

اثر روش اندازه‌گیری و ابعاد و شکل محفظه مورد استفاده در روش لغزشی بر زاویه استقرار ذرات خاک

بیژن راعی^{1*}، حسین اسدی²، فرخ اسدزاده³

تاریخ دریافت: 93/02/09 تاریخ پذیرش: 94/11/12

¹- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

²- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

³- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: bijanraei@yahoo.com

چکیده

زاویه استقرار ذرات، از پارامترهای مهم در تعیین تنش برشی بحرانی برای شروع حرکت ذرات طی فرآیند فرسایش محسوب می‌شود. روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره وجود دارد که نتایج این روش‌ها اغلب متفاوت از یکدیگر می‌باشند. دو روش لغزشی و تشکیل توده از روش‌های پرکاربرد اندازه‌گیری این مشخصه می‌باشند. در این پژوهش زاویه استقرار ذرات در 6 کلاس اندازه‌ای از یک نمونه خاک و یک نمونه شن به دو روش لغزشی و تشکیل توده اندازه‌گیری و مقایسه شد. برای تعیین نقش ابعاد جعبه در روش لغزشی 11 جعبه متفاوت از نظر شکل و ابعاد مورد استفاده قرار گرفت. اثر تغییر ابعاد محفظه بر مقدار زاویه استقرار در سطح 0/1 درصد ($p < 0.001$) معنی‌دار بود به طوری که افزایش عرض و ارتفاع محفظه سبب افزایش مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه استقرار گردید و همچنین افزایش طول محفظه سبب کاهش مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه استقرار گردید. این تغییرات به گونه‌ای بود که با افزایش نسبت جرم ذرات به سطح مقطع محفظه، زاویه استقرار اندازه‌گیری شده کوچک‌تر بود. اثر شکل محفظه بر مقدار زاویه استقرار نیز در سطح 0/1 درصد ($p < 0.001$) معنی‌دار بود. مقایسه نتایج روش لغزشی با روش تشکیل توده نشان داد که زاویه استقرار به دست آمده به روش لغزشی به طور میانگین در حدود 10 درجه بیشتر از مقدار حاصله به روش تشکیل توده است. با توجه به نتایج می‌توان به ضعف روش‌های اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره اشاره نمود و به نظر می‌رسد که نیاز است در روش‌های اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره تجدیدنظر صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: ذرات خاک، ذرات شن، روش تشکیل توده، روش لغزشی، زاویه استقرار ذره

The Effect of Measurement Method, Size and Shape of Box in Sliding Method on the Angle of Repose of Soil Particles

B Raei^{*1}, H Asadi², F Asadzadeh³

Received: 29 April 2015

Accepted: 01 February 2016

¹- Ph.D Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²- Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural, University of Tehran, Karaj, Iran

³- Assist. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural, Urmia University, Urmia, Iran

*Corresponding Author, E-mail: bijanraei@yahoo.com

Abstract

The angle of repose of soil particles is an important factor for determining critical shear stress for initiation of soil particles motion during the erosion process. There are different methods for measuring the angle of particle repose and the result of each method is somewhat different from those of the others. Sliding and fixed-base piling methods are the two most common methods in the literature. In this study, 6 different size classes of a soil and a fluvial sand samples were subjected to the measurement of angle of particle repose using sliding and fixed-base piling methods. Sliding method was performed using 11 boxes of different sizes and shapes. Statistical analysis indicated that the effect of box size was significant ($P < 0.001$) on the measured angle of particle repose. Increasing box width and depth resulted in higher values for the angle of repose, but increasing the box length has resulted in lower values for it. It seems that the increasing of the ratio of particle weight (amount) to the box cross section, leads to a decrease in AOR. The shape of box significantly affected the angle of particle repose ($P < 0.001$). The comparison of the two methods indicated that the angle of particle repose measured by the fixed-base piling method is about 10 degrees less than that of the sliding method. According to the results, the current methods for measuring the angle of particle repose seems to have shortcomings and there is a need to revise the measuring methods.

Keywords: Angle of repose; Fixed-Base piling method; Sand particle; Sliding method; Soil particles.

زاویه استقرار ذره برابر با زاویه طبیعی سطح آزاد کپه توده جامد با سطح افق هست. این پارامتر یکی از مهم-ترین خواص پودرها و ذرات کروی است که نشان‌دهنده اصطکاک بین ذرات است و در علوم مختلف برای توصیف حرکت توده پودرها و ذرات کروی استفاده می‌شود (ایلجی و ژآو 2008). زاویه استقرار برای توصیف چگونگی جریان پودرها و مواد مدور نسبت به سیالیت (ژآو 2002)، نزول ناگهانی پودرها (فرتِه و

مقدمه

زاویه استقرار ذره¹ یکی از مهم‌ترین پارامترهای ماکروسکوپی در توصیف رفتار ذرات کروی هست (چین و وانگ 1999) و در علوم مختلفی از قبیل فرسایش (جولین 1995، دوآن و همکاران 2001)، ساخت پلیمر، مهندسی استخراج، ذوب فلزات و غیره کاربرد دارد (چو و همکاران 2010). بر اساس تعریف،

¹ - Angle of repose

بحرانی برای بستر یک شکل و همگن رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$[4] \quad (t_{cr})^* = \frac{2}{(C_D)_{cr}} \frac{1}{a < f^2 (z/z_0) > |1 + (F_L/F_D)_{cr} \tan f_0|}$$

که در آن، F_D نیروی کشندگی، F_L نیروی بالابردگی، β شیب بستر و f_0 زاویه استقرار ذره، Z ارتفاع بالای بستر، Z_0 پارامتر زبری کف، $f(z/z_0)$ تابع نیمرخ سرعت، C_D ضریب کشندگی و α پارامتر نشان‌دهنده هندسه ذره هست ($a = 1.5$ برای ذرات کروی) (ویبرگ و اسمیت 1985). مورگان (2005) زاویه استقرار ذرات خاک را از ویژگی‌های مهم آن در قابلیت شروع به حرکت ذرات توسط جریان رواناب معرفی نموده است. بررسی منابع نشان می‌دهد که روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری زاویه استقرار ذرات وجود دارد که داده‌های هر روش نیز تا حدودی متفاوت بوده و در اغلب موارد قابل مقایسه نیستند (برآون و ریچاردز 1970، ونگ و همکاران 2010). علاوه بر این، اغلب این روش‌ها برای تعیین زاویه استقرار مواد پودری و دانه‌های غلات معرفی شده و در مورد تعیین زاویه استقرار ذرات خاک یا شن تحقیقات کمی صورت گرفته است. به‌طور معمول برای تعیین زاویه استقرار ذره از چهار روش استفاده می‌شود. در روش اول، پودر (و یا هر ماده دیگر) به داخل قیفی جاری می‌شود که در ارتفاع ثابتی از بالای سطح صاف قرار دارد. در روش دوم، قیف ابتدا به وسیله پودر پر می‌شود و سپس قیف به تدریج به سمت بالا جابجا شده تا نمونه به بیرون قیف جریان پیدا کند. در هر دو روش، زاویه‌ای که توده تشکیل شده با سطح افقی ایجاد می‌کند را برابر با زاویه استقرار ذره در نظر می‌گیرند. در این دو روش نکته مهم این است که ذرات در قیف به راحتی حرکت نکنند. بنابراین اندازه‌گیری زاویه استقرار ذراتی که دارای چسبندگی هستند با این دو روش دارای محدودیت‌هایی است. علاوه بر این، در این روش‌ها ذرات نباید در معرض جریان هوا باشند. از دیگر محدودیت‌های این روش‌ها این است که اندازه-

همکاران (1996) و چینه‌بندی² (ماکس 1997، ایلجی و ژآو 2008) و جداسازی³ (جولین و همکاران 1993) نیز به‌کار می‌رود.

