بررسی شاخص های موثر در افزایش ظرفیت باربری خاک های مشکل دار برای اجرای سازه های هیدرولیکی با استفاده از مخلوط خاک و سیمان

امیر عباس کمان بدست [۱]، روزبه آقامجیدی [۲]

۱- گروه مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- گروه عمران، واحد سپیدان ، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران

تاریخ دریافت:۱۳۹۶/۰۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

چکیده

نیاز روز افزون به خاک به عنوان اصلی‌ترین مصالح در پروژه‌های آبی و کانال‌های انتقال آب و عدم وجود خصوصیات کیفی و ژئوتکنیکی لازم در تمامی خاک‌ها، امروزه بهسازی خاک را با استفاده از مصالح و مواد افزودنی مورد توجه قرار داده است. مدول الاستیسیته خاک نشانگر مقدار کرنش خاک در برابر مقدار مشخصی از تنش است. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، خاک در برابر تنش‌های وارده تغییر شکل کمتری خواهد داشت. هدف این تحقیق، بررسی تأثیر سیمان و تغییرات تراکم بر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری خاک‌های رسی مسئله‌دارمی باشد. در این تحقیق نمونه‌های خاک رسی تنها و خاک رسی با درصد اختلاط سیمان ۱۰ درصد و در رطوبت‌های بهینه، در تراکم‌های ۸۵، ۹۵ و ۱۰۰ درصد مورد آزمایش تک محوری قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها دلالت بر این دارد که مدول الاستیسیته با اضافه کردن سیمان تا ۳,۵ برابر بیشتر می‌شود و با افزایش زمان ماندگاری سیمان، مدول الاستیسیته تا چند برابر (بسته به میزان تراکم) افزایش می یابد. هرچه تراکم نمونه بیشتر باشد، این شدت افزایش هم بیشتر است. همچنین سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری تا چندین برابر حالت عادی می گردد.

واژه‌های کلیدی: ***مدول الاستیسیته، سیمان، رطوبت، تراکم، کرنش***

مقدمه

به طور معمول خاک‌های رسی مادامی که تحت رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه قرار می‌گیرند، بارهای زیادی را تحمل نموده و تغییر شکل ناچیزی را متحمل می‌شوند؛ ولی، هرچه میزان رطوبت افزایش یابد، ظرفیت باربری آن کم شده و تغییر شکل بیشتری در خاک ایجاد گردیده و نهایتاً پایداری خاک از بین می‌رود. معمولاً خاک‌های رسی نفوذ پذیری کمی داشته و انبساط و انقباض زیاد با تغییر ناچیز رطوبت از خواص آن‌هاست. با توجه به هزینه‌های گزافی که خاکبرداری و خاکریزی در پروژه‌های عمرانی و آبیاری و زهکشی در مناطقی که خاک منطقه دارای خصوصیات مناسبی جهت اجرای طرح‌ها به دنبال ندارد، تثبیت و بهسازی خاک به کمک مواد افزودنی اهمیت فراوانی را به همراه دارد. به بیان دیگر از نظر اقتصادی بهینه تر است خاک منطقه بهسازی شده و عملیات حمل خاک از منابع قرضه صورت نگیرد. عموماً خاک موجود در سایت اجرایی از دیدگاه مهندسی برای ساخت وساز، ایده آل و کاملاً مطلوب نیست و باید با اعمال تغییراتی بر آن جهت فعالیت‌های سازه‌ای مانند احداث سازه های هیدرولیکی مانند ایستگاه پمپاژ، کانال‌های آبیاری زهکشی و غیره آماده شود. لذا دو راهکار متفاوت در مواجهه با خاک های نامناسب در مهندسی ژئوتکنیک، تغییر محل سایت و

تغییر خصوصیات سایت است که به بهسازی و یا در مواردی همسازی خاک موسوم است. بهسازی (یا گاه اصلاح) به مجموعه عملیاتی اطلاق می‌شود که به حذف برخی رفتارهای نامناسب خاک یا تحمیل رفتارهای مناسب به آن می‌انجامد. اهداف عمده بهسازی شامل افزایش مقاومت خاک، کاهش خصوصیات کلی تغییر شکل پذیری و حذف برخی رفتارهای نامناسب یا اضافه نمودن برخی رفتارهای مناسب به توده خاک می‌باشد. روش‌های متداول بهسازی خاک را می‌توان متراکم کردن، اختلاط و جایگزینی خاک با مصالح دیگر برشمرد. همه روش‌های یاد شده برای همه سایت‌های موجود مناسب نیستند و هر سایت با یک یا چند روش قابل بهسازی است. نخستین بار آمیس (۱۹۱۷) مخلوط خاک-سیمان را به عنوان یک تحقیق پژوهشی در فیلادلفیای آمریکا به ثبت رساند. پس از وی در سازمان بزرگراه‌های ایالت داکوتای جنوبی و آیووا (۱۹۲۲) و متعاقب آن اداره راه کارولینای جنوبی (۱۹۳۲) این ترکیب را در تثبیت مسیر جاده‌ها و احداث بزرگراه‌ها به کار گرفت [۱]. در طول سالهای ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۰ تحقیقاتی برروی فاکتورهای مؤثر خاک بهبود یافته متراکم شده در بستر راه‌ها انجام گرفت [۲]. چهار فاکتور کنترل کننده بنیادی جهت طراحی و ساخت خاک سیمان عبارت‌اند از درصد رطوبت، شیوه و زمان عمل آوری، تراکم و میزان سیمان. این فاکتورها قبل از ساخت به‌وسیله عملیات آزمایشگاهی بر روی نمونه تعیین می‌شود. سیمنتاسیون به معنای عام آن سیمانی شدن و چسبیدن است و در استانداردهای AASHTOو ASTM خاک به چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و ایجاد یک توده چسبنده و با مقاومت بیشتر اطلاق می‌شود.

