

TANE ŞEKLİNİN HİDROMETRE DENEY SONUÇLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Mustafa ÖZER^{a*}, Mehmet ORHAN^a

^aGazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü 06500, Beşevler/ANKARA

Özet

Bu çalışmada, disk şeklindeki tanelerin sıvı içerisindeki çökme hızını veren eşitlikler kullanılarak tane büyüklüğü dağılımları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar standart hidrometre deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçta, Stokes yasasıyla levhamsı şekle sahip tanelerin çapının olduğundan daha küçük hesaplandığı ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, standart hidrometre deneyinin kil yüzdesini gerçekte olduğundan daha fazla hesapladığı da belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Stokes yasası, hidrometre deneyi, tane şekli, kil yüzdesi

EFFECT OF PARTICLE SHAPE ON THE HYDROMETRE TEST RESULTS

Abstract

In this study particle size distribution is determined with equations related with sedimentation rate of disk shaped particles in a liquid and obtained results are compared with standard hydrometer test results. In a result, it is determined that Stokes' law underestimate the diameter of disk-shaped particle. Besides, it is also determined that standard hydrometer test overestimates the clay percentage.

Key words: Stokes law, hydrometer test, particle shape, clay content

1. Giriş

Küre şeklindeki bir tanenin durgun bir sıvı içerisindeki çökme hızıyla tane büyüklüğü arasındaki matematiksel ilişki ilk kez George Gabriel Stokes tarafından ortaya konmuştur. Bu matematiksel ilişki bir çok kaynakta “Stokes Yasası” veya “Stokes Eşitliği” olarak adlandırılmaktadır. Stokes yasasına göre, özgül ağırlığı taneyle aynı olup sıvı içerisinde taneyle aynı hızda çöken eşdeğer kürenin çapı tane çapı olarak hesaplanmakta ve bir çok kaynakta buna “Stokes Çapı” denilmektedir [1]. Zemin mekaniği uygulamalarında 0.075 mm’den küçük zeminlerin tane büyüklüğü dağılımı da

* İletişim kurulacak yazar: Tel: 0312 202 8648, e-posta: ozerm@gazi.edu.tr

Stokes yasasına dayanan hidrometre ve pipet gibi çökeltme deneyleriyle belirlenmektedir. Ancak, Stokes yasasıyla zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde bazı kabuller yapılmakta olup, bu kabuller ve açıklamaları aşağıda sıralanmıştır.

a) *Tanelerin küre şeklinde olduğu kabul edilmektedir:* Buna rağmen, gerçek zemin tanelerinin ve özellikle kil minerallerinin küre şeklinde olmadığı bilinmektedir. Örneğin, halloyizit silindirik, montmorillonit ve illit yapraksı, kaolinit ise levhamsı şekildedir [2].

b) *Bütün tanelerin özgül ağırlığının aynı olduğu kabul edilmektedir:* Zeminler genellikle farklı minerallerin bileşiminden meydana gelmekte ve zemin minerallerinin özgül ağırlıkları da birbirinden farklı olabilmektedir [2]. Buna rağmen, tane çaplarının ve yüzdelerinin hesaplanmasında sadece tek bir özgül ağırlık değeri kullanılabilir. Bu nedenle, deneye tabi tutulan zemin örneğinin özgül ağırlığının tek bir değer olduğunun kabul edilmesi gerekmektedir. Ancak, zeminlerin özgül ağırlığı genellikle 2.55 ile 2.70 arasında değişmekte ve özgül ağırlığın bu aralıktaki değişimi Stokes yasasıyla hesaplanan tane çaplarını ve yüzdelerini önemli ölçüde etkilememektedir [3].

c) *Tanelerin durgun su içerisinde çökmesinin laminar akım koşullarına uygun olduğu ve türbülans meydana gelmediği kabul edilmektedir:* Süspansiyonda türbülans veya laminar akım koşullarının oluşması tane büyüklüğüne ve tanelerin sıvı içerisindeki çökme hızına bağlıdır ve Reynolds sayısı (Eş. 1) ifade edilmektedir [4].

$$R_e = \frac{\rho_f U D}{\eta} \quad (1)$$

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 küçük olması gerekir [4]. Hidrometre deneyinde örnekler 0.075 mm elekten elendiği için, bu varsayım bir sorun oluşturmamaktadır. Ayrıca mikrometre düzeyindeki taneler için laminar akım varsayımının genellikle doğru olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır (örneğin Myseles [5] ve Clift vd. [6]).