یکی از کاربردهای پارامتر زاویه استقرار ذرات در علوم خاک استفاده از آن در روابط مربوط به اصلاح اثر شیب در تنش برشی بحرانی (جولین 1995، دوآن و همکاران 2001) هست. به‌علت نقشی که وزن ذرات در برابر حرکت بازی می‌کند، تنش برشی بحرانی برای فرسایش به شیب بستر وابسته است. به‌همین دلیل لازم است که تنش برشی برای ذراتی که بر روی سطح شیب‌دار قرار دارند، اصلاح شوند (مودی و همکاران 2005). بنابراین زمانی که اندازه‌گیری تنش برشی بحرانی ذرات در شیب‌های مختلف انجام می‌گردد، می‌بایست تنش‌های برشی بحرانی به‌دست‌آمده به تنش برشی بحرانی ذره در سطح افقی تبدیل گردد. رابطه تنش برشی که بر سطح شیب‌دار به‌دست‌آمده است با تنش برشی در سطح افقی به‌صورت زیر هست:

$$[1] \quad t_{cr} = \gamma_1 \gamma_2 t_{cr,0}$$

که در آن؛ $t_{cr,0}$ تنش برشی بحرانی بر بستر افقی است و ψ_1 و ψ_2 به ترتیب ضریب اصلاح تنش برشی بحرانی برای شیب طولی و عرضی هست. این ضرایب با روابط زیر تعیین می‌گردند:

$$[2] \quad \gamma_1 = \frac{\sin(f \pm b_1)}{\sin f}$$

$$[3] \quad \gamma_2 = \left(\cos b_2 \frac{1 - \tan^2 b_2}{1 + \tan^2 b_2} \right)^{1/2}$$

که در آن؛ f زاویه استقرار ذره، β_1 و β_2 به ترتیب زاویه شیب طولی و عرضی هست (دوآن و همکاران 2001). همچنین زاویه استقرار ذره در روابط نظری مربوط به برآورد تنش برشی بحرانی به‌کار می‌رود. به‌عنوان نمونه برای محاسبه تنش برشی

² - Stratification

³ - Segregation

چاودهری و همکاران (2001) متوجه شدند که زاویه استقرار ذره به‌طور غیرخطی با مقدار رطوبت افزایش می‌یابد. هاهوت-اوهارا و همکاران (1999) دریافتند که ذرات درشت‌تر زاویه استقرار بزرگ‌تری دارند. گلدارت و همکاران (1990) خاطر نشان کردند که اندازه مشخصی برای ابزارآلات مورداستفاده در روش-های معمول اندازه‌گیری زاویه استقرار ذرات وجود ندارد و لازم است توافق عمومی برای بهترین طراحی اندازه تجهیزات انجام شود، و مقدار مناسب مواد مورداستفاده نیز باید مشخص شود. فنگ گوآنگ و همکاران (2009) طی تحقیقی به بررسی زاویه استقرار ذره از طریق روش استوانه چرخشی پرداختند و متوجه شدند که افزایش سرعت چرخش استوانه موجب افزایش اندازه زاویه استقرار و افزایش درجه پرتابی استوانه از ذرات موردنظر موجب کاهش اندازه زاویه استقرار می‌شود که البته این تأثیرات قابل توجه نبوده و می‌توان از آن چشم‌پوشی نمود. مرور منابع به‌روشنی نشان می‌دهد که علاوه بر نوع روش، متغیرهای موجود در هر یک از روش‌ها، برای نمونه سرعت چرخش استوانه در روش استوانه چرخشی و یا اندازه محفظه در روش لغزشی می‌تواند مقادیر زاویه استقرار ذرات را دستخوش تغییرات نماید. در روش لغزشی ابعاد محفظه (جعبه) به‌کار رفته توسط محققان مختلف متفاوت بوده و به ابعاد مشخص و ثابتی در منابع اشاره نشده است. تحقیق حاضر با هدف تعیین اثر ابعاد و شکل جعبه مورداستفاده در روش لغزشی بر زاویه استقرار اندازه-گیری شده در دو نمونه خاک و شن با اندازه‌های مختلف انجام شد. همچنین در تحقیق حاضر زاویه استقرار به‌روش تشکیل توده نیز اندازه‌گیری شده و نتایج دو روش مورد مقایسه قرار گرفت.

گیری دقیق زاویه استقرار در آن‌ها با دقت قابل قبول و قابل مقایسه دشوار بوده و نتایج دارای پراکندگی بسیاری هستند.

در روش سوم که به آن روش لغزشی می‌گویند، ابتدا ذرات در یک محفظه مکعب مستطیلی ریخته شده و هم-تراز با سطح محفظه می‌گردد، سپس صفحه‌ای که محفظه بر روی آن نصب شده است به آرامی شیب‌دار می‌شود تا ذرات به‌صورت معنی‌دار شروع به ریزش کنند. زاویه‌ای را که در این حالت صفحه شیب‌دار با سطح افقی ایجاد می‌کند برابر با زاویه استقرار ذره در نظر می‌گیرند. روش چهارم که به آن روش استوانه گردشی می‌گویند به این صورت است که ابتدا حجم معینی از ذرات در داخل استوانه‌ای (که به‌صورت افقی به محوری نصب شده است) ریخته شده و سپس با سرعت ثابتی به چرخش در می‌آید. پس از مدتی استوانه را ثابت کرده و زاویه‌ای که توده ذرات داخل استوانه با خط افق تشکیل می‌دهد را برابر زاویه استقرار ذره در نظر می‌گیرند (گلدارت و همکاران 2006، ونگ و همکاران 2010). خصوصیتی از ذرات از قبیل میزان رطوبت، شکل، اندازه، ویژگی اصطکاکی سطح ذرات یا توانایی تغییر شکل، تأثیر نسبتاً زیادی بر زاویه استقرار ذره دارد (ونگ و همکاران 2010، لوکاسزوک و همکاران 2001). ترین (1985) آزمایش-هایی را بر روی سه نوع ماده (گوی شیشه‌ای، گوی سربی و ماسه) برای کمینه کردن پیچیدگی اثر خصوصیات سطحی و شکل بر زاویه استقرار انجام داد. ایشان برای آزمایش‌های خود از چهار روش استفاده کرد که شامل توده تشکیل شده بر بستر ثابت، توده تشکیل شده با قیف ثابت بدون هیچ‌گونه دست-کاری، حرکت لغزشی توسط واژگونی جعبه مستطیلی شکل و روش استوانه چرخشی هست. نتایج نشان داد که زاویه استقرار ذره با استفاده از روش اول و دوم (زاویه استقرار ذره استاتیک) کم‌تر از روش سوم و چهارم (زاویه استقرار ذره دینامیک) هست.

مواد و روش‌ها

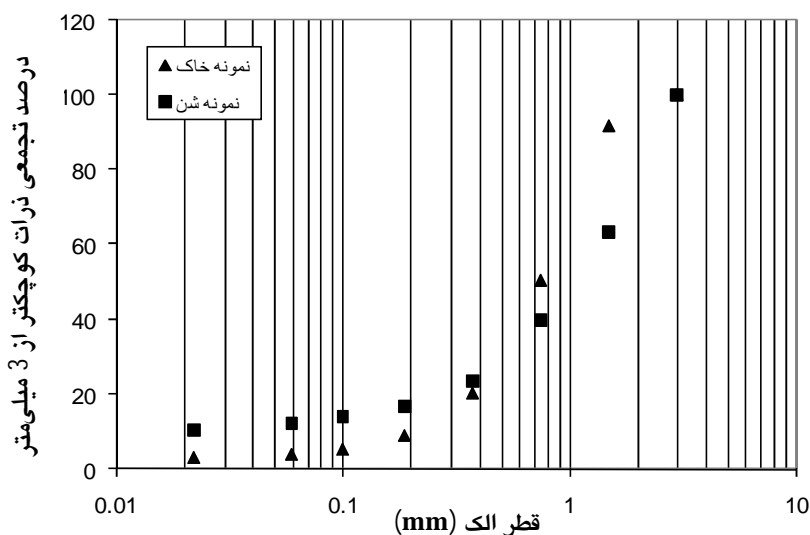
نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، دو نوع مواد خاکی به‌کاربرده شد. نمونه اول، خاکی با خاکدانه‌های پایدار بود که از جنگل-های منطقه سد تاریک در استان گیلان انتخاب شد و دیگری رسوبات نرم رودخانه‌ای (شن خالص) که توزیع اندازه ذرات آن تقریباً مشابه خاک اول بود. نمونه‌های شن و خاک به آزمایشگاه منتقل‌شده و در مجاورت هوا خشک گردیدند. نمونه خاک هوا خشک‌شده به آرامی کوبیده شده و از سری الک‌های 0/5، 1، 1/6، 2، 2/36، 0/125 و 0/053 میلی‌متری عبور داده شد. این اندازه‌ها بر اساس آزمایش‌های فرسایش ناشی از جریان و به دلایل تکنیکی انتخاب شدند (دانشیار و همکاران 1392، اسدی و همکاران 2011، راعی و همکاران 2015). برای

هر کدام از کلاس‌های اندازه‌ای حدود یک کیلوگرم نمونه جدا شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول 1 نشان داده شده است. در این تحقیق بافت به‌روش هیدرومتری (گی و بادر 1986)، اسیدیته‌ی خاک در سوسپانسیون 1:5 خاک و محلول 0/01 مولار کلرید کلسیم، قابلیت هدایت الکتریکی در سوسپانسیون 1:5 خاک و آب، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک (ریموند و هیگنسون 1992)، ماده آلی به‌روش والکی- بلک (راول 1994) و میانگین وزنی قطر (MWD) به روش الک تر اندازه‌گیری شد (بلیک و هارتج 1986). توزیع اندازه ذرات خاکدانه و نمونه شن تقریباً مشابه بوده است (شکل 1).

