

بررسی رفتار خاکهای ماسه ای مسلح و غیر مسلح زیر پی نواری به کمک روش PIV*

«یادداشت پژوهشی»

مسعود حاجی علیلوی بناب^(۱) هوشنگ کاتبی^(۲) فریبا بهروزسرند^(۳)

چکیده در تحقیق حاضر مکانیسم گسیختگی، تغییر شکل خاک ماسه ای و تاثیر مسلح کننده ها بر این فرآیند در زیر یک پی نواری به کمک روش PIV بررسی شده است. بدین منظور مدل سازی های فیزیکی بر روی خاک ماسه ای انجام شده و برای مسلح سازی از مواد ژئوسنتتیکی مناسب استفاده گردیده است. در هر مرحله از بارگذاری، از توده تغییر شکل یافته خاک عکسبرداری دیجیتال شده و تصاویر مورد پردازش قرار گرفته اند. نتایج آزمایشات نشان می دهند که استفاده از مسلح کننده های مناسب منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و کاهش میزان نشست پی و تغییر در مکانیسم گسیختگی شده و همچنین کارایی بهتر ژئوگرید نسبت به ژئوتکتایل در خاک های ماسه ای و در محدوده کرنش های کوچک ثابت می گردد.

واژه های کلیدی PIV، مدل سازی فیزیکی، مکانیسم گسیختگی، خاک ماسه ای، ژئوسنتتیک.

Behavior Investigation of Reinforced and Unreinforced Sand below Strip Foundation using PIV

M.Hajialiloue Bonab H. Katebi F. B. Sarand

Abstract In this research, failure mechanism, soil deformation and effect of reinforcement below a strip foundation were studied using physical modeling and PIV method. For this purpose, a comprehensive set of tests were undertaken on dense and loose sands and different geosynthetic materials such as geotextile and geogrid for soil reinforcing. In each step of loading, digital image of deformed soil was captured and image processing was applied with GeoPIV software. The experimental results showed that using of geogrid and geotextile leading to increase bearing capacity considerably, reduce settlement and change the failure mechanism of sand. The test results showed also that geogrid has an effective performance in comparison with geotextile in sand at the range of small strains.

Key Words PIV, Physical modeling, Failure Mechanism, Sand, Geosynthetics

* نسخه ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۸/۱۱/۴ و نسخه ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۰/۸/۲۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده ی مسئول، استادیار گروه خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

(۲) استادیار گروه خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

(۳) دانشجوی دکتری خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

مقدمه

طی سالیان متمادی بر اساس آزمایشات متعدد ثابت شده است که ظرفیت باربری و نشست پی‌ها تابعی از شکل پی و پارامترهای خاک اطراف و شرایط محیطی می‌باشد لذا بر این اساس تا حال روابط مختلفی برای پیش بینی ظرفیت باربری و میزان نشست پی‌ها با اشکال گوناگون توسط محققان مختلف ارائه شده است.

ترزاقی [13] اولین کسی بود که نظریه ای برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی ارائه کرد. بر اساس این نظریه سه نوع مدل گسیختگی به شرح زیر برای انواع مختلف خاکها قابل انتظار میباشد:

۱- اگر گسیختگی نهایی همراه با توسعه سطح گسیختگی تا سطح خاک باشد، به آن گسیختگی برشی کلی یا *general shear failure* می‌گویند که عموماً در خاکهای دانه ای متراکم و یا خاکهای چسبنده سفت مورد انتظار است.

۲- اگر شالوده مورد نظر بر روی خاک ماسه ای با تراکم متوسط متکی باشد لیکن سطح گسیختگی در خاک بتدریج به سمت خارج توسعه یافته و نشست شالوده همراه با پرش‌های ناگهانی خواهد بود و در این حالت هیچ قله حداکثری در نمودار فشار - نشست ملاحظه نمی‌گردد. به این نوع گسیختگی، گسیختگی برشی موضعی یا *local shear failure* می‌گویند.

۳- اگر شالوده بر روی خاک نسبتاً شل متکی باشد، سطح گسیختگی در خاک به سطح زمین توسعه نخواهد یافت و به این نوع گسیختگی، گسیختگی برشی سوراخ کننده یا *punching shear failure* می‌گویند [۵].

همانطور که می‌دانیم خاک مصالحی است که در مقابل فشار و برش مقاومت خوبی دارد، اما در مقابل کشش ضعیف است. تلاش‌های متعددی به منظور غلبه بر ضعف کششی خاک انجام گرفته است و این تلاشها نهایتاً منجر به بکار بردن روش مسلح سازی خاک شده است. البته در خاکهای برجا مسلح کردن خاک علاوه بر

اصلاح ضعف کششی خاک، پارامترهای مکانیکی آن را نیز بهبود می‌بخشد. بنابراین واژه خاک مسلح، به مسلح کردن خاک به وسیله عناصر کششی نظیر میلگرد، تسمه‌های فولادی و یا ژئوستنتیکها اطلاق می‌شود. با توجه به تعاریف و توضیحات ارائه شده واضح است که مکانیزم گسیختگی خاک در شرایط مسلح متفاوت از حالت غیر مسلح خواهد بود دانشمندان متعددی بر روی رفتار خاک مسلح در زیر پی‌های نواری تحقیق کرده اند از جمله این افراد می‌توان به Guido [10] Binquet and Akinmusuru and [8]، Yetimuglu [15]، lee [9]، Adams and Colin Akinboladeh [6] اشاره کرد. نتیجه واحدی که همه این محققین به آن دست یافته اند افزایش چشمگیر ظرفیت باربری خاک با قرار دادن مسلح کننده در عمق مشخص از زیر پی است. هم چنین بر اساس این مطالعات مدهای گسیختگی متفاوتی برای خاکهای با مسلح کننده های گوناگون برای عمقهای قرارگیری و تعداد لایه های مختلف ارائه شده است. در مورد مکانیزم گسیختگی خاک مسلح، Huang and Menq [11] فرضیه ای را بر اساس مکانیزم شکست wide - slab در خاک که توسط Schlosser et al. [12] پیشنهاد شده، ارائه داده اند که برطبق این تئوری گوه گسیختگی بعد از لایه های مسلح کننده ایجاد شده و سطوح گسیختگی نواحی مقاوم تا سطح زمین توسعه پیدا می‌کند.

