

ارزیابی وضعیت مقاومت صحرایی و آزمایشگاهی برای اختلاط عمیق رس-سیمان و رس-آهک

داود جلالوند^۱، جهانگیر خزایی^{۲*}، یزدان شمس ملکی^۳

۱- دانش آموخته دکتری تخصصی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، ایران

چکیده

در این مطالعه نتایج مقاومت ستون های اختلاط عمیق و حجیم خاک-چسباننده مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، نمونه های متعدد صحرایی و آزمایشگاهی استوانه ای شکل به طول ۲۰ cm و قطر ۱۰ cm، حاصل اختلاط خاک - سیمان و خاک - آهک عمل آوری شده در دما و رطوبت محیط های آزمایشگاهی و صحرایی، تحت آزمون های بارگذاری تک محوری محصورنشده قرار گرفته اند. مخلوط های وزنی مختلف خاک-چسباننده با حداقل ۶٪ و حداکثر ۱۴٪ وزنی مواد چسباننده تهیه شده اند. همچنین، اختلاط عمیق و حجیم خاک در مقیاس صحرایی در خاک رسی لاغر CL به کمک دستگاه اختلاط-حفار ساخته شده در جریان انجام این پژوهش، اجرا شده است. علاوه بر نمونه های استوانه ای آزمایشگاهی، از چاهک های اختلاط حجیم در دو چیدمان خطی (تکی) و ساعتی (گروهی) نیز نمونه های استوانه ای برداشت شده و در آزمایشگاه تحت بارگذاری تک محوری تا لحظه شکست قرار گرفته اند. نتیجه کلی این مطالعه، پیشنهاد ضرایب تبدیل مقاومت نمونه آزمایشگاهی به صحرایی و بالعکس، در شرایط یکسان هندسی ساخت و نوع مصالح انتخابی و شرایط متفاوت محیطی عمل آوری نمونه ها است.

کلمات کلیدی

اختلاط عمیق، خاک-سیمان، خاک-آهک، نمونه صحرایی، نمونه آزمایشگاهی، مقاومت.

۱- مقدمه

اختلاط عمیق یکی از روش های پر کاربرد و مقرون به صرفه، جهت بهسازی خاک های ضعیف و مساله دار است. مصالح اختلاط شامل خاک و چسباننده های مختلفی همانند سیمان و آهک است، که خوشبختانه به وفور یافت می شود. خاک های مختلفی همانند خاک های چسبنده رسی یا خاک های دانه ای توسط این روش به خوبی بهسازی می شوند. جهت پیشبرد بهتر مراحل کار، نیاز به بررسی و شناخت عوامل موثر بر فرآیند اختلاط عمیق است، که این امر مستلزم مطالعه مقالات و پژوهش های پژوهشگران مختلف، پیرامون این موضوع است. لذا استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی و تجربی و نرم افزاری [۱] بسیار حائز اهمیت است و می تواند به عنوان خط مشی اساسی انجام پژوهش حاضر باشد. بر این اساس، در ادامه شرح یافته های تحقیقات مرتبط در پژوهش های پیشین ارائه شده است. برای مثال، نتایج مطالعه بنان شو^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد بکاربردن تیغه منحنی، تاثیر کامل و خوبی در شمع های اختلاط عمیق دارد. یعنی زاویه ۳۰ درجه تیغه منحنی تاثیر زیادی بر همگنی دارد و ۴ مرتبه تکرار اختلاط نیز، بهترین تعداد چرخش است [۲]. رفتار تنش-کرنش دپوهای خاک دریایی هنگ کنگ که توسط سیمان پایدار شده اند، توسط هو^۳ و همکاران (۲۰۲۱) [۳] به کمک انجام تعداد ۳۸ آزمایش مقاومت تک محوری UCS و سه محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده CU مطالعه شده است [۳]. همچنین کوانگ^۴ و

*نویسنده عهده دار مکاتبات: j.khazaie@razi.ac.ir

²Benen Shu et al.

³Ho et al.

⁴Quang et al.

همکاران (۲۰۲۰) تحقیقی برای مشخص شدن رفتار مکانیکی خاک های وینه لونغ با افزایش میزان سیمان و مدت عمل آوری انجام دادند [۴]. مشخص شد که مدول ارتجاعی با افزایش مقاومت فشاری تک محوری افزایش می یابد [۴]. سوگانیا^۵ و همکاران (۲۰۲۰) رفتار تراکمی خاک رس ارگانیک کوتاناد اصلاح شده و دست خورده و همچنین رفتار تحکیمی یک بعدی آن را آزمایش کرده اند [۵]. در این مقاله مشخص شد که نسبت آب به سیمان مهمترین پارامتر برای خاک رس اصلاح شده است. نتایج نشان داد که اضافه کردن سیمان تنش تسلیم را افزایش می دهد و تنش های پسا تسلیم با کاهش نسبت آب به سیمان کاهش می یابد. همچنین تغییرات مقدار آب اولیه تأثیری بر روی تنش های تسلیم ندارد [۵].

زکریا^۶ و همکاران (۲۰۲۰) [۶] پایدار سازی رس های نرم محلی مصر با روش اختلاط عمیق با استفاده از سیمان پرتلند معمولی یا آهک را انجام داده اند. نتایج آزمایش ها نشان داد که در ستون های شناور (غیراتکایی) نشست بیشتر و در ستون های با باربری اتکایی، نشست کمتر است [۶]. یاو^۷ و همکاران (۲۰۱۹) ارزیابی مقاومت رس دریایی اصلاح شده با سیمان با نسبت اختلاط، مقدار سیمان، مقدار آب کل و دوره عمل آوری مختلف تو سبب آزمایش تک محوری را بررسی نمودند [۷]. طبق یافته های آنها، با افزایش مدت زمان عمل آوری، مقاومت فشاری افزایش و با افزایش میزان آب، کاهش یافته است [۷]. هنیفی^۸ و همکاران (۲۰۱۷) اثرات اضافه کردن پودر شیشه به دوغاب سیمان در خاک ما سه- رس را ارزیابی کردند. بررسی آزمایشگاهی با استفاده از آزمایش های ویکات، آزمایش تک محوری و آزمایش اولتراسونیک UPV انجام شده است [۸]. برای بررسی از آزمایش ویکات، UCS و UPV استفاده می شود، که در حین انجام مطالعات وزن مخصوص نمونه ها نیز ارزیابی شده و ۳ نمونه نیز از هر ارزیابی آزمایش می شود [۸].

ویسم^۹ و همکاران (۲۰۱۷) مطالعات آزمایشگاهی را بر روی رس های نرم تونس که توسط اختلاط عمیق اصلاح شده بودند، انجام دادند و نتایج نشان داد که زاویه اصطکاک زهکشی شده در زمان بهسازی از ۱۱ به ۳۳ درجه افزایش می یابد. همچنین زاویه اصطکاک زهکشی نشده تحکیم یافته از ۷ به ۱۸ درجه افزایش می یابد. کاهش مقاومت برشی زهکشی نشده از ۱۸۰ به ۷۱ کیلوپاسکال، وقتی نسبت آب به سیمان از ۰/۷ به ۱ افزایش می یابد، ایجاد می شود [۹]. یاو و همکاران (۲۰۱۶) آزمایش مدل فیزیکی بر روی خاک های نرم با ستون های اختلاط عمیق را انجام دادند. اثرات طول ستون، نسبت مساحت جایگزین و سربار بر روی نشست پی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که نشست پی با افزایش طول ستون، زمانی که نسبت مساحت جایگزین و سربار یکسان هستند، کاهش می یابد. آنها دریافتند که استفاده از ستون های بلندتر بهتر از تعداد ستون های بیشتر است [۱۰]. شن^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۳) بررسی های میدانی و آزمایشگاهی را انجام دادند و مطالعات آنها نشان داد که مقاومت برشی رس های اطراف ستون اختلاط عمیق ۸، در دوره کوتاه نصب افزایش می یابد [۱۱]. تحلیل ها نشان داد که چرخش تیغه های اختلاط تأثیر زیادی بر روی فشار آب منفذی اضافی و شکست رس در منطقه اطراف ستون اختلاط دارد [۱۱]. اسماعیلی و خواجه ای (۲۰۱۶) [۱۲] بررسی های آزمایشگاهی را با استفاده از ستون اختلاط عمیق برای مقاوم سازی ماسه سست با تراکم نسبی ۵۰٪ زیر خاکریز انجام دادند [۱۲]. نتایج نشان داد که ۶۴٪ افزایش میزان بار شکست و کاهش ۴۰٪ نشست تاج خاکریز، برای الگوی مربعی وجود دارد و این مقادیر برای الگوی مثلثی به ترتیب ۶۳ و ۱۲ درصد است. نتایج بدست آمده رفتار الگوی مربعی را تایید می کند [۱۲]. وونگلرت^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۵) بررسی هایی را در مورد تأثیر مقاوم سازی های مغزه ستون ها با نمونه های فیزیکی و عددی انجام دادند [۱۳]. حمزه گولو^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۷) از ترکیب پودر شیشه و سیمان به عنوان ماده افزودنی استفاده کردند و در این تحقیق از ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد پودر شیشه برای تقویت خاک نرم با درصد رطوبت های مختلف استفاده شده است [۱۴]. با افزایش میزان پودر شیشه تا ۳٪ میزان مقاومت فشاری افزایش می یابد، ولی برای درصدهای بیشتر از آن، این مقدار کاهش می یابد [۱۴]. یو^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه نتایج مدلسازی تمام عرضی سلولی و سلولی اصلاح شده را انجام داده

⁵ Suganya et al.

⁶ Zakaria et al.

⁷ Yao et al.

⁸ Hanifi et al.

⁹ Wissem et al.

¹⁰ Shen et al.

¹¹ Wonglert et al.

¹² Hamza Gullu et al.

¹³ Yu et al.

اند. جهت مقایسه نتایج کاربرد تحلیل های سه بعدی با راه حل های ارائه شده توسط لاو و همکاران را با استفاده از نرم افزار FLAC مورد استفاده قرار دادند [۱۵]. نتایج نشان داد که مدول ارتجاعی ستون های اختلاط عمیق تاثیر ناچیزی بر روی بارهای کششی دارند، هر چند که ستون های با مدول ارتجاعی بزرگ تر دارای جابجایی های قائم کمتری هستند [۱۵].

لیو^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۷) بررسی هایی را در مورد ارزیابی استاتیکی از مقاومت پیش تحکیمی ترکیب خاک-سیمان تحت فشار محوری در نرم افزار ABAQUS انجام دادند و در این مقاله دو منبع اصلی ناهمگنی در مقاومت فشاری محدود نشده در ستون های خاک-سیمان تحت بارگذاری فشاری بررسی شده است [۱۶]. جامساوانگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۵) بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر جابجایی های جانبی و ضریب ایمنی شیب های پایدار شده با ستون های اختلاط عمیق و ضریب اطمینان را توسط روش های عددی مورد بررسی قرار داده اند [۱۷]. نتایج آنها نشان داد که عمق نفوذ تاثیر چشمگیری بر روی جابجایی های جانبی می گذارد. زمانیکه فاصله ستون ها کمتر از دو برابر قطر ستون ها باشد، پدیده قوس زدگی ایجاد شده و باعث افزایش مقاومت و سختی مصالح می شود [۱۷]. ایگنوت^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۵) پیش بینی بارها و سازوکار گسیختگی و تغییر شکل ها در مدلسازی دو و سه بعدی را مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. نتایج نشان داد که با توجه به فاصله بین ستون ها یا عرض آنها، انطباق خوبی بین پیش بینی بار نهایی در حالت دو بعدی و سه بعدی وجود دارد [۱۸]. همچنین ایبه^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۴) تحقیقاتی را به صورت صحرایی بر روی ترکیب کردن شمع های بتنی در مرکز ستون های اختلاط عمیق انجام دادند و در نهایت متوجه شدند که استفاده از سخت کننده ها باعث کاهش ۲۰ تا ۴۰ درصدی هزینه پروژه می شود [۱۹].

