

مدول برشی کرنش کوچک ماسه های تزریق شده با دوغاب زئولیت-سیمان

افشین کردنائیج^{۱*}، رضا ضیایی موید^۱، مجید سلیمانی^۲

^۱ دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۲ دانشکده ی علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۲۷

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۰-۱۶

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۰۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

سیمان

زئولیت

ماسه

تزریق

مدول برشی کرنش کوچک

خلاصه: تولید سیمان یکی از مهمترین منابع انتشار گاز دی اکسید کربن در جهان است و انرژی زیادی نیز مصرف می کند. بنابراین، جایگزین نمودن بخشی از آن با مصالح ارزان تر و مطلوب محیط زیست از قبیل زئولیت از اهمیت بالایی برخوردار است. مدول برشی کرنش کوچک (G_0) خاک پارامتری مهم در بسیاری از زمینه های مهندسی ژئوتکنیک می باشد. در این تحقیق، یک سری آزمایش المان خمشی بر روی نمونه های ماسه ی تزریق شده با دوغاب زئولیت-سیمان انجام شد تا اثر سمانتاسیون بر G_0 ماسه های تزریق شده مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که G_0 نمونه های تزریق شده با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با زئولیت (Z) تا ۳۰٪ زیاد می شود. پس از این مقدار (Z_{30})، افزایش در میزان زئولیت سبب کاهش G_0 می شود. همچنین، در همه ی نسبت های آب به مصالح سیمانی (W/CM) و Z در دوغاب، با افزایش اندازه ی ذرات ماسه، G_0 کاهش می یابد. مقدار G_0 متناظر با Z_{30} در ماسه ی D11 (کوچک ترین ذرات) تزریق شده با دوغاب حاوی نسبت آب به مصالح سیمانی ۳، ۵ و ۷ به ترتیب ۲۱/۷، ۱۶/۷ و ۱۲/۵ برابر ماسه ی خالص شده است. کمترین G_0 در نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی Z_{90} و W/CM برابر با ۷ مشاهده شده است که این مقدار برای ماسه های D11، D1، D2 و D16 به ترتیب ۲/۱۶، ۱/۲ و ۱/۱۹ برابر G_0 ماسه ی متناظر در حالت تثبیت نشده است. با جایگزینی ۶۰٪-۵۰ سیمان با زئولیت در دوغاب تزریق، کاهش نسبی در G_0 نمونه های تزریق شده با سیمان تنها ایجاد نمی شود. بنابراین، از نظر اقتصادی و زیست محیطی، جایگزین نمودن این مقدار سیمان با زئولیت حائز اهمیت می باشد.

۱- مقدمه

بهسازی خاک، تکنیکی برای بهبود مشخصات مهندسی خاک است. امروزه کاربرد مصالح و تکنیک تزریق در بخش های مربوط به ساخت و ساز بسیار رایج است. انواع مصالح تزریق از قبیل سیمان، سیمان و ماسه، رُس و سیمان، سیمان سرباره، سنگ گچ و سیمان، اپوکسی و پلیمر، رُس و آسفالت، پودر خاکستر سوخت و بسیاری از کلوئیدها و مصالح شیمیایی با ویسکوزیته ی پایین مورد استفاده قرار می گیرند [۱].

تزریق نفوذی با سیمان یکی از روش های بهسازی خاک در مهندسی ژئوتکنیک است که به وسعت جهت کاهش نفوذپذیری،

بهبود خواص مکانیکی و تثبیت خاک بدون تغییر در ساختار آن استفاده می شود. این روش برای بهسازی خاک زیر فونداسیون سازه های موجود و مقاوم سازی خاک سست به صورت درجا کاربرد دارد. همچنین، از تزریق نفوذی به طور معمول جهت افزایش مقاومت روانگرایی خاک زیر سازه های موجود استفاده می شود. در مقایسه با سایر زمینه های مهندسی عمران، تکنیک تزریق نسبتاً جدید است و آزمایش ها و تحقیقات جدیدی جهت توسعه ی آن نیاز است. مرور تجربی تلاش های بین المللی در این زمینه نشان می دهد که کارهای تحقیقاتی معدودی در رابطه با تزریق در مصالح درشت دانه انجام شده است [۲].

تزریق پذیری خاک به معنی قابلیت نفوذ دوغاب در فضاهای خالی

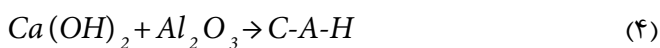
* نویسنده عهده دار مکاتبات: a.kordnaej@edu.ikiu.ac.ir



$Ca(OH)_2$ داخل محلول به صورت کریستال های بزرگ در منافذ خالی رسوب می کنند.

علی رغم استفاده ی گسترده از سیمان در بهسازی خاک ها، به کار بردن این روش مشکلاتی را در پی دارد. از دیدگاه زیست محیطی، صنعت سیمان سبب انتشار حدود ۷ درصد گاز کربنیک در جهان می شود [۲۲]. همچنین، برای تولید سیمان انرژی زیادی مصرف می شود؛ به طوری که صنعت سیمان ۱۵٪ از کل انرژی مصرفی در ایران را به خود اختصاص داده است. متوسط انرژی مصرفی برای تولید سیمان در ایران 840 kcal در هر کیلوگرم از کلینکر و 112 kWh در هر تن سیمان می باشد [۲۳]. به منظور به کار بردن مصالح ارزان قیمت تر و سازگارتر با محیط زیست، می توان از مصالح سیمانی مکمل مانند پوزولان های طبیعی به جای درصدی از سیمان استفاده نمود. به این ترتیب، بخشی از سیمان با مصالحی جایگزین می شود که نه تنها عموماً ارزان قیمت تر از سیمان می باشند و احتیاجی به عملیات حرارتی پرهزینه ندارند، بلکه موجب بهبود خواص سیمان از دیدگاه های مختلف مکانیکی و پایایی می گردند.

پوزولان ها، مصالح سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی هستند که به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارند، ولی در صورت ریزدانه بودن و حضور رطوبت، با $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراسیون سیمان در دمای معمولی واکنش شیمیایی انجام داده و تشکیل ترکیباتی می دهند که دارای خاصیت چسبندگی هستند [۲۴]. همچنین، $Ca(OH)_2$ می تواند با آلومین واکنش انجام داده و تولید ژل هیدرات آلومینات کلسیم ($C-A-H$) نماید که دارای خاصیت چسبندگی می باشد. واکنش های پوزولانی به صورت زیر است [۲۵]:

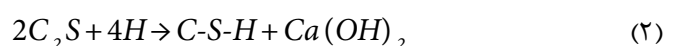
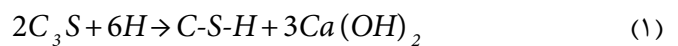


ژئولیت ها از جمله مصالح پوزولانی هستند که به علت خواص جالب و منحصر به فرد آنها از قبیل سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و توانایی ذخیره ی گرما بین سیکل های هیدراتاسیون (جذب آب) و دهیدراتاسیون (آب دهی)، در بسیاری از کارهای صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند [۲۶]. ژئولیت طبیعی به مقدار زیادی در کشورهای مختلف از جمله ایران یافت می شود و می تواند به راحتی استخراج و فرآوری شود [۲۷]. اگر ژئولیت ها به صورت محلی

آن تحت فشار مشخصی است. قابلیت نفوذ دوغاب در خاک وابسته به توزیع دانه بندی ذرات خاک و دوغاب، میزان ریزدانه ی خاک، فشار تزریق، نسبت آب به سیمان یا ویسکوزیته ی دوغاب، تراکم نسبی، نسبت تخلخل و هدایت هیدرولیکی خاک است. ویسکوزیته ی دوغاب و فشار تزریق، طول تزریق را محدود می کند [۳]. مطالعات متعددی بر روی مصالح، خصوصیات، تجهیزات و روش تزریق دوغاب سیمانی و همچنین تزریق پذیری انجام شد [۴-۱۴].

یکی از پارامترهای مهم در عملیات تزریق، ویسکوزیته ی دوغاب می باشد. قابلیت پمپاژ و تزریق به منظور نفوذ در منافذ و ترک ها به شدت به ویسکوزیته ی دوغاب بستگی دارد؛ بنابراین، ویسکوزیته ی دوغاب پارامتر مهمی در طراحی تزریق می باشد. استفاده از فوق روان کننده ها در دوغاب های سیمانی، در روش های پیشرفته ی تزریق از اهمیت زیادی برخوردار است. این افزودنی ها نقش مهمی را در تولید دوغاب های با کارایی بالا و افزایش ویسکوزیته ی آن ها به منظور جریان یافتن مناسب در گمانه، منافذ و ترک های سنگ و تضمین تزریق مؤثر دارند [۱۵]. از این رو، محققین مختلف از فوق روان کننده در تهیه ی دوغاب های سیمانی استفاده نمودند [۱۱ و ۱۳ و ۱۶-۲۰].

افزودن سیمان به خاک، واکنش های شیمیایی مختلفی را در پی دارد که منجر به تغییرات کوتاه مدت و طولانی مدت در خاک می شود. مهم ترین این واکنش ها، واکنش هیدراسیون و واکنش پوزولانی هستند. محصول اصلی تشکیل شده از هیدراتاسیون سیمان پرتلند، ژل هیدرات سیلیکات کلسیم ($C-S-H$) است که از هیدراتاسیون ترکیبات سیلیسی سیمان حاصل می شود. محصول مهم دیگر، هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) است (Trhlíková, 2013). واکنش های هیدراتاسیون شامل دو واکنش زیر است [۲۱]:



در واکنش های فوق، $H: H_2O$ و $S: SiO_2$ ، $C: CaO$ هستند. محصولات هیدراتاسیون منجر به تشکیل فاز جامد سخت می شوند. به محض هیدراتاسیون، ژل $C-S-H$ باعث افزایش مقاومت می شود. ژل ها، فیبرهایی را در سطح ذرات سیمان تشکیل می دهند؛ منافذ بین ذرات سیمان را پر می کنند و سبب سخت شدن آن می شوند.

G_0 خاک های تزریق شده با دوغاب سیمانی با استفاده از آزمایش BE انجام شد. Dano و Hicher [۳۸] برای تعیین G_0 ماسه ی تزریق شده با میکروسیمان از آزمایش BE استفاده نمودند. نتایج نشان داد که G_0 نمونه های تزریق شده بیشتر از ۱۰ برابر نمونه های تثبیت نشده است. همچنین، G_0 تحت تأثیر تنش همه جانبه قرار ندارد. Pantazopoulos و Atmatzidis [۱۹] با انجام آزمایش BE بر روی ماسه های تزریق شده با دوغاب سیمانی مشاهده نمودند که تزریق سبب افزایش قابل توجه در G_0 ماسه می شود. آن ها اشاره نمودند که با افزایش فشار همه جانبه تا 400 kPa ، G_0 نمونه های تزریق شده بدون تغییر باقی می ماند.

محققان مختلف مطالعاتی جهت تعیین پارامترهای مقاومتی خاک های تثبیت شده با سیمان-زئولیت به روش مخلوط کردن انجام داده اند [۴۳-۳۹]. با این حال، مطالعه ای در زمینه ی تزریق دوغاب زئولیت-سیمان در خاک به منظور بررسی اثر آن بر پارامترهای مختلف خاک از جمله مدول برشی کرنش کوچک (G_0) یافت نشده است. بر این اساس، در این تحقیق، با انجام یک سری تست های آزمایشگاهی المان خمشی به ارزیابی تأثیر تزریق دوغاب زئولیت-سیمان بر G_0 نمونه های ماسه ی سست ($D_r = 30\%$) پرداخته می شود.

۲- پارامترهای موثر بر تزریق

عوامل متعددی ممکن است بر روی تزریق و پارامترهای مختلف خاک تزریق شده تأثیرگذار باشند. یکی از پارامترهای مؤثر بر تزریق، نسبت آب به مصالح سیمانی (W/CM) در دوغاب است. W/CM بالای دوغاب می تواند تزریق پذیری را آسان کند، ولی پایداری دوغاب به علت رسوب زیاد ذرات سیمانی و یا آب انداختن کم می شود [۴۴]. در مطالعات انجام شده بر روی خاک های تزریق شده با مصالح سیمانی، از W/CM های مختلفی استفاده شد. در این زمینه، Dano و Hicher [۳۸] از ۵/۸، Delfosse-Ribay و همکاران [۴۵] از ۸، و Yildiz و Soganci [۴۶] از ۱ به عنوان مقدار W/CM برای تهیه ی دوغاب استفاده نمودند. Schwarز و Krizek [۸]، Mutman و Kavak [۱۰]، و Pantazopoulos و همکاران [۱۱] نشان دادند که با افزایش W/CM در دوغاب، مقاومت فشاری محدود نشده ی (UCS) ماسه ی تزریق شده به علت ساختار نسبتاً سست آن کاهش می یابد. Dano و Derache [۴۷] از $W/$

در دسترس باشند، بسیار مقرون به صرفه (در بعضی مواقع ارزان تر از ماسه) هستند [۲۸]. گزارش شده است که در ساخت 386 km کانال در لس آنجلس در سال ۱۹۱۲، با جایگزینی تقریباً ۲۵٪ از سیمان پرتلند با زئولیت، یک میلیون دلار در هزینه صرفه جویی شده است. مهمترین کاربرد زئولیت در صنعت سیمان و بتن در چند سال گذشته در چین گزارش شده است. برای این منظور، در سال ۲۰۰۵ کل زئولیت مصرفی در چین ۳۰ میلیون تن بوده است. همچنین، استفاده از زئولیت طبیعی به عنوان مصالح پوزولانی اخیراً در ایران رشد زیادی یافته است [۲۹]. بنابراین، به منظور کاهش هزینه ی تولید سیمان و همچنین کاهش اثرات زیست محیطی سیمان پرتلند، می توان از زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تثبیت خاک استفاده نمود.