سیمانی شدن مصنوعی به طور معمول در ارتباط با ماسه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ زیرا مصالح درشت‌تر مانند شن و ماسه‌های درشت دانه، نیازمند به بهسازی نیستند و اغلب خصوصیات ژئوتکنیکی مطلوبی دارند؛ به همین منظور، جهت بهسازی خاک با استفاده از سیمانی شدن مصنوعی آن، محققین بیشترین توجه را به ماسه‌ها و مصالح ریزدانه معطوف داشته‌اند [۳]. پس از اضافه شدن سیمان به خاک واکنش‌های مختلفی بین خاک و سیمان صورت می‌گیرد. مهم‌ترین این واکنش‌ها واکنش جانشینی یون‌های مثبت و واکنش تجمع-تراکم است .در این دو واکنش بافت خاک با تجمع ذرات درکنار یکدیگر و به نوعی دانه بندی آن تغییر می‌کند و مقاومت توده افزایش می‌یابد .هرچه ذرات سیمان ریزتر باشند هیدراتاسیون بیشتر و برای مدت طولانی‌تر حتی تا سالیان دراز انجام می‌شود و این امر به افزایش مقاومت ترکیب سیمانی با زمان می‌گردد [۴]. برخی کاربردهای ترکیبات خاک سیمان یا خاکهای تثبیت شده با سیمان شامل محافظت از شیب کانال‌ها، استفاده به عنوان لایه اساسی در پی‌های ایستگاه‌های پمپاژ، حفاظت بستر و کناره رودخانه‌ها از فرسایش جانبی و به عنوان ماده‌های با نفوذپذیری کم برای کف مخازن و دریاچه‌ها و تصفیه خانه‌ها و غیره می‌باشد.

دوپاس و پکر (۱۹۷۹) با مطالعه خواص استاتیکی و مکانیکی ماسه سیمان به منظور بهسازی ماسه و اجتناب از خطر روانگرایی نشان دادند که با افزایش مقدار ماده سیمانی کننده بر چسبندگی خاک افزوده می‌شود و افزودن ۵ درصد سیمان پرتلند ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسکال چسبندگی در خاک ماسه‌ای به وجود می‌آورد [۵]. کلاف و همکاران (۱۹۸۱) اثر سیمانی شدن مصنوعی و طبیعی را در کالیفرنیا بررسی نمودند. در این تحقیق مقاومت نهایی نمونه‌ها با درصد سیمانی شدن افزایش یافت و با افزایش درجه سیمانی شدن، افزایش حجم درهنگام برش در محدوده کرنش‌های کوچک‌تری ظاهر شد. همچنین تأثیر ماده سیمانی بعد از گسیختگی به صورت چسبندگی باقی ماند و مقاومت کششی ماده سیمانی شده درحدود ۱۰ برابر مقاومت فشاری آزمایش تک محوری گردید [۵]. در سال‌های اخیر برخی بررسی‌های آزمایشگاهی توسط وارتمن و

همکاران (۲۰۰۴) صورت گرفته است که امکان استفاده از شیشه خرد شده را برای بهبود خواص مهندسی ذرات درشت دانه و ماسه‌ای و مواد ساحلی مانند کائولین و ماسه بادی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. مقاومت اصطکاکی ذرات دانه‌ای خاک با افزودن شیشه خردشده به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و افزودن شیشه خرد شده برای بهبود خواص مهندسی سایر مواد ساحلی به صورت یک راهکار پیشنهاد می‌شود [۶].

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین نیز اشاره شد، مدول الاستیسیته خاک یکی از خصوصیات مهندسی خاک است که در پروژه‌های عمرانی تأثیر بسزایی دارد.. معادلات پایه برای تغییر شکل پیوسته در حالت تعادل استاتیکی را می‌توان با استفاده از قانون هوک برای مواد همگن به صورت زیر بیان کرد:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma'_x - \upsilon\sigma'_y - \upsilon\sigma'_z)$$
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(-\upsilon\sigma'_x + \sigma'_y - \upsilon\sigma'_z) \qquad (۱)$$
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(-\upsilon\sigma'_x - \upsilon\sigma'_y + \sigma'_z)$$

معادله (۱) نشان دهنده مولفه‌های تانسور کرنش است که به وسیله کمیت برداری ε بیان می‌شود. رابطه‌های ساختاری در خاک که رفتار خاک را بیان می‌کند، به شکل زیر بیان می‌شود. در رابطهٔ (۱) $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ مولفه‌های تنش نرمال در راستای محورهای x، y و z می‌باشند. در صفحه‌ی تنشی که در آن رابطهٔ $\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = 0$ برقرار باشد، قانون هوک برای یک ماده‌ی راست‌محور به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\upsilon_{xy}\upsilon_{yx}} \begin{bmatrix} E_x & \upsilon_{xy}E_y & 0 \\ \upsilon_{yx}E_x & E_y & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy}(1-\upsilon_{xy}\upsilon_{yx}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

رابطهٔ (۲) را می‌توان به صورت خلاصه در رابطهٔ (۳) بیان نمود.

$$\sigma = M\varepsilon \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳) M، ماتریس صلبیت و سفتی خاک است که بر حسب مدول الاستیسیته ارائه می‌شود. تغییرات مدول الاستیسیته خاک رسی اصلاح شده به کمک سیمان در شرایط اشباع و در تراکم‌های ۸۵، ۹۵ و ۱۰۰ درصد در این تحقیق بررسی شد. این مطالعه در آزمایشگاه تحقیقاتی مکانیک خاک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. نمونه خاک رسی مورد مطالعه از محل یکی از منابع قرضه استان خوزستان که در پروژه‌های عمرانی متعدد از آن استفاده می‌شود تهیه گردید. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده مطابق با استانداردهای موجود تعیین شد که نتایج آن در جدول (۱) به صورت طبقه بندی شده ارائه شده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول (۱) مشخص گردید که خاک این منبع قرضه به لحاظ خصوصیات ژئوتکنیکی دچار ضعف‌هایی می‌باشد.

