

ارزیابی تأثیر شکل و یکنواختی ذرات خاک‌های دانه‌ای بر درصد تخلخل

قاسم شه‌پری^۱، رسول اجل‌لوئیان^{۲*}

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۹

چکیده

یکی از اهداف مهم در ساخت جاده‌ها و بدنه سدهای خاکی، متراکم ساختن هرچه بیشتر خاک می‌باشد. افزایش تراکم همراه با کاهش پوکی باعث بهبود خصوصیات مهندسی مصالح خاکی نظیر مقاومت و نفوذپذیری می‌شود. نسبت پوکی حداقل خاک علاوه بر انرژی تراکم، به خصوصیات مهندسی خاک نیز وابسته می‌باشد. از جمله عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات خاک‌های دانه‌ای می‌توان به شکل ذرات و ضریب یکنواختی اشاره کرد. از آنجایی که روابط تجربی در مهندسی ژئوتکنیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، بدین لحاظ در تحقیق حاضر سعی بر آن است که رابطه‌ی تجربی بین پوکی و پارامترهای مزبور بدست آورده شود. اگرچه مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است ولیکن نتایج آن مطالعات جامع نبوده و از دقت بالایی برخوردار نیستند. در تحقیق حاضر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی روابطی جامع و دقیق جهت برآورد پوکی حداقل خاک‌های دانه‌ای نسبتاً یکنواخت ارائه شده است. در این مطالعه چهل و دو نمونه خاک با شکل و ضریب یکنواختی متفاوت تهیه شدند، سپس با استفاده از وسایل اندازه‌گیری دقیق و نمودارهای مقایسه‌ای ضریب گردشدگی و کرویت هر کدام اندازه‌گیری شد و در نهایت با استفاده از ۷۰ درصد از داده‌های حاصل آمده، رابطه‌ای برای محاسبه پوکی حداقل بر اساس درجه گرد شدگی، کرویت و ضریب یکنواختی ارائه گردیده است. اعتبارسنجی روابط بدست آمده نیز با استفاده از مابقی داده‌ها صورت گرفت. نتایج حاصله روندی منطقی و قابل قبول داشت.

کلید واژه‌ها: شکل ذرات خاک، کرویت، گردشدگی، پوکی، ضریب یکنواختی.

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان

۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان rasajl@sci.ui.ac.ir

* مسئول مکاتبات

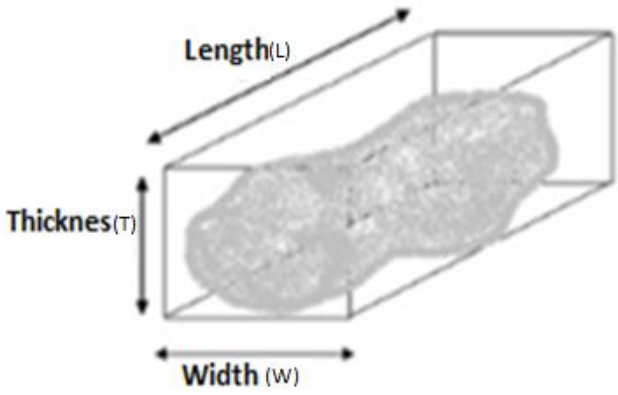
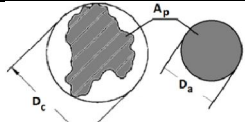
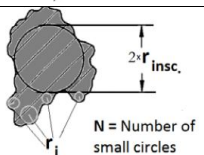
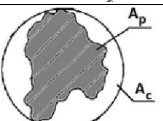
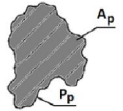
1. مقدمه

بدست آوردن روابط بین پارامترهای مختلف در مهندسی ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارد به گونه‌ای که امروزه تعداد زیادی از تحقیقات در این زمینه صورت می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین پارامترها در این زمینه نسبت پوکی خاک‌ها می‌باشد. رابطه بین پوکی و پارامترهای مؤثر توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است، چان و پیچ (1997)، کوبریناوسکی و ایشیهارا (2002)، یود (1973)، چو و همکاران (2006)، یوسف و عبدالرحمان (2007)، شیموب و مورتو (1995)، میورا و همکاران (1998)، دیسکن و همکاران (2001)، جیا و ویلیام (2001)، ناکاتا و همکاران (2001) و سیانگ و همکاران (2012) در رابطه با تأثیر شکل ذرات و توزیع دانه‌بندی آن‌ها بر ویژگی‌های خاک تحقیقاتی انجام دادند و هر کدام روابطی را ارائه نموده‌اند. نتایج تحقیقات آنان نشان می‌دهد که پوکی متأثر از گردشگری، کرویت و ضریب یکنواختی می‌باشد و در این خصوص روابطی ارائه شده است؛ اما روابط بدست‌آمده از جامعیت کافی برخوردار نبوده و اعتبارسنجی نشده‌اند.

هدف اصلی این تحقیق ارائه رابطه‌ای جامع و دقیق بین پوکی و پارامترهای مؤثر شامل شکل ذرات و ضریب دانه‌بندی می‌باشد. با استفاده از رابطه حاصله می‌توان پوکی خاک‌های مختلف را با استفاده از پارامترهای مزبور بدست آورد. همچنین با استفاده از نتایج تحقیق حاضر در آینده می‌توان روشی جدید جهت تلفیق منابع قرضه ارائه نمود. امروزه در پروژه‌هایی مانند زیرساخت جاده از طبقه‌بندی آشتو برای تلفیق منابع قرضه استفاده می‌شود و هدف اصلی، تلفیق دو منبع قرضه جهت تولید یک خاک با دانه‌بندی مشخص می‌باشد. در این روش‌ها بدون توجه به برخی از پارامترهای مهم نظیر شکل ذرات تلفیق انجام می‌گیرد، در صورتی که شکل ذرات بر پوکی خاک تأثیر زیادی دارد. لذا در این مقاله با انجام تحقیقات دقیق در مورد تأثیر شکل ذرات و دانه‌بندی بر روی پوکی خاک، می‌توان گامی در جهت ارائه روشی بهتر و جامع‌تر برای تلفیق منابع قرضه برداشت. برای انجام این کار داشتن اطلاعات کافی از توصیف، روش‌ها و وسایل