بر طبق آنچه گفته شد تخمین ظرفیت باربری خاکها به روش های کلاسیک گسیختگی برشی مبتنی بر بکارگیری پارامترهایی است که بخشی به هندسه پی و بار وارده (طول، عرض، عمق پی، زاویه انحراف، خروج از مرکزیت بار) و بخشی به مشخصات ژئوتکنیکی خاک (زاویه اصطکاک، چسبندگی، عمق آب زیرزمینی و وزن مخصوص) وابسته است. روشهای ارائه شده تاکنون بر پایه مطالعات تحلیلی و همچنین مدلسازیهای آزمایشگاهی استوار بوده و اکثر مدل‌های فیزیکی انجام یافته بر اساس اطلاعات نیرو- تغییر مکان پی استوار

یکی از این روش‌ها، اندازه‌گیری‌های تغییر شکل تصویر مینا است. در این تحقیق از یک سیستم نوین اندازه‌گیری تغییر شکل بر اساس PIV و فتوگرامتری نزدیک برد بعنوان روشی مناسب برای استفاده در مدلسازی‌ها و آزمایشات ژئوتکنیکی استفاده شده است. بدین منظور از یک دوربین عکاسی دیجیتال برای تهیه تصاویر متوالی از تغییر شکل صفحه‌ای خاک استفاده شده است. شکل (۱) روند کلی این تکنیک را نشان می‌دهد.

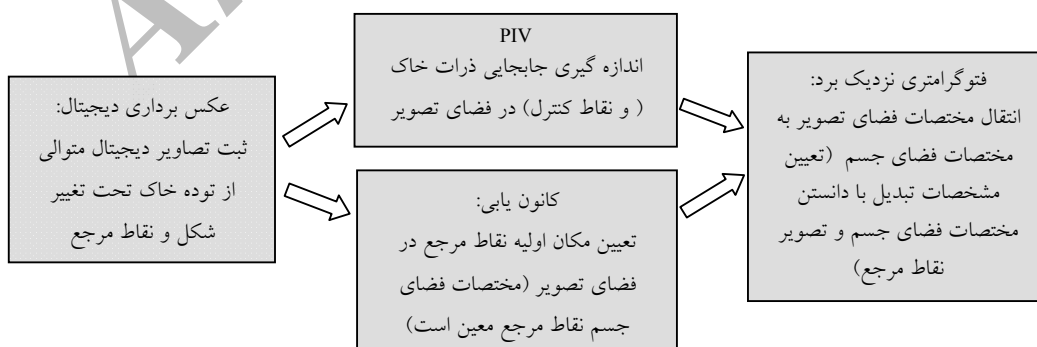
PIV (Particle Image Velocimetry) در واقع یک روش سرعت سنجی است که در ابتدا در رشته مکانیک سیالات و برای اندازه‌گیری سرعت میدان جریان ۲ و ۳ بعدی بکاربرده شد [7] سپس یک رویکرد اصلاح شده برای کاربرد PIV در آزمایشات ژئوتکنیکی صورت گرفته است که تغییر شکل خاک بعنوان جریان با سرعت کم بیان می‌شود [14]. درحالی‌که سیال نیازمند سید بندی شدن با ذرات (توپهای پلی استیرین یا پودر رنگی)، برای فراهم کردن بافت قابل تشخیص و مشخصه‌های تصویر است تا پردازش تصویری قابل اعمال باشد. ماسه طبیعتاً دارای بافت ذاتی ذرات مختلف‌الرنگ است. جهت انجام پردازش تصویری، تصویر اول در نواحی که بردارهای جایجایی مورد نظرند به یک شبکه از پچ‌های آزمون تقسیم بندی می‌شود که هر پچ آزمون، ($I \text{ test} U$) مرکب از یک ماتریس تصویر از درجه $L \times L$ پیکسل می‌باشد [$I(U)$].

است و معمولاً مشاهده مکانیزم گسیختگی براساس این روشها مشکل است. بنابراین با توجه به پیچیدگی رفتار خاک که منجر به پیچیدگی اندرکنش خاک و مسلح‌کننده‌ها میگردد بررسی رفتار تغییر شکل خاک مسلح زیر پی‌های نواری به روشهای تجربی این امکان را فراهم میسازد تا درک درست تری از مکانیزم تغییر شکل و یا گسیختگی ایجاد شود لذا هدف اصلی این تحقیق بررسی چگونگی تغییر شکلهای ایجاد شده در زیر پی نواری در ماسه شل و متراکم در حالت غیر مسلح و مسلح و مقایسه نتایج بدست آمده از آنها است. به منظور بررسی چگونگی گسترش تغییر شکلهای ایجاد شده و همچنین چگونگی گسترش کرنش در زیر پی‌های نواری در ماسه شل و متراکم و در حالت مسلح و غیر مسلح در مقیاس آزمایشگاهی تعدادی آزمایش برنامه ریزی شده و با استفاده از روش تصویری PIV انجام گرفت که در ادامه به تفصیل توضیح داده می‌شود. حال برای آشنایی بطور خلاصه فرآیند کار با روش PIV معرفی و بررسی می‌گردد.

تئوری روش سرعت سنجی تصویری ذرات

(PIV) درمدلسازی‌های ژئوتکنیک

روش‌هایی که امکان اندازه‌گیری‌های دقیق را بدون استفاده از ابزار آلات مکانیکی گران قیمت بوجود می‌آورند نقش موثری در گسترش استفاده از مدل‌های فیزیکی خواهند داشت.



شکل ۱ نمای کلی روش پردازش تصویری

گیری حاصل متناظر با آن افزایش خواهد یافت [۱] و [14].

