

بررسی رابطه بین ضرایب تغییر شکل خاک تعیین شده با استفاده از آزمایشات بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاهی*

سید محمود حسینی^(۳)علی ملاحسنی^(۲)جعفر بلوری بزاز^(۱)

چکیده ضریب تغییر شکل خاک که یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین پارامترهای خاک است، به رابطه‌ی بین تنش و نشست پذیری خاک اشاره دارد. مقدار ضریب تغییر شکل خاک، ثابت نیست و به عوامل زیادی بستگی دارد و در محدوده‌ی بسیار وسیعی تغییر می‌کند. ضریب تغییر شکل خاک، توسط آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی و برجا از جمله آزمایش: تحکیم، سه محوری، نفوذ استاندارد (SPT)، مقاومت مخروط (CPT)، آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) و بسیاری از آزمایش‌های دیگر تعیین می‌گردد. آزمایشات برجا، اگرچه نسبت به آزمایشات آزمایشگاهی نتایج دقیق‌تری را به دست می‌دهند، اما معمولاً هزینه‌بر و وقت‌گیر بوده و در بسیاری موارد انجام آن‌ها مشکل و گاه ناممکن است. در تحقیق حاضر، سعی گردیده است که با استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه برجا و سپس با مدل نمودن این آزمایش در آزمایشگاه، بین نتایج آزمایشات این دو گروه، یک ارتباط ریاضی برقرار نمود تا بتوان ضریب تغییر شکل خاک را با انجام آزمایش در آزمایشگاه تعیین کرد. به این منظور، ابتدا با نمونه‌گیری از خاک محل، طبقه بندی، درصد رطوبت و وزن مخصوص، نمونه تعیین می‌گردید و سپس آزمایش بارگذاری صفحه برجا در محل مورد نظر انجام می‌شد. پس از اتمام آزمایش برجا، با تهیه‌ی نمونه‌ی دست نخورده و انتقال آن به آزمایشگاه، آزمایش بارگذاری صفحه، که در آزمایشگاه مدل‌سازی شده بود، بر روی نمونه‌ی دست نخورده انجام می‌شد. برای برقراری یک ارتباط ریاضی، بین نتایج این دو گروه آزمایش (آزمایش بارگذاری صفحه برجا و مدل آزمایشگاهی)، نمودارهای بار-نشست آن‌ها با یکدیگر، مقایسه شدند. پس از ترسیم این نمودارها برای برقراری ارتباط ریاضی بین آن‌ها، شیب مماسی اولیه، شیب وتری و شیب باربرداری برای هر نمودار محاسبه و این شیب‌ها برای هر نمونه با یکدیگر مقایسه شدند. با توجه به رفتار پیچیده‌ی خاک و نیز شرایط متفاوت آزمایشات برجا و آزمایشگاهی، نتایج به دست آمده در محدوده‌ی این تحقیق، منطقی به نظر می‌رسند. این نتایج می‌تواند مورد استفاده‌ی مهندسین و محققین قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی ضریب تغییر شکل خاک، برجا، شیب اولیه، وتری و باربرداری

A Comparative Study on Determination Soil Deformation Modulus, Using In-Situ and Laboratory Plate Load Tests

J. Bolouri-Bazaz

A. Mollahasani

S. M. Hosseini

Abstract Soil deformation modulus is one of the most complicated and important soil parameters, correlating between stress and settlement. The magnitude of deformation modulus is not constant. Its value, which varies in a wide range, depends on many factors. The soil deformation modulus may be determined using in-situ and laboratory tests, including consolidation test, triaxial test, Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT), Plate Load Test (PLT) and many other tests. Although the in-situ test results are more accurate in comparison with laboratory tests, but in-situ tests are more expensive and time consuming and practically these tests are usually difficult and sometimes impossible to perform. In the present research the in-situ plate load test results are employed to determine the soil deformation modulus. This test is then modeled in the laboratory and results are compared. To achieve this, after soil sampling from the site, the samples were classified after which their moisture content and unit weight were determined. The plate load test, modeled in the laboratory, was then performed on the undisturbed samples, taken from the site. In order to compare and establish a mathematical correlation between the results of these two groups (the in-situ and laboratory plate load tests), the load-settlement curves of all two group tests were plotted, after which the initial tangent slope, secant slope and unloading slope for each sample was calculated and plotted and the results were then compared. Considering the complicated soil behavior, the results of this research seem to be appropriate and can be used in practical civil engineering purposes.

Key Words Soil Deformation Modulus, In-Situ, Initial, Secant, Unloading Slope.

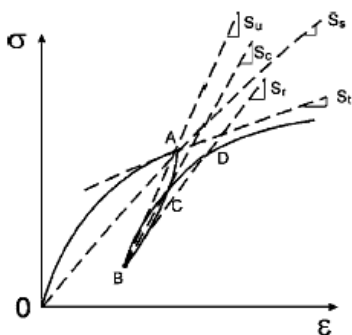
* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۱۲/۱۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۸/۷/۱۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانشیار، گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

واحد طول است؛ به عبارتی، ضریب تغییر شکل جزء مشخصات ذاتی خاک است، اما ضریب سختی بستگی به سطح بارگذاری شده دارد؛ بنابراین، استفاده از ضریب تغییر شکل نسبت به ضریب سختی ارجحیت دارد [5]. ضریب تغییر شکل در قسمت‌های مختلف مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از موارد کاربرد این ضریب، می‌توان به پی‌های سطحی، پی‌های عمیق، پایداری شیب، سازه‌های نگهدارنده و روسازی‌ها اشاره نمود [6].



شکل ۱ تعریف انواع ضرایب تغییر شکل خاک [2]

آزمایشات مختلفی برای تعیین ضریب تغییر شکل خاک انجام می‌شوند که آن‌ها را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم نمود:

۱. گروه اول آزمایشاتی هستند که در آزمایشگاه و بر روی نمونه‌های دست‌خورده و یا دست‌نخورده‌ی خاک انجام می‌شوند. مانند: آزمایش تحکیم، آزمایش سه محوری و آزمایش تک محوری.

۲. گروه دوم آزمایشات برجا بوده که در محل و بر روی خاک طبیعی انجام می‌شوند، مانند: آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، آزمایش مقاومت مخروط (CPT)، آزمایش بارگذاری صفحه (PLT)، آزمایش صفحه فشار پیچشی، آزمایش دیلاتومتر (DMT) و آزمایش پرسومتر یا فشارسنج (PMT).

بدیهی است آزمایشات برجا، اصولاً به نتایج دقیق‌تری منتهی می‌شوند، اما این نوع آزمایشات، هزینه‌ی بالاتری داشته و وقت‌گیرتر هستند و در بسیاری موارد

مقدمه

ضریب تغییر شکل خاک که بیانگر رابطه‌ی بین تنش و کرنش است، یکی از پیچیده‌ترین پارامترهای خاک می‌باشد که توسط آزمایش‌های مختلفی تعیین می‌گردد. برای مواد الاستیک خطی، ضریب تغییر شکل، به عنوان ضریب ارتجاعی (Elastic modulus)، E که نسبت ثابت تنش به کرنش است، نامیده می‌شود. ضریب تغییر شکل برای خاک‌ها که از مواد الاستیک نیستند، ثابت نبوده و به عوامل زیادی بستگی دارد [1] که در نتیجه، دامنه‌ی تغییرات آن بسیار گسترده است (1MPa تا 1000 MPa) [2]. مقدار این ضریب، معمولاً از آزمایش سه محوری و یا آزمایش تحکیم به دست می‌آید [3]. مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ضریب تغییر شکل خاک را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد [4]:

۱. پارامترهای مربوط به مشخصات خاک، مانند: وزن مخصوص خشک، تخلخل، درصد رطوبت و ...
۲. پارامترهای مربوط به چگونگی بارگذاری خاک، نظیر: مقدار تنش متوسط، میزان کرنش، نرخ بارگذاری، شرایط زه‌کشی و ...

در حالت کلی، ضریب تغییر شکل (E) شیب منحنی تنش-کرنش (S) نمی‌باشد؛ ولی به هر حال این شیب با ضریب تغییر شکل مرتبط بوده و می‌توان بین شیب منحنی تنش-کرنش با ضریب تغییر شکل، رابطه‌ای برقرار کرد. با توجه به نمودار تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش سه محوری که شیب‌های مختلفی از آن قابل محاسبه می‌باشد، ضرایب تغییر شکل بسیاری را از روی این شیب‌ها می‌توان برای خاک تعریف نمود [4]. این ضرایب تغییر شکل با توجه به شکل (۱) عبارتند از: ضریب وتری (E_s)، ضریب مماسی (E_t)، ضریب باربرداری یا ضریب برجهندگی (E_{II})، ضریب بارگذاری مجدد (E_r) و ضریب دوره‌ای (E_e).