اندازه‌گیری شکل ذرات خاک ضروری می‌باشد. در مطالعات پیشین اصطلاحات و تعاریف گوناگون برای تشریح شکل ذرات ارائه گردیده است و این اصطلاحات توسط افراد مختلف به‌طور متفاوت تعریف شدند. از جمله این اصطلاحات می‌توان به کرویت و گردشگری اشاره کرد که در اکثر تحقیقات برای تشریح شکل ذرات از این دو کلمه استفاده شده است. به منظور آشنایی بیشتر در این زمینه، برخی از مهم‌ترین تعاریف به‌طور خلاصه در جدول 1 نشان داده شده‌اند. در این جدول نام پارامتر، توصیف پارامتر با استفاده از یک فرمول یا تعریف و مرجع هر کدام از آن‌ها نشان داده شده است. این تعاریف از اعتبار کافی برخوردار بوده و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در پژوهش‌های جدیدتر عموماً نتایج پژوهش‌های قدیمی‌تر تأیید و کامل‌تر می‌شوند. برای مثال، در این جدول تعریف ارائه‌شده برای گردشگری توسط وادل (1935) نشان داده شده است که با تعریف ارائه‌شده توسط سانتامارینا و چو (2004) تقریباً یک مفهوم را داشته است. در واقع تعریف ارائه‌شده توسط سانتامارینا و چو (2004) نتایج پژوهش‌های وادل (1935) را تأیید کرده و اعتبار آن را افزایش می‌دهد به گونه‌ای که در مطالعات مختلف و حتی در طراحی نرم‌افزارهای آنالیز عکس از این تعاریف استفاده گردیده است. ابتدا با استفاده از ابزارآلات مخصوص، ابعاد مختلف عکس با دقت بالا برآورد شده و در این نرم‌افزارها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و شکل ذرات با دقت کافی محاسبه می‌شود. بنابر مطالب گفته‌شده، در پژوهش‌های بعدی نیز می‌توان از تعاریف ارائه‌شده قدیمی استفاده کرد و قدیمی بودن آن‌ها از اعتبار آن‌ها نمی‌کاهد. در جدول 1، تعاریف متفاوتی از نسبت پهن‌شدگی و طویل‌شدگی نیز توسط افراد مختلف ارائه شده است. برای نمونه، کو و همکاران (1998) نسبت پهن‌شدگی را نسبت بعد متوسط به بزرگ‌ترین بعد ذرات معرفی کردند در حالی که اسپنبرنر (1956) و اردوغان و فولر (2005) نسبت پهن‌شدگی را نسبت بزرگ‌ترین بُعد به بُعد متوسط ذرات گزارش کردند.

جدول 1. برخی از مهم‌ترین تعاریف ارائه‌شده در زمینه توصیف شکل ذرات توسط افراد مختلف

| شماره | پارامتر | رابطه | شکل مربوطه | مرجع |
|-------|------------------|---------------------------|---|---|
| 1 | Sphericity | T/L |  | Santamarina and Cho, 2004 Shape was obtained by Erdogan and Fowler, 2005 |
| 2 | Sphericity | $3\sqrt{(W \cdot T)/L^2}$ | | Krumbein, 1941 |
| 3 | Aspect ratio | L/T | | some image analysis software |
| 4 | Aspect ratio | L/W | | Kuo and Freeman, 2000 |
| 5 | Flatness Ratio | W/T | | Kuo et al., 1998 |
| 6 | Flatness Ratio | T/W | | Erdogan and Fowler, 2005 Aschenbrenner, 1956 |
| 7 | Elongation Ratio | L/W | | Kuo et al., 1998 |
| 8 | Elongation Ratio | W/L | | Aschenbrenner, 1956 Erdogan and Fowler, 2005 |
| 9 | Sphericity | D_v/D_c |  | Wadell, 1935 |
| 10 | Roundness | |  | Wadell, 1932; Krumbein and Sloss, 1963; Mitchell and Soga, 2005 |
| 11 | Roundness | A_p/A_c |  | Tickell, 1938 |
| 12 | Circularity | P_p^2/A_p |  | Blott and Pye, 2008 |

بیشتر می‌باشد. علیرغم دقت بالاتر روش آنالیز دیجیتالی عکس از روش نمودارهای مقایسه‌ای، اما ابزارهای مورد نیاز آن به آسانی در دسترس نیستند. بدین لحاظ تاکنون استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای معمول‌تر بوده است. در جدول نمونه‌ای از نمودارهای مقایسه‌ای نشان داده شده است که با استفاده از آن اندازه‌گیری کرویت و گردش‌دگی به آسانی می‌تواند صورت گیرد. در پژوهش حاضر نیز سعی شده است که با استفاده از این جدول و وسایل اندازه‌گیری دقیق، ضرائب گردش‌دگی و کرویت تعیین گردیده و روابط آن‌ها با نسبت پوکی حداقل به صورت آماری برآورد گردد.

جهت انجام بهتر تحقیق در این زمینه، فقط دانستن تعاریف و توصیفات شکل ذرات کافی نیست، بلکه بررسی روش‌های مختلف اندازه‌گیری شکل ذرات نیز ضرورت دارد. در تعیین شکل ذرات انتخاب دو روش متفاوت شامل استفاده از روش آنالیز دیجیتال عکس و استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای امکان پذیر می‌باشد. در روش آنالیز دیجیتال عکس از تکنولوژی پیشرفته‌تری استفاده می‌گردد لذا نتایج حاصل از این روش از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. مزیت این روش آن است که با آنالیز دیجیتالی عکس امکان محاسبه سیستماتیک شکل ذرات شامل آنالیز فوریر، آنالیز فرکچرال و دیگر روش‌ها را فراهم می‌کند و دقت آن جهت برآورد شکل ذرات خاک

آن نوشت و در نرم‌افزارهای آماری تحلیل رگرسیون را انجام داده و ضرائب هر یک از پارامترها را در معادله بدست آورد.