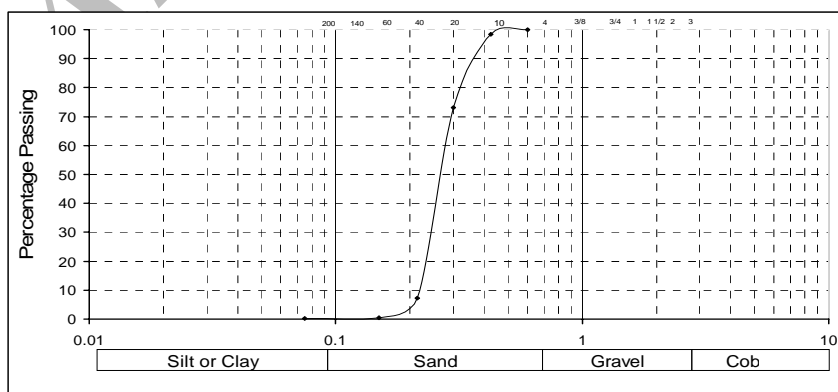
ویژگی‌های مدل فیزیکی

مصالح خاکی. تحقیق حاضر بر روی ماسه خشک منطقه صوفیان استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غرب ایران انجام گردیده است. پس از حمل مقدار مورد نیاز از این ماسه از محل یاد شده به آزمایشگاه لازم بود تا این ماسه برای آزمایشهای اولیه مهیا شود. ابتدا با عبور از الک ۳۰ تمامی مواد اضافی از آن جدا شدند. سپس این ماسه شستشو داده شده و توسط خشک کن خشک گردید. ماسه مورد استفاده بر اساس طبقه بندی متحد که مورد تایید استاندارد ASTM نیز می باشد، دانه بندی یکنواخت داشته و جزو ماسه بد دانه بندی SP قرار می‌گیرد. نمودار مربوط به منحنی دانه بندی خاک در شکل (۲) ارائه شده است. سایر مشخصات ماسه مورد آزمایش در جدول (۱) آمده است. یکی از نکات قابل توجه در ساخت مدل های فیزیکی در رابطه با نحوه ریزش ماسه و رعایت یکنواختی مدل و پیوستگی در ریزش ماسه است. بدین منظور از روش بارانی استفاده شده و در حالت شل ماسه از ارتفاع ۲۵ سانتیمتری ریخته شد همچنین برای تهیه نمونه های مترکم مشابه حالت شل، خاک بشکل شل درون جعبه ریخته می شود.

برای یافتن جابجایی پیچ آزمون مابین تصاویر ۱ و ۲، یک پیچ جستجو (U+S) searchI، در دومین تصویر انتخاب می شود که این پیچ جستجو با گسترش دادن پیچ آزمون به اندازه Smax در جهات u و v ناحیه ای را که پیچ آزمون مورد جستجو قرار می گیرد تعریف می کند (یعنی پیچ آزمون مربع اولیه با اندازه L، بعلاوه حاشیه ای برابر بردار جابجایی ماکزیمم عمودی و افقی). سپس با کمک تابعی که بعنوان تابع برازش تعریف می شود (correlation function) به دنبال محل پیچ آزمون در تصویر بعدی می‌گردد و پچی در تصویر دوم را که به ازای آن میزان تابع برازش به حداکثر خود می رسد بعنوان محل ثانویه پیچ آزمون تصویر اول انتخاب می کند و بردار حرکت بین مرکز های این دو پیچ را به عنوان بردار جابجایی معرفی می کند.

پردازش عکسها بوسیله نرم افزارهای matpiv و geoPIV که تحت برنامه MATLAB نوشته شده است انجام می گردد. خروجی این نرم افزارها بصورت ماتریس دو بعدی u, v می باشد که اولی نشان دهنده مولفه افقی و دومی نشان دهنده مولفه عمودی بردار جابجایی هر پیچ است. نرم افزارهای موجود دارای دقت تقریبی ۱/۱۵ پیکسل برای بافت ماسه هستند.

دقت سیستم ازدقت روش PIV حاصل می شود که شدت تابعی از اندازه وبافت پیچ PIV است. هر چه فراوانی روشنایی فضایی تصویر بیشتر شود دقت اندازه



شکل ۲ منحنی دانه بندی ماسه

جدول ۱ مشخصات ماسه مورد آزمایش

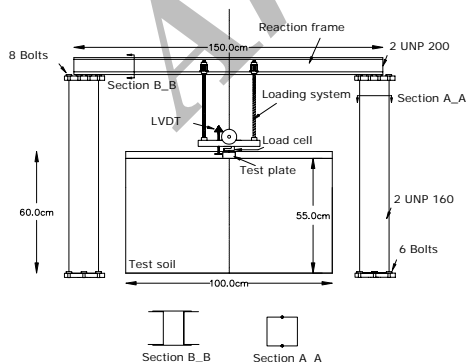
γ_{dmax}	γ_{dmin}	G_s	e_{max}	e_{min}	ϕ	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	C_u	C_c
۱۶/۷۶ (KN/m ³)	۱۴/۲۰ (KN/m ³)	۲/۶۳۷	۰/۸۲۲	۰/۵۴	۲۸°	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۳	۱/۳۶	۰/۸۷

جدول ۴ مشخصات ژئوگرید

۴۵۰	واحد وزن	(g/m ²)
۲/۵	ضخامت	(mm)
۶×۶	اندازه بازشدگی	(mm)
-۵۰ تا +۸۰	دمای کاری	(C)

در آزمایشات مربوط به حالت مسلح خاک، از یک لایه مسلح کننده استفاده شده و این لایه در عمق Z/B برابر ۰/۵ قرار گرفت. (Z عمق قرارگیری و B عرض پی می باشد)

سیستم بارگذاری. با توجه به معیارهای موجود برای ساخت مدل و ایجاد یک سازه صلب، ابتدا یک پی نواری بتن آرمه در سطح زمین اجرا گردیده و در دو انتهای این پی، صفحه پای ستون برای نصب ستونها همراه با ۶ بولت جایگذاری شدند به همین ترتیب اتصالات تیر و ستون نیز طراحی گردیدند. جزئیات مربوط به سازه نگهدارنده سیستم اعمال نیرو در شکل (۳) و مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳ پیکربندی مدل آزمایشگاهی و مقاطع سازه نگهدارنده سیستم اعمال نیرو

منتها بعد از اینکه یک لایه ۵ سانتی متری ریخته شد لایه خاک بوسیله یک چکش و یک صفحه فلزی متراکم می گردید و سپس لایه بعدی ریخته شده و عملیات تراکم تکرار می شد و نهایتاً دانسیته نسبی خاک بعد از اتمام آزمایش با احتساب وزن خاک و دانستن حجم آن محاسبه میگردد. جدول (۲) مشخصات ماسه های مورد استفاده مدل های آزمایش شده را نشان می دهد.

