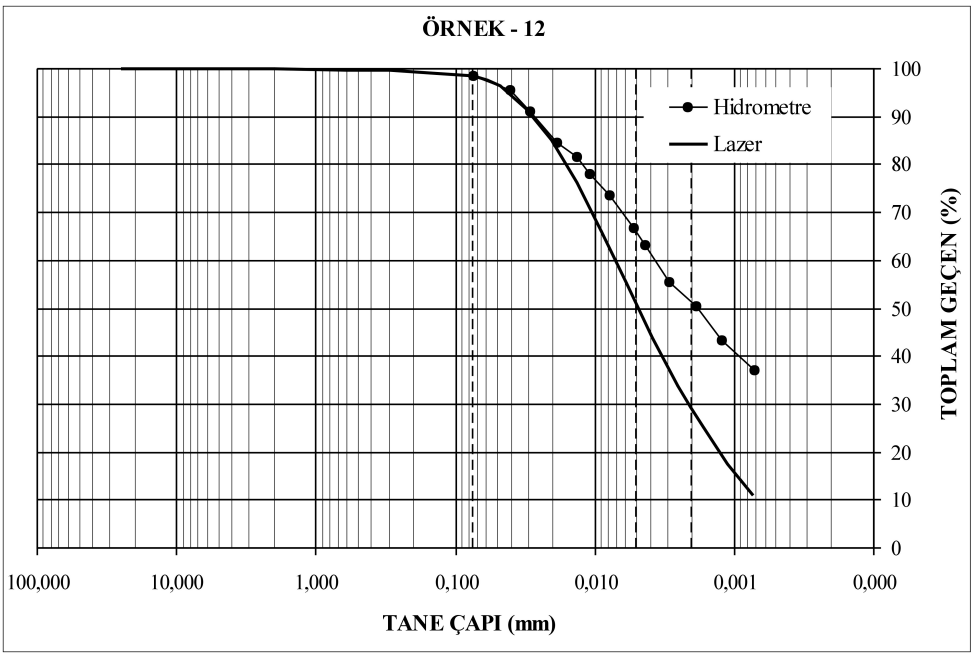


Şekil EK-1.10. Örnek-10 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

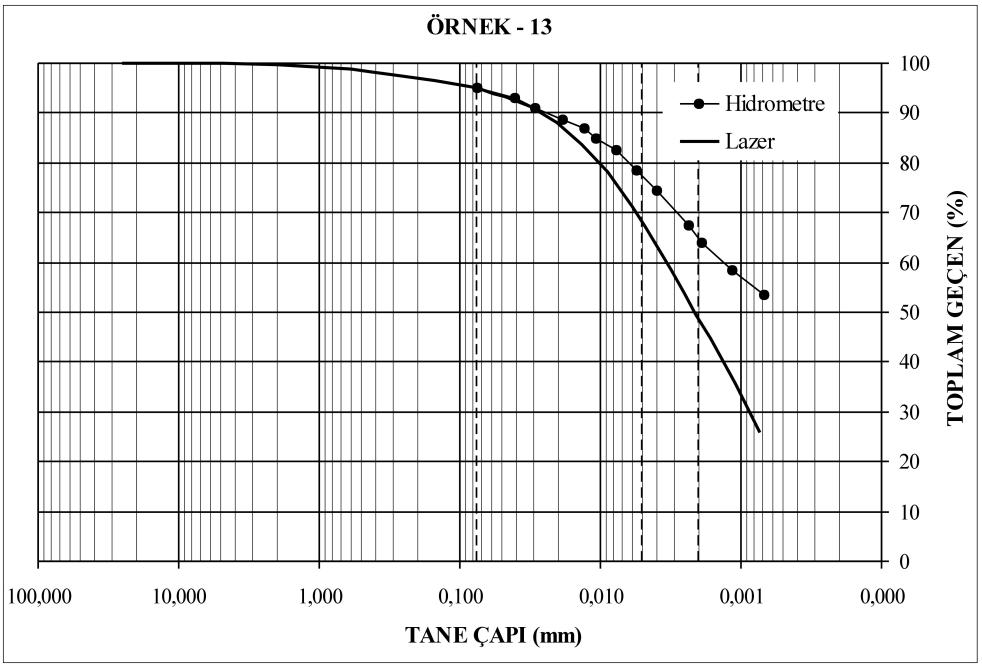


Şekil EK-2.1. Örnek-11 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

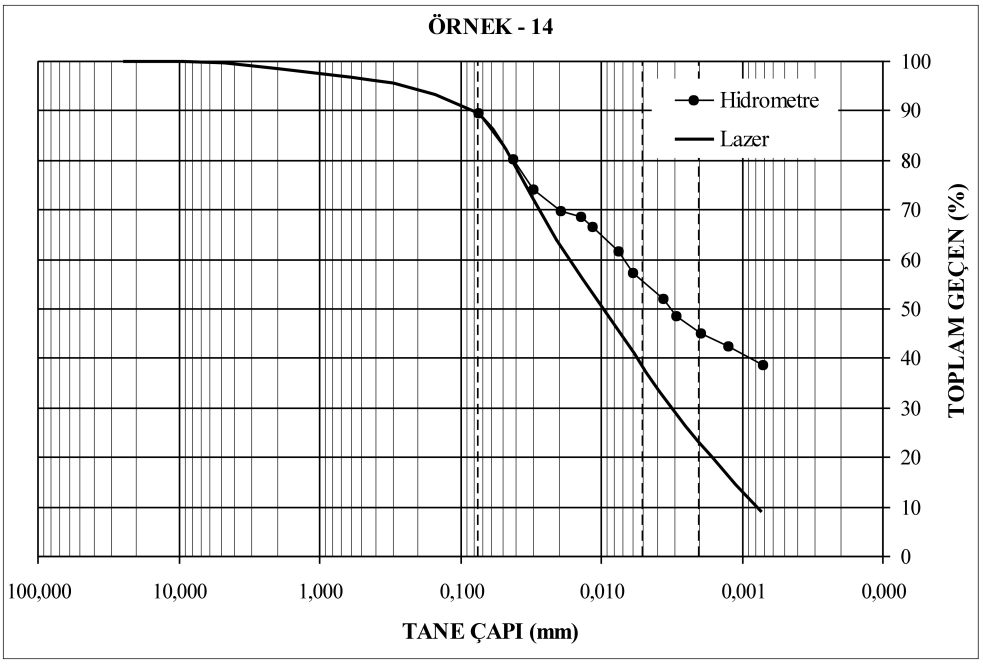


Şekil EK-2.2. Örnek-12 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

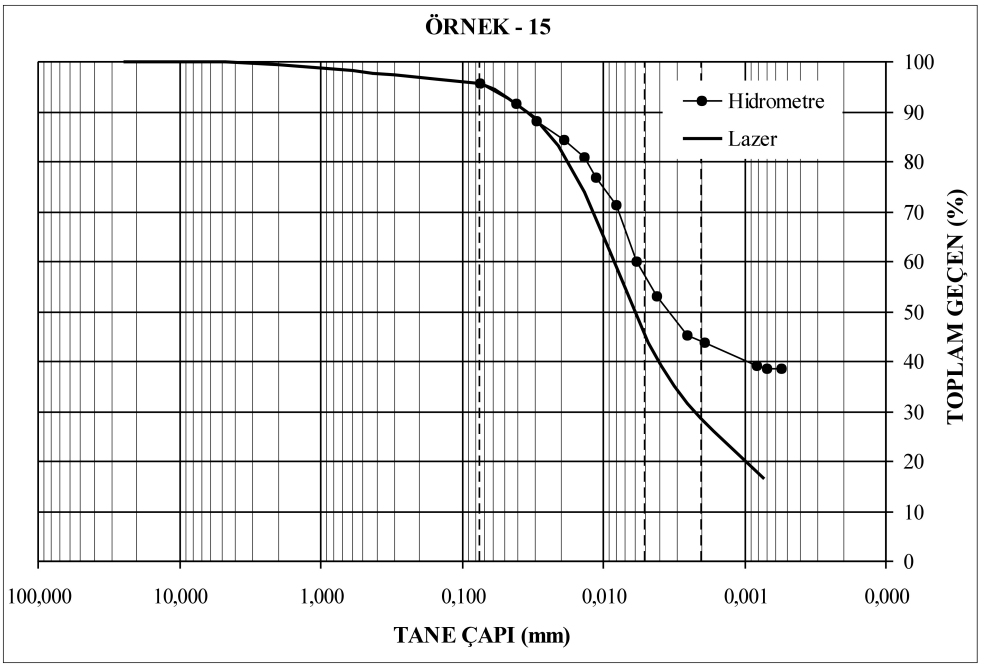


Şekil EK-2.3. Örnek-13 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

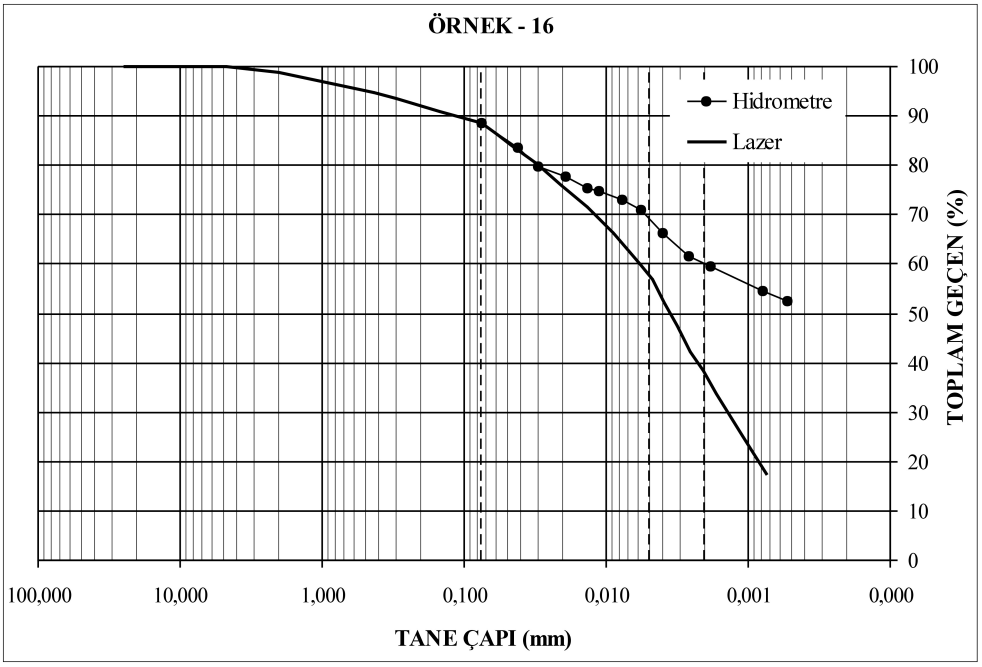


Şekil EK-2.4. Örnek-14 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

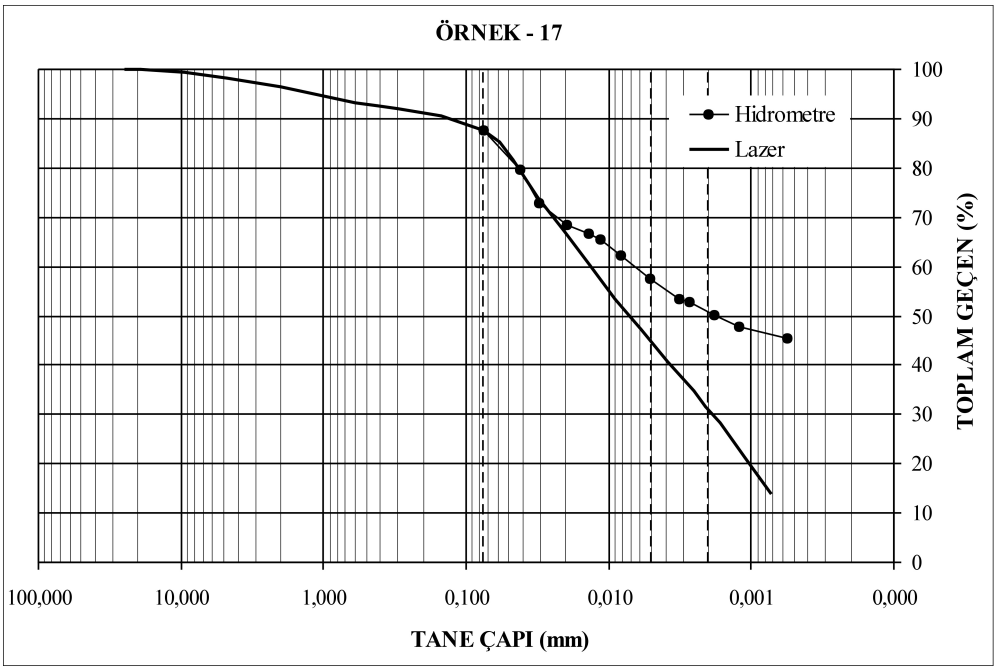


Şekil EK-2.5. Örnek-15 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

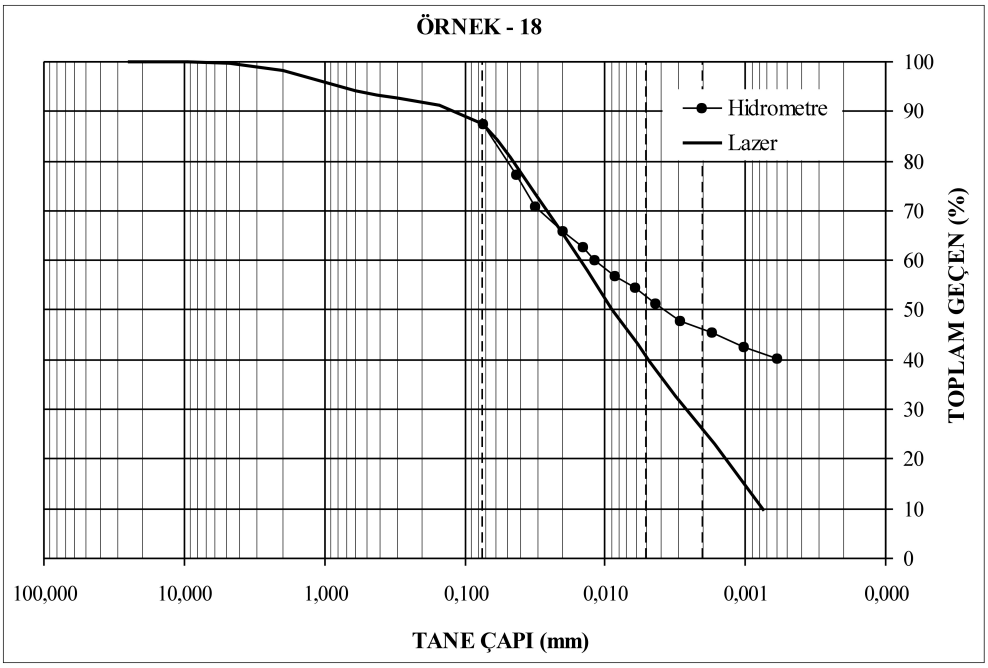


Şekil EK-2.6. Örnek-16 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

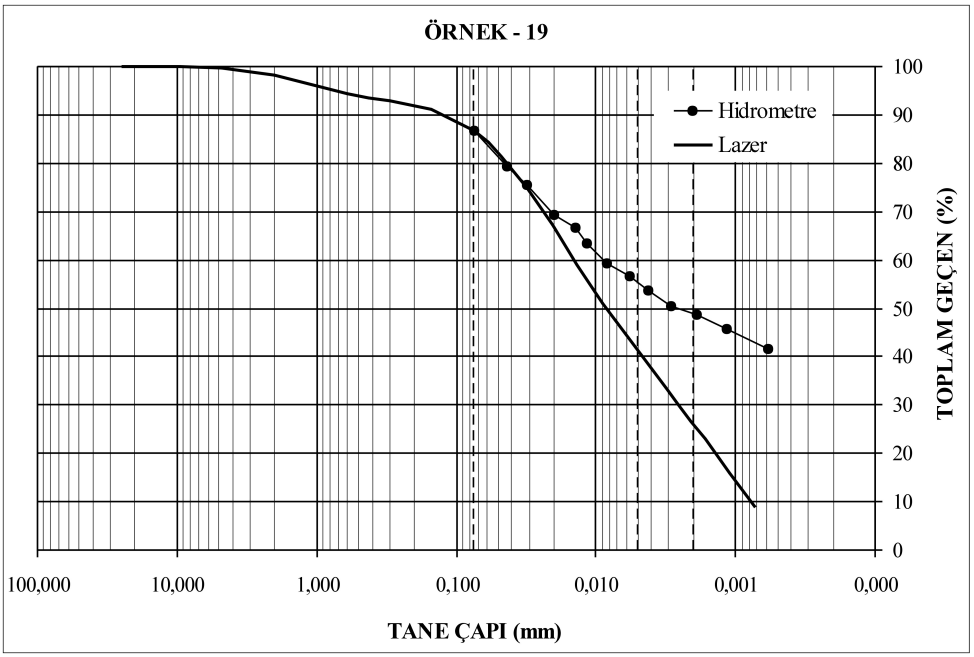


Şekil EK-2.7. Örnek-17 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

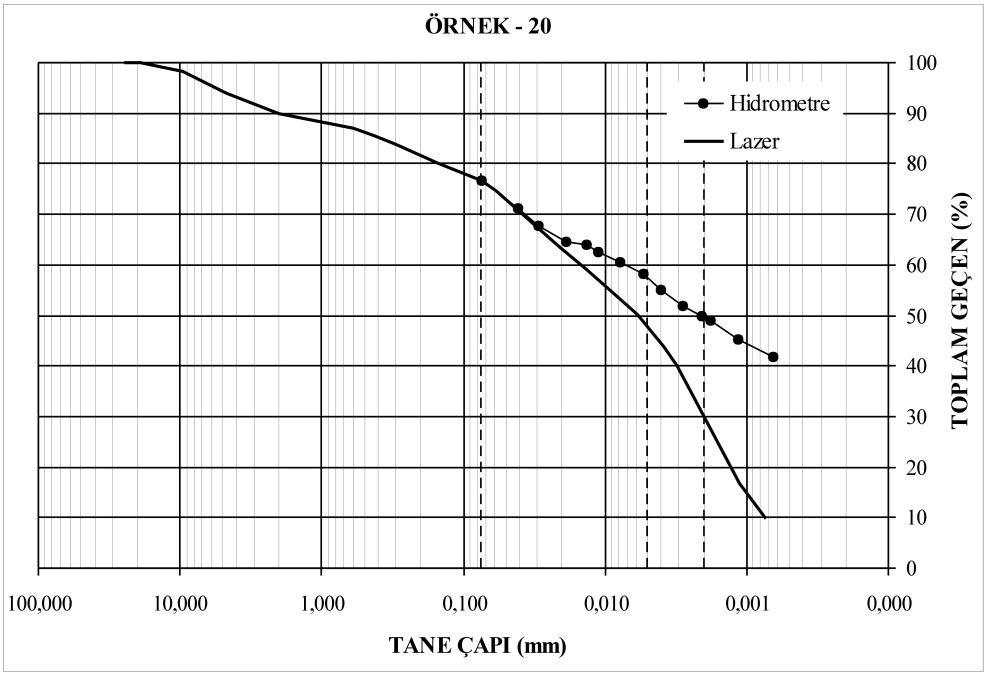


Şekil EK-2.8. Örnek-18 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

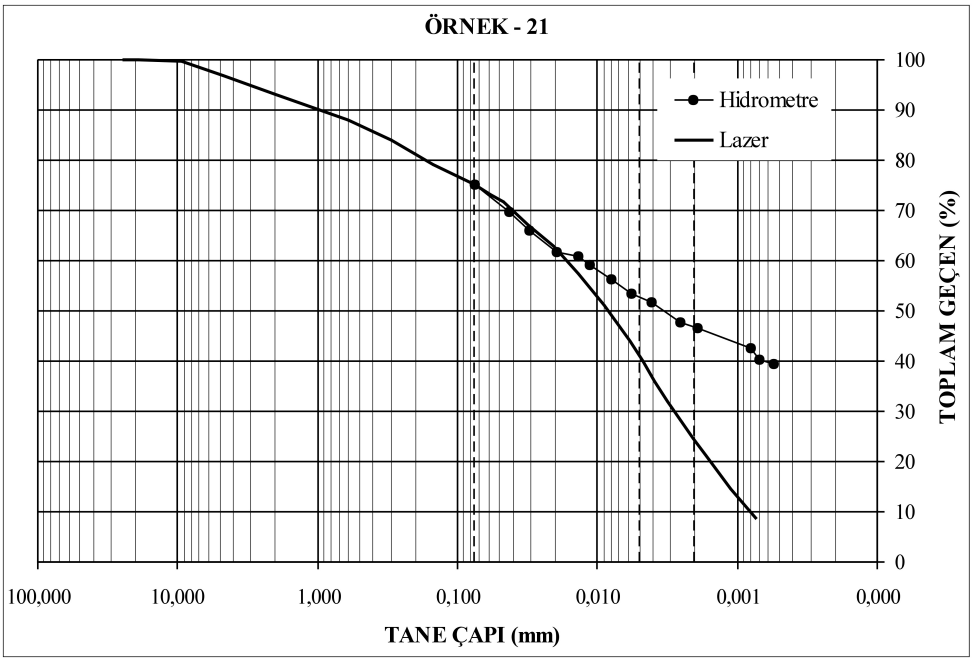


Şekil EK-2.9. Örnek-19 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

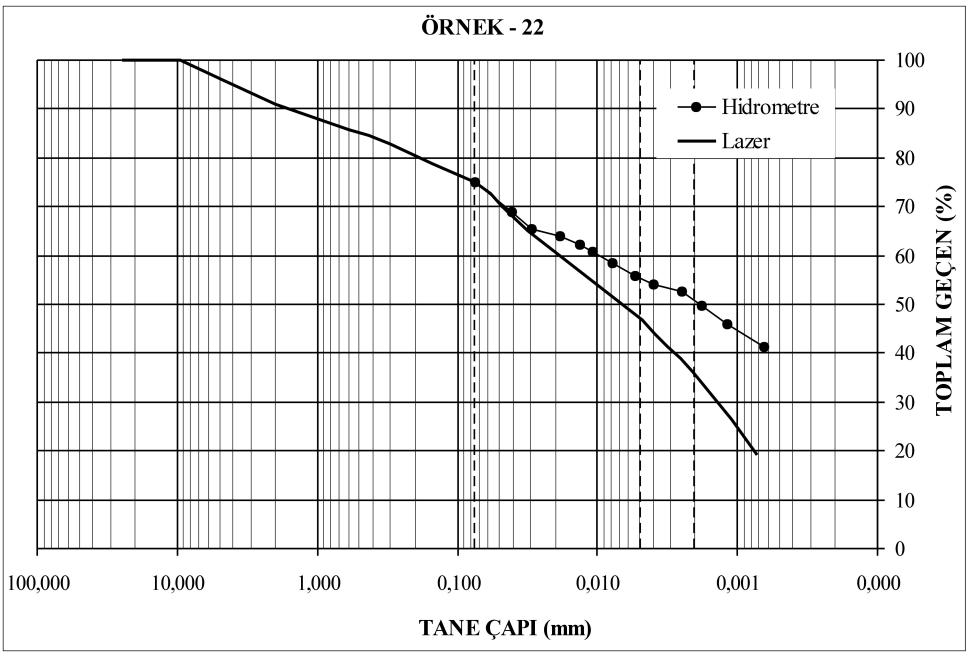


Şekil EK-2.10. Örnek-20 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

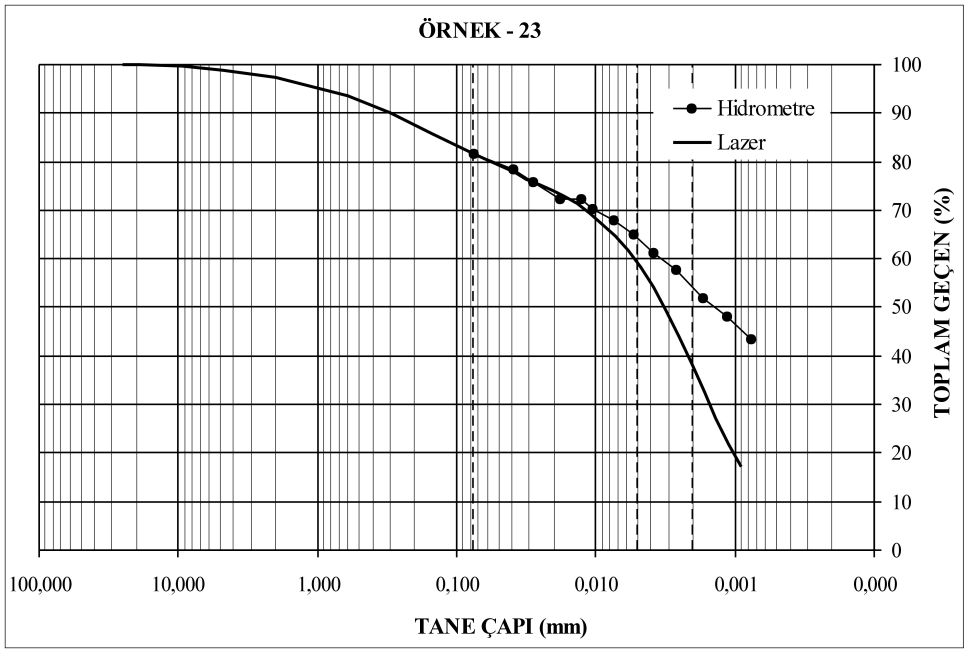


Şekil EK-2.11. Örnek-21 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

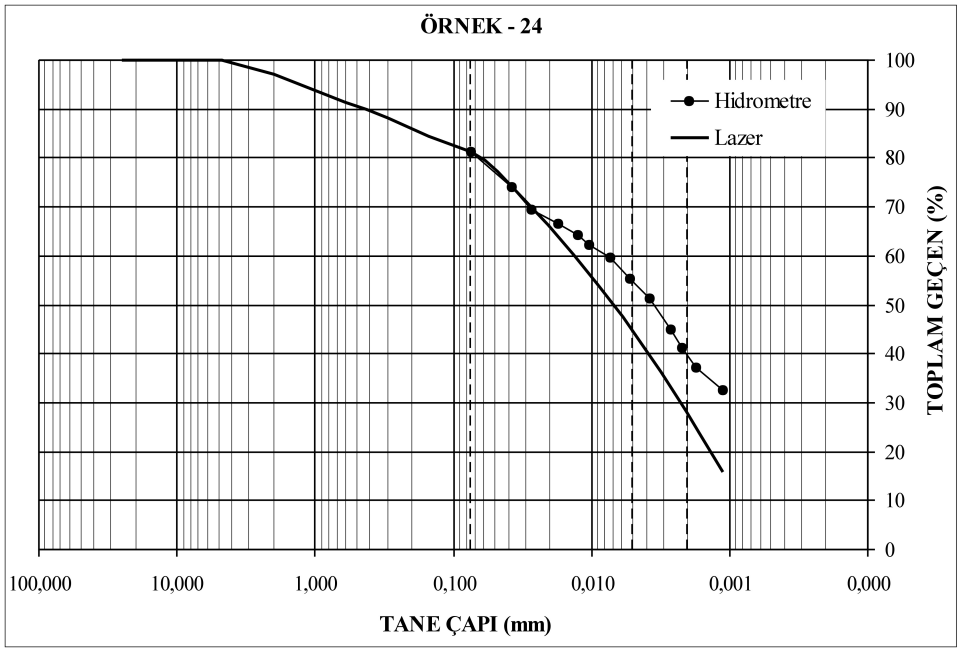


Şekil EK-2.12. Örnek-22 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

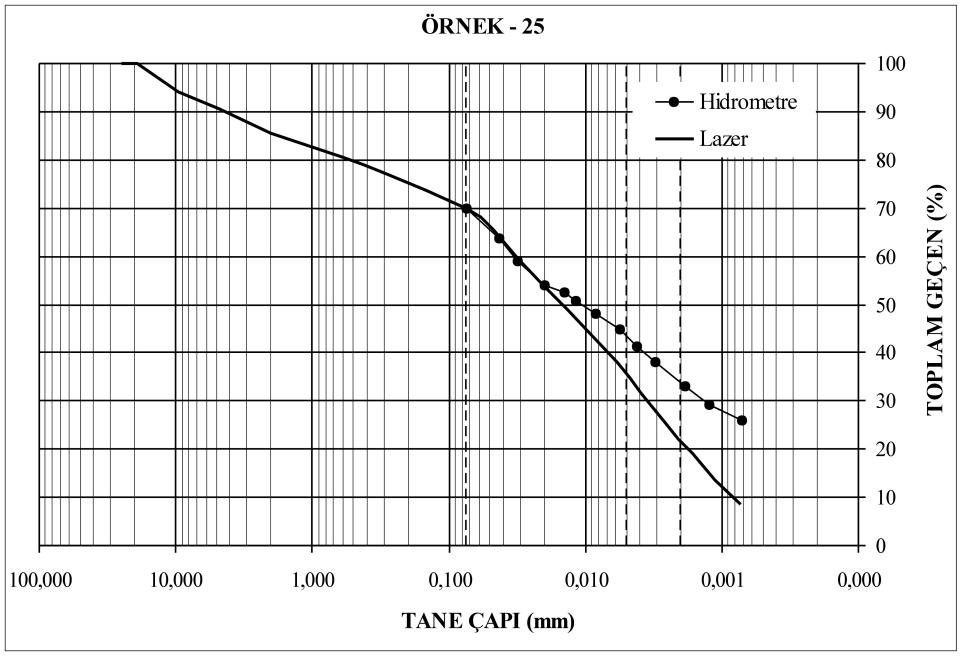


Şekil EK-2.13. Örnek-23 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