2. مواد و روش‌ها

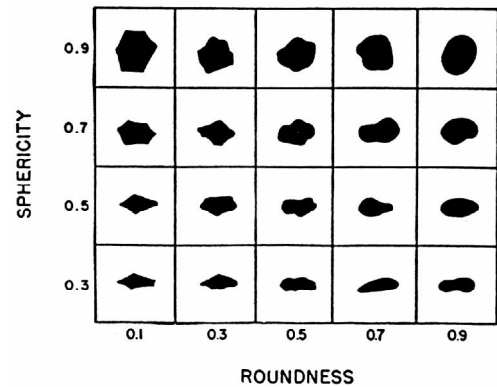
جهت بررسی تأثیر شکل ذرات و ضریب یکنواختی بر پوکی، نمونه‌هایی با شکل و دانه‌بندی گوناگون تهیه و با انجام آزمایشات و اندازه‌گیری‌ها، پارامترهای مختلف برآورد شده و در نهایت رابطه بین آن‌ها محاسبه گردید. همه نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش از نقاط مختلف استان‌های خوزستان و اصفهان تهیه و فراوری شدند. منظور از فراوری نمونه‌ها تغییر دانه‌بندی آن‌ها در آزمایشگاه و ساخت نمونه‌هایی با ضریب یکنواختی خاص می‌باشد. به‌طور کلی نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- نمونه‌هایی که محل برداشت آن‌ها در طبیعت مشخص می‌باشد و شامل نمونه‌های برداشت شده از رسوبات رودخانه‌های کارون و زاینده‌رود، دانشگاه اصفهان (کوه صفه) و معدن سدید می‌باشند.

نمونه‌های K01, K02, K03, K04, K05, K06 که دارای ضریب کرویت متوسط و گردشگی بالا بوده و عموماً از آهک تشکیل یافته‌اند، از رسوبات رودخانه کارون تهیه شدند. رسوبات این رودخانه از گوشه‌دار تا کاملاً گردشده تغییر می‌کنند. در سرچشمه‌ی این رودخانه رسوبات گوشه‌دار وجود دارند و با حرکت به سمت پایین‌دست، نمونه‌هایی با گردشگی بیشتر مشاهده می‌شود. نمونه‌ها از ساحل رودخانه کارون در 25 کیلومتری جنوب شهر دездز برداشت شدند که محل برداشت این نمونه‌ها با سرچشمه رودخانه فاصله زیادی داشت، بنابراین حمل آن‌ها توسط رودخانه موجب گردش شدن ذرات شده است. طی بررسی رسوبات رودخانه‌ی کارون به وضوح مشاهده شد که ذرات درشت‌تر در رسوبات عموماً دارای گردشگی بیش‌تر نسبت به ذرات ریزتر می‌باشند. جهت ایجاد تنوع در نمونه‌ها و برآورد اثر دانه‌بندی بر پوکی خاک، با استفاده از رسوبات رودخانه‌ای، نمونه‌های مختلف با دانه‌بندی‌های متنوع فراوری شده‌اند، همین عامل یعنی

جدول 2. نمودار مقایسه‌ای جهت تعیین درجه گردشگی و

کرویت (Santamarina and Cho, 2004)



پس از بدست آوردن نتایج آزمایشات، برآورد بهترین معادله بین پارامترها یک امر مهم می‌باشد. در برخی موارد علی‌رغم نتایج دقیقی که از آزمایشات تجربی حاصل می‌شود، محاسبات ناقص در آنالیز رگرسیون موجب کاهش دقت این روابط شده و در نتیجه دقت روابط تجربی رضایت‌بخش نیست. لذا جهت رفع این مشکل و برآورد بهتر روابط بین پارامترها می‌توان از آزمون فاکتوریل استفاده کرد. این آزمون یک آزمون آماری می‌باشد و عموماً در پژوهش‌های پزشکی، زیست‌شناسی، شیمی، زمین‌شناسی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد و وجود یا عدم وجود اثر متقابل بین پارامترها را نشان می‌دهد. گرچه این یک آزمون آماری بوده و نتایج آن فقط شامل وجود یا عدم وجود اثر متقابل بین پارامترها می‌باشد، با این حال با روش خاصی می‌توان از این آزمون در برآورد بهتر روابط بین پارامترها استفاده کرد. عدم وجود اثر متقابل بین پارامترها بدین معنا است که با تغییر در یک پارامتر تغییر محسوسی در شدت اثر پارامترهای دیگر بر جواب (پارامتر وابسته)، ایجاد نمی‌شود (حامدی، 1390). پس در مواردی که بین پارامترها اثر متقابل وجود دارد، باید رابطه به صورتی برآورد شود که ضریب پارامترها تابعی از مقدار پارامترهای دیگر باشد و در مواردی که بین پارامترها اثر متقابل وجود ندارد، باید رابطه به گونه‌ای برآورد شود که ضریب پارامترها یک عدد ثابت بوده و تابعی از مقدار پارامترهای دیگر نباشد. بدین ترتیب با در نظر گرفتن وضعیت اثر متقابل بین پارامترها می‌توان شکل کلی رابطه را متناسب با

اختلاف در اندازه ذرات در نمونه‌های مذکور موجب اختلاف در شکل ذرات آن‌ها شده است.

نمونه‌های Z0, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6 و Z0 که دارای گردشگی بالا بوده و عموماً از آهک تشکیل شده‌اند، از رسوبات رودخانه زاینده‌رود در نزدیکی‌های شهر اصفهان برداشت شدند. این نمونه‌ها در یک نقطه برداشت شده و مشابه نمونه‌های رسوبات کارون با استفاده از الک‌های گوناگون فراوری شدند. در مرحله فراوری آن‌ها سعی بر ایجاد نمونه‌هایی با دانه‌بندی متفاوت شده است. بنابراین اختلاف در شکل ذرات این نمونه‌ها نیز مانند نمونه‌های برداشت شده از رسوبات رودخانه‌ای کارون، به اختلاف در دانه‌بندی آن‌ها مربوط می‌شود.

نمونه‌های D1, D2, D3, D4, D5, D6 و D0 در کوه صدف واقع در قسمت جنوبی شهر اصفهان برداشت شدند. این کوه از سه واحد با جنس‌های متفاوت تشکیل شده است، دامنه کوه از واحد شیلی و قله آن از واحد کنگلومرا و آهک تشکیل یافته است. نمونه‌های مذکور از مواد واریزه‌ای واحد شیل برداشت شدند. در طبیعت بر اثر فرسایش سنگ‌های شیلی رسوباتی پهن و گوشه دار تشکیل می‌شوند بنابراین علت پهن بودن این نمونه‌ها و گوشه‌دار بودن آن‌ها به منشأ زمین‌شناسی و چگونگی تشکیل آن‌ها مربوط می‌شود.