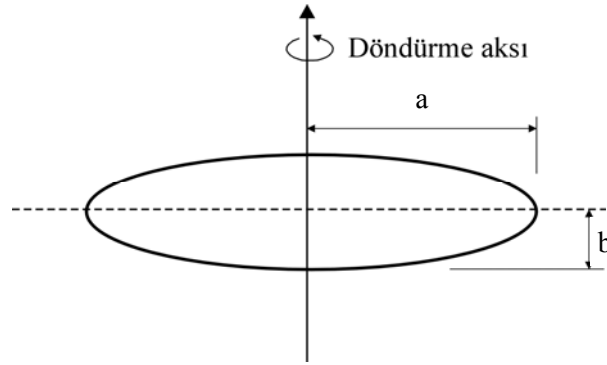
d) *Tanelerinin çökme sırasında birbirlerinden ve çöktürme silindirinin kenarlarından etkilenmedikleri kabul edilmektedir:* Deneyde kullanılan örnek miktarı ile bu durum kontrol edilebilmektedir. 1 litre süspansiyonda 50 gramdan daha fazla örnek kullanmadıkça tanelerin birbirinden etkilenmesinin ve çöktürme silindirinin çevreleme etkisinin önemli olmadığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır (örneğin, Weatherly [7]). Hidrometre deneyinde 30 – 35 g numune kullanıldığından, bu varsayım da herhangi bir sorun oluşturmamaktadır.

e) *Taneler çok kısa bir sürede ve mesafede sabit hıza ulaştıkları ve çökme hızlarının çok düşük olduğu kabul edilmektedir* [1].

Bu kabullerden deney sonuçları üzerinde en çok etkili olanı, bütün tanelerin küre şeklinde olduğunun kabul edilmesidir. Bu çalışmada, konu üzerine yapılmış başlıca kuramsal çalışmalardan yararlanılarak tane şeklinin ve küre kabulünün hidrometre deney sonuçları üzerindeki etkisi deneylerle ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. Önceki Çalışmalar

Küre kabulünün hidrometre deney sonuçları üzerindeki etkisini inceleyen en güncel kuramsal çalışmalardan birisi Lu vd. [8] tarafından yapılmıştır. Lu vd. [8] kaolinit gibi levhamsı şekle sahip tanelerin disk şeklindeki elipsoide benzetilerek analiz edilebileceğini ifade etmiştir. Lu vd. [8]'nin elipsoit tanımlaması Şekil 1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Elipsoidin şematik görünümü (Elipsoidin kağıt düzlemine dik boyutu “a” ile aynıdır ve düşey eksen etrafında döndürüldüğünde üç boyutlu görüntü elde edilmektedir) [8].

Lu vd. [8], elipsoit şeklindeki tanelerin hidrodinamik özelliklerinin akışkanlar mekaniğinin klasik konularından birisi olduğunu ifade etmiş ve Barr [9], Rouse [10] ve Payne ve Pell [11] tarafından disk şeklindeki elipsoit tanelerin su içerisindeki çökme hızlarının Eşitlik 2'de görüldüğü gibi tanımlandığını belirtmişlerdir. Eşitlik 2, elipsoit şeklindeki tanelerin rastgele konumda çöktükleri kabulüne dayanmaktadır.