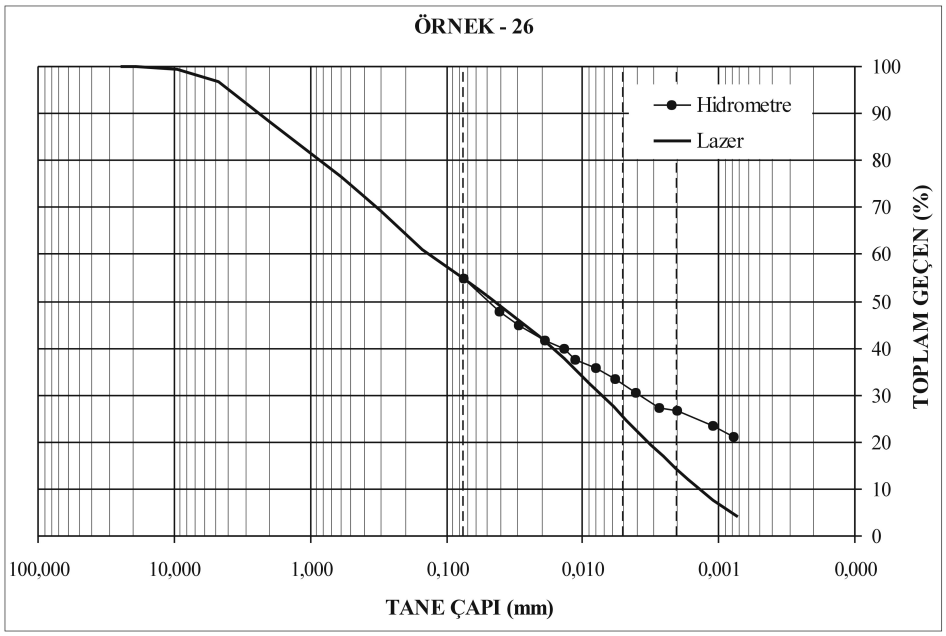


Şekil EK-2.14. Örnek-24 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

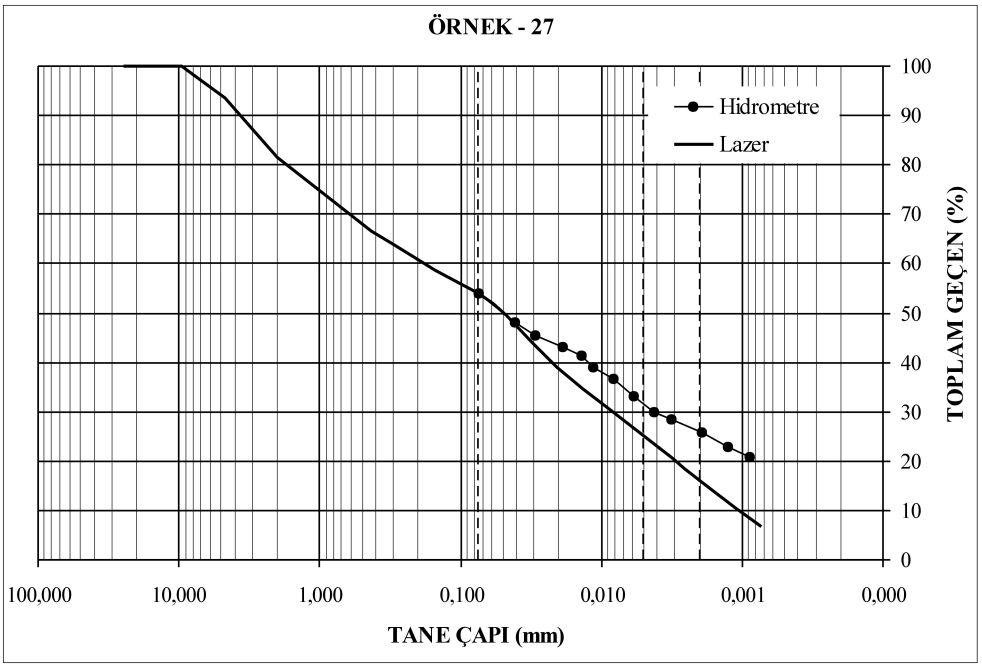


Şekil EK-2.15. Örnek-25 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

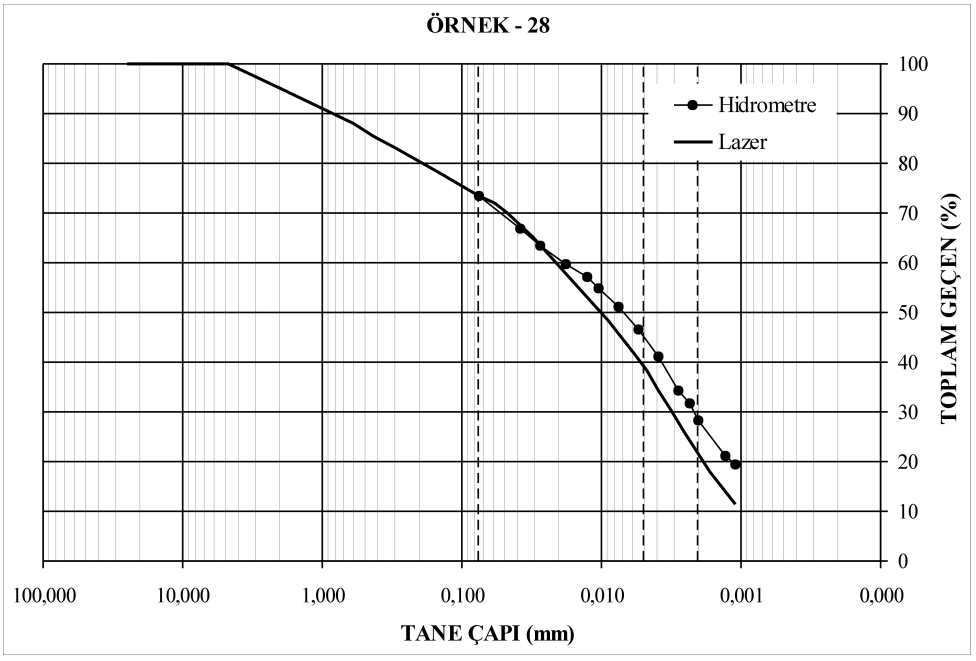


Şekil EK-2.16. Örnek-26 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

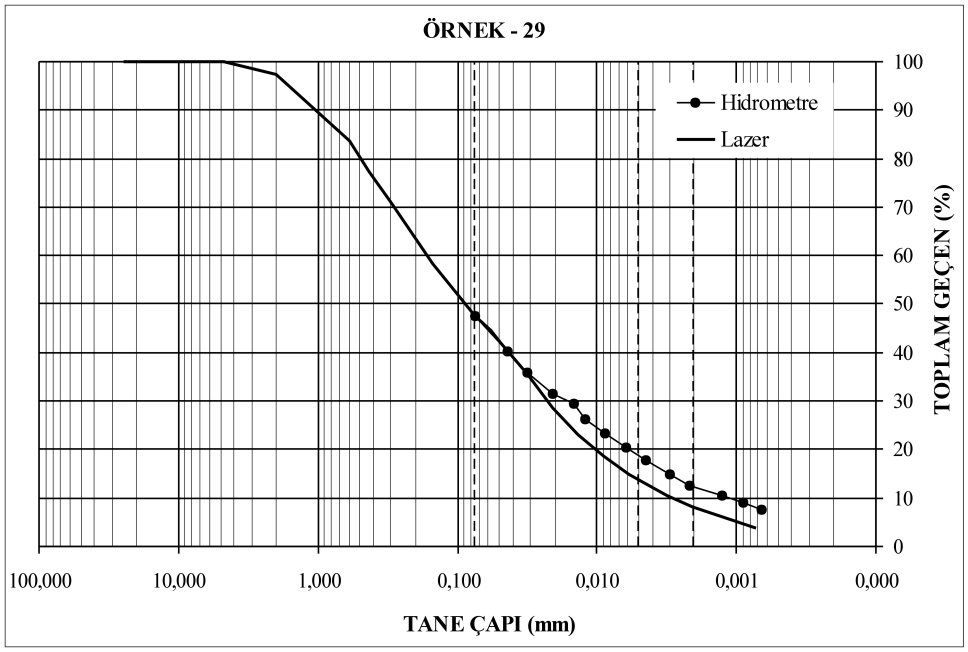


Şekil EK-2.17. Örnek-27 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

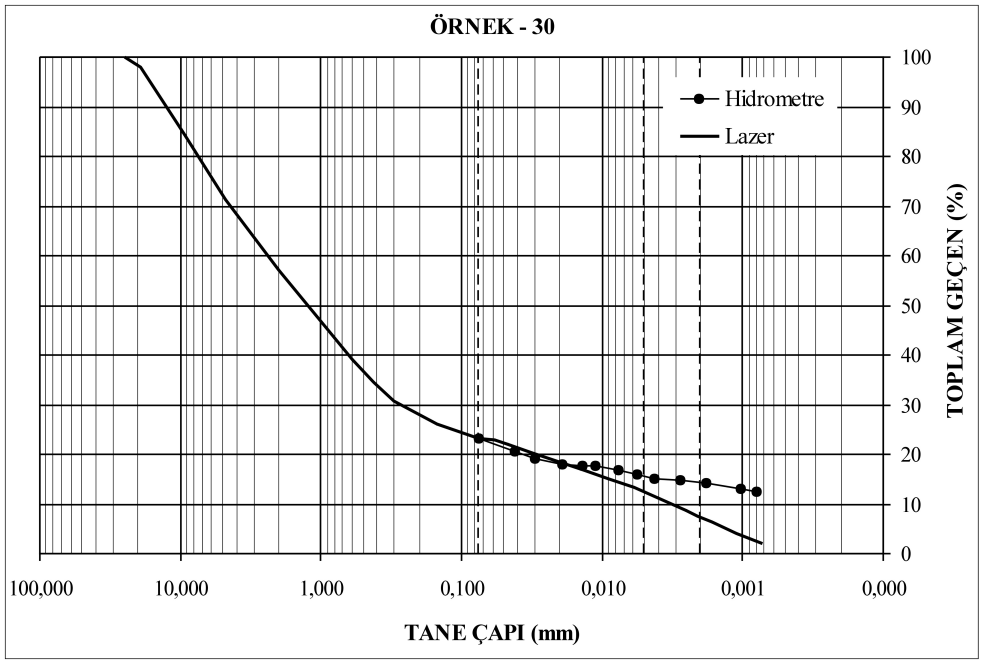


Şekil EK-2.18. Örnek-28 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-2. Her iki yöntem ile belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin küçük bir bölümünün üst üste çakışık olduğu örnekler

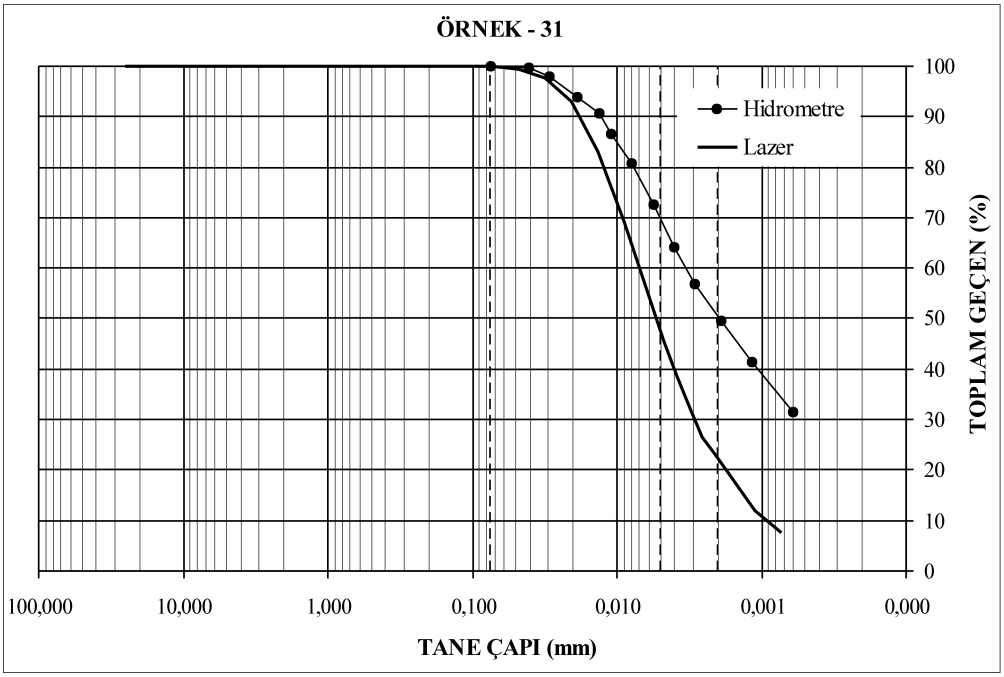


Şekil EK-2.19. Örnek-29 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

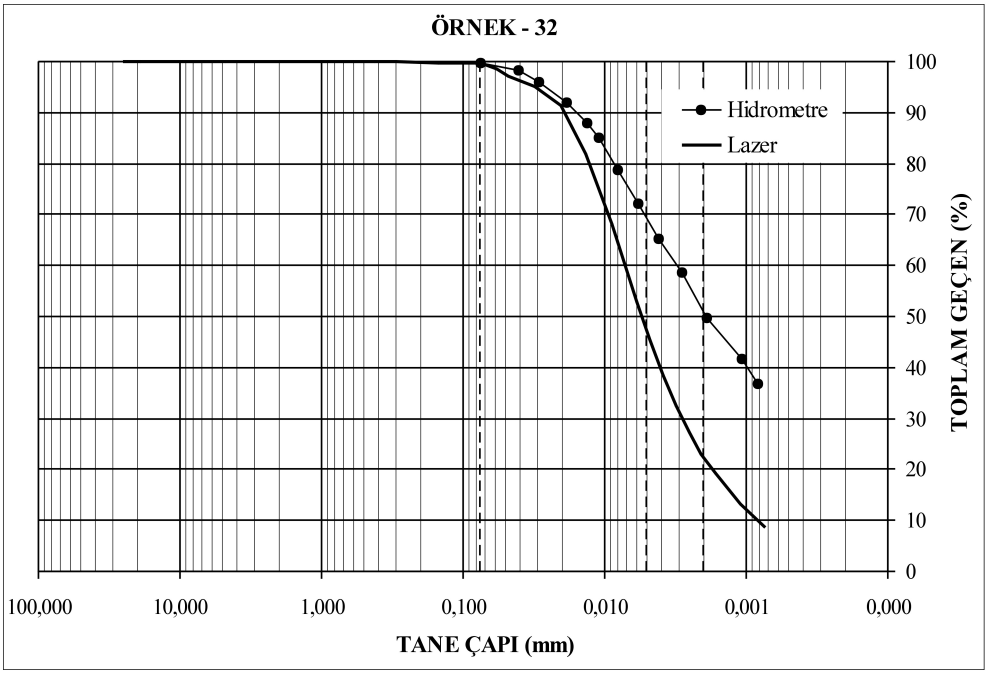


Şekil EK-2.20. Örnek-30 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-3. Hidrometre yönteminin bütün tane çaplarını daha yüksek belirlediği örnekler

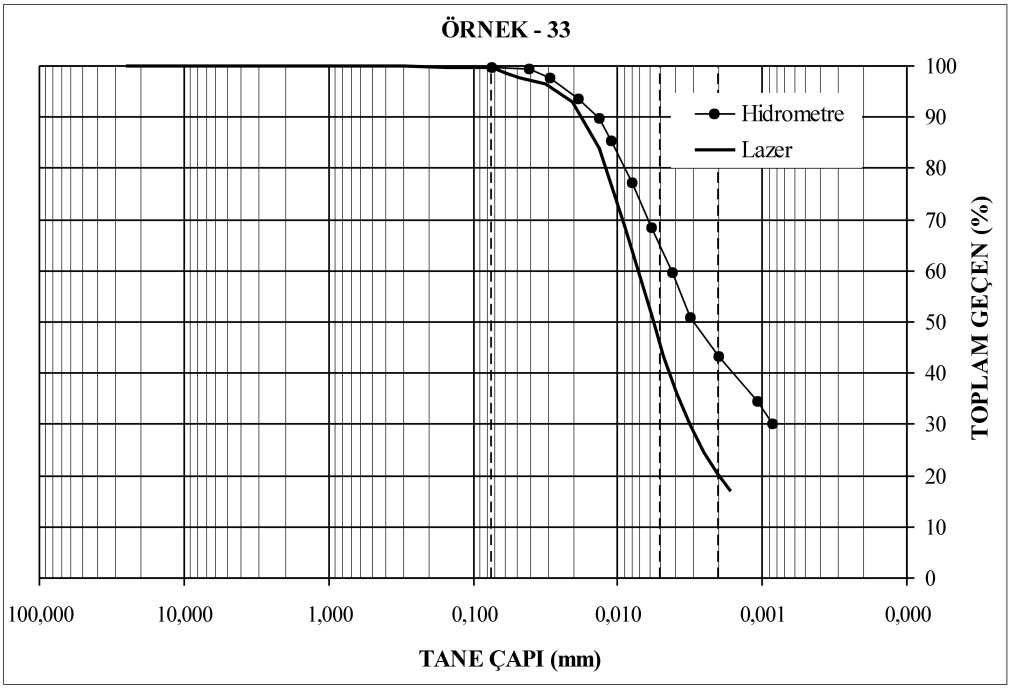


Şekil EK-3.1. Örnek-31 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

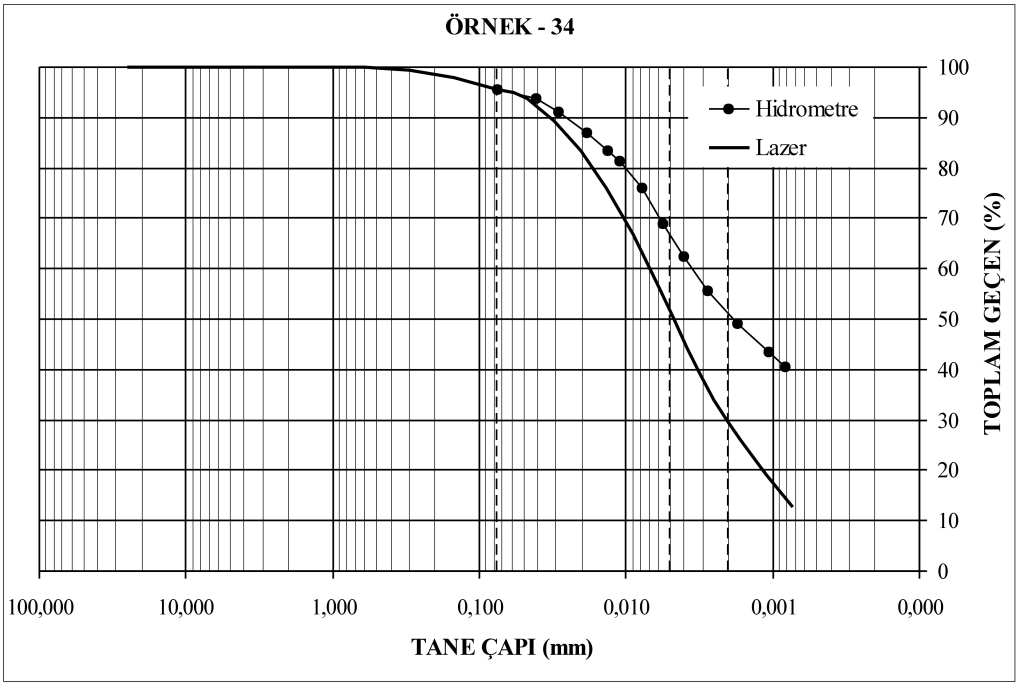


Şekil EK-3.2. Örnek-32 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-3. Hidrometre yönteminin bütün tane çaplarını daha yüksek belirlediği örnekler

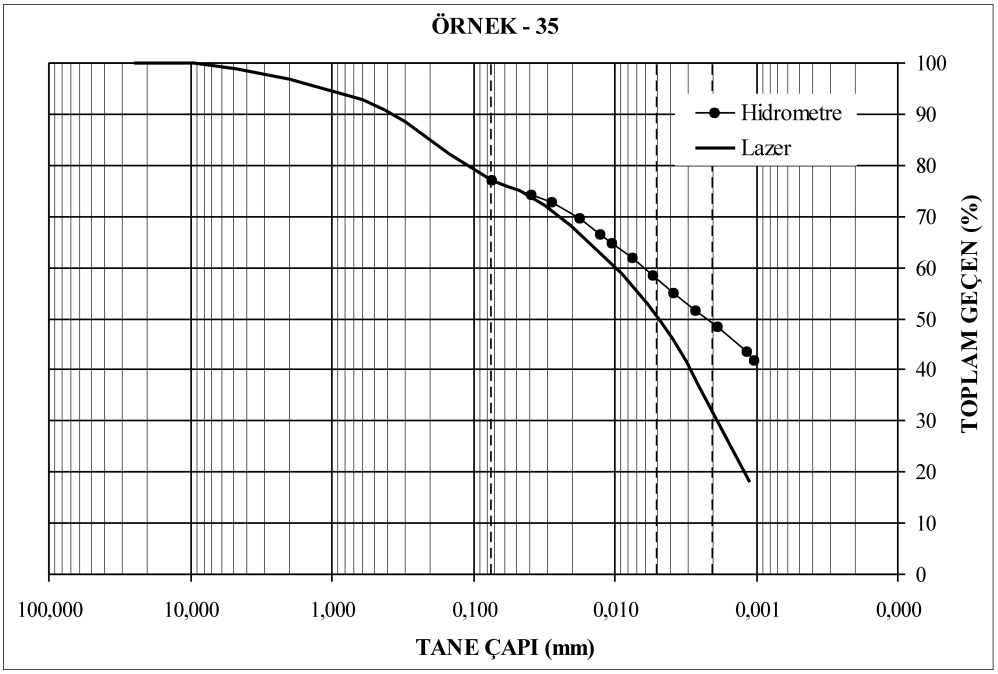


Şekil EK-3.3. Örnek-33 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

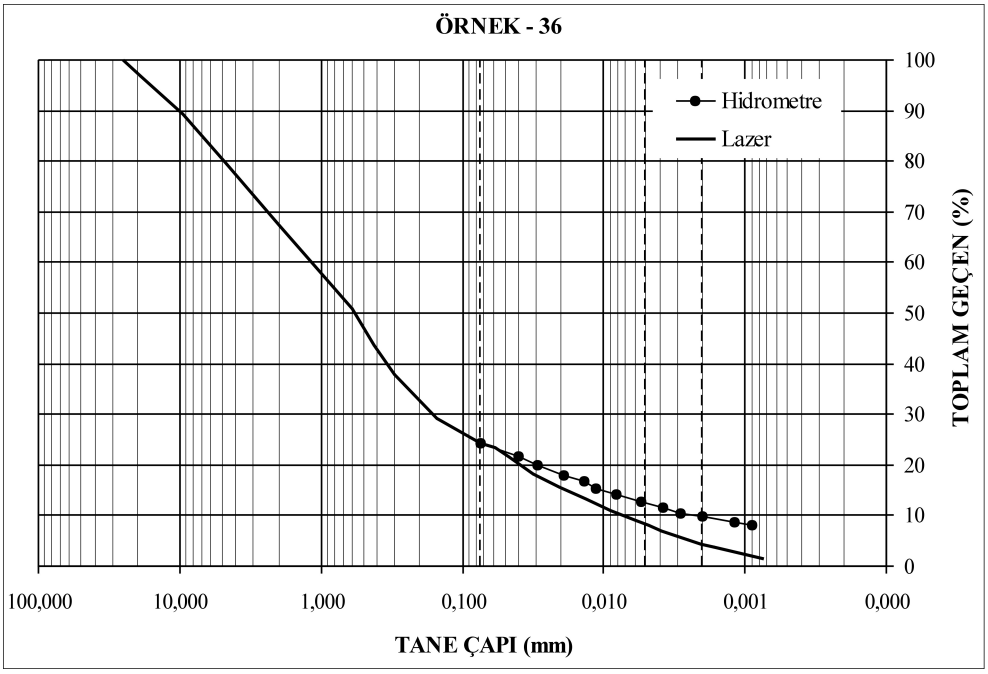


Şekil EK-3.4. Örnek-34 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-3. Hidrometre yönteminin bütün tane çaplarını daha yüksek belirlediği örnekler