نمونه‌های Sa1, Sa2, Sa3, Sa4, Sa5, Sa6 و Sa0 از معدن سدید واقع در گردنه آبنیل در فاصله 10 کیلومتری شرق شهر اصفهان برداشت شدند. این نمونه‌ها بر خلاف نمونه‌های دیگر با استفاده از سنگ‌شکن در کارگاه شکسته شده‌اند بنابراین کاملاً گوشه‌دار هستند. این‌ها مصالحی هستند که پس از خرد کردن توده سنگ طبیعی در ساخت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. وزن مخصوص حقیقی این نمونه‌ها تحت تأثیر کانی‌های مافیک تشکیل‌دهنده آن‌ها بیش از سایر نمونه‌ها می‌باشد.

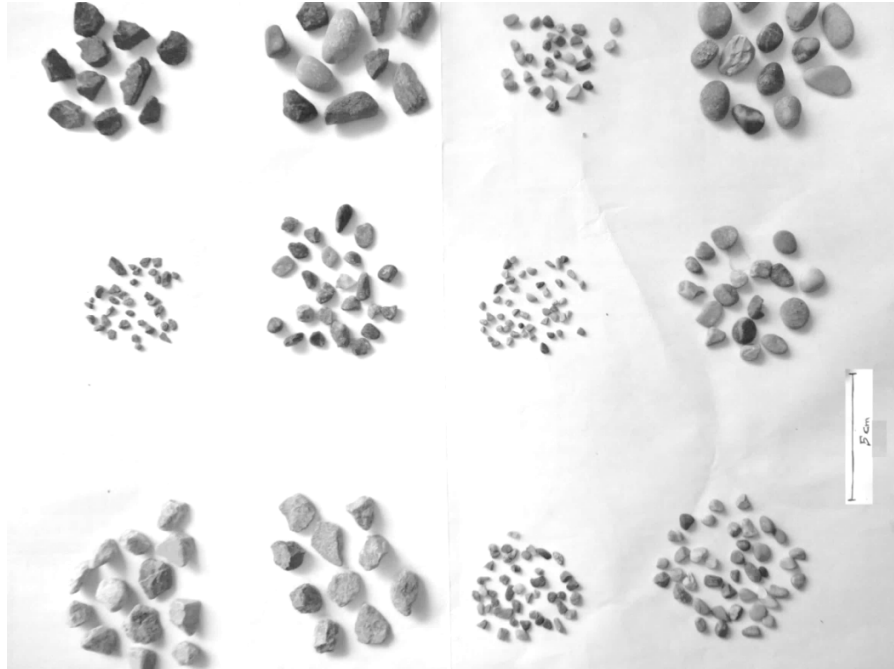
- نمونه‌های برداشت شده در محل اجرای پروژه‌های عمرانی که محل برداشت آن‌ها در طبیعت معلوم نیست.

تعدادی از نمونه‌ها (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8 و F9) با مراجعه به محل اجرای پروژه‌های مختلف، از مصالح مورد استفاده در آن پروژه‌ها برداشت شدند. چون مصرف‌کنندگان این مصالح از محل برداشت آن‌ها مطلع نبودند، منشأ و محل دقیق برداشت آن‌ها در طبیعت معلوم نشده است. نمونه‌های F1 و F2 گوشه‌دار هستند در حالی که نمونه‌های F5 و F6 آبرفتی بوده و دارای گردشگی بالا هستند. نمونه F1 از شکسته شدن سنگ گرانیت در کارگاه‌های ساخت گرانیت حاصل آمده است و نمونه‌های F2, F5 و F6 عموماً از آهک تشکیل شده‌اند. نمونه‌های F3 و F4 نمونه‌های شکسته شده و گوشه‌داری هستند که مصرف صنعتی داشته و وزن مخصوص حقیقی خیلی بالایی دارند. نمونه‌های F7, F8, F9 همانند F3 و F4 شکسته شده و گوشه‌دار هستند لکن دارای وزن مخصوص حقیقی کم‌تر می‌باشند.