$$U = \frac{2}{9} \frac{a^2}{\Delta_a} \frac{E(\rho_s - \rho_w)g}{\eta} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de U: elipsoidin çökme hızını (cm/sn), a: elipsoidin yarıçapını (cm), b: elipsoidin yarı kalınlığını (cm), ρ_s : elipsoit ile aynı hızda çöken kürenin yoğunluğunu (g/cm^3), ρ_w : suyun yoğunluğunu (g/cm^3), g: yerçekimi ivmesini (981 cm/sn^2), η : suyun viskozitesini ($g/cm.sn$), E: elipsoidin şekil oranını (kalınlık/çap) ifade etmektedir. Δ_a ise Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır (Δ_a 'nın hesaplanmasında radyan değeri kullanılmalıdır).

$$\Delta_a = \frac{\sqrt{1-E^2}}{\cos^{-1} E} \quad (3)$$

Küre şeklindeki tanenin su içerisindeki çökme hızını veren Stokes yasası ise Eşitlik 4'de görüldüğü gibidir.

$$U = \frac{2}{9} \frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\eta} a^2 \quad (4)$$

Lu vd. [8], elipsoit şeklindeki tanelerin çökme hızını veren Eşitlik 2 ile küre şeklindeki tanelerin çökme hızını veren Stokes eşitliğini (Eş.4) birbirine eşitleyip, su içerisinde aynı hızda çöken küreyle disk şeklindeki elipsoidin yarıçapları arasındaki ilişkiyi elde etmişlerdir. Bu ilişki Eşitlik 5'de görüldüğü gibidir.

$$a = \frac{a^*}{\sqrt{\frac{E}{\Delta_a}}} \quad (5)$$

Eşitlik 5'de, a elipsoidin yarıçapını, a* ise elipsoit ile aynı hızda çöken eşdeğer kürenin yarıçapını ifade etmektedir. Eşitlik 5 kullanılarak, tanenin şekil oranını bilmek koşuluyla Stokes yasasıyla hesaplanan eşdeğer küre çapını disk çapına dönüştürmek mümkündür.

Disk şeklindeki tanelerin sıvı içerisindeki çökme hızlarını inceleyen diğer bir araştırmacı ise Lerman vd. [12]'dir. Lerman vd. [12], disk şeklindeki bir tanenin bir sıvı içerisindeki çökme hızını tanenin çökme konumuna bağlı olarak tanımlamış ve disk şeklindeki tanenin geniş yüzeyi boyunca çökmesi halinde çökme hızının Eşitlik 6 ile hesaplanabileceğini belirtmiştir. Lerman vd. [12], disk şeklindeki tanenin dar kenarı boyunca çökmesi halinde ise çökme hızının Eşitlik 6'da 0.238 yerine 0.356 konularak hesaplanabileceğini ifade etmiştir.

$$U = \frac{0.238 g (\rho_s - \rho_f) a^{1/3} r_e^2}{\eta h} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da, U: diskin çökme hızını (cm/sn), g: yerçekimi ivmesini (981 cm/sn²), ρ_s : tane yoğunluğunu (g/cm³), ρ_f : sıvının yoğunluğu (g/cm³), a: diskin yarıçapını (cm), r_e : disk ile aynı hacimdeki kürenin yarıçapını (cm), η : sıvının viskozitesini (g/cm.sn), h: ise diskin kalınlığını (cm) göstermektedir.

Allen [13], düzensiz şekle sahip tanelerin laminar akım bölgesinde rastgele konumda çöktüğünü ve hesaplanan eşdeğer çapının çökme konumuna bağlı olduğunu ifade etmiştir. Adı geçen araştırmacı, düzensiz şekle sahip bir tanenin Stokes yasasıyla

hesaplanan eşdeğer küre çapının, çeşitli konumlarda çöktüğünde hesaplanacak tane çaplarının ortalaması olduğunu belirtmiştir. Lu vd. [8]'nin önerdiği eşitlik (Eş. 2) tanelerin rastgele konumda çöktükleri varsayımına dayandığından bu çalışmada Lu vd. [8]'nin önerdiği eşitlik dikkate alınmıştır.