آزمایش المان خمشی (BE) یک آزمایش غیرمخرب است که برای تعیین سرعت موج برشی (V_s) و متعاقباً مدول برشی کرنش کوچک (G_0) در آزمایشگاه کاربرد دارد. پیشرفت های اخیر در کیفیت ثبت سیکنال دیجیتال و تکنیک های آنالیز پیشرفته، اهمیت آزمایش BE را افزایش داده است. با استفاده از V_s ، مدول برشی کرنش کوچک (G_0) از رابطه ی زیر تعیین می شود.

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (5)$$

از مزایای استفاده از G_0 این است که یکی از محدود پارامترهایی می باشد که هم در محل و هم در آزمایشگاه قابل تعیین است. اگر رابطه ای برای G_0 در آزمایشگاه به دست آید، این رابطه در محل نیز می تواند مورداستفاده قرار گیرد. بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی در دهه های گذشته، انجام آزمایش BE بر خاک های تثبیت شده با مصالح سیمانی برای تعیین V_s و متعاقباً G_0 توجه زیادی را به خود جلب نموده است. Acar و El-Tahir [۳۰]، Saxena و همکاران [۳۱]، Chang و Woods [۳۲]، Fahey و Sharma [۳۳]، و Seng و Tanaka [۳۴] با انجام آزمایش BE نشان دادند که افزایش سمانتاسیون، G_0 ماسه ها را زیاد می کند. Coop و Cuccovillo [۳۵]، Baig و همکاران [۳۶]، Fernandez و Santamarina [۳۷]، و Fahey و Sharma [۳۳] گزارش نمودند که مقدار G_0 در ماسه های سمانتانه تا یک تنش آستانه که در آن تخریب ساختار یا باند رخ می دهد، مستقل از تنش مؤثر متوسط و وابسته به سمانتاسیون است. تحقیقات معدودی به منظور ارزیابی V_s یا

CM برابر با ۲/۳، ۳/۳ و ۵/۸ برای تزریق دوغاب میکروسیمان در نمونه‌های خاک ماسه‌ای استفاده نمودند. نتایج حاکی از این بود که افزایش W/CM سبب کاهش خطی مقادیر خواص دینامیکی شده است. Pantazopoulos و Atmatzidis [۱۹] به بررسی خواص دینامیکی ماسه‌های تزریق‌شده با دوغاب سیمان با نسبت آب به سیمان ۱، ۲ و ۳ پرداختند. با افزایش W/CM ، مدول برشی ماسه‌ی تزریق‌شده کاهش یافت. این اثر برای نسبت میرایی برعکس بوده است.

پارامتر تأثیرگذار دیگر بر رفتار خاک‌های تزریق‌شده با دوغاب‌های سیمانی، زمان عمل‌آوری نمونه‌های تزریق‌شده است. Mutman و Kavak [۱۰] با بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های تزریق‌شده با دوغاب سیمان نشان دادند که مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه حداقل ۱/۵ برابر نمونه‌های ۷ روزه است. Mollamahmutoglu و Yilmaz [۴۸] بیان نمودند که UCS نمونه‌های تزریق‌شده با دوغاب میکروسیمان با زمان عمل‌آوری افزایش یافت. با این حال، نرخ افزایش مقاومت تا ۲۸ روز زیاد، اما بعدازآن به‌شدت کم شد. Markou و Droudakis [۲۰] با انجام تزریق دوغاب سیمانی در نمونه‌های ماسه مشاهده نمودند که افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ تا ۹۰ روز تأثیر کمی بر مقاومت ماسه‌های تزریق‌شده دارند. Mollamahmutoglu و Avcı [۱۴] بیان نمودند که مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای تزریق‌شده با میکروسیمان با افزایش زمان عمل‌آوری زیاد می‌شود. Yildiz و Soganci [۴۶] به‌سازی خاک‌های دانه‌ای با تزریق سیمان را در زمان‌های ۷ و ۲۸ روز موردبررسی قرار دادند. بر اساس نتایج تحقیق آن‌ها، مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه دو برابر نمونه‌های ۷ روزه بوده است. Avcı و Mollamahmutoglu [۴۹] مشاهده نمودند که نمونه‌های ماسه‌ای تزریق‌شده با دوغاب سیمانی، ۸۳٪ از مقاومت نهایی (۱۵۰ روزه) خود را ظرف ۲۸ روز و ۹۵٪ آن را ظرف ۵۶ روز کسب کردند. اندازه‌ی ذرات ماسه پارامتر مهمی است که به‌طور اساسی نفوذ دوغاب و حداکثر فشار تزریق را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۳]. Dano و Derache [۴۷] تأثیر اندازه ذرات ماسه بر خواص دینامیکی ماسه‌ی تزریق‌شده با سیمان را موردبررسی قرار دادند. افزایش اندازه‌ی ذرات ماسه تأثیر مثبتی بر خواص دینامیکی ماسه‌ی تزریق‌شده داشت. Kumar [۵۰] رفتار مهندسی خاک‌های ماسه‌ای سست تزریق‌شده

با سیمان را مورد تحقیق قرار داد. نتایج نشان داد که اگرچه در میزان سیمان کم، ماسه با اندازه‌هی ذرات متوسط مقاومت برشی بیشتری نسبت به ماسه‌هی درشت نشان می‌دهد، در مقدار سیمان زیاد، ماسه‌ی درشت دانه مقاومت بالاتری دارد. Pantazopoulos و Atmatzidis [۱۹] خواص دینامیکی دو نوع ماسه‌ی تمیز بین الک‌های ۲۵-۱۴ و ۵۰-۲۵، تزریق‌شده با میکروسیمان را مورد تحقیق قرار دادند. با افزایش اندازه‌ی ذرات ماسه، مدول برشی کم و نسبت میرایی زیاد شد. Markou و Droudakis [۱۹] نشان دادند که مقاومت ماسه‌ی تزریق‌شده با کاهش اندازه‌ی مؤثر ذرات به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. Avcı و Mollamahmutoglu [۴۹] مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای تزریق‌شده با سیمان بسیار ریزدانه را بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که UCS ماسه‌های متوسط تزریق‌شده در مقایسه با ماسه‌های ریز کمتر است.

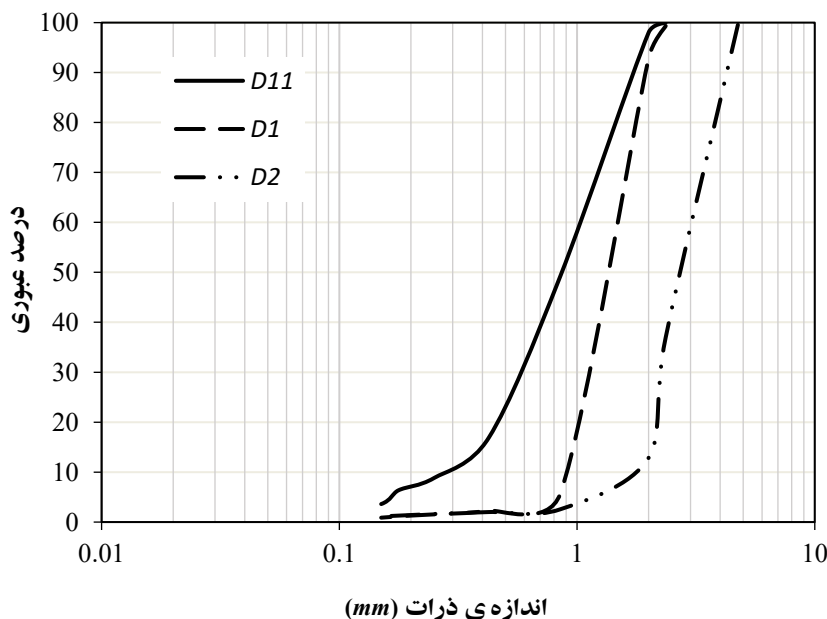
۳- مصالح و روش‌ها

۳-۱- مصالح

در این پژوهش، ماسه‌های سیلیسی فیروزکوه $D11$ ، $D1$ و $D2$ برای تست‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفتند. این ماسه‌ها به‌وسیله‌ی همه‌ی دوغاب‌های مورد استفاده قابلیت تزریق دارند. منحنی‌های دانه‌بندی ماسه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این منحنی‌ها، ماسه‌های مورد استفاده دارای دانه‌بندی یکنواخت و فاقد ریزدانه هستند. در جدول ۱، خلاصه‌ای از مشخصات ماسه‌های مورد استفاده آورده شده است.

از سیمان پرتلند نوع ۲ آبیک و ژئولیت طبیعی (ریزتر از الک ۲۰۰) از نوع کلینوپتیلولیت تهیه شده از شرکت نگین پودر سمنان که مربوط به کوه‌های شمال سمنان است، استفاده شد. چگالی مخصوص (G_p) ژئولیت و سیمان به ترتیب ۲/۲ و ۳/۱ است. برای تعیین منحنی دانه‌بندی ژئولیت از آزمایش هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D7928 [۵۵] استفاده شد. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ژئولیت را نشان می‌دهد. ترکیبات شیمیایی مصالح سیمانی (سیمان و ژئولیت) در جدول ۲ ارائه شده است.

به‌منظور بهبود کارایی و تزریق‌پذیری دوغاب‌ها، از فوق‌روان‌کننده (نسل جدید افزودنی براساس شیمی پلی‌کربوکسیلات) تهیه شده از شرکت نامیکاران قزوین استفاده شد. مقدار مصرف این



شکل ۱. منحنی های دانه بندی ماسه های مورد استفاده
 Fig. 1. The grain size distribution curves of the used sands

جدول ۱. مشخصات ماسه های مورد استفاده
 Table 1. Properties the used soils

مشخصه	D11	D1	D2
D_{50} (mm) (ASTM D2487 [۵۱])	۰/۸۷	۱/۴۵	۲/۶۵
C_u (ASTM D2487 [۵۱])	۴/۲۵	۱/۴۶	۲/۱۸
C_c (ASTM D2487 [۵۱])	۱/۱۹	۰/۹۵	۱/۰۳
G_s (ASTM D854 [۵۲])	۲/۶۵	۲/۶۲	۲/۶۰
e_{min} (ASTM D4253 [۵۳])	۰/۵۳۳	۰/۵۲۷	۰/۴۳۱
e_{max} (ASTM D4254 [۵۴])	۰/۹۰۱	۰/۸۴۹	۰/۷۴۸
طبقه بندی خاک (ASTM D2487 [۵۱])	SP	SP	SP

D_{50} : چگالی مخصوص: G_s ; ضریب دانه بندی: C_c ; ضریب یکنواختی: C_u ; اندازه ی متوسط ذرات خاک: D_{50} ; نسبت تخلخل حداکثر: e_{max} ; نسبت تخلخل حداقل: e_{min}

رابطه ۷ وزن خاک مورد نیاز تعیین شد.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (6)$$

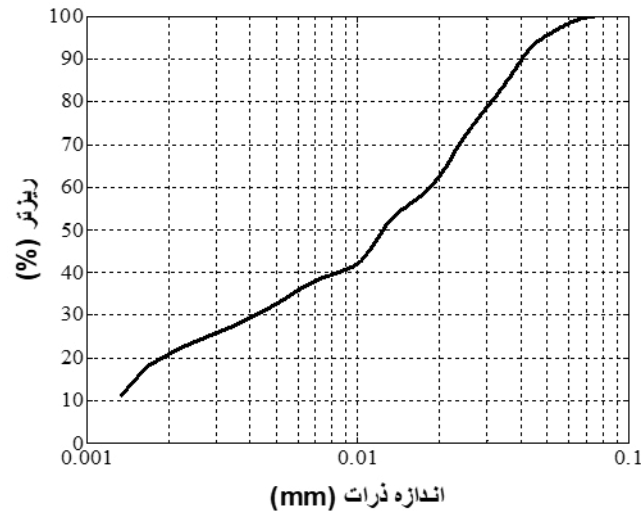
$$W = \frac{G_s \times V}{1 + e} \quad (7)$$

در روابط فوق e_{max} : نسبت تخلخل حداکثر خاک، e_{min} : نسبت تخلخل حداقل خاک، e : نسبت تخلخل متناظر با تراکم ۳۰٪، G_s :

فوق روان کننده طبق پیشنهاد شرکت تولیدکننده ۱-۱/۵٪ وزن خشک مصالح سیمانی است، که در این تحقیق از ۱٪ استفاده شد.