راجا^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۴) [۲۰] تحقیقاتی را بر روی خاک های منبسط شونده برای تهیه راهنمایی برای اختلاط عمیق انجام دادند و پارامترهای گوناگون شامل استفاده از دو نوع خاک، پتانسیل تورم و پلاستیسیته، چهار نوع چسباننده با درصدهای مختلف، سه مقدار مصرف 100 kg/m^3 تا 200 kg/m^3 ، سه نسبت W/C برابر $0/8$ ، $1/0$ ، $1/3$ ، مدت عمل آوری ۷ و ۱۴ روزه، بررسی خاک بدون تورم، فشار تورم، انقباض خطی، مقاومت فشاری محدود نشده و مدول برشی کرنش کوچک را مورد بررسی قرار دادند [۲۰]. که در نهایت مشخص گردید که برای اختلاط عمیق مقدار آب بهینه برابر با حد روانی خاک است. نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی نشان می دهد که پارامترهای مقاومت و سختی بدست آمده از کارهای صحرایی از نتایج کارهای آزمایشگاهی کوچک تر هستند (مقاومت صحرایی حدودا بین ۲۰ تا ۳۳ درصد نتایج آزمایشگاهی است). مطالعات نشان داد که اختلاط عمیق در خاک های منبسط شونده باعث افزایش سختی به میزان ۴۰ تا ۷۰ درصد و افزایش مقاومت خاک ها تا ۸۰٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی می شود [۲۰]. کیویز^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۳) تحقیقاتی را بر روی کارایی و مقاومت بهینه در اختلاط عمیق انجام دادند و در نهایت متوجه شدند که میزان سیمان موجود در توده خاک در بیشتر حالت ها کمتر از ۳۰٪ است [۲۱]. نتایج نشان داد که حد روانی اوج برای کائولینیت و ایلیت برای میزان سیمان در حدود ۶٪ است. راونجانت^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۳) آزمایش های صحرایی را برای تاثیر روش های بهبود ظرفیت باربری ستون های اختلاط عمیق تحت بارگذاری چرخه ای جانبی به همراه مغزه های سخت کننده مرکزی انجام دادند [۲۲]. بر اساس یافته ها، ستون هایی که دارای مغزه فولادی اند، کاهش سختی در آنها با سرعت کمتری اتفاق می افتد و میزان خیز آنها نیز افزایش می یابد، که آنرا می توان به دلیل مدول ارتجاعی بالاتر و جنس همگن در مصالح فولادی دانست [۲۲]. چن^{۲۱} و همکاران (۲۰۱۳) تحقیقاتی را با استفاده از روش صحرایی و مقایسه تک و چند ستون اختلاط همزمان در تونل مترو و با فاصله از تونل، را انجام دادند [۲۳]. براساس نتایج این تحقیق، روش اختلاط عمیق با بالاترین نسبت آب به سیمان و کاهش سرعت اختلاط و بدون تزریق در حین چرخش بایستی اتخاذ شود [۲۳]. بنابر بررسی های جامع انجام شده، تا به حال کمتر به صورت همزمان در خصوص کیفیت نهایی اختلاط عمیق در شرایط آزمایشگاهی و

¹⁴ Liue et al.

¹⁵ Jamsawang et al.

¹⁶ Ignat et al.

¹⁷ Ye et al.

¹⁸ Raja et al.

¹⁹ Kiewicz et al.

²⁰ Raongjant et al.

²¹ Chen et al.

صحرایی نمونه های کوچک- مقیاس و بزرگ- مقیاس بر روی رس لاغر مطالعه شده است. افزون بر اینکه، در این تحقیق شرایط کلی بلندمدت واقعی طرح اختلاط عمیق نیز بر اساس تغییرات پارامترهای مختلفی تعریف شده است. برای مثال زمان های طولانی برای بررسی اثر طول دوره عمل آوری بلند مدت بر نتیجه نهایی اختلاط عمیق خاک- چسباننده در مقیاس صحرایی در شرایط آزمایش ها دخالت داده شده است. بدست آوردن طرح اختلاط یکسان و یکنواخت در مقیاس صحرایی کار بسیار دشواری است و نمونه هایی که در آزمایشگاه تولید می شوند، می توانند شامل کنترل های دقیق تری باشند. افزون بر این ها تلاش بسیار زیادی برای توسعه یک دستگاه اختلاط عمیق- حفار بومی و تهیه ملحقات و ملزومات اجرایی- عملیاتی آن شده است. علیرغم اینکه در ظاهر پژوهش مقاله حاضر مشابه کارهای قبلی است، اما برای توسعه یک دستگاه اختلاط عمیق- حفار بومی و عملیاتی کردن آن (انجام اختلاط های واقعی)، به ویژه تهیه و تدارک ملزومات، اتصالات و ملحقات دستگاه تزریق دوغاب، برداشت نمونه های صحرایی و ... تلاش بسیار زیادی از نظر زمانی- مالی به عمل آمده است. در واقع هدف عمده این مطالعه، طی مسیر و دشواری های عملی کردن یافته های نظری و یا آزمایشگاهی مطرح شده مبحث اختلاط عمیق در آیین نامه ها و مقالات معتبر قبلی است. همچنین بیش از چند صد نمونه در طی بازه زمانی حدود ۳ سال ساخته و آزمایش شده است. از آغاز گستردگی کار و جنبه های عملی پژوهش و بررسی صنعتی فرآیند اختلاط عمیق (صحرایی و آزمایشگاهی) در این مطالعه از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. شناسایی چالش های تجربی پیش روی انجام فرآیند اختلاط عمیق و حجیم صحرایی در قالب آزمون های آزمایشگاهی، هدف مهم دیگر این پژوهش است.

۲- روش انجام تحقیق

در این مطالعه نمونه های استوانه ای شکل تهیه شده در محیط آزمایشگاه و محیط صحرایی تحت آزمون های مقاومت فشاری تک محوری نامحصور قرار گرفته اند. برای ساخت نمونه ها از خاک در محل رس لاغر CL با نسبت آب به چسباننده معادل حد روانی LL خاک استفاده شده است. دو نوع نمونه استوانه آزمایشگاهی و صحرایی تحت آزمون های UCS قرار گرفته اند. آزمون های مقاومت فشاری نامحصور^{۲۲} UCS با سرعت جابه جایی 1mm/min انجام شده است. برای این منظور در شکل ۱ آزمون نمونه میدانی تحت بارگذاری مقاومت فشاری نامحصور و ثبت داده ها توسط ثبت داده نمایش داده شده است. ابعاد نمونه های استوانه ای در تمام مراحل این مطالعه شامل طول ۲۰ cm و قطر ۱۰ cm است. بنابراین نسبت طول به قطر (یعنی $L/D=2$) نمونه حداقل ۲ مورد نیاز استاندارد آزمایش های UCS را برآورده می کنند.



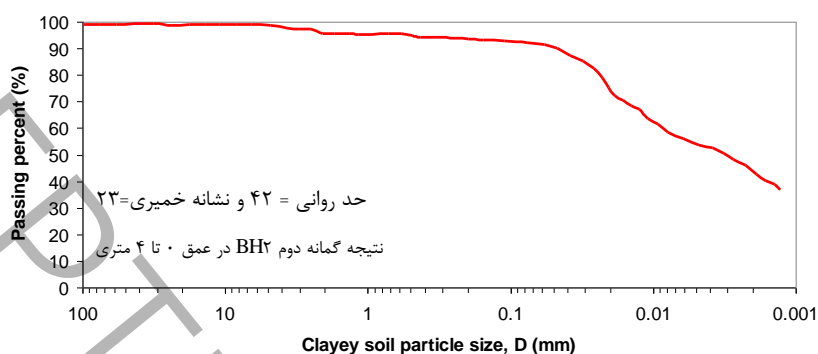
شکل ۱: آزمون نمونه صحرایی تحت بارگذاری مقاومت فشاری محصورنشده و ثبت داده ها توسط ثبت داده.

Figure 1: Field sample test under unconfined compressive strength loading and data recording by data logger.

افزودن آهک به خاک باعث کاهش خواص خمیری آن می شود. به طوری که در برخی موارد ممکن است مخلوط خاک-آهک کاملاً غیرخمیری شود. مطابق مقادیر شاخص خمیری و حد روانی خاک می توان در خصوص عملکرد تثبیت خاک با چسباننده آهکی یا

²² Unconfined compressive strength tests: UCS tests

سیمانی اظهار نظر کرد. شکل ۲ منحنی دانه بندی خاک رسی مورد آزمایش در عملیات آزمایشگاهی و صحرایی را نشان می دهد. مطابق این شکل، حد روانی این خاک کمتر از ۵۰ و برابر ۴۲ و اندیس خمیری آن برابر ۲۳ است. بنابراین مقادیر حدود آتربرگ، این خاک در تثبیت با سیمان عملکرد مناسبی خواهد داشت. برای اختلاط خاک با سیمان و آهک در این مطالعه، از روش تزریق با فشار دوغاب این دو نوع چسباننده استفاده شده است.



شکل ۲: منحنی دانه بندی خاک رسی مورد آزمایش در ساخت نمونه های آزمایشگاهی و صحرایی.
Figure 2: Particle size distribution curve of clayey soil tested in making laboratory and field samples.

۲-۱- نمونه سازی ها و آزمون های میدانی (صحرایی)

در این تحقیق علاوه بر آزمون های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی، نمونه های اختلاط عمیق و حجیم در محل صحرا نیز اجرا شده و آزمون های مختلف روی آنها انجام شده است. در این راستا و به منظور ایجاد شرایط واقعی در محل برای اختلاط عمیق و حجیم خاک با ماده افزودنی، اقدام به طراحی و ساخت یک دستگاه ویژه جهت حفاری و تزریق گردید. اهم فعالیت های انجام شده در این بخش بدین شرح می باشد: ۱- ساخت و تهیه تیغه مخلوط کننده دستگاه برای نصب بر روی تراکتور، ۲- اختلاط خاک با ماده افزودنی، ۳- ساخت نمونه های صحرایی، ۴- عمل آوری نمونه ها، ۵- مغزه گیری از اختلاط عمیق و حجیم انجام شده، ۶- تهیه نمونه با استفاده از کیسینگ گذاری (غلاف رانی در اختلاط برجای صحرایی)، ۷- انجام آزمون های مقاومتی تک محوری و ۸- جمع آوری اطلاعات و ارائه نتایج.

۲-۱-۱- ساخت و ارتقای تیغه اختلاط عمیق- حفار ماشینی

برای ساخت تیغه حفار از لوله با قطر ۲ اینچ استفاده شده، به طوری که پره های مخلوط کن با فواصل و زوایای مشخص بر روی آن نصب شده است. پره های برهم زننده (اختلاط) خاک با دو جهت کاملا مخالف در چهار ردیف با فواصل ۲۲ cm بر روی این لوله نصب شده اند. جهت های مخالف پره ها برای برهم زدن و دستخوردن کامل خاک استفاده می شود. بر روی قسمت انتهایی لوله از یک سرمته با ارتفاع ۱۰ cm جهت نفوذ به داخل خاک و یک مارپیچ (روتاری) جهت ادامه حرکت مته در داخل خاک استفاده شده است. از روتاری برای تعیین نفوذ مته به داخل خاک یا خروج مته از آن، استفاده می شود. بر روی لوله سه عدد سوراخ با قطر حدود ۱۰ mm برای تزریق دوغاب در داخل خاک ایجاد شده است. (همچنین جنس تمامی لوله ها از فولاد و جنس سرمته از آلیاژ چدن است).

جهت تزریق دوغاب از یک غلاف با ارتفاع ۲۰ cm که بر روی محیط بیرونی لوله ۲ اینچ نصب می شود، استفاده شده است. غلاف بوسیله یک شاسی محکم به پوسته بیرونی گیربکس دستگاه حفار (از گیربکس دستگاه چاله کن درختی استفاده شده است) متصل شده است، تا اجازه چرخش به غلاف داده نشود. بر روی این غلاف یک عدد شیر برای تزریق دوغاب قرار گرفته است، تا در زمان های مورد نیاز از طریق این شیر تزریق دوغاب در داخل لوله حفار انجام گیرد. غلاف با استفاده از رینگ های مختلف کاملا آب بند شده و با استفاده از گریس اصطکاک بین آن و لوله از بین رفته است.