3. Deneysel Çalışma

3.1. Malzeme ve Yöntem

Deneysel çalışmada, indeks özellikleri Çizelge 1'de görülen zemin örneği kullanılmıştır.

Çizelge 1. Üzerinde çalışılan zemin örneğin indeks özellikleri

Likit limit (%)	Plastik limit (%)	Plastisite indisi (%)	40 no.lu elekten geçen (%)	200 no.lu elekten geçen (%)	Zemin sınıfı*
88.8	33.6	55.2	100	99.2	CH

*USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi)'ye göre

Likit limit ve plastik limit deneyleri ASTM 4318 (2000) [14]'e, elek analizi deneyi ise ASTM D 422 (1998) [15]'ye göre yapılmıştır. Likit limit deneyinin yapılmasında ASTM tipi Casagrande likit limit aleti, Hidrometre deneyinde ise ASTM tipi 151 H hidrometresi kullanılmıştır.

3.2. Deneysel Bulgular ve Tartışma

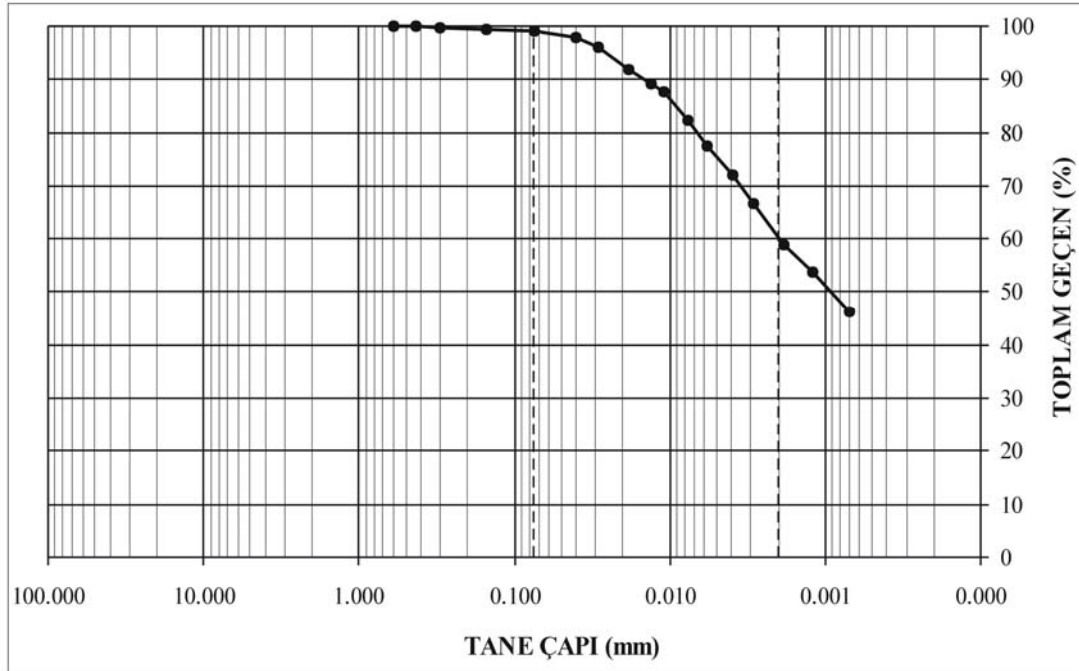
Zemin örneğine ASTM D 422 (1998)'ye göre standart hidrometre deneyi yapılmış ve sonuçları Çizelge 2'de, tane büyüklüğü dağılım eğrisi ise Şekil 2'de verilmiştir. Standart hidrometre deneyinde tane çapları Stokes yasasına, dolayısıyla da küre varsayımına göre hesaplanmıştır. Kürenin şekil oranı ise $E = 1$ 'dir.

