



مشخصات مکانیکی نمونه های خاک-سیمان با ساختار پایه ماسه ای و دوغاب ساخته شده با آب دریا در شرایط محیطی دریایی

مژگان گراوند، حامد بایسته*، مهدی شریفی

گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۰۲

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹

کلمات کلیدی:

خاک-سیمان

آب شور

ماسه ساحلی

مقاومت تک محوری

دوغاب

خلاصه: اجرای ستون های خاک-سیمان با استفاده از روش های اختلاط عمیق و تزریق پرفشار، راهکاری مؤثر جهت مقابله با مشکلات ناشی از مقاومت کم خاک های مسئله دار ساحلی است. آنچه در اجرایی این ستون ها در جامعه مهندسی متداول است، الزام استفاده از آب شیرین در ساخت دوغاب مورد استفاده در این ستون ها است. این موضوع هم از منظر محل تأمین و هزینه های حمل آن و هم از منظر نبود آب شیرین در بسیاری از نواحی، سبب تحمیل هزینه های زیاد به پروژه ها و تاخیرات زمانی اجرایی آن ها می گردد. این در حالی است که قبل از گیرش نهایی سیمان، آب شور موجود در محیط اجرای ستون ها با آب شیرین موجود در دوغاب حین ساخت آن ها در اعماق خاک آمیخته می گردد. بررسی امکان پذیری استفاده از آب شور در طرح اختلاط این ستون ها و ارزیابی رفتار نمونه های خاک-سیمان در شرایط دریایی کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تحقیق سعی شده است عوامل مؤثر در طرح اختلاط دوغاب شامل میزان شوری آب مصرفی، درصد سیمان، نسبت آب به سیمان و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری و کششی ماسه-سیمان بررسی شود. همچنین با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به صورت ریزساختاری رفتار نمونه ها ارزیابی شده است. نتایج نشان می دهد در بازه سیمان مصرفی ۱۵ تا ۲۵ درصد وزن ماسه خشک، استفاده از آب شور در ساخت دوغاب، سبب کاهش مقاومت نمونه های ماسه-سیمان در شرایط محیطی دریایی نمی شود. بازه مقاومت فشاری حاصل شده برای نمونه های ماسه-سیمان ساخته شده با آب دریا حدود (۱/۵ تا ۶) مگاپاسکال و نسبت مقاومت کششی به فشاری این نمونه ها در محدوده (۰/۱۵ تا ۰/۳) قرار دارد.

است که روشی مؤثر جهت مقابله با مشکلات ناشی از عدم مقاومت، کنترل نشست و کنترل روانگرایی خاک در محیط های دریایی است [۱]. این روش بر اساس مخلوط کردن مواد سیمان با خاک به منظور تشکیل یک ماده سخت ناشی از واکنش پوزولانی است که به وسیله ماتریس سیمان بین دانه های خاک اتفاق می افتد [۲]. با استفاده از روش اختلاط عمیق و یا تزریق پرفشار و تزریق سیمان درون خاک، ستونی سخت تر از خاک ساخته می شود که به آن خاک-سیمان^۳ می گویند [۳]. در این روش ها دوغاب سیمان با روش مخلوط کردن با مخلوط کن های مکانیکی (اختلاط عمیق) یا جت با فشار بالا (تزریق پرفشار) به درون خاک ضعیف تزریق می گردد [۴]. بررسی ها نشان

۱- مقدمه

توسعه پایدار سازه های مهندسی ساخته شده در نواحی ساحلی، خصوصاً تأمین ظرفیت باربری و کنترل نشست آن ها، یکی از چالش های حوزه مهندسی ژئوتکنیک به شمار می آید. بر این اساس، انتخاب روش مناسب بهسازی خاک متناسب با شرایط محیطی دریایی، امری ضروری است. یکی از روش های بهسازی که در سال های اخیر در ایران متداول شده است، اجرای ستون های خاک-سیمان با استفاده از روش اختلاط عمیق^۱ و یا تزریق پرفشار^۲

1 Deep Soil Mixing (DSM)

2 Jet grouting

* نویسنده عهده دار مکاتبات: h.bayesteh@qom.ac.ir

3 Soilcrete



می دهد در بهسازی خاک های ماسه ای با سیمان، به سبب مشخص بودن دانه بندی و تخلخل مصالح، رفتار خاک-سیمان تحت کنترل و قابل پیش بینی بوده و چالش های کمتری را نسبت به نمونه های رس-سیمان به دنبال دارد [۵].