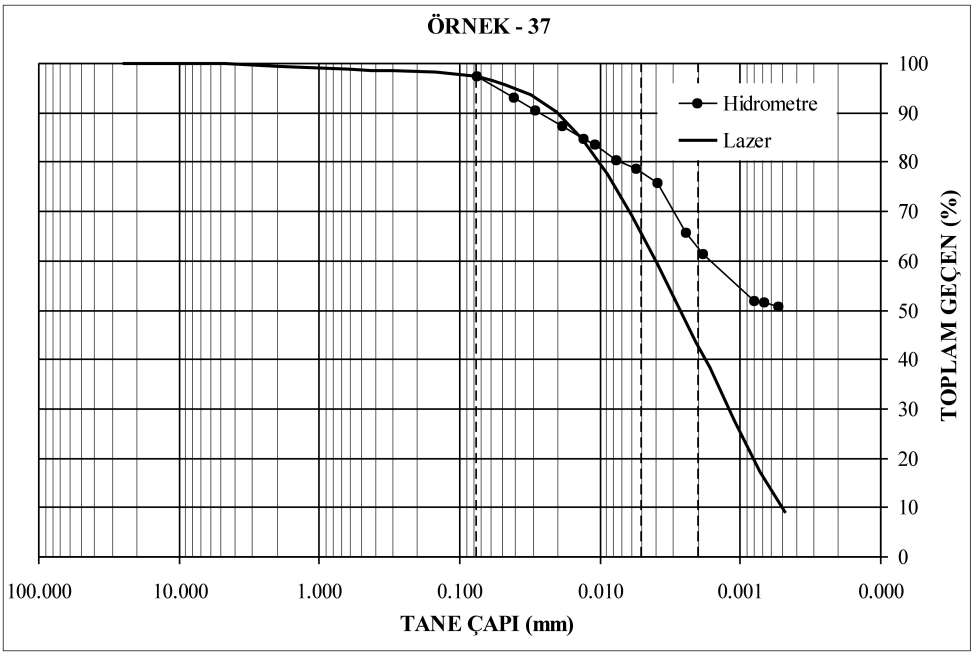


Şekil EK-3.5. Örnek-35 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

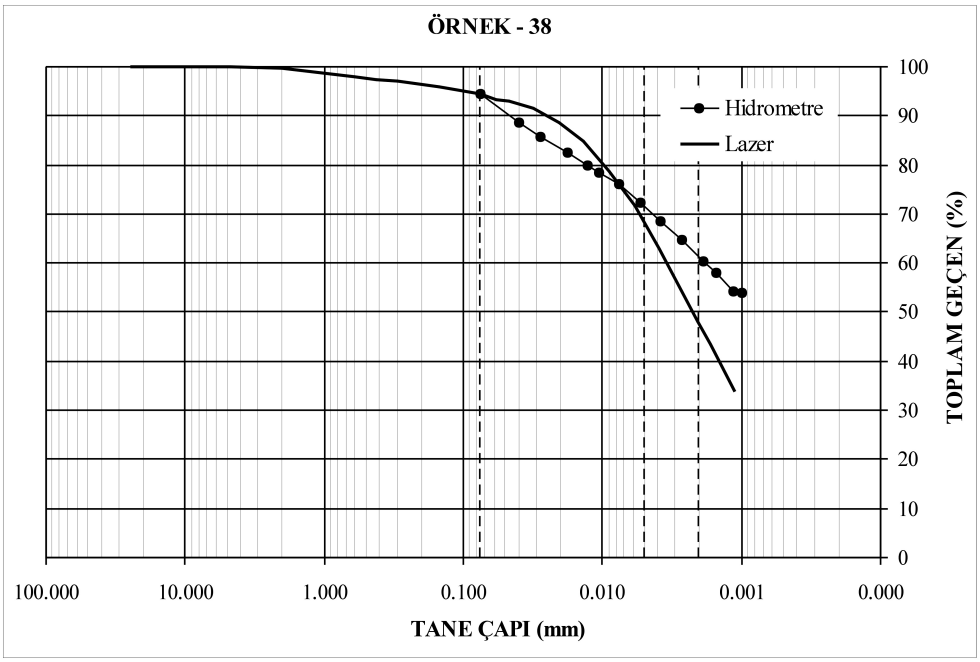


Şekil EK-3.6. Örnek-36 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

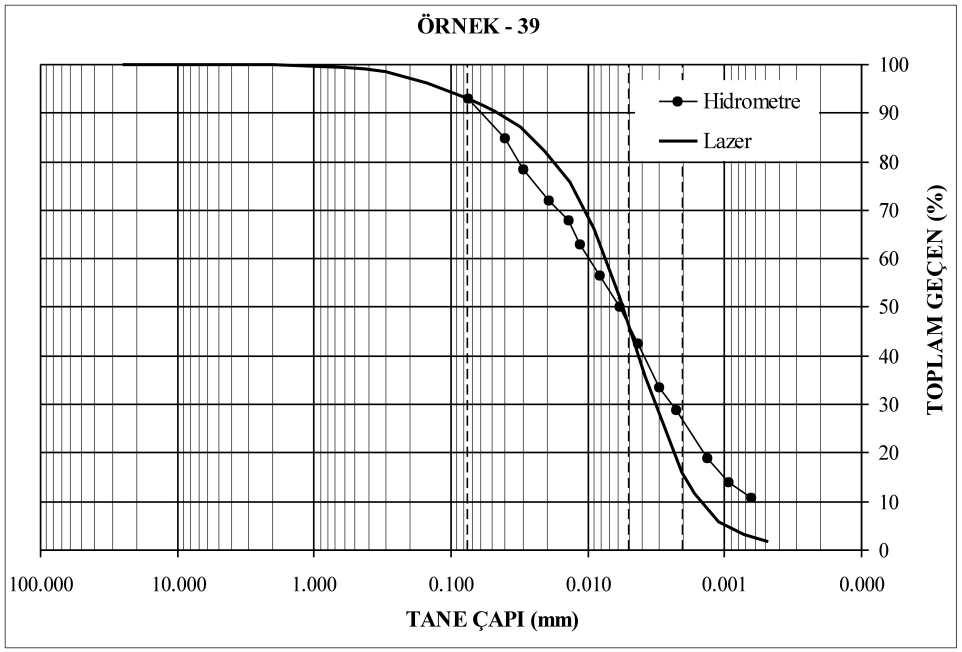


Şekil EK-4.1. Örnek-37 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

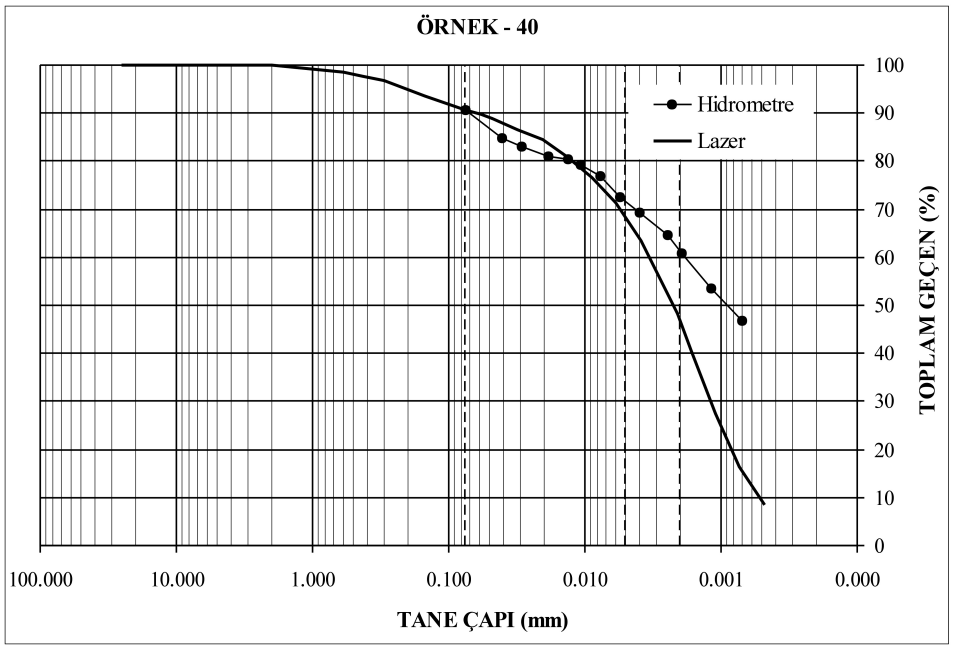


Şekil EK-4.2. Örnek-38 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

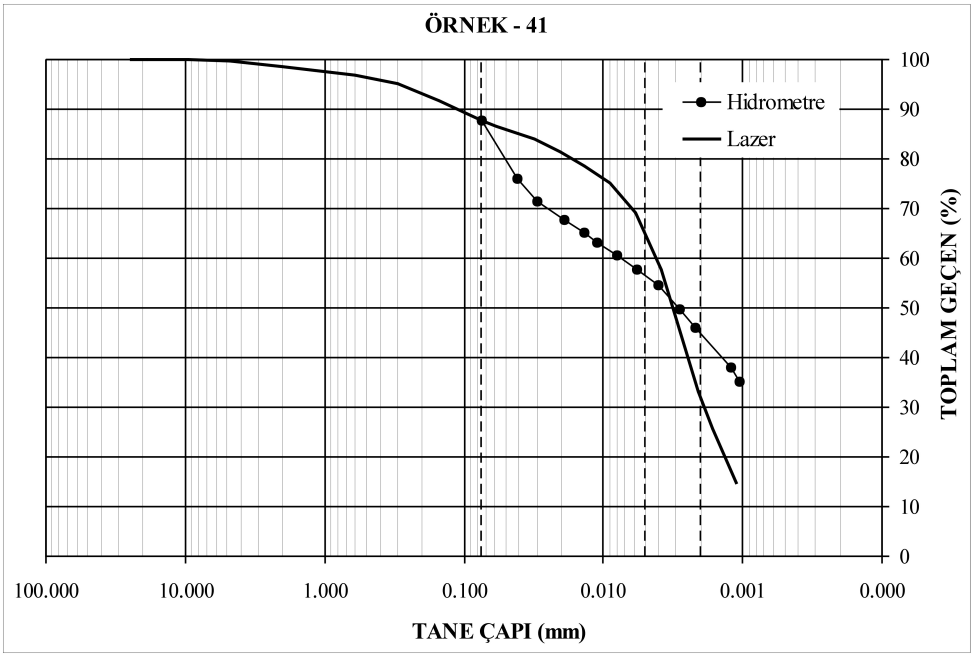


Şekil EK-4.3. Örnek-39 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

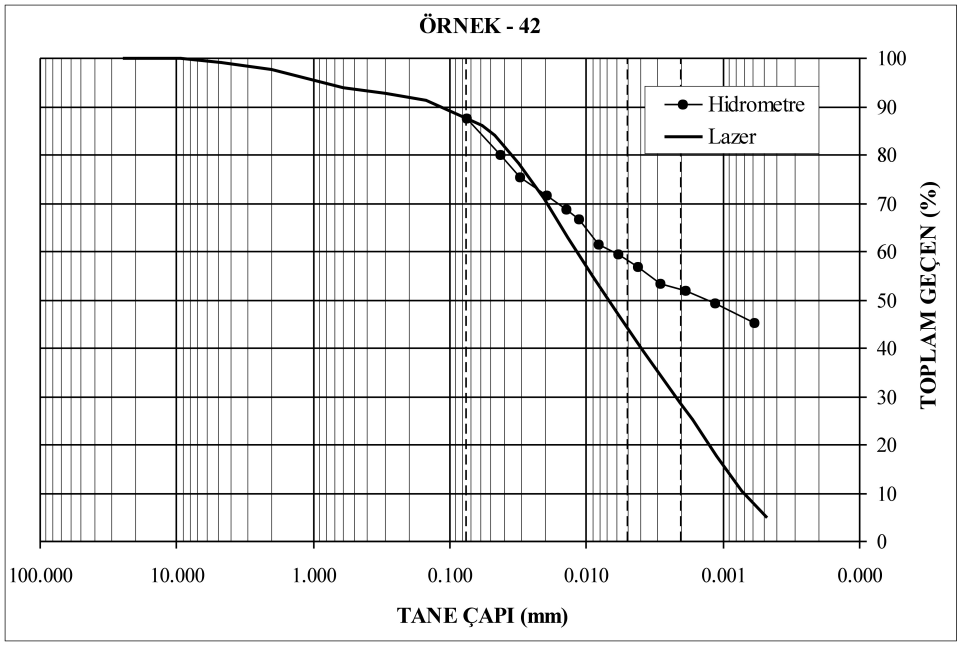


Şekil EK-4.4. Örnek-40 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

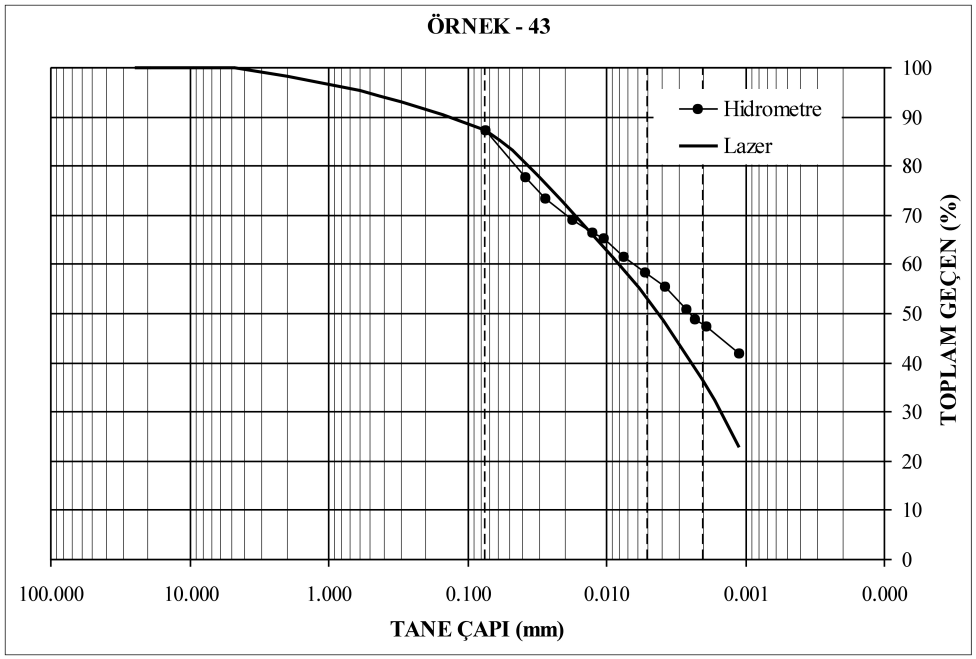


Şekil EK-4.5. Örnek-41 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

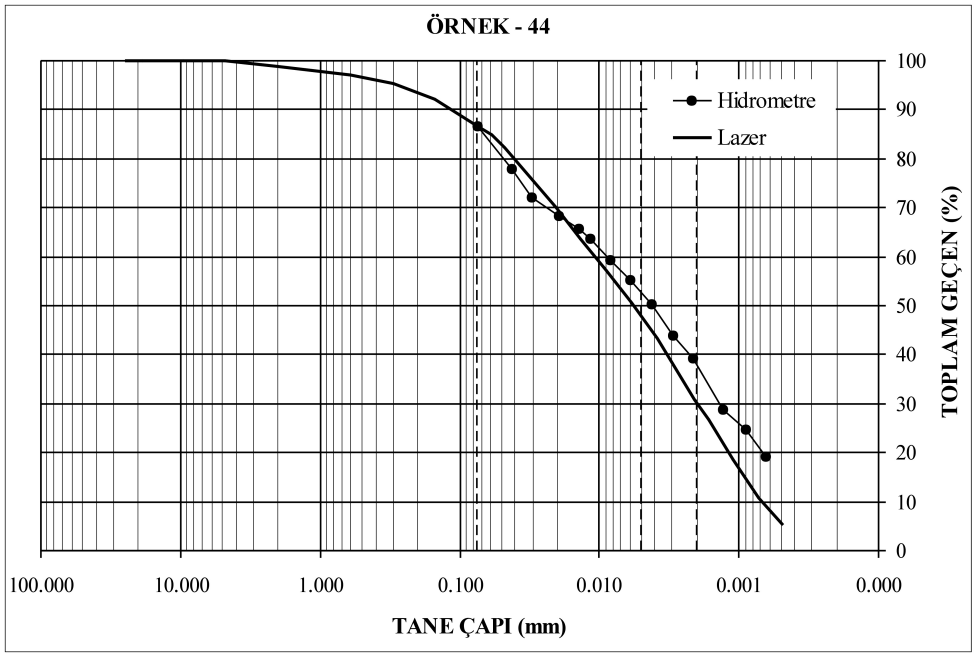


Şekil EK-4.6. Örnek-42 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

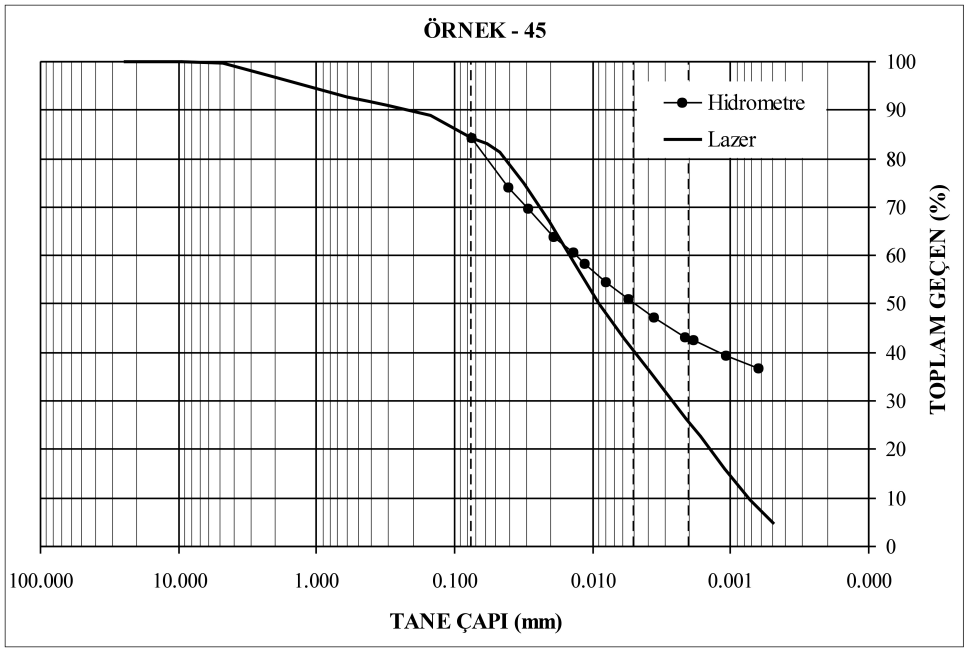


Şekil EK-4.7. Örnek-43 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

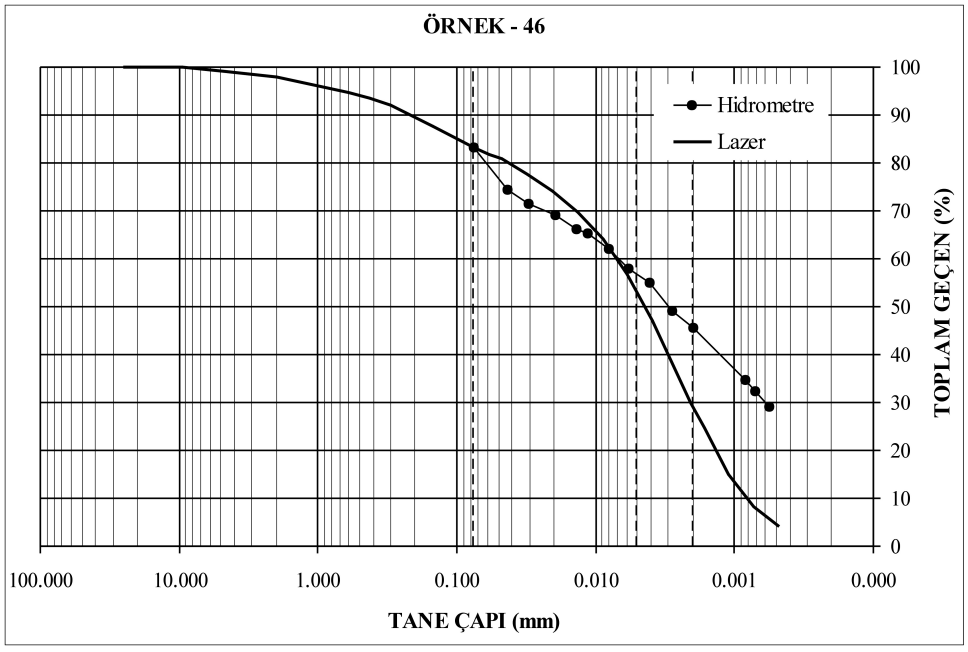


Şekil EK-4.8. Örnek-44 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

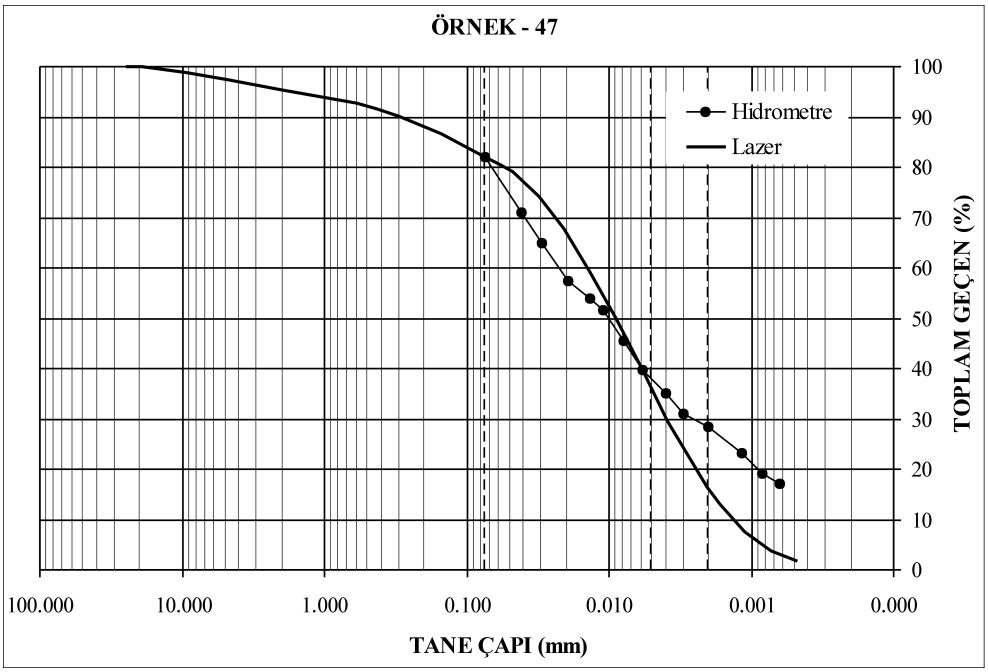


Şekil EK-4.9. Örnek-45 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

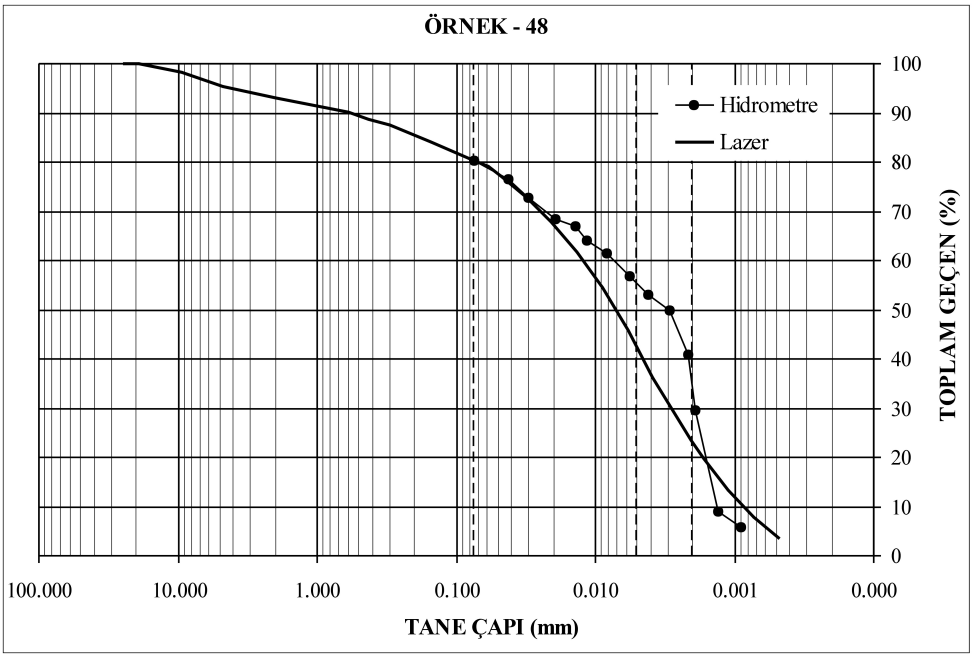


Şekil EK-4.10. Örnek-46 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

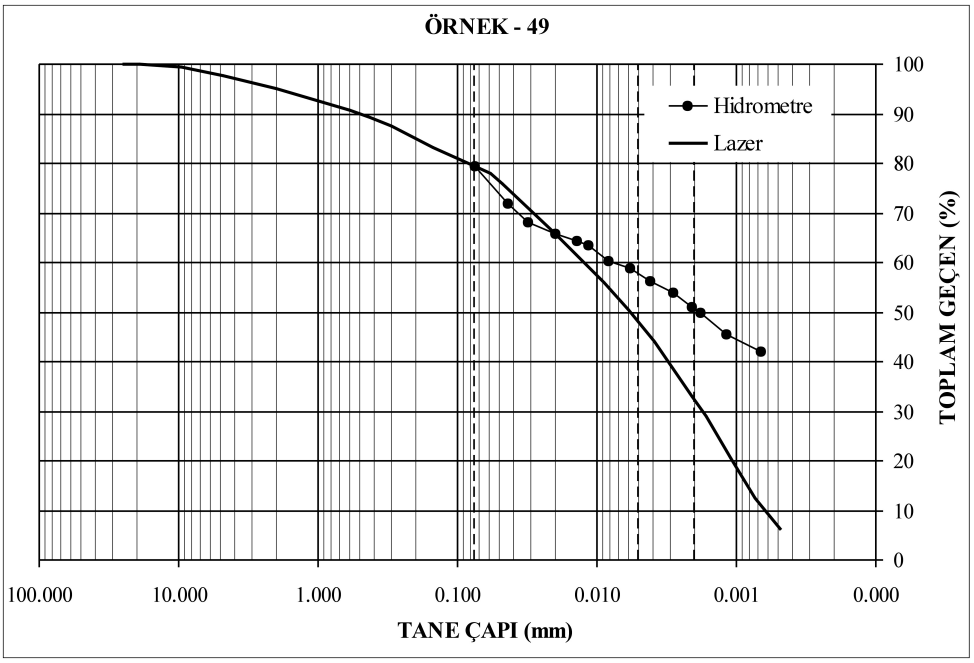


Şekil EK-4.11. Örnek-47 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

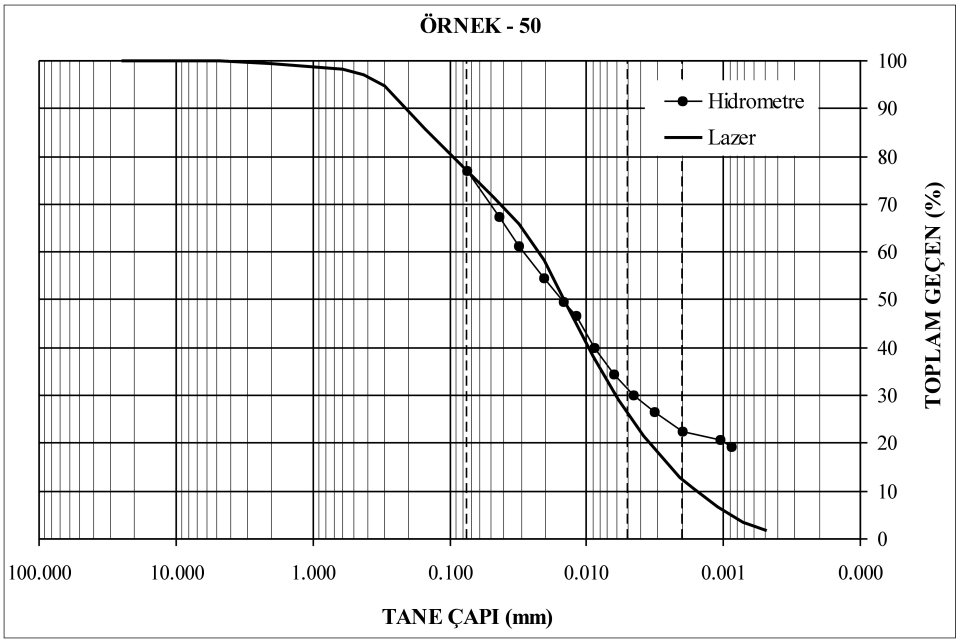


Şekil EK-4.12. Örnek-48 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

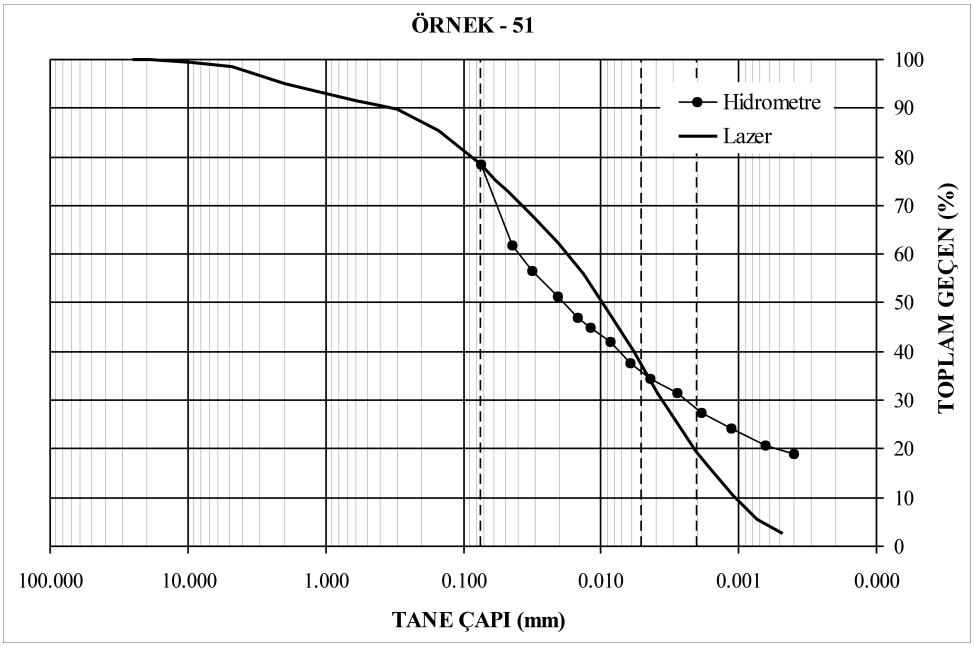


Şekil EK-4.13. Örnek-49 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

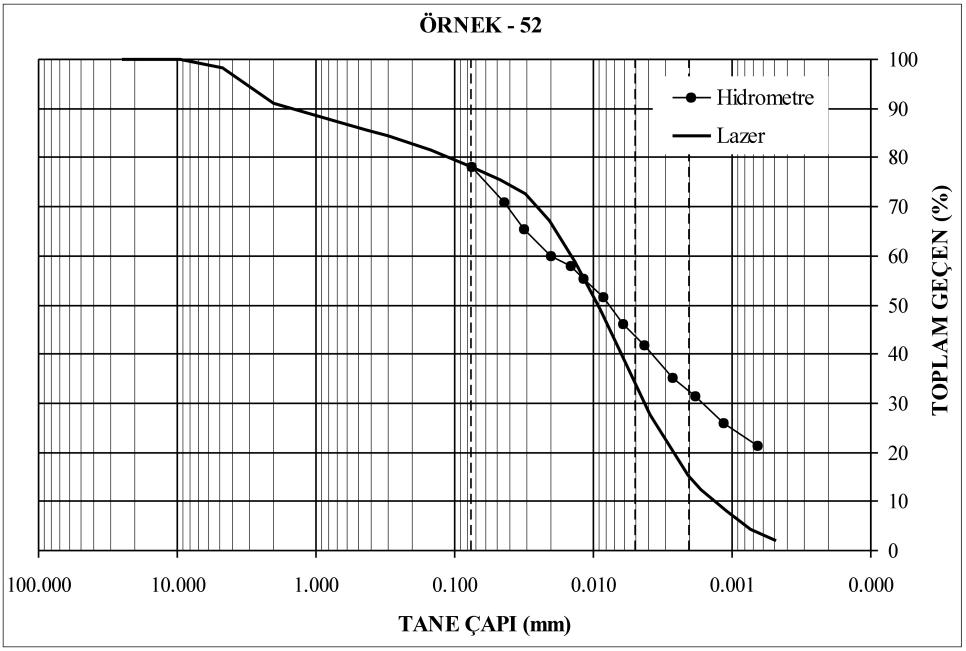


Şekil EK-4.14. Örnek-50 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

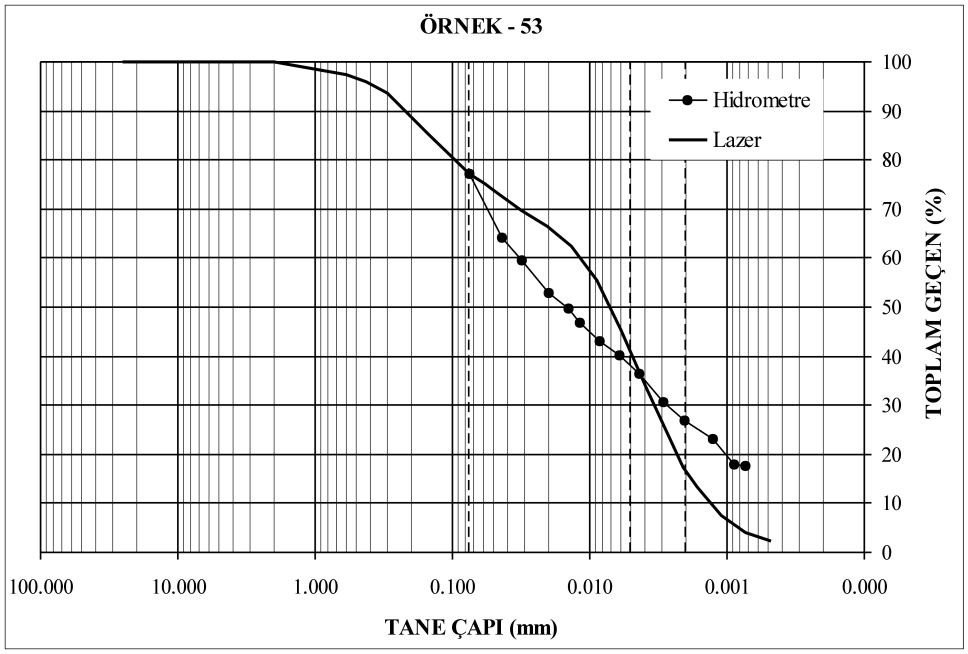


