

بررسی رابطه زاویه اصطکاک داخلی و شکل ذرات با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و عکس برداری از دانه‌ها

اکبر چشمی^{*}، نسیم خان محمدی^۲، اسماعیل نصیری^۲

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۱/۵

دریافت مقاله: ۹۰/۲/۳۷

چکیده

تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی رسوبات درشت‌دانه در مطالعات ژئوتکنیک موضوع مهمی می‌باشد. با توجه به تأثیر متغیرهای وابسته به شکل دانه بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، این تحقیق روشی ارائه می‌دهد که در آن با استفاده از متغیرهای شکل دانه می‌توان زاویه اصطکاک داخلی آبرفت درشت‌دانه را تخمین زد. در این تحقیق از ۹ محل در آبرفت‌های تهران نمونه خاک مناسب تهیه شد و با آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده (آزمایش‌های شناسایی، سه محوری و برش مستقیم) زاویه اصطکاک داخلی هر نمونه تعیین گردید. سپس از دانه‌های تشکیل دهنده هر نمونه عکس‌های دیجیتالی تهیه شد و با مقایسه این عکس‌ها با نمودار پیشنهادی کرومباین و اسلاس (Krumbein and Sloss, 1963) متغیرهای شکل دانه (کرویت و گردشدگی) به صورت کمی تعیین شد. بدین منظور از ۲۵۲۰ دانه به روش چشمی و میکروسکوپی عکس برداری شده است. با رسم نمودارهایی ارتباط بین زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و متغیرهای شکل دانه بررسی شد و ضمن ارائه روابط تجربی بین آن‌ها مشخص شد که با افزایش زاویه دار بودن و کاهش کرویت دانه‌ها، زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: زاویه اصطکاک داخلی، متغیرهای شکل دانه، گردشدگی، کرویت

۱ استادیار دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، a.cheshomi@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی

*مسئول مکاتبات

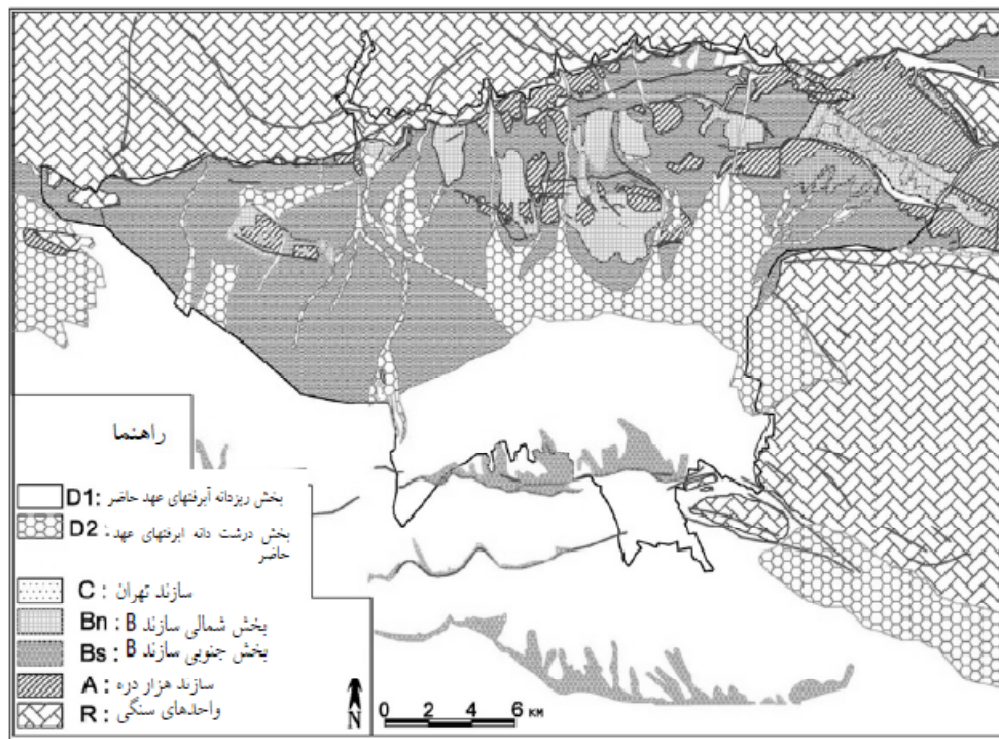
۱. مقدمه

این پارامترها، روش‌های مختلف از جمله آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی توسعه یافته است. با توجه به تأثیر برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی نظیر زاویه اصطکاک داخلی بر متغیرهای شکل دانه، لزوم بررسی دقیق‌تر این اثر و استخراج روابط تجربی بین آن‌ها، می‌تواند تخمین اولیه‌ای از زاویه اصطکاک داخلی در اختیار قرار دهد.

در این تحقیق با مطالعه شکل دانه‌ها و مقایسه آن‌ها با نمودارهای ارائه شده در تحقیقات قبلی متغیرهای شکل دانه کمی شده، از طرف دیگر با انجام تعدادی آزمایش آزمایشگاهی نظیر سه‌محوری و برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی خاک تعیین گردیده است. با مقایسه متغیرهای شکل دانه و زاویه اصطکاک داخلی روابط تجربی بین متغیرهای شکل دانه و زاویه اصطکاک داخلی پیشنهاد شده است.

شهر تهران بر روی نهشته‌های آبرفتی بنا شده است. سازند هزار دره (سازند A) قدیمی‌ترین آبرفت آن بوده که بر روی سنگ بستر قرار گرفته است. بر روی این آبرفت‌ها سازند ناهمگن شمال تهران (سازند B) واقع شده است که در دو بخش شمال (سازند Bn) و جنوب (سازند Bs) رخنمون دارد. سازند تهران (سازند C) بخش اعظم مناطق شمالی و مرکزی شهر را در بر گرفته است. جوان‌ترین آبرفت، آبرفت‌های عهد حاضر (سازند D) می‌باشد. این آبرفت‌ها در بخش‌های جنوبی تهران ریزدانه (سازند D1) و در بخش‌های شمالی و مسیل‌ها درشت‌دانه (سازند D2) است. در شکل ۱ گسترش این آبرفت‌ها بر روی نقشه زمین‌شناسی شهر تهران نشان داده شده، ویژگی‌های زمین‌شناختی این آبرفت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

به دلیل توسعه ساخت و ساز در گستره تهران، تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی آبرفت‌ها ضروری است. برای تعیین



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی تهران، (آژانس همکاری‌های بین‌الملل ژاپن JICA، مرکز مطالعات زلزله و زیست‌محیطی تهران ۱۳۸۰).