۲-۳- تهیه ی نمونه ها

نمونه های ماسه ای در شرایط سست و با تراکم نسبی (D_r) تقریبی ۳۰٪ در قالب های استوانه ای دوتکه از جنس پلکسی به روش ریزش خشک (در سه لایه ی برابر) تهیه شدند. نسبت تخلخل (e) متناظر با ۳۰٪ $D_r \approx 30\%$ از رابطه (۶) به دست آمده، سپس با استفاده از



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی زئولیت مصرفی

Fig. 2. The grain size distribution curve of the used zeolite

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی مصالح سیمانی

Table 2. Chemical properties of cementitious materials

مشخصه	D11	D1	D2
D_{50} (mm) (ASTM D2487 [۵۱])	۰/۸۷	۱/۴۵	۲/۶۵
C_u (ASTM D2487 [۵۱])	۴/۲۵	۱/۴۶	۲/۱۸
C_c (ASTM D2487 [۵۱])	۱/۱۹	۰/۹۵	۱/۰۳
G_s (ASTM D854 [۵۲])	۲/۶۵	۲/۶۲	۲/۶۰
e_{min} (ASTM D4253 [۵۳])	۰/۵۳۳	۰/۵۲۷	۰/۴۳۱
e_{max} (ASTM D4254 [۵۴])	۰/۹۰۱	۰/۸۴۹	۰/۷۴۸
طبقه‌بندی خاک (ASTM D2487 [۵۱])	SP	SP	SP

D_{50} : چگالی مخصوص، G_s : ضریب دانه‌بندی، C_c : ضریب یکنواختی، C_u : اندازه‌ی متوسط ذرات خاک، e_{min} : نسبت تخلخل حداکثر، e_{max} : نسبت تخلخل حداقل

۳-۳- تعیین ویسکوزیته

آزمایش تعیین ویسکوزیته دوغاب‌ها طبق استاندارد ASTM D445 [۵۷] انجام شد. ویسکوزیته‌ی تعدادی از دوغاب‌های استفاده شده در حالت با فوق روان کننده و بدون فوق روان کننده تعیین شد. پارامترهای متغیر در تعیین ویسکوزیته‌ی دوغاب‌های مختلف، درصد جایگزینی سیمان با زئولیت (Z) و نسبت آب به مصالح سیمانی (W/CM) در دوغاب و استفاده یا عدم استفاده از فوق روان کننده در آن‌ها می‌باشد.

۳-۴- تزریق پذیری

مصالح ریزدانه‌ی موجود در دوغاب می‌توانند به راحتی سبب

چگالی مخصوص خاک، V : حجم داخلی قالب (حجم خاک) و W : وزن خشک خاک است.

برای جلوگیری از چسبیدن قالب به نمونه، قبل از ریزش ماسه در قالب، یک ورق طلق نازک در داخل قالب قرار داده شد تا از دست خوردگی نمونه‌ی تزریق شده حین خروج از قالب جلوگیری شود. پایین و بالای قالب با کلاهک‌هایی از جنس PVC که دارای سوراخی برای ورود و خروج دوغاب است، بسته شدند. ابتدا، یک لایه از ماسه‌ی درشت دانه به ضخامت تقریبی $1/7$ cm در داخل کلاهک‌ها ریخته شد تا هنگام تزریق مانند فیلتر سبب پخش دوغاب در کل سطح مقطع نمونه شود [۵۶]. در انتها، کلاهک‌های قالب به وسیله‌ی میله‌هایی بسته شدند.



شکل ۳. تجهیزات تزریق
Fig. 3. Grouting equipment

به وسیله ی کمپرسور هوا تامین شد، از ۲۰ تا ۵۰ kPa متغیر بود. P با افزایش اندازه ی ذرات ماسه، افزایش W/CM و کاهش Z در دوغاب، کاهش می یافت. تزریق زمانی متوقف شد که حجم دوغاب تزریق شده به دو برابر حجم حفرات نمونه های ماسه ی داخل قالب برسد [۱۹ و ۶۱]. بعد از تزریق، شیرهای بالا و پایین نمونه برای جلوگیری از خروج دوغاب بسته شد.

پس از ۴۸ تا ۷۲ ساعت، نمونه ها از قالب خارج شدند. سپس، برای جلوگیری از تغییرات رطوبت و نزدیک شدن به شرایط درجا، نمونه ها درحالی که ورق طلق دور آنها قرار داشت، با ورق پلاستیکی (سلفون) دورپیچ شدند و در کیف پلاستیکی دولایه قرار گرفتند. در انتها، نمونه ها در اتاقی با دمای تقریبی $23^{\circ}C$ برای طی زمان عمل آوری ۹۰ روز نگهداری شدند.

۳-۶- آزمایش فشاری محدود نشده

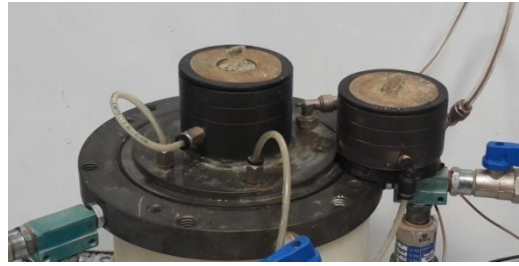
از آزمایش فشاری محدود نشده مطابق ASTM D4219 [۶۲] برای نشان دادن تاثیر زمان عمل آوری بر نمونه های ماسه ی تزریق شده در زمان های عمل آوری ۰،۷، ۲۸ و ۹۰ روز استفاده شد. با انجام یک سری آزمایش فشاری محدود نشده بر روی نمونه های ماسه ی D_{11} تزریق شده با ارتفاع 14 cm و قطر 7 cm ، مقاومت فشاری محدود نشده ی (UCS) نمونه های ماسه ی تزریق شده با دوغاب زئولیت-سیمان تعیین شد.

بسته شدن منافذ بین ذرات خاک شوند [۵۸]. به همین دلیل، اغلب قبل از انجام عملیات تزریق در محل، تزریق پذیری دوغاب سیمانی در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار می گیرد تا مشخصات آن تعیین شود [۵۹ و ۶۰]. در این تحقیق، تزریق پذیری بر حسب توانایی دوغاب برای ورود در منافذ خاک و طی مسافت 1 m مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از لوله ای به طول 1 m و با قطر داخلی $3/8\text{ cm}$ استفاده شد. برای انجام آزمایش تزریق پذیری، اندازه ی متوسط ذرات ماسه (D_{50})، فشار تزریق (P) و همچنین W/CM دوغاب به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند.

۳-۵- تزریق و عمل آوری

تمامی دوغاب ها در این تحقیق با آب آشامیدنی تهیه شدند، زیرا برای استفاده در دوغاب های سیمانی مناسب هستند [۱۹]. پیش از تزریق، در مخزن تزریق دوغاب مقدار کافی آب ریخته (سه برابر حجم منافذ نمونه ی ماسه) و این آب تحت فشار 10 kPa از پایین به نمونه وارد و از بالا خارج شد تا سبب اشباع نمونه شود. عبور جریان آب از نمونه تا زمانی ادامه می یافت که هیچ حباب هوایی از لوله ی خروجی در بالای نمونه مشاهده نمی شد [۴۹].

فوق روان کننده به مقدار ۱٪ وزن خشک سیمان هم زمان با آب به ظرف اختلاط حاوی مصالح سیمانی (زئولیت و سیمان) اضافه شد، سپس محتویات ظرف به مدت حدود ۵ دقیقه به وسیله ی مخلوط کن با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه کاملاً مخلوط شد. از تجهیزات آزمایشگاهی مطابق ASTM D4320/D4320M [۵۶] برای تزریق دوغاب به منظور تهیه ی نمونه های ماسه ی تزریق شده ی کوچک مقیاس استفاده شد. شکل ۳ تجهیزات استفاده شده برای تزریق در نمونه های ماسه را نشان می دهد. پس از مخلوط کردن، دوغاب به مخزن تزریق منتقل شد. در زمان انتقال دوغاب به مخزن و حین تزریق، مخلوط کن داخل مخزن با سرعت ۷۵ دور بر دقیقه می چرخید تا از رسوب مصالح سیمانی جلوگیری شود. درنهایت، دوغاب در نمونه های ماسه ی سست تزریق شد. با توجه به اینکه در ماسه های تزریق شده به روش تزریق نفوذی، مقاومت نمونه ها مستقل از فشار تزریق (P) است [۱۰]، در این تحقیق، حداقل فشار مورد نیاز به عنوان P در نظر گرفته شد. بر اساس متوسط اندازه ی ذرات ماسه (D_{50}) و همچنین W/CM و Z دوغاب، مقدار P که



شکل ۴. المان های خمشی
Fig. 4. Bender elements

۳-۷- آزمایش المان خمشی

در این تحقیق، ۷۱ آزمایش المان خمشی بر روی نمونه های ماسه ی $D11$ ، $D1$ و $D2$ خالص (ثبیت نشده) و تزریق شده با قطر 7 cm و ارتفاع 14 cm ، انجام شد. زمان عمل آوری نمونه های ماسه ی تزریق شده با مصالح سیمانی ۹۰ روز بود.

از یک المان خمشی از نوع موازی در پدستال بالا به عنوان فرستنده و یک المان خمشی از نوع سری در پدستال پایین به عنوان گیرنده استفاده شد. هر دو المان دارای طول 21 mm ، عرض 8 mm و ضخامت 0.6 mm بود. به وسیله دستگاه ایجادکننده موج، یک موج سینوسی $V \pm 10$ و فرکانس 3 kHz تولید شده و به المان خمشی ارسال می شد. این موج باعث ایجاد جابجایی در پیزوالکتریک فرستنده شده و در نتیجه ی این جابجایی، موج برشی در محیط پیوسته تولید می شود. با رسیدن این موج به المان خمشی گیرنده و تغییر شکل در آن، ولتاژی ایجاد می شود که این ولتاژ توسط یک اوسیلوسکوپ قابل مشاهده است. با مقایسه موج ارسالی و دریافتی، سرعت موج قابل محاسبه است. تحقیقات گذشته نشان داده است که کرنش برشی تولید شده در این روش کمتر از 10^{-5} می باشد [۶۳]. شکل ۴ تصویر المان های خمشی را نشان می دهد.

Atmatzidis و Pantazopoulos [۱۹] نشان دادند که V_s نمونه های تزریق شده با افزایش تنش محصور کننده تا 400 kPa تغییر نمی یابد. براین اساس، در این تحقیق، آزمایش های المان خمشی بر روی نمونه های تزریق شده ی محدود نشده انجام شد. از آنجایی که اغلب نمونه های تزریق شده بسیار سخت بودند و قرار دادن المان های خمشی در داخل آن ها با فشار غیر ممکن بود، قبل از انجام آزمایش، یک حفره ی کوچک در دو انتهای نمونه های تزریق شده ایجاد و با گچ تازه پر شد. سپس، المان های خمشی با

فشار به داخل گچ تازه وارد شدند، تا از تماس مناسب بین المان ها و نمونه های تزریق شده اطمینان حاصل شود [۱۹ و ۳۶]. در جدول ۳ شرایط نمونه ها برای آزمایش المان خمشی ارائه شده است.

۳-۸- آنالیز ریزساختار

ریزساختار یک ماده با مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن وابستگی متقابل دارد [۶۴]. برای بررسی ریزساختار نمونه های تزریق شده و رفتار باندهای سیمانی بین دانه های خاک و مصالح سیمانی، تست های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی نمونه های ماسه ی تزریق شده انجام شد. به این منظور، قطعات کوچکی از مرکز نمونه های تزریق شده مورد آزمایش SEM قرار گرفت.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آزمایش تعیین ویسکوزیته ی دوغاب ها

در دوغاب های حاوی فوق روان کننده، به مقدار 1% وزن خشک مصالح سیمانی (ژئولیت و سیمان)، فوق روان کننده به همراه مقدار وزنی آب مورد نیاز، به مصالح سیمانی اضافه شدند و به مدت ۵ دقیقه در ظرف حاوی مخلوط کن با سرعت 1000 دور بر دقیقه به طور کامل مخلوط شدند. در جدول ۴ ویسکوزیته ی ظاهری دوغاب های مورد استفاده در حالت با فوق روان کننده و بدون فوق روان کننده برای سرعت 60 دور بر دقیقه در ابتدای تزریق ($t=0$) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، ویسکوزیته ی دوغاب های بدون فوق روان کننده به خصوص در نسبت آب به مصالح سیمانی (W/CM) پایین و درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت (Z) بالا، زیاد است و برای تزریق مناسب نمی باشد.