Şekil EK-4.15. Örnek-51 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

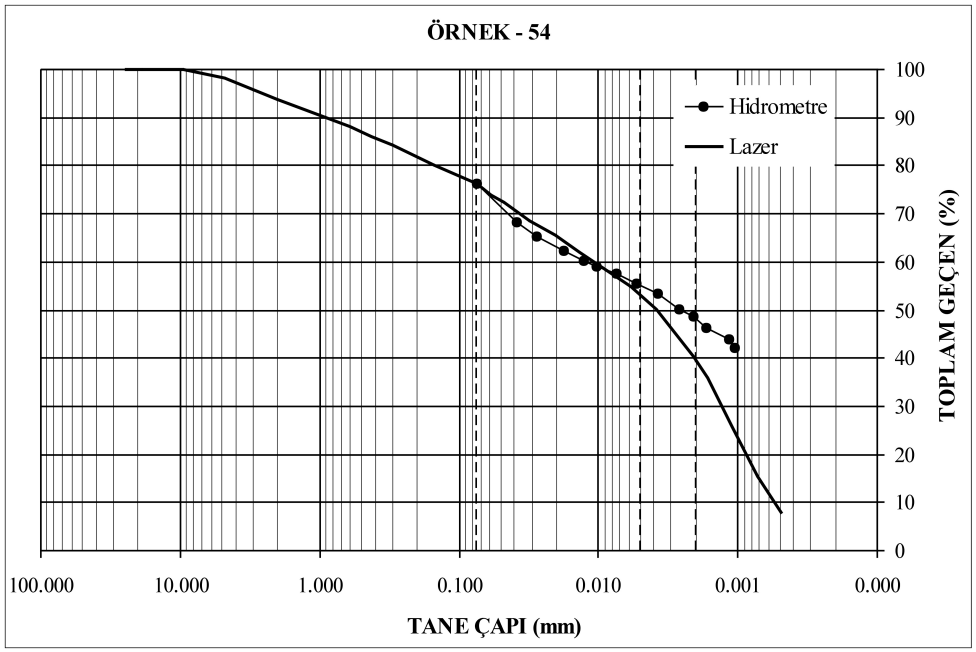


Şekil EK-4.16. Örnek-52 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

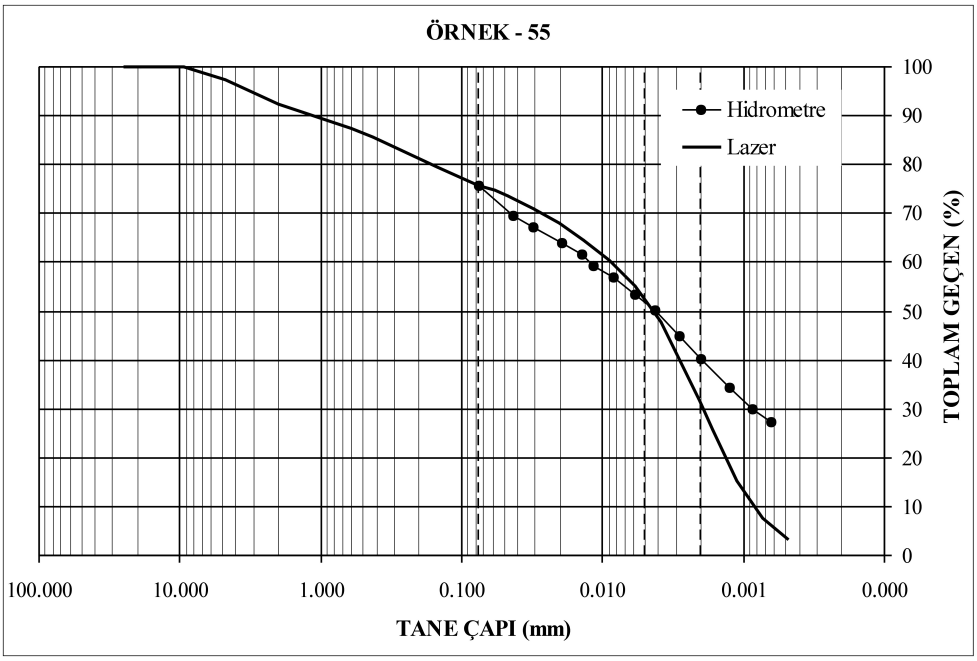


Şekil EK-4.17. Örnek-53 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

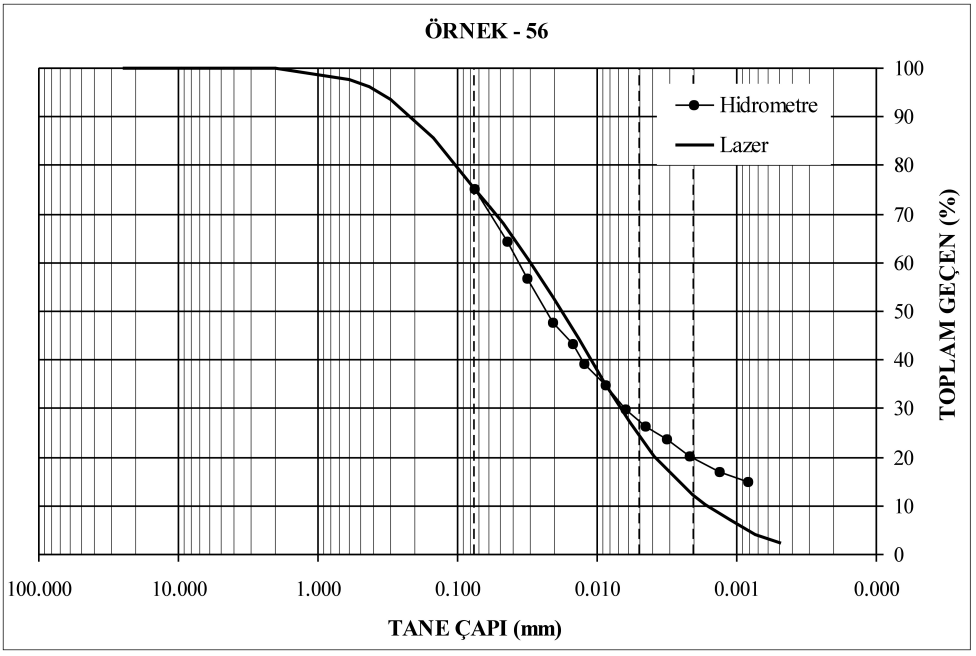


Şekil EK-4.18. Örnek-54 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

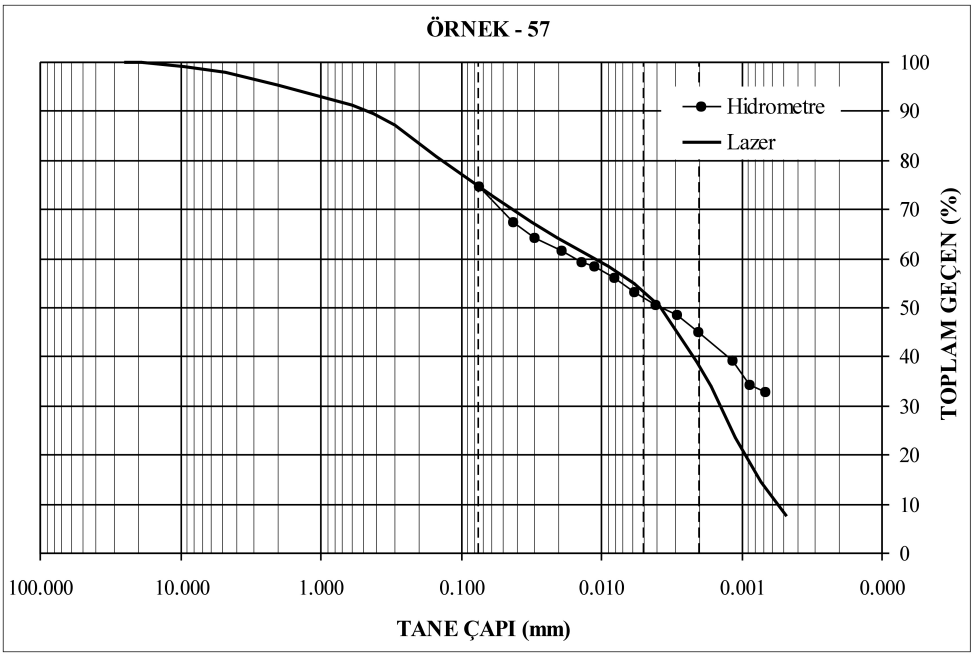


Şekil EK-4.19. Örnek-55 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

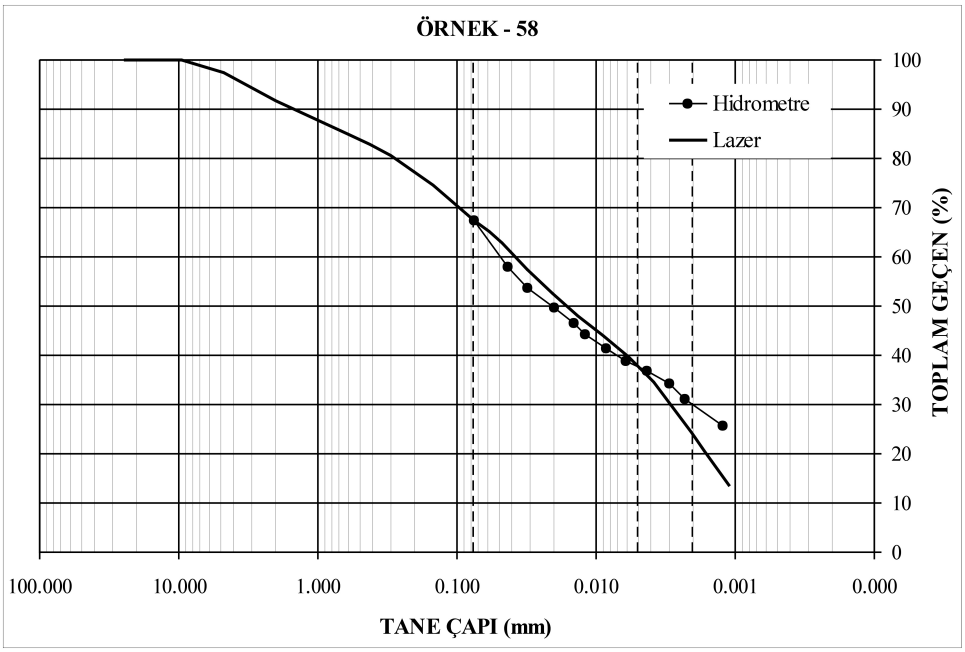


Şekil EK-4.20. Örnek-56 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

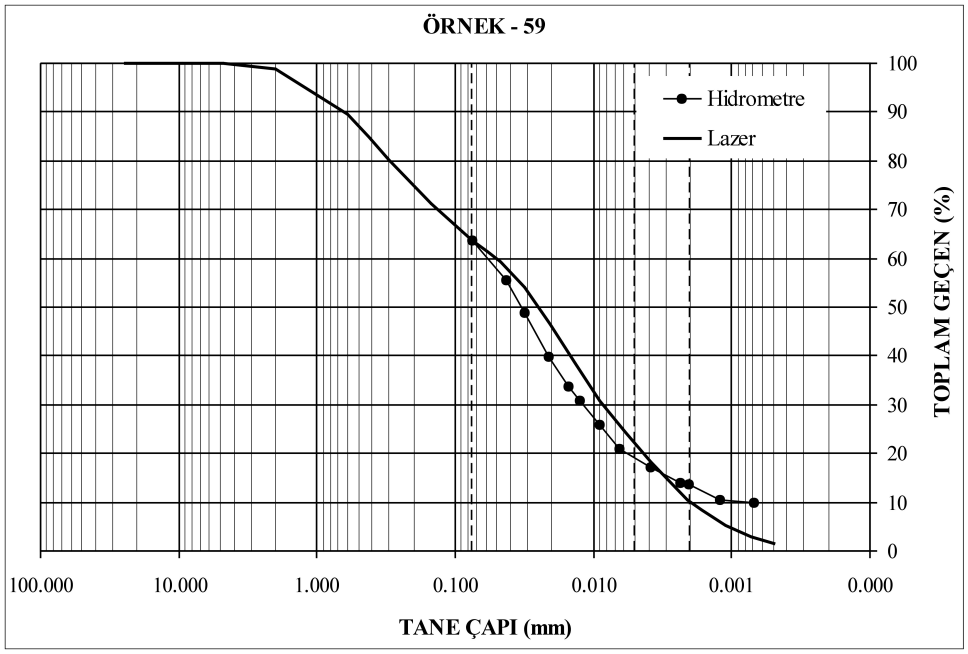


Şekil EK-4.21. Örnek-57 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

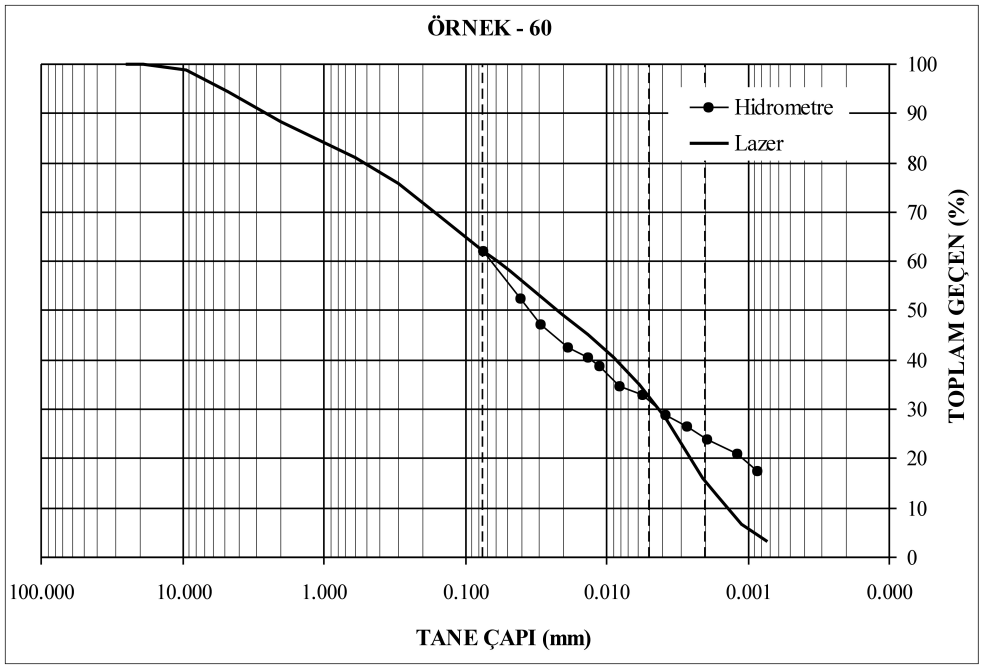


Şekil EK-4.22. Örnek-58 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

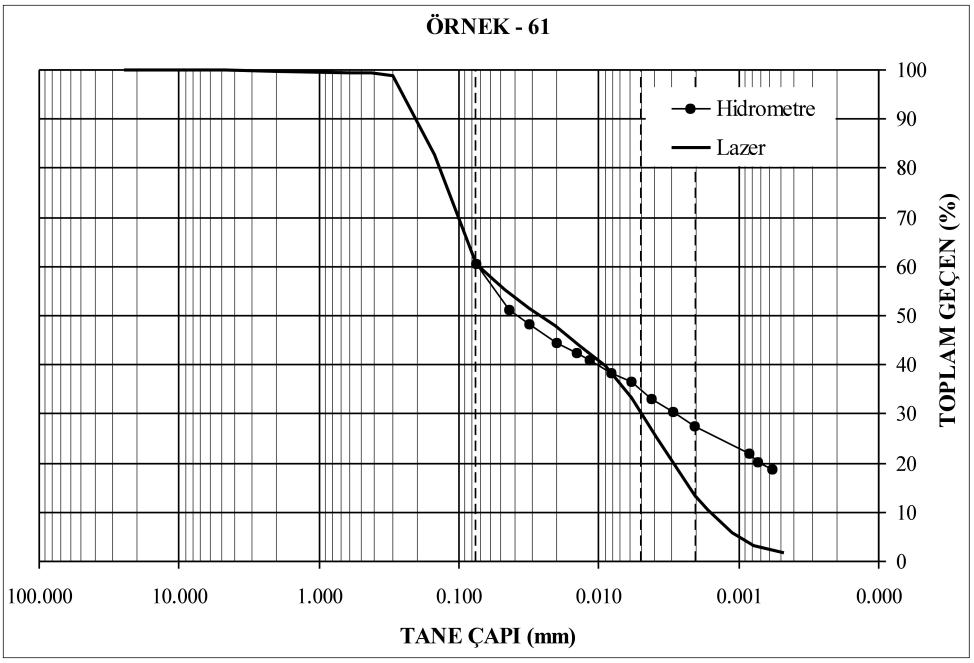


Şekil EK-4.23. Örnek-59 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

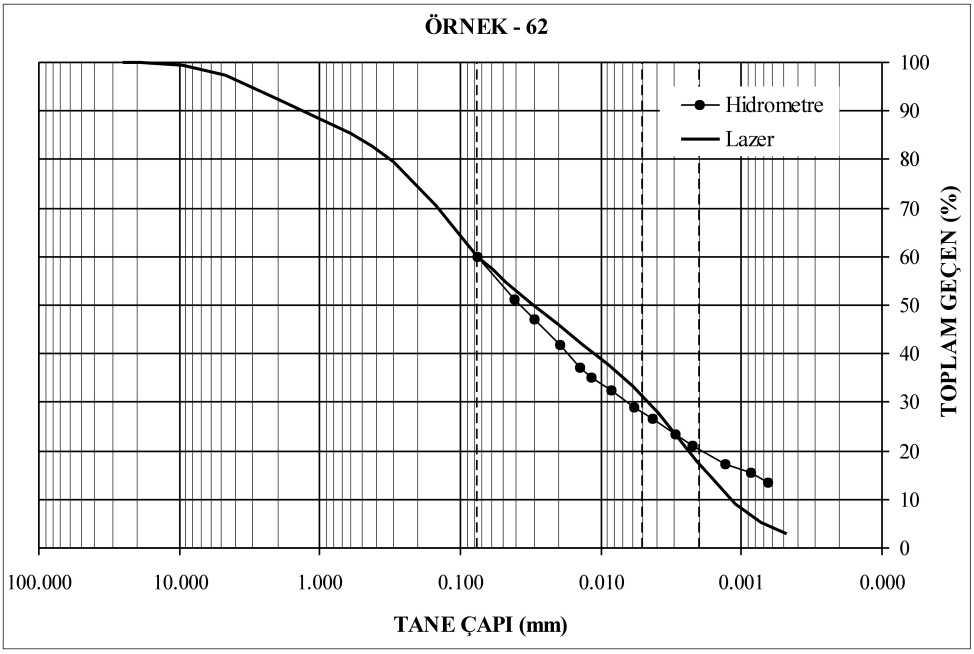


Şekil EK-4.24. Örnek-60 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

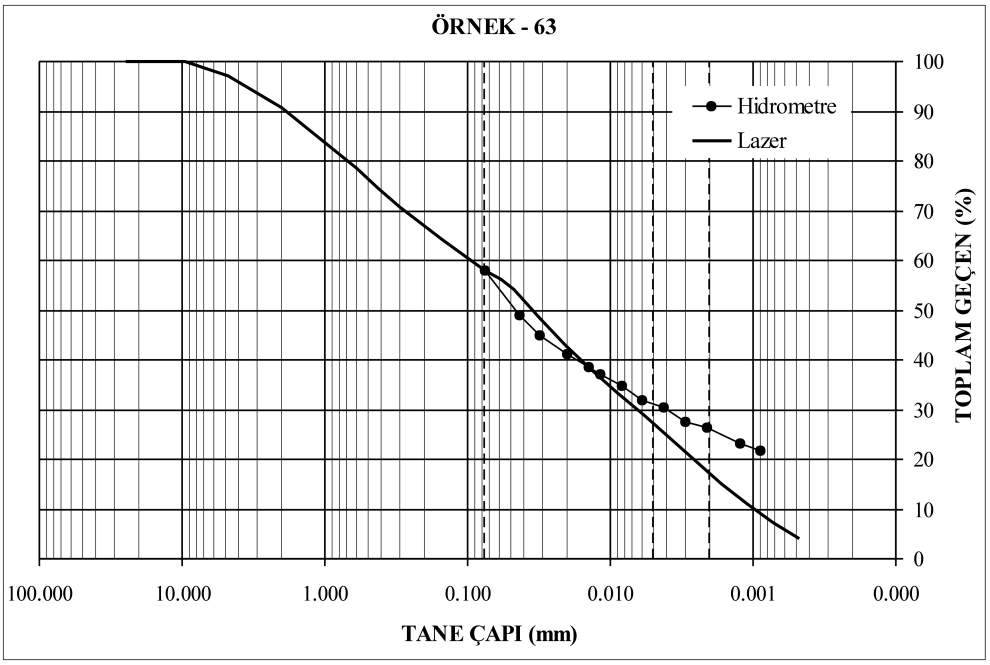


Şekil EK-4.25. Örnek-61 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

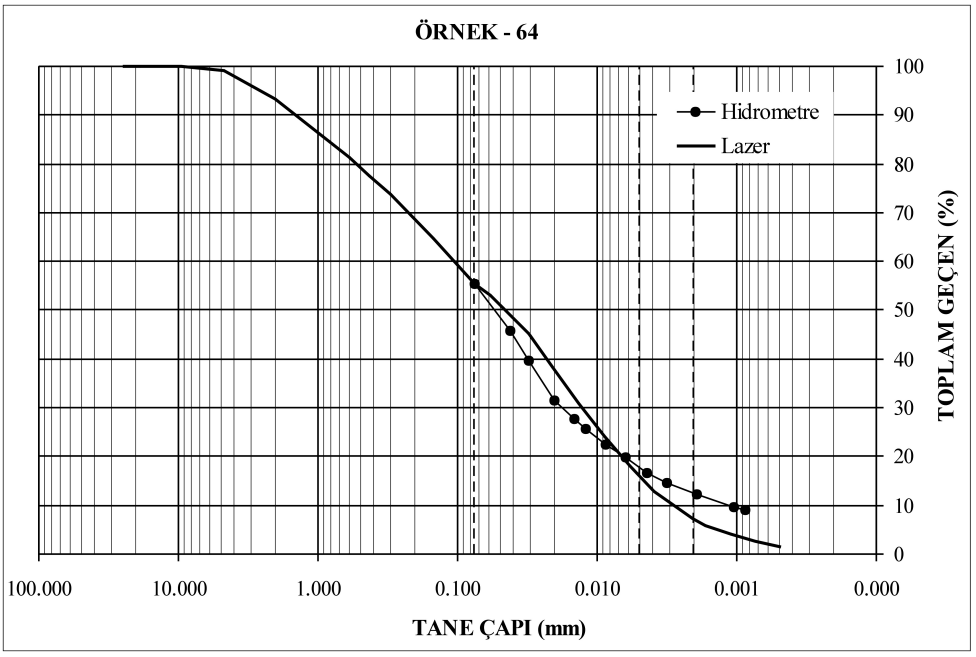


Şekil EK-4.26. Örnek-62 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

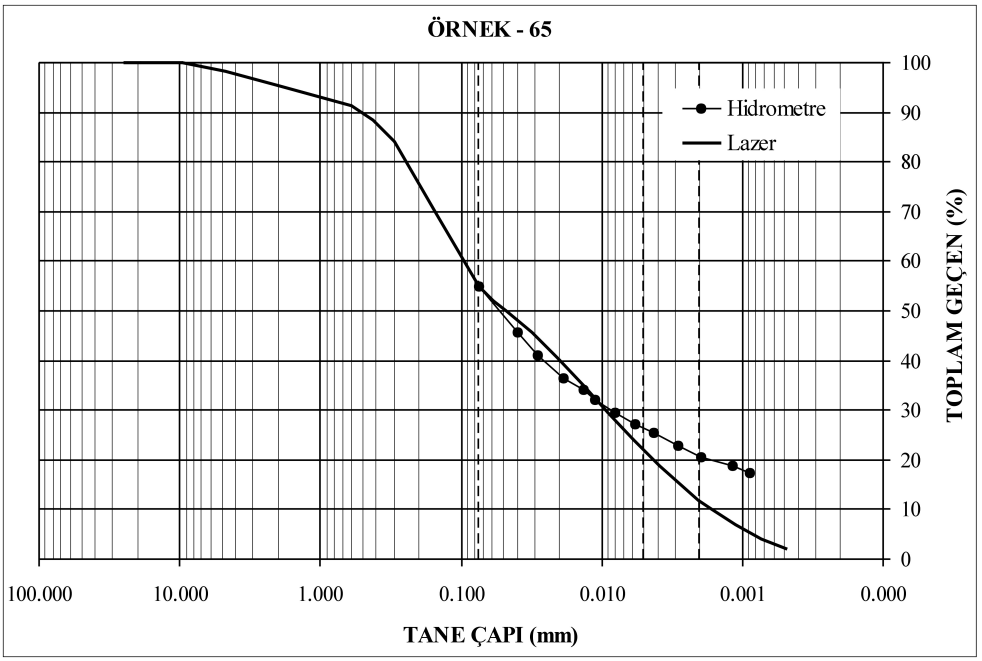


Şekil EK-4.27. Örnek-63 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

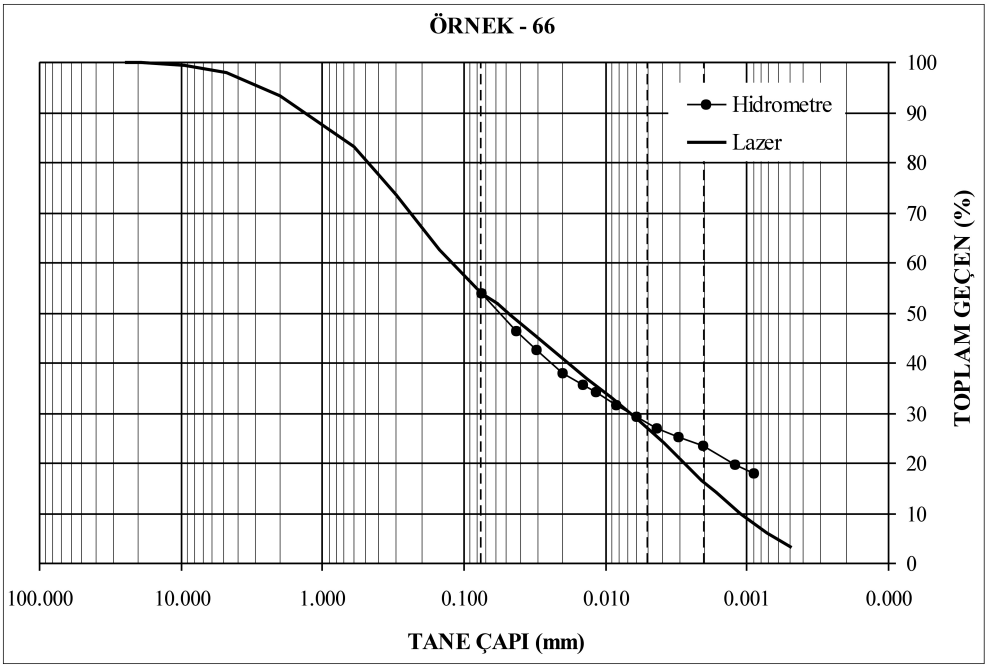


Şekil EK-4.28. Örnek-64 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

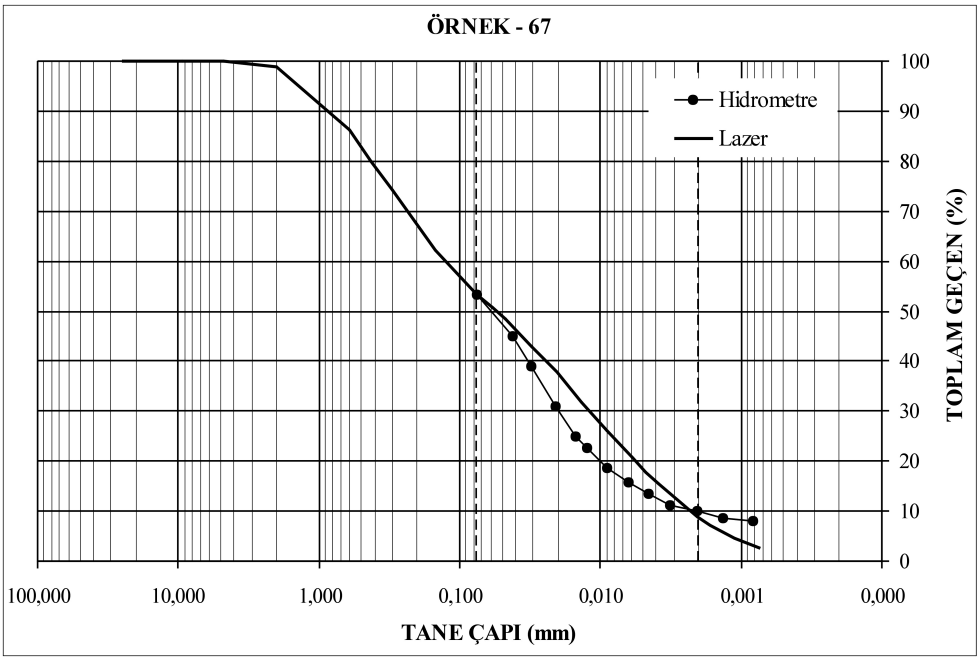


Şekil EK-4.29. Örnek-65 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

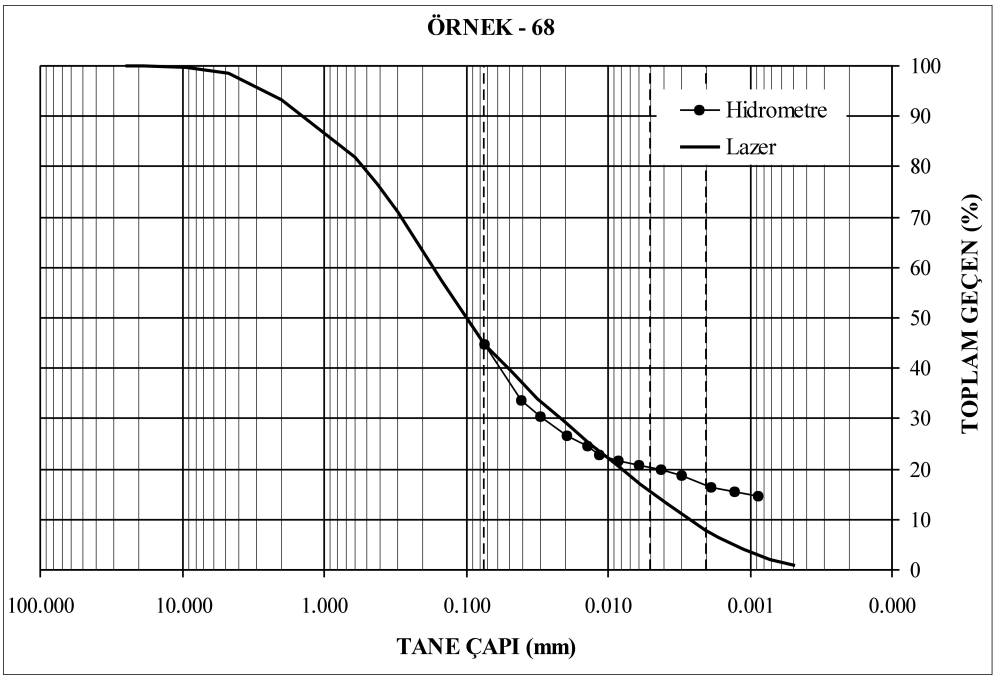


Şekil EK-4.30. Örnek-66 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

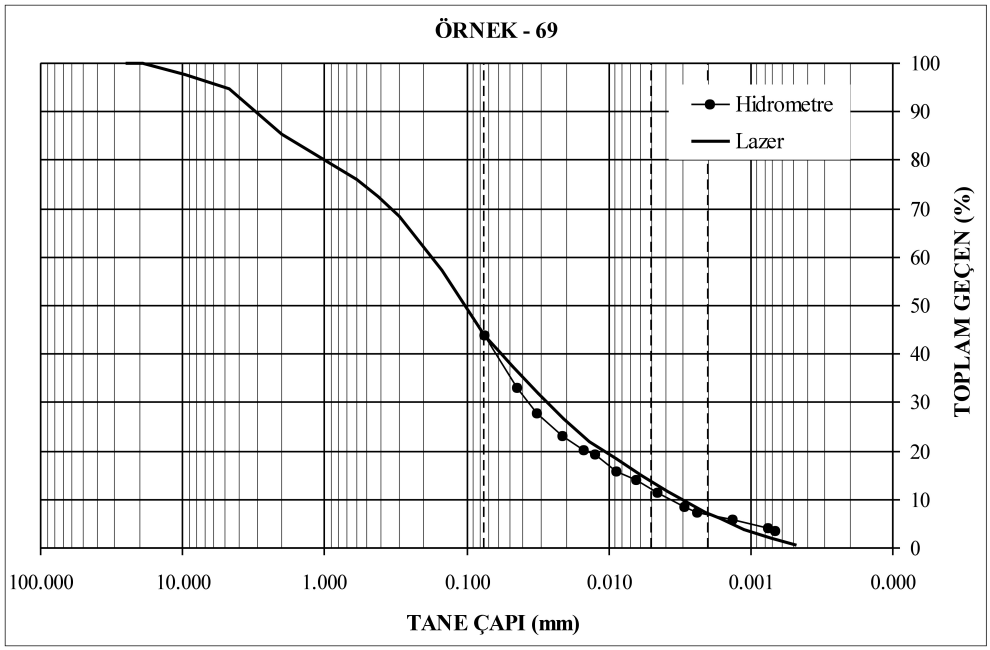