باید توجه داشت که ضریب تغییر شکل با ضریب سختی متفاوت است. بعد ضریب تغییر شکل نیرو بر واحد سطح بوده، حال آن‌که بعد ضریب سختی نیرو بر

دست خورده و یا دست نخورده تهیه و به آزمایشگاه منتقل شدند. در ادامه به چگونگی و شرایط انجام آزمایشات برجا و آزمایشگاهی پرداخته می شود.

آزمایشات برجا. برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه، محل مناسب انتخاب شده و سربار مورد نیاز به آنجا منتقل می شد. پس از صاف و تمیز کردن سطح خاک، صفحه‌ی بارگذاری بر روی لایه‌ی نازکی از ماسه مستقر می شد. سپس سایر تجهیزات برجا نصب می گردید و آزمایش بارگذاری صفحه انجام می شد. موارد زیر در کلیه‌ی آزمایشات برجا یکسان بوده است:

۱. قطر صفحه‌ی بارگذاری در کلیه‌ی آزمایشات برجا ۳۰ cm بود.
۲. برای قرائت نشست‌ها در تمامی آزمایشات فوق، از ۳ نشست سنج با دقت ۰/۰۱ mm استفاده می شد.
۳. کلیه‌ی آزمایشات بر روی خاک با رطوبت طبیعی انجام می گرفت و از اشباع شدن خاک محل در حین آزمایش و قبل از آن جلوگیری به عمل می آمد.
۴. تمامی آزمایشات برجا در اراضی موسوم به سپاد که در شمال شهر مشهد واقع شده‌اند، انجام پذیرفته است. خلاصه‌ای از مشخصات آزمایشات برجا و خاک‌های مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایشات آزمایشگاهی. به منظور تعیین مشخصات مکانیکی خاک‌هایی که آزمایش بارگذاری صفحه بر روی آن‌ها انجام شده، نمونه‌های دست خورده و دست نخورده از مجاورت محل استقرار صفحه‌ی بارگذاری گرفته می شد. آزمایشاتی که در آزمایشگاه بر روی این نمونه‌ها انجام شده، عبارتند از:

۱. آزمایش دانه‌بندی (ASTM D422-63)،
۲. آزمایش تعیین حدود اتربرگ شامل: تعیین حد روانی و حد خمیری (ASTM D4318-84)،
۳. آزمایش تعیین درصد رطوبت (ASTM D2216-71)،
۴. آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک خاک به روش

انجام آن مشکل و غیر ممکن می باشد. در همین راستا بسیاری از محققین سعی نموده‌اند با مدل نمودن آزمایشات محلی در آزمایشگاه، بین نتایج آن‌ها رابطه‌ای برقرار نمایند. در این تحقیق، سعی شده است که آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه، مدل‌سازی گردد. با توجه به این که این آزمایش ابداعی می باشد، در مراجع و منابع، تحقیق و کار مشابهی در این رابطه انجام نشده است؛ اما برخی از محققین سعی نموده‌اند رابطه‌ای بین نتایج آزمایش بارگذاری صفحه و برخی آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند: آزمایش تحکیم، آزمایش سه محوری و آزمایش CBR برقرار نمایند [7]. هم‌چنین روابطی بین نتایج آزمایش بارگذاری صفحه و سایر آزمایش‌های برجا، مانند: آزمایش CPT، آزمایش CBR برجا، آزمایش پرسیمتری و... ارائه شده است [8]. در رابطه با انجام آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه نیز کارهای بسیار محدودی انجام شده است که محدود به انجام این آزمایش با ابعاد واقعی و بر روی خاک‌های دست خورده و ایجاد فضایی با ابعاد حداقل $1/6 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ و صفحه‌ی بارگذاری به قطر ۳۰ سانتی متر می باشد. اشکال عمده‌ی این کار، دست خورده بودن نمونه‌ی خاک و سختی و هزینه‌ی بالای این آزمایش می باشد [9].

در این تحقیق، سعی بر ارائه‌ی روشی جدید، بسیار کم هزینه‌تر و آسان‌تر نسبت به آزمایش بارگذاری صفحه در محل بوده که مدل‌سازی آزمایش مذکور در آزمایشگاه و بر روی نمونه‌ی دست نخورده می باشد. در ادامه‌ی روند انجام این آزمایش و مدل‌سازی آن در آزمایشگاه و برقراری ارتباط بین نتایج آن و آزمایش بارگذاری صفحه در محل، شرح داده خواهد شد.

برنامه‌ی آزمایشات

همان‌گونه که بیان شد، آزمایشات به دو گروه برجا و آزمایشگاهی تقسیم می شوند. پس از اتمام آزمایش بارگذاری صفحه برجا که طبق استاندارد ASTM D1194-94 انجام می گرفت، به منظور انجام آزمایشات آزمایشگاهی و تکمیلی، نمونه‌هایی به صورت

می‌باشد. قسمت دوم، بیانگر بخش اعشاری وزن مخصوص خشک خاک (که همیشه بزرگتر از یک است) می‌باشد؛ در صورتی که دو یا چند نمونه دارای طبقه بندی و وزن مخصوص یکسان باشند، بعد از عدد مربوط به وزن مخصوص شماره‌های ۱، ۲ و ... به این نام گذاری اضافه می‌شود. به عنوان مثال، نمونه‌ای با نام M-50-2، معرف نمونه‌ی دوم با طبقه‌بندی ML و وزن مخصوص خشک 1.50 g/cm^3 می‌باشد.

کلوخه (ASTM D7263-09)،
 ۵. آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه.
 مشخصات خاک‌های مورد آزمایش و همچنین مقادیر تنش‌های اعمالی در آزمایش بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه که برای محاسبات نهایی مورد استفاده قرار گرفتند، در جدول (۱) ارائه شده است.
 در این جدول، شماره‌گذاری نمونه‌ها به صورت دو قسمتی می‌باشد. قسمت اول، مشخص‌کننده‌ی طبقه‌بندی خاک M معرف خاک ML و CM معرف خاک CL-ML

جدول ۱ مشخصات خاک‌های مورد آزمایش و مقادیر تنش‌های اعمال شده در آزمایشات*

شماره نمونه	γ_d (g/cm^3)	W (%)	LL (%)	PI (%)	<200 (%)	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃
CM-54	۱/۵۴	۱۱/۸	۲۵	۴	۹۳/۷۱	۷	۴	۰/۳	۷	۴	۰/۲۵
CM-62	۱/۶۲	۱۱/۴	۲۵	۴	۹۷/۷۳	۷	۴	۰/۳	۷	۴	۰/۲۵
CM-63	۱/۶۳	۱۳/۲	۲۵	۵	۹۷/۴۷	۷	۴	۰/۳	۷	۴	۰/۲۵
CM-74	۱/۷۴	۱۲	۲۵	۵	۸۹/۱۶	۷	۴	۰/۳	۷	۴	۰/۲۵
CM-75	۱/۷۵	۱۱/۷	۲۴	۴	۸۶/۴۹	۷	۴	۰/۳	۷	۴	۰/۲۵
M-45	۱/۴۵	۶	۲۳	-----	۸۵/۹۸	۶	۴	۰/۳	۶	۴	۰/۲۵
M-46	۱/۴۶	۱۳	۲۶	-----	۸۸/۷۰	۶	۴	۰/۳	۶	۴	۰/۲۵
M-48	۱/۴۸	۷/۳	۲۴	-----	۷۸/۰۲	۵	۴	۰/۳	۵	۴	۰/۲۵
M-50-1	۱/۵۰	۹	۲۲	-----	۷۵/۸۵	۶	۴	۰/۶	۶	۴	۰/۲۵
M-50-2	۱/۵۰	۱۰/۸	۲۴	-----	۹۰/۰۶	۶	۴	۰/۳	۶	۴	۰/۵
M-51-1	۱/۵۱	۷/۵	۲۴	-----	۸۲/۲۷	۶	۴	۰/۶	۶	۴	۰/۲۵
M-51-2	۱/۵۱	۹/۳	۲۳	-----	۹۰/۶۹	۶	۴	۰/۳	۶	۴	۰/۲۵
M-52	۱/۵۲	۸	۲۴	-----	۸۹/۰۶	۶	۴	۰/۳	۶	۴	۰/۲۵
M-57-1	۱/۵۷	۹	۲۳	-----	۷۵/۲۶	۶	۴	۰/۳	۶	۴	۰/۲۵
M-57-2	۱/۵۷	۱۰/۴	۲۴	۳	۸۸/۴۲	۵	۴	۰/۳	۵	۴	۰/۵
M-57-3	۱/۵۷	۹/۴	۲۳	-----	۸۰/۳۸	۶	۴	۰/۳	۶	۴	۰/۲۵
M-58	۱/۵۸	۸	۲۴	-----	۸۲/۷۱	۵	۴	۰/۳	۵	۴	۰/۲۵
M-62	۱/۶۲	۷/۷	۲۰	-----	۵۷/۲۳	۶	۴	۰/۶	۶	۴	۰/۵

* نمادهای مورد استفاده در جدول (۱) به موارد زیر اشاره دارند:

γ_d ، W، LL و PI: به ترتیب، وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت، حد روانی و دامنه‌ی خمیری خاک،

200 <: درصد عبوری از الک ۲۰۰،

P₁ و P₁: به ترتیب؛ حداکثر تنش بارگذاری در آزمایش بارگذاری صفحه‌ی برجا و در آزمایشگاه (kg/cm^2).