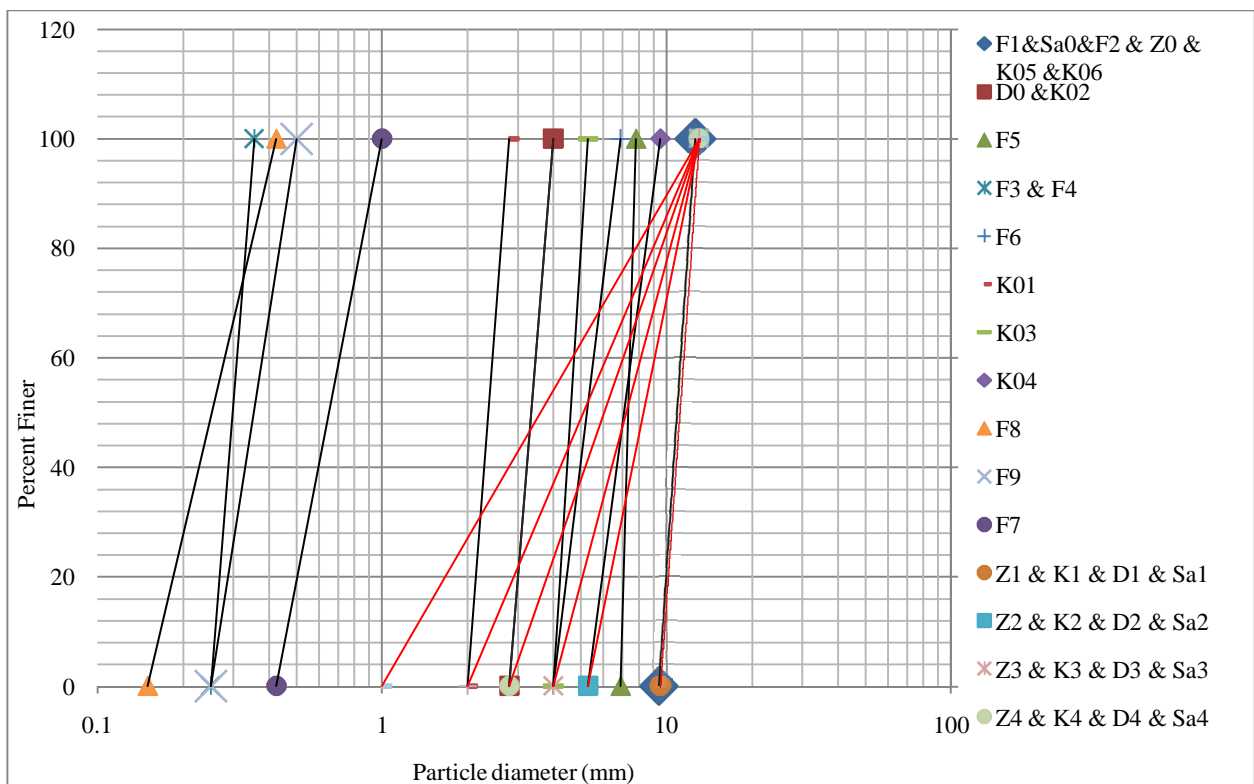
پس از جمع‌آوری نمونه‌های مختلف، با استفاده از الک‌ها در آزمایشگاه، نمونه‌های مختلف با ضریب یکنواختی متفاوت تهیه شدند. در فراوری آن‌ها عموماً سعی بر ساخت نمونه‌هایی با ضریب یکنواختی کم‌تر از 3/6 می‌شد. در شکل 2 نمودارهای دانه‌بندی نمونه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها عموماً دارای دانه‌بندی یکنواخت می‌باشند. ضریب یکنواختی نمونه‌ها بین 1/06 (کاملاً یکنواخت) تا 3/6 (درآستانه دانه‌بندی خوب) می‌باشند. به‌طور کلی با توجه به اینکه تمام نمونه‌ها دارای ضریب یکنواختی کم‌تر از 4 می‌باشند، می‌توان گفت که پژوهش حاضر بر روی نمونه‌های بد دانه‌بندی شده یا یکنواخت انجام گرفته است.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که اندازه ذرات نمونه‌ها در این پژوهش از کم‌تر از 1 میلی‌متر تا 13 میلی‌متر تغییر می‌کند و نمونه‌ها از نظر گوشه‌داری در طیف وسیعی قرار گرفته و کرویت نمونه‌ها از 0/3 تا 0/64 تغییر می‌کند. تنوع در پارامترهای مذکور، در برآورد اثر آن‌ها بر پوکی و ارائه یک معادله تجربی جامع کمک زیادی می‌کند.



شکل 1. عکس تعدادی از نمونه‌های مورد استفاده (تنوع نمونه‌ها از نظر اندازه و شکل ذرات در این تصویر مشاهده می‌شود).



شکل 2. منحنی توزیع دانه‌بندی نمونه‌های مورد آزمایش

آزمون اندازه‌گیری پوکی مینیمم نیز بر روی همه نمونه‌ها انجام گرفت.

پس از جمع‌آوری و فراوری نمونه‌های فوق‌الذکر، کرویت، گردشگی و ضریب دانه‌بندی آنها اندازه‌گیری شدند و

برآورد شود یعنی انرژی و وقت لازم برای متراکم کردن نمونه‌ها اعمال گردد. از همین رو در آزمایش اندازه‌گیری پوکی نمونه‌ها، هر نمونه در سه لایه و در سه مرحله درون یک سیلندر با حجم $942/297$ سانتی‌متر مکعب ریخته شد. در هر مرحله یک وزنه کیلوگرمی بر روی آن قرار داده و به مدت یک دقیقه ویبره شد. جهت اطمینان از کافی بودن انرژی تراکم و صحت نتایج این آزمایش، برخی از نمونه‌ها یک بار به مدت 3 دقیقه و بار دیگر به مدت 15 دقیقه بارگذاری و ویبره شدند و سپس نتایج دو دوره ویبراسیون با یکدیگر مقایسه شدند. در جدول 3 نتایج پوکی نمونه‌های F1 و D0 برای دوره‌های مختلف ویبراسیون نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که تفاوت در مقدار پوکی حداقل بین دوره 3 دقیقه‌ای و 15 دقیقه‌ای از 0/05 بیشتر نیست، بنابراین دوره 3 دقیقه‌ای برای متراکم ساختن نمونه‌ها کافی بوده و نیازی به اعمال انرژی و زمان بیشتر برای متراکم ساختن خاک مشاهده نمی‌شود.

همان‌طور که قبلاً هم گفته شد، در اکثر مطالعات از کرویت گردش‌دگی برای توصیف شکل ذرات استفاده شده است و این دو پارامتر توصیفات مختلفی دارند که توسط افراد مختلف ارائه شده‌اند. در مطالعه حاضر در خصوص توصیف کرویت ذرات از تعریف ارائه شده توسط سانتمارینا و چو استفاده شده است. مطابق تعریف سانتمارینا و چو (2004)، کرویت برابر با نسبت کوچک‌ترین بعد ذره به بزرگ‌ترین بعد آن می‌باشد. بنابراین جهت برآورد کرویت، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین بعد ذره با استفاده از وسایل دقیق اندازه‌گیری و نسبت بعد کوچک به بعد بزرگ‌تر محاسبه شد. در این راستا از هر نمونه تعداد بیست ذره انتخاب گردید و ضریب کرویت هر یک تعیین و معدل آن‌ها به عنوان ضریب کرویت نمونه تعیین گردید. همچنین به منظور برآورد دقیق‌تر گردش‌دگی، بیست ذره از هر نمونه انتخاب شد. سپس با استفاده از جدول گردش‌دگی هر کدام برآورد و میانگین محاسبه گردید. چون هدف اصلی این پژوهش برآورد رابطه بین پوکی حداقل و پارامترهای مؤثر است، باید پوکی نمونه‌ها با دقت بالایی