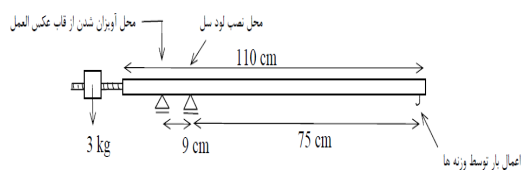
جدول ۲ مشخصات مکانیکی متوسط ماسه شل و متراکم بکاررفته در آزمایشات

متراکم	شل	حالت خاک
۱۵/۹۶	۱۴/۷۸	γ_d (KN/m ³)
۰/۶۱	۰/۷۵	تخلخل e
٪۷۳	٪۲۵	D_r (%)

مسلح کننده ها. در ساخت فونداسیون خاکی مسلح مورد آزمایش از دو نوع مسلح کننده ژئوتکستایل و ژئوگرید استفاده شد. مشخصات مکانیکی و فیزیکی مسلح کننده ها به تفکیک در جداول (۳) و (۴) آورده شده است [۳ و ۴].

جدول ۳ مشخصات ژئوتکستایل

۳۰۰	وزن واحد	(gr/m ²)
۱/۶	ضخامت	(mm)
۱۳/۲۲	مقاومت کششی ماکزیمم	(KN/m)
۵۰/۳۰	افزایش طول در وضعیت مقاومت کششی ماکزیمم٪	
۳۸۹۰	مقاومت در برابر سوراخ شدن	(N)
۰/۰۷	اندازه بازشدگی	(mm)



شکل ۶ سیستم بارگذاری مورد استفاده در آزمایشات

نتایج حاصل از انجام آزمایشها

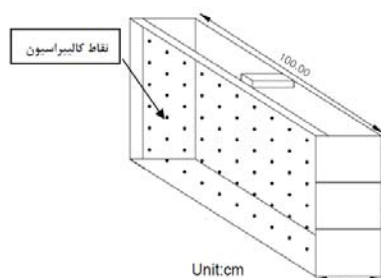
در طول آزمایش از توده خاک در حال تغییر شکل در هر مرحله از بارگذاری با استفاده از دوربین دیجیتال با وضوح تصویری ۷/۱ مگا پیکسل عکسبرداری و در حافظه داخلی ذخیره شد و بعد از انجام آزمایشات، عکسهای گرفته شده با استفاده از نرم افزار Geopiv8 مورد پردازش تصویری قرار گرفتند. در این تحقیق با مش بندی عکسهای گرفته شده در اندازه ۴۸×۴۸ بافت تصویری مناسبی جهت تحلیل‌ها ایجاد شده و جابجایی مشها در توده خاک در حال تغییر شکل بدست آمد.

چند نمونه از نتایج حاصل از پردازش تصویری عکسها در ادامه ارائه گردیده است. در این شکلها، نمودارهای سمت راست بردارهای جابجایی المانهای خاک و نمودارهای سمت چپ کرنشهای برشی ایجاد شده در اثر نشست پی نواری در وضعیت های مختلف را نشان می دهند. از آنجائی که اصولاً مسلح کننده ها در مصالح خاکی متراکم بکار می روند لذا در آزمایشاتی که روی ماسه شل انجام گرفته از مسلح کننده ها استفاده نشده است. با مقایسه نمودارهای بدست آمده تفاوت کلی مکانیسم رفتاری در خاکهای ماسه ای شل و متراکم در وضعیت پیش از گسیختگی کاملاً بارز می باشد. همانطور که در شکل (۷) دیده می شود بعلت شل بودن خاک، تمایل به تراکم خاک در زیر پی در اثر بارگذاری وجود دارد و جهت بردارهای تغییر مکان در زیر پی به سمت پایین و طرفین متمایل است بنابراین در این شرایط خاک زیر پی قبل از تشکیل گوه گسیختگی دچار نشست قابل توجهی شده است و آثار این نشست تا اعماق حدود



شکل ۴ مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه

برای ساخت ظرف آزمایشگاهی که بایستی خاک در داخل آن قرار می گرفت از صفحات فلزی استفاده شده که با توجه به ضخامت و نحوه اتصالات تا حد قابل قبولی صلب بودند. بخاطر عکسبرداری از سیستم در طی بارگذاری های متوالی در یک طرف محفظه مورد نظر از طلق شفاف (plaxiglass) جهت مشاهده میدان تغییر شکل توده خاک استفاده شد که توسط پیچ در سه وجه مدل متصل گردید. شکل (۵) ابعاد جعبه آزمایش و نقاط کالیبراسیون را نشان می دهد فاصله نقاط کالیبراسیون در مدلسازی فیزیکی اخیر ۸ سانتی متر بود. برای اعمال بار از یک سیستم نیرو کنترل استفاده شده است که در آن بار با افزودن وزنه ها تا لحظه گسیختگی نمونه افزایش داده می شود. این سیستم بصورت شماتیک در شکل (۶) نشان داده شده است.