P₂ و P₂: به ترتیب؛ تنش در شروع مرحله‌ی باربرداری در آزمایش بارگذاری صفحه‌ی برجا و در آزمایشگاه (kg/cm^2).

P₃ و P₃: به ترتیب؛ تنش در پایان مرحله‌ی باربرداری در آزمایش بارگذاری صفحه‌ی برجا و در آزمایشگاه (kg/cm^2).

توسط دستگاه تحکیم که با تغییراتی در اندازه و ابعاد اولیه آن ایجاد شده بود، انجام گرفت. با توجه به ابعاد بزرگ نمونه دست نخورده‌ی اخذ شده از محل و عدم جای‌گیری آن درون دستگاه تحکیم، قسمتی از قالب دستگاه که محل استقرار قالب تحکیم می‌باشد، با قالبی مشابه ولی بزرگتر (حدوداً ۲/۵ برابر) تعویض شد (شکل ۳). سپس نمونه‌ها به وسیله‌ی این دستگاه، تحت بارگذاری صفحه (به قطر ۷/۵ cm) در آزمایشگاه قرار می‌گرفتند. با توجه به این‌که در هنگام انجام این آزمایش در محل، شرایط محدود شدگی خاک اطراف وجود ندارد، سعی بر این بوده است که عدم محدود شدگی مدل نیز تا حد امکان در آزمایشگاه تأمین گردد. البته در صورت امکان استفاده از قالب بزرگتر با ابعادی بزرگتر، قطعاً به شرایط واقعی نزدیکتر بوده و باعث تدقیق نتایج و کاهش میانگین خطا خواهد گردید؛ ولی در این صورت، نمونه دست نخورده‌ی گرفته شده به مراتب سنگین‌تر و حمل آن به آزمایشگاه بسیار مشکل خواهد بود. دقیقاً به همین دلیل، قطر صفحه در آزمایشگاه ۷/۵ سانتی‌متر انتخاب شده که با توجه به قطر قالب که ۲۲ سانتی‌متر است، تا حدی بتوان شرایط آزمایش در محل را مدل نمود. نسبت بین قطر صفحه و قطر قالب، ۳ به ۱ می‌باشد. این نسبت در آزمایش CBR آزمایشگاهی نیز (با قالب مشابه) همین مقدار می‌باشد (قطر صفحه ۵ و قطر قالب ۱۵ سانتی‌متر). از طرفی باید توجه داشت این آزمایش برای سایت‌هایی که قرار است گودبرداری شود، (و داشتن ضریب تغییر شکل قبل از برداشت گود بسیار ضروری است) توصیه می‌گردد. به این منظور باید از انتهای چاه دستی حفر شده، نمونه‌گیری کرد؛ بنابراین، سبک بودن نمونه، یکی از مهم‌ترین پارامترهاست. شایان ذکر است نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با اطلاع از امکان تأثیر کناره‌های قالب بوده است و برقراری ارتباط بین نتایج برجا و آزمایشگاه، در همین حالت مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات و مقادیر تنش‌های اعمال شده به نمونه‌ی آزمایشگاهی و آزمایشات برجا در جدول (۱) آورده شده است.

پس از انجام آزمایشات مقدماتی، شامل شناسایی و طبقه بندی خاک، به منظور انجام آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌ی دست نخورده توسط لوله استوانه‌ای شکل به قطر ۲۲ cm و ارتفاع ۲۰ cm از خاک محل انجام آزمایش تهیه می‌شد. به این منظور، ابتدا گودالی به قطر حدود ۴۰ cm و ارتفاع بیش از ۲۰ cm به گونه‌ای حفر می‌گردید که در میانه‌ی آن، استوانه‌ای با قطری معادل استوانه نمونه‌گیر باقی بماند (شکل ۲-الف). سپس نمونه‌گیر به آهستگی و به صورت قائم به داخل نمونه رانده می‌شد (شکل ۲-ب). پس از پایین رفتن کامل نمونه‌گیر، نمونه به آهستگی از قسمت زیرین آن جدا می‌گردید و پس از گذاشتن آن در پلاستیک به آزمایشگاه منتقل می‌شد.



الف



ب

شکل ۲ تهیه‌ی نمونه دست نخورده توسط لوله‌ی استوانه‌ای شکل برای آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه
الف: حفر گودال ب: استقرار استوانه‌ی نمونه‌گیر در نمونه و آماده‌سازی جهت نمونه‌گیری

سپس در آزمایشگاه آزمایش بارگذاری صفحه

فرآیند محاسبات و نتایج

پس از انجام آزمایشات بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه، نمودارهای بار-نشست آنها ترسیم شدند. شکل (۴) نمودارهای بار-نشست مربوط به ۱۸ آزمایش بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای بار-نشست، برای تعیین ضریب تغییر شکل خاک می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

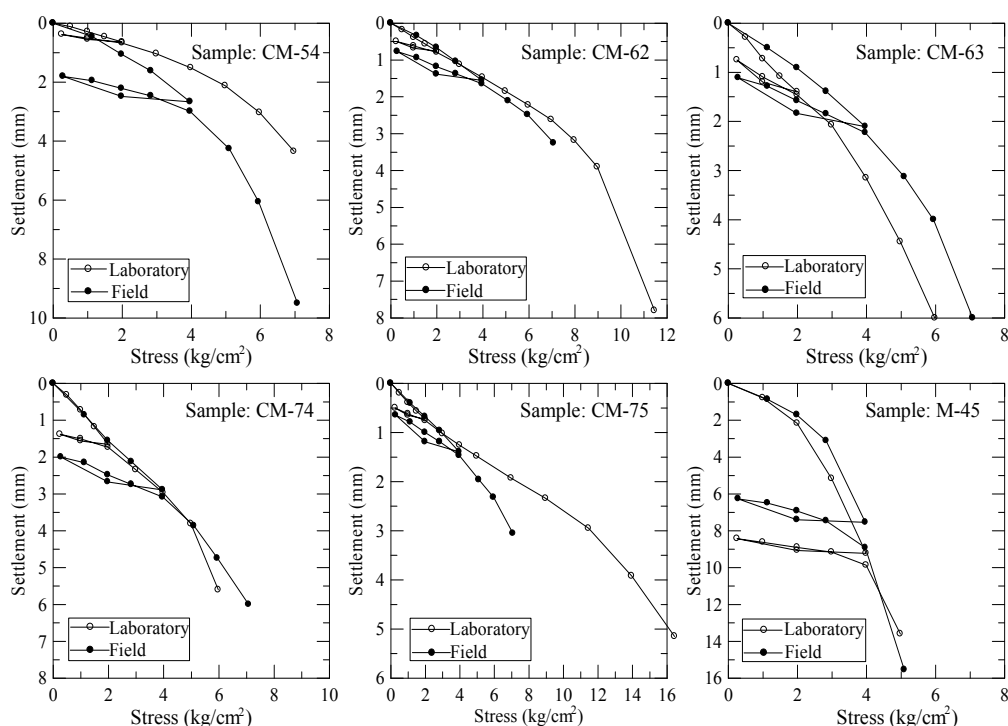
$$E = \frac{q}{\rho} B \left(1 - v^2 \right) I_s \quad (1)$$

در این رابطه: v : ضریب پواسون و I_s : ضریب شکل و صلبیت صفحه‌ی بارگذاری می‌باشد. برای محاسبه‌ی ضریب تغییر شکل خاک با استفاده از رابطه‌ی فوق، ضریب پواسون برابر با 0.3 و مقدار I_s برای صفحه‌ی دایروی و صلب برابر با 0.79 در نظر گرفته شده است [10]. از نمودارهای بار-نشست، شیب مماسی اولیه، شیب وتری و شیب باربرداری برای هر نمونه محاسبه شدند که نتایج حاصل در جدول (۲) ارائه شده است.