مطابق جدول ۴، فوق روان کننده تاثیر بسزایی بر کاهش

جدول ۳. شرایط نمونه ها برای آزمایش المان خمشی
Table 3. Specimens' conditions for bender element test

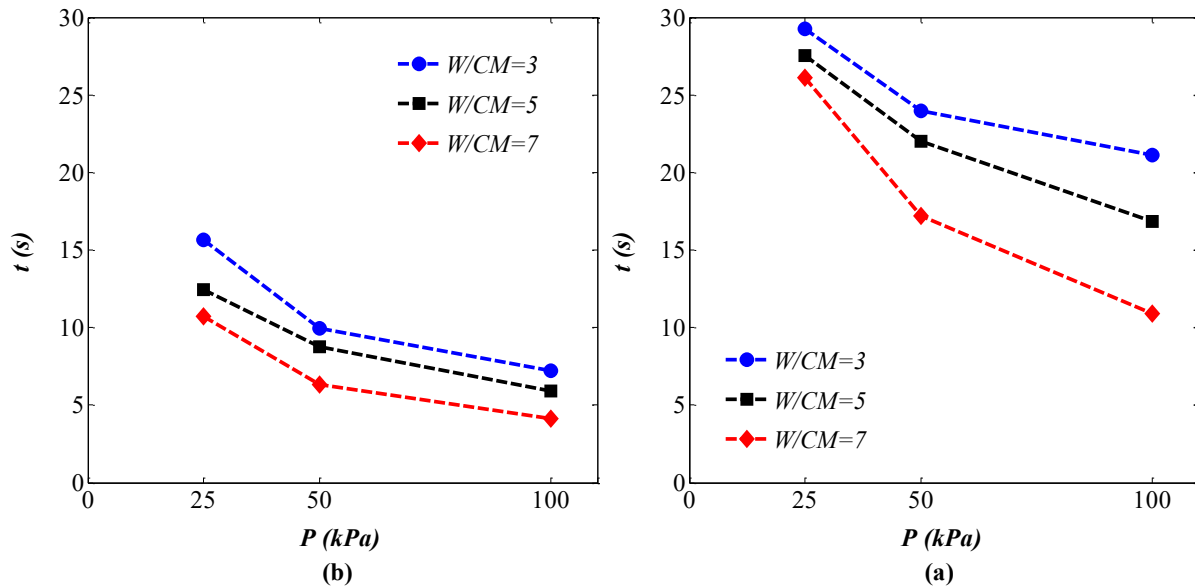
ردیف	D_{50} (mm)	Z (%)	W/C M	ردیف	D_{50} (mm)	Z (%)	W/C M	ردیف	D_{50} (mm)	Z (%)	W/C M
۱*	۰/۸۷	-	-	۲۵	۰/۸۷	۸۰	۷	۴۹	۱/۴۵	۶۰	۷
۲	۰/۸۷	۰	۳	۲۶	۰/۸۷	۹۰	۷	۵۰	۱/۴۵	۹۰	۷
۳	۰/۸۷	۱۰	۳	۲۷*	۱/۴۵	-	-	۵۱*	۲/۶۵	-	-
۴	۰/۸۷	۲۰	۳	۲۸	۱/۴۵	۰	۳	۵۲	۲/۶۵	۰	۳
۵	۰/۸۷	۳۰	۳	۲۹	۱/۴۵	۱۰	۳	۵۳	۲/۶۵	۲۰	۳
۶	۰/۸۷	۴۰	۳	۳۰	۱/۴۵	۲۰	۳	۵۴	۲/۶۵	۳۰	۳
۷	۰/۸۷	۵۰	۳	۳۱	۱/۴۵	۳۰	۳	۵۵	۲/۶۵	۴۰	۳
۸	۰/۸۷	۶۰	۳	۳۲	۱/۴۵	۴۰	۳	۵۶	۲/۶۵	۵۰	۳
۹	۰/۸۷	۸۰	۳	۳۳	۱/۴۵	۵۰	۳	۵۷	۲/۶۵	۶۰	۳
۱۰	۰/۸۷	۹۰	۳	۳۴	۱/۴۵	۶۰	۳	۵۸	۲/۶۵	۹۰	۳
۱۱	۰/۸۷	۰	۵	۳۵	۱/۴۵	۷۰	۳	۵۹	۲/۶۵	۰	۵
۱۲	۰/۸۷	۱۰	۵	۳۶	۱/۴۵	۹۰	۳	۶۰	۲/۶۵	۱۰	۵
۱۳	۰/۸۷	۲۰	۵	۳۷	۱/۴۵	۰	۵	۶۱	۲/۶۵	۳۰	۵
۱۴	۰/۸۷	۳۰	۵	۳۸	۱/۴۵	۱۰	۵	۶۲	۲/۶۵	۴۰	۵
۱۵	۰/۸۷	۴۰	۵	۳۹	۱/۴۵	۳۰	۵	۶۳	۲/۶۵	۵۰	۵
۱۶	۰/۸۷	۵۰	۵	۴۰	۱/۴۵	۴۰	۵	۶۴	۲/۶۵	۶۰	۵
۱۷	۰/۸۷	۶۰	۵	۴۱	۱/۴۵	۵۰	۵	۶۵	۲/۶۵	۹۰	۵
۱۸	۰/۸۷	۷۰	۵	۴۲	۱/۴۵	۶۰	۵	۶۶	۲/۶۵	۰	۷
۱۹	۰/۸۷	۹۰	۵	۴۳	۱/۴۵	۹۰	۵	۶۷	۲/۶۵	۲۰	۷
۲۰	۰/۸۷	۰	۷	۴۴	۱/۴۵	۰	۷	۶۸	۲/۶۵	۳۰	۷
۲۱	۰/۸۷	۲۰	۷	۴۵	۱/۴۵	۱۰	۷	۶۹	۲/۶۵	۴۰	۷
۲۲	۰/۸۷	۳۰	۷	۴۶	۱/۴۵	۲۰	۷	۷۰	۲/۶۵	۶۰	۷
۲۳	۰/۸۷	۵۰	۷	۴۷	۱/۴۵	۳۰	۷	۷۱	۲/۶۵	۹۰	۷
۲۴	۰/۸۷	۶۰	۷	۴۸	۱/۴۵	۴۰	۷				

قطر متوسط ذرات خاک D_{50} ; نسبت آب به مصالح سیمانی W/CM ; درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت Z ; ماسه‌ی خالص $*$:

جدول ۴. ویسکوزیته‌ی دوغاب‌ها
Table 4. Apparent viscosity of the suspensions

W/CM	$Z=۰\%$	$Z=۳۰\%$	$Z=۵۰\%$	$Z=۹۰\%$	$Z=۰\%$	$Z=۳۰\%$	$Z=۵۰\%$	$Z=۹۰\%$
	ویسکوزیته‌ی دوغاب بدون فوق‌روان‌کننده (cP)				ویسکوزیته‌ی دوغاب با فوق‌روان‌کننده (cP)			
۳	۱/۷	۲/۷۱	۵/۹۱	۶/۲۴	۱/۳۴	۱/۵۷	۱/۶۵	۱/۸۸
۵	۱/۳۹	۱/۷۴	۲/۱۱	۳	۱/۲۹	۱/۳۶	۱/۴۳	۱/۶۵
۷	۱/۳۶	۱/۵۹	۱/۶۵	۲/۱۶	۱/۲۱	۱/۲۴	۱/۲۶	۱/۳۶

۱ cP (gr/m.s) ویسکوزیته‌ی آب



شکل ۵. نمودار زمان - فشار تزریق دوغاب دارای $Z=30\%$ در ماسه ی (a): $D11$ ، (b): $D1$
 Fig. 5. Grouting time-pressure curves for suspension having $Z=30\%$, (a): $D11$, (b): $D1$

که ساختار خاک تغییر نکند. بنابراین، قبل از انجام عملیات تزریق در محل، تزریق پذیری دوغاب سیمانی باید در آزمایشگاه در طولی بیشتر از طول نمونه ی کوچک مقیاس مورد آزمایش قرار گیرد. زیرا اگرچه که ممکن است تزریق ماسه های مورد نظر در نمونه ی آزمایشگاهی کوچک مقیاس قابل تزریق باشد، ولی در محل نیاز به تزریق در طولی به مراتب بیشتر است.

در این تحقیق، تزریق پذیری بر اساس قابلیت نفوذ دوغاب در منافذ ماسه ها مورد ارزیابی قرار گرفت. تزریق پذیری بر روی ماسه های $D1$ و $D11$ با دوغاب دارای Z برابر 30% در سه فشار تزریق ۲۵، ۵۰ و 100 kPa و سه W/CM برابر با ۳، ۵ و ۷ مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۵ تغییرات زمان تزریق (t) نسبت به فشار تزریق (P) برای 1 m طول خاک را نشان می دهد. مطابق انتظار، با افزایش W/CM در دوغاب، به دلیل کاهش ویسکوزیته، زمان تزریق کاهش پیدا می کند. همچنین، در همه ی W/CM ها، با افزایش فشار، زمان تزریق کاهش می یابد. با توجه به شکل ۵ می توان پی برد که همه ی دوغاب های به کار رفته در این مطالعه قابلیت تزریق در ماسه های مورد استفاده را دارا می باشند.

۴-۳- آزمایش فشاری محدود نشده

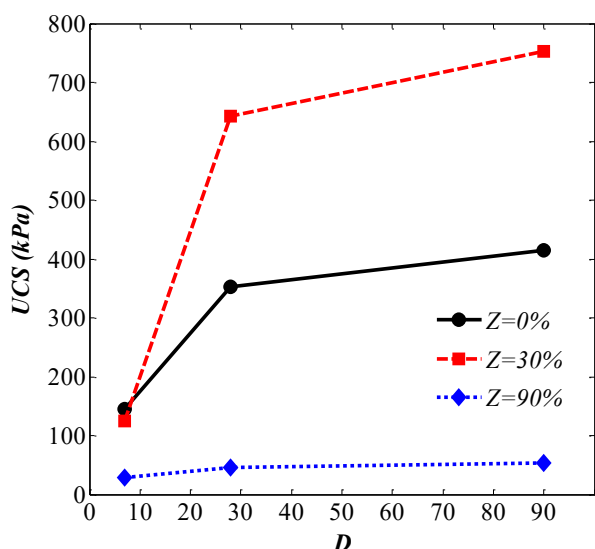
آزمایش های فشاری محدود نشده ی انجام شده بر ماسه ی $D11$

ویسکوزیته ی دوغاب ها دارد. ویسکوزیته دوغاب با افزایش W/CM آن کاهش می یابد. همچنین، با افزایش Z در دوغاب، ویسکوزیته ی آن زیاد می شود. ویسکوزیته ی دوغاب های با درصد ژئولیت بالا و بدون فوق روان کننده، زیاد بوده و قابلیت تزریق در ماسه های مورد مطالعه را ندارند. از این رو، در این پژوهش، از فوق روان کننده در همه ی دوغاب ها استفاده شد.

۴-۲- آزمایش تزریق پذیری

هدف اصلی در این تحقیق انجام بهسازی خاک به صورت تزریق غیر محرک (Passive Injection) است. در این حالت، ساختار اولیه ی خاک تغییر نمی کند و منافذ بین ذرات خاک با دوغاب سیمان جایگزین می شود. بنابراین، فشار تزریق باید کم باشد تا ساختار خاک پس از تزریق بدون تغییر باقی بماند. درحالی که ممکن است تعریف دقیق محدوده ی فشار کم آسان نباشد Avci و Mollamahmutoğlu [۴۹] برای تعیین خواص مقاومتی ماسه ی تزریق شده با سیمان بسیار ریز از فشار تزریق $50-100 \text{ kPa}$ استفاده نمودند. Mutman و Kavak [۱۰] از فشار تزریق ۱۰۰، ۱۵۰ و 200 kPa به عنوان فشار کم استفاده نمودند.

بر اساس موارد فوق، محققین مختلف برای انجام تزریق نفوذی فشارهای متفاوتی را به عنوان فشار تزریق کم در نظر گرفتند به طوری

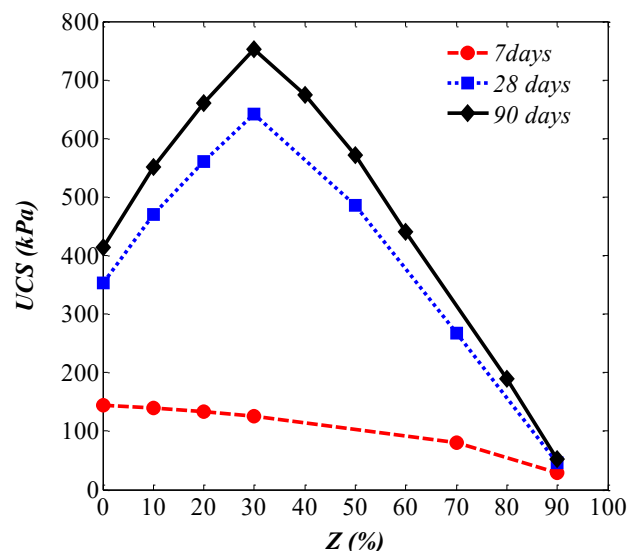


شکل ۷. تاثیر زمان عمل آوری (D) بر UCS نمونه های ماسه ی D11 تزریق شده با دوغاب حاوی W/CM=۳

Fig. 7. Effect of the curing time (D) on UCS for D11 sand specimens grouted with suspension having W/CM=3

در شکل ۶ مشاهده می شود که در نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی زئولیت، به خصوص در حالت $Z < 60\%$ ، از ۷ تا ۲۸ روز افزایش چشمگیری در UCS نمونه ها مشاهده می شود. زیرا مقاومت بلند مدت نمونه های تزریق شده با دوغاب دارای زئولیت، علاوه بر واکنش های هیدراسیون، تحت تاثیر واکنش های پوزولانی مصالح نیز قرار دارد.