برای نفوذ و خروج مته به داخل خاک نیاز به نیروی هیدرولیکی زیادی است، که بدون خروج خاک، عملیات نفوذ و بر هم زدن خاک را انجام دهد. به همین منظور از تراکتور استفاده شده است، که با استفاده از نیروی محرکه تراکتور بتوان نیروی مورد نیاز حفاری را ایجاد نمود. ولی تنها مشکل در استفاده از تراکتور، عدم گردش شفت تراکتور در دو جهت مخالف هم بود. زیرا بایستی برای نفوذ در داخل خاک از حرکت ساعتگرد شفت و برای خروج مته از داخل خاک، از جهت چرخش پادساعتگرد استفاده نمود. تنها تراکتوری که این دو جهت چرخش را فراهم می کند، تراکتور باغی با نام تجاری گلدونی^{۲۳} است، که بر روی گیربکس انتهایی خود از دو شفت با جهت چرخش مخالف استفاده می کند. اما مشکل موجود عدم یکسان بودن قطر شفت ها است، که به همین منظور بایستی از یک رابط برای تبدیل این دو استفاده نمود، که با پیگیری های مختلف این رابط از یک نمایندگی تهیه و با عملیات جوشکاری به شفت با سایز بزرگ تر تبدیل و بر روی شفت کوچک تر متصل شد. جهت انتقال نیروی چرخش تراکتور به مته، از دستگاه چاله کن تراکتوری استفاده شد که می توان با جایگزین کردن مته چاله کن با مته اختلاط طراحی شده، مطابق شکل ۳-الف تا ۳-ج عملیات حفاری و اختلاط را انجام داد. با استفاده از وسایل مذکور می توان عملیات نفوذ و خروج مته به داخل خاک، بدون خروج کامل خاک از ستون ایجاد شده را انجام داد. شکل ۳-د تا ۳-ی وضعیت استقرار دستگاه طراحی شده شامل تیغه های حفاری و اختلاط عمیق روی سطح مورد نظر را نشان می دهد. همچنین در شکل ۳ نمایش نحوه اتصال حفار اختلاط عمیق به محور محرک تراکتور گلدونی و حفاری عمیق انجام شده توسط دستگاه طراحی شده بدون خروج خاک حفاری شده، نمایش داده شده است.

برای تزریق دوغاب سیمان به داخل خاک نیاز به پمپ تزریق با فشار مناسب است، که با توجه به فشار مورد نیاز برای تزریق و عدم دسترسی به این پمپ، ناگزیر از سایر وسایل جهت تزریق استفاده شد. که به همین منظور دستگاه فوم بتن سه فاز انتخاب شد، که با استفاده از آن بتوان دوغاب با نسبت های مختلف آب به سیمان را تهیه و با استفاده از شیلنگ آنرا به مته طراحی شده متصل نمود و در داخل خاک تزریق نمود. برای تهیه نسبت های مختلف دوغاب سیمان، ابتدا آب را با استفاده از کفکش به داخل مخزن دستگاه فوم بتن وارد کرده و سپس با استفاده از پمپ انتقال سیمان به داخل مخزن، سیمان وزن شده را نیز به مصالح اختلاط اضافه کرده، تا اختلاط و ترکیب کامل دوغاب انجام گیرد. سپس از پمپ های انتقال دستگاه، برای انتقال دوغاب تهیه شده به مته حفار استفاده می شود. شیر و رابط نصب شده این امکان را می دهد تا بتوان با اتصال شیلنگ دستگاه فوم بتن، ورود و خروج دوغاب به درون خاک را با استفاده از شیر کنترل نمود. شکل ۳ شامل نمایشی از فرآیند حفاری دورانی در جهت نفوذ برای ایجاد گمانه، جهت تزریق دوغاب به همراه دستگاه فوم بتن ۳ فاز و بشکه های تامین آب اختلاط در محل است.

۲-۱-۲- اختلاط خاک با مواد افزودنی

با توجه به استفاده از روش اختلاط تر، از دوغاب برای تثبیت با درصد مختلف ماده افزودنی استفاده می شود. در این مرحله برای کاهش تعداد نمونه ها، از نسبت آب به سیمان بهینه که در کارهای آزمایشگاهی بدست آمده است، به عنوان نسبت آب به سیمان مطالعاتی در کارهای میدانی استفاده می شود. این نسبت برابر درصد رطوبت معادل حد روانی نمونه خاک رسی لاغر مورد مطالعه منظور شده است.

۳-۱-۲- ساخت نمونه های صحرائی

همانگونه که در بخش های مختلف شکل ۳ مشخص است با استفاده از دستگاه اختلاط تهیه شده، نمونه های صحرائی با شرایطی مشابه با شرایط آزمایشگاهی آماده می شوند. در این مرحله از سیمان به عنوان تنها ماده افزودنی استفاده می شود.



ج- تعیین محدوده اختلاط صحرائی



ب- دستگاه تزریق مصالح اختلاط عمیق



الف- استقرار حفار طراحی شده



ی- نمای پایانی اختلاط حجیم صحرائی



و- اتمام فرایند اختلاط صحرائی



د- انتهای یک اختلاط عمیق صحرائی

شکل ۳: مراحل مختلف انجام اختلاط صحرائی برای ساخت نمونه های صحرائی و صحرائی-آزمایشگاهی.
Figure 3: Different stages of field mixing to make field and field-laboratory samples.

۴-۱-۲- عمل آوری نمونه ها

عمل آوری به روش میدانی برای مدت زمان های ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه در صحرا با شرایط محیطی موجود انجام گرفت. تفاوت شرایط عمل آوری آزمایشگاهی و صحرائی در نحوه عمل آوری می باشد، که در شرایط میدانی هیچگونه عملیاتی برای عمل آوری نمونه های ایجاد شده صورت نمی گیرد.

۵-۱-۲- مغزه گیری از اختلاط عمیق و حجیم صحرائی

پس از سخت شدن اختلاط های عمیق صحرائی اجرا شده و سپری شدن زمان های موردنظر (زمان های ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه) برای صحت سنجی اختلاط انجام شده در صحرا، ابتدا اطراف تعدادی از نمونه ها را باز نموده تا گیرش کامل دوغاب سیمان با خاک محیط نمایان گردد. همانگونه که در شکل ۴ مشخص است استوانه ای با قطر مته حفار ایجاد شده است. از طرفی در شکل های ۴-الف و ۴-ب توده کلی خارج شده، پس از خشک شدن از ستون برجای اختلاط عمیق صحرائی نشان داده شده است. بعد از اطمینان از صحت اختلاط انجام شده بایستی نمونه گیری با استفاده از دستگاه مغزه گیر از گمانه های موجود در زمان های عمل آوری مشخص شده انجام گیرد. در شکل های ۴-ج و ۴-د کرگیری و پیشرفت فرآیند (مغزه گیری) در مرکز گمانه ای که از قبل در آن اختلاط عمیق صورت گرفته است، نمایش داده شده است. با توجه به وجود خاک در اختلاط ها نمی توان در زمان مغزه گیری از آب جهت کاهش حرارت تیغه مغزه گیر استفاده نمود به همین دلیل متأسفانه پس از مغزه گیری در محل اختلاط ها، مطابق شکل ۴-و نمونه سالم، با ابعاد مناسب استخراج نگردید. در شکل ۴-و نمایش کاملی از قطعه خاک- ستون که میانه آن توسط مغزه گیری خارج شده، داده شده است. در نهایت با توجه به عدم موفقیت در فرایند مغزه گیری، تصمیم به تغییر روش نمونه گیری صحرائی اتخاذ گردید. بنابراین تمام نمونه هایی که در این مرحله ساخته شده اند، غیرقابل استفاده بوده و تنها از تعدادی از آنها برای آزمایش بارگذاری صفحه می توان استفاده نمود.



ج- انجام عملیات کرگیری (مغزه گیری) برای انجام آزمایش ها



ب- قطعه خارج شده پس از خشک شدن از اختلاط عمیق صحرائی



الف- نمونه آماده شده در صحرا با استفاده از دستگاه حفار و تزریق



و- مغزه گیری از قطعه ی اختلاط عمیق



د- پیشرفت فرآیند کرگیری (مغزه گیری) در محل مرکز گمانه

شکل ۴: نمایش مراحل مختلف تلاش برای استخراج مغزه ها (کرگیری) از محل اختلاط صحرائی.

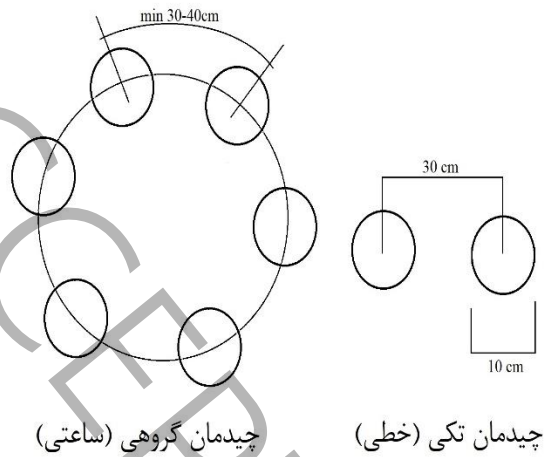
Figure 4: Showing the different stages of trying to extract cores from the field mixing site.

۲-۱-۶- تهیه نمونه های استوانه ای صحرائی با استفاده از شیوه غلاف رانی

مطابق آنچه در بخش قبلی گفته شده، تهیه نمونه سالم و قابل استفاده استوانه ای شکل، از محل های اختلاط صحرائی با مشکلات اجرایی عدیده ای مواجه گردید. از این رو با توجه به تحقیقات ویسم^{۲۴}[۹] و یائو^{۲۵}[۱۰] قالب های استوانه ای آماده در داخل چاهک اختلاط رانده شده و آن ها بعد از سپری شدن زمان عمل آوری، استخراج شده و جهت انجام آزمایش تک محوری استفاده خواهند شد. برای این هدف از لوله های PVC با قطر ۱۰ cm و طول ۸۰ cm استفاده شده است. همانگونه که در شکل ۵ مشخص است بر روی محیط لوله از سوراخ هایی با قطر ۱ cm و فواصل ۵ cm با چیدمان ضربدری استفاده شده است. هدف از ایجاد این سوراخ ها، ایجاد ارتباط رطوبتی نمونه با محیط اطراف و اندرکنش مخلوط داخل قالب با محیط اطراف می باشد. برای این منظور چاهک های اختلاط عمیق صحرائی ایجاد گردید و پس از اختلاط خاک - سیمان، قالب های سوراخ دار در محل گمانه رانده شده است، تا مطابق شکل ۵ پس از سپری شدن زمان عمل آوری قالب ها را خارج نموده و به قطعات مورد نیاز برش زد.

برای کارهای میدانی و با توجه به تعداد تکرار مورد نیاز برای هر آزمایش، از ۲ قالب غلافی سوراخ کاری شده با ارتفاع ۸۰ cm استفاده می شود، تا بتوان پس از برشکاری، حداقل ۴ نمونه با ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی متر از آنها استخراج نمود. به همین دلیل در چاهک هایی با قطر ۶۰ cm و عمق حداقل ۱۰۰ cm، دو قالب غلافی سوراخ کاری شده با فواصل مرکز به مرکز ۳۰ سانتی متر و چیدمان تکی - خطی قرار می گیرد (قطر و عمق چاهک مطابق آیین نامه FHWA-HRT-13046 [۱] است). برای مشاهده تاثیر تعداد غلاف ها و برهمکنش آنها بر روی یکدیگر، در تعدادی از چاهک ها از ۶ قالب سوراخ کاری شده با چیدمان گروهی (تجمیعی - شعاعی) ساعتی مطابق شکل ۵ استفاده شده است. برای کارهای میدانی در حالت غلاف گذاری تعداد ۷۰ نمونه مطابق جدول ۱ در سه درصد اختلاط وزنی مختلف ۶، ۸ و ۱۰٪ و سه زمان عمل آوری ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه اجرا شده است.

²⁴Wissem
²⁵Yao



شکل ۵: راست: (شکل بالا) نحوه اجرای چیدمان نمونه ها و شرایط غلاف گذاری آنها در محیط صحرایی و (شکل پایین) استخراج نمونه ها از محل اختلاط صحرایی با چیدمان (الف) گروهی - ساعتی و (ب) تکی - خطی. چپ: ابعاد پلانی مدل ها.

Figure 5: Right: (top figure) how to implement the arrangement of samples and their casing conditions in the field environment and (bottom figure) extraction of samples from the field mixing site with (a) group-clockwise and (b) single-line arrangement. Left: Plan dimensions of the models.

جدول ۱: برنامه و جزئیات انجام آزمایش های میدانی اجرا شده در صحرا جهت اخذ نمونه های منتقل شده به آزمایشگاه.

Table 1: Schedule and details of tests carried out in the field to obtain samples transferred to the laboratory.