جدول 1- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش.

کلاس بافتی	MWD (mm)	ماده آلی	کربنات کلسیم معادل	شن	سیلت	رس	هدایت الکتریکی (dSm ⁻¹)	pH
-	(mm)		%					-
رسی	1/146	5/25	2/75	32	23	45	0/85	5/95



شکل 1- منحنی توزیع اندازه‌های ذرات شن و خاکدانه.

استقرار ذره را به دو روش لغزشی و تشکیل توده اندازه‌گیری کرد (شکل 2). در این دستگاه برای اندازه‌گیری با روش تشکیل توده، قیفی در ارتفاع ثابتی

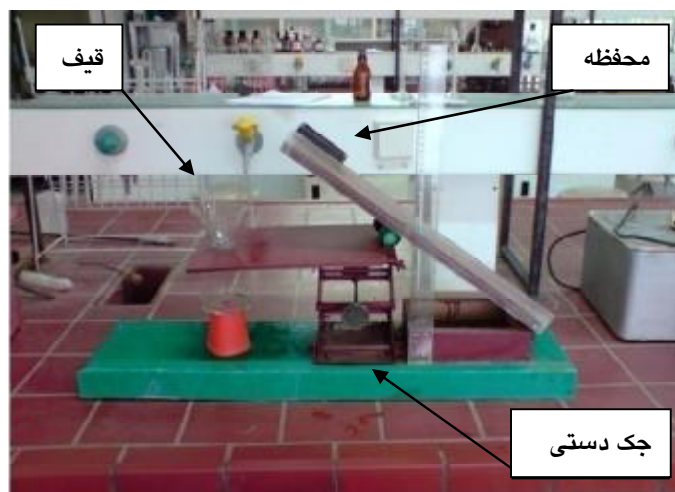
طراحی و ساخت ابزار اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره در این تحقیق برای اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره دستگاهی ساخته شد که به‌وسیله آن می‌توان زاویه

ذرات شروع به حرکت می‌کنند زاویه صفحه شیب‌دار با سطح جعبه اندازه‌گیری شده و برابر با زاویه استقرار ذره در نظر گرفته می‌شود (گلدارت و همکاران 2006، ایلجی و ژآو 2008). زاویه استقرار ذره، برای شش کلاس اندازه‌ای هر دو نمونه با دو تکرار تعیین شد.

برای بررسی اثر ابعاد محفظه روی زاویه استقرار ذرات، ابتدا محفظه‌هایی به شکل مکعب مستطیل در ابعاد مختلف ساخته شد که برای هر بعد آن سه اندازه‌ی متفاوت در نظر گرفته شد. یعنی تعداد هفت محفظه با اندازه‌های مختلف ساخته شد که ابعاد آن (ارتفاع×عرض×طول) برابر $8 \times 4 \times 6$ ، $8 \times 4 \times 4$ ، $8 \times 4 \times 2$ ؛ $12 \times 4 \times 2$ ، $16 \times 4 \times 2$ ، $8 \times 6 \times 2$ ، $8 \times 8 \times 2$ سانتی‌متر بود. همچنین از محفظه با ابعاد $5 \times 10 \times 5$ نیز استفاده شد. همچنین برای بررسی این فرضیه که آیا تغییر هم‌زمان ابعاد در مکعب نیز منجر به تغییر زاویه استقرار به‌دست‌آمده خواهد شد یا خیر، از مکعب‌هایی با ابعاد $3 \times 3 \times 3$ ، $4 \times 4 \times 4$ و $6 \times 6 \times 6$ سانتی‌متر نیز استفاده شد. سپس به‌وسیله هر کدام از این محفظه‌ها زاویه استقرار ذرات در

کلاس‌های مختلف اندازه‌ای دو نمونه (خاک و شن) با دو تکرار اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، تجزیه واریانس در قالب فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی انجام شد.

تعیین‌شده و در زیر آن محفظه‌ای با قطر 10 و ارتفاع 2 سانتی‌متر به‌گونه‌ای قرار گرفت که دهانه خروجی قیف دقیقاً در مرکز صفحه قرار گیرد. برای تعیین زاویه استقرار از هر کلاس اندازه‌ای ذرات، مقدار کافی در درون قیف ریخته می‌شد تا در محفظه پایین قیف توده‌ای از ذرات تشکیل شود. سپس از توده تشکیل‌شده عکس‌برداری صورت گرفته و به‌وسیله عکس، زاویه سطح توده نسبت به سطح افقی اندازه‌گیری شده و این زاویه برابر با زاویه استقرار ذره در نظر گرفته شد (کومر و همکاران 2004، فراکزک و همکاران 2007، ایلجی و ژآو 2008). برای تعیین زاویه استقرار به روش لغزشی نحوه عمل دستگاه به این صورت است که یک محفظه در انتهای یک صفحه چوبی با طول 50 و عرض 20 سانتی‌متر قرار داده می‌شود. این صفحه چوبی توسط یک لولا به یک صفحه چوبی دیگر با طول 20، عرض 15 و ضخامت 5 سانتی‌متر متصل بوده (شکل 2) و صفحه چوبی متحرک توسط یک جک قادر به بالا رفتن و افزایش شیب است. برای تعیین زاویه استقرار ابتدا درون محفظه از ذرات با قطر موردنظر پر شده و به‌وسیله یک کاردک هم‌تراز با لبه محفظه می‌گردد (باید توجه نمود که در حین تراز کردن، ذرات متراکم نشوند). سپس صفحه به‌وسیله جک به‌تدریج بالا آورده می‌شود تا شیب سطح افزایش یابد. لحظه‌ای که



شکل 2- دستگاه اندازه‌گیری زاویه استقرار ذرات به روش لغزشی و تشکیل توده.

نتایج و بحث

اثر کلاس اندازه‌های، ابعاد محفظه و نوع خاک بر زاویه استقرار ذره

نتایج تجزیه واریانس اثر اندازه، نوع نمونه و ابعاد محفظه بر زاویه استقرار ذره که با استفاده از روش لغزشی اندازه‌گیری شد، در جدول 2 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نوع مواد خاکی، کلاس اندازه‌های، ابعاد محفظه و اثرات متقابل این پارامترها اثر معنی‌داری در سطح 0/1 درصد بر زاویه استقرار ذره

داشت. روند تغییر زاویه استقرار برای کلاس‌های اندازه‌های مختلف ذرات شن و خاک که توسط محفظه-هایی با ابعاد مختلف اندازه‌گیری شد در شکل 3 نشان داده شده است. زاویه‌های استقرار برای هر کلاس اندازه‌های دو نمونه خاک و شن که توسط محفظه‌هایی با ابعاد مختلف به دست آمده است با یکدیگر متفاوت بودند که با توجه به جدول 2 اثر متقابل کلاس اندازه، نوع خاک و ابعاد محفظه بر زاویه استقرار ذره معنی‌دار بود.