جدول ۱. مقایسه آبرفت‌های گستره تهران بر اساس طبقه‌بندی ریبین (نقل از چشمی و همکاران، ۱۳۸۷)

سازند				موضوع
D	C	B	A	مقایسه
سال ۱۰۰۰۰	سال ۵۰۰۰۰	سال ۷۰۰۰۰۰	۵ میلیون سال	سن
سیمان نشده	سیمان ضعیف‌تر از A و سخت نشده	متغیر ولی عموماً دارای سیمان ضعیف	سیمان شده و سخت شده	سیمانی شدن
از حد رس تا قطعات سنگی بزرگ‌تر از یک متر	از حد رس و سیلت تا حداکثر دانه به قطر ۲۰ سانتی‌متر	بسیار متغیر با قطعات چند متری	از حد رس تا دانه‌هایی به قطر ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر	دانه‌بندی
افقی	افقی	به صورت دگر شیب بر روی آبرفت A و دارای شیب کمتر از ۱۵ درجه	دارای شیب حداکثر تا ۹۰ درجه	شیب لایه‌ها
کمتر از ۱۰ متر	حداکثر ۶۰ متر	حداکثر ۶۰ متر (به سمت جنوب کم می‌شود)	حداکثر ۱۲۰۰ متر	ضخامت
سیلابی - رودخانه‌ای	سیلابی - رودخانه‌ای	یخچالی - سیلابی	سیلابی	حوضه رسوبی

۲. متغیرهای شکل دانه

متغیرهای شکل دانه‌ها توسط محققین مختلف بررسی شده است. Wadell (1932)، Krumbein (1941)، Powers (1953)، Krumbein and Sloss (1963) و Barrett (1980) از سه متغیر بدون بعد برای توصیف شکل دانه‌ها استفاده کرده‌اند. این سه متغیر بدون بعد کرویت (Sphericity)، گردش‌دگی (Roundness) و زبری (Roughness) هستند. کرویت تعریف شده توسط Wadell (1932) عبارت از نسبت حجم دانه به حجم کره محیطی دانه است، Dodds (2003) معتقد است که این تعریف به سبب اینکه شامل اندازه‌ای از گردش‌دگی دانه نیز می‌باشد چندان مناسب نیست. Santamarina et al. (2001) تعریف دیگری از کرویت دانه ارائه کردند. بر این اساس کرویت به صورت نسبت سطح دانه به سطح کره هم حجم دانه تعریف می‌شود. کلمه گردش‌دگی متفاوت از کرویت بوده و اولین بار توسط Wadell (1932) عنوان شد. گردش‌دگی عبارت است از میانگین شعاع‌های انحنای گوشه‌های دانه به شعاع بزرگ‌ترین دایره محاط شده در داخل دانه (Wadell, 1932). هرچند گردش‌دگی

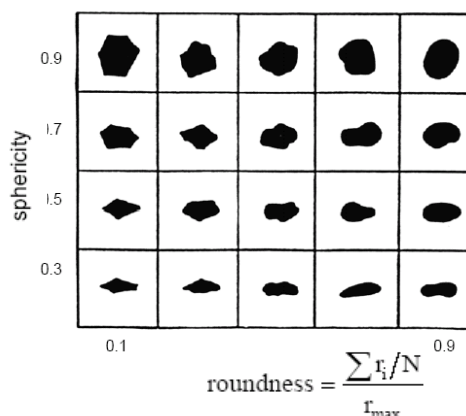
خصوصیتی ۳ بعدی است ولی روش‌های اندازه‌گیری گردش‌دگی بر روی تصویر دوبعدی دانه تمرکز دارند. زبری بیانگر وضعیت ناهمواری‌های موجود در سطح دانه است. در نظر گرفتن مقیاس در بررسی زبری سطح دانه لازم است. تمام دانه‌ها در یک مقیاسی ممکن است دارای سطوح زیر باشند (Santamarina et al., 2001). بنابراین زبری سطح دانه متناسب با نیاز مطالعاتی بایستی در یک مقیاس مشخصی تعریف شود. اندازه‌گیری بافت سطح دانه یا همان زبری آن مشکل بوده لذا در اندازه‌گیری‌های مربوط به شکل دانه از آن صرف‌نظر می‌شود (Barrett, 1980). Krumbein and Sloss, (1963) متغیرهای اصلی شکل دانه‌ها را کرویت و گردش‌دگی معرفی نموده و برای کمی کردن آن‌ها نموداری پیشنهاد کرده‌اند. این نمودار در شکل ۲ ارائه شده است. در این نمودار یک‌سری شکل دانه، نشان داده شده و به ازای هر شکل عدد مشخصی برای کرویت و گردش‌دگی دانه پیشنهاد شده است. با مقایسه شکل دانه‌ها با اشکال ارائه شده در این نمودار امکان کمی کردن کرویت و گردش‌دگی برای دانه‌ها وجود دارد.