درصد اختلاط خاک با سیمان ۱۰ درصد انتخاب گردید. لازم به ذکر است درصد انتخاب شده برای اختلاط سیمان با خاک رسی بر اساس درجه تخلخل خاک تثبیت شده بود. برای اینکه بتوان تأثیر افزایش سیمان، تغییرات رطوبت و مقادیر مختلف تراکم را در

تغییرات مدول الاستیسیته مشاهده نمود، حالتی از خاک بدون هیچگونه اضافه نمودن مواد اصلاحی در رطوبت‌های مورد نظر ساخته و مورد آزمایش تک محوری قرار گرفت. این حالت به عنوان شاهد مبنای مقایسه و تحت آزمایش تک محوری قرار گرفت.

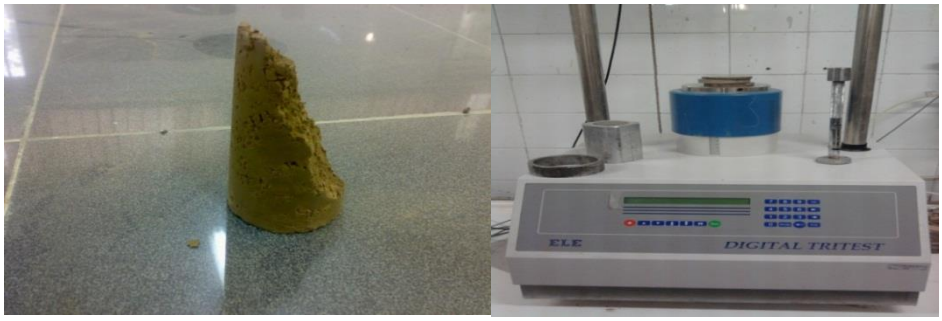
جدول ۱- خصوصیات مهندسی خاک مورد استفاده

مدول الاستیسیته KN/m^2	مقاومت فشاری محدود نشده KN/m^2	رده‌بندی AASHTO	رده‌بندی USCS	حد خمیری PL	حد روانی LL	درصد ماسه	درصد لای	درصد رس	مشخصات
۸۰۰	٤٨	A-6	CL	۲۰/٤٤	۳۱/۹	٦	۷۱	۲۲	مقادیر

برخی از نتایج جدول (۱) برگرفته از مطالعات و تحقیقاتی است که توسط دریایی (۱۳۸۸) انجام شده است [۱۲]. توجه به ارقام مندرج در جدول (۱) مشخص می کند که خاک مورد استفاده دارای مدول الاستیسیته نسبتاً پایینی (حدود ۰/۸ مگاپاسکال) است و از این رو در فعالیت‌هایی که نیاز به تغییر شکل کمی در خاک است چندان مناسب نیست؛ لذا، در این تحقیق سعی بر این است که با افزایش سیمان و افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار این پارامتر افزایش داد. جهت تهیه نمونه‌ها برای انجام آزمایش تک‌محوری و محاسبهٔ مدول الاستیسیته خاک سیمان، ابتدا در هر نسبت اختلاط آزمایش پروکتور استاندارد جهت تعیین وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه انجام شد. آزمایش تراکم به روش پروکتور استاندارد، مطابق با استاندارد ASTM D698 صورت گرفت. نگهداری از نمونه ها باید طوری انجام می‌گرفت تا عمل آوری در شرایط رطوبت بهینه انجام شود.. این آزمایش در مقایسه با آزمایش‌های دیگر مقاومتی خاک یک آزمایش ساده و سریع محسوب می‌شود. ابعاد نمونه باید طوری انتخاب شود که بزرگ‌ترین سایز دانه‌ها در نمونه حداکثر از ۰/۱۶ کوچک‌ترین بعد قالب کمتر باشد. همچنین قطر و ارتفاع نمونه نباید به ترتیب از ۳/۲cm و ۶/۹ کمتر باشد. نسبت قطر به ارتفاع نمونه نیز کمتر از ۰/۳۳ تا ۰/۵ توصیه می‌شود؛ به این علت که اگر بیشتر از این مقدار باشد، باعث ایجاد کمانش و خاصیت ستونی در خاک شده و این امر مقاومت خاک را کمتر از واقعیت پیش بینی می‌نماید(ASTM D5102) .

سرعت بارگذاری در آزمایش فشاری ساده از نوع کنترل کرنش در محدوده ۰/۵ میلی متر تا ۲ میلی متر در دقیقه می‌باشد. نتیجه حاصل از این آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (q_u) می‌باشد. برای نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، استاندارد ASTM D1633 دو نوع قالب استوانه ای با نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵ یا ۲ را برای انجام آزمایش مقاومت فشاری پیشنهاد داده که در این پژوهش از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ استفاده شده است، یعنی نسبت ارتفاع به قطر ۲ می‌باشد. شکل (۱)وسایل مورد استفاده جهت تهیه نمونه و شکل (۲) نمونه‌ای از استوانه‌های خاک سیمان آزمایش شده را نمایش می‌دهد.

شکل ۱- قالب و چکش جهت تهیه نمونه‌ها شکل (۲) نمونه شکسته شده سیمان



شکل ۲- وسایل ساخت نمونه و آزمایش تک محوری شکل (٤) نمونه شکسته شده رسی در ۱۰۰ درصد تراکم

بعد از اندازه‌گیری وزن واحد حجم خشک ماکزیمم، به کمک آزمایش پرکتور استاندارد، وزن واحد حجم مرطوب برای هر نسبت اختلاط تعیین شد (ابن جلال و شفاعی ،۱۳۷۱) [۹]. نتایج حاصل از آزمایش پروکتور استاندارد برای خاک رسی و خاک رسی سیمان در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- نتایج آزمایش پروکتور استاندارد برای خاک‌های رسی و رسی سیمان

رطوبت بهینه تراکم ω_{opt} بر حسب درصد	جرم مخصوص خشک آزمایشگاهی $(\rho_d)_{\max}$ برحسب kg/m3	نوع خاک
۱۷	۱۸۲۸	خاک رس
۱۹	۱۷۳۸	خاک رس سیمان