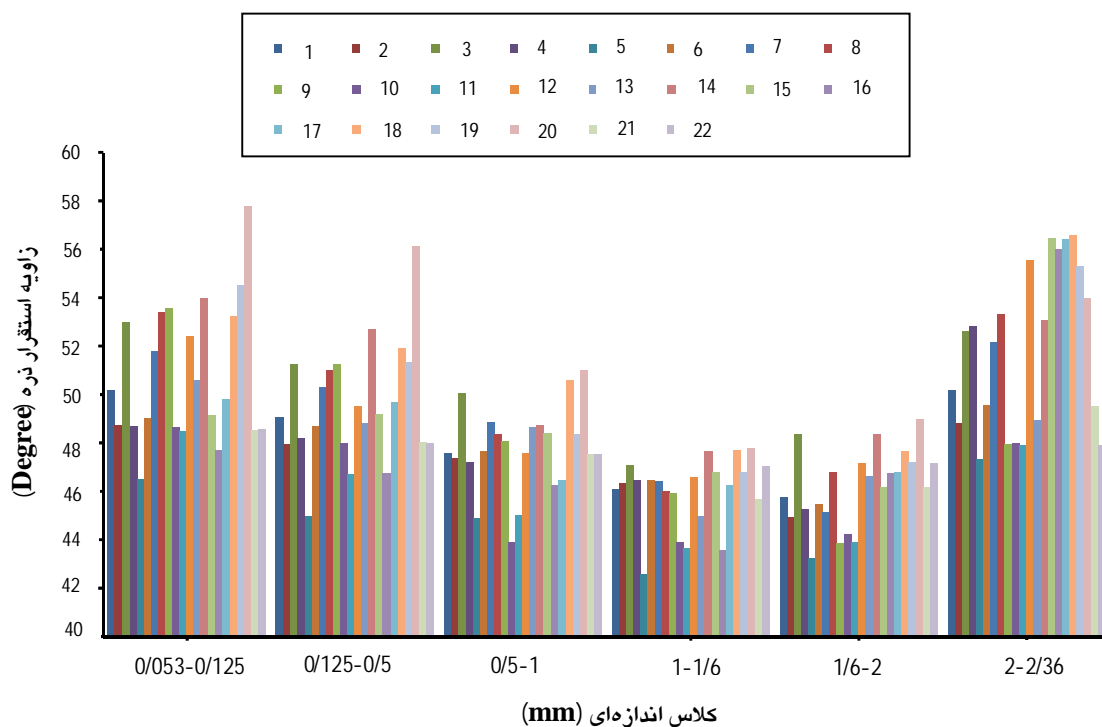
جدول 2- خلاصه نتایج تجزیه واریانس اثر کلاس اندازه‌های و نوع خاک و ابعاد محفظه بر زاویه استقرار ذره.

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
کلاس اندازه‌های	5	254/750 ^{***}
نوع مواد خاکی	1	180/845 ^{***}
ابعاد محفظه	10	60/968 ^{***}
کلاس اندازه‌های × نوع خاک	5	8/930 ^{***}
کلاس اندازه‌های × ابعاد محفظه	50	6/927 ^{***}
کلاس اندازه‌های × ابعاد محفظه × نوع خاک	50	2/647 ^{***}
خطا	132	0/158

^{***} نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح 0/1 درصد

کلاس اندازه‌های کوچک‌تر اثر چسبندگی بین ذرات بر زاویه استقرار ذره بیش‌تر می‌شود. ونگ و همکاران (2010) نیز به اثر متقابل اندازه ذرات و ویژگی‌های مربوط به چسبندگی آن‌ها اشاره داشته‌اند. افزایش زاویه استقرار ذره با افزایش اندازه توسط هاهوتواوهارا و همکاران (1999) نیز نشان داده شده است. برای ذرات شن کلاس 2/36-2 میلی‌متر بالاترین زاویه استقرار ذره را دارا بود و برای کلاس‌های اندازه-ای 1/6-2 میلی‌متر زاویه استقرار ذره کاهش شدیدی پیدا کرد و سپس برای کلاس‌های اندازه‌های 1/6-1، 0/5-1، 0/5-0/125 میلی‌متر با کاهش کلاس اندازه-ای زاویه استقرار ذره افزایش یافت.

مقایسه میانگین اثر متقابل اندازه ذره و نوع نمونه بر زاویه استقرار ذره در شکل 4 آمده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، زاویه استقرار ذره برای کلاس اندازه‌های 2/36-2 میلی‌متر ذرات خاک بالاترین مقدار را داشت و سپس کاهش شدیدی در کلاس اندازه‌های 1/6-2 و 1/6-1 میلی‌متر به وجود آمد و پس از آن روندی افزایشی با کاهش اندازه پیدا کرد به‌گونه‌ای که زاویه استقرار ذره کلاس اندازه‌های 0/125-0/053 میلی‌متر ذرات خاک پس از کلاس 2/36-2 میلی‌متر بالاترین مقدار را داشت. علت این روند را می‌توان این‌گونه توضیح داد که برای کلاس‌های اندازه‌های بزرگ‌تر از 1-0/5، اثر وزن و اندازه ذره بر زاویه استقرار ذره بیش‌تر از خصوصیات دیگر است، اما برای



شکل 3- روند تغییر زاویه استقرار به دست آمده توسط محفظه‌هایی با ابعاد مختلف برای ذرات شن و خاک.

ستون‌های شماره 1 تا 11 به ترتیب نشان‌دهنده اعداد مربوط به محفظه‌های با ابعاد (ارتفاع×عرض×طول) $8 \times 4 \times 4$ ، $8 \times 4 \times 2$ ، $6 \times 6 \times 6$ و $4 \times 4 \times 4$ برای ذرات شن و ستون‌های شماره 11 تا 22 به ترتیب نشان‌دهنده اعداد مربوط به محفظه‌های با ابعاد (ارتفاع×عرض×طول) $8 \times 4 \times 2$ ، $8 \times 4 \times 4$ ، $8 \times 4 \times 6$ ، $12 \times 4 \times 2$ ، $16 \times 4 \times 2$ ، $8 \times 6 \times 2$ ، $8 \times 8 \times 2$ ، $5 \times 10 \times 5$ ، $3 \times 3 \times 3$ و $4 \times 4 \times 4$ و $6 \times 6 \times 6$ برای ذرات خاک هست.

نسبت به افزایش شیب صفحه دستگاه مقاومت بیشتری از خود در مقابل حرکت نشان دهند و در نتیجه زاویه استقرار بیشتری داشته باشند.

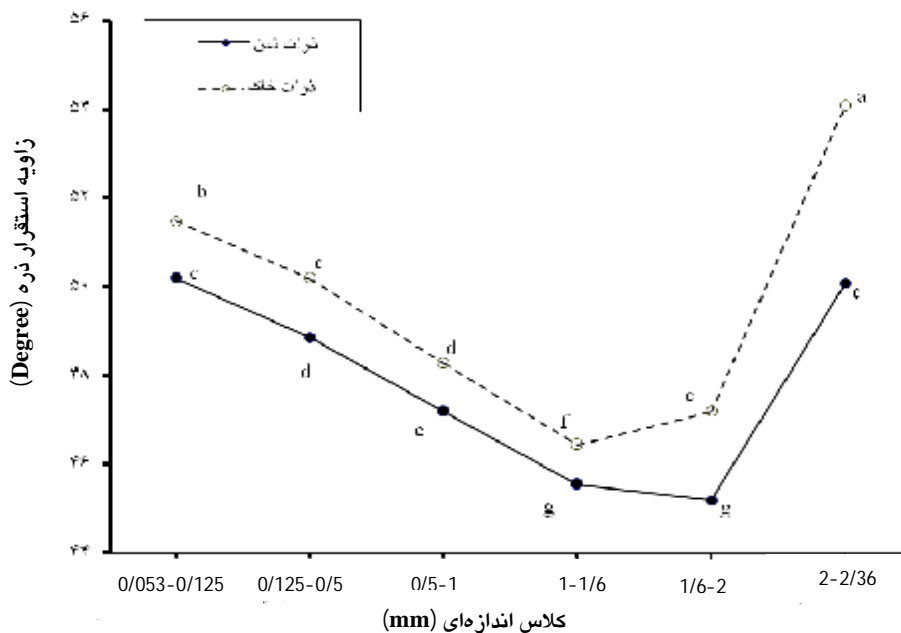
اثر تغییر ابعاد و شکل محفظه بر زاویه استقرار ذره
به منظور بررسی اثر تغییر ابعاد محفظه و همچنین شکل محفظه بر روی زاویه استقرار ذره در روش لغزشی، مطالعه‌ای با محفظه‌هایی با ابعاد مختلف و با دو تکرار صورت پذیرفت. تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که علاوه بر نوع خاک و اندازه ذره، ابعاد محفظه مورد استفاده نیز باعث تغییر در مقدار اندازه-گیری زاویه استقرار ذره می‌شود. همچنین اثر متقابل این عوامل نیز در سطح 0/1 درصد ($p < 0.001$) معنی‌دار بود (جدول 2). روند تغییر زاویه استقرار برای کلاس-های اندازه‌ای مختلف که توسط محفظه‌هایی با ابعاد