Şekil EK-4.31. Örnek-67 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

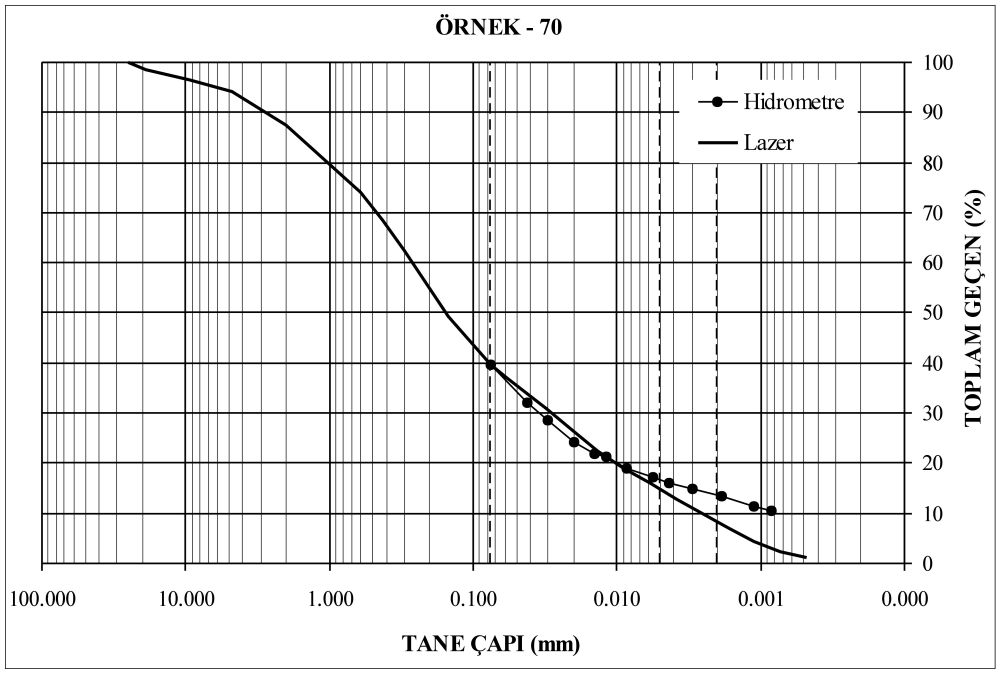


Şekil EK-4.32. Örnek-68 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

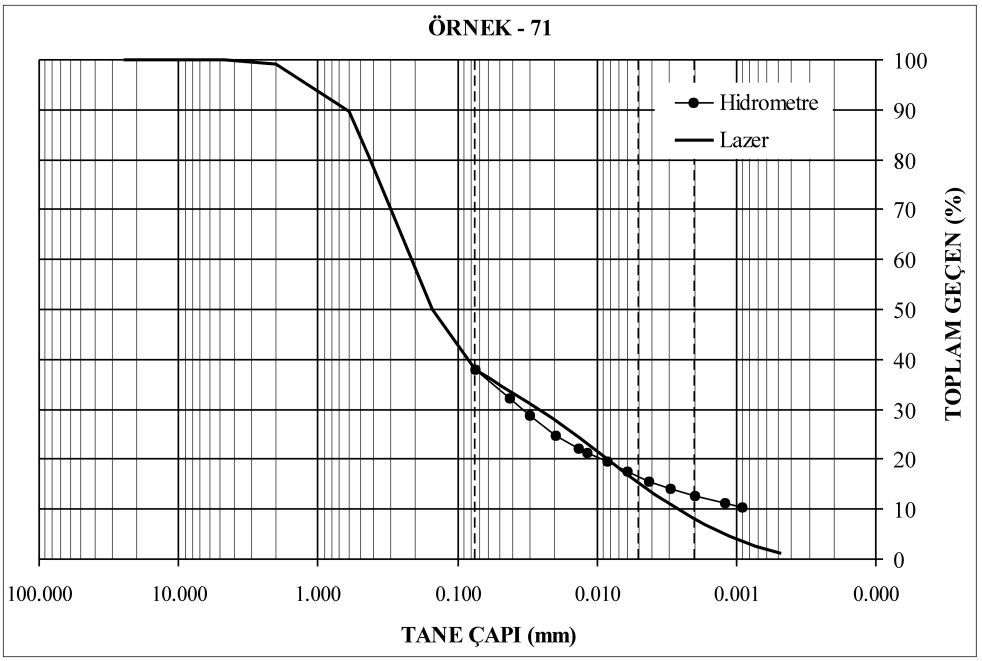


Şekil EK-4.33. Örnek-69 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

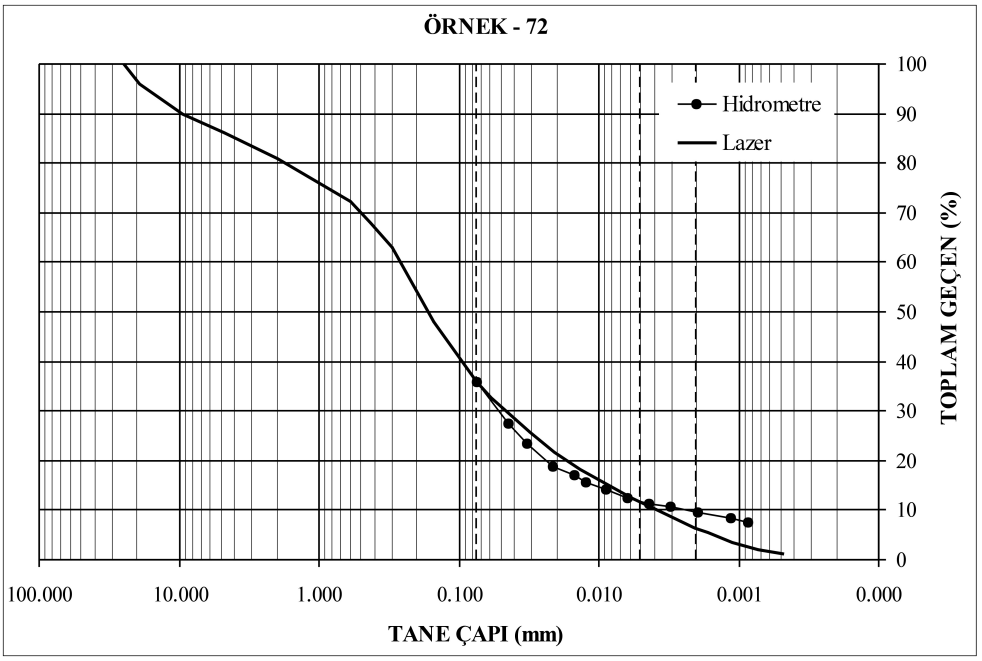


Şekil EK-4.34. Örnek-70 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-4. Her iki yöntemle belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin değişik tane çaplarında kesiştiği örnekler

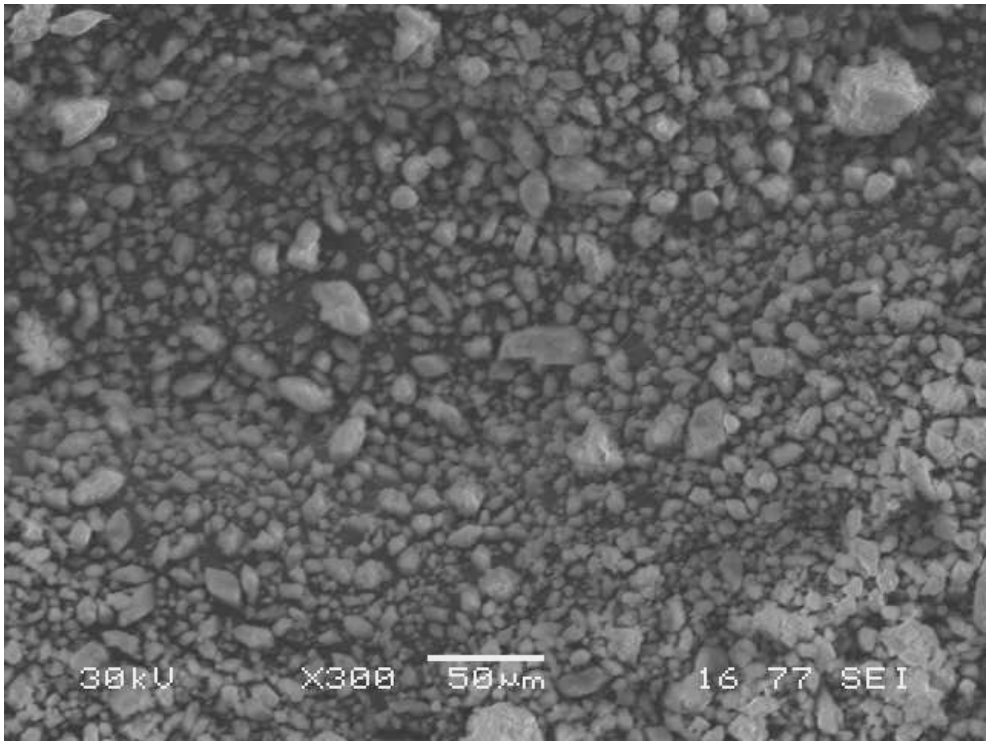


Şekil EK-4.35. Örnek-71 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

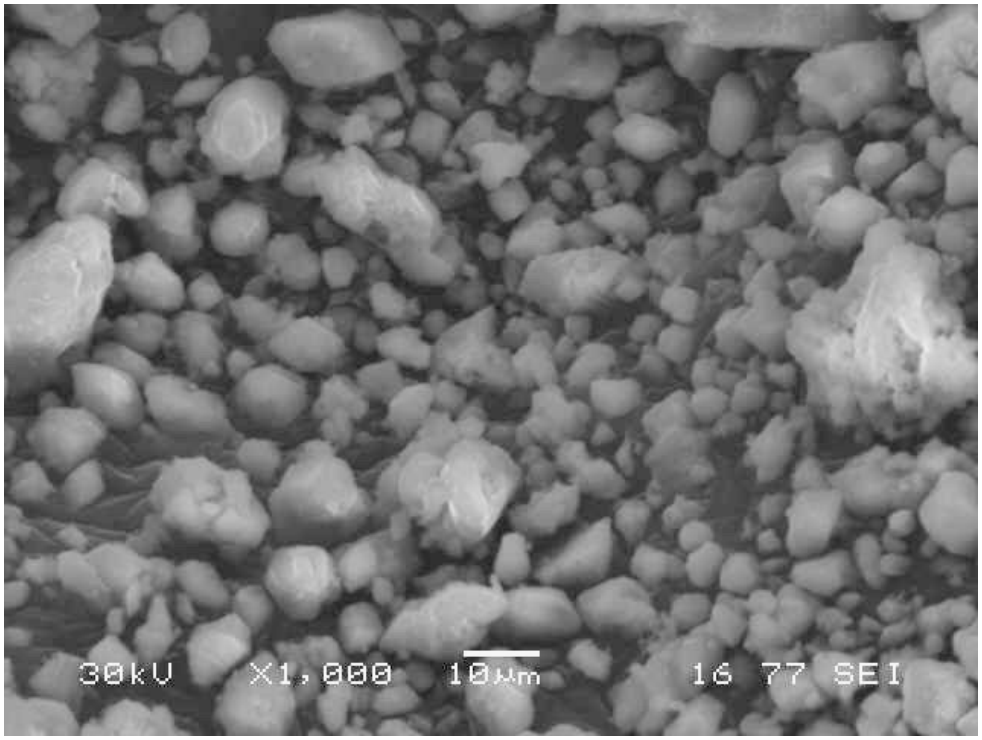


Şekil EK-4.36. Örnek-72 üzerinde lazer kırınım ve hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılması

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

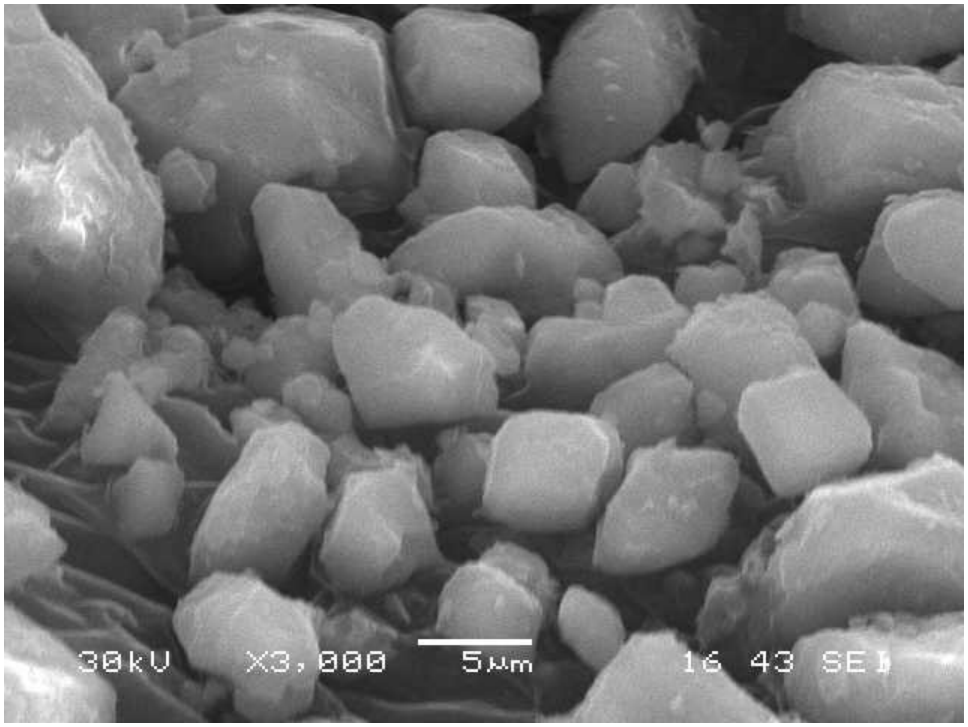


Resim EK-5.1. Örnek-1'e ait bir SEM görünümü (a)

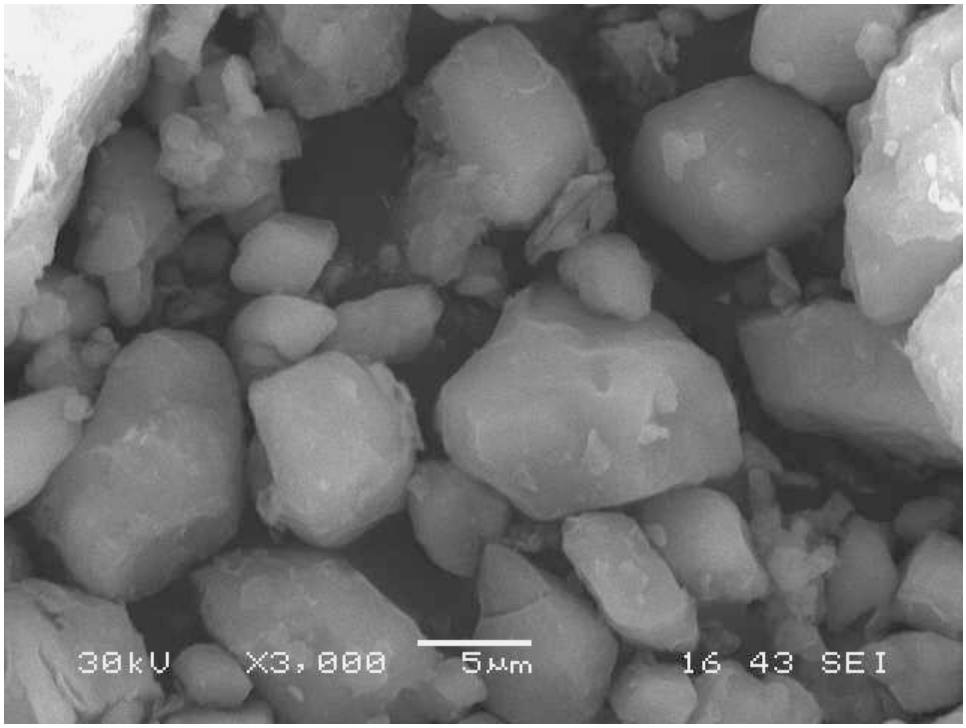


Resim EK-5.2. Örnek-1'e ait bir SEM görünümü (b)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

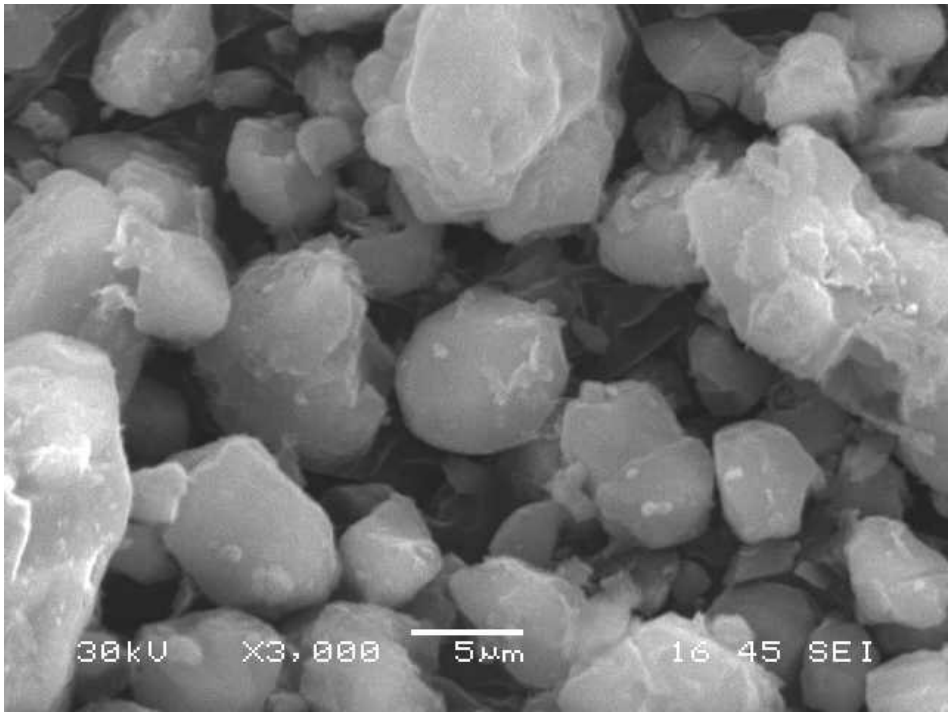


Resim EK-5.3. Örnek-1'e ait bir SEM görünümü (c)

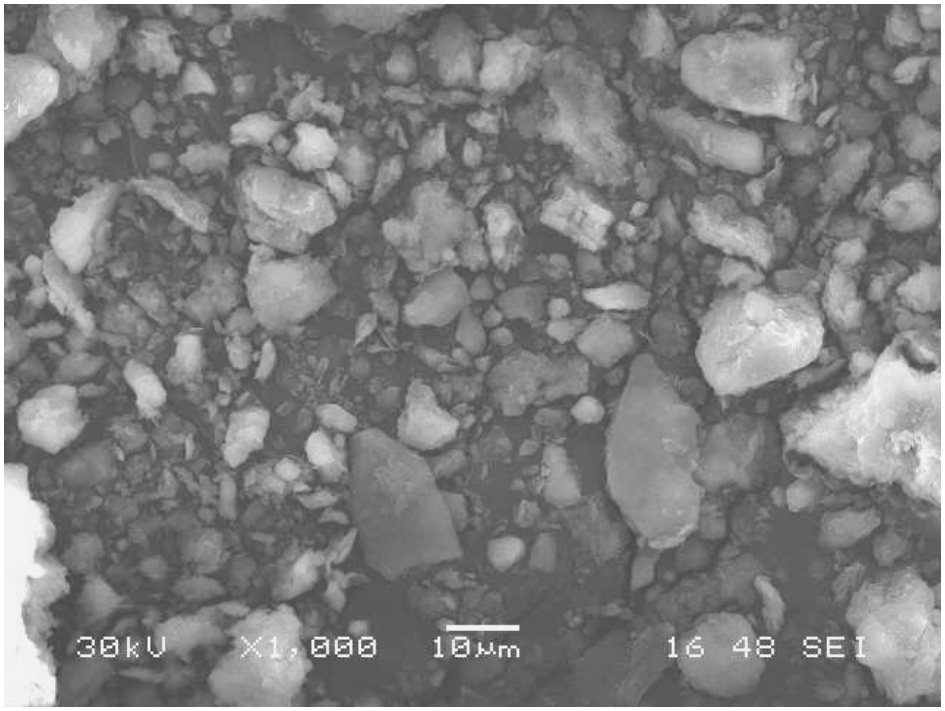


Resim EK-5.4. Örnek-1'e ait bir SEM görünümü (d)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

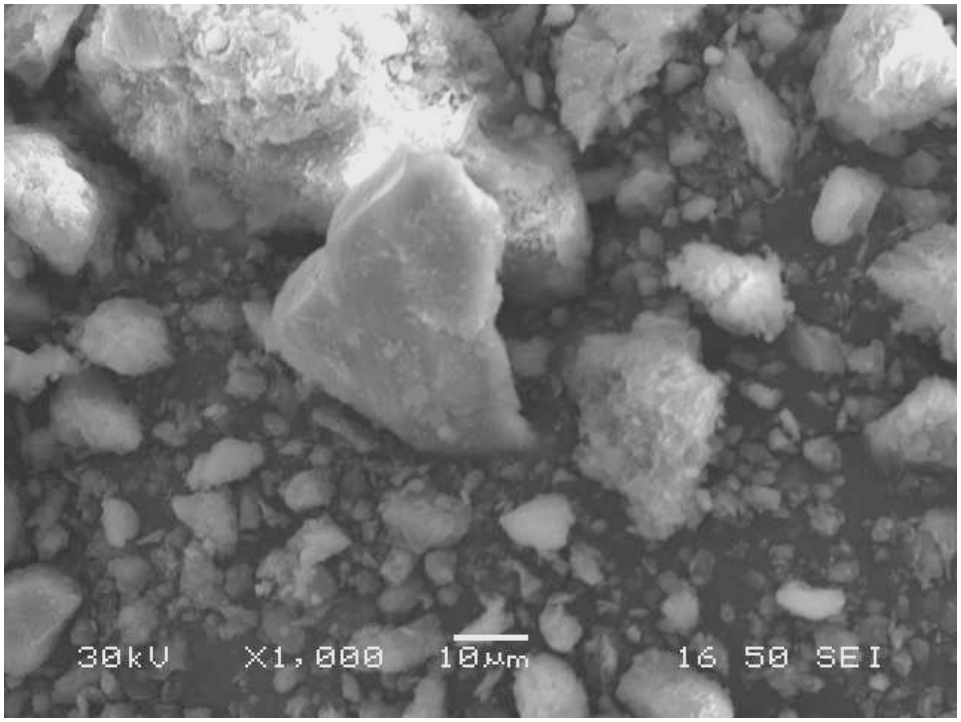


Resim EK-5.5. Örnek-1'e ait bir SEM görünümü (e)

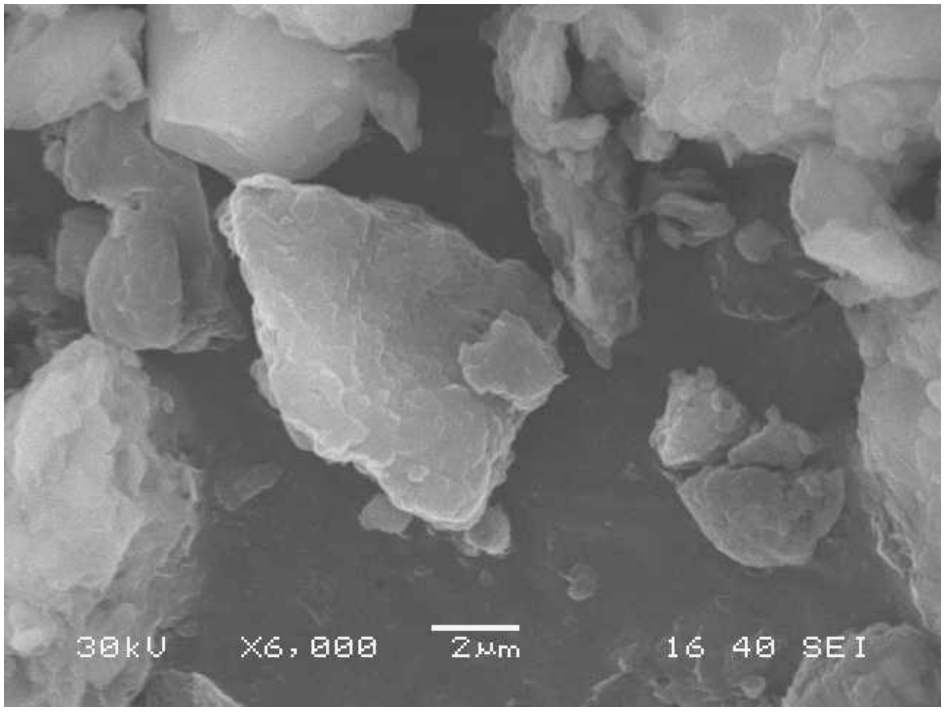


Resim EK-5.6. Örnek-11'e ait bir SEM görünümü (a)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

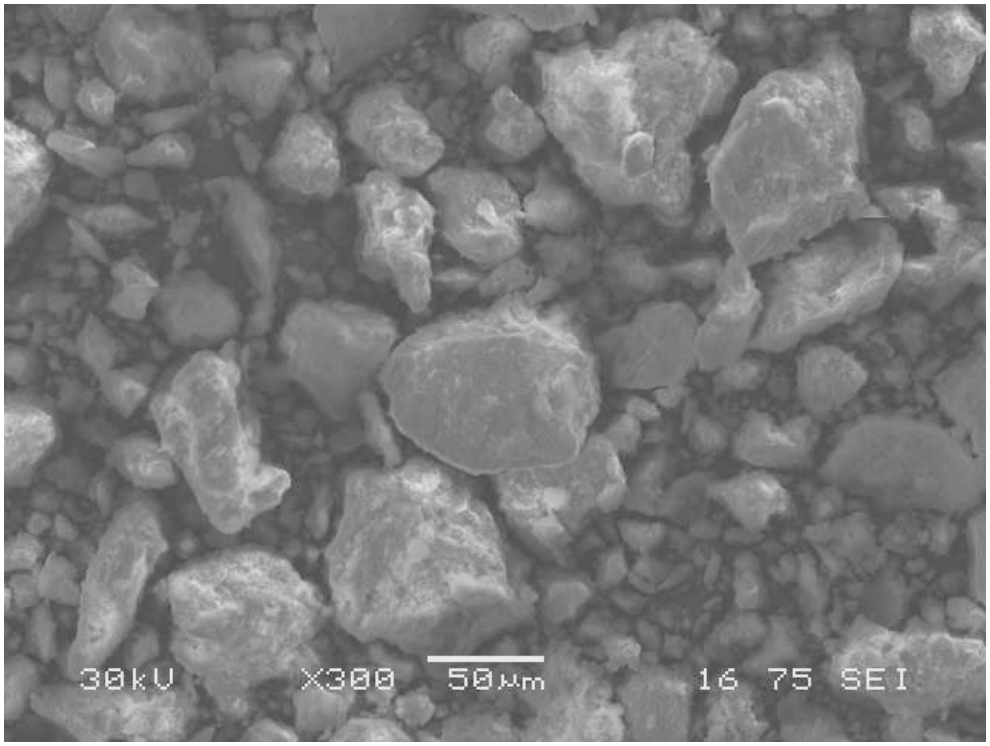


Resim EK-5.7. Örnek-11'e ait bir SEM görünümü (b)

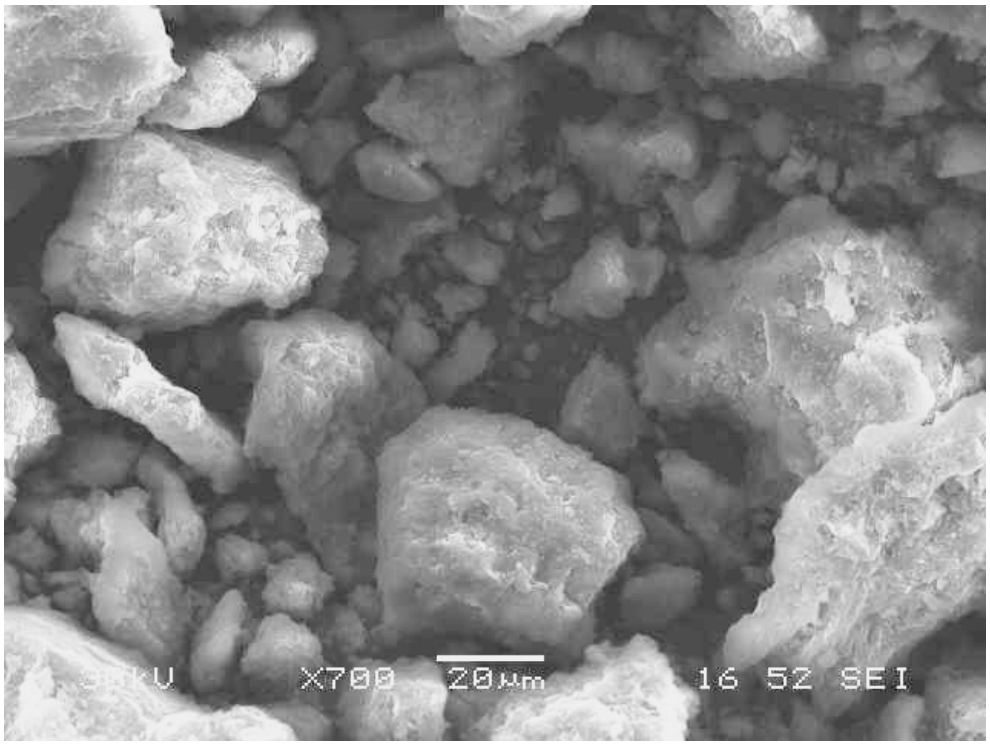


Resim EK-5.8. Örnek-11'e ait bir SEM görünümü (c)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

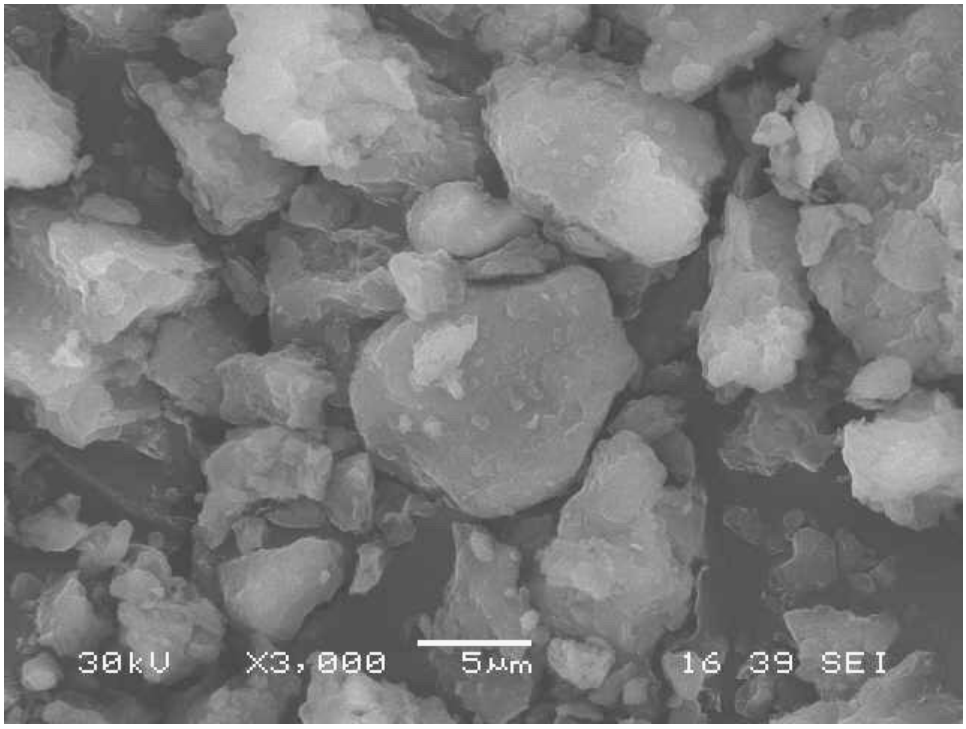


Resim EK-5.9. Örnek-23'e ait bir SEM görünümü (a)