Standart hidrometre deneyiyle Stokes yasasına göre hesaplanan tane çaplarının Lu vd. [8]'nin önerdiği eşitlikle (Eş. 5) disk çapına dönüştürülebilmesi için tanelerin ortalama şekil oranının (kalınlık/çap) bilinmesi gerekmektedir. Zemin örneğinin yaklaşık şekil oranının belirlenebilmesi için örneğin 200 no.lu elekten geçen kısmının SEM (Scanning Electron Microscope) fotoğrafı çekilmiştir (Şekil 3).

Şekil 3'de verilen SEM fotoğrafından tanelerin genellikle levhamsı şekilde olduğu görülmektedir. Taneleri disk şekline benzeterek analiz edebilmek için tanelerin yaklaşık şekil oranının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için, SEM fotoğrafında net olarak görülen tanelerden birisinin çapının yaklaşık 15 μm , diğerinin ise yaklaşık 8 μm olduğu kabul edilmiştir. SEM fotoğrafı iki boyutlu görüntü kaydettiğinden, tanelerin kalınlıklarını saptamak mümkün olmamıştır.

Çizelge 2. ASTM D 422 (1998)'ye göre yapılan hidrometre deneyinin sonuçları

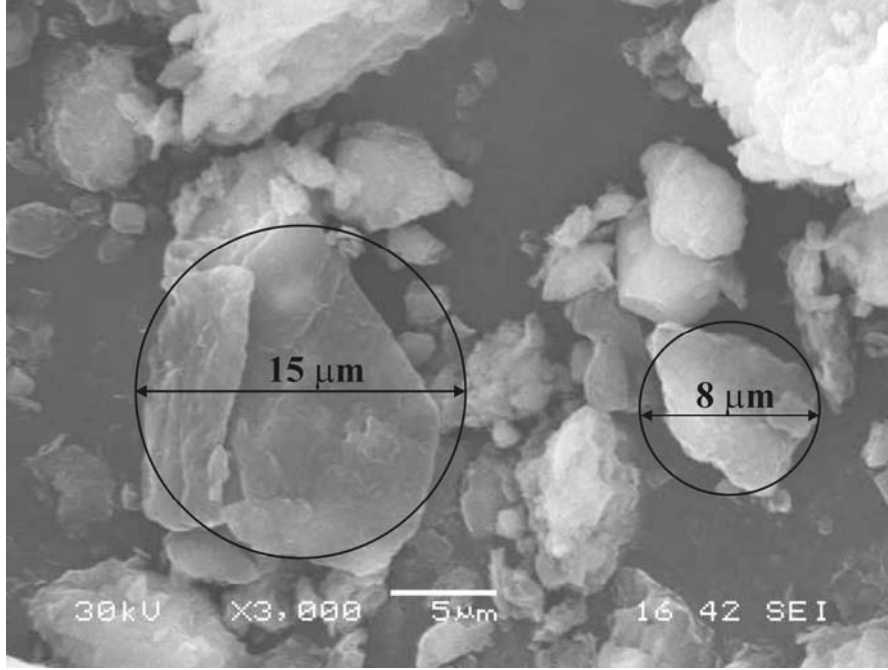
Tane çapı, "D" (mm)	"D" çapından küçük olan tanelerin yüzdesi (%) P
0.040	97.8
0.029	96.0
0.018	91.8
0.013	89.1
0.011	87.7
0.008	82.2
0.006	77.6
0.004	72.1
0.003	66.6
0.002	58.8
0.001	53.7



Şekil 2. Standart hidrometre deneyinden elde edilen tane büyüklüğü dağılım eğrisi.

Ancak, yaklaşık bir şekil oranı belirleyebilmek için, tahmin yürütülerek 15 µm çapındaki tanenin kalınlığının 2 µm veya 3 µm olabileceği kabul edilmiştir. Tanenin kalınlığı 2 µm kabul edildiğinde, şekil oranı $E = 0.133$ ve 3 µm kabul edildiğinde ise 0.2 olarak hesaplanmıştır. 8 µm çapındaki tanenin kalınlığının ise 0.4 µm veya 1 µm

olabileceği kabul edilerek ve şekil oranları sırasıyla $E = 0.05$ ve 0.125 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Deneyde kullanılan örneğin SEM fotoğrafı.