جدول 3. مقایسه دوره ویبراسیون 15 دقیقه‌ای با دوره 3 دقیقه‌ای

| مقدار اختلاف بین پوکی دوره‌های مختلف | پوکی برای دوره 15 دقیقه‌ای و بارگذاری حدود ده کیلوگی | پوکی برای دوره 3 دقیقه‌ای | نمونه |
|--------------------------------------|--|---------------------------|-------|
| 0/002 | 0/544 | 0/546 | F1 |
| 0/05 | 0/64 | 0/69 | D0 |

آزمون شامل برخی از نمونه‌های برداشت‌شده از رودخانه کارون، معدن سدید، دانشگاه اصفهان (کوه صفه) و رودخانه زاینده‌رود بوده که هر کدام از آن‌ها دارای شش حالت از ضریب دانه‌بندی هستند (نمودارهای دانه‌بندی این نمونه‌ها در شکل با رنگ قرمز ترسیم شده‌اند). داشتن وضعیت‌های مختلف دانه‌بندی در این نمونه‌ها شرایط لازم برای انجام آزمون فاکتوریل را بر روی آن‌ها فراهم کرده است. نتیجه این آزمون وضعیت اثر متقابل بین پارامترها را نشان می‌دهد. دانستن این موضوع می‌تواند در تهیه نمونه‌ها و طراحی آزمایشات در پژوهش‌های بعدی و ارائه رابطه تجربی دقیق تر کمک زیادی بکند (حامدی، 1390). که در تحقیق حاضر از

در نهایت پس از انجام آزمایشات، با تحلیل نتایج در نرم‌افزار SPSS رابطه بین پارامترها محاسبه شد و پس از آن اعتبار رابطه تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. 70 درصد داده‌ها جهت بدست آوردن رابطه مذکور در نرم‌افزار SPSS و مابقی برای اعتبارسنجی آن رابطه مورد استفاده قرار گرفتند. پس از بدست آوردن رابطه بین پارامترها، جهت اعتبارسنجی آن، نتایج رابطه با مقدار پوکی واقعی مقایسه شده و پس از محاسبه خطای آن رابطه، خطای بیشینه و میانگین جهت قضاوت مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این‌ها، آزمون آماری فاکتوریل در مورد شکل ذرات و ضریب یکنواختی انجام شد و از نتایج آن جهت برآورد بهترین رابطه بین پارامترها استفاده گردید. نمونه‌های مورد استفاده در این

نتایج این آزمون جهت برآورد دقیق‌تر رابطه تجربی بین پارامترها استفاده شده است.

نتایج آزمایشات اندازه‌گیری پوکی نشان داده شده است. از داده‌های این جدول برای به دست آوردن رابطه بین پوکی و سایر پارامترها استفاده گردیده است. داده‌های مورد استفاده در این جدول شامل 70 درصد از نتایج آزمایشات می‌باشند و مابقی داده‌ها برای اعتبارسنجی رابطه حاصله مورد استفاده قرار گرفتند.

3. نتایج و بحث

در جدول 4 خصوصیات مهندسی نمونه‌های مختلف مانند شکل ذرات، دانه‌بندی، وزن مخصوص حقیقی ذرات جامد و

جدول 4. خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مورد استفاده و نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی

| Sample | R | S | Cu | Gs | D10(mm) | D60(mm) | پوکی واقعی |
|--------|------|------|------|------|---------|---------|------------|
| F5 | 0/7 | 0/43 | 1/06 | 2/57 | 6/99 | 7/43 | 0/55 |
| Z0 | 0/74 | 0/52 | 1/17 | 2/69 | 9/80 | 11/47 | 0/53 |
| F6 | 0/90 | 0/42 | 1/31 | 2/57 | 4/22 | 5/55 | 0/52 |
| K01 | 0/57 | 0/58 | 1/18 | 2/70 | 2/07 | 2/45 | 0/48 |
| K02 | 0/68 | 0/58 | 1/20 | 2/70 | 2/90 | 3/47 | 0/49 |
| K03 | 0/67 | 0/56 | 1/15 | 2/70 | 4/11 | 4/74 | 0/49 |
| K04 | 0/75 | 0/48 | 1/34 | 2/70 | 5/62 | 7/52 | 0/50 |
| K05 | 0/84 | 0/64 | 1/17 | 2/70 | 9/80 | 11/47 | 0/49 |
| K06 | 0/88 | 0/44 | 1/17 | 2/70 | 9/80 | 11/47 | 0/51 |
| F7 | 0/10 | 0/52 | 1/53 | 2/61 | 0/46 | 0/71 | 0/62 |
| F8 | 0/10 | 0/60 | 1/68 | 2/62 | 0/17 | 0/28 | 0/60 |
| F9 | 0/10 | 0/58 | 1/41 | 2/65 | 0/27 | 0/38 | 0/60 |
| D1 | 0/10 | 0/30 | 1/20 | 2/66 | 9/80 | 11/46 | 0/70 |
| D2 | 0/10 | 0/41 | 1/57 | 2/66 | 5/79 | 9/07 | 0/70 |
| D3 | 0/10 | 0/42 | 1/80 | 2/66 | 4/50 | 8/11 | 0/65 |
| D4 | 0/10 | 0/43 | 2/15 | 2/66 | 3/26 | 7/03 | 0/61 |
| D5 | 0/10 | 0/43 | 2/55 | 2/66 | 2/41 | 6/14 | 0/58 |
| D6 | 0/10 | 0/45 | 3/61 | 2/66 | 1/29 | 4/66 | 0/52 |
| Sa1 | 0/10 | 0/44 | 1/17 | 2/94 | 9/80 | 11/46 | 0/66 |
| Sa2 | 0/10 | 0/43 | 1/57 | 2/94 | 5/79 | 9/07 | 0/68 |
| Sa3 | 0/10 | 0/45 | 1/80 | 2/94 | 4/50 | 8/11 | 0/62 |
| Sa4 | 0/10 | 0/46 | 2/15 | 2/94 | 3/26 | 7/03 | 0/57 |
| Sa5 | 0/10 | 0/46 | 2/55 | 2/94 | 2/41 | 6/14 | 0/53 |
| Sa6 | 0/10 | 0/47 | 3/61 | 2/94 | 1/29 | 4/66 | 0/49 |
| Z1 | 0/74 | 0/52 | 1/17 | 2/69 | 9/80 | 11/46 | 0/55 |
| Z2 | 0/58 | 0/43 | 1/57 | 2/69 | 5/79 | 9/07 | 0/56 |
| Z3 | 0/54 | 0/46 | 1/80 | 2/69 | 4/50 | 8/11 | 0/54 |
| Z4 | 0/51 | 0/45 | 2/15 | 2/69 | 3/26 | 7/03 | 0/50 |
| Z5 | 0/47 | 0/46 | 2/55 | 2/69 | 2/41 | 6/14 | 0/46 |
| Z6 | 0/42 | 0/48 | 3/61 | 2/69 | 1/29 | 4/66 | 0/41 |