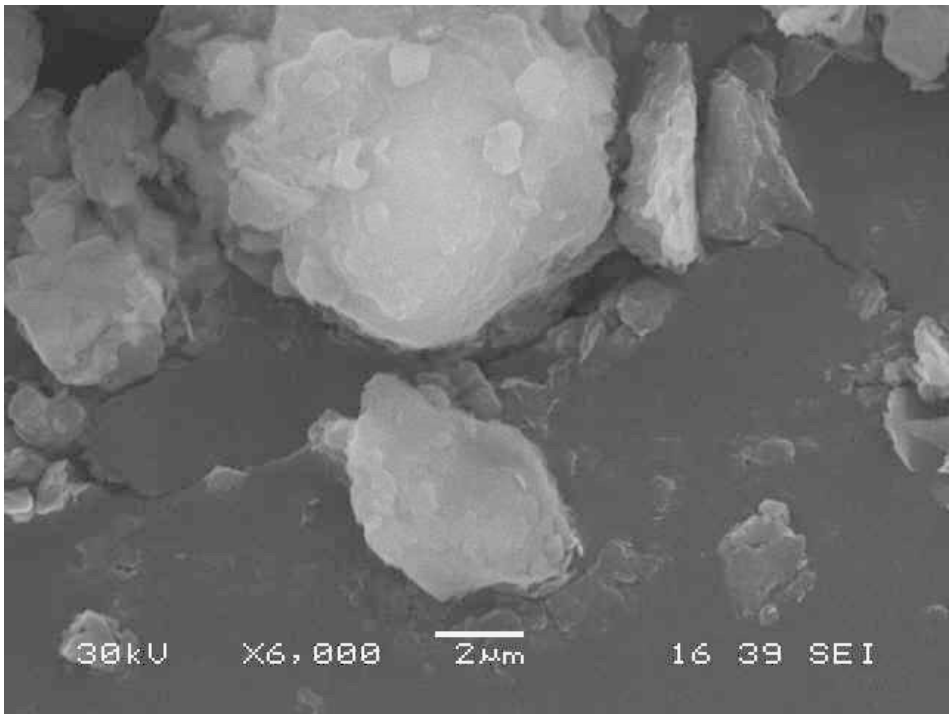


Resim EK-5.10. Örnek-23'e ait bir SEM görünümü (b)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

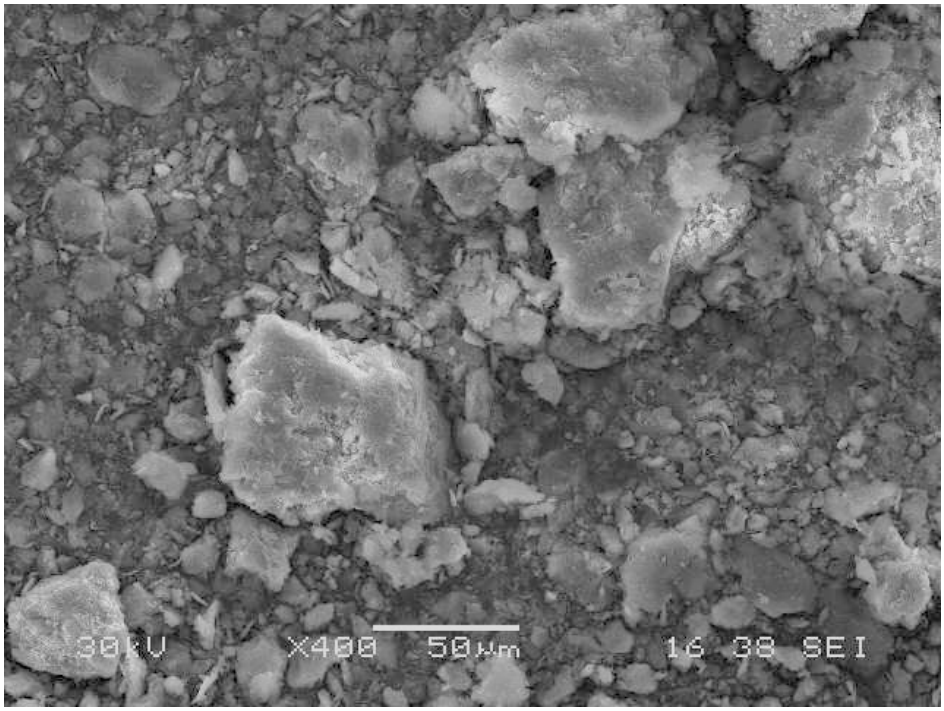


Resim EK-5.11. Örnek-23'e ait bir SEM görünümü (c)

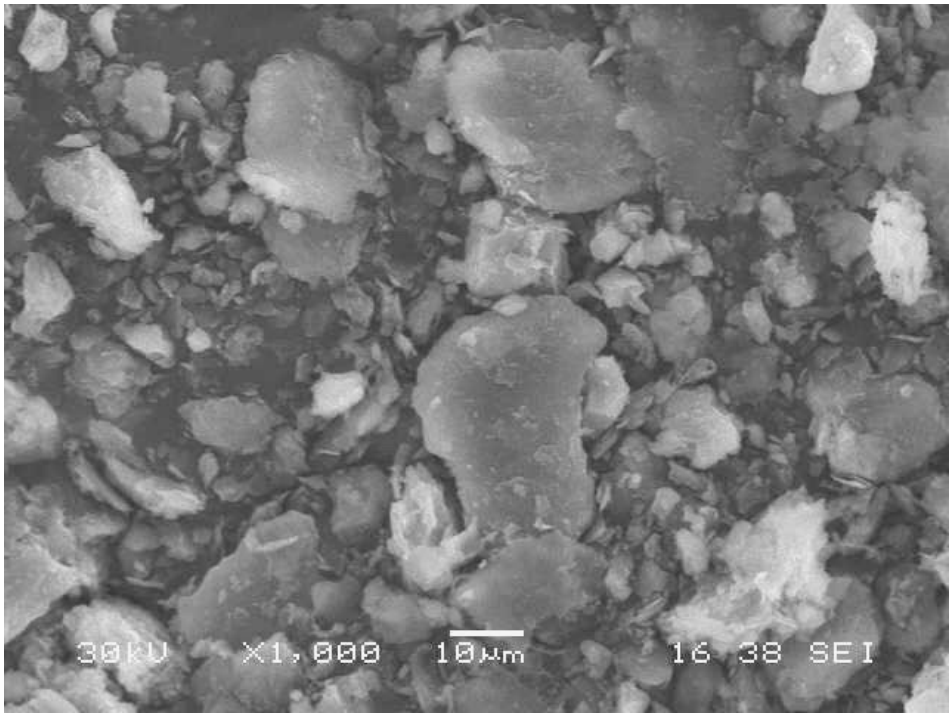


Resim EK-5.12. Örnek-23'e ait bir SEM görünümü (d)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

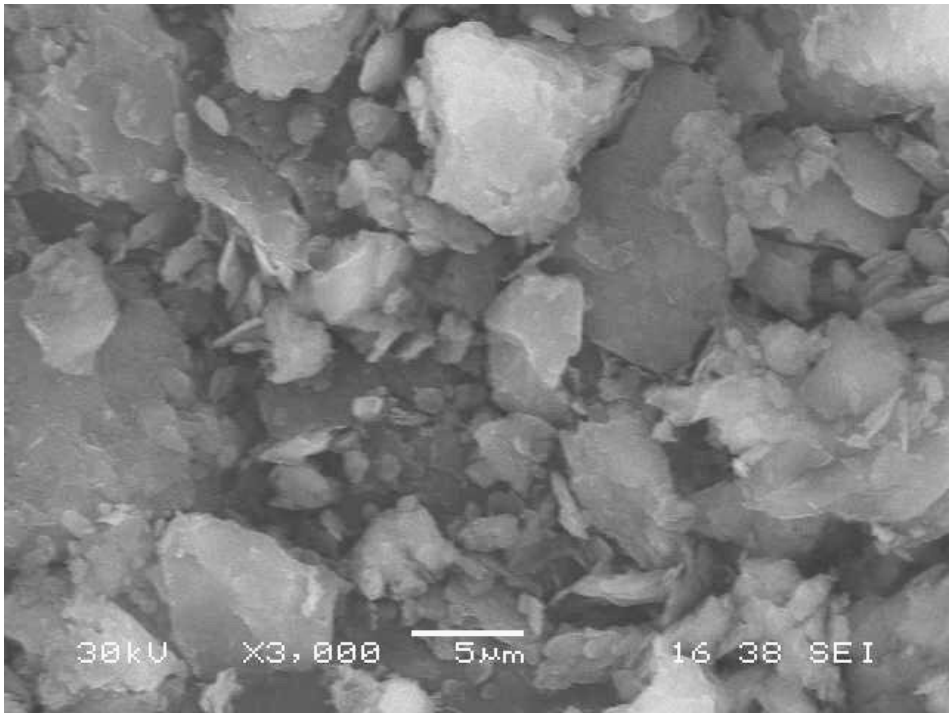


Resim EK-5.13. Örnek-34'e ait bir SEM görünümü (a)

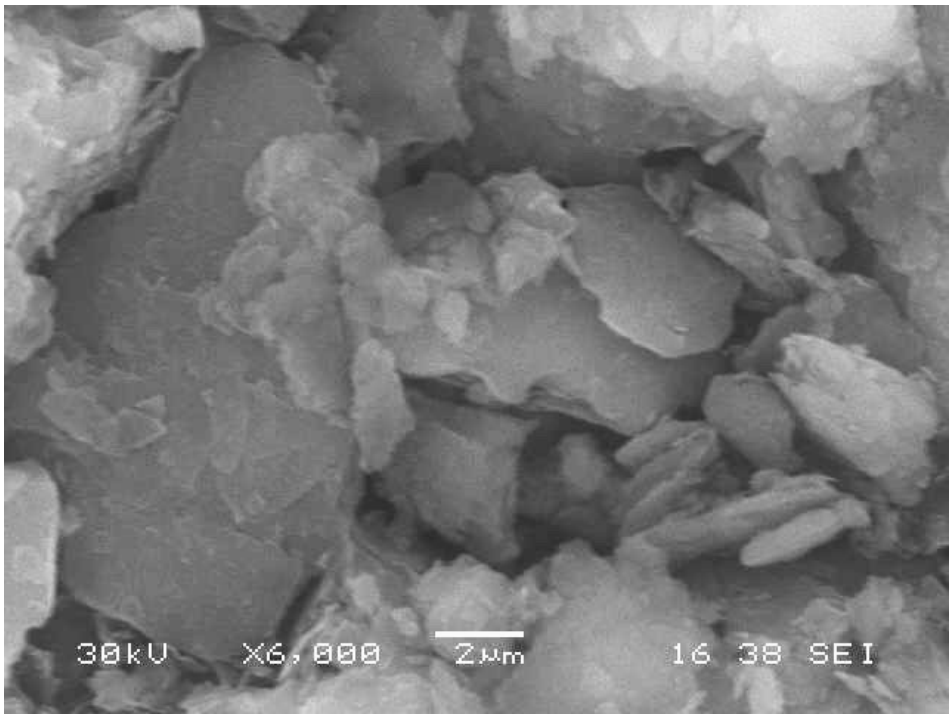


Resim EK-5.14. Örnek-34'e ait bir SEM görünümü (b)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

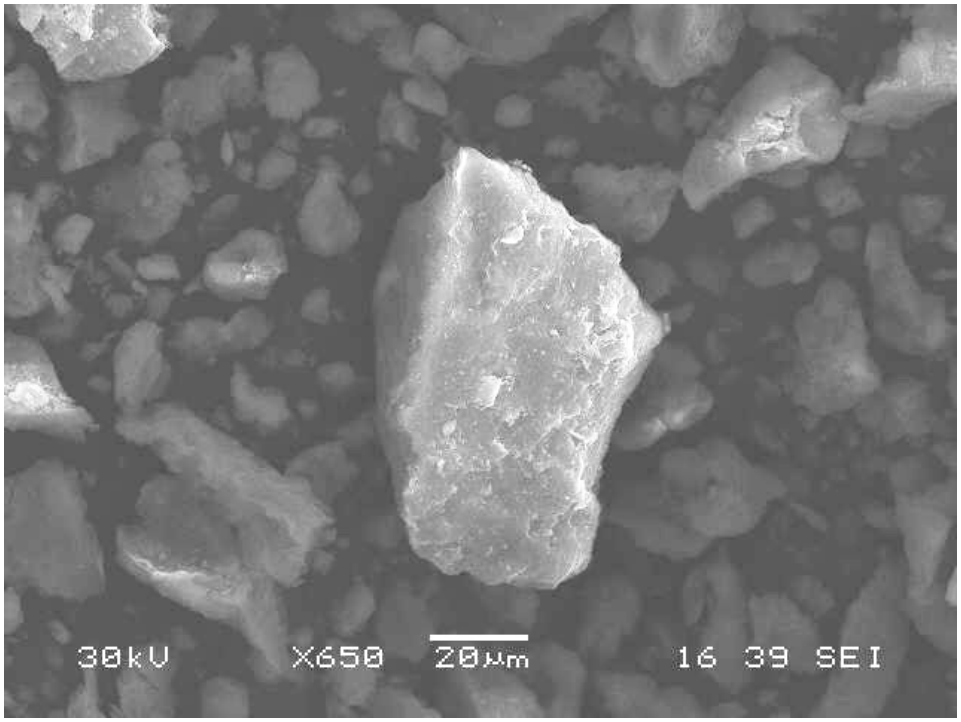


Resim EK-5.15. Örnek-34'e ait bir SEM görünümü (c)

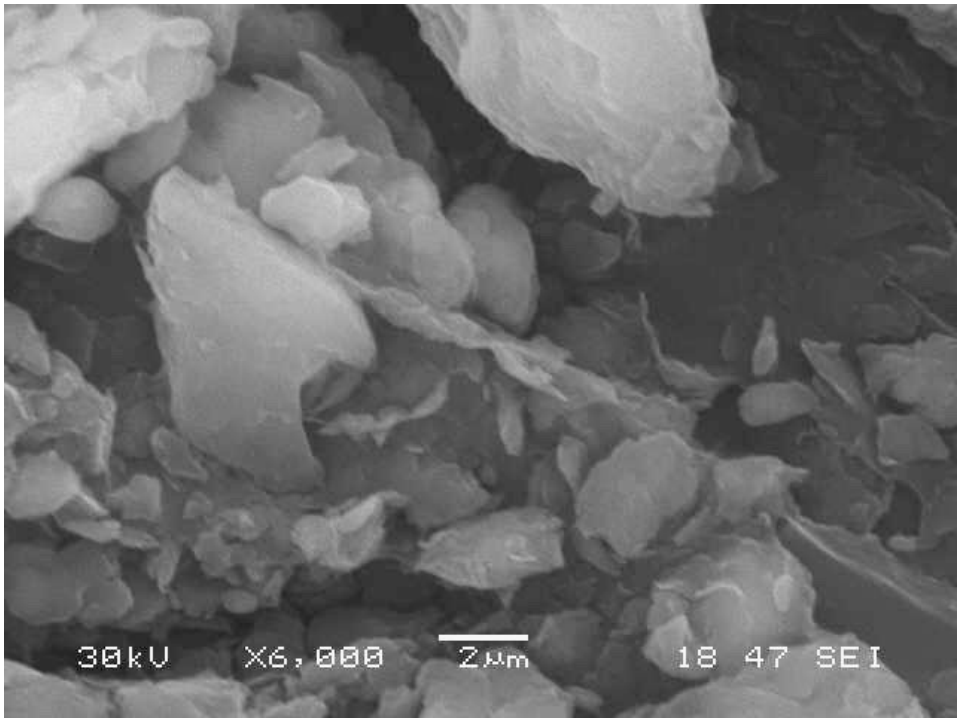


Resim EK-5.16. Örnek-34'e ait bir SEM görünümü (d)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

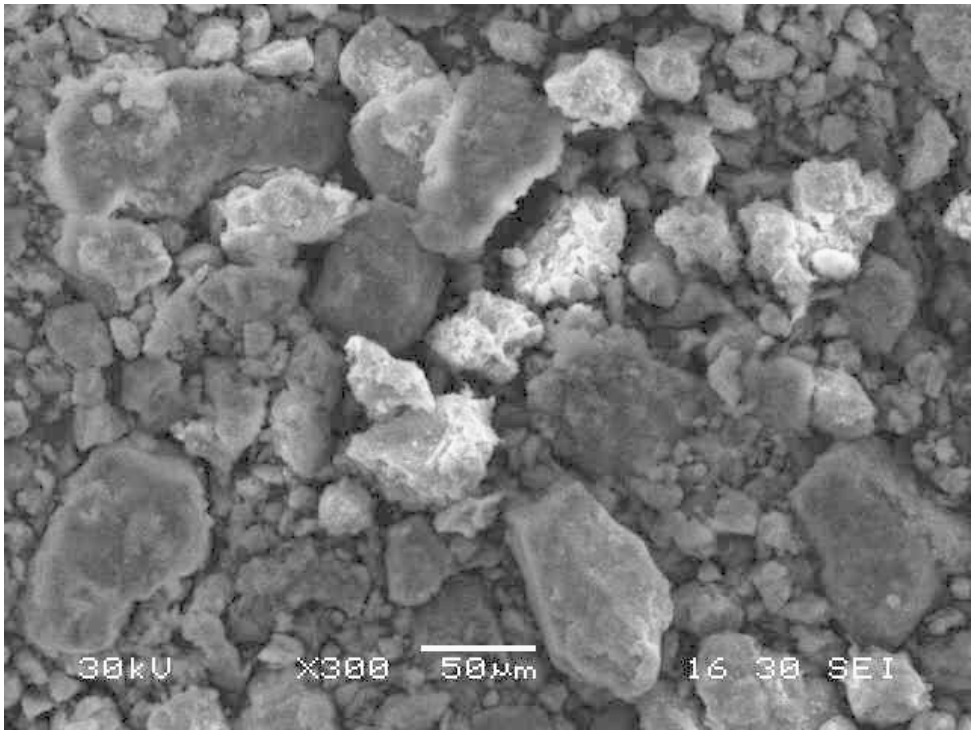


Resim EK-5.17. Örnek-53'e ait bir SEM görünümü (a)

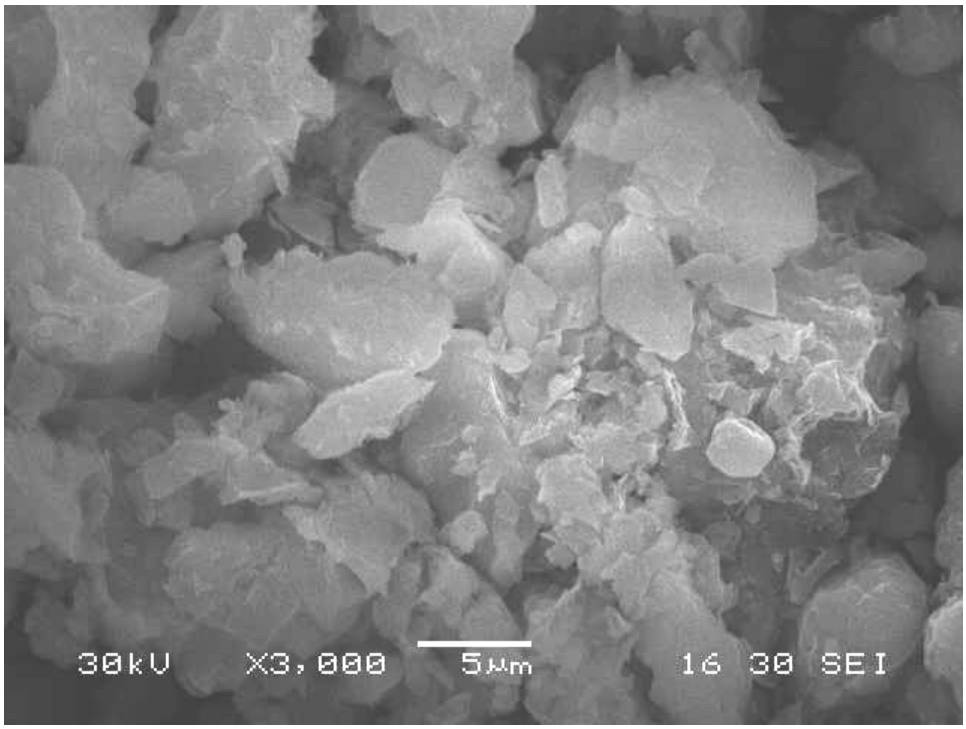


Resim EK-5.18. Örnek-53'e ait bir SEM görünümü (b)

EK-5. Bazı örneklerin SEM görünümleri

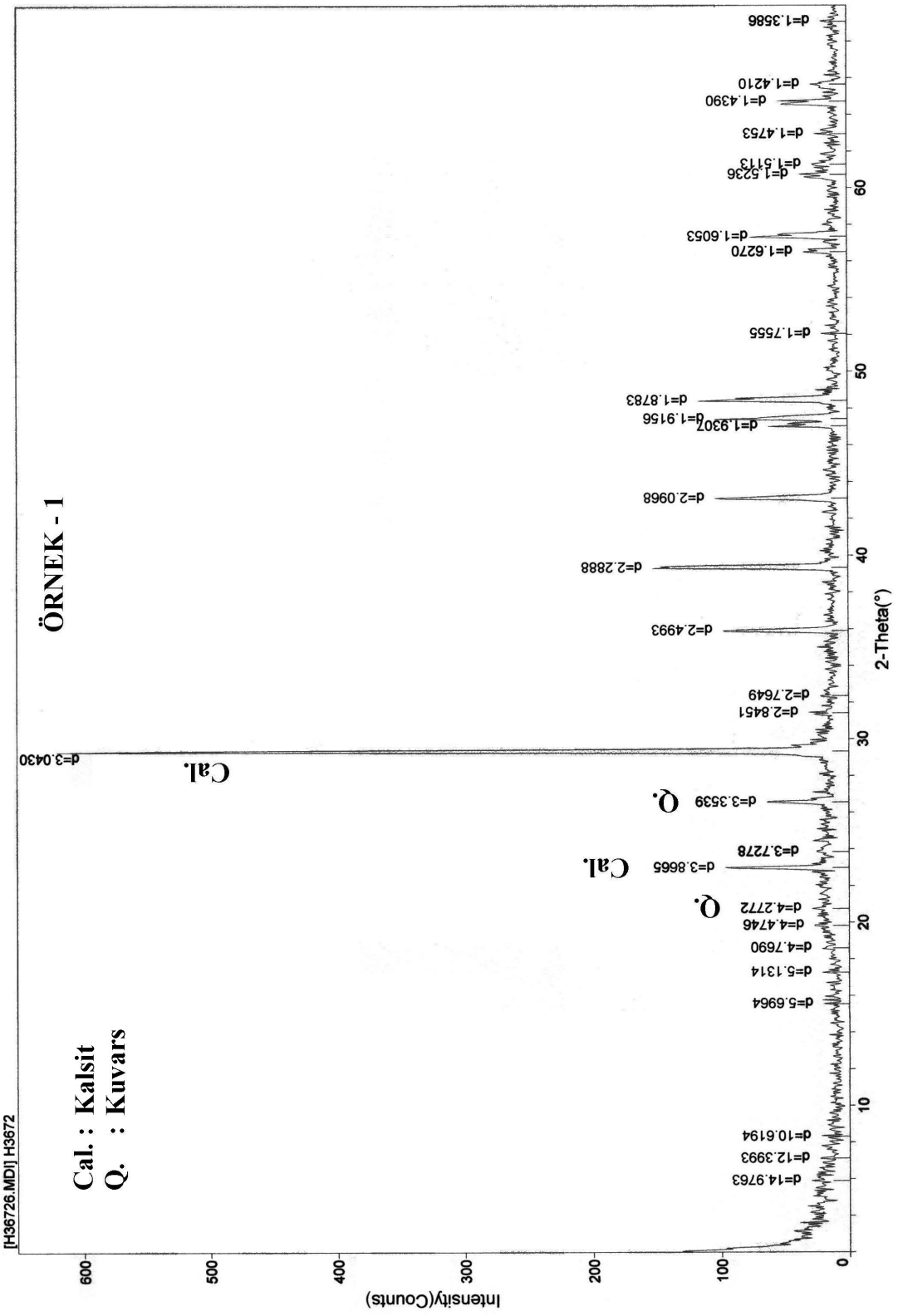


Resim EK-5.19. Örnek-60'a ait bir SEM görünümü (a)



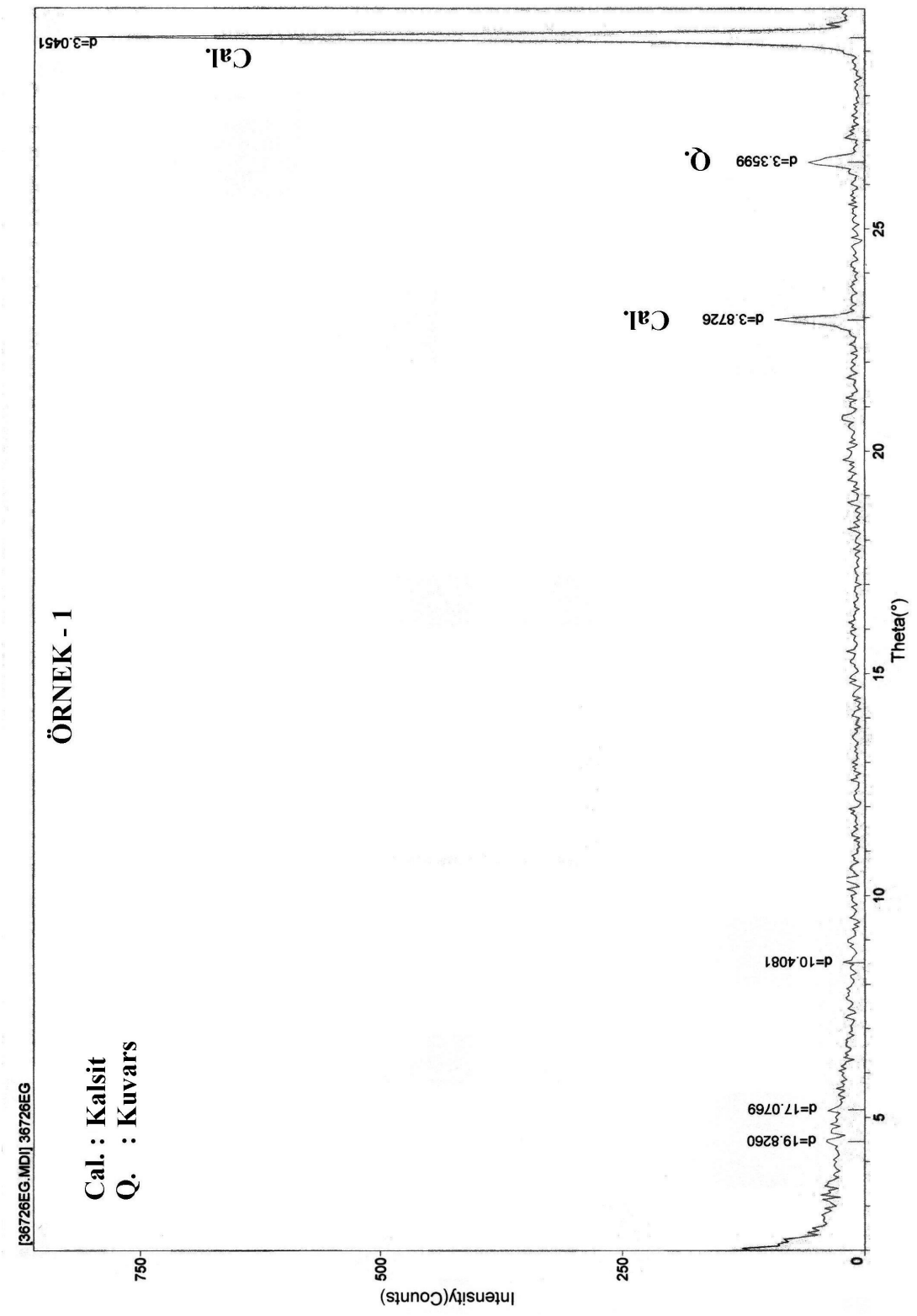
Resim EK-5.20. Örnek-60'a ait bir SEM görünümü (b)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



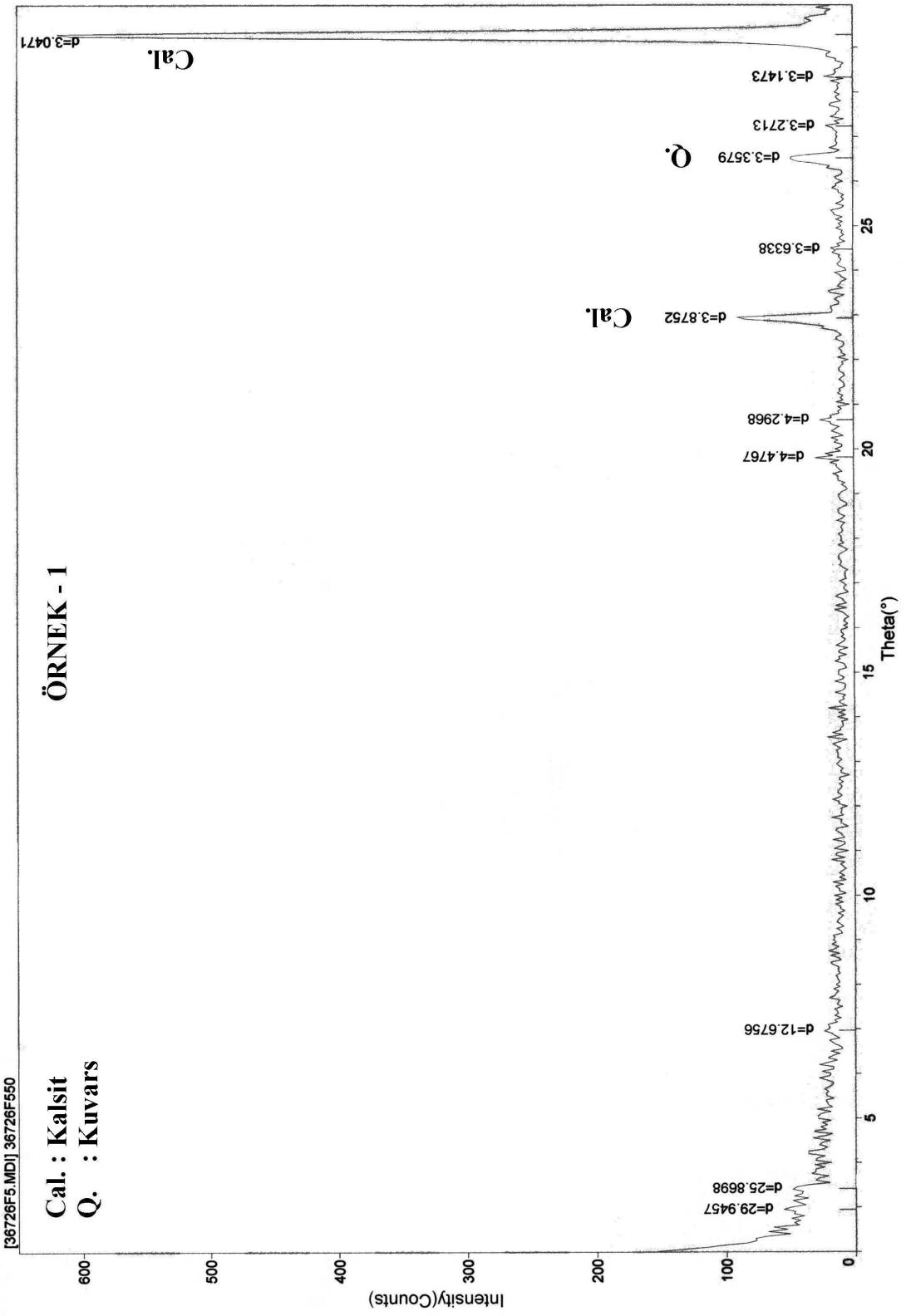
Şekil EK-6.1. Örnek-1'in XRD analiz sonucu (normal çekim)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