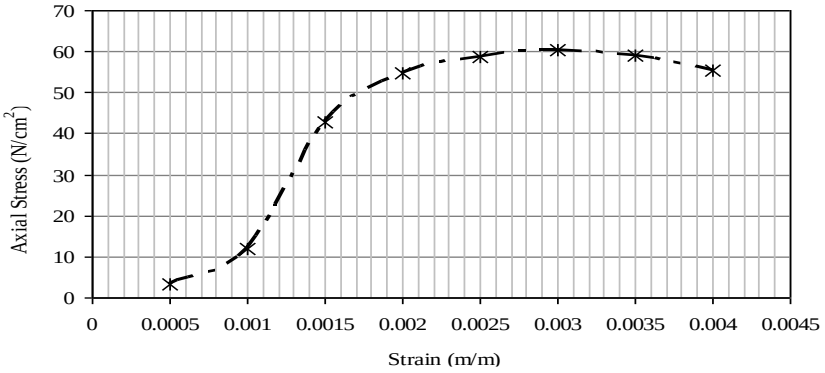
براساس اعداد مندرج در جدول (۲) با افزایش میزان ماسه، جرم واحد حجم مخصوص خاک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است. با توجه به قالب نشان داده شده در شکل (۱)، حجم قالب تعیین شده و با استفاده از وزن واحد حجم به دست آمده برای هر نسبت اختلاط، مقدار مخلوط خاک که برای تهیه هر نمونه باید در قالب ریخته و کوبیده شود برآورد گردید. بر اساس آزمایش پروکتور استاندارد انجام شده، نمونه‌ها در سه لایه کوبیده شدند. از این رو، این مقدار رس- سیمان که باید در استوانه ساخت نمونه برای انجام آزمایش مقاومت محوری درون نمونه ریخته شود، به سه قسمت مساوی تقسیم گردید و در هر

مرحله یک قسمت درون قالب متراکم می‌گردید. بدین صورت که ابتدا یک سوم وزنی از خاک نمونه اختلاط مورد نظر درون استوانه ریخته شده، سپس با استفاده از چکش طراحی شده و با کمک دستگاه آزمایش سه محوری، هر لایه با دور ثابت ۱/۵ میلیمتر در دقیقه تا حدی که یک سوم از حجم قالب تراکم را پر کند، متراکم گردید. سپس لایه‌های دو و سه نیز به همین ترتیب متراکم شدند. سپس نمونه‌ها در دستگاه بخار قرار داره شده‌اند که با ورود مقدار مشخصی بخار آب سرد، فضای قرار گیری نمونه‌ها را به صورت اشباع حفظ می‌کرد. برای جلوگیری از هر گونه خطا در اندازه‌گیری‌های انجام شده، از هر استوانه خاک سه نمونه تهیه و هر سه مورد آزمایش تک محوری قرار گرفت و نتایج به صورت میانگیری شده ارائه گردید. از جمله مشکلات آزمایشگاهی در این مرحله چسبیدن نمونه خاک به دیواره لایه داخلی استوانه بود، به طوری که امکان خارج کردن نمونه به صورت سالم میسر نبود. برای حل این مشکل از یک طلق بسیار نازک در لایه داخلی استوانه استفاده شد. البته در اینجا باید اضافه نمود که در طرح اولیه این تحقیق تراکم ۱۱۰ درصد نیز مورد توجه بود، ولی در حین آزمایش‌ها به دلیل اینکه برای همه نمونه‌ها امکان ایجاد این چنین تراکمی میسر نبود و به دلیل همگن سازی آزمایش‌ها، این تراکم به صورت کامل از تحقیقات حذف گردید. در حین انجام آزمایش‌ها تغییرات طول نمونه به ازای هر ۰/۲ میلیمتر و نیروی متناظر آن ثبت شد. نمونه نتایج برای خاک رس–سیمان در تراکم ۸۵ درصد و در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- نمونه نتایج آزمایش خاک سیمان ۲۸ روزه با تراکم ۸۵ درصد

تنش (N/cm2)	سطح مقطع (cm2)	نیرو (N)	کرنش (m/m)
۱/۵۲	۱۹/۶۲	۲۹/۹۳	۰/۰۰۰۵
۳/۹۲	۱۹/۶۱	۷۶/۹۸	۰/۰۰۱
۷/۲۲	۱۹/۶	۱۴۱/۵۶	۰/۰۰۱۵
۱۱/۶۴	۱۹/۵۹	۲۲۸	۰/۰۰۲
۱۸/۳۴	۱۹/۵۸	۳۵۹/۳	۰/۰۰۲۵
۳۲/۶۱	۱۹/۵۷	۶۳۸/۴	۰/۰۰۳
۷۷/۹۴	۱۹/۵۶	۱۵۲۴	۰/۰۰۳۵
۱۱۴/۸۱	۱۹/۵۵	۲۲۴۴	۰/۰۰٤
۱۸۷/۱۷	۱۹/۵۴	۳۶۵۸	۰/۰۰٤۵

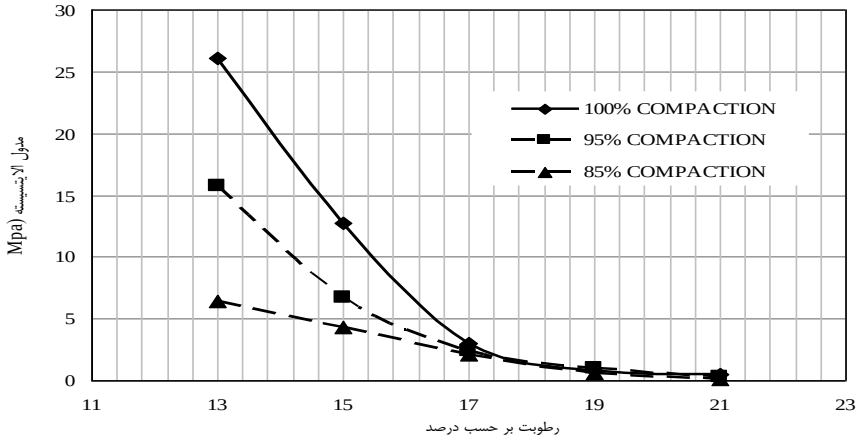
برای کلیه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، محاسبات و اندازه‌گیری‌هایی همانند آنچه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، انجام شد. در کلیه اندازه‌گیری‌ها در نهایت منحنی‌های تنش کرنش مربوطه استخراج شد. برای هر نمونه یک نمودار تنش- کرنش به صورت شکل (۵) ترسیم شد که از طریق شیب نمودار تا نقطه حداکثر مدول الاستیسیته ماکزیمم محاسبه شد.