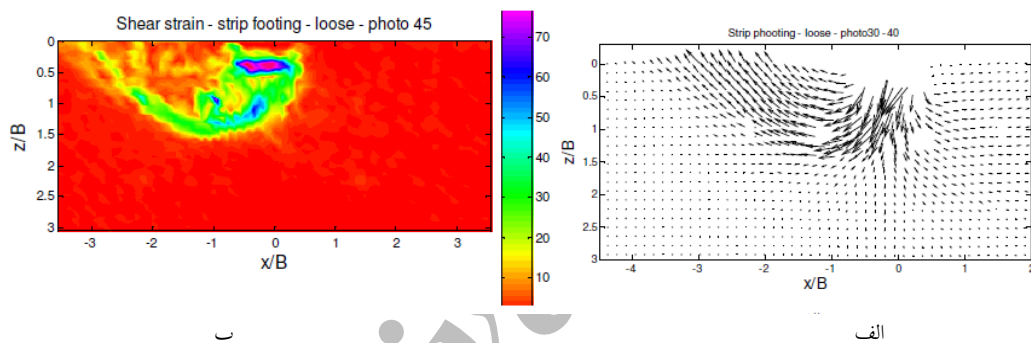


شکل ۵ جعبه آزمایش

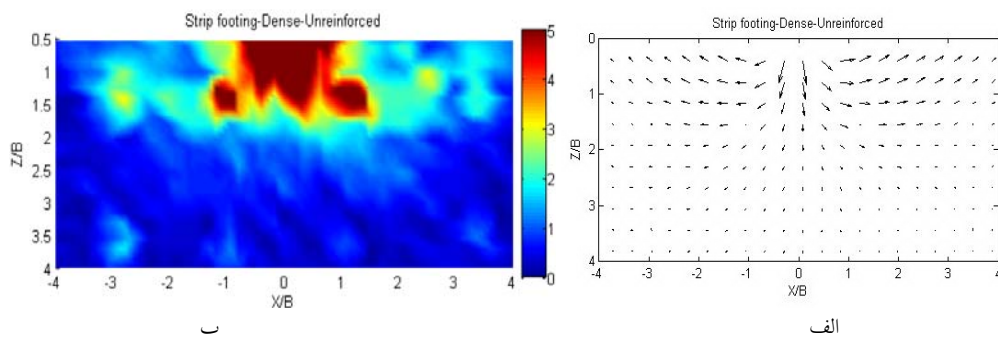
خروج از مرکزیت یا مایل بودن نیرو باعث خواهد شد که مکانیزم گسیختگی از دو طرف به یک طرف تغییر پیدا کند [2]. گوه گسیختگی ایجاد شده در نمودار کرنش برشی مربوط به همین وضعیت نیز به وضوح قابل مشاهده می باشد (شکل ۷-ب). البته لازم به ذکر است که در حالت خاک متراکم مسلح نیز در اکثر آزمایشات گوه گسیختگی بوجود آمده بصورت یک طرفه بود که این مساله در شکل (۹-الف) نیز دیده می شود.

$Z/B=1.5$ ادامه دارد در ضمن گوه گسیختگی بوجود آمده در این حالت بصورت یک طرفه است و این مساله احتمالاً ناشی از چرخش پی نواری در وضعیت نزدیک به حالت گسیختگی است. دلایل محتمل این مساله را بشرح زیر می توان بیان نمود:

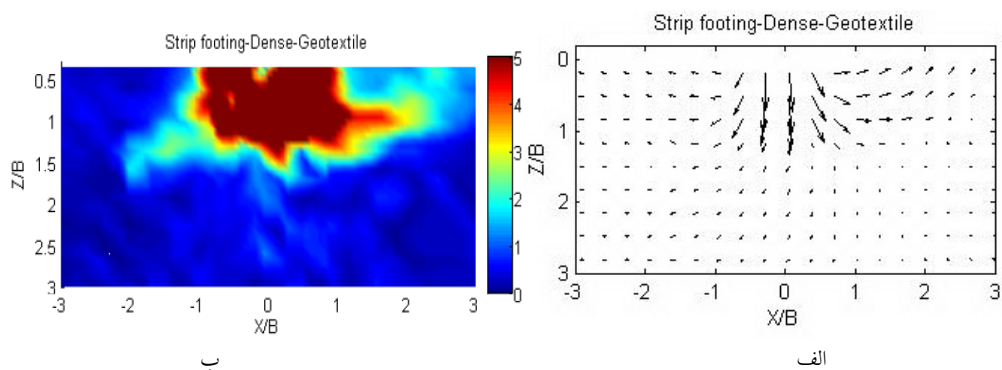
- ۱- خارج از مرکزیت نیروی وارد بر پی
 - ۲- عدم یکنواختی کامل خاک زیر پی
- بنابراین نحوه گسیختگی خاک زیر پی نواری بشدت نسبت به نحوه بارگذاری حساس بوده و کمی



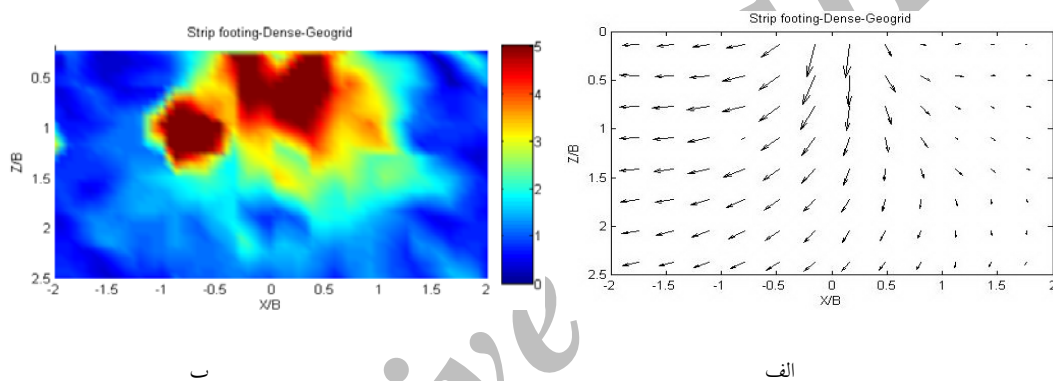
شکل ۷ الف) بردارهای جابجایی المانهای خاک در اثر نشست پی نواری در خاک ماسه ای شل، ب) کرنشهای برشی بوجود آمده در اثر نشست پی در این شرایط



شکل ۸ الف) بردارهای جابجایی المانهای خاک در اثر نشست پی نواری در خاک ماسه‌ای متراکم غیرمسلح، ب) کرنشهای برشی بوجود آمده در اثر نشست پی در این شرایط



شکل ۹ الف) بردارهای جابجایی المانهای خاک در اثر نشست پی نواری در خاک ماسه ای متراکم مسلح شده با ژئوتکستایل، ب) کرنشهای برشی بوجود آمده در اثر نشست پی در این شرایط



شکل ۱۰ الف) بردارهای جابجایی المانهای خاک در اثر نشست پی نواری در خاک ماسه ای متراکم مسلح شده با ژئوگرید، ب) کرنشهای برشی بوجود آمده در اثر نشست پی در این شرایط