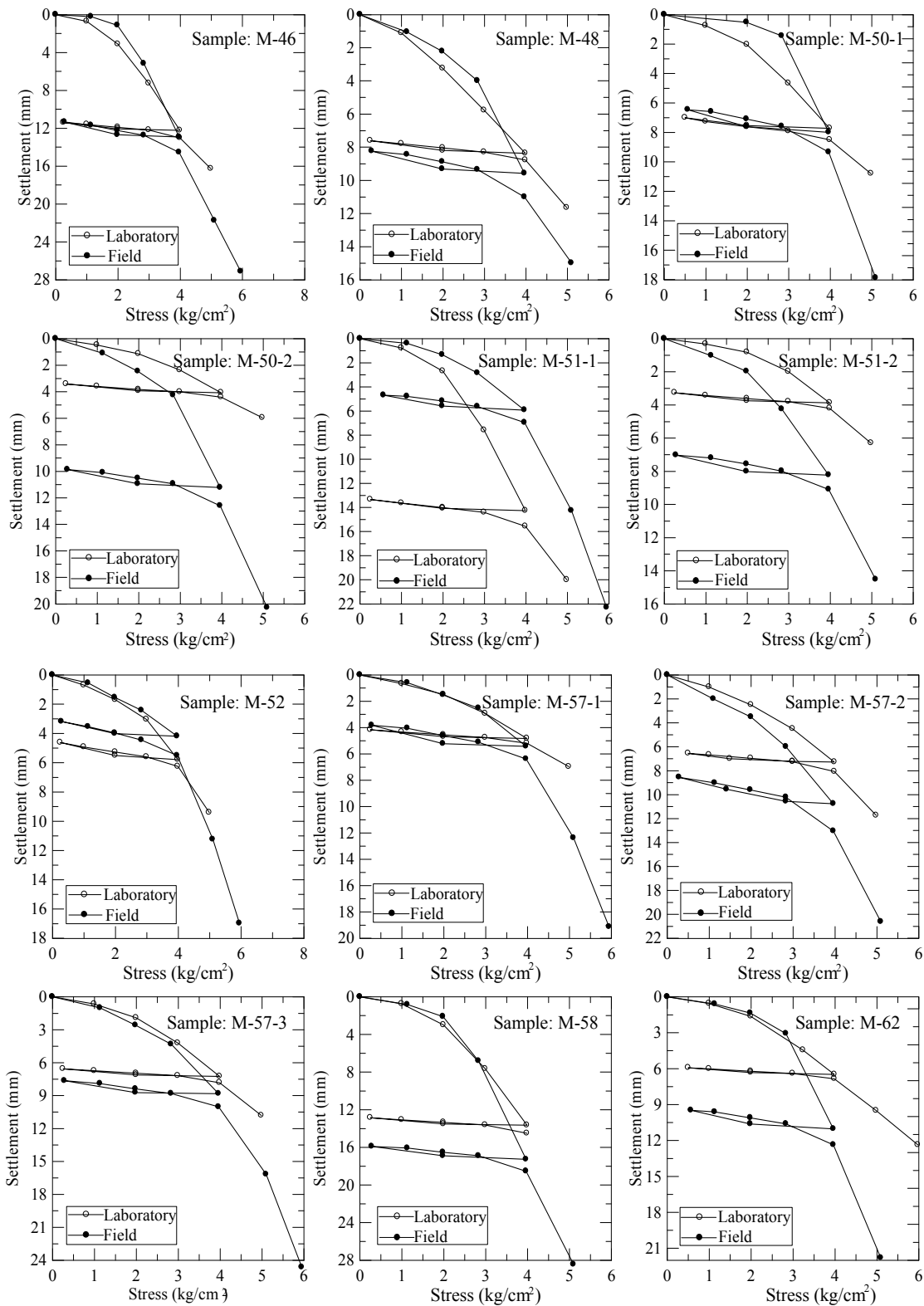
پس از انجام کلیه‌ی آزمایشات، نمودارهای بار-نشست مربوط به آزمایشات بارگذاری صفحه برجا و نیز آزمایشگاه ترسیم، مقایسه و تجزیه و تحلیل شدند که در ادامه، فرآیند کار و نتایج شرح داده می‌شوند.



شکل ۳ دستگاه تحکیم با تغییراتی در ابعاد آن جهت آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه



شکل ۴ نمودارهای بار-نشست آزمایش‌های بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه



ادامه‌ی شکل ۴

جدول ۲ مقادیر شیب‌های محاسبه شده برای هر نمودار*

شماره نمونه	S _{Fi}	S _{Fs}	S _{Fu}	S _{Li}	S _{Ls}	S _{Lu}
CM-54	۲۵/۰	۱۸/۸	۴۲/۶	۴۵/۳	۳۱/۲	۶۷/۱
CM-62	۳۳/۳	۳۰/۱	۴۷/۰	۲۷/۶	۲۶/۳	۶۷/۱
CM-63	۲۲/۶	۲۱/۸	۳۷/۰	۱۷/۴	۱۴/۳	۲۶/۹
CM-74	۱۳/۲	۱۲/۸	۴۱/۴	۱۵/۸	۱۲/۱	۶۴/۵
CM-75	۲۸/۱	۲۹/۴	۴۹/۵	۲۵/۶	۲۷/۴	۷۷/۵
M-45	۱۳/۲	۵/۲	۲۸/۷	۱۲/۸	۴/۳	۴۶/۷
M-46	۵۶/۶	۳/۱	۲۳/۱	۱۴/۱	۳/۳	۴۵/۶
M-48	۱۰/۸	۴/۱	۲۷/۴	۸/۹	۴/۸	۴۹/۱
M-50-1	۷/۹	۵/۰	۲۲/۱	۱۳/۵	۵/۲	۴۸/۴
M-50-2	۱۰/۳	۳/۵	۲۷/۱	۲۱/۱	۹/۸	۵۶/۶
M-51-1	۲۹/۵	۶/۷	۲۷/۳	۱۳/۲	۲/۸	۴۰/۶
M-51-2	۱۱/۲	۴/۸	۳۰/۴	۳۲/۱	۱۰/۴	۶۲/۳
M-52	۲۰/۸	۹/۵	۳۶/۳	۱۴/۵	۶/۹	۳۱/۹
M-57-1	۱۹/۲	۷/۳	۲۲/۸	۱۵/۴	۸/۳	۵۶/۲
M-57-2	۵/۵	۳/۷	۱۶/۷	۱۰/۰	۵/۶	۴۸/۴
M-57-3	۱۱/۳	۴/۵	۳۱/۲	۱۵/۴	۵/۶	۵۴/۲
M-58	۱۳/۸	۲/۳	۲۶/۹	۱۳/۷	۳/۰	۴۷/۳
M-62	۱۹/۰	۳/۶	۲۲/۰	۱۸/۴	۶/۱	۶۲/۳

* نمادهای مورد استفاده در جدول (۲) عبارتند از:

- S_{Fi} و S_{Li}؛ به ترتیب، شیب مماسی اولیه مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه (kg/cm³).
 S_{Fs} و S_{Ls}؛ به ترتیب، شیب وتری مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه (kg/cm³).
 S_{Fu} و S_{Lu}؛ به ترتیب، شیب باربرداری مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه (kg/cm³).

تجزیه و تحلیل نتایج

تعیین داده‌های پرت. به منظور ایجاد یک رابطه ریاضی و منطقی بین نتایج آزمایشات برجا و آزمایشگاهی که شامل مقادیر شیب مماسی اولیه، شیب وتری و شیب باربرداری متناظر می‌باشد (جدول ۲)، ابتدا داده‌های پرت در هر سری از اطلاعات شناسایی و حذف گردید و سپس داده‌های باقی‌مانده، مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. اگر μ ؛ میانگین داده‌ها، σ ؛ انحراف معیار داده‌ها و α ؛ ضریب مربوط به درصد خطا باشند، داده‌هایی که خارج از بازه $\mu \pm \alpha\sigma$ قرار می‌گیرند، به عنوان داده‌ی پرت تلقی می‌شوند. برای تعیین σ از رابطه زیر استفاده

می‌شود:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق، x_i و n ، به ترتیب، i امین داده و تعداد داده‌ها می‌باشند. با پذیرش خطای ۱۰٪ برای انجام آزمایش‌ها، با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه برجا و آزمایشگاه، پس از محاسبه‌ی مقادیر شیب‌ها، برای تعیین بازه مربوط به داده‌های پرت، ابتدا تفاضل این شیب‌ها برای آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی محاسبه می‌شد، سپس مقادیر میانگین (μ) و انحراف معیار (σ)، برای این داده‌های تفاضلی محاسبه و

۲. مدل توانی با معادله $y = ax^b$.