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود می‌توان کلاس‌های 1-1/6 و 1/6-2 (به ترتیب برای ذرات خاک و شن) را به عنوان اندازه بحرانی در نظر گرفت که در بالای این حد بحرانی با افزایش اندازه ذرات زاویه استقرار ذرات افزایش یافت و در زیر این حد بحرانی با کاهش اندازه ذرات این زاویه افزایش یافت که به این قضیه ونگ و همکاران (2010) نیز اشاره کرده بودند. از طرفی در تمام کلاس‌های اندازه‌ای اثر نوع ذره بر زاویه استقرار ذره معنی‌دار بود و در تمام کلاس‌ها زاویه استقرار ذرات خاک بیش‌تر از زاویه استقرار ذرات شن است که در سطح 5 درصد معنی‌دار بود. علت این امر را می‌توان به چسبندگی بیش‌تر و چگالی کمتر ذرات خاکدانه نسبت به ذرات شن ربط داد. چسبندگی بیش‌تر ذرات خاکدانه نسبت به ذرات شن سبب شد تا این ذرات

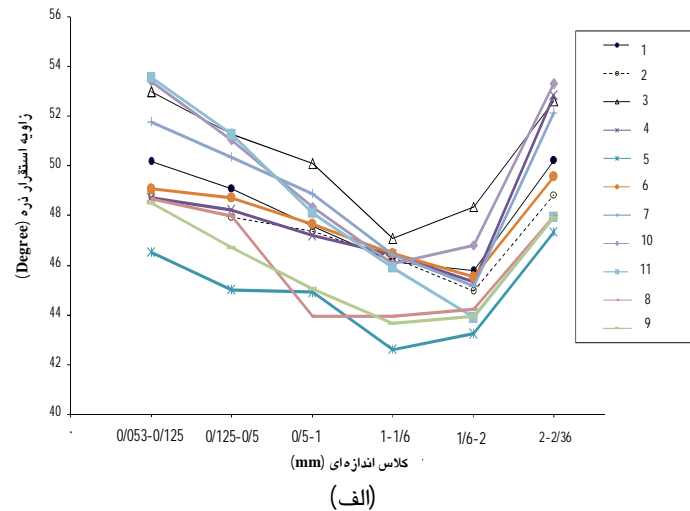
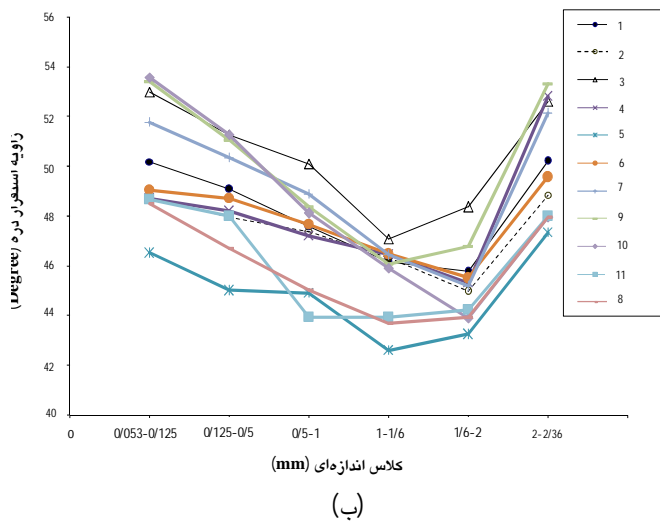
استقرار ذرات شن مربوط به کلاس اندازه‌های 2-2/36 میلی‌متر بود. برای ذرات خاک بزرگ‌ترین زاویه استقرار به‌دست‌آمده (57/75) نیز مربوط به محفظه با ابعاد 3×3×3 سانتی‌متری بود و همچنین کمترین زاویه به‌دست‌آمده (43/58) نیز همانند ذرات شن مربوط به محفظه 14×4×2 بود. برای بیشتر محفظه‌ها کلاس اندازه‌های 1-1/6 میلی‌متر کلاس اندازه‌های بحرانی خاک بود به‌غیر از محفظه‌های 8×8×2 و 12×4×2 که کلاس اندازه‌های 1-1/6 میلی‌متر کلاس اندازه‌های بحرانی بود. همچنین برای ذرات خاک بزرگ‌ترین زاویه استقرار در محفظه‌های 8×4×4، 8×4×6، 8×6×2، 6×6×6 و 3×3×3 مربوط به کلاس اندازه‌های 0/053-0/125 میلی‌متر بود و در بقیه محفظه‌ها بزرگ‌ترین مقدار زاویه استقرار ذرات شن مربوط به کلاس اندازه‌های 2-2/36 میلی‌متر بود. بر اساس نتایج با تغییر ابعاد محفظه زاویه استقرار زاویه استقرار ذره اندازه‌گیری شده نیز تغییر یافت که در ادامه دلایل آن مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

مختلف اندازه‌گیری شد در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زاویه‌های استقرار برای هر کلاس اندازه‌ای که توسط محفظه‌هایی با ابعاد مختلف به‌دست‌آمده است با یکدیگر متفاوت بودند که با توجه به جدول 2 اثر متقابل کلاس اندازه و ابعاد محفظه بر زاویه استقرار ذره معنی‌دار بود. برای ذرات شن بزرگ‌ترین زاویه استقرار به‌دست‌آمده (53/56) مربوط به محفظه با ابعاد 3×3×3 سانتی‌متری بود و کمترین زاویه به‌دست‌آمده (42/5) مربوط به محفظه 14×4×2 بود.

برای بیشتر محفظه‌ها کلاس اندازه‌های 1/6-2 میلی‌متر کلاس اندازه‌های بحرانی ذرات شن بود به‌غیر از محفظه‌های 8×4×6، 8×4×4، 16×4×2 و 6×6×6 که کلاس اندازه‌های 1-1/6 میلی‌متر کلاس اندازه‌های بحرانی بود. همچنین برای ذرات شن بزرگ‌ترین زاویه استقرار در محفظه‌های 8×4×4، 12×4×2، 16×4×2، 8×6×2 و 8×8×2 مربوط به کلاس اندازه‌های 0/053-0/125 میلی‌متر بود و در بقیه محفظه‌ها بزرگ‌ترین مقدار زاویه



شکل 4- مقایسه میانگین اثر متقابل کلاس اندازه و نوع خاک بر زاویه استقرار ذره.



شکل 5- روند تغییر زاویه استقرار به دست آمده توسط محفظه‌هایی با ابعاد مختلف، الف) ذرات خاک ب) ذرات شن. منحنی‌های شماره 1 تا 11 به ترتیب نشان‌دهنده اعداد مربوط به محفظه‌های با ابعاد (ارتفاع×عرض×طول) $8 \times 4 \times 2$, $8 \times 4 \times 4$, $8 \times 4 \times 6$, $12 \times 4 \times 2$, $16 \times 4 \times 2$, $8 \times 6 \times 2$, $8 \times 8 \times 2$, $4 \times 4 \times 4$, $6 \times 6 \times 6$, $5 \times 10 \times 5$, $3 \times 3 \times 3$ و هست.