تعیین کرویت و گردشگری دانه‌ها از نمودار ارائه شده توسط Krumbein and Sloss (1963) استفاده کردند. نامبرندگان زبری سطح دانه را در نظر نگرفته و بر این عقیده‌اند که اندازه‌گیری زبری یا بافت سطح دانه‌ها مشکل بوده و تأثیر آن بر خواص مهندسی مصالح ناچیز است. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش گردشگری، کرویت و میانگین آن‌ها ضریب پوکی حداقل و حداکثر (e_{min} and e_{max}) کاهش می‌یابد. Sukumarana and Ashmawy (2001) با انجام تعدادی آزمایش سه محوری در شرایط زهکش شده نشان دادند که با افزایش فاکتور شکل و فاکتور تیزگوشگی زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پوکی حداکثر افزایش می‌یابد. Cheshomi et al. (2009) برای مطالعه تأثیر متغیرهای شکل دانه بر زاویه اصطکاک داخلی در آبرفت درشت‌دانه تهران از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برجا استفاده کرده و برای کمی کردن متغیرهای شکل دانه از تکنیک عکس‌برداری و مقایسه آن‌ها با نمودار کرومباین و اسلوس استفاده نمودند بر این اساس رابطه‌ای تجربی بین زاویه اصطکاک داخلی خاک و گردشگری و کرویت پیشنهاد کردند.

۴. روش تحقیق

به منظور بررسی تأثیر متغیرهای شکل دانه بر زاویه اصطکاک داخلی در آبرفت تهران، ۹ محل برای نمونه‌برداری انتخاب شده است. در جدول ۲ موقعیت محل‌های نمونه‌برداری، ارائه شده است. نمونه‌ها از ترائشه‌های موجود در هر محل اخذ شده، اطلاعات مربوط به عمق اخذ نمونه و آبرفتی که نمونه از آن تهیه شده در جدول ۲ ارائه شده است. بر روی کلیه نمونه‌ها آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM: D 422-63 انجام شده، در جدول ۲ طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد نشان داده شده است. نمونه‌های باقیمانده روی هر الک برای مطالعه متغیرهای شکل دانه در کیسه‌های مخصوص نگهداری شده است.

به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) بر روی نمونه‌های بازسازی شده هر محل،



شکل ۲. نمودار استفاده شده برای تعیین کرویت و

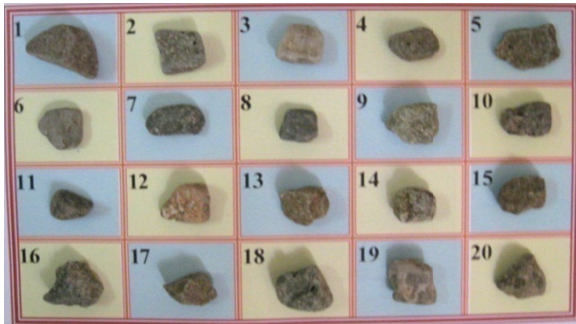
گردشگری دانه‌ها (Krumbein and Sloss, 1963). در این شکل r_i شعاع انحناي گوشه‌های دانه و r_{max} شعاع حداکثر دایره‌ای که در داخل دانه قرار می‌گیرد و N تعداد منحنی‌های عبوری از گوشه‌های دانه است.

۳. مطالعات قبلی

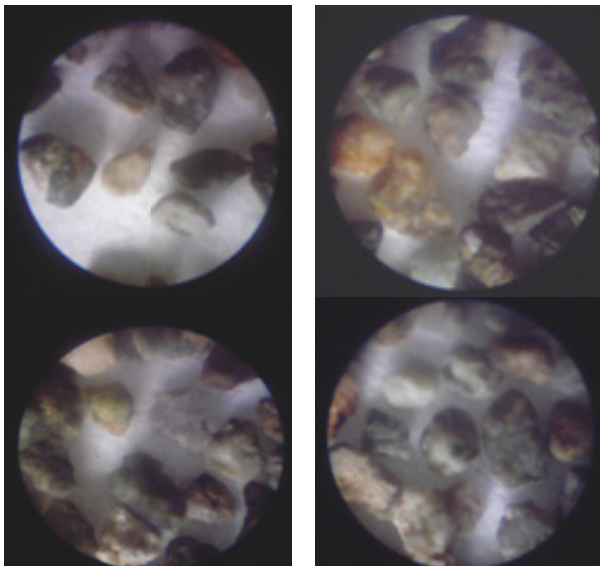
در چهار دهه گذشته محققین مختلفی اثر متغیرهای شکل دانه بر خواص مهندسی خاک‌ها را مطالعه کرده‌اند. Terzaghi (1967) نشان داد که ماسه‌های گرد، دارای زاویه اصطکاک داخلی کمتری نسبت به ماسه‌های زاویه‌دار هستند. Mirghasemi et al. (2002) نتیجه گرفتند که با افزایش تیزگوشگی دانه‌ها مقاومت برشی افزایش می‌یابد. Dodds (2003) اثر شکل دانه‌ها بر روی سختی (Stiffness) را در خاک‌های ماسه‌ای مطالعه کرد و نتیجه گرفت با افزایش تیزگوشگی و زبری سطح دانه‌ها در کرنش‌های پایین، سختی کاهش یافته و در کرنش‌های بالا، سختی افزایش می‌یابد. Zelasko (1966) ارتباط بین اندازه، شکل و مقاومت برشی را برای خاک‌های ماسه‌ای بررسی کرد. De Jaeger (1991) رابطه‌ای تجربی برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای ارائه کرد. این رابطه شامل یک عدد ثابت و ۴ متغیر شکل، یکنواختی، اندازه و تراکم دانه‌ها است. Santamarina and Cho (2004) و Cho et al. (2004) تأثیر متغیرهای شکل دانه بر خواص مهندسی ماسه‌ها را بررسی کردند و برای

برش مستقیم و سه محوری CU، روابطی بین پارامترهای شکل دانه و زوایای اصطکاک داخلی خاک پیشنهاد گردیده است.

روش انجام تحقیق مذکور مشابه روش پیشنهادی Cheshomi et al. (2009) بوده و تفاوت آن در روش تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک و محل‌های نمونه‌برداری است.



شکل ۳. عکس دانه‌های باقیمانده روی الک ۰/۵ اینچ، موقعیت: میدان تجریش.



شکل ۴. عکس دانه‌های باقیمانده روی الک شماره ۴۰، موقعیت: میدان تجریش.

آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) انجام گردیده است. آزمایش سه‌محوری طبق استاندارد ASTM: D4767-95 و آزمایش برش مستقیم در قالب‌های ۱۰×۱۰ و ۳۰×۳۰ سانتی‌متر طبق استاندارد ASTM: D 3080-90 در شرایط اشباع و به روش کند انجام شده است. نتایج آزمایش‌های سه محوری و برش مستقیم در جدول ۲ ارائه شده است.

از نمونه‌های خاک باقیمانده روی هر الک، تعدادی دانه به صورت تصادفی (Random) انتخاب شده و از آن دانه‌ها عکس‌برداری صورت گرفته است. منظور از انتخاب تصادفی دانه‌ها این است که ملاک و معیار خاصی برای انتخاب دانه‌هایی که نماینده هر الک می‌باشند وجود نداشته و به صورت کاملاً تصادفی تعدادی دانه به عنوان نماینده آن الک انتخاب شده است. عکس‌برداری در دو مرحله با چشم غیرمسلح (برای دانه‌های بزرگ‌تر از الک شماره ۱۶) و دیگری با میکروسکوپ (برای دانه‌های عبوری از الک شماره ۱۶) صورت پذیرفته است. تعداد دانه‌های مطالعه شده برای خاک‌های باقیمانده روی الک‌های یک اینچ، ۰/۷۵ اینچ، ۰/۵ اینچ و ۰/۳۷۵ اینچ به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و برای الک‌های شماره ۴، ۱۶، ۱۰، ۸، ۴۰ و ۸۰ به ترتیب ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۲۰ و ۳۰ بوده است. در شکل ۳ و ۴ عکس دانه‌های انتخابی روی الک ۰/۵ اینچ و الک شماره ۴۰ مربوط به نمونه اخذ شده از میدان تجریش نشان داده شده است. برای هر محل نمونه‌برداری ۲۸۰ دانه عکس‌برداری شده، بنابراین با توجه به ۹ محل مورد مطالعه در مجموع ۲۵۲۰ دانه، عکس‌برداری شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از اتمام مرحله عکس‌برداری، با مقایسه عکس‌های گرفته شده با نمودار دو بعدی کرومباین-اسلاس که در شکل ۲ ارائه شده، به هر دانه دو عدد برای کرویت و گردش‌دگی آن نسبت داده شده است. به منظور حذف خطای فرد، مقایسه عکس‌ها با نمودار، توسط یک فرد انجام گرفته است.

با مقایسه بین مقادیر کرویت و گردش‌دگی تعیین شده از روش فوق با زوایای اصطکاک داخلی تعیین شده از آزمایش‌های

۵. محاسبه پارامترهای شکل دانه

برای محاسبه پارامترهای شکل نمونه‌های اخذ شده از روش میانگین‌گیری استفاده شده است. در این روش، میانگین گردشگی دانه‌های باقیمانده روی هر الک (\bar{R}_i) از تقسیم مجموع گردشگی دانه‌های عکس‌برداری شده بر تعداد دانه‌ها طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود. میانگین کرویت دانه‌های باقیمانده روی هر الک (\bar{S}_i) از تقسیم مجموع کرویت دانه‌های عکس‌برداری شده بر تعداد دانه‌ها طبق رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\bar{R}_i = \frac{\sum r_i}{\sum n} \quad (1)$$

$$\bar{S}_i = \frac{\sum s_i}{\sum n} \quad (2)$$

سپس برای تعیین کرویت و گردشگی هر نمونه که معرف محل نمونه‌برداری است از گردشگی‌ها و کرویت‌های تمام الک‌ها، میانگین گرفته شده و عددی نهایی معرف گردشگی (\bar{R}_f) و کرویت (\bar{S}_f) برای هر نمونه بوده که بر اساس رابطه ۳ و ۴ تعیین شده است.

$$\bar{R}_f = \frac{\sum (\bar{R}_1 + \bar{R}_2 + \dots + \bar{R}_{10})}{10} \quad (3)$$

$$\bar{S}_f = \frac{\sum (\bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \dots + \bar{S}_{10})}{10} \quad (4)$$

\bar{R}_f : میانگین نهایی گردشگی و کرویت برای هر محل یا هر نمونه.

$\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_{10}$ و $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \dots, \bar{R}_{10}$: میانگین گردشگی و کرویت هر یک از الک‌های یک اینچ، ۰/۷۵ اینچ، ۰/۵ اینچ و ۰/۳۷۵ اینچ، و الک‌های نمره ۴، ۸، ۱۰، ۱۶، ۴۰ و ۸۰ که از رابطه ۱ و ۲ استخراج شده است. عدد ۱۰ در مخرج کسر نشان دهنده تعداد الک‌های مورد استفاده می‌باشد.

بنابراین با توجه به روابط فوق به ازای هر آزمایش دانه‌بندی یک عدد برای گردشگی (\bar{R}_f) و یک عدد برای کرویت (\bar{S}_f) نظیر آن آزمایش، تعیین شده است. مقادیر گردشگی و کرویت اندازه‌گیری شده به ازای هر نمونه در جدول ۲ نشان داده شده است.

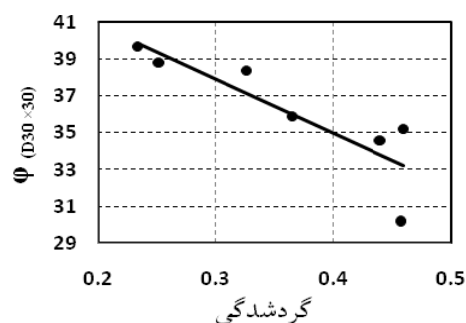
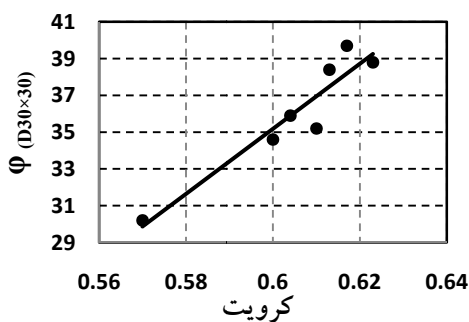
۶. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده

در جدول ۲ زاویه اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش‌های سه محوری، برش مستقیم ۳۰×۳۰ و ۱۰×۱۰ سانتی‌متر با مقادیر گردشگی و کرویت هر نمونه، که از مطالعه عکس دانه‌ها به دست آمده ارائه شده است.