در این مدل‌ها x و y به ترتیب، بیانگر مقادیر شیب‌های محاسباتی در آزمایشگاه و برج می‌باشند. پس از انتخاب مدل‌های نهایی، به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد این مدل‌ها، برخی از پارامترهای آماری برای هر مدل محاسبه و نمودارهای آماری مربوطه رسم شدند. در بخش‌های بعدی، مقادیر شیب مماسی اولیه، شیب و تری و شیب باربرداری بررسی و تحلیل شده، و توانایی هر یک از مدل‌ها در تبدیل نتایج آزمایشگاهی به نتایج میدانی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تحلیل شیب مماسی اولیه. پس از انجام آزمایش بارگذاری صفحه برج و آزمایشگاه و محاسبه‌ی شیب مماسی اولیه، ابتدا روابطی بر اساس مدل‌های خطی و توانی برای ارتباط بین مقادیر شیب‌های برج و آزمایشگاه توسعه یافتند. سپس به منظور ارزیابی عملکرد آماری مدل‌ها، نمودارهایی به منظور مقایسه‌ی چشمی نتایج مدل‌ها ترسیم شدند و عملکرد عددی آن‌ها در قالب مقادیر باقی‌مانده (خطای محاسبه شده توسط مدل)، (مربع خطا) SE، (مجموع مربعات خطای محاسبه شده) SSE، (قدر مطلق خطای نسبی) ARE، (میانگین قدر مطلق خطای نسبی) MARE، (ضریب تعیین) R^2 و (شیب نمودار مقایسه‌ای) Slope صورت پذیرفت.

به عنوان نمونه، نمودارهای مربوط به مدل خطی برای شیب مماسی اولیه در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۵-الف) چگونگی توسعه‌ی مدل و مقدار R^2 آن را نشان می‌دهد. شکل (۵-ب) اشاره به عملکرد باقی‌مانده‌ها (تفاوت بین نتایج میدانی حاصل از مدل و اندازه‌گیری) دارد. در شکل (۵-ج) نیز مقادیر محاسباتی در مقابل مشاهداتی (اندازه‌گیری) ترسیم شده‌اند. در حالت ایده‌آل، نقاط نموداری (در نمودار ج) می‌بایست بر روی یک خط برازش کامل (با ضریب زاویه‌ی ۱) قرار گیرند.

الف: مدل خطی

رابطه‌ای که بر اساس مدل خطی بین مقادیر شیب‌های

سپس بازه‌ی مورد نظر تعیین می‌شد. داده‌هایی که میزان اختلاف بین نتایج آزمایشات برج و آزمایشگاهی نسبت به میانگین مقادیر اختلافات، مقدار قابل توجهی بوده و خارج از بازه $\mu \pm 0.05$ قرار گیرد، داده‌ی پرت تلقی می‌گردد. با انجام محاسبات فوق برای شیب‌های محاسباتی، بازه مربوط به تعیین داده‌های پرت برای هر یک از این شیب‌ها تعیین و داده‌های پرت شناسایی شدند. در بین کلیه‌ی داده‌ها، فقط تفاضل مربوط به یکی از شیب‌های مماسی اولیه به عنوان داده‌ی پرت شناسایی شده و حذف گردید. برای این داده، مقدار شیب مماسی اولیه اندازه‌گیری شده‌ی برج $56/6$ و معادل آن در آزمایشگاه $14/1$ بود.

انتخاب مدل. پس از شناسایی و حذف داده‌ی پرت، به منظور ایجاد یک رابطه‌ی ریاضی و منطقی بین نتایج آزمایشات برج و آزمایشگاهی، مقادیر شیب‌های مماسی اولیه، شیب‌های و تری و شیب‌های باربرداری هر گروه به صورت جداگانه توسط چندین مدل، شامل مدل‌های: خطی، توانی، نمایی، لگاریتمی، چند جمله‌ای درجه دو و درجه سه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با توجه به این‌که با افزایش مقدار شیب مماسی اولیه، شیب و تری و یا شیب باربرداری در آزمایشگاه، مقدار این شیب‌ها در حالت برج نیز افزایش پیدا می‌کند، از مدل‌هایی که قسمت انتهایی آن‌ها انحنایی رو به پایین داشته و با این روند افزایشی مغایرت داشتند، چشم‌پوشی شد و سایر مدل‌ها مورد بررسی بیشتر و دقیق‌تر قرار گرفت. چنین مدل‌هایی که قسمت انتهایی آن‌ها انحنایی رو به پایین دارد و یا نمودار آن‌ها به صورت دو قوسی می‌باشد، ممکن است فقط در محدوده‌ی داده‌های موجود نتایج بهتری ارائه دهند؛ ولی با افزایش تعداد داده‌ها و یا تفاوت برخی از شرایط، این مدل‌ها فاقد کارایی لازم در تعمیم نتایج می‌باشند. با توجه به این توضیحات، مدل‌هایی که برای تحلیل نهایی انتخاب شدند عبارتند از:

۱. مدل خطی با معادله $y = ax$.

مماسی اولیه برجا و آزمایشگاه به دست آمده، به صورت چگونگی محاسبه‌ی پارامترهای فوق، بر اساس این رابطه‌ی خطی در جدول شماره (۳) ارائه شده است. زیر می‌باشد:

$$S_{Fi} = 0.82S_{Li} \quad (۳)$$

جدول ۳ مقادیر شیب‌های مماسی اولیه و پارامترهای آماری مربوطه برای مدل خطی *

S_{Li}	S_{Fio}	S_{Fic}	Residual	SE	ARE (%)
۱۲/۸	۱۳/۱۷	۱۰/۴۹	۲/۶۷	۷/۱۵	۲۰/۳۱
۸/۹	۱۰/۸	۷/۳	۳/۵	۱۲/۲۷	۳۲/۴۳
۱۳/۵۴	۸/۹۳	۱۱/۱	-۳/۱۷	۱۰/۰۷	۴۰/۰۲
۲۱/۱۴	۱۰/۳۴	۱۷/۳۴	-۷/۰	۴۸/۹۷	۶۷/۶۸
۱۳/۱۷	۲۹/۵۴	۱۰/۸	۱۸/۷۴	۳۵۱/۱۱	۶۳/۴۴
۳۲/۰۹	۱۱/۱۷	۲۶/۳۱	-۱۵/۱۴	۲۲۹/۱	۱۳۵/۴۵
۱۴/۴۷	۲۰/۷۷	۱۱/۸۶	۸/۹۱	۷۹/۳۹	۴۲/۸۹
۱۵/۳۹	۱۹/۲۰	۱۲/۶۲	۶/۵۷	۴۳/۲	۳۴/۲۴
۱۰/۰۲	۵/۵۲	۸/۲۱	-۲/۶۹	۷/۲۶	۴۸/۸۴
۱۵/۳۹	۱۱/۲۷	۱۲/۶۲	-۱/۳۶	۱/۸۴	۱۲/۰۳
۱۳/۷۲	۱۳/۷۷	۱۱/۲۵	۲/۵۲	۶/۳۳	۱۸/۲۸
۱۸/۳۶	۱۸/۹۶	۱۵/۰۶	۳/۹۱	۱۵/۲۷	۲۰/۶۱
۴۵/۲۵	۲۴/۹۹	۳۷/۱۱	-۱۲/۱۲	۱۴۶/۸۱	۴۸/۴۸
۲۷/۶۳	۳۲/۲۹	۲۲/۶۶	۱۰/۶۳	۱۱۳/۰۲	۳۱/۹۳
۱۷/۴۳	۲۲/۶۳	۱۴/۳	۸/۳۳	۶۹/۴۱	۳۶/۸۲
۱۵/۷۶	۱۳/۲۱	۱۲/۹۳	۰/۲۹	۰/۰۸	۲/۱۸
۲۵/۵۹	۲۸/۰۵	۲۰/۹۹	۷/۰۶	۴۹/۹۱	۲۵/۸
SSE=۱۱۹۱/۲			ARE (%)=۴۰		

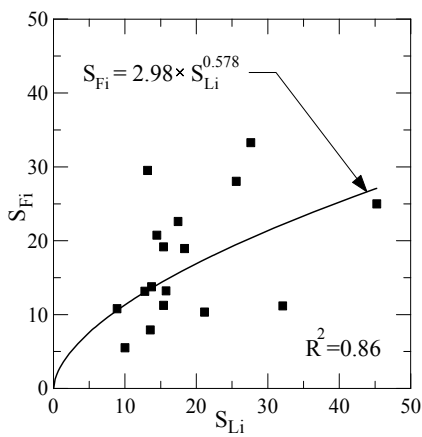
* نمادهای مورد استفاده در جدول (۳) به موارد زیر اشاره دارند:

S_{Li} ؛ شیب مماسی اولیه مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه.

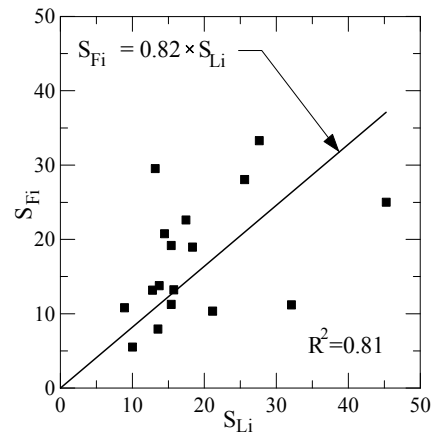
S_{Fic} و S_{Fio} ؛ به ترتیب، شیب مماسی اولیه مشاهده شده و شیب مماسی اولیه‌ی محاسبه شده توسط مدل مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه‌ی برجا.