ردیف	نوع نمونه اختلاط	درصد وزنی طرح مخلوط (درصد)	تعداد روز عمل آوری در محیط (روز)	تعداد نمونه موفق آزمون شده	چیدمان نمونه ها
۱	مخلوط خاک-سیمان	۶	۱۴	۴	تکی
۲	مخلوط خاک-سیمان	۸	۱۴	۵	تکی
۳	مخلوط خاک - سیمان	۱۰	۱۴	۴	تکی
۴	مخلوط خاک - سیمان	۶	۱۴	۴	تجمیعی
۵	مخلوط خاک - سیمان	۸	۱۴	۴	تجمیعی
۶	مخلوط خاک - سیمان	۱۰	۱۴	۵	تجمیعی
۷	مخلوط خاک - سیمان	۶	۲۸	۴	تکی
۸	مخلوط خاک - سیمان	۸	۲۸	۳	تکی
۹	مخلوط خاک - سیمان	۱۰	۲۸	۴	تکی
۱۰	مخلوط خاک - سیمان	۶	۲۸	۴	تجمیعی
۱۱	مخلوط خاک - سیمان	۸	۲۸	۴	تجمیعی
۱۲	مخلوط خاک - سیمان	۱۰	۲۸	۳	تجمیعی
۱۳	مخلوط خاک - سیمان	۶	۴۲	۴	تکی
۱۴	مخلوط خاک - سیمان	۸	۴۲	۴	تکی
۱۵	مخلوط خاک - سیمان	۱۰	۴۲	۳	تکی
۱۶	مخلوط خاک - سیمان	۶	۴۲	۳	تجمیعی
۱۷	مخلوط خاک - سیمان	۸	۴۲	۴	تجمیعی
۱۸	مخلوط خاک - سیمان	۱۰	۴۲	۴	تجمیعی
-	مجموع کل آزمایش های اجرا شده	-	-	۷۰	-

نمونه های غلاف گذاری شده پس از استخراج از چاهک ها برای برشکاری به آزمایشگاه منتقل شده و به قطعات ۲۰ cm تقسیم شده اند (مطابق شکل ۶). انتخاب قطعات با طول ۲۰ cm برای یکسان بودن ابعاد نمونه های استوانه ای آزمایشگاهی و میدانی است (۱۰×۲۰ سانتی متر)، تا بتوان مطالعه و مقایسه دقیق تری را بر روی نتایج نهایی آنها انجام داد.



شکل ۶: نمونه های برش خورده میدانی با ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی متری جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری.
Figure 6: Field cut samples with dimensions of 10x20cm to perform uniaxial compressive strength test.

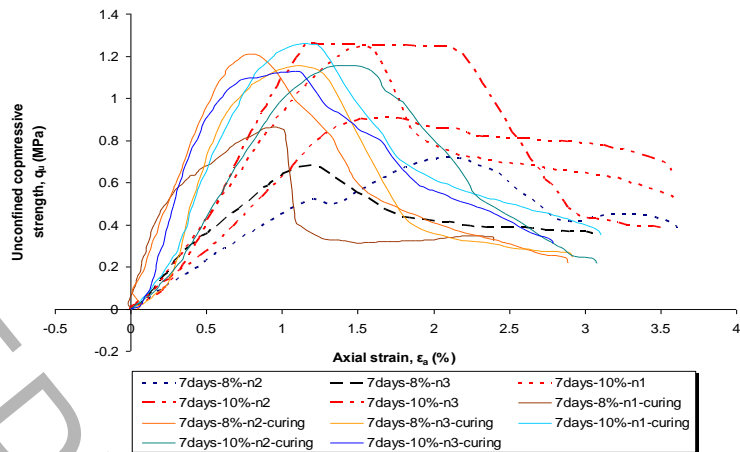
۳- نتایج آزمون های اختلاط عمیق در مقیاس آزمایشگاهی

۳-۱- نمونه های تثبیت شده با سیمان بدون عمل آوری

در کل تعداد ۶ نمونه خاک-سیمان آزمایشگاهی استوانه ای با سن ۷ روزه شامل ۳ نمونه ۰.۸٪ و سه نمونه ۱.۰٪ ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. وزن مخصوص نمونه های تثبیت شده با ۰.۸٪ و ۱.۰٪ سیمان در سن ۷ روزه و بدون عمل آوری به صورت خلاصه مابین ۱/۸۶ تا ۲/۰۷۵ گرم بر سانتی مترمکعب است. همچنین وزن کلی تمام شده نمونه های استوانه ای نیز در محدوده ۳۱۸۰ تا ۳۲۹۰ گرم است. افزون بر این، تعداد ۱۳ نمونه ۷ روزه با عمل آوری نیز، در محیط آزمایشگاه ساخته شده است. از این تعداد تنها یک نمونه بدون کاربرد چسباننده سیمانی آزمایش شده است. تعداد ۴ نمونه ۰.۶٪، ۴ نمونه ۰.۸٪ و ۴ نمونه ۱.۰٪ سیمان در سن ۷ روزگی، با لحاظ عمل آوری تحت آزمایش UCS قرار گرفته اند. وزن تمام شده این دسته از نمونه ها بین ۳۲۲۶ تا ۳۴۰۴ گرم و چگالی نهایی آنها در محدوده ۱/۹۷ تا ۲/۰۸۴ گرم بر سانتی متر مکعب است.

۳-۱-۱- مقایسه تاثیر عمل آوری بر روی نمونه های ۷ روزه

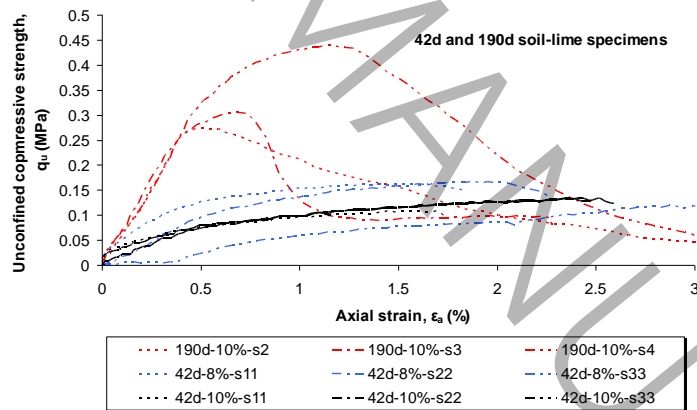
در شکل ۷ منحنی تنش - کرنش ۷ روزه برای نمونه های استوانه ای با ۰.۸٪ تا ۱.۰٪ سیمان ترسیم شده است. در این شکل مقایسه تاثیر عمل آوری روی نمونه ها بررسی شده است. مطابق این شکل، با عمل آوری نمونه های خاک-سیمان اختلاط عمیق، برای در صد های ۰.۸٪ سیمان، مقادیر بار لحظه شکست نمونه ها با عمل آوری افزایش یافته است. ولی مقادیر تغییر شکل لحظه شکست نمونه با استفاده از عمل آوری تغییری نداشته و تقریباً تغییر شکل ها یکسان هستند. برای نمونه های با ۱.۰٪ سیمان، در مقادیر بار لحظه شکست نمونه ها با عمل آوری تغییر محسوسی مشاهده نمی شود. همچنین مقادیر تغییر شکل لحظه گسیختگی نمونه با استفاده از عمل آوری تغییری نداشته و تقریباً تغییر شکل ها یکسان هستند. بنابراین برای دوره عمل آوری ۷ روزه می توان نتیجه گرفت که عمل آوری، تغییری در تغییر شکل ها ایجاد نمی کند. لازم بذکر است که نمونه های بدون عمل آوری، برای سن های ۲۸ روزه نیز تهیه شده است، ولی میزان تردشدگی نمونه ها تا حدی افزایش یافته است، که امکان آزمایش نمونه ها در آزمایش تک محوری میسر نیست. بنابراین می توان تمایز اثرات عمل آوری را برای نمونه های با سن بالاتر از ۷ روز عنوان نمود، به طوری که نمونه های بدون عمل آوری رفتار شکننده تر و بدون کسب نتایج مقاومت فشاری بالاتر را تجربه کرده اند.



شکل ۷: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های ۷ روزه با و بدون عمل آوری با ۸٪ تا ۱۰٪ سیمان.

Figure 7: Stress-strain curve for 7-days samples with and without curing with 8% to 10% cement.

شکل ۸ تاثیر مدت زمان عمل آوری بر نمودار تنش-کرنش نمونه های ترکیب شده با آهک را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش زمان عمل آوری می توان افزایش مقاومت نمونه ها برای آهک را مشاهده نمود. ولی در اینجا نیز می توان رفتار ترد شده نمونه ها را مشاهده نمود. یعنی با افزایش زمان عمل آوری در نمونه های اختلاط با آهک، روند افزایش مقاومت و کاهش کرنش در لحظه شکست نمونه ها، قابل مشاهده خواهد بود. مطابق شکل ۸ آزمونه های با ۱۰٪ آهک و نیز سن عمل آوری ۱۹۰ روزه، بیشترین سطح زیر منحنی تنش-کرنش که معرف طاقت نمونه است را دارا می باشند.



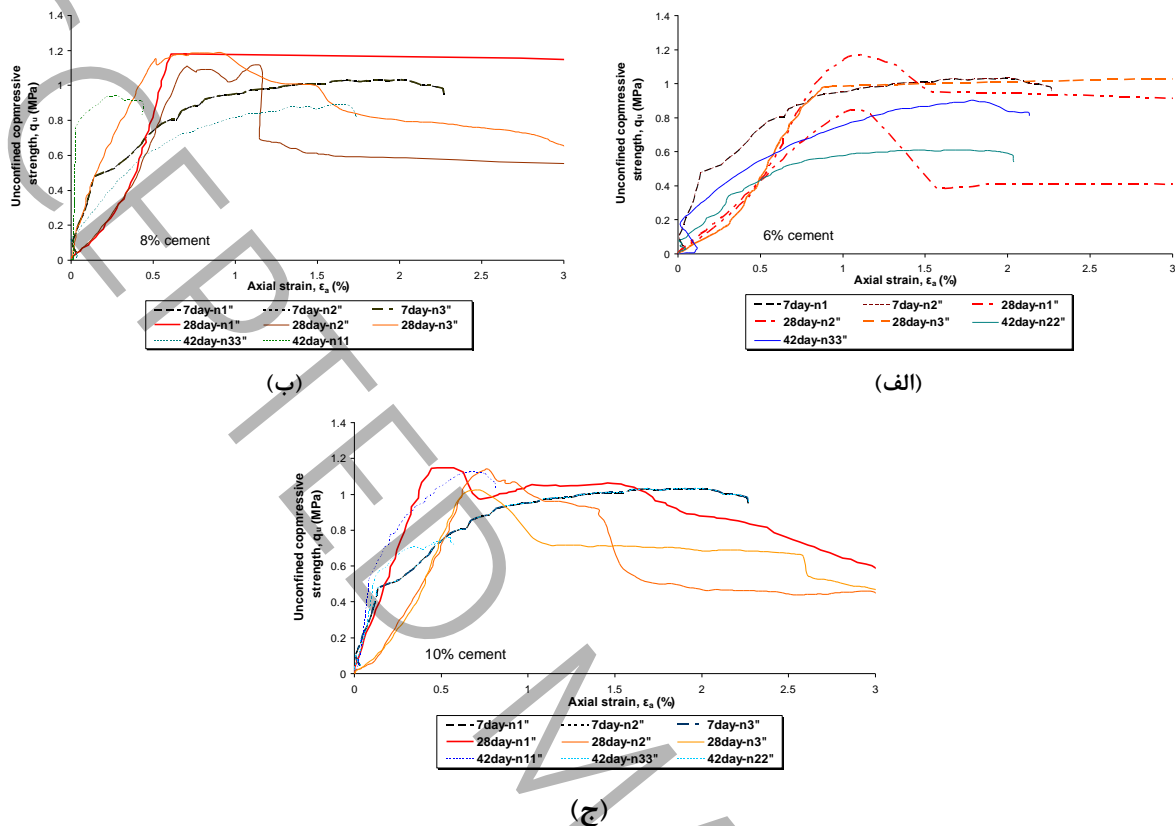
شکل ۸: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های با ۸ تا ۱۰ درصد وزنی آهک همراه ۴۲ و ۱۹۰ روز عمل آوری.

Figure 8: Stress-strain curve for samples with 8% to 10% by weight of lime with 42 and 190 days of curing.