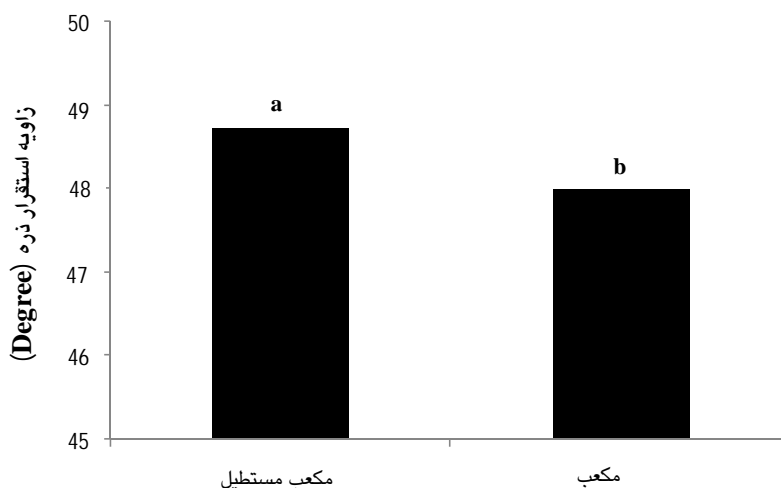
استقرار ذره کمتر برآورد شد. به نظر می‌رسد یکی از عواملی که منجر به ایجاد این روند در اندازه‌گیری زاویه استقرار ذرات با تغییر ابعاد محفظه می‌شود، تغییر نسبت وزن ذرات درون محفظه به سطح مقطع محفظه است.

همان‌طور که در جدول 3 آمده است با افزایش این نسبت زاویه استقرار به دست آمده کوچک‌تر شد. بر اساس جدول 3 بزرگ‌ترین مقادیر زاویه استقرار به دست آمده برای ذرات خاک توسط محفظه مکعب مستطیلی، مربوط به محفظه‌هایی است که در آن نسبت وزن ذرات درون محفظه به سطح مقطع محفظه کوچک‌ترین بود (محفظه با ابعاد $8 \times 8 \times 2$ و $8 \times 4 \times 6$) و همچنین کوچک‌ترین مقدار زاویه استقرار به دست آمده برای ذرات خاک توسط محفظه مکعب مستطیلی مربوط به محفظه‌ایی است که در آن نسبت وزن ذرات درون محفظه به سطح مقطع محفظه بزرگ‌ترین بود (محفظه با ابعاد $16 \times 4 \times 2$). همچنین برای ذرات شن نیز روندی مشابه ذرات خاک مشاهده شد و بزرگ‌ترین مقادیر زاویه استقرار به دست آمده برای ذرات شن توسط محفظه مکعب مستطیلی مربوط به محفظه‌هایی است که

تحلیل آماری دیگر به گونه‌ای انجام شد که در آن هر بار فقط تغییر یک بعد مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان مثال برای بررسی تغییر ارتفاع محفظه، داده‌هایی که با محفظه‌های با ابعاد $8 \times 4 \times 2$, $8 \times 4 \times 4$, $8 \times 4 \times 6$ انجام شد به طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. همچنین به دلیل این‌که فقط تأثیر تغییر اندازه‌ی یک بعد محفظه مورد نظر بوده است، برای هر دو نمونه شن و خاک آزمایش‌ها جداگانه مورد تجزیه و تحلیل آماری گرفت تا از اثر نوع خاک چشم‌پوشی شود. اثر تمام موارد مورد بررسی در سطح 0/1 درصد بر زاویه استقرار ذره معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین اثر تغییر ابعاد محفظه بر زاویه استقرار ذره در جدول 3 آمده است. همان‌طور که در جدول 3 مشخص است اندازه زاویه استقرار ذره با تغییر اندازه محفظه اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره تغییر می‌کند و در بیشتر موارد این تغییر در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار بود. در بیشتر موارد بیش‌ترین مقدار زاویه استقرار ذره توسط محفظه‌ای برآورد شد که بزرگ‌ترین بعد را داشته است. البته این مسئله در مورد افزایش طول صادق نیست و با افزایش طول مقدار زاویه

هست، که این امر موجب می‌گردد با افزایش نیروی وزن نسبت به سطح مقطع در یک سطح شیب‌دار، ذرات در شیب‌های کمتری شروع به ریزش کنند و به همین علت است که اندازه زاویه استقرار ذرات کم‌تر ارزیابی می‌گردد. البته مطمئناً عوامل دیگری نیز در به وجود آمدن این روند با تغییر ابعاد محفظه مؤثر هستند که شناسایی و توضیح آن‌ها نیازمند بررسی و مطالعات گسترده‌تری هست. علاوه بر ابعاد محفظه، شکل محفظه نیز اثر معنی‌داری بر زاویه استقرار ذره دارد که در شکل 6 نشان داده شده است.

در آن نسبت وزن ذرات درون محفظه به سطح مقطع محفظه کوچک‌ترین بود (محفظه با ابعاد $8 \times 8 \times 2$ و $8 \times 4 \times 6$) و کوچک‌ترین مقدار زاویه استقرار به دست آمده برای ذرات خاک توسط محفظه مکعب مستطیلی مربوط به محفظه‌ایی است که در آن نسبت وزن ذرات درون محفظه به سطح مقطع محفظه بزرگ‌ترین بود (محفظه با ابعاد $16 \times 4 \times 2$). برای محفظه‌های مکعبی شکل نیز چنین روندی مشاهده گردید. به نظر می‌رسد این روند را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که اثر این نسبت به دلیل برآیند نیروهای وارده بر ذرات در یک سطح شیب‌دار



شکل 6- مقایسه میانگین اثر شکل محفظه مورد استفاده بر زاویه استقرار ذره.

روش تشکیل بود. ونگ و همکاران (2010) نیز به تفاوت مقادیر زاویه استقرار ذرات که با استفاده از روش‌های تشکیل توده و استقرار ذره به دست آمده بودند اشاره کرده بودند، البته باید متذکر شد که در تحقیق یادشده آزمایش بر روی پودر ذغال نرم شده صورت گرفت و اختلاف دو روش حدود 5 درجه بوده است. براون و ریچاردز (1970) نیز به تفاوت مقادیر زاویه استقرار ذرات که با استفاده از روش‌های مختلف به دست می‌آیند اشاره کرده بودند.

مقایسه روش لغزشی و روش تشکیل توده

علاوه بر اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره به روش لغزشی، این زاویه توسط روش تشکیل توده نیز اندازه‌گیری شد که یک نمونه از آن در شکل 7 نشان داده شده است. مقایسه آماری زاویه استقرار اندازه‌گیری شده به روش لغزشی و تشکیل توده نشان داد که اختلاف آماری معنی‌داری در سطح 5 درصد بین دو روش وجود دارد (جدول 4). مقایسه میانگین دو روش نشان داد (شکل 8) که زاویه استقرار ذره که به روش لغزشی اندازه‌گیری شده حدود 10 درجه بیش‌تر از

جدول 3- مقایسه میانگین اثر تغییر اندازه محفظه بر زاویه استقرار ذره.

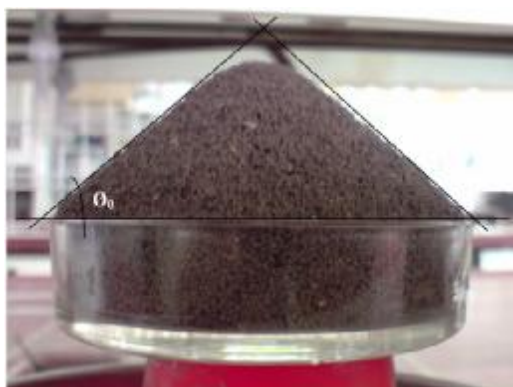
نسبت جرم ذرات به سطح مقطع	سطح مقطع محفظه (cm ²)	میانگین جرم ذرات داخل محفظه (g)	میانگین زاویه استقرار (Degree)	ابعاد محفظه (cm)	نوع تغییرات	نوع ذره	شکل محفظه
9/879	8	79/036	48/150 ^b	8×4×2	تغییر ارتفاع محفظه		
10/367	16	165/884	47/385 ^c	8×4×4			
9/770	24	234/616	50/391 ^a	8×4×6			
9/879	8	79/036	48/15 ^a	8×4×2	تغییر طول محفظه	تک مکعب	
14/887	8	119/028	48/10 ^a	12×4×2			
20/300	8	162/462	44/93 ^b	16×4×2			
9/879	8	79/036	48/15 ^b	8×4×2	تغییر عرض محفظه		مکعب مستطیل
10/156	12	121/873	47/816 ^c	8×6×2			
9/740	16	155/485	49/10 ^a	8×8×2			
6/937	8	52/502	49/775 ^b	8×4×2	تغییر ارتفاع محفظه		
7/174	16	114/790	48/116 ^c	8×4×4			
6/760	24	162/397	50/758 ^a	8×4×6			
6/937	8	52/502	49/775 ^a	8×4×2	تغییر طول محفظه	تک مکعب	
10/280	8	82/242	49/358 ^b	12×4×2			
13/780	8	110/245	47/841 ^c	16×4×2			
6/937	8	52/502	49/775 ^b	8×4×2	تغییر عرض محفظه		
6/932	12	83/195	49/233 ^c	8×6×2			
6/83	16	109/344	51/266 ^a	8×8×2			
3/888	9	34/998	48/438 ^a	3×3×3	تغییر ابعاد مکعب	تک مکعب	
5/208	16	83/341	46/112 ^b	4×4×4			
7/352	36	264/675	45/951 ^b	6×6×6			
2/632	9	23/690	52/608 ^a	3×3×3	تغییر ابعاد مکعب	تک مکعب	
3/49	16	55/845	47/567 ^b	4×4×4			
5/201	36	187/243	47/309 ^b	6×6×6			

تیمارهایی که در کمترین حالت دارای یک حرف لاتین (a, b, c) مشترک می‌باشند، اختلاف معنی‌داری با آزمون توکی در سطح احتمال 5 درصد ندارند.