تغییرات UCS نمونه های تزریق شده ی ماسه ی D11 نسبت به زمان عمل آوری (D) برای درصدهای Z برابر با ۰، ۳۰ و ۹۰ در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق این شکل، مقاومت ۷ روزه ی نمونه های ماسه ی تزریق شده با سیمان (Z_0) تقریباً ۴۶٪-۳۴ و برای نمونه های با Z_{30} تقریباً ۱۸٪-۱۴ مقاومت ۹۰ روزه ی آن ها است. به عبارتی دیگر، در نمونه های ماسه ی تزریق شده با دوغاب حاوی Z_{30} کسب مقاومت پس از ۷ روز به مراتب بیشتر از نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی Z_0 (بدون سیمان) است. در بلند مدت، مقادیر بالای SiO_2 و Al_2O_3 در زئولیت با $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراسیون سیمان واکنش انجام می دهند و متعاقباً ژل های (C-S-H) و (C-A-H) بیشتری تشکیل می شود. بنابراین، واکنش های پوزولانی اثر مهمی در افزایش تدریجی و طولانی مدت مقاومت نمونه های ماسه ی تزریق شده با دوغاب دارای زئولیت هستند. مطابق شکل ۷، نرخ افزایش UCS، بعد از ۲۸ روز، کاهش چشمگیری دارد. از ۲۸ تا



شکل ۶. تغییرات UCS نسبت به Z در نمونه های ماسه ی D11 تزریق شده با دوغاب دارای W/CM=۳

Fig. 6. Variation of the UCS against Z for D11 sand grouted with suspension having W/CM=3

تزریق شده در سه زمان عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان داد که مقاومت نمونه های تزریق شده با دوغاب زئولیت-سیمان به شدت تابع زمان عمل آوری است. افزایش مقاومت نمونه های ماسه ی تزریق شده با زمان، تحت تاثیر فرآیندهای هیدراسیون و پوزولانی است. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده ی (UCS) نمونه های ماسه ی D11 تزریق شده با دوغاب حاوی نسبت آب به مصالح سیمانی (W/CM) ۳ نسبت به درصد جایگزینی سیمان با زئولیت (Z) برای زمان های عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۶ نشان داده شده است. در مقایسه با نمونه های تزریق شده با سیمان (Z_0)، افزودن زئولیت به دوغاب موجب کاهش مقاومت اولیه ی (۷ روزه) نمونه ها می شود. مقاومت ۷ روزه ی نمونه های تزریق شده به طور اساسی تحت تاثیر واکنش های هیدراسیون کوتاه مدت سیمان قرار دارد. واکنش های هیدراسیون (واکنش های ۱ و ۲) و ایجاد ژل های C-S-H به شدت به مقدار CaO موجود در سیمان وابسته است. از آنجایی که جایگزینی سیمان با زئولیت، کاهش سیمان و متعاقباً کاهش CaO را به همراه دارد، افزایش Z سبب کاهش واکنش های هیدراسیون (کاهش ژل های C-S-H) شده، مقاومت نمونه های تزریق شده کم می شود. با توجه به اینکه شرط انجام واکنش های پوزولانی (واکنش های ۳ و ۴) حضور $Ca(OH)_2$ حاصل از واکنش های هیدراسیون می باشد، در کوتاه مدت واکنش های پوزولانی قابل توجهی انجام نمی شود.

۹۰ روز، همه ی نمونه های تثبیت شده، رشد مقاومت تقریباً مشابهی دارند. به طوری که نمونه های تزریق شده پس از ۲۸ روزه، ۸۵٪ از مقاومت ۹۰ روزه ی خود را کسب می کنند. با توجه به موارد فوق، می توان مقاومت و سختی ۹۰ روزه را به عنوان مقاومت و سختی نهایی در کلیه ی نمونه های تزریق شده با سیمان-ژئولیت در نظر گرفت. بنابراین، در ادامه از زمان عمل آوری ۹۰ روز (نهایی) به عنوان معیار برای ارزیابی تاثیر تزریق بر G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده استفاده می شود.

۴-۴- آزمایش المان خمشی

آزمایش المان خمشی (BE) بر روی ماسه های تثبیت نشده نشان داد که G_0 ماسه های $D11$ ، $D1$ و $D2$ به ترتیب $۵۳/۸$ ، $۵۸/۳$ و $۶۶/۵$ MPa است. همچنین، آزمایش های BE بر روی ماسه های $D11$ ، $D1$ و $D2$ تزریق شده با دوغاب دارای درصد های مختلف جایگزینی سیمان با ژئولیت (Z) و نسبت های آب به مصالح سیمانی (W/CM) ۳، ۵ و ۷، در زمان عمل آوری ۹۰ روز انجام شد. در بخش های زیر تاثیر جایگزینی سیمان با ژئولیت و نسبت آب به مصالح سیمانی دوغاب و همچنین اندازه ی ذرات ماسه بر G_0 ماسه های تزریق شده ارائه می شود.

۴-۵- تاثیر جایگزینی سیمان با ژئولیت بر G_0 ماسه های تزریق شده

مقادیر G_0 در برابر درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت (Z) برای ماسه های $D11$ ، $D1$ و $D2$ تزریق شده با دوغاب های حاوی W/CM برابر با ۳، ۵ و ۷ در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در هر سه نوع ماسه، مقادیر G_0 با افزایش Z تا ۳۰٪ زیاد می شود. افزایش بیشتر از ۳۰٪ در Z منجر به کاهش G_0 می شود. براین اساس، مقدار Z متناظر با حداکثر G_0 ، درصد جایگزینی بهینه (Z_{opt}) نامیده می شود. این نتیجه بر یافته های Mola-Abasi و همکاران [۳۹] سازگار می باشد. زیرا آن ها با انجام آزمایشات فشاری تک محوری بر نمونه های ماسه های تثبیت شده با ژئولیت و سیمان (به روش مخلوط کردن) بیان نمودند که مقدار Z بهینه ی متناظر با مقاومت فشاری محدود نشده ی (UCS) حداکثر ۳۰٪ است. Salamatpoor و همکاران [۴۲] با انجام آزمایش های فشاری محدود نشده بر مخلوط ماسه -ژئولیت-سیمان، UCS حداکثر

را در مقدار ژئولیت بهینه ی ۴۰٪ گزارش نمودند.

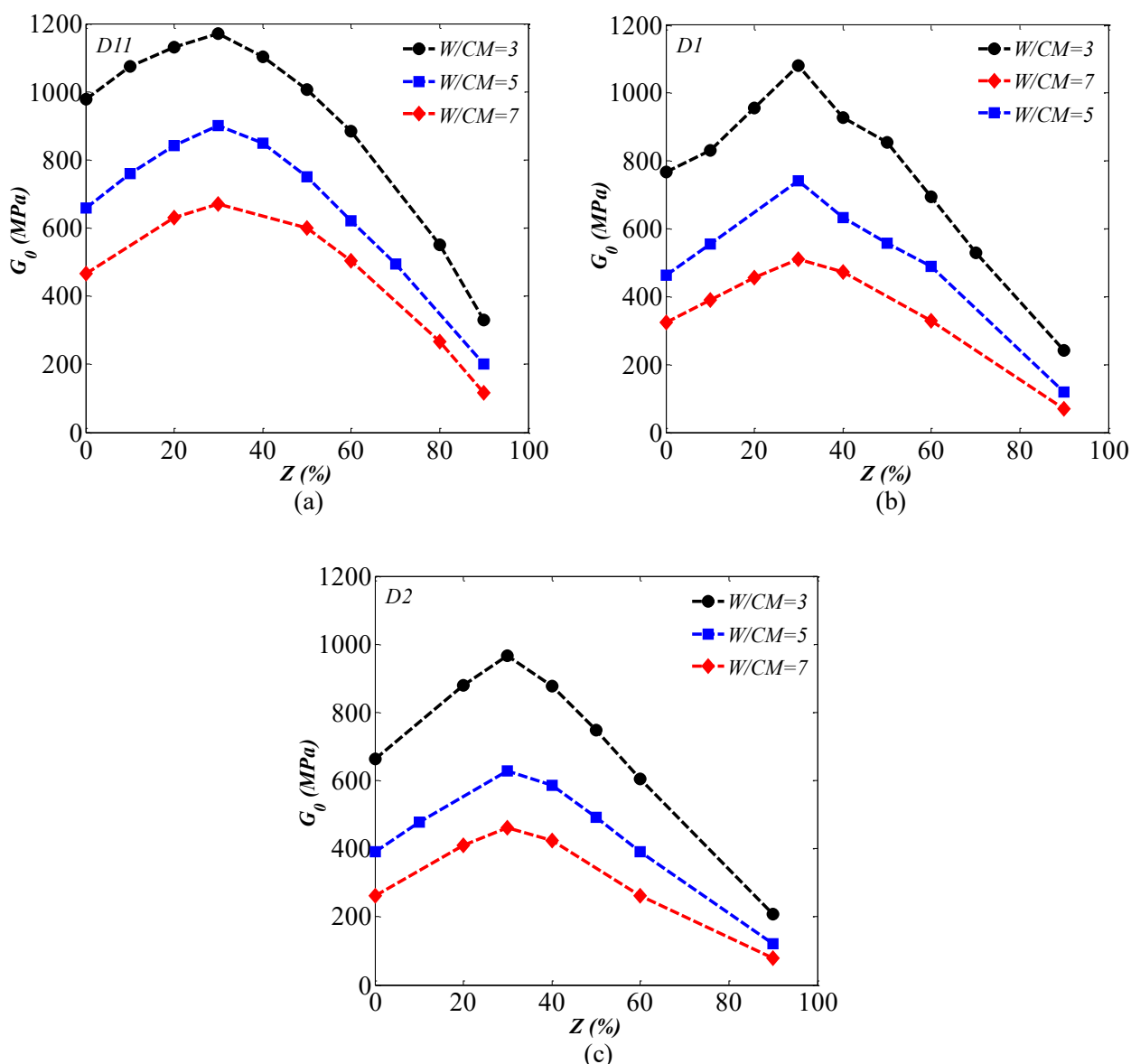
دلیل اصلی افزایش G_0 تا Z_{30} در این تحقیق، باندهای سیمانی قوی تشکیل شده به وسیله ی تزریق در منافذ ماسه می باشد. واکنش های پوزولانی بین $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراسیون سیمان با SiO_2 و Al_2O_3 موجود در ژئولیت سبب تشکیل ژل های $C-S-H$ و $C-A-H$ اضافه (نسبت به نمونه های تزریق شده با Z_0) در بین ذرات ماسه می شود. پس از Z_{opt} ، افزایش ژئولیت باعث تشکیل باندهای ضعیف در نمونه های تزریق شده و متعاقباً کاهش G_0 می شود. با افزایش درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت یا کاهش میزان سیمان در نمونه های ماسه ی تزریق شده، مقدار SiO_2 و Al_2O_3 زیاد می شود، درحالی که مقدار CaO کاهش می یابد (جدول ۲). چنانچه مقدار SiO_2 و Al_2O_3 در نمونه های تزریق شده بیشتر از CaO باشد (دوغاب با $Z_{30} \gg Z$)، واکنش های هیدراسیون (واکنش های ۱ و ۲) به علت فقدان CaO کافی، کاهش می یابد. بنابراین، با افزایش ژئولیت بیشتر از Z_{30} ، انتظار می رود که حتی با وجود SiO_2 و Al_2O_3 زیاد، G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده کاهش یابد.

به منظور ارزیابی بهتر افزایش G_0 در اثر تزریق، G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده با G_0 ماسه های خالص (تثبیت نشده، $G_{0(cs)}$) مربوطه به صورت زیر نرمالیزه می شود [۶۵]:

$$I_f = \frac{G_0}{G_{0(cs)}} \quad (۸)$$

مقادیر ضریب افزایش G_0 (I_f) برای نمونه های ماسه ی تزریق شده در شکل ۹ آورده شده است. بیشترین مقدار I_f (I_{fmax}) متناظر با Z_{opt} برای ماسه ی $D11$ تزریق شده با دوغاب حاوی W/CM برابر با ۳، ۵ و ۷ به ترتیب ۲۱/۷، ۱۶/۷ و ۱۲/۵ است. I_{fmax} برای ماسه ی $D2$ (درشت ترین ماسه) تزریق شده با دوغاب دارای W/CM برابر با ۳، ۵ و ۷ به ترتیب ۱۴/۵، ۹/۴ و ۶/۹۵ است.