۳-۲- مقایسه تاثیر مدت عمل آوری بر روی نمونه های سیمان

در شکل ۹ تاثیر زمان عمل آوری بر روی نمودار تنش-کرنش برای خاک های ترکیب شده با سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۹ (الف) مشخص است برای اختلاط خاک با درصد وزنی ۶٪ سیمان بیشترین مقاومت برای ۲۸ روز عمل آوری مشاهده می شود و کمترین کرنش زمان شکست نیز برای سن ۲۸ روزه ثبت شده است. به عبارت دیگر برای سن ۲۸ روزه رفتار ترد شدگی و ترد شکنی برای اختلاط خاک-سیمان مشاهده شده است. در شکل ۹ (ب) اختلاط خاک - سیمان با درصد وزنی ۸٪ نمایش داده شده است و بیشترین مقاومت فشاری و کمترین کرنش زمان شکست برای سن ۲۸ روز نمایان شده است. در شکل ۹ (ج)

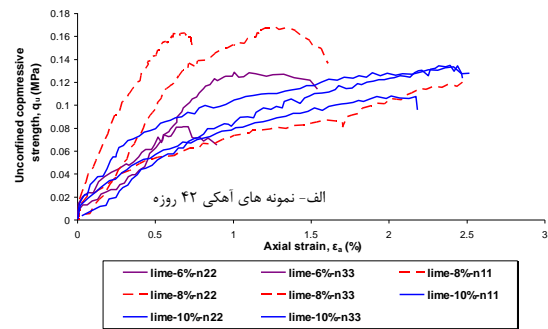
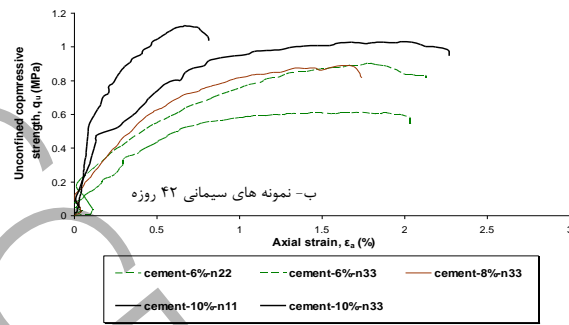
اختلاط خاک-سیمان برای درصد وزنی ۱۰٪ سیمان نمایش داده شده است، ولی بر خلاف شکل های قبلی، برای این درصد و در سن های ۲۸ و ۴۲ روزه، مقاومت فشاری و کرنش زمان شکست نمونه ها یکسان است. بنابراین با افزایش در صد ماده افزودنی چسباننده سیمانی و با افزایش مدت زمان عمل آوری، نمونه خاک-سیمان رفتار تردتری از خود نشان می دهند.



شکل ۹: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های سیمانی ۷ تا ۴۲ روز عمل آوری شامل درصد های سیمان: (الف) ۶٪، (ب) ۸٪ و (ج) ۱۰٪.
Figure 9: Stress-strain curve for cement samples from 7 to 42 days of curing, including cement percentages: (a) 6%, (b) 8% and (c) 10%.

۳-۳- مقایسه تاثیر افزودنی آهک و سیمان بر روی نمونه ها

همانگونه که در آزمایش ها مشخص شده است نمونه های سیمانی دارای وزن مخصوص بالاتری نسبت به نمونه های آهکی با درصد چسباننده یکسان هستند. شکل ۱۰ مقایسه نتایج تنش-کرنش برای نمونه های با ۴۲ روز عمل آوری برای چسباننده های آهک و سیمان را با درصد های یکسان ۶٪ تا ۱۰٪ نشان می دهد. مشاهده می شود که نمونه های اختلاط خاک-سیمان مقاومت بسیار بالاتری را نسبت به نمونه خاک-آهک (با درصد های یکسان) نشان می دهند. این به این معنی است که جایگزین کردن سیمان به جای آهک باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده نمونه شده است که این افزایش تقریباً ۱۰ برابر برای عمل آوری ۴۲ روزه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به طور کلی تعداد ۱۹ نمونه آزمایشگاهی (اختلاط در قالب استوانه ای) ۴۲ روزه عمل آوری شده خاک-آهک و خاک-سیمان ساخته شده که شامل یک نمونه بدون چسباننده، ۳ نمونه خاک-سیمان ۶٪، ۳ نمونه خاک-سیمان ۸٪ و سه نمونه خاک-سیمان ۱۰٪ است. همچنین در نمونه های خاک-آهک نیز تعداد ۳ نمونه اختلاط ۶٪، ۳ نمونه ۸٪ و سه نمونه ۱۰٪ آماده و آزمایش شده است. محدوده وزن این نمونه ها مابین ۲۸۵۰ تا ۳۲۳۰ گرم و چگالی آنها بین ۱/۸۲ تا ۲/۰۷۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. مطابق بخش های الف و ب شکل ۱۰ اختلاف ۳ تا ۷ برابری بین مقاومت بیشینه نمونه های ضعیف خاک-آهک و نمونه های مستحکم خاک سیمان وجود دارد.



شکل ۱۰: منحنی مقایسه تنش-کرنش برای نمونه های با ۸ تا ۱۰ درصد وزنی آهک یا سیمان و ۴۲ روز عمل آوری.

Figure 10: Stress-strain comparison curve for samples with 8 to 10 percent by weight of lime or cement and 42 days of curing.

۳-۴- نتایج آزمون های اختلاط عمیق برجا (در مقیاس میدانی)

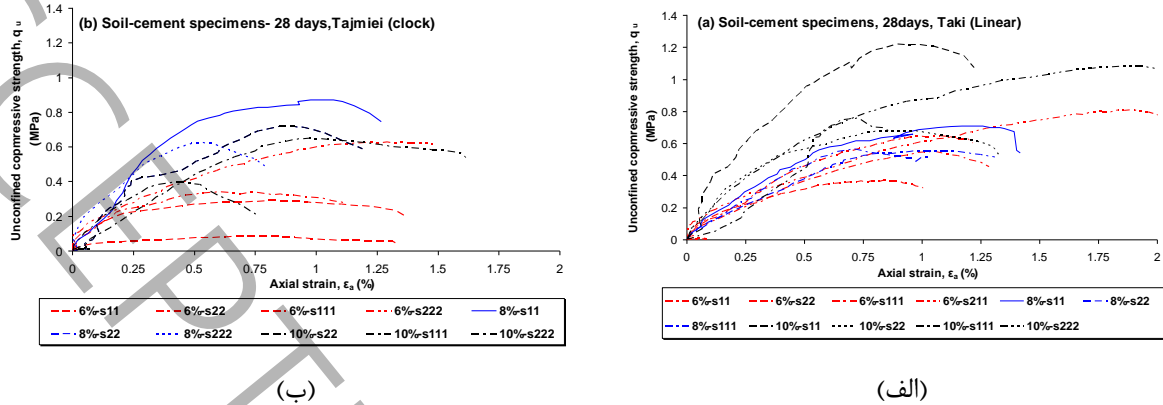
در این مطالعه، آزمون های میدانی به ۲ بخش تقسیم شده اند. الف: اختلاط حجیم و ب: اختلاط عمیق. اختلاط حجیم در زمین مربعی با ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ cm و عمق ۱۰۰ cm انجام شده است. برای ایجاد اختلاط کامل از مته حفار با فواصل دارای همپوشانی استفاده شده است. از سوی دیگر اختلاط عمیق در چاهکی دایره ای با قطر ۶۰ cm و عمق ۱۰۰ cm انجام شده است. برای تمامی نمونه های میدانی، از سیمان به عنوان ماده چسباننده استفاده شده است. بر روی هریک از نمونه های میدانی تهیه شده، نمونه برداری آزمایشگاهی انجام شده است.

نتایج بار-نشست برای نمونه های استوانه ای گردآوری شده از اختلاط های حجیم میدانی به قطر ۱۰ cm و طول ۲۰ cm برای درصد های وزنی ۶ تا ۱۰ درصد سیمان ارائه شده است. در اختلاط های عمیق، هدف استفاده از دستگاه کرگیر برای برداشت نمونه ها بوده است، ولی با توجه به عدم استفاده از آب برای خنک کردن فرآیند برشکاری، تنها یک نمونه سالم از محیط استخراج شد. به همین دلیل از روش دوم، برای تهیه نمونه ها استفاده شد. بدین صورت که اختلاط در چاهکی به قطر ۶۰ cm و عمق ۱۰۰ cm انجام شده و سپس کیسینگ ها (غلاف های) استوانه ای با قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۸۰ cm در محدوده اختلاط، درون خاک رانده می شود، تا در زمان های عمل آوری مختلف، استوانه ها از زمین خارج و برای استخراج نتایج بارگذاری، با ارتفاع (طول) ۲۰ سانتیمتر برش خورده و به آزمایشگاه منتقل شوند. برای مشاهده تاثیر تعداد اختلاط های عمیق در ابعاد مشخصی از محوطه زمین مورد مطالعه و احتمال تاثیر اختلاط ها بر روی نتایج نشست-بارگذاری، از دو روش اختلاط تکی و گروهی (تجمیعی) استفاده شده است. بدینگونه که با توجه به تعداد تکرار ۲ نمونه، در محل اختلاط یکبار دو قالب غلاف گذاری قرار می گیرد. ولی در نمونه مشابه برای دیدن اثرات آنها بر روی یکدیگر از ۶ قالب کیسینگ با فاصله حدود ۱۰ cm از یکدیگر استفاده شده است. بنابراین، برای اجرای نمونه های تکی از چیدمان خطی و برای نمونه های تجمیعی از چیدمان ساعتی استفاده شده است.

۳-۵- نتایج نمونه های اختلاط حجیم برجا (در مقیاس میدانی)

در شکل ۱۱ تاثیر مقدار چسباننده در اختلاط های صحرائی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این نمودار از سیمان بعنوان ماده افزودنی و با درصد های وزنی ۶ تا ۱۰ درصد و عمل آوری ۲۸ روزه ارائه شده است. مطابق شکل ۱۱ روند کلی پاسخ های درصد های اختلاط، مشابه نمونه های آزمایشگاهی است. همانگونه که در شکل مشخص است، در نمونه های تکی با افزایش درصد وزنی سیمان مقاومت نمونه ها افزایش می یابد و رفتار تردشکنی نمونه ها با افزایش میزان سیمان کاملا مشهود می باشد ولی در نمونه های تجمیعی مقادیر مقاومت نمونه های با ۸ و ۱۰ درصد بسیار به هم نزدیک شده اند و در بعضی نمونه ها نتایج ۸ و ۱۰ درصد کاملا بر هم منطبق هستند. افزایش مقادیر افزودنی سیمان به بیش از ۱/۶، رفتار نمونه های اختلاط خاک-سیمان ترد و شکننده شده است. رفتار ترد یا شکننده نمونه های

اختلاط باعث افزایش مقادیر سربار قابل تحمل و شکست نمونه در تغییر شکل های ناگهانی و کوچک می شود. یعنی با افزایش سیمان مخلوط، حد تحمل تغییر شکل فشاری نامحصور نمونه نهایی خاک-سیمان، در اثر افزایش شکنندگی کلی نمونه استوانه ای، کاهش می یابد.



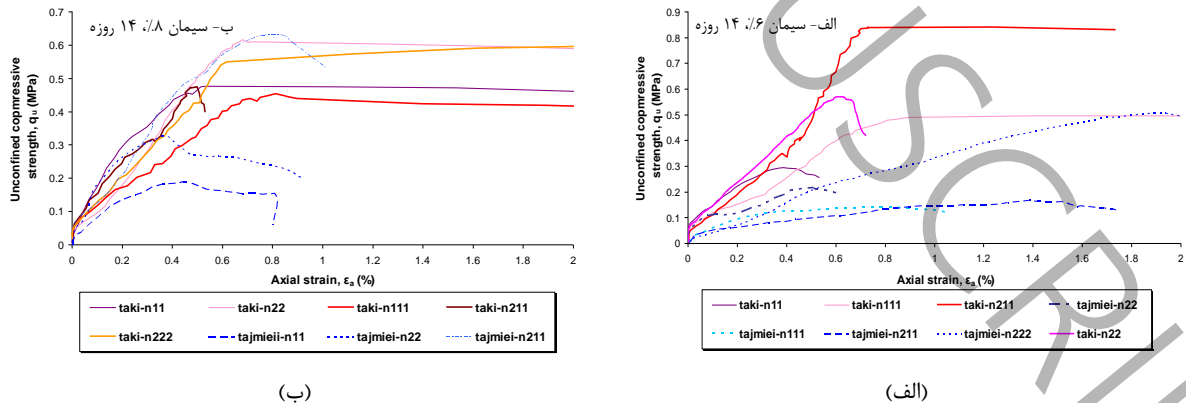
شکل ۱۱: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های سیمان با ۲۸ روز عمل آوری شامل: (الف) نمونه های تکی (چیدمان خطی)، (ب) نمونه های گروهی (چیدمان ساعتی).

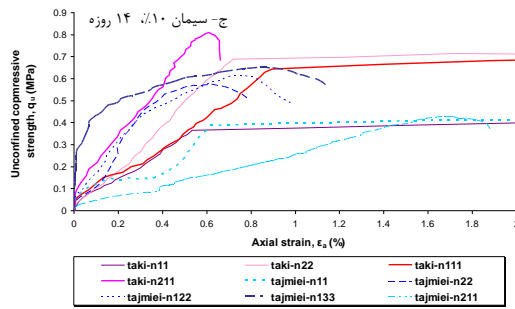
Figure 11: Stress-strain curve for cement samples with 28 days of curing including: (a) single samples (linear layout), (b) group samples (clocky layout).