یک از پارامترهای شکل ذرات (کرویت و گردشگری) مستقل از مقدار Cu اعمال گردید و ضریب پارامتر Cu در رابطه نیز مستقل از پارامترهای شکل ذرات اعمال شد. بدیهی است که در نظر گرفتن نکات مذکور در ارائه رابطه دقیق تر کمک زیادی کرده و بدین طریق بهترین معادله ممکن محاسبه و ارائه گردید.

نتایج اعتبارسنجی رابطه شماره 1 در جدول 5 ارائه گردیده است. در این جدول علاوه بر مشخصات نمونه‌های مختلف، نتایج پیش‌بینی پوکی با استفاده از رابطه 1 و نیز مقدار خطا و درصد خطای این رابطه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین خطای نسبی مربوط به نمونه F1 بوده که 13/48 درصد می‌باشد و میانگین خطای نسبی در تمام نمونه‌ها برابر با 4/3 درصد می‌باشد که مقدار قابل توجهی نبوده و همبستگی بالای بین پارامترها و دقت بالای رابطه را برای پیش‌بینی پوکی نشان می‌دهد. علت دقت بالای این رابطه تجربی صرفاً حذف کردن خطای دستگاهی و دیگر خطاها نمی‌باشد. بلکه برآورد مناسب‌ترین رابطه تجربی با نظر گرفتن اثر متقابل بین پارامترها نیز کمک زیادی در افزایش دقت کرده است.

از پردازش داده‌های جدول 4 در نهایت یک معادله غیر خطی چندمتغیره بین پوکی و پارامترهای مؤثر شامل گردشگری، کرویت و ضریب یکنواختی بدست آمده است، که در رابطه 1 نشان داده شده است. این رابطه تجربی جهت محاسبه‌ی پوکی خاک‌های دانه‌ای با ضریب یکنواختی کم‌تر از 3/6 مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رابطه که نتیجه اصلی این پژوهش می‌باشد، e_{min} (نسبت پوکی حداقل)، S (کرویت)، R (گردشگری) و Cu (ضریب یکنواختی) می‌باشند. با توجه به این رابطه، با افزایش هر کدام از پارامترهای گردشگری، کرویت و ضریب یکنواختی مقدار پوکی حداقل کاهش می‌یابد که این قضیه نتایج مطالعات قبلی را تأیید کرده و منطقی به نظر می‌رسد.

(1)

$$e_{min} = 1.003 - 0.508 \times S - 0.389 \times (1-S) \times R - 0.071 \times Cu$$

نتایج آزمون فاکتوریل با سطح احتمال بالا وجود اثر متقابل بین پارامترهای گردشگری و کرویت و عدم وجود اثر متقابل بین پارامترهای شکل ذرات و ضریب دانه‌بندی را نشان می‌دهد. در رابطه 1، از یک طرف ضریب پارامتر گردشگری تابعی از پارامتر کرویت اعمال شد. از طرف دیگر ضریب هر

جدول 5. نتایج اعتبارسنجی رابطه 1

| Sample | R | S | Cu | Gs | D10 (mm) | D60 (mm) | پوکی واقعی | پوکی پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه تجربی | مقدار خطا | خطای نسبی % |
|--------|------|------|------|------|----------|----------|------------|---|-----------|-------------|
| F1 | 0/10 | 0/56 | 1/17 | 2/65 | 9/80 | 11/47 | 0/55 | 0/62 | 0/074 | 13/48 |
| D0 | 0/25 | 0/31 | 1/20 | 2/66 | 2/90 | 3/47 | 0/70 | 0/69 | 0/003 | 0/49 |
| Sa0 | 0/13 | 0/44 | 1/17 | 2/94 | 9/80 | 11/47 | 0/66 | 0/67 | 0/009 | 1/31 |
| F2 | 0/10 | 0/49 | 1/17 | 2/69 | 9/80 | 11/47 | 0/61 | 0/65 | 0/037 | 6/07 |
| F3 | 0/10 | 0/51 | 1/19 | 3/75 | 0/26 | 0/31 | 0/63 | 0/64 | 0/010 | 1/63 |
| F4 | 0/10 | 0/57 | 1/19 | 3/85 | 0/26 | 0/31 | 0/56 | 0/61 | 0/052 | 9/30 |
| K1 | 0/86 | 0/54 | 1/17 | 2/70 | 9/80 | 11/46 | 0/50 | 0/49 | 0/008 | 1/66 |
| K2 | 0/79 | 0/50 | 1/57 | 2/70 | 5/79 | 9/07 | 0/48 | 0/48 | 0/003 | 0/65 |
| K3 | 0/76 | 0/52 | 1/80 | 2/70 | 4/50 | 8/11 | 0/46 | 0/47 | 0/011 | 2/48 |
| K4 | 0/74 | 0/53 | 2/15 | 2/70 | 3/26 | 7/03 | 0/42 | 0/45 | 0/029 | 6/98 |
| K5 | 0/71 | 0/54 | 2/55 | 2/70 | 2/41 | 6/14 | 0/39 | 0/42 | 0/028 | 7/06 |
| K6 | 0/67 | 0/55 | 3/61 | 2/70 | 1/29 | 4/66 | 0/36 | 0/35 | 0/005 | 1/49 |

خطای استاندارد ضرائب در حد قابل قبولی به صفر نزدیک بوده و نسبت به ضرائب مذکور بسیار کوچک‌تر هستند، که این نیز دلیلی بر دقت بالای رابطه تجربی بوده و نشان می‌دهد که رابطه مذکور جهت پیش‌بینی پوکی با استفاده از شکل ذرات و ضریب یکنواختی مناسب است. همچنین امید به ارائه روش جدید تلفیق منابع قرضه با در نظر داشتن شکل ذرات را افزایش می‌دهد.