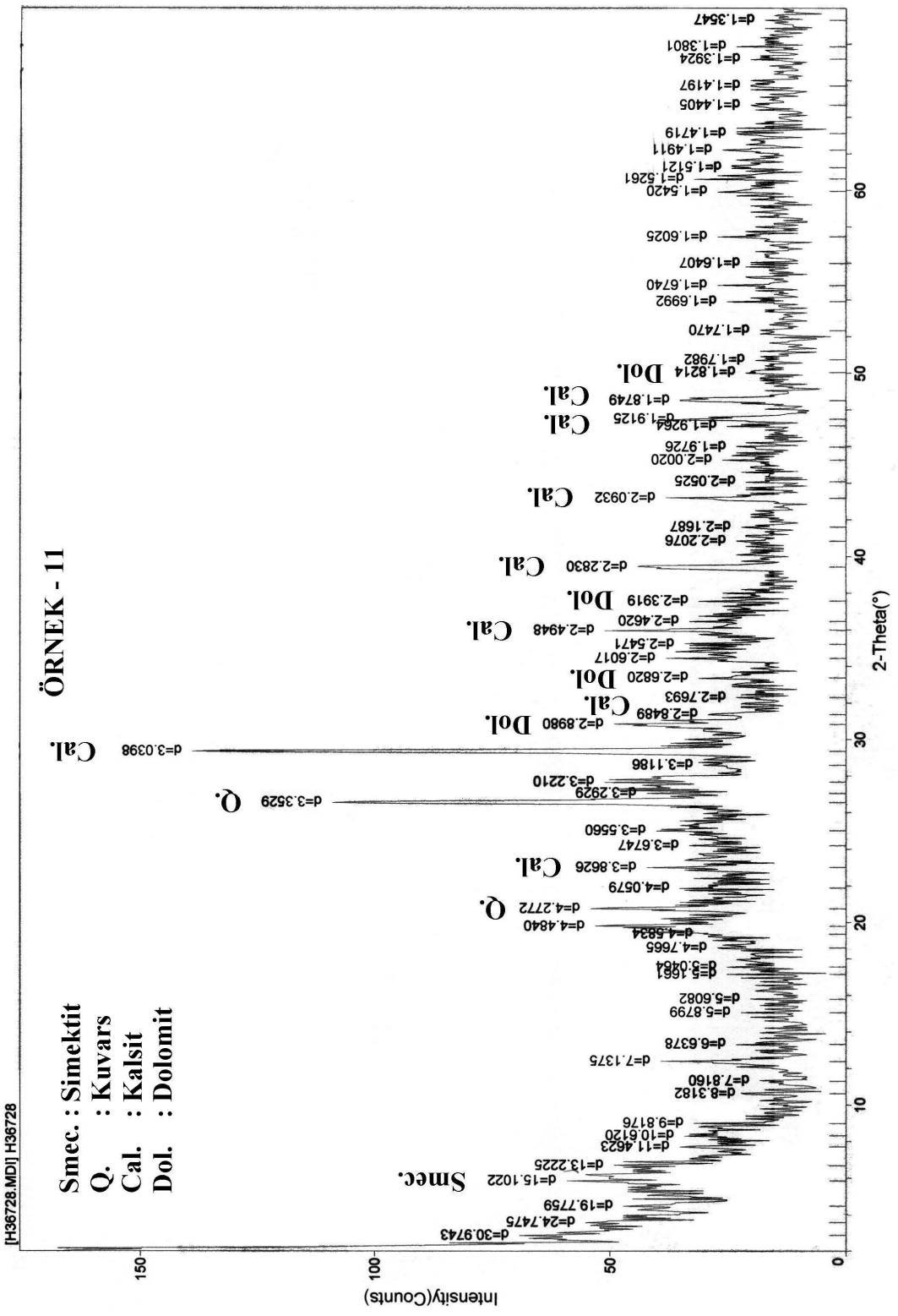
Şekil EK-6.2. Örnek-1'in XRD analiz sonucu (Etilen Glikol ile doyurulmuş)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



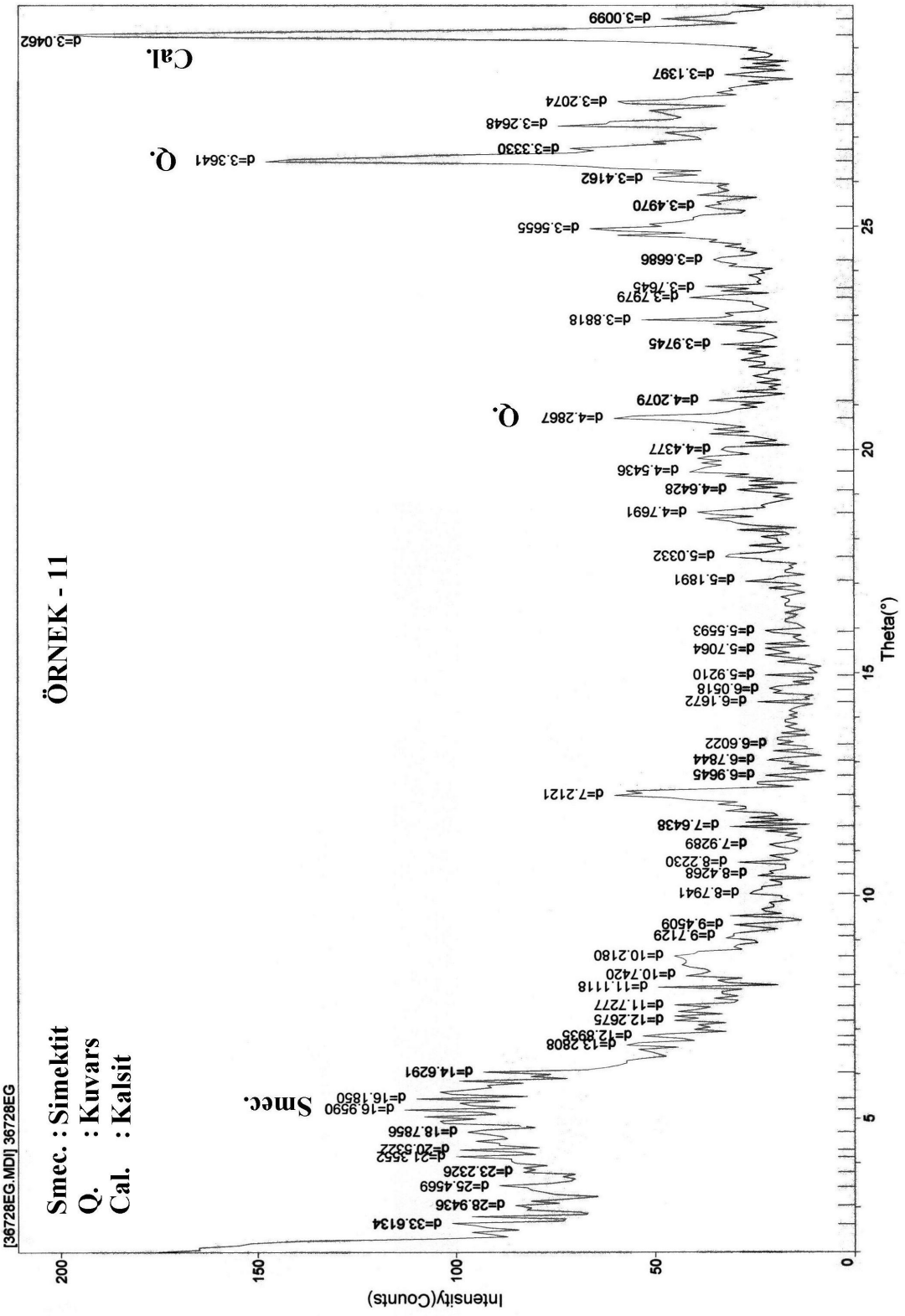
Şekil EK-6.3. Örnek-1'in XRD analiz sonucu (550 ^{0}C'de fırınlanmış)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



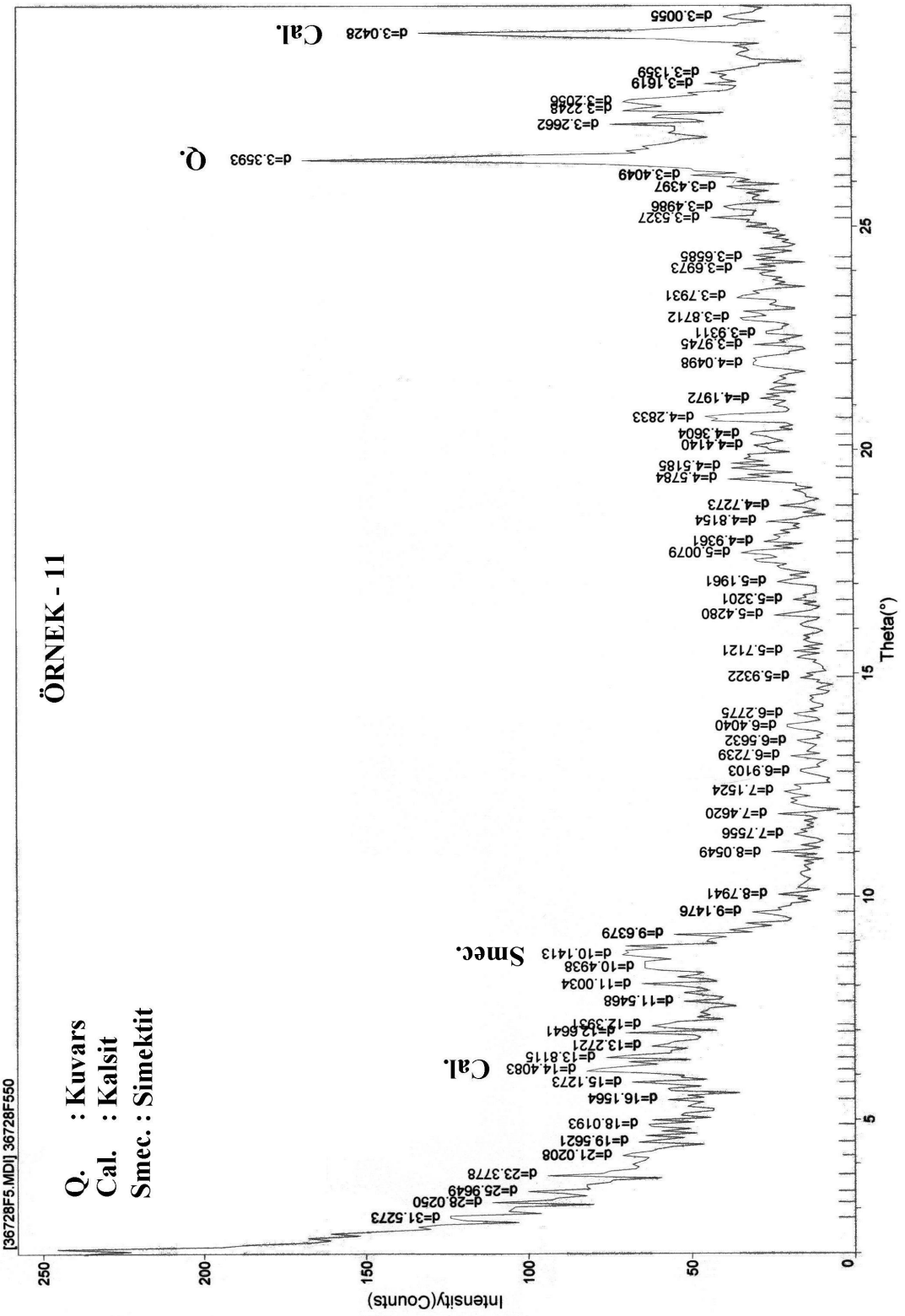
Şekil EK-6.4. Örnek-11'in XRD analiz sonucu (normal çekim)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



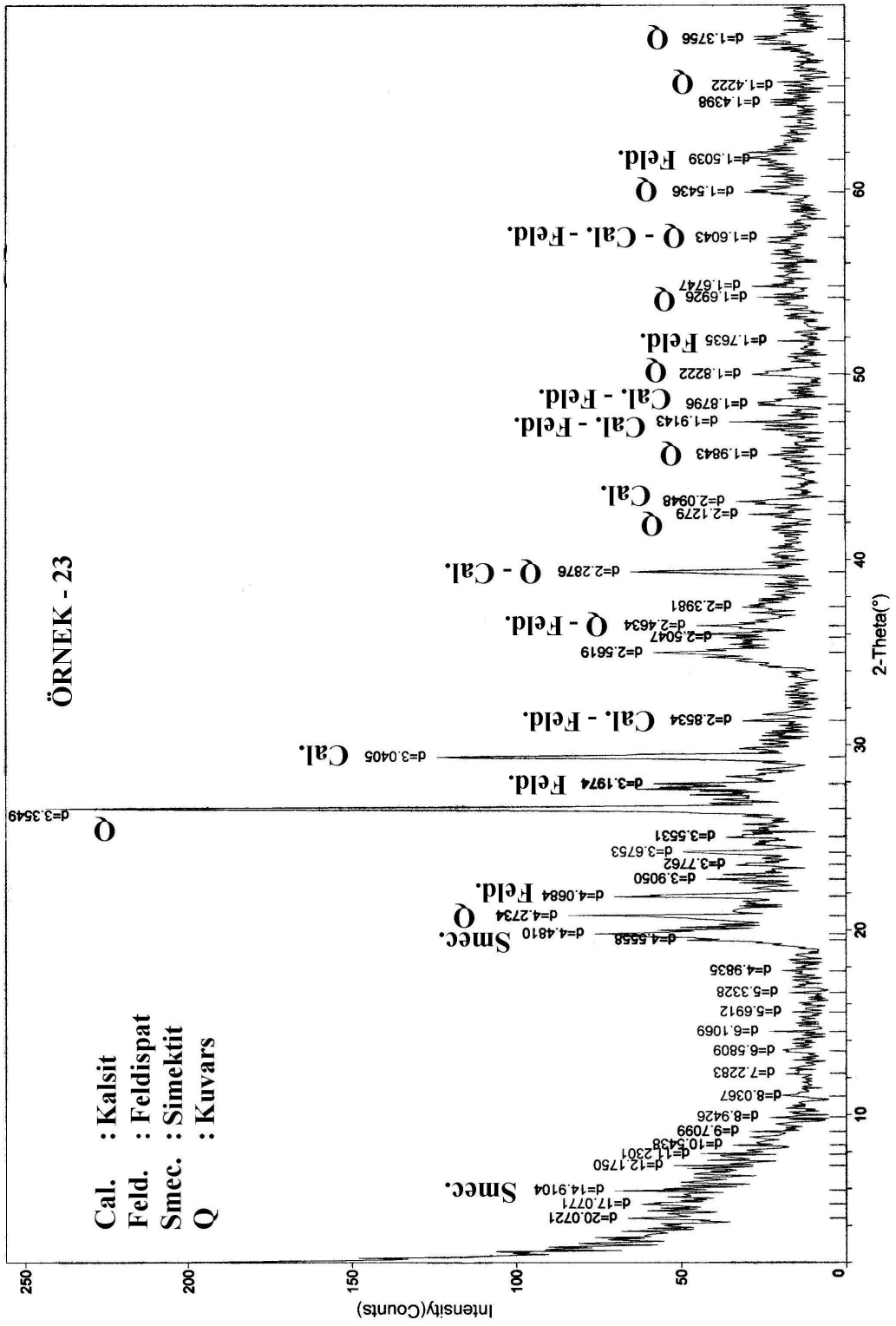
Şekil EK-6.5. Örnek-11'in XRD analiz sonucu (Etilen Glikol ile doyurulmuş)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



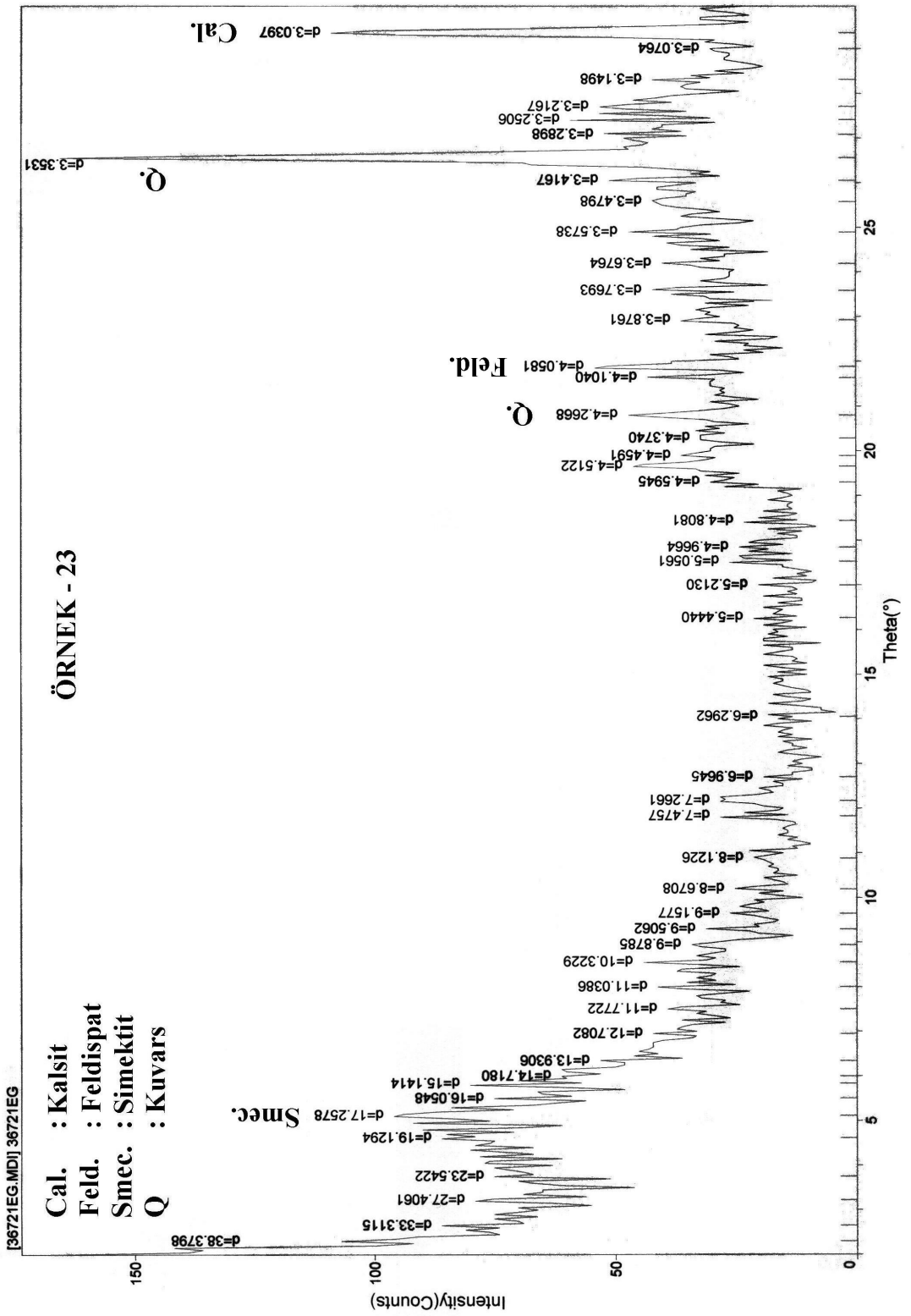
Şekil EK-6.6. Örnek-11'in XRD analiz sonucu (550 ^{0}C'de fırınlanmış)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



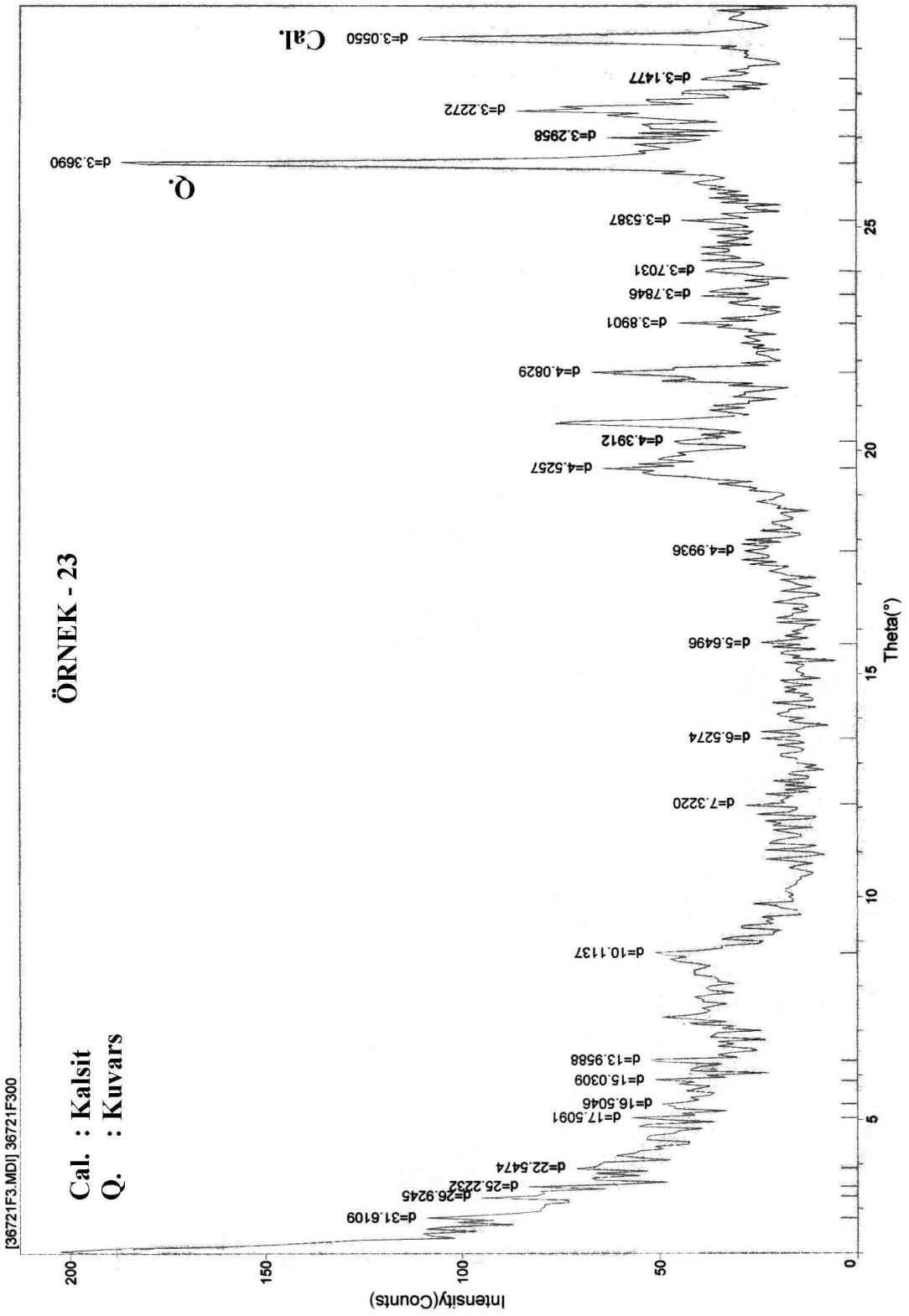
Şekil EK-6.7. Örnek-23'ün XRD analiz sonucu (normal çekim)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



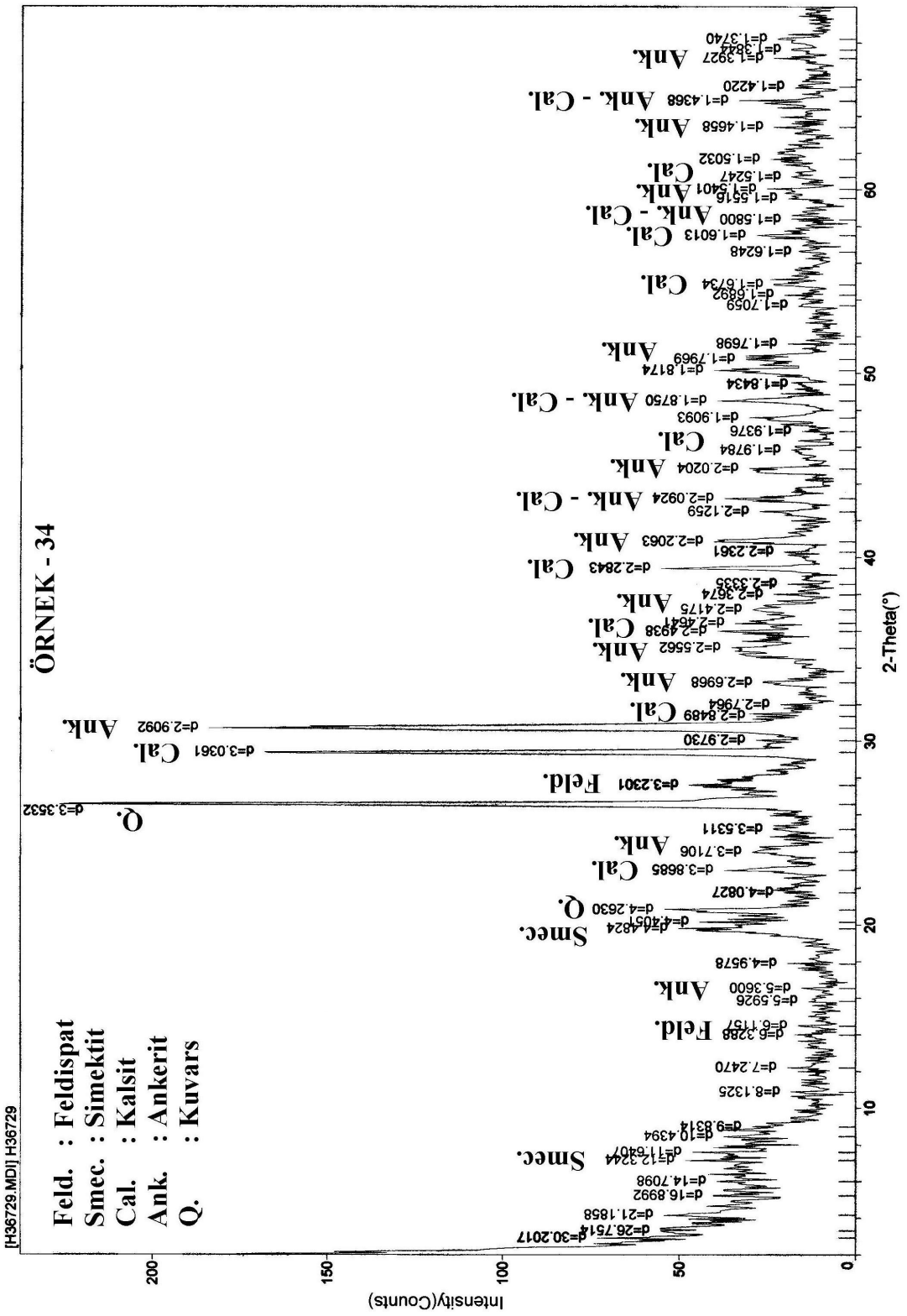
Şekil EK-6.8. Örnek-23'ün XRD analiz sonucu (Etilen Glikol ile doyurulmuş)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



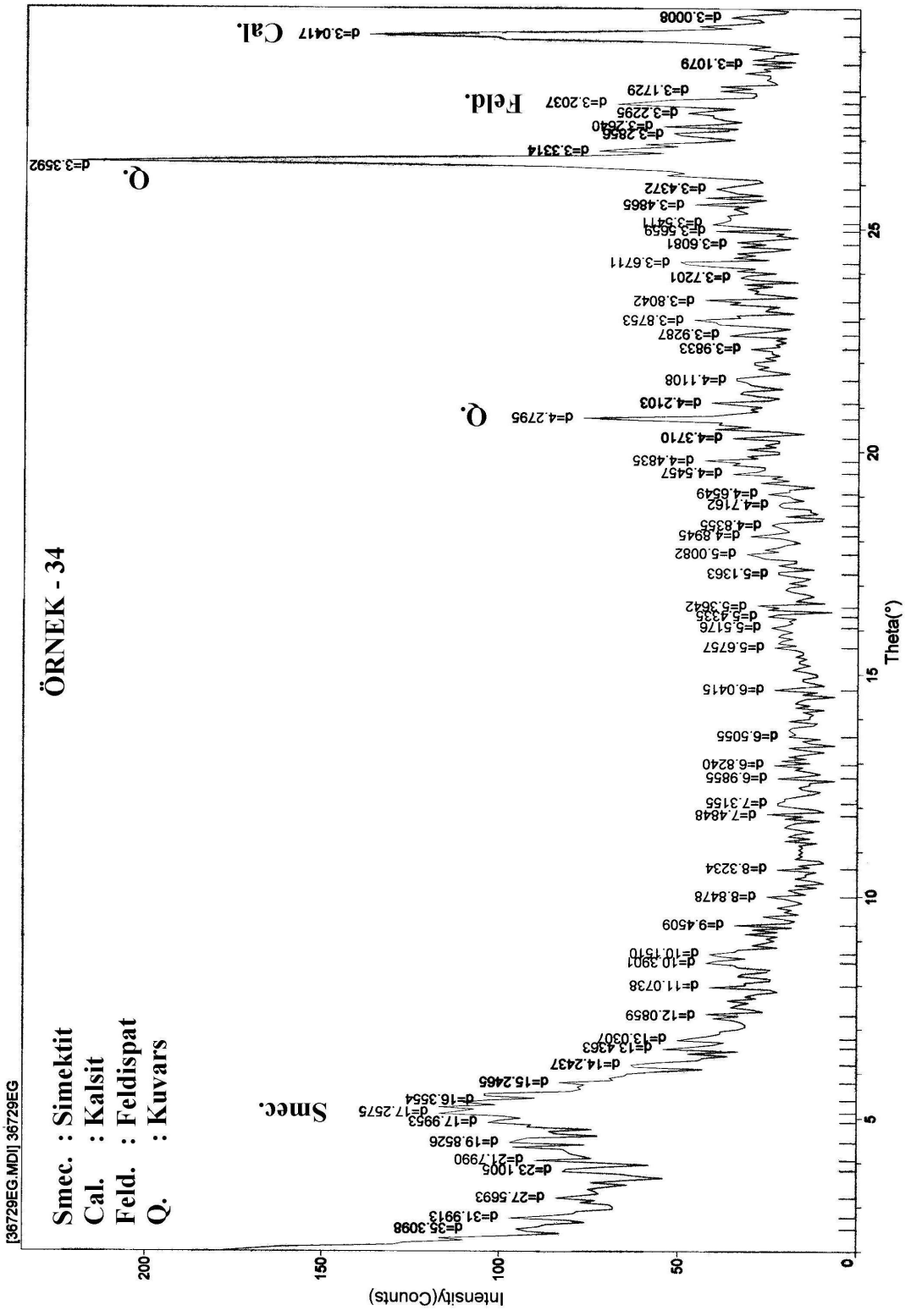
Şekil EK-6.9. Örnek-23'ün XRD analiz sonucu (550 ^{0}C'de fırınlanmış)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