با توجه به داده‌های جدول ۲ روند مشابهی در تغییرات زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده در آزمایش برش مستقیم با قالب ۳۰×۳۰ سانتی‌متر، بیشتر از آزمایش برش مستقیم با قالب ۱۰×۱۰ سانتی‌متر و آزمایش سه‌محوری است.

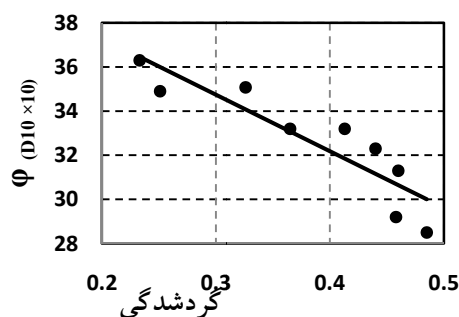
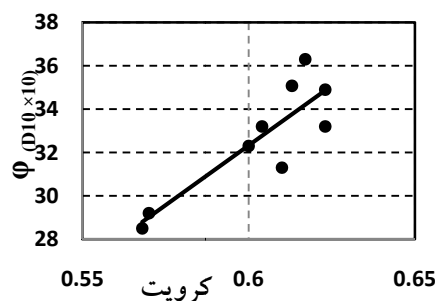
جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مطالعه پارامترهای شکل دانه

S/R	گردشگی (R)	کرویت (S)	برش مستقیم				سه محوری CU		روش آزمایشگاهی	زاویه محدوده بردارد (درج)	طبقه‌بندی آبرفت	محل
			۳۰×۳۰		۱۰×۱۰		φ	C (kPa)				
			φ	C (kPa)	φ	C (kPa)						
۲/۶۵	۰/۲۳۳	۰/۶۱۷	۴۰	۱۱/۸	۳۶	۱۶/۱۵	۳۵	۱۳	GP-GC	۵/۰ - ۶/۵	C	م. تجریش
۲/۴۸	۰/۲۵۱	۰/۶۲۳	۳۹	۱۸/۶	۳۵	۱۴/۲	۳۴	۱۱/۹	GM	۶/۰ - ۸/۰	C	پاسداران
۱/۸۸	۰/۳۲۶	۰/۶۱۳	۳۸	۱۱/۸	۳۵	۱۳/۲	۳۴	۱۲	GP - GM	۶/۰ - ۸/۰	B	نیایش
۱/۶۵	۰/۳۶۵	۰/۶۰۴	۳۶	۱۸	۳۳	۱۵/۹	۳۱	۲۲	GP - GM	۶/۰ - ۹/۰	B	م. مادر
۱/۵۱	۰/۴۱۳	۰/۶۲۳	-	۲۴/۵	۳۳	۲۷/۸	۳۲	۳۲	GP - GM	۱/۰ - ۱۲/۰	C	م. ولیعصر
۱/۳۶	۰/۴۴	۰/۶	۳۵	۳۵	۳۲	۱۴/۳	۳۲	۱۱	GM	۵/۵ - ۷/۵	C	م. توحید
۱/۳۳	۰/۴۶	۰/۶۱	۳۵	۳۲	۳۱	۳۶/۵	۳۰	۲۶/۵	SM	۹/۰ - ۱۱/۰	D	م. بهارستان
۱/۲۴	۰/۴۵۸	۰/۵۷	۳۰	۳۵	۲۹	۳۳	۲۸	۳۰/۶	SM	۶/۰ - ۷/۵	D	نواب
۱/۱۷	۰/۴۸۵	۰/۵۶۸	-	۱۶/۶	۲۸	۴۶/۵	۲۸	۴۰	SM	۱۱/۵ - ۱۵/۵	D	م. بهمن



شکل ۵. نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده

از آزمایش برش مستقیم 30×30 سانتی‌متر
(کرویت و گردشگی) و ϕ (D30x30)



شکل ۶. نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی به دست

آمده از آزمایش برش مستقیم 10×10 سانتی‌متر ϕ (D10x10) و
(کرویت و گردشگی)

نمونه‌های مربوط به آبرفت‌های B و C مطالعه شده، دانه‌بندی مشابهی داشته و زاویه اصطکاک داخلی آنها نیز نزدیک به هم بوده است. زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده در آبرفت D کمتر از دو آبرفت قبلی است. نمونه‌های مربوط به آبرفت D مطالعه شده از نظر دانه‌بندی بافت ریزتری نسبت به آبرفت‌های B و C دارند.

دامنه تغییرات کرویت در نمونه‌های مطالعه شده کم است در حالی که دامنه تغییرات گردشگی بیشتر است. کم بودن دامنه تغییرات کرویت، مرتبط به یکنواختی منشاء رسوبات بوده و بالا بودن دامنه تغییرات گردشگی به فاصله طی شده توسط رسوبات از منشاء، وابسته است. با حرکت رسوبات در مسیرهای طولانی گوشه‌ها گردتر شده و به سطوح صاف‌تری تبدیل می‌شوند. به همین دلیل مقادیر گردشگی بیشتری برای محل‌های مطالعه شده در قسمت‌های جنوبی به دست آمده است.