نوع رفتار خاک مسلح شده با ژئوتکستایل تقریباً مشابه رفتار خاک غیرمسلح متراکم می باشد و بکاربردن ژئوتکستایل تاثیر چندانی چشمگیری در بهبود رفتار خاک و نهایتاً افزایش ظرفیت باربری نداشته است علت این مساله را می توان چنین بیان کرد که چون ژئوتکستایل ها خود مصالح شکل پذیری هستند بنابراین برای گسترش فرآیند کششی لزوماً پی باید نشست قابل توجهی نماید و چون این امر در بسیاری از مواقع علل مخصوص در مصالح متراکم نمی تواند بوقوع بپیوندد لذا ژئوتکستایل کارایی خوبی از خود نشان نمی دهد بنابراین ژئوتکستایل ها ممکن است مصالح مناسبی برای افزایش ظرفیت

در شکل های (۸)، (۹) و (۱۰) مکانیزم رفتاری خاک ماسه ای متراکم در اثر اعمال نیرو نشان داده شده است. همانطور که در شکلها دیده می شود تمایل به نشست در زیر پی ها قبل از تشکیل گوه گسیختگی در خاکهای ماسه ای متراکم کمتر از خاک ماسه ای شل است و از میان آزمایشات مربوط به خاک متراکم نیز در شرایط بارگذاری یکسان، میزان نشست المانهای خاک در حالت خاک مسلح شده با ژئوگرید کمترین مقدار را دارد. با توجه به نتایج بدست آمده چنین برداشت می شود که در شرایط بارگذاری یکسان مقدار نشست المانهای خاک و

ابعام مختلف خاک در زیر پی را نشان می دهند (X) فاصله از مرکز پی و Z عمق در زیر پی است).

همانطور که در شکل (۱۱) دیده می شود در ماسه شل در اعماق نزدیک به سطح پی، مقدار نشست المانهای خاک بسیار نزدیک به اندازه نشست خود پی میباشد ولی با حرکت به عمق از مقدار نشست المانهای خاک کاسته می شود و این فرآیند حاکی از تمایل خاک ماسه ای شل به تراکم در زیر پی است.

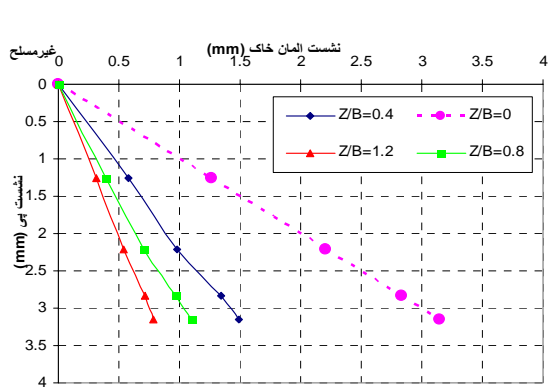
مقایسه بین نشست خود پی و نشست المانهای خاک در اعماق مختلف برای خاک ماسه ای متراکم در شکل های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) بصورت نمودار ارائه شده است. همانطوریکه دیده می شود در شرایط متراکم اختلاف بین نشست پی و نشست المانهای خاک نسبت به حالت شل بیشتر است و این اختلاف با حرکت به سمت عمق بیشتر می شود این پدیده از تاثیر تراکم در فرآیند نشست ناشی شده است. در شرایط بارگذاری مشابه، زمانی که از ژئوگرید بعنوان مسلح کننده استفاده شده، مقدار نشست المانهای خاک به شدت کاهش یافته است که این مساله نهایتا منجر به افزایش چشمگیر ظرفیت باربری پی شده است، درحالی که در وضعیت بارگذاری یکسان رفتار خاک برای حالت متراکم غیر مسلح و مسلح شده با ژئوتکتایل تفاوت چشمگیری ندارد. با در نظر گرفتن توضیحات اخیر می توان به کارایی بهتر ژئوگرید بعنوان مسلح کننده در خاکهای ماسه ای پی برد.

برای بررسی چگونگی تغییر شکل و جهت جابجایی المانهای خاک در زیر و اطراف پی از زاویه قرار گیری بردارهای تغییر مکان استفاده شد با توجه به زاویه بردارهای تغییر مکان المان ها در اعماق مختلف در اطراف پی ها نسبت به افق که در شکل های (۱۵-۱۸) آورده شده اند چنین نتیجه می شود که چگونگی جابجایی پی نواری در ماسه شل و متراکم متفاوت از هم است و حتی جهت جابجایی پی در شرایط ماسه متراکم غیر مسلح و مسلح مشابه هم نیست.

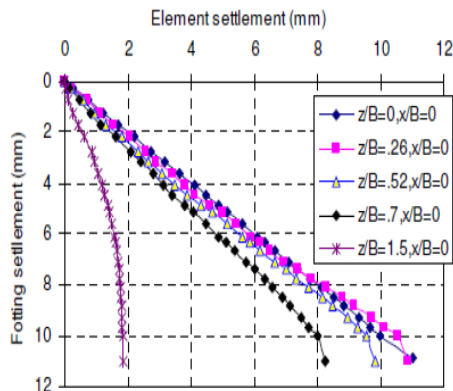
باربری مصالح دانه ای نباشند. این نتیجه گیری در ادامه بکمک تحلیل سایر نمودارها نیز بدست آمده است. بنابراین نتیجه گیری کلی که می توان به آن اشاره نمود عدم کارایی قابل توجه ژئوتکتایل بعنوان مسلح کننده در خاکهای دانه ای مشابه با مشخصات ماسه بکار رفته در این تحقیق است که امکان نشست زیاد ندارند.