یکی از پارامترهای آماری که میزان دقت روابط را بیان می‌کند پارامتر خطای استاندارد می‌باشد. افزایش این ضریب به معنی کم شدن دقت رابطه و کاهش آن بیانگر همبستگی بالای بین پارامترها و دقت بالای رابطه می‌باشد. ضرائب رگرسیون مربوط به رابطه شماره 1 در جدول 6 با نمادهای a ، b ، c و d نشان داده شده‌اند. در این جدول همچنین خطای استاندارد مربوط به هر یک از این ضرائب نیز ارائه شده است. مقدار

جدول 6. پارامتر آماری خطای استاندارد مربوط به ضرائب رگرسیون در رابطه 1

| خطای استاندارد | خطای استاندارد | خطای استاندارد | خطای استاندارد | خطای استاندارد |
|----------------|----------------|----------------|----------------|--|
| ضریب d | ضریب c | ضریب b | ضریب a | رابطه پوکی حداقل با کرویت و گردشگری |
| 0/007 | 0/033 | 0/067 | 0/037 | $e_{min} = a - b \times S - c \times R \times (1-S) - d \times Cu$ |

4. نتیجه‌گیری

رابطه تجربی جهت تخمین نسبت پوکی حداقل بر اساس بافت و ساخت خاک ارائه گردید که این رابطه از دقت کافی برخوردار بوده و برای محاسبه‌ی پوکی خاک‌های دانه‌ای با ضریب یکنواختی کم‌تر از 3/6 می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. دقت بالای رابطه، امید به ارائه روش جدید تلفیق منابع قرضه را افزایش می‌دهد.

پوکی حداقل در درجه اول به کرویت، گردشگری و ضریب یکنواختی بستگی دارد. نتایج آزمون اثر متقابل نشان می‌دهد که اثر متقابل بین پارامترهای شکل و ضریب یکنواختی در برآورد پوکی خاک‌های بد دانه‌بندی شده وجود ندارد. علاوه بر این، نتایج آزمون وجود اثر متقابل بین پارامترهای کرویت و گردشگری را نشان می‌دهد.

منابع

- حامدی، ج.، 1390، روشهای پژوهش خوب، انتشارات دانشگاه تهران، صفحات 400 تا 410.
- Aschenbrenner, B.C., 1956. A new method of expressing particle sphericity, *Journal of sedimentary petrology*, 26: 15-31.
- Blott, S. J., Pye, K., 2008. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification, *Journal of sedimentology*, 55 (1): 31-63.
- Chan, L.C.Y., Page, N.W., 1997. Particle fractal and load effects on internal friction in powders, *Journal of powder technology*, 90: 259-266.
- Cho, G.C., Dodds, J.S., Santamarina, J.C., 2006. Particle shape effects on packing density, Stiffness and strength: natural and crushed sands, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132 (5): 591-602.
- Cubrinovski, M., Ishihara, K., 2002. Maximum and minimum void ratio characteristics of sands, *Journal of soils and foundation*, 42 (6): 65-78.
- Dyskin, A. V., Estrin, Y., Kanel-Belov, A. J., Pasternak, E., 2001. Toughening by fragmentation - How topology helps, *Advance engineering material*, 3(1): 885-888.
- Erdogan, S. T., Fowler, D. W., 2005. Determination of aggregate shape properties using X-ray Topographic Methods and the effect of shape on concrete rheology, *International center for aggregates research*, Research report: ICAR 106-1.

- Jia, X., Williams, R. A., 2001. A packing algorithm for particles of arbitrary shapes, *Journal of powder technology*, 120: 175-186.
- Krumbein, W. C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, *Journal of sedimentary petrology*, 11 (2): 64-72.
- Krumbein, W. C., Sloss, L. L., 1963. *Stratigraphy and sedimentation*, Freeman, San Francisco, Second edition.
- Kuo, C., Rollings, R. S., Lynch, L. N., 1998. Morphological study of coarse aggregates using image analysis, *Journal of materials in civil engineering*, 10 (3): 135-142.
- Kuo, C-Y., Freeman, R. B., 2000. Imaging indices for quantification of shape, Angularity and surface texture of aggregates, Transportation research board 79th annual meeting, Washington, 686.
- Mitchell, J. K., Soga, K., 2005. *Fundamentals of soil behavior*, Third edition, Wiley, New Jersey.
- Miura, K., Maeda K., Furukawa, M., Toki, S., 1998. Mechanical characteristics of sands with different primary properties, *Journal of soils and foundations*, 38: 159-172.
- Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Murata, H., 2001. One dimensional compression behavior of uniformly graded sand related to single particle crushing strength, *Journal of soils and foundations*, 41(2): 39-51.
- Santamarina, J.C., Cho, G.C., 2004. Soil behavior: the role of particle shape, *The Skempton conference*, Thomas Telford, London, 604-617.
- Shimobe, S., Moroto, N., 1995. A new classification chart for sand liquefaction, *Earthquake geotechnical engineering conference*, Rotterdam, The Netherlands, 315-320.
- Siang, A. J. L. M., Wijeyesekera, D. C., Zainorabidin, A., Bakar, E., 2012. The Effects of particle morphology (shape and sizes) characteristics on its engineering behavior and sustainable engineering performance of sand, *International journal of integrated engineering - Special issue on ICONCEES*, 4 (3): 27-37.
- Tickell, F. G., Hiatt, W. N., 1938. Effect of the angularity of grains on porosity and permeability, *Journal of bulleting of the American association of petroleum geologist*, 22: 1272-1274.
- Wadell, H., 1932. Volume, shape and roundness of rock particles, *Journal of geology*, 40: 443-451.
- Wadell, H., 1935. Volume, shape and roundness of quartz particles, *Journal of geology*, 43 (3): 250- 279.
- Youd, T.L., 1973. Factors controlling maximum and minimum densities of sands, Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesion less soils, *ASTM STP523*, West Conshohocken, 98-112.
- Youssef, G., Gihan A., 2007. Correlations between relative density and compaction test parameters, *Twelfth international colloquium on structural and geotechnical engineering*.