شکل ۵- تغییرات تنش کرنش برای رس سیمان ۷ روزه با تراکم ۸۵ درصد (با سیمان ۱۰ درصد)

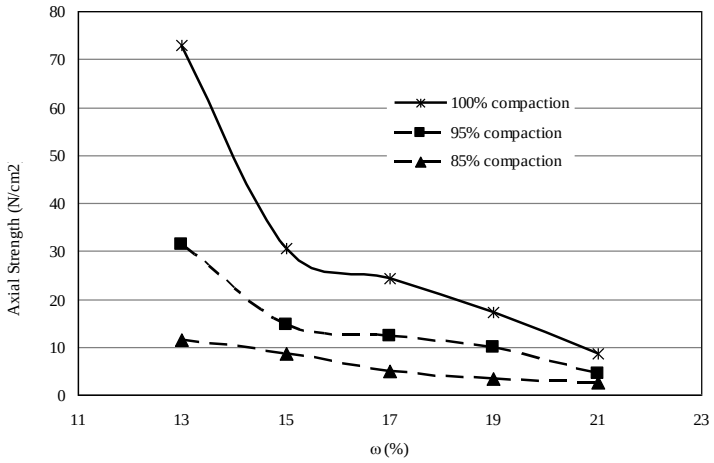
نتایج و بحث

شکل (۶) تغییرات مدول الاستیسیته خاک رسی را در تراکم‌های مختلف نشان می‌دهد. در رطوبت بهینه شکستگی در شکل‌ها مشاهده شده که پس از آن شیب نمودار کاهش می‌یابد. نکتهٔ قابل توجه این است که در رطوبت بهینه، مقادیر مدول الاستیسیته هر سه تراکم تقریباً برابر می‌شود و پس از رطوبت بهینه کلیه نمودارها بر هم منطبق می‌شوند. به عبارت دیگر در رطوبت بهینه و بیشتر از آن مقادیر مدول الاستیسیته تابعی از تراکم نمی‌باشد. دلیل این پدیده را می‌توان در نمودار تراکم جستجو نمود؛ زیرا، در رطوبت‌های بیش از رطوبت بهینه، آب واقع در بین ذرات خاک از قابلیت تراکم پذیری خاک کاسته و تنش‌های وارده نه تنها به ذرات خاک بلکه به آب بین ذره‌ای نیز وارد می‌شود. به همین علت در توده خاک با رطوبت‌های بیشتر تاثیری در مدول الاستیسیته خاک ندارد.



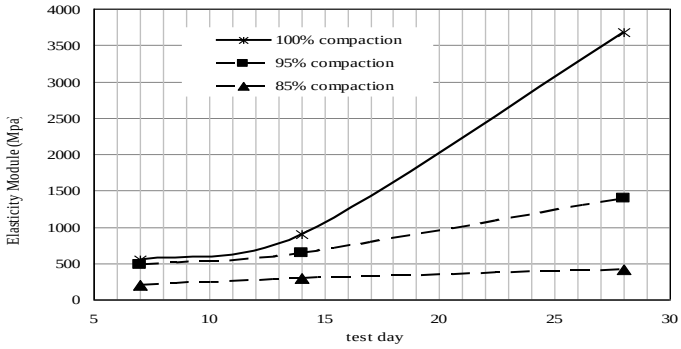
شکل ٦- تغییرات مدول الاستیسیته در مقابل رطوبت در تراکم‌های مختلف برای خاک رسی

شکل (۷) مقاومت فشاری خاک در مقابل رطوبت در تراکم‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۷) ملاحظه می‌شود که با افزایش رطوبت مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. برای تراکم ۱۰۰ درصد مقاومت فشاری رطوبت ۱۳ درصد، ۸/۵۲ برابر مقدار آن در رطوبت ۲۱ درصد است؛ این مقدار برای تراکم ۸۵ درصد ۴/۵۲ برابر است. با افزایش رطوبت نمودارها به یکدیگر نزدیک شده، به طوری‌که، در رطوبت ۲۱ درصد اختلاف مقادیر آن‌ها به حداقل خود می‌رسد.



شکل ۷- مقاومت فشاری خاک در تراکم‌های مختلف

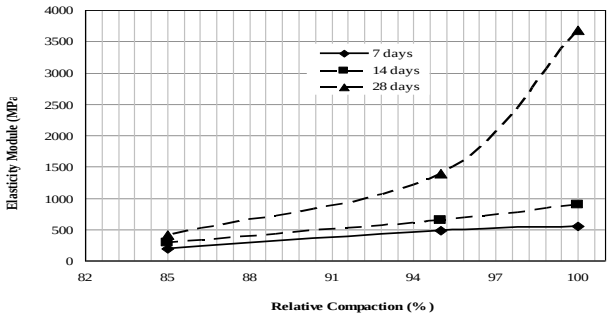
همان‌گونه که در بخش‌های گذشته به آن اشاره شد، این تحقیق در سه تراکم و در خاک رس سیمان انجام شد. شکل‌های (۸) الی (۱۰) به ترتیب نتایج حاصل از تغییرات مدول الاستیسیته را برای حالت‌های مختلف خاک رس سیمان در تراکم‌های ۸۵، ۹۵ و ۱۰۰ درصد تراکم حالت ماکزیمم را نشان می‌دهد. شکل (۸) تغییرات مدول الاستیسیته رس سیمان را با مدت زمان نگهداری در شرایط اشباع نشان می‌دهد. مشخص است که مدول الاستیسیته با افزایش زمان ماندگاری سیمان افزایش می‌یابد. اما نکته قابل توجه این است که هرچه تراکم بیشتر باشد، شدت افزایش هم بیشتر می‌گردد. شیب نمودار در فاصله ۷ تا ۱۴ روز برای تراکم ۱۰۰ به ترتیب ۲/۱ و ۳/۸ برابر شیب در ۹۵ و ۸۵ درصد تراکم است. این شیب در فاصله ۱۴ تا ۲۸ به ترتیب ۳/۷ و ۲۲/۲ برابر است. پس با افزایش تراکم هم مدول الاستیسیته و هم شدت افزایش آن افرایش می‌یابد.