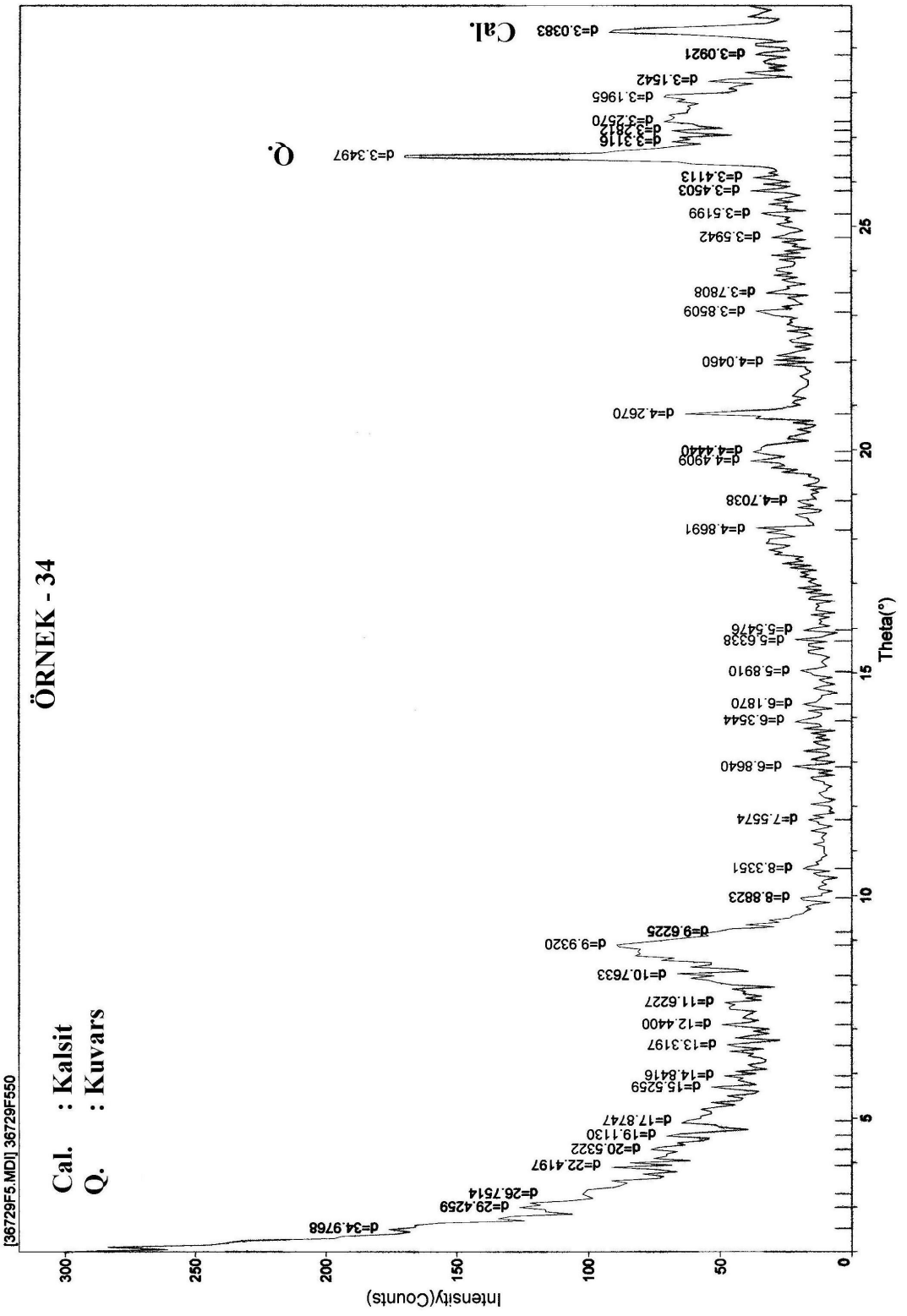
Şekil EK-6.10. Örnek-34'ün XRD analiz sonucu (normal çekim)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



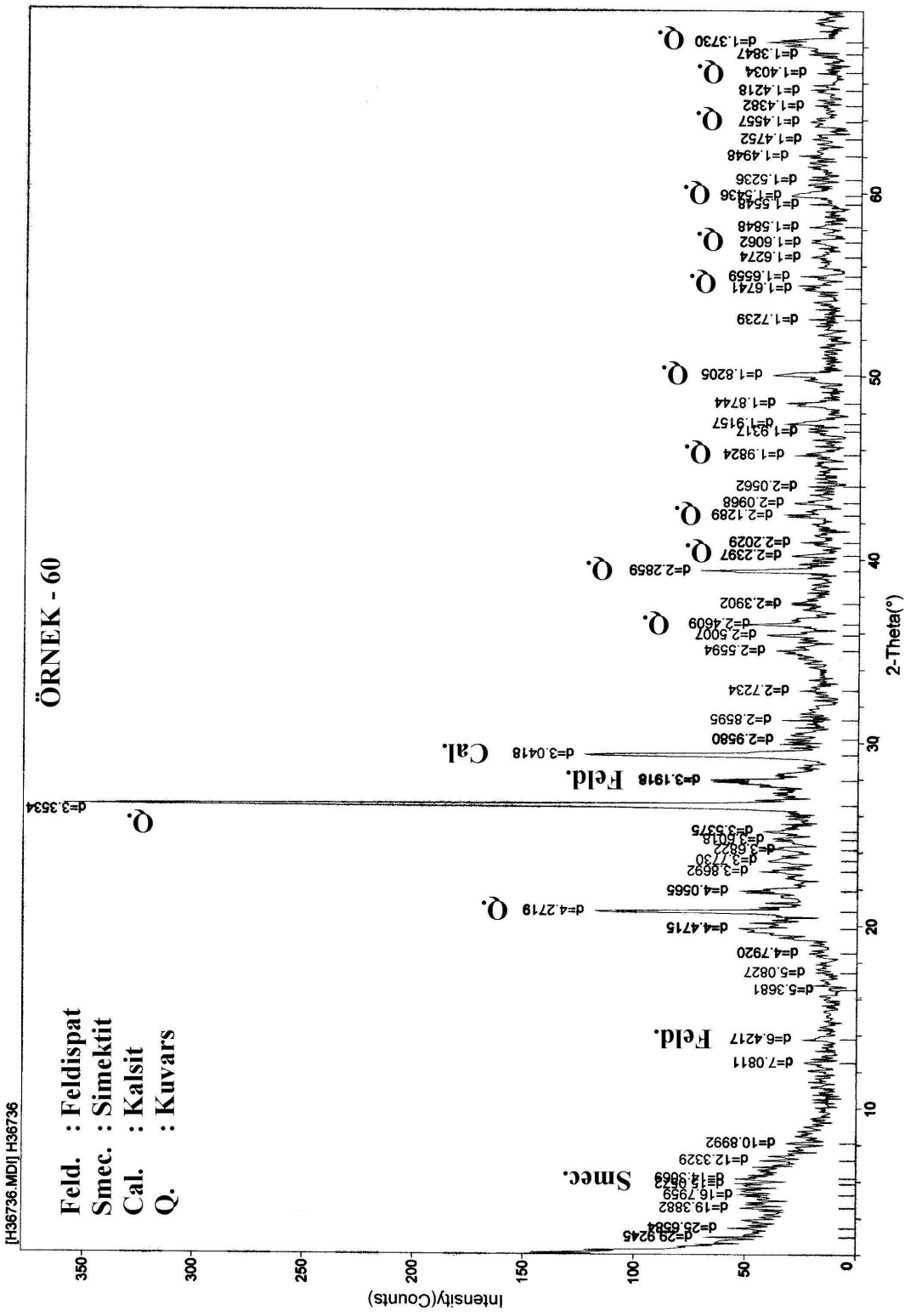
Şekil EK-6.11. Örnek-34'ün XRD analiz sonucu (Etilen Glikol ile doyurulmuş)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



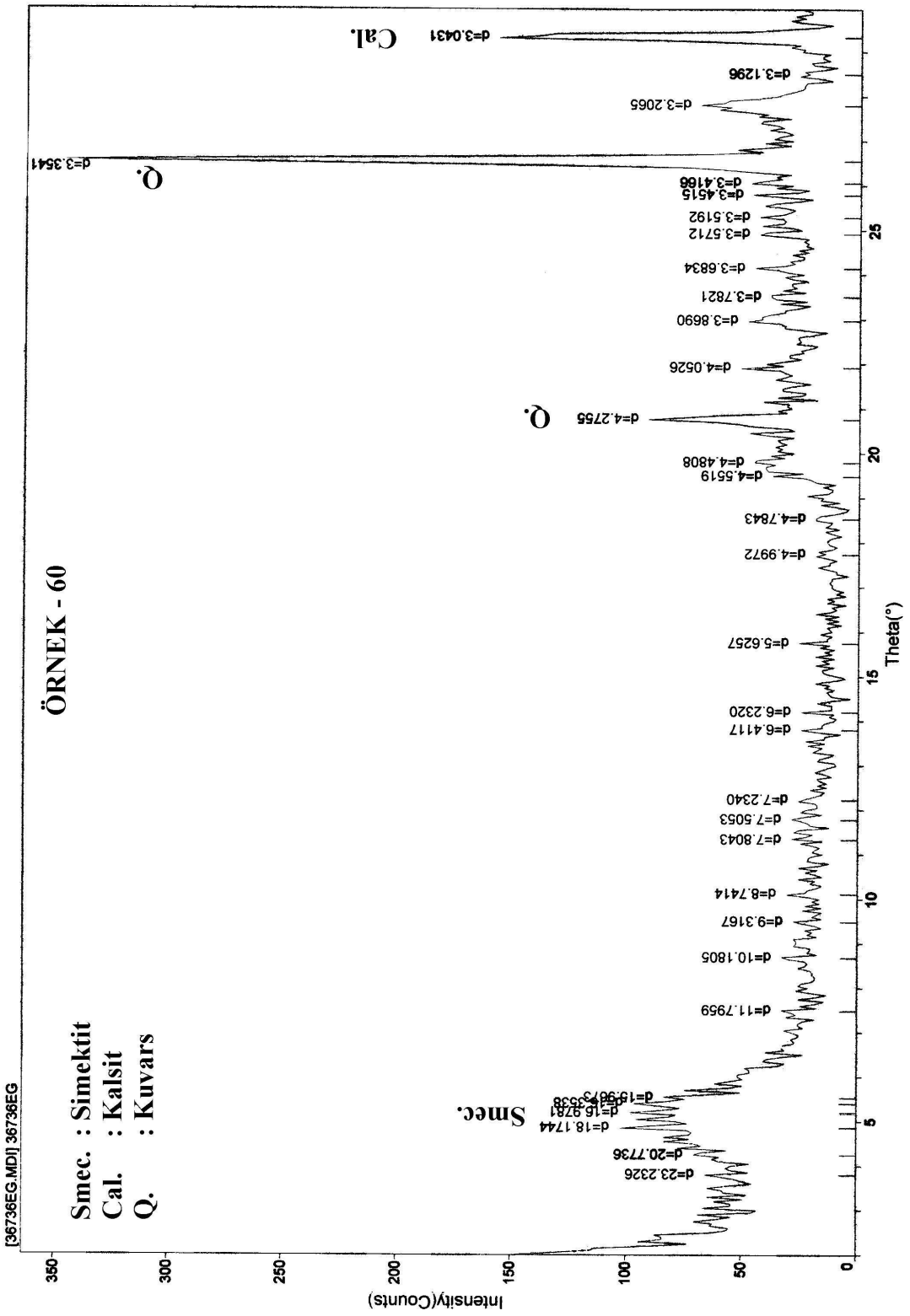
Şekil EK-6.12. Örnek-34'ün XRD analiz sonucu (550 ^{0}C'de fırınlanmış)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



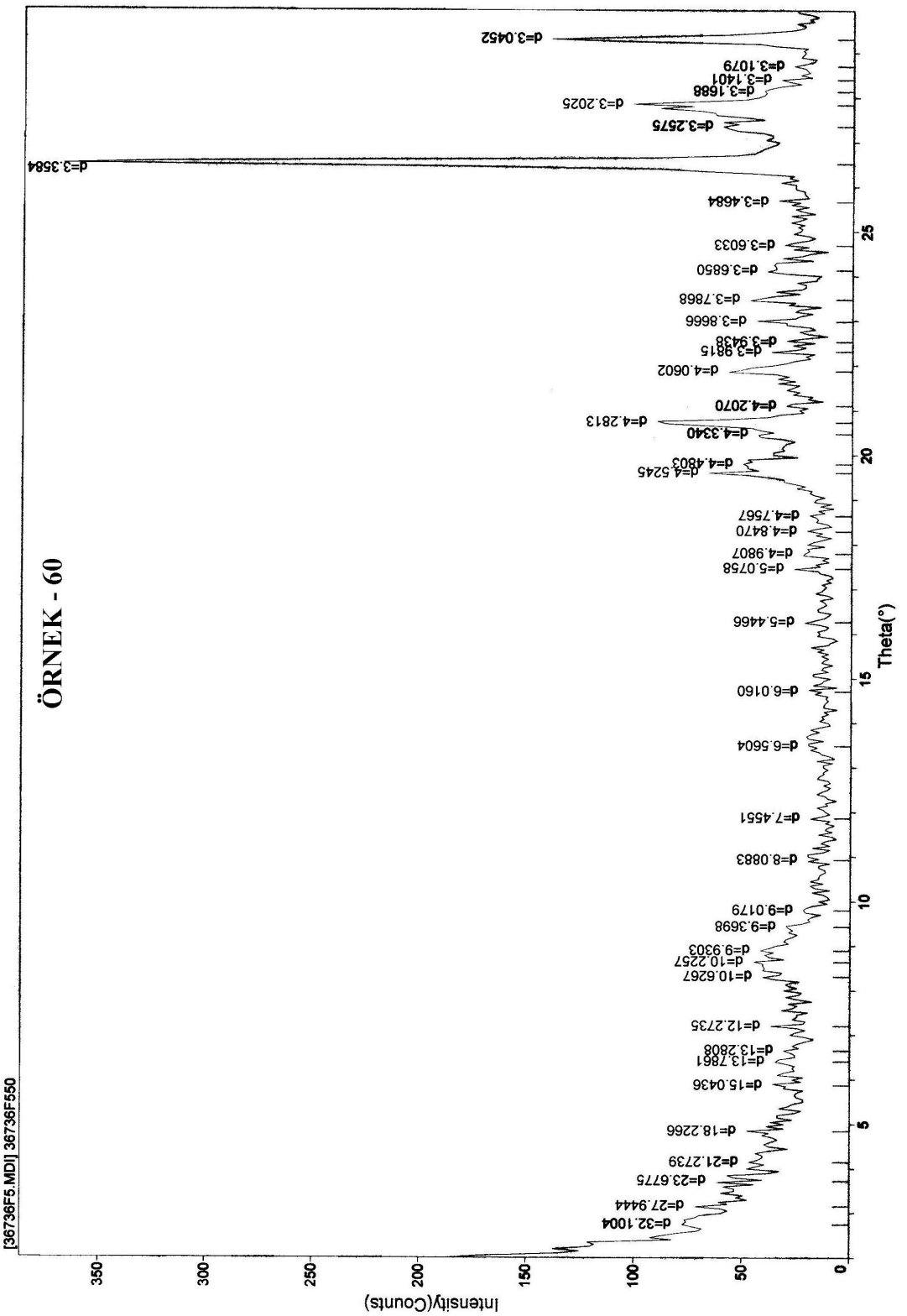
Şekil EK-6.13. Örnek-60'ın XRD analiz sonucu (normal çekim)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



Şekil EK-6.14. Örnek-60'ın XRD analiz sonucu (Etilen Glikol ile doyurulmuş)

EK-6. Bazı örneklerin XRD analiz sonuçları



Şekil EK-6.15. Örnek-60'ın XRD analiz sonucu (550 ^{0}C'de fırınlanmış)

EK-7. Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi

Lazer kırınım yöntemiyle 200 no.lu elekten geçen zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi, aşamalar halinde aşağıda verilmiştir. Burada verilen deney yöntemi, başta ISO 13320 (1999)'de belirtilen temel ilkelere, daha sonra lazer kırınım yöntemi üzerine yapılmış önceki çalışmalara, bu çalışma kapsamında ortaya konulan deneysel bulgulara ve kişisel deneyimlere dayanmaktadır.

1. Terimler ve kavramlar

Lazer kırınım yönteminde sıklıkla kullanılan bazı terimlerin ve kavramların açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- Geri plan ölçümü : Gün ışığı, optik yüzeylerin parıldaması vb. gibi etkenlerden kaynaklanan ışın kırınım deseninin, örnek ölçümünün sonuçlarından çıkartılmasını sağlamaktadır. Doğru sonuca ulaşmak için, sisteme örnek dahil edilmeden hemen önce geri plan ölçümü alınmalı ve geri plan ölçümü ile örnek ölçümü arasındaki süre mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır.
- Işın azalma oranı : Analiz sırasından gözlenebilen bir ölçüt olup, tanelere çarpan ışınların yayılma ve/veya emilme yoluyla azalma veya eksilme oranını ifade etmektedir. Lazer kırınım yönteminde örnek miktarı ışın azalma oranına göre belirlenmekte ve sağlıkı bir ölçüm yapılabilmesi için ışın azalma oranının %10 – 30 arasında olması gerekmektedir.
- Saptırma indisi : Taneye çarpan ışınların yön değiştirmesini yansıtan optik parametredir.
- Emme katsayısı : tanelerin ışınları emme özelliğini yansıtan optik parametredir.
- Alt örnek : 200 no.lu eleğin altına geçen fazla miktardaki (en az 10 – 15 g) örnekten, lazer kırınım analizi için alınan 0,1 – 0,5 g arasındaki örnek.

2. Örnek hazırlanması

i. Araziden uygun tekniklerle getirilen örnek, bir tepsi içerisinde etüve konulur ve 110 ±5 ^{0}C sıcaklıkta kurutulur.

EK-7. (Devam) Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi

ii. Tamamen kurumuş olan örnek, lastik tokmakla nazikçe ezilip ufalanır. Bu işlem sırasında münferit tanelerin kırılmamasına özen gösterilir.
iii. Örneğin tamamı 200 no.lu elekten elenir ve eleğin altına geçen örnek, küçük bir silindirik kaba (koni batma likit limit deney kabı bunun için uygundur), eleğin üzerinde kalan örnek ise daha büyük bir silindirik kaba boşaltılır.
iv. Lazer kırınım analizi için 0,1 – 0,5 g arasında örnek yeterlidir. Ancak, bu örneğin, bütünü yeterli düzeyde temsil etmesi için, 200 no.lu eleğin altına geçen örneğin en az 10 – 15 g kadar olması önerilir.
v. Eleğin üzerinde kalan örneğe bilinen standart yöntemlerle (Örneğin ASTM D 422) elek analizi uygulanır. Eleğin altına geçen örneğe ise, aşağıda belirtildiği gibi lazer kırınım analizi uygulanır.

3. Lazer kırınım analizi için alt-örnek alınması

vi. Silindirik kabın içerisinde bulunan 10 – 15 g ağırlığındaki örnek, uygun bir spatulayla iyice karıştırılarak homojen hale getirilir. Kullanılan spatula, kabın içerisinde rahatlıkla hareket edebilecek ölçülerde olmalıdır. Daha sonra spatulanın ucuyla bir miktar alt-örnek alınarak, azar azar haznenin içerisine boşaltılır. Bu sırada bilgisayar ekranından ışın azalma oranı gözlenir. Analiz için gereken örnek, ışın azalma oranının % 15 – 30 arasında olmasını sağlayacak kadardır. Bahsedildiği şekilde alınan alt-örneğin, bütünü yeterli düzeyde temsil ettiği deneysel olarak saptanmıştır.

4. Örneklerin ayrıştırılması ve analiz edilmesi

Lazer kırınım analizlerinde örneklerin ayrıştırılması için ASTM D 422'de tanımlandığı gibi hazırlanan Calgon çözeltisi kullanılabilir. Calgon çözeltisi ile örneklerin ayrıştırılması iki şekilde yapılabilir. Birincisi doğrudan ilave etme, ikincisi ise önceden bekletme yöntemi olarak adlandırılmış olup, uygulama şekli aşağıda

EK-7. (Devam) Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi

verilmiştir. Her iki yöntemde de, en az 100 ml Calgon çözeltisinin yeterli olduğu ve analizlerde çeşme suyunun kullanılabileceği deneysel olarak saptanmıştır.

Not 1: Lazer kırınım cihazı açıldıktan sonra, lazer ışınlarının durağan hale gelmesi için en az yarım saat beklenmelidir.

vii. *Doğrudan ilave etme yöntemi:* Örnek haznesi suyla doldurulurken 100 ml Calgon çözeltisi doğrudan örnek haznesinin içerisine boşaltılıp, ultrasonik enerji, mekanik karıştırıcı ve pompa çalıştırıldıktan sonra geri plan ölçümü alınır. Daha sonra, madde vi'da belirtildiği şekilde alınan alt-örnek haznenin içerisine boşaltılır.

viii. *Önceden bekletme yöntemi:* Madde vi'da belirtildiği şekilde alınan alt-örnek, plastik bir kabın içerisine (örneğin plastik bardak) boşaltılıp üzerine 100 ml Calgon çözeltisi ilave edildikten sonra küçük bir spatulayla birkaç dakika karıştırılır ve yaklaşık 16 saat bekletilir. Bu sürenin sonunda, örnek, birkaç dakika daha karıştırıldıktan sonra Calgon çözeltisi ile birlikte örnek haznesinin içerisine boşaltılır. Örnek boşaltılmadan önce, haznenin içerisi suyla doldurulup ultrasonik enerji, mekanik karıştırıcı ve pompa çalıştırılmış ve geri plan ölçümü alınmış olmalıdır.

Not 2: Kil yüzdesi düşük ($< \approx \%\ 40$) olan örneklerde her iki ayrıştırma yönteminin de aynı sonucu verdiği, kil yüzdesi yüksek ($> \approx \%\ 40$) olan örneklerde ise önceden bekletme yönteminin daha iyi ayrıştırma sağladığı deneysel olarak saptanmıştır. Bununla birlikte, önceden bekletme yönteminin iki dezavantajı bulunmaktadır. Birincisi, deney süresini uzatmasıdır. İkincisi ise, ışın azalma oranının %15–30 arasında olmasını sağlayacak örnek miktarının önceden belirlenmesinin güç olmasıdır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, örnek, öncelikle doğrudan ilave etme yöntemiyle analiz edilip, ışın azalma oranının %15 – 30 arasında olmasını sağlayacak alt-örnek miktarı göz kararıyla belirlenir ve aynı miktardaki alt-örnek yaklaşık tahmin edilerek madde vi'da belirtildiği gibi alınıp plastik kabın içerisine boşaltılır. Bu durumda dahi, alınan alt örneğin, ışın azalma oranını sağlamayacağı olasılığına karşılık, aynı örnekten değişik miktarlarda birkaç tane alt-örnek alınması önerilir.

ix. Gerek doğrudan ilave etme, gerekse önceden bekletme yöntemiyle hazırlanan örnek, haznenin içerisine boşaltıldıktan sonra ultrasonik enerjinin etkisiyle ayrışması için birkaç dakika beklenir.

EK-7. (Devam) Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi

Not 3: Örneklerin tam olarak ayrıştırılması için ultrasonik enerji uygulama süresinin zeminden zemine değişiklik gösterdiği ve bazı örneklerde kısa sürede topaklanma meydana geldiği deneysel olarak saptanmıştır. Ayrıştırmanın tamamlandığı ve topaklanmanın başladığı an, bilgisayar ekranından ön-izleme penceresi gözetlenerek tespit edilebilmektedir. Örnek, sisteme dahil edildikten sonra, ön-izleme penceresinde tane büyüklüğü dağılımı histogram şeklinde gösterilmekte ve topaklanma meydana geldiğinde bu histogramın iri taneleri gösteren kuyruğu yatay ekseni dik bir şekilde kesmektedir. Bahsedilen bu durum meydana gelmeden hemen önce ölçüm alınarak, örneğin tamamen ayrıştığı anı yakalamak mümkündür.

x. Zemin örneğinin ayrıştırlması tamamladıktan sonra (Bkz. Not 3) bilgisayardan gerekli komut kullanılarak ölçüm gerçekleştirilir ve yazıcıdan çıktısı alınır. Şekil EK-7.1'de, Malvern Master SizerX (long bed) lazer kırınım cihazı ve 45 mm odak uzaklığına sahip mercek kullanılarak yapılan bir analiz sonucunun çıktısı görülmektedir.

5. Sonuçların değerlendirilmesi

Veri toplama dedektörünün üzerinde bulunan bantların belirli ölçüm aralıkları olduğundan, lazer kırınım analizinin sonucunda tane büyüklüğü tek bir değer olarak değil, bir aralık olarak verilmektedir. Tane büyüklüğü aralığını tek bir değere dönüştürmek için söz konusu ölçüm bandının alt ve üst sınırlarının geometrik ortalamasının alınması gerekmektedir. Örneğin, bir ölçüm bandının alt ve üst ölçüm sınırları 52,68 ile 64,92 μm ise, bunu tek bir değere dönüştürülmesi için aşağıdaki gibi bir işlem uygulanır.

$$D = \sqrt{52{,}68 \text{ x } 64{,}92} \quad = \quad 58{,}48 \ \mu m$$

EK-7. (Devam) Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi

GAZİ ÜNİVERSİTESİ TEKNİK EĞT. FAK.
YAPI BÖLÜMÜ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI
LASER PARTICLE SIZER DENEY SONUCU

Version 1.2b — 06 Jul 2005 13:15

HACETTEPE-2 **:Run Number 7**

MIE
1.54 (0.1)

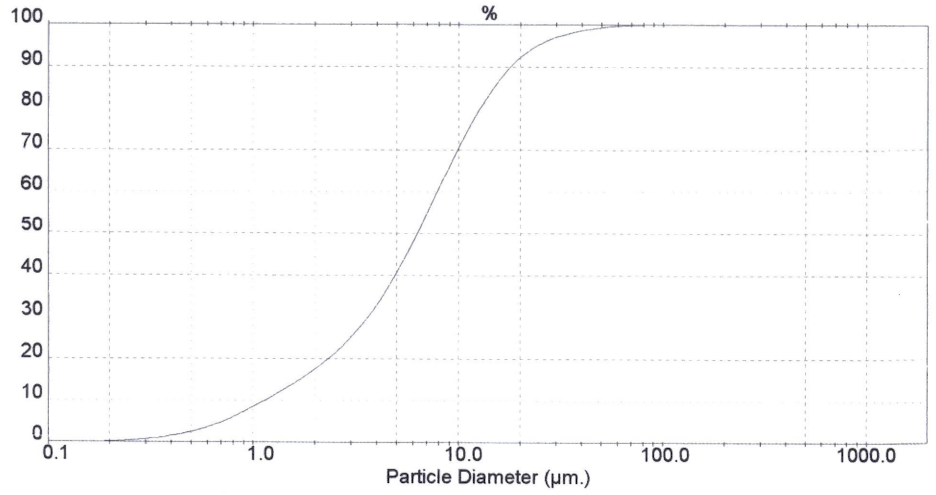
Source: Analysed

Measured on: 06 Jul 2005 13:15

Presentation: 2OHD
Very Polydisperse model — Volume Result — Focus = 45 mm.

Residual = 0.189 % — Concentration = 0.012 % — Obscuration = 22.80 %
d (0 .5) = 6.29 µm — d (0.1) = 1.13 µm — d (0.9) = 17.95 µm
D [4, 3] = 8.57 µm — Span = 2.68
Sauter Mean (D[3,2]) = 2.74 µm — Mode = 7.59 µm
Specific Surface Area = 0.8266 sq. m. / gm — Density = 2.65 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.05	0.04	0.12	0.04
0.12	0.07	0.15	0.11
0.15	0.11	0.19	0.22
0.19	0.20	0.23	0.42
0.23	0.32	0.28	0.73
0.28	0.48	0.35	1.21
0.35	0.71	0.43	1.92
0.43	1.02	0.53	2.93
0.53	1.42	0.65	4.36
0.65	1.90	0.81	6.25
0.81	2.30	1.00	8.55
1.00	2.49	1.23	11.05
1.23	2.56	1.51	13.61
1.51	2.86	1.86	16.47
1.86	3.36	2.30	19.84
2.30	4.06	2.83	23.89
2.83	5.04	3.49	28.93
3.49	6.25	4.30	35.18
4.30	7.61	5.29	42.79
5.29	8.82	6.52	51.61
6.52	9.40	8.04	61.01
8.04	9.18	9.91	70.19
9.91	8.28	12.21	78.47
12.21	6.94	15.04	85.41
15.04	5.30	18.54	90.71
18.54	3.58	22.84	94.29
22.84	2.27	28.15	96.56
28.15	1.42	34.69	97.97
34.69	0.92	42.75	98.89
42.75	0.58	52.68	99.48
52.68	0.35	64.92	99.83
64.92	0.17	80.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.2b
Serial No. 32908-26

06 Jul 05 13:15

Şekil EK-7.1. Lazer kırınım analiz sonucunu gösteren bir örnek

ÖZGEÇMİŞ

31.03.1973 tarihinde İstanbul–Bakırköy'de dünyaya geldi. İlk öğrenimini İstanbul'da Yeşiltepe İlkokulunda, orta öğrenimini Niğde-Ulukışla Kasabasında, lise öğrenimini ise Antalya – Manavgat Endüstri Meslek Lisesi Yapı Bölümünde tamamladı. 1996 senesinde Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünden mezun oldu. Mezuniyetinin ardından 6 ay süreyle ASKİ kanal yatırım şubesinde saha kontrol teknisyeni olarak görev yaptı. 1997 senesinde Uzman olarak Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü, Zemin Mekaniği Laboratuvarında göreve başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir. 1999 senesinde Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisansını tamamladı ve 2000 senesinde yine Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Doktora eğitimine başladı.