۳-۶- تاثیر عمل آوری بر روی نتایج میدانی

۳-۶-۱- تاثیر عمل آوری ۱۴ روزه بر روی نمونه های صحرائی

در شکل ۱۲ تاثیر برهمکنش نمونه ها در محیط صحرائی مورد بررسی قرار گرفته است. در این نمودارها به بررسی تاثیر تعداد استوانه ها در یک محیط یکسان پرداخته شده است. با توجه به تعداد تکرار نمونه های که برابر ۲ در نظر گرفته شده است، در نمونه های تکی از دو استوانه و در نمونه های گروهی (تجمیعی) از ۶ استوانه در محیطی با مساحت یکسان استفاده شده است، تا بتوان تاثیر برهمکنش نمونه ها را بر روی نتایج تنش-کرنش فشاری-محوری آزمونه ها مشاهده نمود. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است، برای ۱۴ روز عمل آوری برای درصد های وزنی ۰.۶٪ و ۰.۸٪ نمودارهای تکی دارای مقاومت های بالاتری نسبت به نمونه های تجمیعی هستند، ولی برای نمودار ۰.۱٪ سیمان این نتایج بسیار به هم نزدیک شده اند. ولی کرنش نقطه شکست نمونه ها تقریباً برابر است و با توجه به یکسان بودن در صدهای چسباننده، رفتار ترد شدگی یکسانی در نمودارها مشاهده می شود. بنابراین برای نمونه های ۰.۶٪ و ۰.۸٪ مقاومت نقطه شکست نمونه های تکی، بالاتر می باشد.



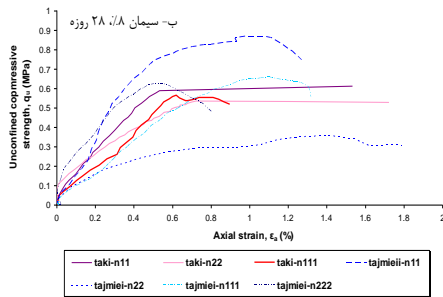


(ج)

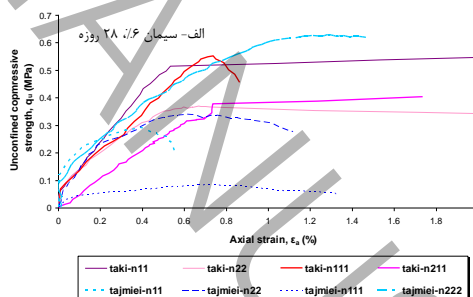
شکل ۱۲: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های سیمان با ۱۴ روز عمل آوری شامل: (الف) ۶٪ سیمان، (ب) ۸٪ سیمان، (ج) ۱۰٪ سیمان.
Figure 12: Stress-strain curve for cement samples with 14 days of curing including: (a) 6% cement, (b) 8% cement, (c) 10% cement.

۲-۶-۳- تاثیر عمل آوری ۲۸ روزه بر روی نمونه های صحرایی

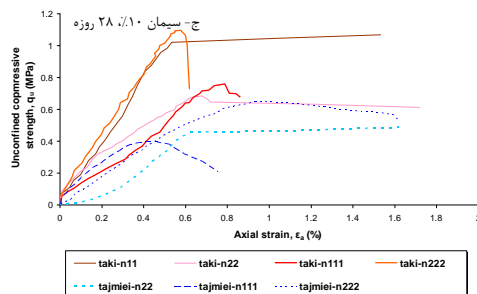
مطابق اندازه گیری ها، وزن مخصوص کلیه نمونه ها با توجه به ضوابط آیین نامه FHWA [۱] برای پذیرش نمونه های با وزن مخصوص حداقل ۹۵ درصد وزن سنگین ترین نمونه، تمامی نمونه ها در محدوده قابل پذیرش بودند. همانگونه که در شکل ۱۳ مشخص است، برای درصد چسباننده ۶٪ و ۸٪ مقادیر مقاومت گزارش شده برای ۲۸ روز عمل آوری به یکدیگر نزدیک می باشند، ولی برای ۱۰٪ نمودارهای تکی دارای مقاومت بالاتری هستند. ولی کرنش نقطه شکست نمونه ها تقریباً برابر است و با توجه به یکسان بودن درصدهای چسباننده، رفتار ترد شدگی یکسانی در نمودارها قابل مشاهده است. به طور کلی تعداد ۲۴ نمونه میدانی (اختلاط صحرایی) ۲۸ روزه عمل آوری شده خاک-سیمان ساخته شده که شامل تعداد ۸ نمونه مجزا برای هر یک از درصدهای سیمان ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ است. وزن نهایی این نمونه ها مابین ۲۹۸۰ تا ۳۵۵۰ گرم و وزن مخصوص آنها بین ۲/۰۴ تا ۲/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. همچنین از هر ۸ نمونه برای هر درصد سیمان، نیمی از تعداد نمونه ها دارای الگوی هندسی اجرای تکی (چیدمان خطی) و نیمی دیگر (تعداد ۴ نمونه) به صورت تجمیعی (چیدمان ساعتی) اند.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۳: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های سیمان با ۲۸ روز عمل آوری شامل: (الف) ۶٪ سیمان، (ب) ۸٪ سیمان، (ج) ۱۰٪ سیمان.

Figure 13: Stress-strain curve for cement samples with 28 days of curing including: (a) 6% cement, (b) 8% cement, (c) 10% cement.

۳-۶-۳- تأثیر عمل آوری ۴۲ روزه بر روی نمونه های صحرایی

همانگونه که در شکل ۱۴ مشخص است برای نمونه های تکی با درصد وزنی ۶٪ مقاومت گزارش شده برای ۴۲ روز عمل آوری مقادیر بالاتری را نشان می دهند. ولی برای درصد وزنی ۸٪ نمودارهای تکی و گروهی (تجمیعی) تقریباً دارای مقادیر یکسان است، ولی برای درصد وزنی ۱۰٪ مقادیر مقاومت گروهی بالاتر است. ولی کرنش نقطه شکست نمونه ها تقریباً برابر می باشد و با توجه به یکسان بودن درصدهای چسباننده، رفتار تردشدگی یکسانی در نمودارها قابل مشاهده است. به طور کلی تعداد ۲۴ نمونه میدانی (اختلاط صحرایی) ۴۲ روزه عمل آوری شده خاک-سیمان ساخته شده، که شامل ۸ نمونه مجزا برای هر یک از درصدهای سیمان سه گانه ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ است. وزن نهایی این نمونه ها مابین ۳۳۳۰ تا ۳۵۵۰ گرم و وزن مخصوص آنها بین ۲/۱۰ تا ۲/۲۶ گرم بر سانتی متر مکعب است. همچنین از هر ۸ نمونه برای هر درصد سیمان، نیمی از تعداد نمونه ها دارای الگوی هندسی اجرای تکی (چیدمان خطی) و نیمی دیگر (تعداد ۴ نمونه) به صورت تجمیعی (چیدمان ساعتی) اند.

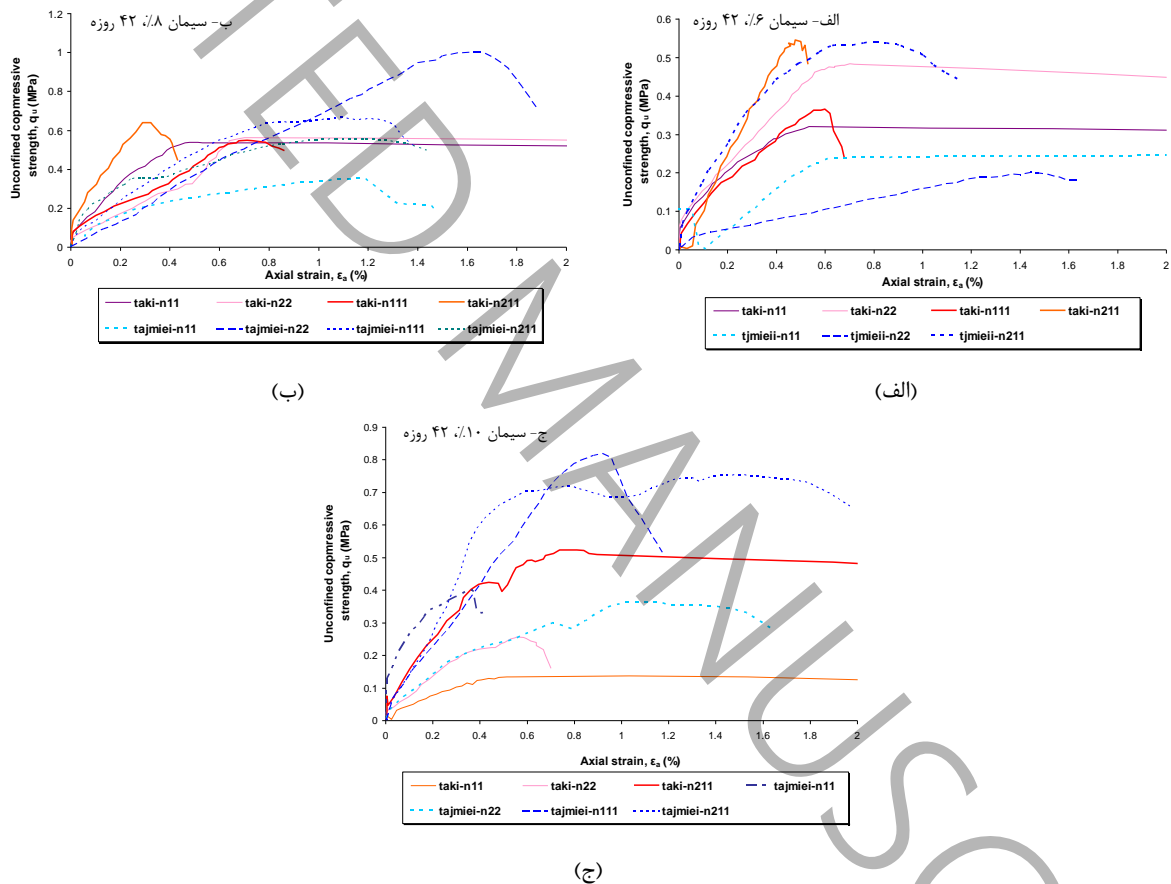
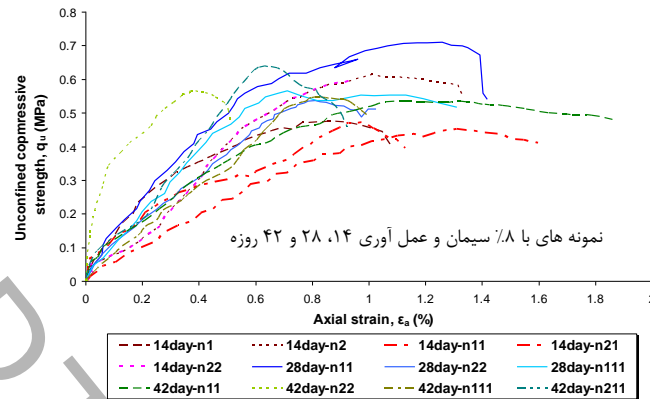


Figure 14: Stress-strain curve for cement samples with 42 days of curing including: (a) 6% cement, (b) 8% cement, (c) 10% cement.

۳-۶-۴- مقایسه تأثیر مدت زمان عمل آوری بر روی نمونه های صحرایی

در شکل ۱۵ نتایج زمان عمل آوری بر روی نمونه های صحرایی تکی با چیدمان خطی مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۱۵ مشخص است برای اختلاط خاک با درصد وزنی ۸٪ سیمان بیشترین مقاومت فشاری تک محوری برای دوره های ۲۸ و ۴۲ روز عمل آوری مشاهده می شود. به عبارتی با عبور از سن ۲۸ روزه، می توان تأثیر مدت زمان عمل آوری بر روی افزایش مقاومت را

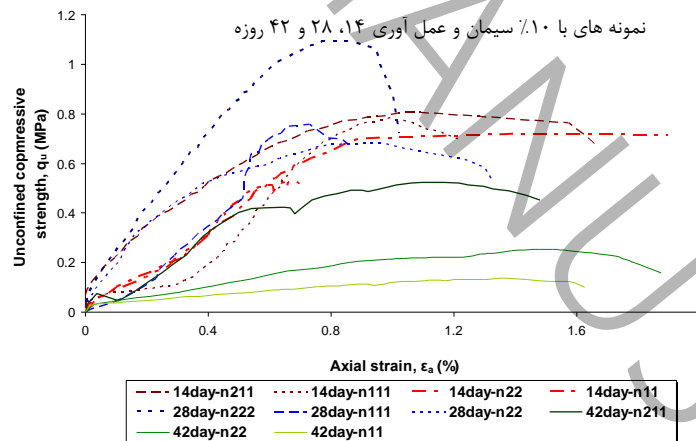
ناچیز دانست. کمترین کرنش زمان شکست نیز برای سن ۴۲ روزه نشان داده شده است. به عبارت دیگر برای سن ۴۲ روزه رفتار تردشدگی برای اختلاط خاک-سیمان بیشتر مشاهده شده است.