جهت پیشنهاد روابط تجربی بین متغیرهای شکل دانه و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ تغییرات کرویت و گردشگی با زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های سه محوری، برش مستقیم 30×30 و 10×10 سانتی‌متر نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ می‌توان روابط تجربی زیر را بین متغیرهای شکل دانه و زاویه اصطکاک داخلی خاک نتیجه‌گیری کرد:

$$\phi (\text{Direct shear test } 30 \times 30) = 176.9 S - 71 \quad r^2 = 0.89 \quad (5)$$

$$\phi (\text{Direct shear test } 10 \times 10) = 110.2 S - 33.85 \quad r^2 = 0.75 \quad (6)$$

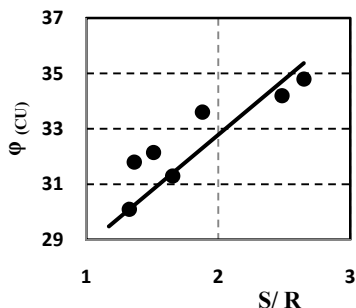
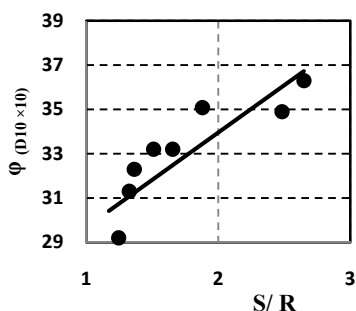
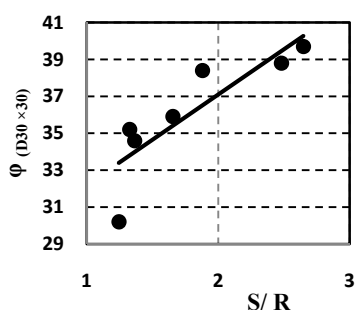
$$\phi_{(CU)} = 101.9 S - 29.89 \quad r^2 = 0.75 \quad (7)$$

$$\phi (\text{Direct shear test } 30 \times 30) = -29.34R + 46.73 \quad r^2 = 0.75 \quad (8)$$

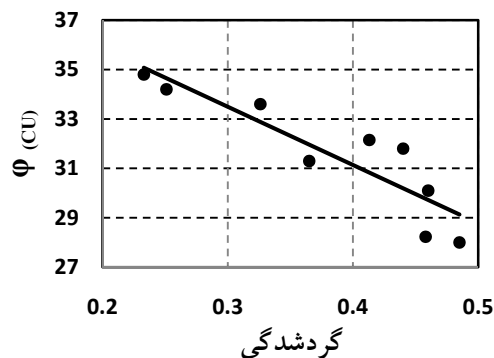
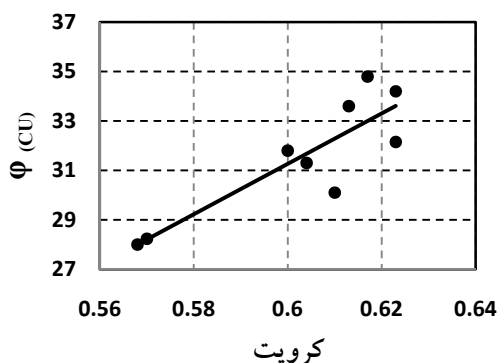
$$\phi (\text{Direct shear test } 10 \times 10) = -25.61 R + 42.42 \quad r^2 = 0.81 \quad (9)$$

$$\phi_{(CU)} = -23.56 R + 40.55 \quad r^2 = 0.75 \quad (10)$$

(Coefficient of determination) بین زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده با متغیرهای شکل دانه در همه آزمایش‌ها بیشتر از ۰/۷۳ است ولی بیشترین همبستگی بین نتایج آزمایش برش مستقیم با قالب‌های ۳۰×۳۰ سانتی‌متر و کرویت مشاهده شده است. با توجه به اینکه بافت خاک مطالعه شده عمدتاً درشت‌دانه بوده و اثر اندازه دانه در آزمایش برش مستقیم ۳۰×۳۰ سانتی‌متر بهتر از سایر آزمایش‌های انجام شده لحاظ می‌گردد لذا می‌تواند دلیلی برای این همبستگی بیشتر باشد.



شکل ۸. رابطه بین نسبت کرویت به گردشگری (S/R) با زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های سه محوری (برش مستقیم ۳۰×۳۰ و ۱۰×۱۰) و (phi)D10×10 (سانتی‌متر)



شکل ۷. نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکش نشده (phi(CU) و کرویت و گردشگری)

به منظور پیشنهاد یک رابطه واحد که اثر گردشگری و کرویت با زاویه اصطکاک داخلی در آن دیده شده باشد از نسبت S/R استفاده شده است. در شکل ۸ رابطه بین زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های مختلف با نسبت S/R نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ می‌توان روابط تجربی زیر را بین نسبت کرویت به گردشگری و زاویه اصطکاک داخلی خاک نتیجه گیری کرد:

$$\Phi (\text{Direct shear test } 30 \times 30) = 4.89 S/R + 27.31 \quad r^2 = 0.73 \quad (11)$$

$$\Phi (\text{Direct shear test } 10 \times 10) = 4.27 S/R + 25.41 \quad r^2 = 0.76 \quad (12)$$

$$\Phi (CU) = 3.99 S/R + 24.8 \quad r^2 = 0.77 \quad (13)$$

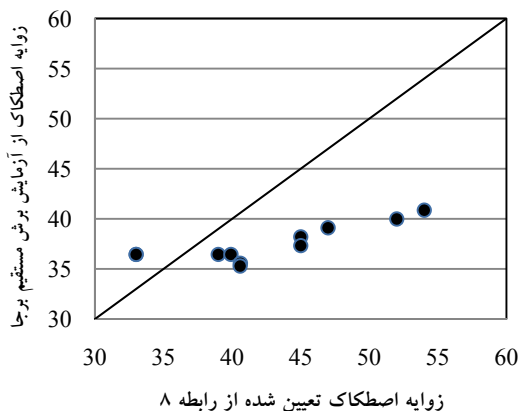
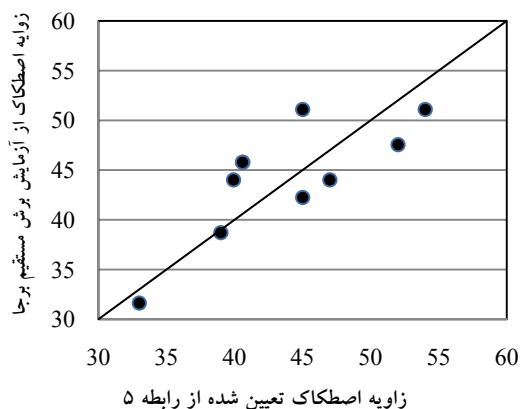
رابطه خطی بین کرویت، گردشگری و نسبت کرویت به گردشگری با زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های مختلف وجود دارد. هر چند ضریب تعیین