Yukarıda yapılan kabullere dayanarak zemin örneğinin şekil oranının yaklaşık 0.05 ile 0.2 arasında değiştiği öne sürülebilir. Bu durumda, ortalama bir şekil oranı belirlemek yerine, şekil oranının sırasıyla 0.05 , 0.1 ve 0.2 olduğunu kabul ederek Stokes yasasıyla hesaplanan tane çapları Eşitlik 3 ve 5 kullanılarak disk çapına dönüştürülmüştür. Dönüştürme işlemine örnek olarak $E = 0.05$ için yapılan hesaplar aşağıda gösterilmiştir. $E = 0.1$ ve 0.2 için yapılan tane çapı dönüşümlerinde de benzer yol izlenmiştir.

$E = 0.05$ için küre çapının disk çapına dönüştürülmesi:

$$\text{Eşitlik 3 ile: } \Delta_a = \frac{\sqrt{1-E^2}}{\cos^{-1} E} = \frac{\sqrt{1-0.05^2}}{\cos^{-1} 0.05} = 0.6567$$

$$\text{Eşitlik 5 ile: } a = \frac{a^*}{\sqrt{\Delta_a}} = \frac{a^*}{\sqrt{0.6567}} = \frac{a^*}{0.2759239}$$

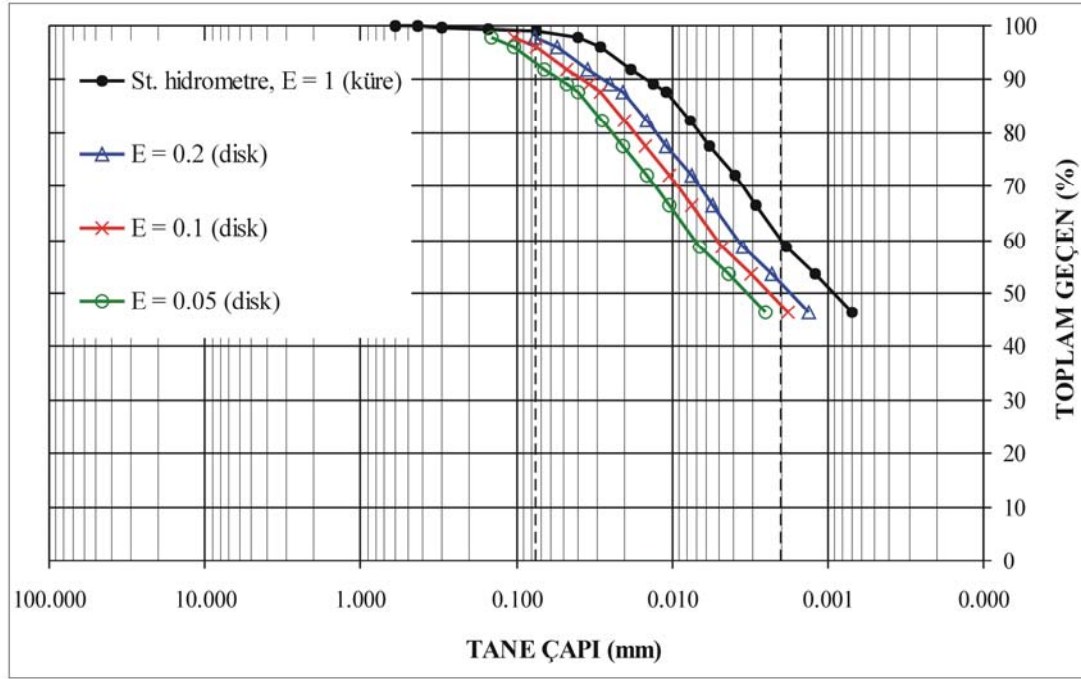
Yukarıdaki eşitliklerde, a^* : Stokes eşitliği ile hesaplanan küre çapını, a ise küre ile aynı hızda çöken ve şekil oranı “ E ” olan disk şeklindeki tanenin çapını ifade etmektedir.