همانطور که از شکل (۱۰) بر می آید با افزودن ژئوگرید به خاک ماسه ای متراکم، تغییر قابل توجهی در اندازه بردارهای جابجایی بوجود آمده و میزان نشستها در شرایط بارگذاری مشابه با حالت غیرمسلح و مسلح شده با ژئوتکتایل شدت کاهش یافته و نهایتا ظرفیت باربری نیز به تبع آن افزایش یافته است بنابراین در این آزمایش فاصله زیادی تا حالت گسیختگی پیش بینی می شود علت این مساله را می توان چنین بیان کرد که چون در این شرایط حجم وسیعی از خاک در برابر نیروهای اعمالی مقاومت کرده لذا کرنشهای برشی ایجاد شده تا عمق زیادی از خاک نفوذ نموده اند بنابراین در این شرایط اثری از تشکیل گوه گسیختگی ظاهر نشده است. افزایش ظرفیت باربری در این شرایط تا جایی پیش رفت که رسیدن به شرایط گسیختگی خارج از توان سیستم بوده و بناچار آزمایش قبل از گسیختگی خاک متوقف گردید. بدین ترتیب می توان گفت که مصالح ژئوگرید نیاز چندانی به نشست خاک برای عمل کردن ندارند و این مساله از سختی نسبتا بالای این مصالح و امکان قفل شدگی بالای آنها با خاک حاصل شده است در نتیجه ژئوگریدها را می توان بعنوان مصالح بسیار مناسب برای افزایش ظرفیت باربری در خاکهای دانه ای مورد استفاده قرار داد.

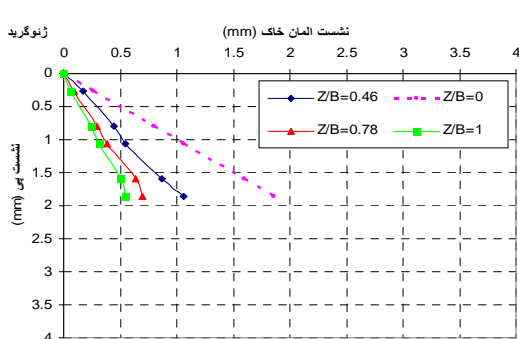
برای تمامی آزمایشات نشست پی با استفاده از LVDT اندازه گیری شده است و در ضمن با استفاده از تحلیل PIV تغییر مکانهای نقاط مختلف خاک در جهت افقی و قائم در اعماق مختلف خاک بدست آمدند. شکل های (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) مقدار تغییر مکان قائم پی را در مقابل تغییر مکانهای قائم بوقوع پیوسته در



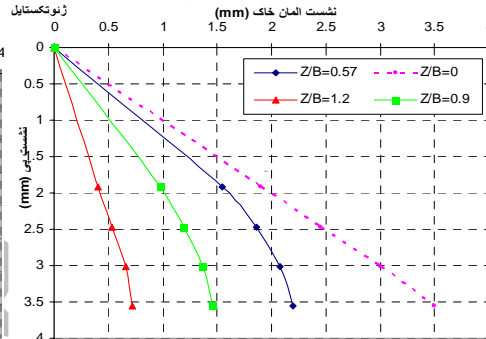
شکل ۱۲ نشست المانهای خاک زیر پی نواری در خاک ماسه ای متراکم غیر مسلح



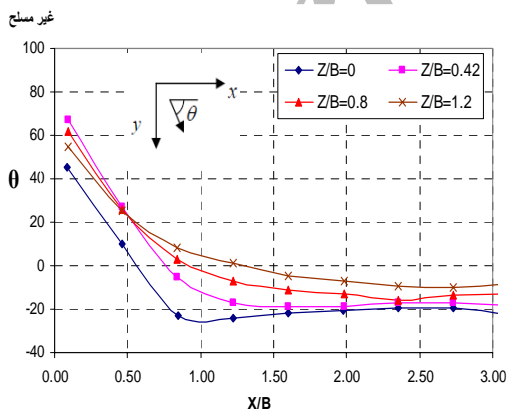
شکل ۱۱ نشست المانهای خاک زیر پی نواری در خاک ماسه ای سست



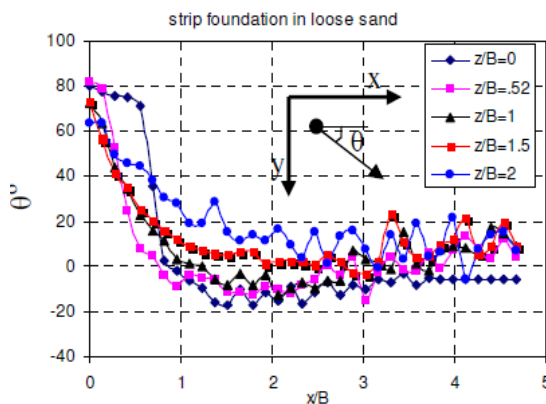
شکل ۱۴ نشست المانهای خاک زیر پی نواری در خاک ماسه ای متراکم مسلح شده با ژئوگرید



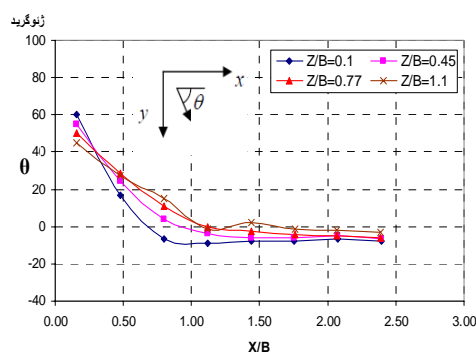
شکل ۱۳ نشست المانهای خاک زیر پی نواری در خاک ماسه ای متراکم مسلح شده با ژئوتکتایل



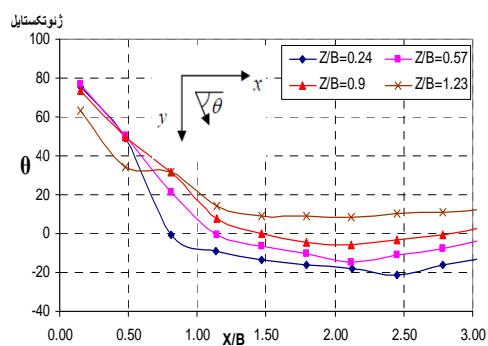
شکل ۱۶ زاویه بردارهای جابجایی المانهای خاک با امتداد افق برای خاک ماسه ای متراکم غیرمسلح



شکل ۱۵ زاویه بردارهای جابجایی المانهای خاک با امتداد افق برای خاک ماسه ای شل



شکل ۱۸ زاویه بردارهای جابجایی المانهای خاک با امتداد افق برای خاک مسلح شده با ژئوگرید



شکل ۱۷ زاویه بردارهای جابجایی المانهای خاک با امتداد افق برای خاک مسلح شده با ژئوتکستایل

افزودن مسلح کننده از مقدار عددی زاویه منفی کاسته می شود و بدین ترتیب در شرایط بارگذاری یکسان حجم وسیعی از خاک در برابر نیروهای اعمالی مقاومت کرده و تشکیل گوه گسیختگی به تعویق می افتد. بدین ترتیب به کمک روش PIV می توان اندازه و جهت جابجایی المانهای خاک زیرپی را به سادگی مورد ارزیابی قرار داد و کارایی هر نوع مسلح کننده ای را بررسی کرد و نهایتاً شکل گوه گسیختگی را پیش بینی نمود.