Residual؛ تفاوت بین شیب مماسی اولیه مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه برجا (خطای محاسبه شده توسط مدل)

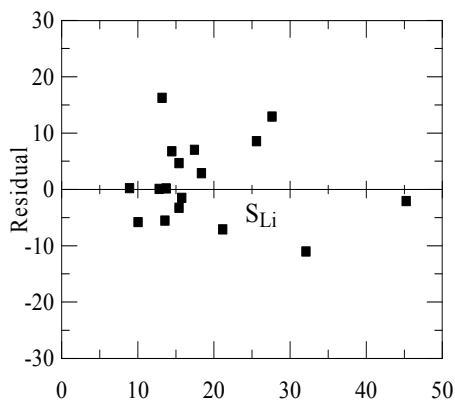
SE؛ مربع تفاوت بین شیب مماسی اولیه مشاهده شده و محاسبه شده، توسط مدل مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه برجا (مربع خطا) ARE، SSE و MARE؛ به ترتیب، قدر مطلق خطای نسبی، مجموع مربعات خطای محاسبه شده و میانگین قدر مطلق خطای نسبی.



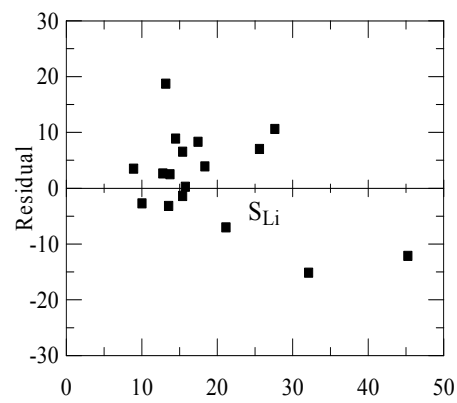
الف



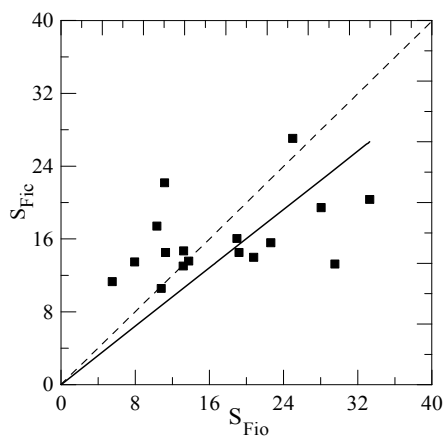
الف



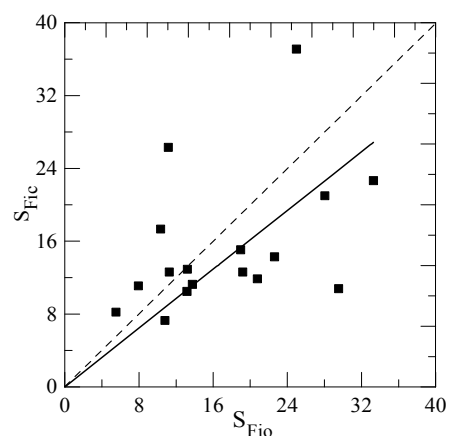
ب



ب



ج



ج

شکل ۶ نمودارهای آماری شیب مماسی اولیه مربوط به توسعه‌ی مدل توانی به منظور تبدیل نتایج آزمایشگاهی به میدانی

شکل ۵ نمودارهای آماری شیب مماسی اولیه مربوط به توسعه‌ی مدل خطی به منظور تبدیل نتایج آزمایشگاهی به میدانی

تحلیل شیب و تری. در این بخش، مقادیر شیب‌های و تری که با توجه به نمودارهای بار-نشست آزمایش‌های بارگذاری صفحه برجا و در آزمایشگاه محاسبه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا رابطه‌ای که بر اساس هر یک از مدل‌های خطی و توانی برای ارتباط بین مقادیر شیب‌های و تری برجا و آزمایشگاه توسعه یافته، ارائه شده است و سپس نمودارهای مربوط به توسعه این رابطه‌ها توسط مدل مربوطه ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

الف: مدل خطی

نمودارهای مربوط به مدل خطی در شکل (۷) نشان داده شده است. رابطه‌ای که بین مقادیر شیب‌های و تری برجا و آزمایشگاه بر مبنای مدل خطی به دست آمده است، به صورت ذیل می‌باشد:

$$S_{Fi} = 0.924S_{Li} \quad (۵)$$

ب: مدل توانی

رابطه‌ای که بر مبنای مدل توانی بین مقادیر شیب‌های مماسی اولیه‌ی برجا و آزمایشگاه به دست آمده، به صورت ذیل می‌باشد:

$$S_{Fi} = 2.987S_{Li}^{0.578} \quad (۴)$$

نمودارهای مربوط به توسعه‌ی این رابطه در شکل (۶) نشان داده شده است.

مشخصات عددی آماری مربوط به تحلیل دو مدل خطی و توانی برای شیب مماسی اولیه در جدول (۴) ارائه شده‌اند. با مقایسه‌ی پارامترهای ارائه شده در این جدول، می‌توان مدل نهایی و مطلوب را انتخاب نمود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به نتایج نزدیک تحلیل آماری دو مدل، مدل توانی توانایی بیشتری برای ایجاد یک ارتباط ریاضی بین مقادیر شیب‌های مماسی اولیه‌ی برجا و آزمایشگاه دارد.

جدول ۴ نتایج آماری مدل‌های خطی و توانی مربوط به مقادیر شیب‌های مماسی اولیه*

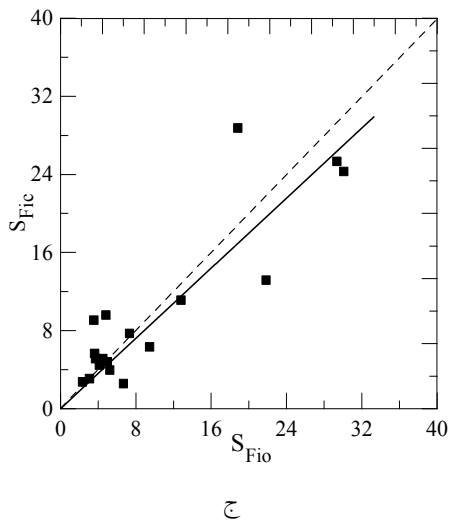
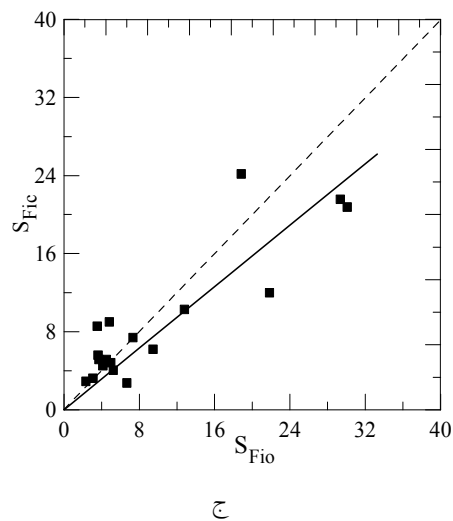
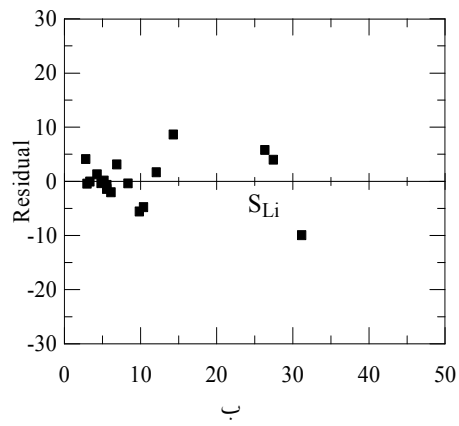
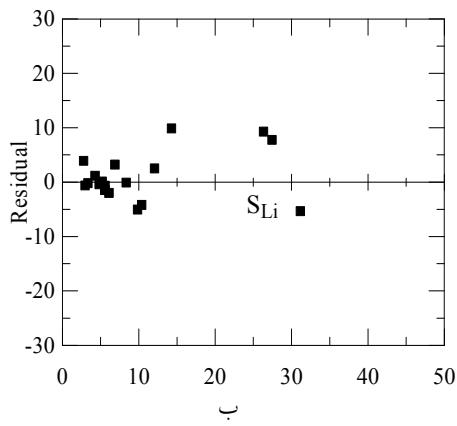
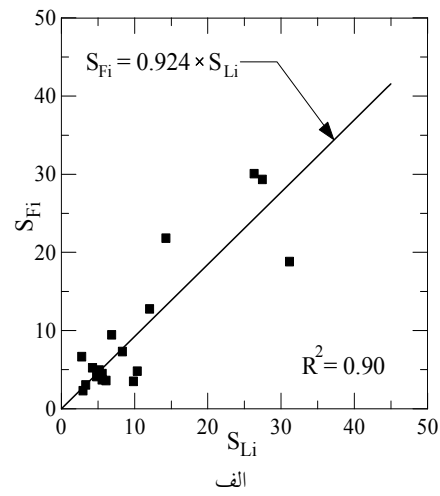
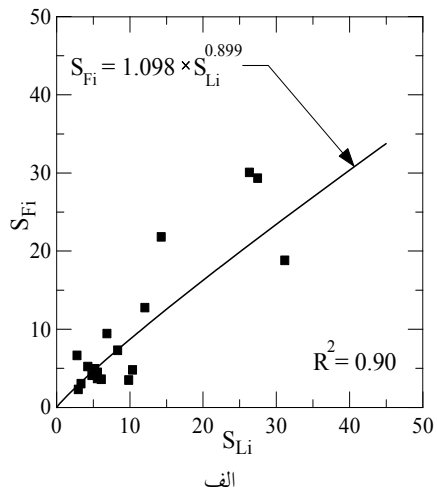
مدل	MARE (%)	Slope	SSE	R ²
خطی	۴۰/۰	۰/۸۰۶	۱۱۹۱/۲	۰/۸۱
توانی	۳۶/۶	۰/۸۰۱	۸۸۵/۲	۰/۸۶