Yukarıdaki işlemlere göre, standart hidrometre deneyiyle hesaplanan tane çaplarının teker teker 0.2759239 katsayısına bölünmesiyle şekil oranı $E=0.5$ için disk çaplarının hesaplanabileceği açıktır. Benzer işlemler $E = 0.1$ ve 0.2 için de tekrar edildiğinde dönüştürme katsayıları sırasıyla 0.3844526 ve 0.5287111 elde edilmiştir. Standart hidrometre deneyiyle hesaplanan tane (küre) çapları, yukarıda hesaplanan dönüştürme katsayılarıyla teker teker bölünerek küre çapına karşılık gelen disk çapları hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 3’de, tane büyüklüğü dağılım eğrileri ise Şekil 4’de verilmiştir.

Çizelge 3. Çeşitli şekil oranlarına göre hesaplanan tane çapları

Küre çapı (mm) E = 1	Küreyle aynı hızda çöken eşdeğer disk çapı (mm)		
	E = 0.2	E = 0.1	E = 0.05
0.040	0.076	0.105	0.146
0.029	0.054	0.074	0.104
0.018	0.035	0.048	0.066
0.013	0.025	0.034	0.048
0.011	0.021	0.029	0.040
0.008	0.015	0.020	0.028
0.006	0.011	0.015	0.021
0.004	0.007	0.010	0.014
0.003	0.006	0.007	0.011
0.002	0.003	0.005	0.007
0.001	0.002	0.003	0.004

Çizelge 3’den görüldüğü gibi, şekil oranı azaldıkça küre çapıyla disk çapı arasındaki fark artmaktadır. Çizelge 3’de verilen sonuçlardan kil boyutu ($< 2\mu\text{m}$) göz önüne alınacak olursa, Stokes eşitliğiyle, kil boyutundan daha büyük olan tanelerin de kil boyutundaymış gibi hesaplandığı görülmektedir. Stokes yasasında, su içerisinde taneyle aynı hızda çöken eşdeğer kürenin çapı tane çapı olarak hesaplanmaktadır. Disk şeklindeki (levhamsı) taneler küre şeklindeki tanelere göre su içerisinde daha yavaş çöktüklerinden, $2\mu\text{m}$ ’den daha büyük olan disk şeklindeki taneler de Stokes eşitliğiyle $2\mu\text{m}$ çapındaymış gibi hesaplanmıştır. Örneğin, şekil oranı $E = 0.2$ ve çapı $3\mu\text{m}$, şekil oranı $E = 0.1$ ve çapı $5\mu\text{m}$ ve şekil oranı $E = 0.05$ ve çapı $7\mu\text{m}$ olan disk şeklindeki taneler su içerisinde $2\mu\text{m}$ çapındaki küreyle aynı hızda çöktüklerinden, Stokes eşitliğiyle $2\mu\text{m}$ çapında küreymiş gibi hesaplanmıştır (Çizelge 3). Lu vd. [8], iyi kristallenmiş tipik bir kaolinit kil mineralinin şekil oranının yaklaşık 0.01 olduğunu ifade etmiştir. Şekil oranı 0.01 olan ve su içerisinde küreyle aynı hızda çöken disk şeklindeki tanenin çapı yaklaşık $16\mu\text{m}$ olarak hesaplanır.



Şekil 4. Küre ve disk varsayımıyla hesaplanan tane büyüklüğü dağılım eğrileri.