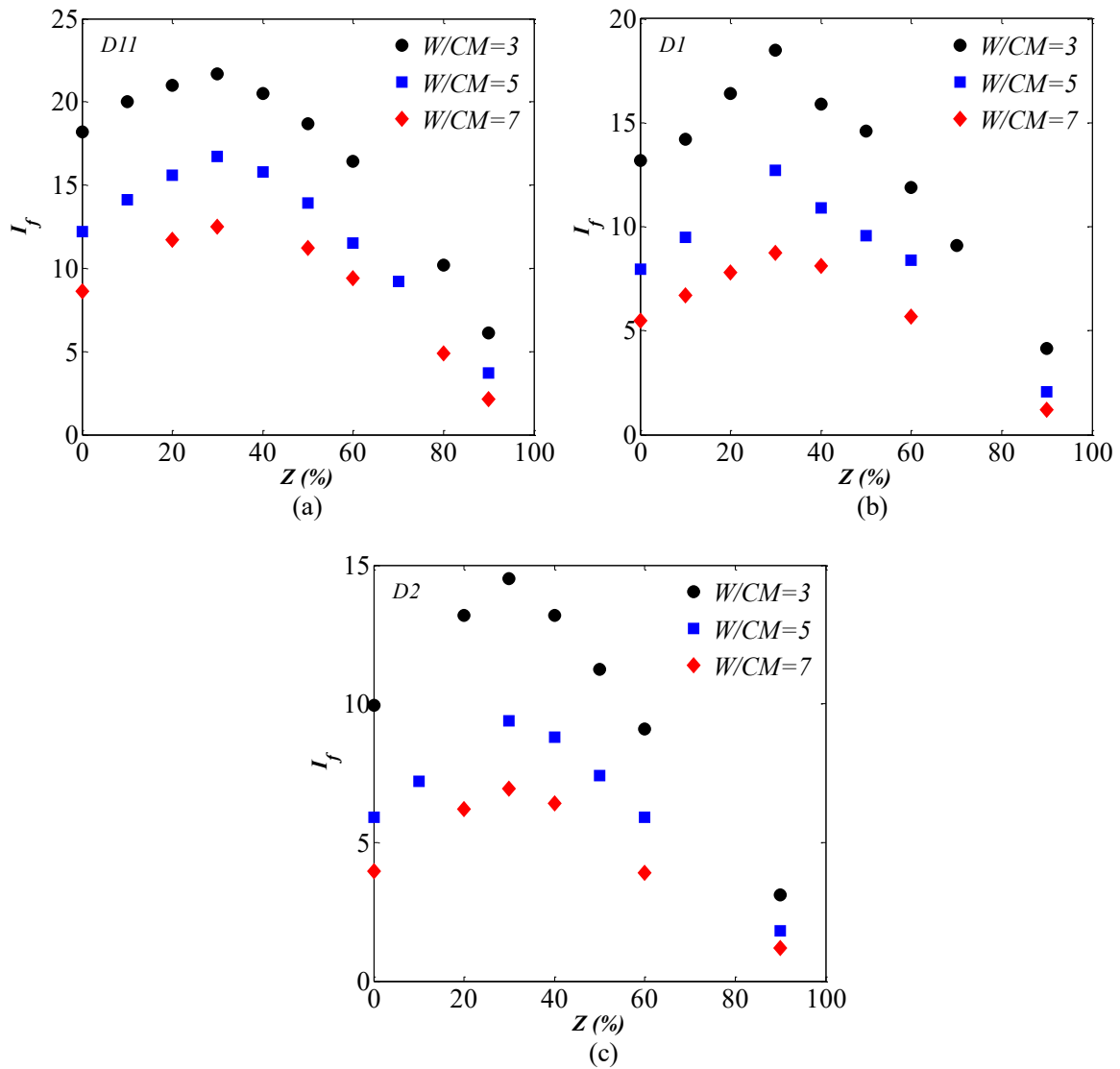
شکل ۹ نشان می دهد که تزریق، حتی با ۹۰٪ جایگزینی سیمان یا ژئولیت، سبب افزایش در G_0 نمونه های تزریق شده می شود. زیرا، در درصد ژئولیت بالا، G_0 علاوه بر باندهای سیمانی، تحت تاثیر افزایش دانسیته ی ماسه به دلیل پر شدن بخشی از حفرات در اثر تزریق نیز قرار می گیرد. تزریق مصالح سیمانی (ژئولیت و سیمان)، تخلخل ماسه را کاهش می دهد و متعاقباً سبب افزایش دانسیته ی آن می شود. شکل ۱۰ تغییرات تخلخل (n) در برابر Z در نمونه های



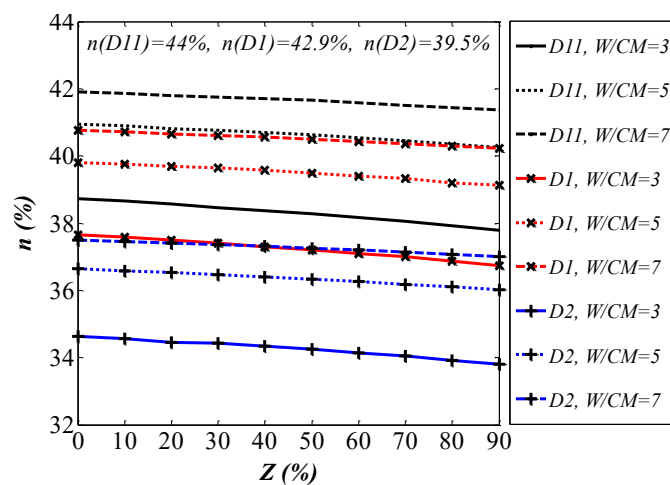
شکل ۸. تاثیر Z بر G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده، (a): $D11$; (b): $D1$; (c): $D2$

قبیل روانگرایی در این ماسه ها موثر باشد. در شکل ۸ مشاهده می شود که G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده ی با دوغاب دارای سیمان (Z_0) تقریباً برابر با G_0 نمونه های تزریق شده با دوغاب دارای Z برابر با ۶۰٪-۵۰ است. این بدان معناست که جایگزینی ۶۰٪-۵۰ سیمان با زئولیت در دوغاب تزریق، کاهش نسبی در G_0 نمونه های تزریق شده با سیمان تنها ایجاد نمی کند. از طرفی دیگر، جایگزین نمودن این مقدار سیمان با زئولیت از نظر اقتصادی و زیست محیطی دارای اهمیت می باشد.

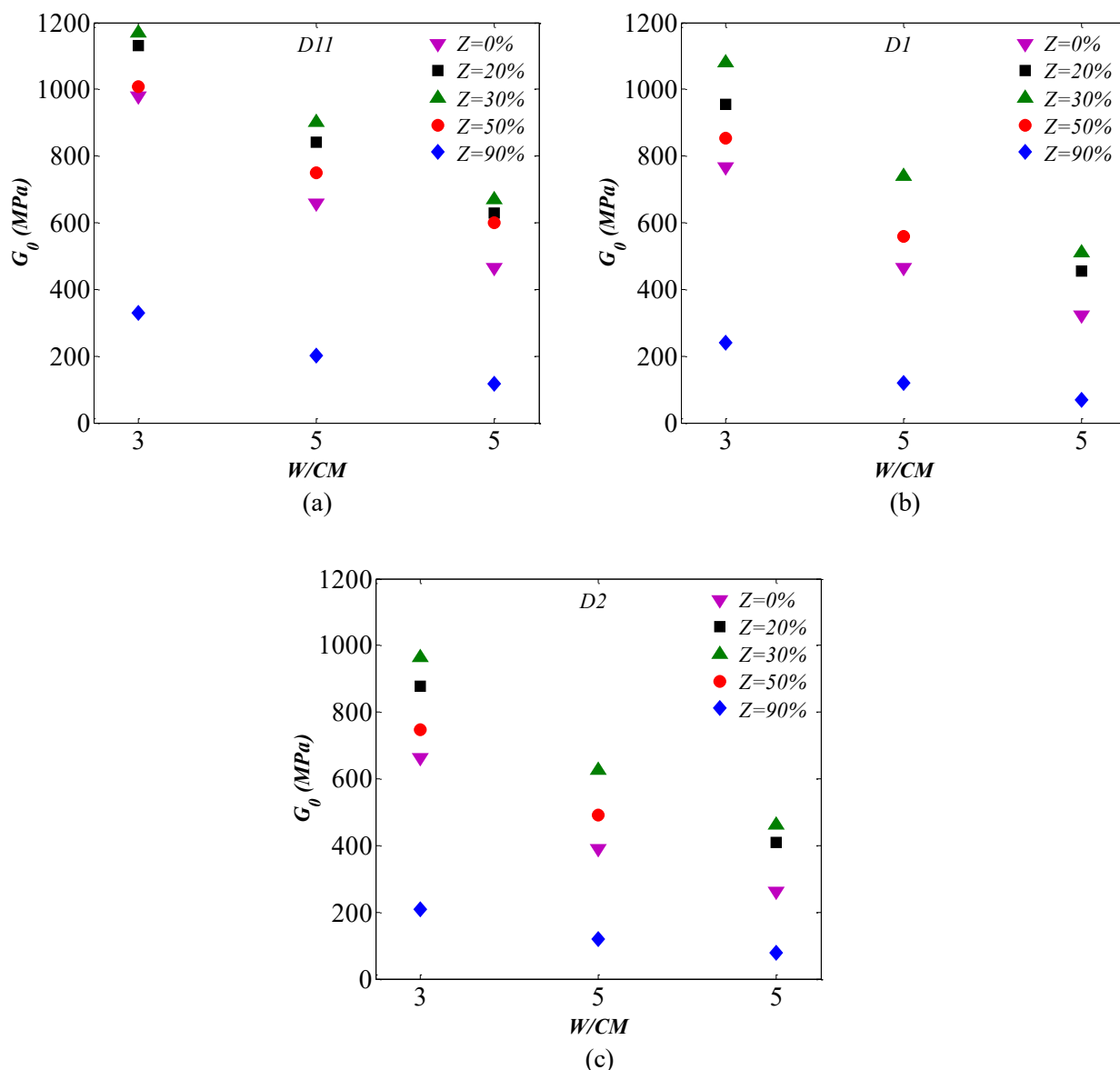
ماسه ی تزریق شده را نشان می دهد. مطابق این شکل، با افزایش زئولیت در دوغاب، به علت بالاتر بودن G_s سیمان (۳/۱) نسبت به زئولیت (۲/۲)، کاهش بیشتری در تخلخل نمونه های ماسه ی تزریق شده (نسبت به ماسه ی خالص) به وجود می آید. کمترین I_f در نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی Z_{90} و W/CM برابر با ۷ می باشد. در این حالت، I_f برای ماسه های $D11$ ، $D1$ و $D2$ به ترتیب ۲/۱۶، ۱/۲ و ۱/۱۹ است. بنابراین، افزایش G_0 در ماسه های $D1$ و $D2$ تزریق شده با دوغاب دارای Z_{90} و W/CM ناچیز می باشد. باین حال، این دوغاب ممکن است برای مقابله با سایر مشکلات از



شکل ۹. تغییرات ضریب بهبود G_0 (I_f) نسبت به Z در نمونه های ماسه ی تزریق شده. (a): D11; (b): D1; (c): D2



شکل ۱۰. تغییرات تخلخل (n) نسبت به Z در نمونه های ماسه ی تزریق شده



شکل ۱۱. تاثیر W/CM بر G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده، (a): D11; (b): D1; (c): D2
 Fig. 11. Effect of W/CM on the G_0 of grouted sand specimens: (a): D11; (b): D1; (c): D2

می شود. در واقع، با کاهش W/CM در دوغاب، ژل های $C-S-H$ و $C-A-H$ بیشتری در نمونه های تثبیت شده تشکیل می شود. I_f برای نمونه های تزریق شده با $W/CM = 3$ از $3/1$ تا $21/7$ ، برای نمونه های با $W/CM = 5$ از $1/8$ تا $16/7$ و برای نمونه های با $W/CM = 7$ از $1/19$ تا $12/5$ متغیر است (شکل ۹). مقدار مصالح سیمانی متناظر با نسبت های آب به مصالح سیمانی ۳، ۵ و ۷ در دوغاب به ترتیب ۲۵، $16/7$ و $12/5$ درصد می باشد. بنابراین، با توجه به شکل ۱۱، در نمونه های ماسه ی $D11$ تزریق شده در دوغاب دارای Z_{opt} ، افزایش مصالح سیمانی از $12/5\%$ به $16/7$ و 25%

۴-۶- تاثیر نسبت آب به مصالح سیمانی بر G_0 ماسه های تزریق شده
 تاثیر W/CM دوغاب بر روی G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق انتظار، G_0 نمونه های تزریق شده با افزایش W/CM دوغاب کم می شود. در هر سه ماسه ی مورد آزمایش ($D11$ ، $D1$ و $D2$) و همه ی درصد های Z ، کمترین G_0 مربوط به نمونه های تزریق شده با دوغاب دارای W/CM برابر با ۷ است. با کاهش W/CM یا افزایش مصالح سیمانی در دوغاب، منافذ بیشتری از ماسه با ذرات سیمان و ژئولیت اشغال می شود و متعاقباً باندهای قوی تری بین ذرات ماسه تشکیل

نمونه های ماسه ی تزریق شده با دوغاب حاوی W/CM برابر با ۳ و Z_{90} ، Z_{30} و Z_0 در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل، صفحات $Ca(OH)_2$ در نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی ۱۰۰٪ سیمان (Z_0) به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۱۳-الف). همچنین، ژل ها ($C-S-H$ و $C-S-A$) را می توان در این شکل مشاهده نمود. با افزایش زئولیت تا ۳۰٪ در دوغاب، مقادیر این ژل ها نیز رشد می یابد (شکل ۱۳-ب). همچنین، مقداری $Ca(OH)_2$ در SEM نمونه های حاوی Z_{30} مشاهده می شود. به عبارتی دیگر، با افزایش درصد زئولیت، مقدار $Ca(OH)_2$ کاهش می یابد. زیرا، همان طور که قبلا اشاره شد، $Ca(OH)_2$ تولید شده در فرآیند هیدراسیون با انجام واکنش پوزولانی با SiO_2 و Al_2O_3 موجود در زئولیت مصرف شده، متعاقبا ژل های بیشتری تولید می شود.