شکل ۸- تغییرات مدول الاستیسیته خاک رس-سیمان در مدت زمان عمل آوری

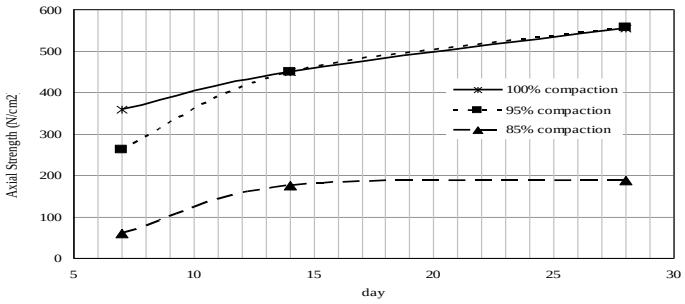
در این اشکال مشاهده می‌گردد که افزایش سیمان به خاک گرچه موجب افزایش مقاومت نمونه نسبت به خاک طبیعی می‌شود. لیکن در نمونه‌ها حالت شکنندگی (brittle) ایجاد می‌شود. به طوری که نمونه‌ها در آزمایش تک محوری تحت کرنش کمتری نسبت به خاک طبیعی به حالت گسیختگی می‌رسند.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقاومت خاک و سیمان به درصد سیمان و زمان عمل آوری بستگی دارد. تأثیر سیمان در افزایش مقاموت خاک را می‌توان در ارتباط با کاهش پلاستیسیته و سیمانی شدن توده خاک دانست. هنگامی که یک خاک چسبنده با درصد مشخصی از سیمان مخلوط گردد، تحت عمل هیدراسیون، یون‌های کلسیم آزاد می‌گردد، این عمل باعث تغییر میدان الکتریکی اطراف ذره رس می‌شود که موجب دانه‌ای شدن ذرات خاک و کاهش پلاستیسیته می‌گردد که این امر خود موجب افزایش مقاومت نمونه شده است. عمل هیدراسیون یک فرآیند زمان بر است که به تدریج انجام می‌شود و حتی تا سال‌ها ادامه پیدا می‌کند و با گذشت زمان خاک بیشتر سیمانی‌شدن شده و طبیعتاً مدول الاستیسیته آن بیشتر می‌شود که به خوبی شکل (۸) را توجیه می‌کند. شکل (۹) زیر تغییرات مدول الاستیسیته رس سیمان را با تراکم برای یک زمان مشخص نشان می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد با افزایش تراکم مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. برای زمان‌های ۷ و ۱۴ روز شدت افزایش مدول الاستیسیته به نسبت ۲۸ روزه به شدت کمتر است. شیب نمودار برای زمان ۲۸ روزه به ترتیب ۵/۴ و ۹/۳ برابر زمان ۱۴ و ۷ روزه است. این بدین معنی است که افزایش تراکم علاوه بر کاهش خلل و فرج و افزایش قفل بست بین ذرات خاک، باعث افزایش خاصیت سمنته کردن سیمان می‌شود.



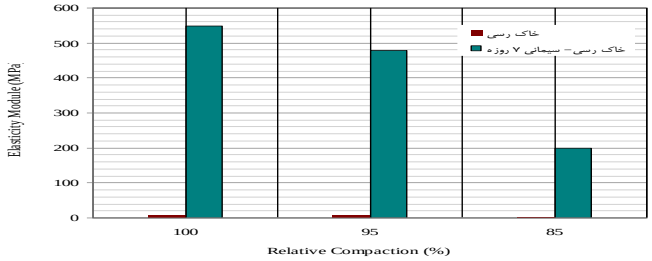
شکل ۹- گرادیان تغییرات مدول الاستیسیته رس-سیمان نسبت به زمان (مدت زمان عمل آوری)

شکل (۱۰) تغییرات مقاومت فشاری رس سیمان را با روز برای تراکم‌های مختلف نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش زمان مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، دلیل این امر را مبتوان به طور مشابه افزایش مدول الاستیسیته توجیه کرد، با گذشت زمان هیدراسیون بیشتری انجام می‌شود و ذرات بیشتر سیمانی شده و مقاومت خاک هم افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که شیب نمودار در فاصله ۷ تا ۱۴ روز بیشتر از ۱۴ تا ۲۸ روز است. این بدین معنی است که در هفته اول افزایش مقاومت فشاری به علت اضافه کردن سیمان شدت بیشتری دارد که به تدریج از شدت آن کاسته می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که مقاومت فشاری در زمان‌های نسبتاً طولانی برای تراکم‌های ۹۵ و ۱۰۰ درصد تقریباً مقادیر یکسانی را دارا می‌باشد. این بدین معنی است تراکم ۹۵ درصد برای مخلوط رس سیمان با توجه به مسائل اقتصادی پروژه، تراکم مناسب‌تری را به دست می‌دهد.