شکل ۱۵: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های صحرایی شامل ۸٪ سیمان و با ۲۸، ۱۴ و ۴۲ روز عمل آوری.

Figure 15: Stress-strain curve for field samples containing 8% cement and with 14, 28 and 42 days of curing.

در شکل ۱۶ اختلاط خاک-سیمان برای در صد وزنی ۱۰٪ سیمان نمایش داده شده است، ولی بر خلاف شکل های قبلی برای این درصد وزنی و در سن های ۱۴ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری و کرنش زمان شکست نمونه ها یکسان هستند. بنابراین با افزایش درصد وزنی سیمان، نمونه ها سریعتر به مقاومت لازم رسیده و مقاومت نمونه ها برای سن های ۱۴ و ۲۸ روز تقریباً یکسان است. با افزایش میزان سیمان برای درصدهای وزنی بیش از ۸٪ می توان تردشدگی نمونه ها را بسیار محسوس دانست. بطوریکه برای سن بیشتر از ۲۸ روز نمونه ها بسیار ترد شده و تحت بارگذاری به سرعت خرد می شوند. بنابراین مطابق شکل ۱۶ کمترین مقاومت فشاری و کمترین کرنش زمان شکست، برای سن ۴۲ روز نمایان شده است.



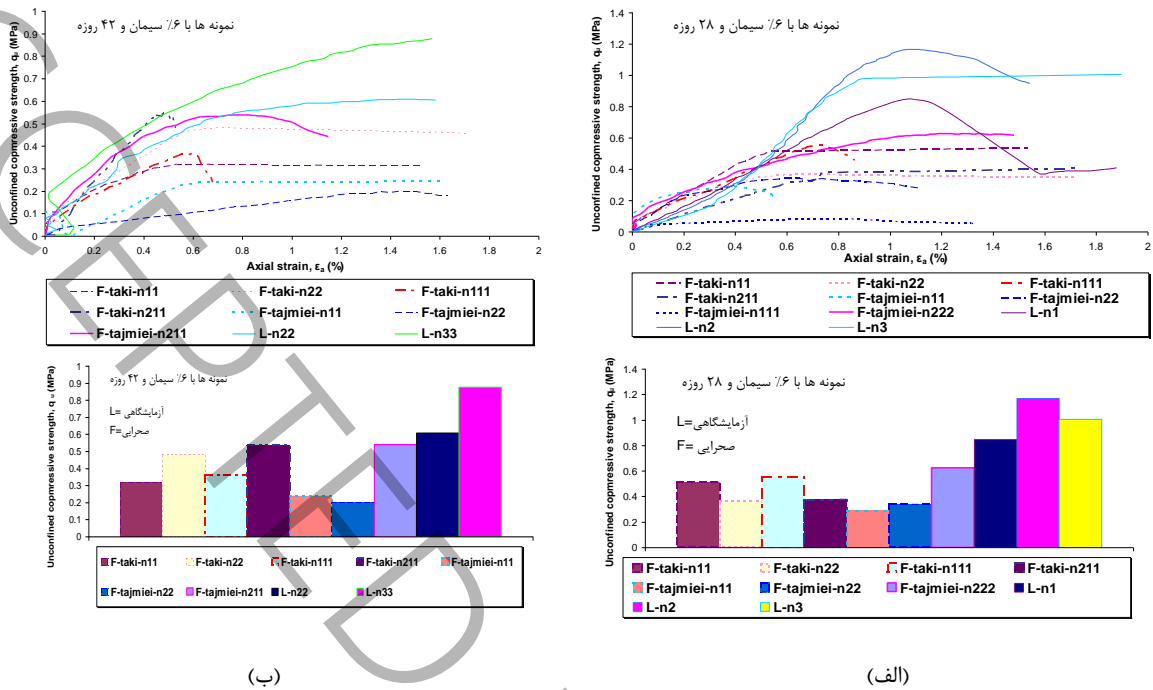
شکل ۱۶: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های صحرایی شامل ۱۰٪ سیمان و با ۲۸، ۱۴ و ۴۲ روز عمل آوری.

Figure 16: Stress-strain curve for field samples containing 10% cement and with 14, 28 and 42 days of curing.

۴- مقایسه نتایج میدانی و آزمایشگاهی برای نمونه های اختلاط با سیمان

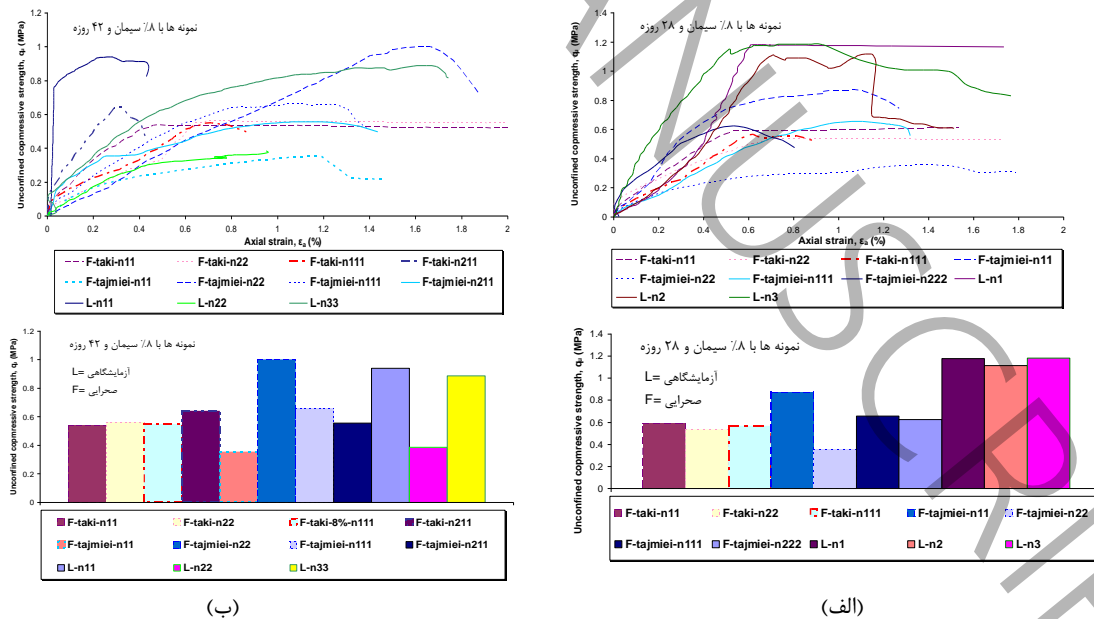
در این قسمت مقایسه نتایج آزمایشگاهی و صحرایی برای کلیه نمونه ها با درصدهای مختلف ماده افزودنی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۷ مقایسه بین نتایج اختلاط حجیم میدانی (F) و آزمایشگاهی (L) برای نمونه های با ۶٪ وزنی سیمان نمایش داده است و نتایج

نمونه ها بصورت نمودار تنش- کرنش و نمودار میله ای ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۱۷ مشخص است نمونه های آزمایشگاهی دارای مقاومت بالاتری هستند، که این پدیده را می توان به دلیل شرایط ایده آل آزمایشگاه و عمل آوری بهتر نمونه ها دانست.



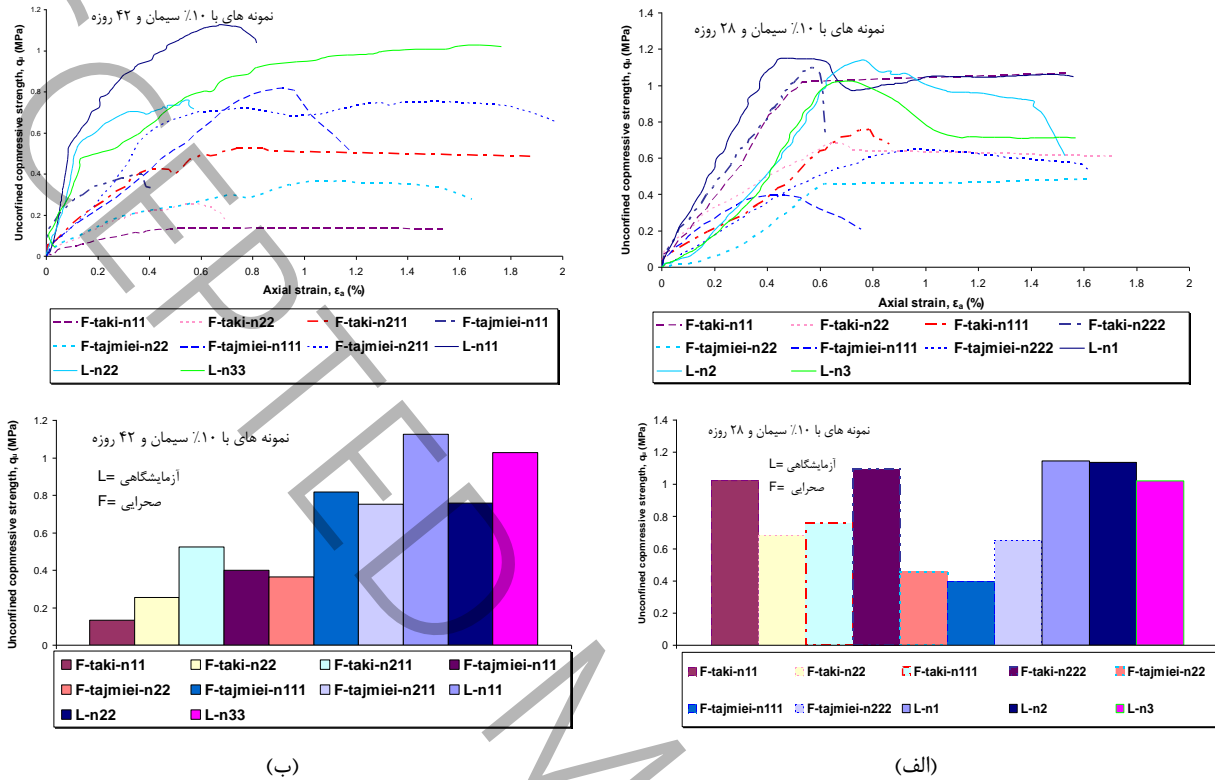
شکل ۱۷: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های با ۶٪ سیمان شامل: (الف) ۲۸ روز عمل آوری، (ب) ۴۲ روز عمل آوری.
Figure 17: Stress-strain curve for samples with 6% cement including: (a) 28 days of curing, (b) 42 days of curing.

در شکل ۱۸ نمودارهای با درصد وزنی ۸٪ مواد افزودنی نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است. نمونه های آزمایشگاهی با سن ۲۸ روزه مقاومت بالاتری را از خود نشان می دهند، ولی با گذشت زمان و رسیدن به سن ۴۲ روزه این نتایج بسیار به هم نزدیک شده اند. دلیل اصلی آن هم تکمیل واکنش های سیمانی شدن در طول زمان نمونه ها است.



شکل ۱۸: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های با ۸٪ سیمان شامل: (آ) ۲۸ روز عمل آوری، (ب) ۴۲ روز عمل آوری.
Figure 18: Stress-strain curve for samples with 8% cement including: (a) 28 days of curing, (b) 42 days of curing.

در شکل ۱۹ مشخص شده است که در ۲۸ روز عمل آوری نمونه های میدانی - تکی با درصد وزنی ۱۰٪ سیمان دارای مقادیر مقاومت نزدیک تری به نمونه های آزمایشگاهی می باشند، ولی در ۴۲ روز عمل آوری نتایج نمونه های گروهی (تجمیعی) به نمونه های آزمایشگاهی بسیار نزدیک شده اند.



شکل ۱۹: منحنی تنش-کرنش برای نمونه های با ۱۰٪ سیمان شامل: (الف) ۲۸ روز عمل آوری، (ب) ۴۲ روز عمل آوری.
Figure 19: Stress-strain curve for samples with 10% cement including: (a) 28 days of curing, (b) 42 days of curing.