فراتر از Z_{30} ، افزایش در زئولیت (کاهش سیمان) منجر به کاهش در واکنش هیدراسیون شده، $Ca(OH)_2$ کمتری تولید شده، در نهایت کاهش واکنش پوزولانی برای تشکیل ژل های اضافه را در پی دارد. این حالت با نتایج تحقیق Mola-Abasi و همکاران [۳۹] و همچنین Mola-Abasi و همکاران [۴۱] انطباق دارد. با توجه به شکل (۱۳-ج)، اگرچه دانسیته ی نمونه ی تزریق شده با دوغاب حاوی Z_{90} افزایش یافته است، به علت فقدان سیمان کافی، صفحات $Ca(OH)_2$ و ژل ها مشاهده نمی شوند. در این حالت، با افزایش زئولیت، به دلیل افزایش دانسیته، تخلخل کمتری در نمونه های ماسه ی تزریق شده ایجاد می شود.

۵- خلاصه و نتیجه گیری

تولید سیمان سبب انتشار مقدار زیادی گاز دی اکسید کربن در جهان می شود و انرژی زیادی نیز مصرف می کند. در این تحقیق، از زئولیت به عنوان یک ماده ی سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شد. با انجام ۷۱ آزمایش المان خمشی به ارزیابی تأثیر تزریق دوغاب زئولیت-سیمان بر مدول برشی کرنش کوچک (G_0) نمونه های ماسه ی سست پرداخته شد. مهم ترین نتایج عبارت است از:

- افزایش میزان جایگزینی سیمان با زئولیت (Z) تا ۳۰٪ سبب افزایش G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده با مصالح سیمانی (زئولیت و سیمان) می شود. با افزایش زئولیت تا Z_{30} ، واکنش های

به ترتیب سبب افزایش ۳۴ و ۷۴ درصدی در G_0 می شود. افزایش G_0 در این حالت برای ماسه ی $D1$ ، ۴۵ و ۱۱۲٪، و برای ماسه ی $D2$ ، ۳۶ و ۱۰۹٪ می باشد.

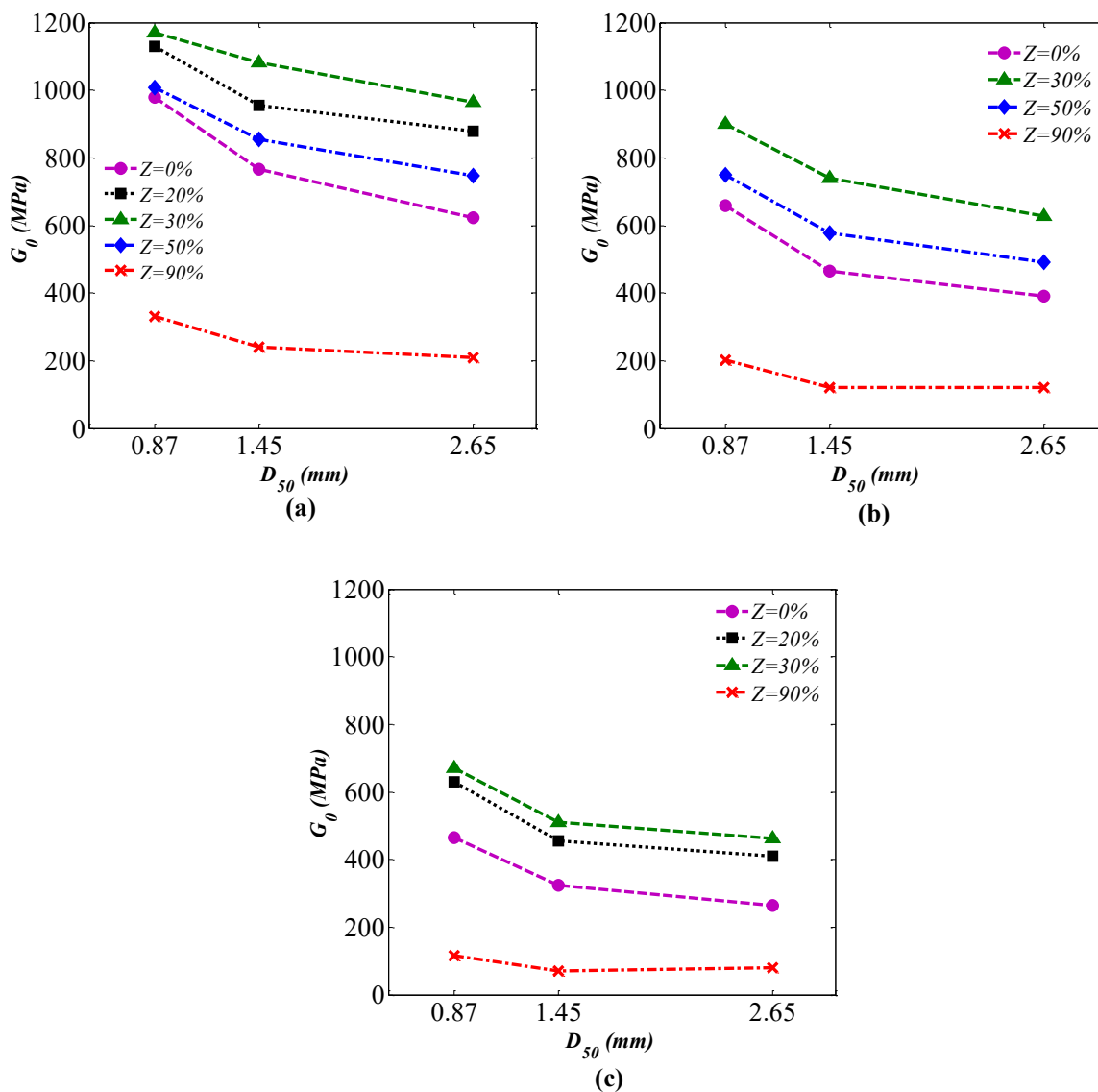
تأثیر افزایش مصالح سیمانی بر G_0 نمونه های تزریق شده با دوغاب دارای درصد زئولیت بالا (Z_{90})، بیشتر است. برای مثال، در ماسه ی $D11$ تزریق شده با دوغاب حاوی Z_{90} ، افزایش در مصالح سیمانی از ۱۲/۵٪ به ۱۶/۷ و ۲۵٪ منجر به افزایش ۷۳ و ۱۸۴ درصدی در G_0 می شود. زیرا، افزایش G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده با Z_{90} عمدتا به دلیل افزایش دانسیته ی خاک در اثر تزریق است. با کاهش زئولیت از Z_{90} ، تأثیر دانسیته بر G_0 کاهش و اثر باندهای سیمانی تشکیل شده در اثر تزریق، افزایش می یابد؛ به طوری که در Z_{opt} اثر دانسیته بر G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده ناچیز می باشد. براین اساس، می توان بیان نمود که G_0 ماسه های تزریق شده تحت تأثیر دو عامل تغییر در اسکلت خاک به دلیل تشکیل باندهای سیمانی و افزایش دانسیته در اثر پر شدن بخشی از حفرات خاک می باشد.

۴-۷- تأثیر اندازه ی ذرات ماسه بر G_0 ماسه های تزریق شده

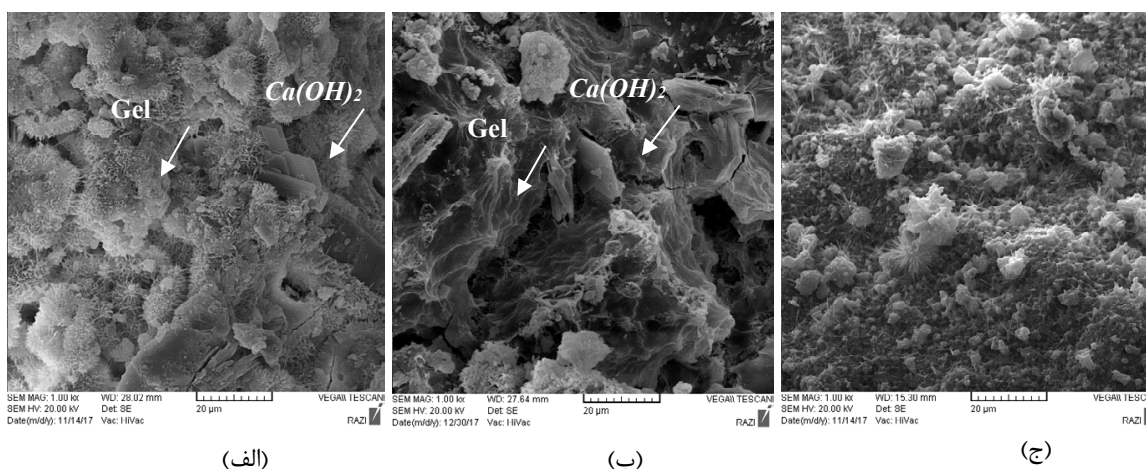
تأثیر متوسط اندازه ی ذرات (D_{50}) ماسه بر G_0 نمونه های تزریق شده ی ۹۰ روزه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با کوچک شدن اندازه ی ذرات ماسه یا افزایش سطح مخصوص ذرات ماسه در نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی Z و W/CM های مختلف، تماس های بین ذره ای در واحد حجم توده ی خاک افزایش می یابد، و سطح بیشتری برای ایجاد باندهای سیمانی در اختیار دوغاب قرار می گیرد. بر این اساس، می توان بیان نمود که در نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی Z و W/CM های مختلف، کاهش در D_{50} ماسه منجر به افزایش در G_0 نمونه ها می شود. در سال های گذشته، این اثر توسط محققین مختلف مورد تایید قرار گرفت [۱۶، ۶۱، ۶۶ و ۶۷]. G_0 نمونه های ماسه ی تزریق شده با دوغاب دارای $Z_{opt} = 3-7$ و $W/CM = 3-7$ از ۶۷۱ تا ۱۱۷۰ MPa در ماسه ی $D11$ ، از ۵۱۰/۷ تا ۱۰۸۰/۸ MPa در ماسه ی $D1$ و از ۴۶۲/۳ تا ۹۶۵/ MPa در ماسه ی $D2$ متغیر است.

۴-۸- آنالیز ریزساختار

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ریزساختار



شکل ۱۲. تاثیر متوسط اندازه‌ی ذرات (D_{50}) ماسه بر G_0 نمونه های تزریق شده، (a): $W/CM=3$; (b): $W/CM=5$; (c): $W/CM=7$



شکل ۱۳. SEM نمونه های تزریق شده با دوغاب حاوی $W/CM=3$ ، (الف): Z_0 ؛ (ب): Z_{30} ؛ (ج): Z_{90}

افزایش یافته است، به علت فقدان سیمان کافی، صفحات $Ca(OH)_2$ و ژل‌ها در SEM مشاهده نشده است.

مراجع

- [1] M.W. Hussin, S.K. Lim, F. Zakaria, Engineering properties of high volume slag cement grout in tropical climate, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 19(1) (2007) 42–54.
- [2] M. Heidarzadeh, A.A. Mirghasemi, F. Eslamian, S.M. Sadr-Lahijani, Application of cement grouting for stabilization of coarse materials. *International Journal of Civil Engineering*, (1) (2013) 71-77.
- [3] S. Akbulut, A. Saglamer, Estimating the groutability of granular soils: a new approach, *Tunnelling and underground space technology*, 17(4) (2002) 371-380.
- [4] J. Lowe, T.C. Standford, Special grouting at Tarbela dam project, in: *Grouting in Geotechnical Engineering*, New Orleans, ASCE, New York, 1982, pp. 152–171.
- [5] G.S. Littlejohn, Design of cement based grouts, in: *Grouting in Geotechnical Engineering*, New Orleans, ASCE, New York, 1982, pp. 35–48.
- [6] B. De Paoli, B. Bosco, R. Granata, D.A. Bruce, Fundamental observations on cement based grouts (1) Traditional materials, in: *Grouting in Geotechnical Engineering*, New Orleans, ASCE, New York, 1992, pp. 474–485.
- [7] W.J. Clarke, M.D. Royal, M. Helal, Ultrafine cement tests and dam test grouting, in: *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, New Orleans, ASCE, New York, 1992, pp. 626–638.
- [8] L.G. Schwarz, R.J. Krizek, (1992) 'Effect of mixing on rheological properties of microfine cement grouts', *Proc. of the Conf. on grouting, soil improvement and geosynthetics*, New Orleans, ASCE, New York, 1992, pp. 512–525.
- [9] K.W. Liao, J.C. Fan, C.L. Huang, An artificial neural network for groutability prediction of permeation grouting with microfine cement grouts, *Computers and Geotechnics*, 38(8) (2011) 978-986.
- [10] U. Mutman, A. Kavak, Improvement of granular

پوزولانی $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراسیون سیمان با Al_2O_3 و SiO_2 موجود در زئولیت سبب تشکیل ژل‌های $C-S-H$ و $C-A-H$ اضافه در بین ذرات ماسه می‌شود. فراتر از Z_{30} ، افزایش در Z منجر به کاهش G_0 می‌شود. زیرا مقدار Al_2O_3 و SiO_2 زیاد می‌شود، درحالی که مقدار CaO کاهش یافته، واکنش‌های هیدراسیون به علت فقدان CaO کافی، کاهش می‌یابد.