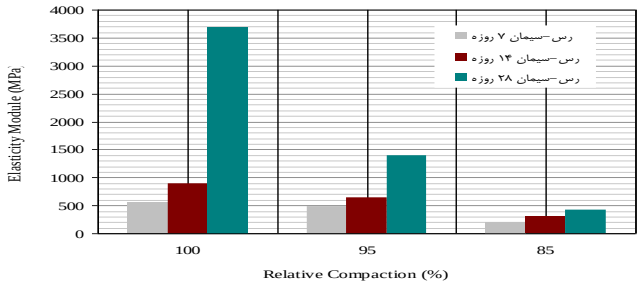
شکل ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری رس- سیمان با روز برای تراکم‌های مختلف

شکل (۱۱) مقایسه مدول الاستیسیته رس در برابر رس–سیمان ۷ روزه را به صورت ستونی نشان می‌دهد. مشخص است که مدول الاستیسیته به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. این افزایش به طور متوسط برای تراکم ۱۰۰، ۹۵ و ۸۵ درصد به ترتیب ۶۳،۹۱ و ۷۳ برابر شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که اضافه کردن سیمان به خاک رس حتی بعد از مدت زمان اندک باعث افزایش زیاد مدول الاستیسیته خواهد شد. نکته جالب دیگر اینکه تراکم ۹۵ درصد باعث بیشترین افزایش مدول الاستیسیته رس سیمان به نسبت رس می‌شود. اما مدول الاستیسیته نهایی تراکم ۱۰۰ درصد بیشتر از ۹۵ درصد است. این به دلیل است که در تراکم ۱۰۰ درصد قفل بست بیشتری بین ذرات وجود دارد و تأثیر سیمانی شدن را افزایش می‌دهد.



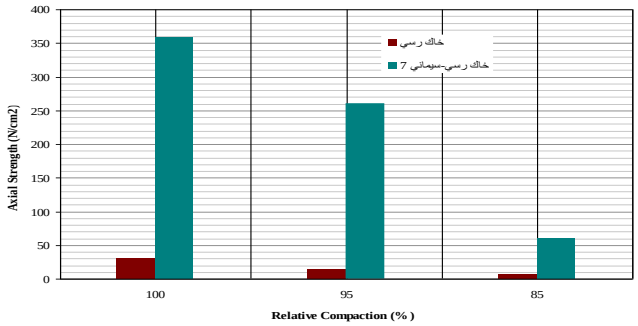
شکل ۱۱- مقایسه مدول الاستیسیته رس در برابر رس–سیمان ۷ روزه

با توجه به شکل (۱۱) شکل (۱۲) تغییرات مدول الاستیسیته را برای رس سیمان به صورت نمودار ستونی برای زمان و تراکم مختلف نشان می‌دهد. افزایش مدول الاستیسیته رس سیمان به نسبت رس در تراکم ۱۰۰ درصد برای زمان ۱۴ و ۲۸ روزه نسبت به زمان ۷ روزه به ترتیب ۱۰۳ و ۴۲۷ برابر است. که نشان می‌دهد که سیمان چه تأثیر چشم گیری در افزایش مدول الاستیسیته رس دارد و همچنین زمان سپری شده برای سیمان حتی اگر کوتاه باشد تا چند برابر مدول الاستیسیته را افزایش می‌دهد.



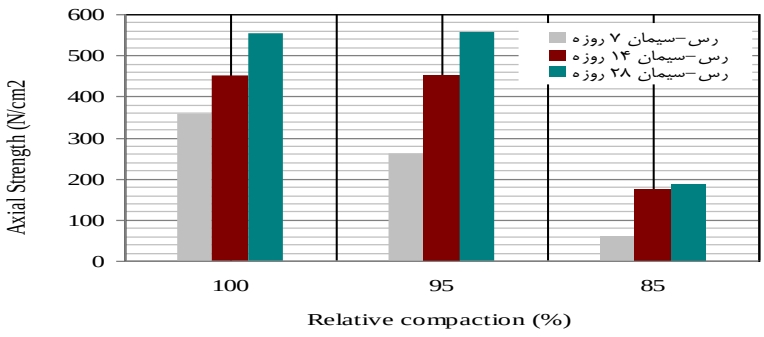
شکل۱۲- نمودار ستونی مدول الاستیسیته برای رس-سیمان

شکل (۱۳) شکل ستونی مقاومت فشاری رس در برابر رس سیمان ۷ روزه را نشان می‌دهد. مشخص است که مقاومت فشاری به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. مقدار مقاومت فشاری در رس سیمان ۷ روزه نسبت به رس برای تراکم‌های ۱۰۰، ۹۵ و ۸۵ درصد به ترتیب ۱۲، ۱۸ و ۱۰ برابر شده است. نکته دیگر این است که در تراکم ۹۵ درصد افزایش مقاومت فشاری رس به دلیل اضافه کردن سیمان بیشتر است. در نتیجه تراکم ۹۵ درصد برای مخلوط رس سیمان تراکم مناسب‌تری است.



شکل ۱۳- نمودار ستونی مقاومت فشاری رس در برابر رس-سیمان ۷ روزه

با توجه به شکل (۱۳) و مقایسه مقاومت فشاری رس و رس سیمان، نمودار ستونی شکل (۱۴) تصویر بهتری از افزایش مقاومت فشاری رس سیمان را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری رس سیمان در زمان ۲۸ روز و تراکم ۱۰۰ درصد نسبت به ۱۴ روز و ۷ روز به ترتیب ۱/۲۲ و ۱/۵۴ برابر شده است. که نشان می‌دهد که زمان تأثیر چشم گیری در افزایش مقاومت فشاری ندارد.



شکل۱۴- نمودار ستونی مقاومت فشاری رس-سیمان

با توجه به نتایج شکل (۱۴) مقادیر مقاومت محوری در تراکم ۹۵ درصد در زمان ۲۸ روز نسبت به زمان‌های ۱۴ و ۷ به ترتیب ۱/۲۴ و ۲/۱۵ برابر است و برای ۸۵ درصد ۱/۰۵ و ۳ برابر است که نشان می‌دهد که هرچه تراکم کمتر باشد تأثیر سیمان بر افزایش مقاومت به خصوص در هفته اول بیشتر است که دلیل آن این است که خاک نسبت پوکی بالاتری دارد و سمنته شدن در خلل و فرج با سادگی بیشتری انجام می‌شود.