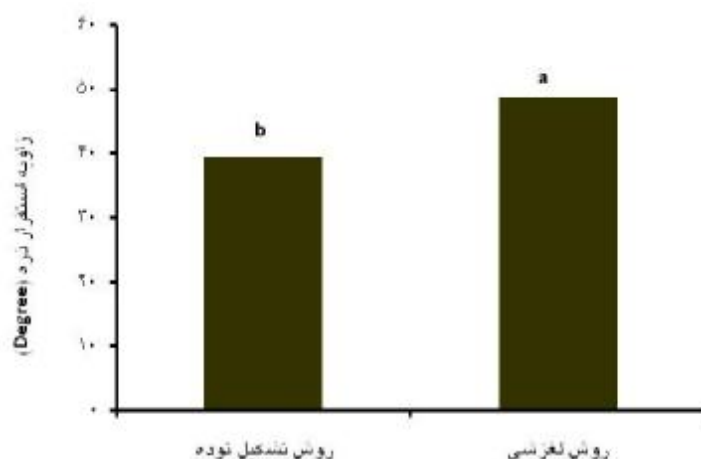
جدول 4- تجزیه واریانس اثر نوع خاک، اندازه ذره و روش آزمایش بر زاویه استقرار ذره.

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
روش اندازه‌گیری	1	1038/094***
نوع خاک	1	5/882***
روش اندازه‌گیری × نوع خاک	1	13/657***
اندازه ذره	5	43/433***
روش اندازه‌گیری × اندازه ذره	5	8/669***
اندازه ذره × نوع خاک	5	3/898***
روش اندازه‌گیری × اندازه ذره × نوع خاک	5	8/177***
خطا	24	0/0965

*** نشان‌دهنده اثر معنی‌دار در سطح احتمال 0/1 درصد است.



شکل 7- نمونه‌ای از اندازه‌گیری زاویه استقرار به روش تشکیل توده (کلاس اندازه‌های 1-0/5 میلی‌متر نمونه خاک).



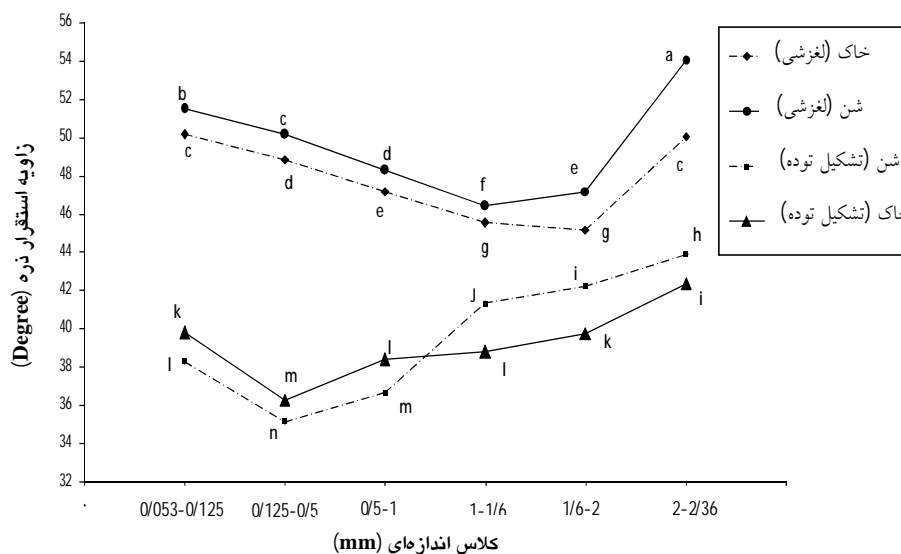
شکل 8- مقایسه میانگین اثر روش اندازه‌گیری بر زاویه استقرار ذره.

اندازه‌های بحرانی برای زاویه استقرار ذرات بود. در روش تشکیل توده برای هر دو نوع نمونه زاویه استقرار ذره برای کلاس اندازه‌های 2-2/36 میلی‌متر بالاترین مقدار را دارا بود و سپس در کلاس‌های اندازه‌های 2-1/6، 1-1/6، 1-0/5 و 0/125-0/5 میلی‌متر کاهش در اندازه زاویه استقرار به وجود آمد و پس از آن زاویه استقرار ذره کلاس اندازه‌های 0/053-0/125 میلی‌متر ذرات افزایش یافت که بعد از کلاس 2-2/36 میلی‌متر بالاترین مقدار را دارا بود. در این روش برای ذرات خاک و شن کلاس اندازه‌های 0/125-0/5 میلی‌متر کلاس اندازه‌های بحرانی هست. بنابراین در هر دو روش یک اندازه بحرانی دیده می‌شود که در بالای این حد بحرانی با افزایش اندازه ذرات زاویه استقرار ذرات افزایش می‌

مقایسه میانگین اثر متقابل اندازه ذره، نوع خاک و روش اندازه‌گیری بر زاویه استقرار ذره در شکل 9 آمده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است در روش لغزشی برای ذرات خاک زاویه استقرار ذره برای کلاس اندازه‌های 2-2/36 میلی‌متر بالاترین مقدار را دارا بود و سپس کاهش شدیدی در کلاس اندازه‌های 2-1/6 و 1-1/6 میلی‌متر به وجود آمد و پس از آن روندی افزایشی با کاهش اندازه پیدا کرد به گونه‌ای که زاویه استقرار ذره کلاس اندازه‌های 0/053-0/125 میلی‌متر ذرات خاک پس از کلاس 2-2/36 میلی‌متر بالاترین مقدار را دارا بود. برای ذرات شن در روش لغزشی اما کلاس اندازه‌های 0/053-0/125 میلی‌متر بالاترین زاویه استقرار ذره را داشت و کلاس اندازه‌های 2-1/6 میلی‌متر کلاس

2 میلی‌متری زاویه استقرار ذرات شن بزرگ‌تر از ذرات خاک بود که دلیل این امر را می‌توان وزن بیشتر ذرات شن عنوان کرد. در تمام کلاس‌ها، مقادیر زاویه استقرار ذرات که از طریق روش لغزشی برآورد شده است بزرگ‌تر از مقادیر زاویه استقرار است که از طریق روش تشکیل توده برآورد شده است.

یابد و در زیر این حد بحرانی با کاهش اندازه ذرات این زاویه افزایش می‌یابد. در روش تشکیل توده در کلاس‌های اندازه‌ای 0/053-0/125 و 0/125-0/5 میلی‌متر زاویه استقرار ذرات خاک بیش‌تر از زاویه استقرار ذرات شن بود که می‌توان دلیل این امر را نیروی چسبندگی بزرگ‌تر در بین ذرات خاک عنوان کرد، اما در سه کلاس بزرگ‌تر 1/6-2، 1/6-2 و 2/36-



شکل 9- مقایسه میانگین اثر متقابل کلاس اندازه، نوع خاک و روش اندازه‌گیری بر زاویه استقرار ذره.