نتایج مهم

از مهمترین نتایج حاصل از تحقیق اخیر به موارد زیر می توان اشاره نمود:

- ۱- به علت تمایل به تراکم در خاک سست، نشست المانهای خاک در اعماق کم، نزدیک به نشست خود پی در این شرایط میباشد و همچنین زاویه قرارگیری بردارهای تغییر مکان با افزایش عمق افزایش یافته و به حالت قائم نزدیک می شوند.
- ۲- در شرایط خاک متراکم، نشست المانهای خاک نسبت به پی در مقایسه با خاک شل کمتر بوده و در شرایط بارگذاری یکسان، اندازه زاویه منفی المانهای خاک در مقایسه با خاک سست کمتر است.
- ۳- استفاده از مسلح کننده ها باعث میشود تا حجم وسیعی از خاک در برابر نیروهای اعمالی مقاومت کرده لذا کرنشهای برشی ایجاد شده تا عمق زیادی از

در تمامی نمودارهای مربوط به زاویه بردارهای جابجایی المانهای خاک مشاهده می شود که درست در زیر پی نواری، (یعنی در فاصله X/B کمتر از 0.5) اندازه زوایا مثبت بوده و مقدار عددی این زاویه درست در مرکز پی یعنی محل اعمال نیرو بیشترین مقدار را داشته و با فاصله گرفتن از مرکز، از مقدار آن کاسته می شود. اندازه مثبت این زاویه بیانگر جهت قائم و رو به پایین بردارهای جابجایی است که حاکی از تمایل به نشست در زیر پی دارد. همانطور که در شکل (۱۵) دیده می شود این زاویه در وضعیت ماسه شل بیشترین مقدار را دارد و کمترین مقدار این زاویه مثبت در خاک مسلح شده با ژئوگرید مشاهده شده است و این بدان معناست که استفاده کردن از ژئوگرید بعنوان مسلح کننده بر سختی خاک افزوده و تمایل به نشست مصالح را کاسته است. با فاصله گرفتن از پی (یعنی در فاصله X/B بزرگتر از 0.5) تا حوالی عمق موثر مقدار عددی زاویه بردارهای جابجایی منفی بوده و در واقع جهت حرکت المانهای خاک به طرف بالا و طرفین است ولی در عمق های پایین تر مقدار این زاویه به صفر رسیده و بردارهای جابجایی به صورت افقی در می آیند. با توجه به شکل (۱۸) اندازه زاویه منفی در مورد خاک مسلح شده با ژئوگرید کمترین مقدار را دارد و این مساله بیان کننده وجود فاصله تا تشکیل گوه گسیختگی در آزمایشهای انجام شده میباشد. با مقایسه نمودارهای بالا چنین نتیجه می شود که با

- خاک نفوذ نمایند و در نتیجه مد گسیختگی از حالت موضعی به کلی تبدیل شود.
- ۴- در مصالح دانه ای متراکم مشابه با ماسه مورد استفاده در آزمایشات اخیر که امکان نشست زیاد ندارند، بکاربردن ژئوگرید بعنوان مسلح کننده بسیار موثرتر از ژئوتکستایل بوده و منجر به بهبود پارامترهای مکانیکی خاک می گردد.
- ۵- به علت شکل پذیر بودن ژئوتکستایل، استفاده از آن به عنوان مسلح کننده در مصالح دانه ای متراکم توصیه نمی گردد.

مراجع

۱. حاجی علیلوی بناب، م.، توسعه روشهای تصویری در مدلسازی پیشرفته ژئوتکنیکی و ارزیابی گسترش تغییر شکل در خاک، گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه تبریز، ایران، (۱۳۸۶).
۲. حاجی علیلوی بناب، م.، سجودی، ی.، احمدی، ح.، مطالعه گسترش کرنش در زیر پی ها به روش تصویری، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران، (۱۳۸۷).
۳. ساکت، ع.، ژئوگرید و کاربرد آن، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۵).
۴. ساکت، ع.، ژئوتکستایل و کاربرد آن، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۵).
۵. طاحونی، ش.، اصول مهندسی ژئوتکنیک، چاپ ششم، انتشارات پارس آیین، (۱۳۸۰).
6. Adams, M.T., Colin, J.G., Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundation, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE123(1):66-73, (1997).
7. Adrian, R.J., Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annual review of fluid mechanics*, 23:261-304, (1991).
8. Akinmusuru, J.Q., Akinbolade, J.A., *Stability of loaded footings on reinforced soil*, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 107(6): 819-827, (1981).
9. Binqet, J., Lee, K.L., Bearing capacity tests on reinforced earth slabs, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 101(12),1241-1255, (1975a).
10. Guido, V.A., Biesjadicki, G.L., Sullivan, M.J., Bearing capacity of geotextile reinforced foundation, *Proceeding of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation of Engineers*, San Francisco, CA, pp. 1777-1780, (1985).
11. Huang, C.C., Menq, F.Y., Deep footing and wide-slab effects on reinforced sandy ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 123(1):30-36, (1997).
12. Schlosser, F., Jacobsen, H.M., Juran, I., Soil reinforcement. *General Report, VIII European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bakema, Helsinki, pp:83-103, (1983).
13. Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, Inc, New York, (1943).
14. White, D.J., Take, W.A. & Bolton, M.D., Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and hotogrammetry, *Geotechnique* 53, No.7: 619-631, (2003).
15. Yetimuglu, T., Wu, J.T.H., Saglamar, A., Bearing capacity of rectangular footing on geogrid reinforced sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 120(12): 2083-2099, (1994).