بهترین انطباق را با مقادیر واقعی نشان می‌دهد. در حالی‌که رابطه پیشنهادی بین آزمایش سه محوری و گردش‌دگی (رابطه ۱۰) کمترین انطباق را با مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج حاصل از ۱۱ آزمایش برش مستقیم برج

(چشمی، ۱۳۸۵)

شماره آزمایش	ϕ (درجه)	C (kPa)	کرویت	گردش‌دگی
۱	۵۲	۵۷	۰/۶۷	۰/۲۳
۲	۴۵	۴۸	۰/۶۴	۰/۲۹
۳	۵۴	۵۷	۰/۶۹	۰/۲۰
۴	۳۳	۱۰۳	۰/۵۷	۰/۳۵
۵	۳۹	۶۸	۰/۶۲	۰/۳۵
۶	۴۷	۵۵	۰/۶۵	۰/۲۶
۷	۳۳	۱۳۴	۰/۵۸	۰/۳۵
۸	۴۵	۱۶۵	۰/۶۹	۰/۳۲
۹	۳۲/۹۲	۱۶۲/۵	۰/۶۵	۰/۳۵
۱۰	۴۰/۶۱	۸۵۶	۰/۶۶	۰/۳۸
۱۱	۴۰/۵۸	۷۲	۰/۶۶	۰/۳۹

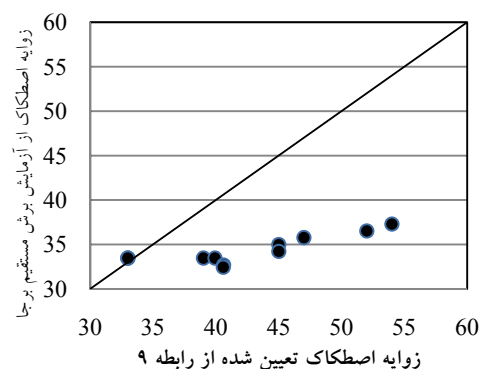
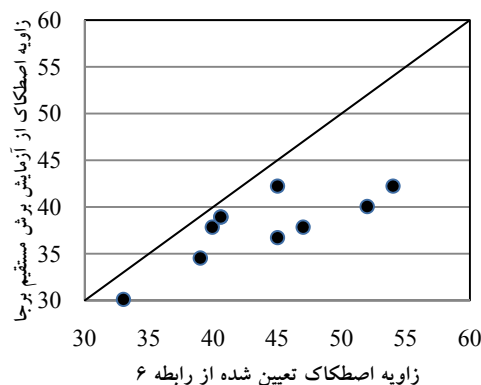


شکل ۹. مقایسه زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم برج و رابطه تجربی شماره ۵ و ۸

چشمی (cheshomi) و همکاران (۱۳۸۵) بر اساس نتایج حاصل از انجام ۱۱ آزمایش برش مستقیم برج و مطالعه متغیرهای شکل دانه در آبرفت‌های تهران، اطلاعات جدول ۳ را گزارش نموده‌اند. به منظور اعتبارسنجی روابط تجربی پیشنهاد شده در تحقیق حاضر، مقادیر کرویت و گردش‌دگی گزارش شده از تحقیقات چشمی و همکاران (۱۳۸۵) در معادله‌های ۵ تا ۱۰ که در تحقیق حاضر به دست آمده، قرار گرفته و زاویه اصطکاک داخلی مربوط به هر آزمایش از روابط تجربی تعیین شده است. از طرف دیگر با توجه به انجام آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس و تعیین دقیق زاویه اصطکاک داخلی امکان مقایسه زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از روابط تجربی و مقادیر واقعی وجود داشته که این مقایسه در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ صورت گرفته است. خط ترسیم شده در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق رسم شده است. در صورتی‌که زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های برش مستقیم برج (مقادیر جدول ۳) با مقادیر تعیین شده از روابط تجربی پیشنهاد شده در این تحقیق (روابط ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰) برابر باشند، نقاط مشخص شده دقیقاً روی خط مذکور قرار می‌گیرند. در صورتی‌که نقاط، زیر خط مذکور باشند نشان می‌دهد که مقادیر تعیین شده از روابط تجربی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش برش مستقیم برج است. در صورتی‌که نقاط، بالای خط مذکور باشند نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک داخلی تعیین شده از روابط تجربی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش برش مستقیم برج است. با استفاده از این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی تعیین شده از روابط تجربی پیشنهاد شده، بین زاویه اصطکاک داخلی و گردش‌دگی دانه‌ها (روابط ۸، ۹ و ۱۰)، مقادیر بیشتر از واقعیت نشان می‌دهد در حالی‌که زاویه اصطکاک داخلی تعیین شده از روابط تجربی پیشنهاد شده، بین کرویت و زاویه اصطکاک داخلی (روابط ۵، ۶ و ۷)، به واقعیت نزدیک‌تر است. در این میان رابطه پیشنهادی بین کرویت و آزمایش برش مستقیم 30×30 سانتی‌متر (رابطه ۵)