با توجه به نتایج بدست آمده برای نمونه های آزمایشگاهی و صحرایی در شکل های فوق مشخص شد که نتایج آزمایشگاهی مقادیر بالاتری از مقاومت را نسبت به مقادیر صحرایی ثبت کرده اند، که این موضوع را می توان نتیجه اختلاط یکنواخت تر و همگن تر خاک و مصالح اختلاط در کل ارتفاع و حجم نمونه و سرانجام مقاومت بالاتر در حین نمونه سازی آزمایشگاهی دانست. همچنین این نتیجه در توافق کامل با یافته های موجود در ادبیات فنی موضوع است [۱]. ضریب تبدیل مقاومت نمونه های آزمایشگاهی به صحرایی برای تنش نقطه شکست را می توان برای در صدهای مختلف مواد افزودنی در سن ۲۸ روزه به شرح موارد جدول ۲ ارائه نمود. همچنین به طور مشابهی ضریب تبدیل مقاومت نمونه های آزمایشگاهی به صحرایی برای تنش نقطه شکست را می توان برای در صدهای مختلف مواد افزودنی در سن ۴۲ روزه به شرح مقادیر مندرج در جدول ۲ ارائه نمود.

جدول ۲: ضریب تفاوت (تبدیل) مقاومت نمونه آزمایشگاهی به صحرایی با ۲۸ و ۴۲ روز عمل آوری.

Table 2: The coefficient of difference (conversion) of the strength of the laboratory sample to the field with 28 and 42 days of curing.

درصد افزودنی	درصد ماده افزودنی چسباننده بر حسب وزن کل نمونه ها		
	۶	۸	۱۰
نوع نمونه ها			
نسبت مقاومت آزمایشگاهی به مقاومت صحرایی (آزمونه های ۲۸ روزه)			
نمونه تکی	۲/۲۳	۲/۰۶	۱/۱۱
نمونه گروهی (تجمیعی)	۲/۴۱	۱/۸۵	۲/۳۳
نسبت مقاومت آزمایشگاهی به مقاومت صحرایی (آزمونه های ۴۲ روزه)			
نمونه تکی	۱/۷۵	۱/۲۹	۲/۴۷
نمونه گروهی (تجمیعی)	۲/۲۹	۱/۱۵	۱/۵۰

بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۲ قبلی، رابطه محاسبه ضریب تبدیل داده های میدانی به آزمایشگاهی و بالعکس، به شکل کلی زیر قابل بیان است:

$$UCS_{Laboratory} = C_{convert} \cdot UCS_{Field} \quad (1)$$

که در رابطه فوق $UCS_{Laboratory}$ مقاومت تک محوری محصورنشده نمونه آزمایشگاهی (MPa)، $C_{convert}$ ضریب تبدیل مقاومت و UCS_{Field} مقاومت نمونه میدانی (MPa) است. بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۲ در قبل، ضرایب تبدیل نتایج مقاومت صحرایی (میدانی) به آزمایشگاهی نمونه ها اعدادی مابین به طور کمینه ۱/۱۱ تا بیشینه ۲/۴۷ است. در واقع نتایج نشان می دهد که ضریب تبدیل مقاومت نمونه ها، به طور کلی وابسته به درصد چسباننده، تعداد روزهای عمل آوری نمونه و چیدمان اجرای ستون های اختلاط عمیق است. چنانچه مشاهده می شود ضریب تبدیل، با افزایش روزهای عمل آوری از ۲۸ به ۴۲ روز در اغلب موارد و با درصدهای مختلف چسباننده سیمانی، کاهش می یابد. علت این موضوع پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون سیمان و وقوع کامل تر واکنش های پوزولانی سیمان-کالی های رس لاغر، با گذشت زمان بیشتر است. همچنین تغییرات نسبت مقاومت آزمایشگاهی و صحرایی در نمونه های تکی نسبت به نمونه های گروهی، شاخص تر و محسوس تر است. دلیل عمده وقوع این موضوع نیز می تواند ناشی از اثرات گروه و همپوشانی های اجرایی ستون های اختلاط مجاور یکدیگر، در چیدمان های ساعتی باشد. از سویی به دلیل دقت مناسب انجام آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی در این مطالعه، میزان اختلاف مقاومت نمونه های مشابه آزمایشگاهی و صحرایی، بیشتر از ۲/۵ برابر نشده است. بر اساس ارزیابی مراجع معتبر [۱۱]، در برخی موارد میزان اختلاف ها بیشتر از این مقادیر نیز گزارش شده است.

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه نمونه های متعدد ستون های اختلاط عمیق تکی و گروهی مصالح خاک-سیمان و خاک-آهک در خاک رسی لاغر به وسیله آزمون مقاومت فشاری نامحصور مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج جامع این پژوهش، بدست آوردن طرح اختلاط یکسان و یکنواخت در مقیاس صحرایی کار بسیار دشواری است و آزمونه هایی که در شرایط آزمایشگاه تولید می شوند، می توانند شامل کنترل های دقیق تری باشند. به طور کلی کنترل طرح اختلاط در مقیاس صحرایی و عملیات در حجم بزرگ، در برخی موارد تقریباً غیرممکن است، به ویژه زمانی که درصدهای مشخصی از مواد اختلاط در یک تناسب وزنی مورد استفاده قرار می گیرد. هیچگاه نمی توان اطمینان حاصل کرد که مصالح اختلاط عمیق به خوبی با یکدیگر مخلوط شده اند و مخلوط در تمام نقاط توزیع ماده چسباننده یکسانی دارد. همه شرایط نسبی و وابسته به وضعیت محیطی از جمله میزان فشار تزریق، تداوم زمانی فشار تزریق، میزان آب

اختلاط، درجه حرارت، روانی دوغاب (گروت)، کارایی و پایداری دوغاب، سرعت جریان دوغاب، دانه بندی و توزیع اندازه ذرات مصالح خاک درجا و میزان مهارت افراد اجرایی است [۱].

در این مطالعه، موضوع اختلاط عمیق در دو حوزه مدلسازی های المانی آزمایشگاهی، عملیات بزرگ-مقیاس صحرائی و ارزیابی نمونه های آزمایشگاهی خاک-سیمان و خاک-آهک مورد تحقیق قرار گرفته است. شرایط حاضر نسبی و وابسته به مسائلی از جمله میزان فشار تزریق، تداوم زمانی فشار تزریق، میزان آب اختلاط، درجه حرارت، روانی، کارایی و پایداری دوغاب، سرعت جریان دوغاب، دانه بندی و توزیع اندازه ذرات مصالح خاک درجا و میزان مهارت افراد اجرایی است. به طور کلی برخی از مهم ترین نتایج این مطالعه، به شرح موارد زیر هستند:

۱- با افزایش درصد آهک، میزان تغییر شکل های متناظر نقطه شکست افزایش پیدا کرده اند. رخداد این موضوع مخالف حالت اختلاط خاک با چسباننده سیمانی است. یعنی رفتار تنش-کرنش نمونه های اختلاط با درصد وزنی آهک بیشتر، به سمت رفتار با شکل پذیری بیشتر متمایل می شوند.

۲- مقادیر تغییر شکل لحظه شکست نمونه با افزایش درصد وزنی سیمان طرح اختلاط کمتر شده اند. این به این معنی است که افزایش بیش از ۶٪ سیمان به مخلوط، باعث شکننده شدن نمونه های اختلاط خاک-سیمان پس از ۲۸ روز عمل آوری شده است.

۳- افزایش زمان عمل آوری باعث نزدیک شدن مقاومت نهایی تک محوری (فشاری) محصور نشده نمونه ها با درصدهای وزنی مختلف سیمان شده است.

۴- به طور کلی افزایش زمان عمل آوری از ۷ به ۲۸ روز، باعث وقوع دو تغییر مختلف می شود: اول افزایش مقاومت تک محوری نمونه های با درصد وزنی چسباننده کمتر تا حد نمونه های با میزان چسباننده بیشتر و دوم کاهش محدوده کرنش شکست (شکننده تر شدن) در نمونه های با درصد چسباننده بیشتر. مطابق یافته های این مطالعه، هر دو ماده سیمان و آهک نقش قابل توجهی در اتصال ذرات رسی به هم دارند، با این تفاوت که در نمونه های آهکی هیدروکسید کلسیم تشکیل شده Ca(OH)_2 در ایجاد پیوندهای بین ذره ای رسی نقش اساسی ایفا می کند.

۵- در این پژوهش ضرایب تبدیل مقاومت آزمایشگاهی به صحرائی (میدانی) نمونه ها، اعدادی مابین ۱/۱۱ تا ۲/۴۷ بدست آمده است، که این مقادیر وابسته به میزان درصد وزنی چسباننده سیمانی، تعداد روزهای عمل آوری نمونه ها، نوع چیدمان نمونه ها (تکی یا گروهی) در محل اختلاط صحرائی و مواردی از این دست است.

۶- مراجع

- [1] Federal highway administration design manual: deep mixing for embankment and foundation support, (OCTOBER 2013). FHWA-HRT-13-046, (2013) p 105.
- [2] B. Shu, H. Gong, S. Chen et al., Case Study of Solid Waste Based Soft Soil Solidifying Materials Applied in Deep Mixing Pile, Buildings, 12 (8) (2022) 01193.
- [3] T.O. Ho, W.B. Chen, J.H. Yin, P.C. Wu, D.C.W. Tsang, Stress-Strain behaviour of Cement-Stabilized Hong Kong marine deposits, Construction and Building Materials, 274 (2021) 122103.
- [4] T.T. Quang, N.L. Nguyen and T.Q.N. Nguyen, Mechanical behavior of Vinh Long soil mixed with cement, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 869 (2020) 072004.
- [5] K. Suganya, P.V. Sivapullaiah, Compressibility of remoulded and cement-treated Kuttanad soil, Soils and Foundations, 60(2020) 697-704.
- [6] M.M. Zakaria et al., Stabilization of Soft Clay Soil by Deep Mixing, Life science journal, 17(3) (2020)1-15.
- [7] K. Yao, Y. Pan, L. Jia, J.T. Yi, J. Hu and C. Wu, Stength evaluation of marine clay stabilized by cementitious binder, Marine Georesources & Geotechnology, 1064-119x(print) (2019) 1521-0618.
- [8] H. Canakci et al., Stabilization Effect of Glass Powder Added Grout for Deep Mixing of Marginal Sand with Clay, Journal of Arab J Sci Eng., (2017).
- [9] F. Wissem, H. Zargayouna, S. Boussetta, M. Bouassida, Experimental Study of Tunis Soft Soil Improved by Deep Mixing Column, Geotechnical and Geological Engineering, 35(3) (2017) 931-947.
- [10] K. Yao et al., Settlement evaluation of soft ground reinforced by deep mixed column, International Journal of Pavement Research and Technology, 9 (2016) 460-465.

- [11] S.L. Shen, K. Miura K, H. Koga, Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation, *Can. Geotech. J.*, 40 (2003) 293-307.
- [12] M. Smaeili, and H. Khajehei, Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns, *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5) (2016) 651-659.
- [13] A. Wonglert, and P. Jongpradist, Impact of reinforced core on performance and failure behavior of stiffened deep cement mixing piles, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 93-104.
- [14] H. Gullu, H. Canakci, I. Zangana, Use of cement based grout with glass powder for deep mixing, *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 12-20.
- [15] Y. Yu, R. Bathurst, Modelling of geosynthetic-reinforced column-supported embankments using 2D full-width model and modified unit cell approach, *Geotextiles and Geomembranes*, xxx (2017) 1-18.
- [16] Y. Lio, J. Hu, Y. Li, L. Li, Statistical evaluation of the overall strength of a soil-cement column under axial compression, *Construction and Building Materials*, 132 (2017) 51-60.
- [17] P. Jamsawang et al., Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows, *Engineering Geology*, 188 (2015) 159-167.
- [18] R. Ignat et al., Two- and three-dimensional analyses of excavation support with rows of dry deep mixing columns, *Computers and Geotechnics*, 66 (2015) 16-30.
- [19] G.B. Ye, Y.S. Cai, and Q. Liu, Field Test on Stiffened Deep Mixed Columns, *Engineering Geology for Society and Territory*, Vol 4: Marine and Coastal Processes, ed. G. Lollino, et al. Cham: Springer Int Publishing Ag., (2014) 12-15.
- [20] R.S. Madhyannapu, and A.J. Puppala, Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140 (9) (2014) p. 15.
- [21] F. Szymkiewicz et al., Optimization of strength and homogeneity of deep mixing material by the determination of workability limit and optimum water content, *Canadian Geotechnical Journal*, 50 (10) (2013) 1034-1043.
- [22] W. Raongjant, and M. Jing, Field testing of stiffened deep cement mixing piles under lateral cyclic loading, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12 (2) (2013) 261-265.
- [23] J.J. Chen et al., Field Tests, Modification, and Application of Deep Soil Mixing Method in Soft Clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (1) (2013) 24-34.