نتیجه گیری

بر اساس آنچه که دراین تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج حاصل از آن در بندهای زیر خلاصه شده است:

مدول الاستیسیته با افزایش زمان ماندگاری سیمان افزایش می‌یابد. هرچه تراکم نمونه بیشتر باشد، این شدت افزایش هم بیشتر است.

شیب نمودار مدول الاستیسیته در فاصله ۷ تا ۱۴ روز برای تراکم ۱۰۰ به ترتیب ۲/۱ و ۳/۸ برابر شیب در ۹۵ و ۸۵ درصد تراکم است.

با افزایش تراکم هم مدول الاستیسیته و هم شدت افزایش آن افرایش می‌یابد.

در خاک‌های رسی در رطوبت بهینه و بیشتر از آن مقادیر مدول الاستیسیته تابعی از تراکم نمی‌باشد.

افزایش سیمان به خاک گرچه موجب افزایش مقاومت نمونه نسبت به خاک طبیعی می‌شود. لیکن در نمونه‌ها حالت شکنندگی (brittle) ایجاد می‌شود. به طوری که نمونه‌ها در آزمایش تک محوری تحت کرنش کمتری نسبت به خاک طبیعی به حالت گسیختگی می‌رسند.

افزایش تراکم تأثیر بسیار زیادی در افزایش مقاومت محوری دارد. این موضوع به طور متوسط در کلیه رطوبت‌ها حدود ۵ برابر می‌باشد. یعنی با افزایش تراکم از ۸۵ به ۱۰۰ درصد مقاومت محوری خاک پنج برابر افزایش می‌یابد.

تأثیر افزایش تراکم در مقاومت محوری در رطوبت‌های کم بیشتر است، به طوری که در رطوبت ۱۳ درصد از تراکم ۸۵ به ۱۰۰ درصد، مقاومت فشاری ۶/۳ برابر می‌شود؛ اما، در رطوبت ۲۱ درصد این مقدار ۴ برابر می‌شود. در تراکم ۸۵ درصد نمودارها به هم نزدیک می‌شوند، این بدین معنی است که در تراکم ۸۵ درصد از تأثیر تغییرات رطوبت بر مقاومت فشاری کاسته می‌شود.

در تراکم ۱۰۰ درصد قفل بست ذرات کاملی بین ذرات رخ داده که با اعمال تنش ذرات به راحتی روی یکدیگر لغزیده و تغییر شکل آنی در خاک به وجود می‌آورد و در تراکم ۸۵ درصد اعمال تنش اولیه باعث افزایش قفل و بست بین ذرات شده و تنش‌های بیشتر باعث می‌شود که ذرات به صورت دفعتی بر روی یکدیگر بلغزند و تغییر شکل زیادی را ایجاد نمایند

با اضافه کردن سیمان مدول الاستیسیته به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. این افزایش به طور متوسط برای تراکم ۱۰۰، ۹۵ و ۸۵ درصد به ترتیب ۶۳،۹۱ و ۷۳ برابر شده است.

افزایش مدول الاستیسیته رس سیمان به نسبت رس در تراکم ۱۰۰ درصد برای زمان ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۱۰۳ و ۴۲۷ برابر است.

منابع

1. Baxter, C. D. P., King, J. W., Silva, A. J., Page, M., and Calabretta, V. V._(2008)_. “Site characterization of dredged sediments and evaluation of beneficial uses.” Recycled materials in geotechnics, A. H. Aydilek and J. Wartman, eds., ASCE, New York, 150–161.

2. Ingles, O. G. and Metcalf, J. B. (1972). “Soil Stabilization Principle and Practice”. Butterworth’s,. Melbourne, Australia.
3. Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. and Rad, N. S. (1981) “Cemented sands under static loading”, Journal of Geotech. Engrg. Div., ASCE, 107(6), 799–817.
4. Coduto, P.D., (2003), “Geotechnical Engineering”- Principles and practices, Prentice Hall Inc. of India, 759p.
5. Dupas, J.; Pecker, A. (1979) "Static and dynamic properties of sand-cement". Journal of Geotechnical Engineering, 105(3), 419-436.
6. Wartman, J., D. G. Grubb, and A. S. M. Nasim. (2004). Select engineering characteristics of crushed glass.
7. Kumar,A,B.S., Walia and A.Bajaj, (2007)., “Influence of fly Ash, Lime, And polyester Fibers on Compaction and Strength Properties Soil.”,journal of Materials in Civil Engineering, vol.19 No 3, pp 242-248.
8. Osinubi,K.J., and Charles M.O.Nwaiwu, (2006), “Compaction Delay Effects of properties of Lime-Treated Soil”,2006,journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18,No.2, 22. pp. 250-258.
9. Osinubi,K.J, (2006)., “Influence of Compactive Efforts on Lime-Slag Treated Tropical Black Clay.”,Journal of materials in Civil Engineering., vol. 18.No.2, pp.175-181.
10. De’an Sun *, Wenjing Sun, Li Xiang (2010). "Effect of degree of saturation on mechanical behavior of unsaturated soils and its elastoplastic simulation." Journal of Computers and Geotechnics vol. 37, Issue 5, July 2010, pp 678-688.
۱۱. ابن جلال، ر. و شفاعی بجستان. م.، (۱۳۷۱). "اصول نظری و عملی مکانیک خاک "، انتشارات. دانشگاه شهید چمران اهواز.۷۲۴ صفحه.
۱۲. دریایی. م، (۱۳۸۸)، "بررسی تأثیر افزایش ماسه در مقاومت مخلوط خاک- آهک در زیرسازی سازه‌های‌آبی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۵ صفحه.
۱۳. رحیمی. ح.، (۱۳۷۹)، "مسائل احداث کانال‌های آبیاری در خاک‌های متعارف." کمیتهٔ ملی آبیاری و زهکشی ایران، مجموعه مقالات کارگاه فنی: ساخت کانال‌های آبیاری، محدودیت‌ها و راه‌حل‌ها، نشریه شماره ۳۹. ص ۱۲۸ الی ۱۶۴.