استفاده از محفظه‌هایی با ابعاد مختلف زاویه استقرار ذرات اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که اندازه و نوع ذره اثر معنی‌داری بر زاویه استقرار دارد. علاوه بر روش لغزشی، زاویه استقرار ذرات توسط روش تشکیل توده نیز اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده از طریق روش لغزشی و روش تشکیل توده تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشته‌اند. همچنین بر اساس آنچه که در نتایج مشاهده شد با تغییر اندازه ابعاد محفظه مورد استفاده در روش لغزشی برای اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره، مقدار زاویه به‌دست‌آمده نیز تغییر می‌کند، به طوری که اثر تغییر ابعاد محفظه بر زاویه استقرار ذره در سطح 0/1 درصد معنی‌دار بود. لذا با توجه به این مسئله که زاویه استقرار ذره یک خصوصیت ذاتی ذرات است که به خصوصیات

نتیجه‌گیری کلی

زاویه استقرار ذره یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در علوم مختلفی کاربرد اساسی دارد، همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد در بحث فرسایش و حفاظت خاک از پارامتر زاویه استقرار ذره در روابط اصلاح شیب در تنش برشی بحرانی و همچنین روابط برآورد تنش برشی بحرانی استفاده می‌شود. افزایش شناخت و پیشرفت تکنولوژی‌های وابسته به اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره می‌تواند منجر به پیشرفت در علوم مختلف و به‌طور ویژه در مبحث فرسایش موجب برآورد دقیق‌تر تنش برشی بحرانی گردد. در این پژوهش به بررسی زاویه استقرار ذرات دو نمونه خاک و شن توسط روش لغزشی پرداخته شد، برای این کار ابتدا ذرات به شش کلاس اندازه‌ای مختلف تقسیم‌بندی شدند و سپس با

مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، نمی‌توان بهترین روش اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره را تعیین نمود و همچنین نمی‌توان مشخص نمود که کدام ابعاد محفظه بهترین ابعاد برای تعیین زاویه استقرار ذره در روش لغزشی هست. با توجه به این ضعف‌ها پیشنهاد می‌گردد در مطالعاتی که نیاز به اندازه‌گیری زاویه استقرار ذره توسط روش لغزشی هست (به‌عنوان مثال زمانی که از فلوم برای اندازه‌گیری تنش برشی بحرانی ذرات استفاده می‌گردد) حتی‌المقدور از محفظه‌ای برای اندازه‌گیری زاویه استقرار ذرات استفاده گردد که ابعاد آن مشابه با ابعاد منطقه آزمایش در مطالعه موردنظر باشد.

منحصربه‌فرد ذرات (از قبیل شکل، اندازه، وزن مخصوص و غیره) وابسته است و تغییر روش آزمایشگاهی و ابعاد ابزارآلات مورد استفاده برای اندازه‌گیری آن نباید اثر معنی‌داری بر مقدار به‌دست‌آمده برای یک ذره مشخص داشته باشد. لذا با توجه به نتایج و از آنجایی که تغییر روش آزمایشگاهی و ابعاد ابزارآلات مورد استفاده برای اندازه‌گیری زاویه استقرار اثر معنی‌داری بر مقدار به‌دست‌آمده برای یک ذره مشخص داشت می‌توان به ضعف این روش‌ها اشاره نمود و بنابراین به‌نظر می‌رسد که نیاز است در روش‌های اندازه‌گیری این پارامتر و همچنین تعریف کلی آن تجدیدنظر کلی صورت گیرد. از طرفی به‌دلیل عدم وجود مقادیر مرجع برای زاویه استقرار ذرات جهت

منابع مورد استفاده

- دانشیار س.ک، اسدی ح و موسوی سع، 1392. تأثیر نوع خاک و قدرت جریان بر اهمیت نسبی فرآیندهای ناشی از رواناب در شرایط آزمایشگاهی. تحقیقات آب و خاک ایران، جلد 44، شماره 4، صفحه‌های 373 تا 382.
- Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H and Rose CW, 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *Journal of Hydrology* 406: 73-81.
- Blake GR and Hartge KH, 1986. Bulk Density. Pp. 363-375. In: Klute A, (ed). *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph 9(2)*. Madison, Wisconsin.
- Brown RL and Richards JC, 1970. *Principles of Powder Mechanics*. Pergamon Press, Oxford. Minnesota, USA.
- Chien N and Wan ZH, 1999. *Mechanics of Sediment Transport*. ASCE Press, Virginia.
- Chou SH, Liao CC and Hsiao SS, 2010. An experimental study on the effect of liquid content and viscosity on particle segregation in a rotating drum. *Powder Technology* 201: 266-272.
- Chowdhury MMI, Sarker RI, Bala BK and Hossain MA, 2001. Physical properties of gram as a function of moisture content. *International Journal of Food Properties* 4(2): 297-310.
- Duan JG, Wang SSY, and Jia Y, 2001. The applications of the enhanced CCHE2D model to study the alluvial channel migration processes. *Journal of Hydraulic Research* 39(5): 1-12.
- Feng-Guang Y, Xing-nian L, Ke-jun Y and Shu-you C, 2009. Study on the angle of repose of nonuniform sediment. *Journal of hydrodynamics* 21(5): 685-691.
- Fraczek J, Zlobecki A and Zemanek J, 2007. Assessment of angle of repose of granular plant material using computer image analysis. *Journal of Food Engineering* 83: 17-22.
- Frette V, Christensen K, Malthesorensen A, Feder J, Jossang T and Meakin P, 1996. Avalanche dynamics in a pile of rice. *Nature* 379: 49-52.
- Gee GH and Bauder JW, 1986. Particle size analysis. Pp. 383- 411. In: klute A, (ed). *Methods of soil Analysis, part I. Physical and Mineralogical Methods*. SSSA, Madison, WI. 9.
- Geldart D, Abdullah EC, Hassanpour A, Nwoke LC and Wouters I, 2006. Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. *China Particuology* 4(3-4): 104-107.
- Geldart D, Mallet MF and Rolfe N, 1990. Assessing the flow ability of powders using angle of repose. *Powder Handling & Processing* 2(4): 341-346.

- Hauhouot-O'Hara M, Brusewitz GH and Zou Y, 1999. Angle of repose of ground marigold petals as a function of particle size, moisture content and flow enhance. Technical note in Applied Engineering in Agriculture 15(4): 319-322.
- Ileleji KE and Zhou B, 2008. The angle of repose of bulk corn stover particles. Powder Technology 187: 110-118.
- Julien P, 1995. Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press. Cambridge. UK.
- Jullien R, Meakin P and Pavlovitch A, 1993. Particle size segregation by shaking in 2-dimensional disc packings. Europhysics Letters 22(7): 523-531.
- Kumar P, Santosa KJ, Beck E and Das S, 2004. Direct-write deposition of fine powders through miniature hopper-nozzles for multi-material solid freeform fabrication. Rapid Prototyping Journal 10(1): 14-23.
- Lukaszuk J, Stasiak M, Rusinek R and Horabik J, 2001. Influence of moisture content on angle of internal friction of cereal grain. Acta Agrophysica 46: 105-113.
- Makse HA, 1997. Stratification instability in granular flows. Physical Review E 56(6): 7008-7016.
- Moody JA, Smith JD and Ragan BW, 2005. Critical shear stress for erosion of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires. Journal of Geophysical Research 110: 1-13.
- Morgan RPC, 2005. Soil Erosion and Conservation (3th ed.). Blackwell Publishing Ltd. Oxford, UK.
- Raei B, Asadi H, Moussavi A and Ghadiri H, 2015. A study of initial motion of soil aggregates in comparison with sand particles of various sizes. Catena 127: 279-286.
- Rayment GE and Higginson FR, 1992. Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods. Reed International Books Australia P/L, Trading as In kata Press, Port Melbourne. 330p.
- Rowell DL, 1994. Soil Science: Methods and Application. Longman Group, Harlow. 345p.
- Train D, 1958. Some aspects of the property of angle of repose of powders. Journal of Pharmacy and Pharmacology 10: 127-135T.
- Wang W, Zhang J, Yang S, Zhang H, Yang H and Yue G, 2010. Experimental study on the angle of repose of pulverized coal. Particuology 8: 482-485.
- Wiberg PL and Smith JD, 1985. A theoretical model for saltating grains in water. Journal of Geophysical Research 90: 7341-7354.
- Zhou YC, Xu BH, Yu AB and Zulli P, 2002. Experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres. Powder Technology 12: 45-54.