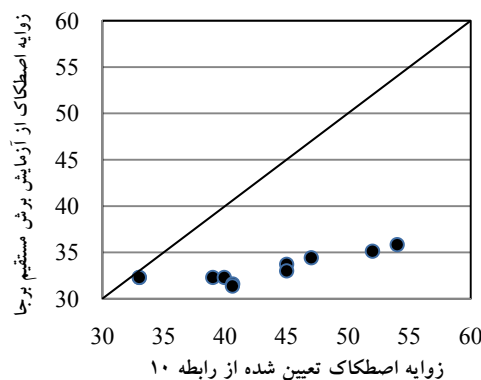
۷. نتیجه گیری

با توجه به آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق، به ازای گردش‌دگی یکسان، کمترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی از آزمایش سه محوری و بیشترین مقدار آن از آزمایش برش مستقیم با قالب‌های به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی متر به دست آمده است. دلیل آن درشت‌دانه بودن خاک مورد مطالعه و لحاظ شدن اثر آن در آزمایش برش مستقیم ۳۰×۳۰ سانتی متر است. با افزایش زاویه دار بودن دانه به دلیل افزایش قفل و بست دانه‌های زاویه دار نسبت به دانه‌های گردگوشه، زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته است. کرویت رابطه مستقیم با زاویه اصطکاک داخلی داشته و گردش‌دگی رابطه عکس با آن دارد. نسبت کرویت به گردش‌دگی رابطه مستقیم با زاویه اصطکاک داخلی خاک دارد. همبستگی خوبی بین نتایج به دست آمده از مطالعه متغیرهای شکل دانه و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی وجود داشته و امکان ارائه روابط تجربی برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی از روی متغیرهای شکل دانه وجود دارد. ضریب تعیین، بین زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده با متغیرهای شکل دانه در همه آزمایش‌ها، بیشتر از ۰/۷۳ بوده ولی بیشترین همبستگی بین نتایج آزمایش برش مستقیم با قالب‌های ۳۰×۳۰ سانتی متری و کرویت مشاهده شده است. اعتبار سنجی روابط تجربی پیشنهاد شده در این تحقیق با نتایج آزمایش‌های برجای دقیق انجام شده نشان می‌دهد که روابط تجربی پیشنهاد شده معمولاً مقادیر بیشتری برای زاویه اصطکاک داخلی پیش‌بینی می‌کند. در این میان مقادیر پیش‌بینی شده از روابط تجربی بین زاویه اصطکاک داخلی با گردش‌دگی بیشتر، از مقادیر پیش‌بینی شده بین زاویه اصطکاک داخلی با کرویت است. رابطه تجربی پیشنهاد شده بین زاویه



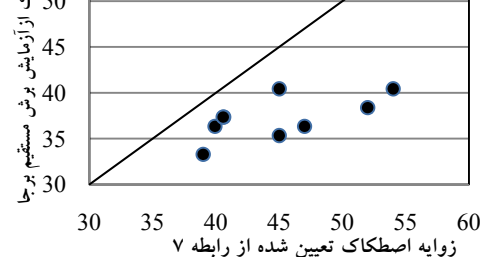
شکل ۱۰. مقایسه زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده

از آزمایش برش مستقیم برجا و رابطه تجربی شماره ۶ و ۹



شکل ۱۱. مقایسه زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از

آزمایش برش مستقیم برجا و رابطه تجربی شماره ۷ و ۱۰



اصطکاک داخلی و کرویت که از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم 30×30 سانتی‌متر به دست می‌آید، مقدار دقیق‌تری برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برجا نشان می‌دهد.

منابع

- آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (Japan International Cooperation Agency)، ۱۳۸۰. گزارش ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ. تهیه شده برای مرکز مطالعات زلزله و زیست‌محیطی شهرداری تهران بزرگ، ۳۸۱ صفحه.
- چشمی ا. ۱۳۸۵. مطالعه خواص مکانیکی آبرفت درشت دانه تهران بر اساس ترکیب زمین‌شناسی و آزمایش‌های مکانیکی. رساله دکتری، بخش زمین‌شناسی مهندسی دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس، ۲۶۲ صفحه.
- چشمی ا. فاخرع. خامه چیان م. ۱۳۸۷. زمین‌شناسی آبرفت‌های تهران و ارزیابی طبقه‌بندی رین جهت مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۳۴، صفحات ۱۵-۱.
- ASTM, D422-63, 1996. Standard test method for particle size analysis of soils. Annual book of ASTM standards, Vol. 04.08. pp. 10-16.
- ASTM, D3080-98, 2003. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM Book of Standards, Volume 04.08.
- ASTM, D4767-95, 2003. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test. ASTM Book of Standards, Volume 04.08.
- Barrett, P.J., 1980. The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology*, Vol. 27: 291-303.
- Cheshomi, A., Fakher, A., Jones, C.J.F.P., 2009. A Correlation between Friction Angle and Particle Shape Metrics in Quaternary Coarse Alluvia. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 42: 145-155.
- Cho, G.C., Dodds, J.S., Santamarina, J.C., 2004. Particle shape effect on packing density, stiffness and strength: Natural and crushed sand. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (5) : 591-602.
- De Jaeger, J., 1991. Influence de la Morphologie des Sables sur Leur Comportement Mecanique. PhD Thesis, Universite Catholique de Louvain, 3 tomes. (In French).
- Dodds, J., 2003. Particle Shape and Stiffness - Effect on Soil Behavior, MSc Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 173 p.
- Krumbein, W.C., Sloss, L.L., 1963. *Stratigraphy and Sedimentation*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, 660 p.
- Krumbein, W.C. 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 11(2) 64-72.
- Mirghasemi, A. A., Rothenburg, L. and Matyas, E. L., 2002. Influence of particle shape on engineering properties of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles. *Geotechnique*, 52(3) : 209-217.
- Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2) : 117-119.
- Santamarino, J.C., Cho, G.C., 2004. Soil behavior: The role of particle shape. *Proc. Skempton Conf.*, March, London. 14 p.
- Santamarina, J.C., Klein, K. and Fam, M., 2001. *Soils and Waves*. J. Wiley and Sons, Chichester, UK, 488 p.

-
- Sukumaran, B., Ashmawy, A.K., 2001. Quantitative characterization of the geometry of discrete particles. *Geotechnique*, 51(7) : 619-627.
- Terzaghi, K., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, London.
- Wadel, H., 1932. Volume, shape, and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 40(2) : 443-451.
- Zelasko, J.S., 1966. *An Investigation of the Influences of Particles Size, Size Gradation and Particle Shape on the Shear Strength and Packing Behavior of Quarziferous Sand*. PhD Thesis, Northwestern University, Evanston.