*نمادهای مورد استفاده در جدول ۴ به موارد زیر اشاره دارند:

R²: ضریب تعیین،

Slope: شیب نمودار مقایسه‌ای مقادیر شیب‌های مشاهده شده برجا در برابر شیب‌های محاسبه شده توسط مدل،

SSE و MARE: به ترتیب، مجموع مربعات خطای محاسبه شده و میانگین قدر مطلق خطای نسبی.



شکل ۸ نمودارهای آماری شیب و تری مربوط به توسعه مدل توانی به منظور تبدیل نتایج آزمایشگاهی به میدانی

شکل ۷ نمودارهای آماری شیب و تری مربوط به توسعه مدل خطی به منظور تبدیل نتایج آزمایشگاهی به میدانی

آزمایشگاه توسعه یافته، بیان شده و سپس نمودارهای مربوط به توسعه‌ی این رابطه‌ها توسط مدل مربوطه ارائه شده است.

الف: مدل خطی

نمودارهای مربوط به مدل خطی در شکل (۹) نشان داده شده است. رابطه‌ای که بین مقادیر شیب‌های وتر و برجا و آزمایشگاه بر مبنای مدل خطی به دست آمده، به صورت زیر می‌باشد:

$$S_{Fi} = 0.572 S_{Li} \quad (V)$$

ب: مدل توانی

نمودارهای مربوط به مدل توانی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. رابطه‌ای که بین مقادیر شیب‌های باربرداری برجا و آزمایشگاه بر مبنای مدل توانی به دست آمده، به صورت زیر می‌باشد:

$$S_{Fi} = 11.14 S_{Li}^{0.25} \quad (A)$$

پس از تحلیل و بررسی مدل‌های مختلف و ارائه‌ی نمودارهای مربوط به هر یک از این مدل‌ها، مشخصات آماری مربوط به تحلیل این دو مدل برای شیب و تری در جدول (۶) خلاصه شده است. با مقایسه‌ی پارامترهای ارائه شده در این جدول، می‌توان مدل نهایی و مطلوب را انتخاب نمود.

جدول ۶ نتایج آماری مدل‌های خطی و توانی مربوط به مقادیر

شیب‌های باربرداری*

مدل (۸)	MARE (%)	Slope	SSE	R ²
خطی	۲۳/۷	۰/۹۲۳	۱۴۴۱/۶	۰/۹۲
توانی	۲۳/۵	۰/۸۹۱	۱۳۵۹/۰	۰/۹۳

ب: مدل توانی

نمودارهای مربوط به مدل توانی در شکل (۸) نشان داده شده است. رابطه‌ای که بین مقادیر شیب‌های وتر و برجا و آزمایشگاه بر مبنای مدل توانی به دست آمده است، به صورت ذیل می‌باشد:

$$S_{Fi} = 1.098 S_{Li}^{0.899} \quad (6)$$

پس از تحلیل و بررسی مدل‌های مختلف و ارائه‌ی نمودارهای مربوط به هر یک از این مدل‌ها، مشخصات آماری مربوط به تحلیل این دو مدل برای شیب و تری در جدول (۵) خلاصه شده است. با مقایسه‌ی این پارامترها می‌توان مدل نهایی و مطلوب را انتخاب نمود.

جدول ۵ نتایج آماری مدل‌های خطی و توانی مربوط به مقادیر

شیب‌های وتر*

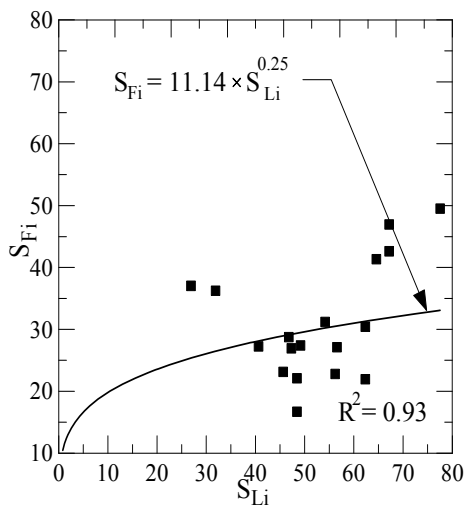
مدل	MARE (%)	Slope	SSE	R ²
خطی	۳۶/۶	۰/۸۹۸	۳۱۴/۹	۰/۹۰
توانی	۳۶/۰	۰/۷۸۷	۳۵۶/۴	۰/۹۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به نتایج نزدیک مشخصات آماری دو مدل و مقایسه‌ی مقادیر R²، دو مدل، عملکرد آماری نسبتاً یکسانی دارند؛ بنابراین استفاده از مدل خطی توصیه می‌شود.

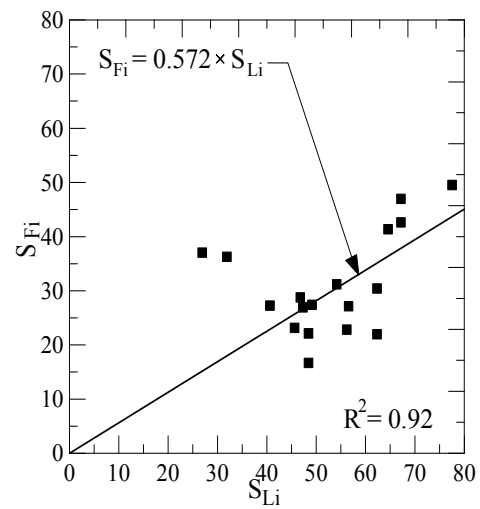
تحلیل شیب باربرداری. آخرین پارامتری که در این تحقیق بررسی شده است، مقادیر شیب‌های باربرداری است که با توجه به نمودارهای بار-نشست آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ی برجا و در آزمایشگاه محاسبه شده‌اند. ابتدا رابطه‌ای که بر اساس هر یک از مدل‌های خطی و توانی برای ارتباط بین مقادیر شیب‌های باربرداری برجا و

توجه به سادگی مدل خطی، استفاده از این مدل توصیه می‌شود.

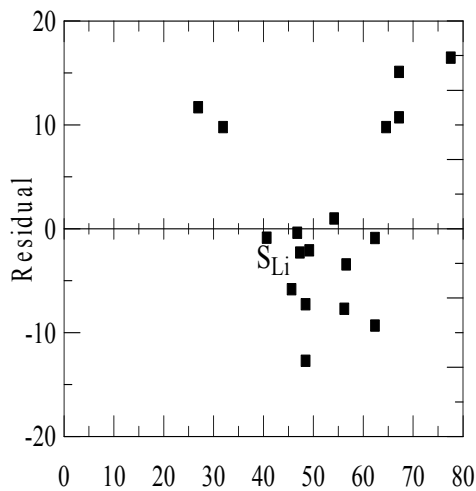
چنان که مشاهده می‌گردد، با توجه به نتایج نزدیک تحلیل آماری دو مدل، و مقایسه‌ی مقادیر R^2 ، دو مدل، عملکرد آماری نسبتاً یکسانی دارند؛ بنابراین با