Standart hidrometre deneyiyle zemin örneğinin kil yüzdesi % 58.8 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 2). Zemin örneğinin, şekil oranı 0.2 olan levhamsı tanelerden meydana geldiği kabul edildiğinde ise kil yüzdesi yaklaşık % 52 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4). Şekil oranı küçüldükçe bu fark daha da artmaktadır. Örneğin şekil oranı 0.01 kabul edildiğinde kil yüzdesi yaklaşık % 40 olarak hesaplanmıştır. Bu örnekler, standart hidrometre deneyiyle levhamsı tanelerden meydana gelen bir numunenin kil yüzdesinin gerçekte olduğundan daha fazla hesaplandığını göstermektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Stokes yasasına dayanan hidrometre yöntemiyle hesaplanan tane çapları tane şeklinden kuvvetle etkilenmektedir.
- Stokes yasasına dayanan hidrometre yöntemiyle çapı 2 μm olarak hesaplanan levhamsı tanelerin gerçek çapı, şekil oranına bağlı olarak değişmekle birlikte 2 μm 'den daha büyüktür.
- Stokes yasasına dayanan hidrometre yöntemiyle levhamsı tanelerden oluşan zemin örneklerinin kil yüzdesi gerçekte olduğundan daha yüksek hesaplanmaktadır.

Elde edilen bu sonuçların, tanelerin disk şeklinde oldukları kabulüne dayanmaktadır. Gerçek zemin taneleri ise belirli bir geometrik şekilden uzaktır. Ancak, levhamsı veya yapraksı tanelerin küreden çok disk şekline daha yakın olduğu da açıktır. Bu nedenle, disk varsayımının küre varsayımına göre daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir. Bu sonuçlara göre kil yüzdesinin önemli olduğu çalışmalarda, eğer

imkan dahilindeyse numunenin SEM fotoğrafları çekilerek yaklaşık bir şekil oranı belirlenmesinin ve bu şekil oranına göre disk varsayımıyla tane çaplarının ve kil yüzdesinin yeniden hesaplanmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

SEM fotoğraflarının çekilmesindeki katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Malzeme A.B.D.'dan Prof. Dr. Süleyman TEKELİ'ye, Dr. Ahmet GÜRAL ve Dr. Bülent BOSTAN'a, bu çalışmanın yürütülmesi için 07/2004-22 proje kod numarasıyla maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Head, K. H., Manuel of Soil Laboratory Testing, Volume 1, Second Edition, Great Britain, John Wiley & Sons. Inc. 1992.
- [2] Mitchell, J. K., Fundamentals of Soil Behavior, U.S.A., John Wiley & Sons, Inc. 1976.
- [3] Özer, M., Lazer kırınım yöntemi ile zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi ve hidrometre yöntemi ile karşılaştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [4] Bardet, J. P., Experimental Soil Mechanics, U.S.A, Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [5] Mysels, K. J., Introduction to Colloid Chemistry, New York, Interscience Publishers, 1959.
- [6] Clift, R., Grace, J. R., and Webber, M. E., Bubbles, Drops and Particles, New York, Academic Press, 1978.
- [7] Weatherly, W. C., The hydrometer method determining the grain size distribution curve of soils, Master of Science thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1929.
- [8] Lu, N., Ristow, G. H. and Likos, W. J., The accuracy of hydrometer analysis for fine-grained clay particles, Geotechnical Testing Journal, 2000; 23 (4): 487 – 495.
- [9] Barr, G., A Monograph of Viscometer, London, Oxford University Press, 1931.
- [10] Rouse, H., Elementary Mechanics of Fluids, New York, John Wiley and Sons, 1946.
- [11] Payne, L.E. and Pell, W.H., Journal of Fluid Mechanics, 1960; 7: 529 – 549
- [12] 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, New York, Plenum Press, 1974.
- [13] Allen, T., Particle Size Measurement, fifth edition, London, Chapman&Hall, 1997.

- [14] ASTM D 4318 (American Society for Testing and Materials) Standard test method for Liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, Annual Book of ASTM Standards, 2000.
- [15] ASTM D 422 (American Society for Testing and Materials), Standard test method for particle-size analysis of soil, Annual Book of ASTM Standards, 1998.