- تزریق، حتی با درصد زئولیت بالا باعث زیاد شدن G_0 می‌شود. زیرا، G_0 علاوه بر باندهای سیمانی ایجاد شده، تحت تاثیر افزایش دانسیته‌ی خاک به علت پر شدن بخشی از منافذ خاک در اثر تزریق نیز قرار دارد.

- G_0 نمونه‌های ماسه‌ی تزریق شده همواره با کاهش نسبت آب به مصالح سیمانی (W/CM) افزایش می‌یابد. با کاهش W/CM یا افزایش مصالح سیمانی در دوغاب، منافذ بیشتری از ماسه با ذرات سیمان و زئولیت اشغال می‌شود و متعاقباً باندهای قوی تری بین ذرات ماسه تشکیل می‌شود. به عبارتی دیگر، با کاهش W/CM در دوغاب، ژل‌های $C-S-H$ و $C-A-H$ بیشتری در نمونه‌های تزریق شده تشکیل می‌شود

- در همه‌ی Z و W/CM ها، با کوچک شدن اندازه‌ی ذرات ماسه، G_0 نمونه‌های ماسه‌ی تزریق شده افزایش می‌یابد. زیرا، با کوچک تر شدن اندازه‌ی ذرات ماسه یا افزایش سطح مخصوص ذرات ماسه در نمونه‌های تزریق شده، تماس‌های بین ذره‌ای در واحد حجم توده‌ی خاک افزایش می‌یابد، و سطح بیشتری برای ایجاد باندهای سیمانی در اختیار دوغاب قرار می‌گیرد.

- G_0 نمونه‌های ماسه‌ی تزریق شده با دوغاب دارای سیمان به تنهایی، برابر با G_0 نمونه‌های تزریق شده با دوغاب حاوی حدود ۶۰٪-۵۰ زئولیت است. بر این اساس و با توجه به ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، سیمان می‌تواند تا ۶۰٪-۵۰ با زئولیت جایگزین شود، بدون اینکه G_0 خاک کاهش یابد.

- SEM ریزساختار نمونه‌های ماسه‌ی تزریق شده با دوغاب حاوی ۱۰۰٪ سیمان، صفحات $Ca(OH)_2$ و ژل‌های $C-S-H$ و $C-A-S$ را در نمونه‌های تزریق شده نشان داده است. در SEM ماسه‌ی تزریق شده با Z_{30} ، مقادیر ژل‌ها رشد یافته، درحالی که مقدار $Ca(OH)_2$ به علت مصرف در فرآیند پوزولانی کاهش یافته است. در ماسه‌ی تزریق شده با Z_{90} اگرچه دانسیته‌ی نمونه‌ی تزریق شده

- 31.
- [20] I.N. Markou, A.I. Droudakis, Factors affecting engineering properties of microfine cement grouted sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(4) (2013) 1041-1058.
- [21] G.A. Rao, Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, 33(11) (2003) 1765-1770.
- [22] J.S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E.M. Gartner, Sustainable development and climate change initiatives, *Cement and concrete research* 38(2) (2008) 115-127.
- [23] N. Ansari, A. Seifi, A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO₂ emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios, *Energy Policy* 58 (2013) 75-89.
- [24] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concrete microstructure, properties and materials*, McGraw-hall, 3rd edition, 1993, pp. 15, 21-54.
- [25] B. Muhunthan, F. Sariosseiri, Interpretation of geotechnical properties of cement treated soils, Research Report FHWA Contract DTFH61-05-C-00008, Washington State University, Pullman WA, 2008.
- [26] M. Sahmaran, The effect of replacement rate and fineness of natural zeolite on the rheological properties of cement-based grouts, *Canadian Journal of Civil Engineering* 35(8) (2008) 796-806.
- [27] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [28] A.H. Ören, A. Kaya, A.S. Kayalar, Hydraulic conductivity of zeolite-bentonite mixtures in comparison with sand-bentonite mixtures, *Canadian Geotechnical Journal* 48(9) (2011) 1343-1353.
- [29] A.A. Ramezani-pour, A. Kazemian, M. Sarvari, B. Ahmadi, Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low Portland cement content and high durability, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(5) (2012) 589-596.
- soils by low pressure grouting, *International Journal of Physical Sciences*, 6(17) (2011) 4311-4322.
- [11] I.A. Pantazopoulos, I.N. Markou, D.N. Christodoulou, A.I. Droudakis, D.K. Atmatzidis, S.K. Antiohos, E. Chaniotakis, Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements, *Cement and Concrete Composites*, 34(5) (2012) 593-603.
- [12] M.Y. Cheng, N.D. Hoang, A novel groutability estimation model for ground improvement projects in sandy silt soil based on Bayesian framework, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43 (2014) 453-458.
- [13] I.N. Markou, D.N. Christodoulou, B.K. Papadopoulos, Penetrability of microfine cement grouts: experimental investigation and fuzzy regression modeling, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(7) (2015) 868-882.
- [14] M. Mollamahmutoglu, E. Avci, Effectiveness of microfine portland cement grouting on the strength and permeability of medium to fine sands, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(3) (2015) 319-326.
- [15] C.A. Anagnostopoulos, Effect of different superplasticisers on the physical and mechanical properties of cement grouts. *Construction and Building Materials*, 50 (2014) 162-168.
- [16] L.G. Schwarz, R.J. Krizek, (2006). Hydrocarbon residuals and containment in microfine cement grouted sand, *Journal of materials in civil engineering*, 18(2) (2006) 214-228.
- [17] L.G. Schwarz, M. Chirumalla, Effect of injection pressure on permeability and strength of microfine cement grouted sand, in: *Grouting for Ground Improvement: Innovative Concepts and Applications*, 2007, pp. 1-15.
- [18] N. Saiyouri, A.A. Alaiwa, P.Y. Hicher, Permeability and porosity improvement of grouted sand, *European journal of environmental and civil engineering*, 15(3) (2011) 313-333.
- [19] I.A. Pantazopoulos, D.K. Atmatzidis, Dynamic properties of microfine cement grouted sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42 (2012) 17-

- Tensile Strength of Zeolite-Cemented Sands. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4) (2018).
- [42] S. Salamatpoor, Y. Jafarian, A. Hajiannia, Physical and mechanical properties of sand stabilized by cement and natural zeolite, *The European Physical Journal Plus*, 133(5) (2018) 205.
- [43] S. Salamatpoor, Y. Jafarian, A. Hajiannia, Improvement of shallow foundations rested on saturated loose sand by zeolite-cement mixture: a laboratory study, *Scientia Iranica*, (2018)
- [44] L.G. Schwarz, R.J. Krizek, 1994. Effect of preparation technique on permeability and strength of cement-grouted sand, *Geotechnical Testing Journal*, 17 (1994) 434-443.
- [45] E. Delfosse-Ribay, I. Djeran-Maigre, R. Cabrillac, D. Gouvenot, Shear modulus and damping ratio of grouted sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 (2004) 461-71.
- [46] M. Yildiz, A.S. Soganci, (2015). Improvement of the strength of soils which comprises granular pumice by injection of cement under low pressure, *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 22(1) (2015) 81.
- [47] C. Dano, N. Derache, Grout injection in the laboratory. In: *Landmarks in Earth Reinforcement, Int. Symp. on Earth Reinforcement*, 2001, pp. 21-26.
- [48] M. Mollamahmutoglu, Y. Yilmaz, Engineering properties of medium-to-fine sands injected with microfine cement grout, *Marine Georesources and Geotechnology*, 29(2) (2011) 95-109.
- [49] E. Avci, M. Mollamahmutoglu, UCS Properties of Superfine Cement-Grouted Sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12) (2016).
- [50] S. Kumar, A study on the engineering behaviour of grouted loose sandy soils (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, Division of Civil Engineering, Cochin University of Science and Technology, India), (2010)
- [51] ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (unified Soil Classification System), West Conshohocken: ASTM
- [30] Y.B. Acar, A.E. El-Tahir, Low strain dynamic properties of artificially cemented sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11) (1986) 1001-1015.
- [31] S.K. Saxena, K.R. Reddy, A.S. Avramidis, Liquefaction resistance of artificially cemented sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(12) (1988) 1395-1413.
- [32] T.S. Chang, R.D. Woods, Effect of particle contact bond on shear modulus, *Journal of Geotechnical Engineering* 118(8) (1992) 1216-1233.
- [33] Sharma, S. S. & Fahey, M. 2004. Deformation characteristics of two cemented calcareous soils. *Canadian Geotechnical Journal* 41: 1139-1151
- [34] S. Seng, H. Tanaka, Properties of cement-treated soils during initial curing stages, *Soils and Foundations*, 51(5) (2011) 775-784.
- [35] T. Cuccovillo, M.R. Coop, (1997). Yielding and prefailure behaviour of structured sands, *Geotechnique* 47(3) (1997) 491-508.
- [36] S. Baig, M. Picornell, S. Nazarian, Low strain shear moduli of cemented sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(6) (1997) 540-545.
- [37] A.L. Fernandez, J.C. Santamarina, Effect of cementation on the small-strain parameters of sands, *Canadian Geotechnical Journal*, 38(1) (2001) 191-199.
- [38] C. Dano, P.Y. Hicher, Behavior of uncemented sands and grouted sands before peak strength, *Soils and foundations*, 43(4) (2003) 13-19.
- [39] H. Mola-Abasi, B. Kordtabar, A. Kordnaeij, Effect of Natural Zeolite and Cement Additive on the Strength of Sand, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(5) (2016) 1539-1551.
- [40] H. Mola-Abasi, A. Khajeh, S. Naderi Semsani, Porosity/(SiO₂ and Al₂O₃ Particles) Ratio Controlling Compressive Strength of Zeolite-Cemented Sands, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2) (2018) 949-958.
- [41] H. Mola-Abasi, A. Khajeh, S. Naderi Semsani, Effect of the Ratio between Porosity and SiO₂ and Al₂O₃ on

- Dissertation, the Institute of the Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 1999.
- [60] S. Perret, K.H. Khayat, G. Ballivy, The effect of degree of saturation of sand on groutability—Experimental simulation, *Ground Improvement*, 4 (2000) 13–22.
- [61] J.C. Dupla, J. Canou, D. Gouvenot, An advanced experimental set-up for studying a monodirectional grout injection process, *Ground Improvement*, 8(3) (2004) 91–99.
- [62] ASTM D4219, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength Index of Chemical- Grouted Soils, West Conshohocken: ASTM International, 2008.
- [63] R. Dyvik, C. Madshus, Lab Measurements of G_m x Using Bender Elements, in: *Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, 1985, pp. 186–196
- [64] P.J.P. Gleize, A. Müller, H.R. Roman, Microstructural investigation of a silica fume–cement–lime mortar, *Cement and Concrete composites*, 25(2) (2003) 171–175.
- [65] D. Porcino, V.N. Ghionna, R. Granata, V. Marciandò, Laboratory determination of mechanical and hydraulic properties of chemically grouted sands, *Geomechanics and Geoengineering*, 11(2) (2016) 164–175.
- [66] S. Zebovitz, R.J. Krizek, D.K. Atmatzidis, Injection of fine sands with very fine cement grout, *Journal of geotechnical engineering*, 115(12) (1989) 1717–1733.
- [67] C. Dano, P.Y. Hicher, S. Tailliez, Engineering properties of grouted sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 130(3) (2004) 328–338.
- International, 2017.
- [52] ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- [53] ASTM D4253, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [54] ASTM D4254, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [55] ASTM D7928, Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [56] ASTM D4320/D4320M, Standard Practice for Laboratory Preparation of Chemically Grouted Soil Specimens for Obtaining Design Strength Parameters, West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [57] ASTM D445, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [58] E.E. Toumbakari, D.V. Gemert, T.P. Tassios, N. Tenoutasse, Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts, *Cement and Concrete Research*, 29 (1999) 867–872.
- [59] S. Akbulut, The improvement of geotechnical properties in granular soils by grouting, Ph.D.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Kordnaeij, R. Ziaie Moayed, M. Soleimani, Small Strain Shear Modulus of Sands Grouted with Zeolite-cement Suspension, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(5) (2020) 1277–1298.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15300.5879](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15300.5879)