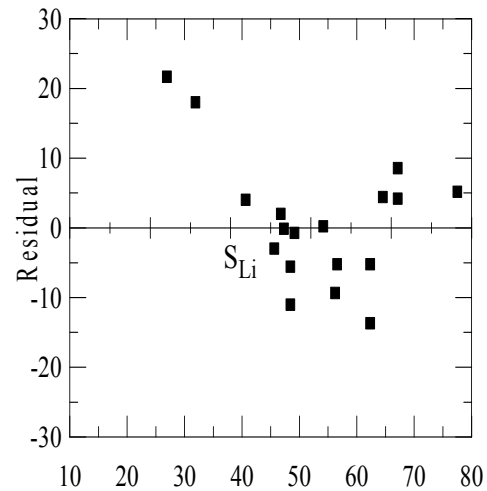
الف



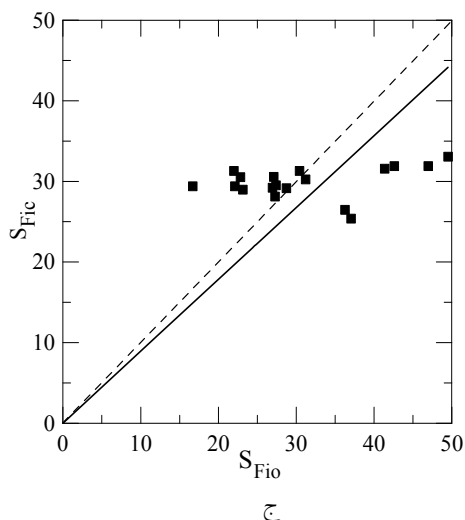
الف



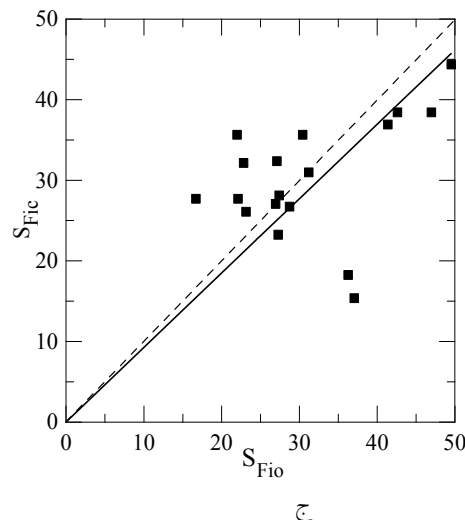
ب



ب



شکل ۱۰ نمودارهای آماری شیب باربرداری مربوط به توسعه مدل توانی به منظور تبدیل نتایج آزمایشگاهی به میدانی



شکل ۹ نمودارهای آماری شیب باربرداری مربوط به توسعه مدل خطی به منظور تبدیل نتایج آزمایشگاهی به میدانی

۳. با توسعه‌ی رابطه بر مبنای مدل‌های خطی و توانی برای مقادیر محاسبه شده‌ی شیب‌های مماسی اولیه و بررسی نتایج آماری این مدل‌ها، مدل توانی (رابطه ۴) با میانگین قدر مطلق خطای نسبی ۳۷٪، بیشینه و کمینه قدر مطلق خطای نسبی به ترتیب: ۱۰۵٪ و ۱٪، به عنوان بهترین مدل برای مقادیر شیب‌های مماسی اولیه توصیه می‌گردد. این بدان معناست که با توجه به رفتار پیچیده‌ی خاک و تعداد محدود آزمایشات انجام شده برای برقراری ارتباط بین نتایج آزمایشگاهی و برجا، این تخمین با میزان خطای متوسطی حدود ۳۷٪ امکان‌پذیر می‌باشد. البته باید توجه داشت معمولاً روابط تجربی ارائه شده، دارای خطای نسبی بالا هستند. به عنوان مثال، یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای تعیین این پارامتر مهم، استفاده از نتایج آزمایش SPT می‌باشد. روابط گوناگون ارائه شده برای استفاده از نتایج این آزمایش به نتایج متفاوتی که گاهی حتی بیش از ۲۰۰٪ با یکدیگر اختلاف دارند، منجر می‌گردد. با عنایت به این موضوع، استفاده از روش

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، هدف تعیین ضریب تغییر شکل خاک با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه برجا و در آزمایشگاه، سعی در ایجاد ارتباط بین نتایج این دو نوع آزمایش بود. آزمایش بارگذاری صفحه در آزمایشگاه با ایجاد تغییراتی در اندازه و ابعاد اولیه‌ی دستگاه تحکیم، مدل شده بود. پس از انجام آزمایشات محلی و آزمایشگاهی، شیب مماسی اولیه، شیب وتری و شیب باربرداری، محاسبه و رسم شدند. سپس مدل‌های گوناگون، شامل خطی و توانی، جهت ارتباط بین نتایج، توسعه یافتند و مدل نهایی که ارتباط بهتر و دقیق‌تری را بین نتایج برقرار می‌کرد، انتخاب گردید. با توجه به آزمایش‌های انجام شده و تحلیل نتایج، می‌توان نکات زیر را استنباط کرد:

۱. رابطه‌ی بین نتایج آزمایش بارگذاری صفحه برجا و آزمایش بارگذاری صفحه مدل‌سازی شده در آزمایشگاه از یک روند منطقی پیروی می‌کند.
۲. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که تفاوت زیادی بین نتایج مدل‌های خطی و توانی وجود ندارد.

۵. با توسعه‌ی رابطه بر مبنای مدل‌های مختلف، برای مقادیر محاسبه شده شیب‌های باربرداری و بررسی نتایج آماری این مدل‌ها، مدل خطی (رابطه‌ی ۷) با میانگین قدر مطلق خطای نسبی ۲۴٪، بیشینه و کمینه‌ی قدر مطلق خطای نسبی به ترتیب: ۶۶٪ و ۰/۴٪، بهترین مدل برای مقادیر شیب‌های باربرداری توصیه می‌شود. پس از مقایسه‌ی نتایج آماری در این حالت با دو حالت قبل، مشخص می‌شود که استفاده از این روش در تعمیم نتایج آزمایشگاهی به شرایط میدانی با خطای کمتری همراه می‌باشد.

تقدیر و تشکر. نویسندگان از مسئولین محترم شرکت سپاد خراسان که در زمینه‌ی انجام آزمایشات صحرایی این تحقیق را فراهم نمودند کمال تشکر را دارند.

پیشنهادی که علیرغم سادگی و کم هزینه بودن آن (در مقایسه با آزمایش بارگذاری صفحه) نتایجی به مراتب با خطای کمتر برای محاسبه و تعیین ضریب تغییر شکل خاک منجر می‌گردد (در مقایسه با استفاده از نتایج آزمایش SPT). به این دلیل میانگین قدر مطلق خطای نسبی ۳۷٪ برای تخمین اولیه در پروژه‌های مهندسی توصیه می‌شود.

۴. با توسعه‌ی رابطه برای مقادیر محاسبه شده‌ی شیب‌های وتری بر مبنای مدل‌های مختلف و ترسیم نمودار آن‌ها و تحلیل نتایج آماری این مدل‌ها، مدل خطی (رابطه‌ی ۵) با میانگین قدر مطلق خطای نسبی ۳۷٪، بیشینه و کمینه‌ی قدر مطلق خطای نسبی به ترتیب: ۱۵۷٪ و ۰/۷٪، برای مقادیر شیب‌های وتری توصیه می‌گردد. با توجه به مقدار خطا، استفاده از این روش نیز در شرایط سخت قابل توصیه است.

مراجع

1. Singh, A. and Chowdhary, G. R., "Soil Engineering in Theory and Practice, Vol. 2, Geotechnical Testing and Instrumentation", Satish Kumar Jain for CBS Publishers & Distributors, New Delhi, India, (1990).
2. Briaud, J. L., Li, Y. and Rhee, K., "BCD: A Soil Modulus Device for Compaction Control", Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 1, pp. 108-115, (2006).
3. Sawicki, A. and Swidzinski, W., "Elastic Moduli of Non-Cohesive Particulate Materials", Elsevier Science (Pub.), (1998).
4. Briaud, J. L., "Introduction to Soil Moduli", Geotech. News, June 2001, BiTech Publishers, Richmond, B.C., Canada, (2001).
5. Lin, P. S., Yang, L. W. and Juang, H., "Sub-Grade Reaction and Load-Settlement Characteristics of Gravelly Cobble Deposits by Plate-Load Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 5, pp. 801-810, (1998).
6. Bowles, J. E., "Foundation Analysis and Design", McGraw-Hill Book Company, Singapore, (1988).
7. Reznik, Y. M., "Comparison of Results of Oedometer and Plate Load Tests Performed on Collapsible Soils", *Engineering Geology Journal*, Vol. 39, pp. 17-30, (1995).

8. Twesigy-Omwe, M. N., "Comparison of Test Results from a Compacted Fill", *International Conference on Advances in Engineering and Technology*, (2004).
9. Demerchant, M. R., Valsangkar, A. J. and Schriver, A. B., "Plate Load Test on Geo-Grid-Reinforced Expanded Shale Lightweight Aggregate", *Geo-Textiles and Geo-Membranes Journal*, Vol. 20, pp. 173-190, (2002).
10. Das, B. M., "Advanced Soil Mechanics", Taylor & Francis, Washington, DC, (1997).
11. ASTM, D 1194 - 94, "Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings", American Society of Testing and Materials.