تاکنون جنبه های مختلف رفتار مقاومتی نمونه های خاک-سیمان توسط محققین بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. از جمله عوامل مورد بررسی شده می توان به بررسی تأثیر درصد سیمان [۸-۶]، نسبت آب به سیمان [۹-۱۲]، نوع خاک [۱۳]، نوع سیمان [۱۵ و ۱۴]، زمان عمل آوری [۱۶-۱۸]، نحوه نمونه سازی [۹]، دانه بندی خاک [۲۱ و ۲۰ و ۱۲] بر رفتار خاک-سیمان اشاره کرد. همچنین رفتارهای مکانیکی ماسه-سیمان نظیر مقاومت فشاری تک محوری [۲۲ و ۲۰ و ۱۰]، حدود اتبرگ و pH [۲۴ و ۲۳ و ۱۲]، مقاومت کششی [۲۵ و ۲۴ و ۱۳ و ۳]، مقاومت خمشی [۱۳ و ۸]، مدول الاستیسیته و سختی خاک [۲۱ و ۲۰] و تغییرات ریزساختاری [۲۶-۳۱ و ۸] توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیقات نشان می دهد هر چند شناخت رفتار خاک-سیمان با رویکردهای مختلف موردعلاقه محققین بوده است، ولی عموم این مطالعات مستقل از تأثیرات شوری آب و محیط بوده و توسط آب شیرین انجام شده است. البته تعدادی از مطالعات نیز به مطالعه اثر مشخصات شیمیایی آب بر رفتار مکانیکی نمونه ها، پرداخته اند. یانگ و همکاران^۱ [۳۲] پارامترهای مکانیکی نمونه های خاک-سیمان را تحت pH های متغیر بررسی و نشان دادند نمونه های ساخته شده در محیط های اسیدی به طور جدی دچار فرسایش شدند و در محیط قلیایی فرسایش کمتر رخ داده است. در محیط های اسیدی قوی، جرم و حجم نمونه ها به دلیل فرسایش کاهش می یابد و مقاومت تا حدود ۷۰٪ درصد مقاومت نمونه در حالت عادی کاهش می یابد. در محیط های قلیایی زیاد نیز مقاومت نمونه ها تا ۳۰٪ کاهش می یابد. امدادول و همکاران^۲ [۳۳] تأثیر شوری آب بر خاک ماسه ای بهسازی شده با آهک و خاکستر بادی را بررسی و نشان دادند با افزایش درصد نمک، به سبب افزایش pH مخلوط، مقاومت فشاری افزایش می یابد. افزایش pH مخلوط سبب افزایش قابلیت انحلال سیلیکات ها با کلسیم و انجام واکنش های پوزلانی می گردد. در نتیجه ژل سیلیکات کلسیم-سدیم تولید شده و باعث افزایش فرآیند هیدراتاسیون می شود.

در این تحقیق نشان داده شده خاکستر بادی به تنهایی تأثیری بر مقاومت نمونه ها ندارد. منگ و همکاران^۳ [۳۴] تأثیر ترکیب نانو-کربنات کلسیم بر خصوصیات مقاومتی و ریزساختاری خاک های تثبیت شده با سیمان در محیط های دریایی را مورد بررسی قرار داده اند. برای نمونه های عمل آوری شده در شرایط دریایی، به سبب وجود یون های کلر و سولفات و دیگر یون های مهاجم، بلوره های نمک تشکیل شده است. افزودن ترکیب نانو-کربنات کلسیم به نمونه ها در شرایط استاندارد و همچنین شرایط محیط دریایی، باعث افزایش مقاومت در سنین اولیه و افزایش مقاومت در برابر فرسایش شده است. خوش سیرت و همکاران [۳۵] به بررسی تأثیر استفاده از آب شور دریا بر مقاومت نمونه های رس-سیمان پرداختند و نشان دادند در محدوده سیمان های ۲۰ تا ۳۰ درصد در تهیه خاک-سیمان، استفاده از آب شور در ساخت نمونه ها، اثر منفی بر پارامترهای مقاومتی نمونه های رس-سیمان ندارد. در بعضی موارد استفاده از آب با شوری نسبی در ساخت نمونه های رس-سیمان تأثیر مثبت هم دارد که این موضوع نیز توسط کیتازومی^۴ [۴] نیز تصریح شده است. در این تحقیق بیان شده در صورت استفاده از آب شیرین در ساخت دوغاب به منظور ایجاد رس-سیمان در بسترهای ساحلی، تغییر ریزساختار رس و افزایش حفرات بین کلاستری^۵ را در پی دارد. چرا که ماهیت خاک های طبیعی دریایی، از یون ها با مشخصات شیمیایی متفاوت و در غلظت بالا شکل گرفته اند و ساختارهای درهم^۵ را برای رس ایجاد کرده اند. این محققین نشان دادند رابطه میزان شوری با مقاومت نمونه های رس-سیمان، خطی (افزایشی یا کاهش) نبوده و ناقوسی شکل است که متأثر از تغییر ساختار و آرایش پولک های رسی ناشی از تغییر میزان شوری است. از منظر مهندسی استفاده از آب شیرین در ساخت دوغاب مورد استفاده در اجرای ستون های خاک-سیمان در جامعه مهندسی کشور رایج شده است. این موضوع سبب تحمل هزینه های زیاد به پروژه ها و تاخیرات زمانی به سبب کمبود آب شیرین در بسیاری از نواحی خصوصاً ساحلی، شده است. این در حالی است که قبل از گیرش سیمان، آب شور موجود در محیط اجرای ستون ها با آب شیرین موجود در دوغاب حین ساخت آن ها در اعماق خاک آمیخته شده و عملاً مقدار آب شیرین استفاده شده در دوغاب،

3 Meng et al (2017)

4 Intra-cluster pores

5 Flocculated

1 Yang et al (2013)

2 Emdadul et al (2017)

آب شور دریا مقاومت فشاری و کششی اولیه (۷ روزه) را اندکی افزایش داده و با گذشت زمان عمل‌آوری، کاهش ۷٪ تا ۱۰٪ مقاومت را در پی دارد. با عنایت به تحقیقات فوق و لزوم شناخت تأثیر آب شور بر رفتار خاک-سیمان متناسب با شرایط محیطی ایران، در این تحقیق به بررسی تأثیر میزان شوری آب مورد استفاده در ساخت دوغاب بر خواص مقاومتی، فیزیکی و ریزساختاری ماسه-سیمان پرداخته خواهد شد. به منظور تطابق آزمایشگاه با شرایط واقعی، آب دریا در غلظت‌های مختلف جهت بررسی تأثیر شوری استفاده خواهد شد. خاک مورد استفاده نیز از خاک‌های ساحلی منطقه انزلی انتخاب شده است. در این تحقیق پاسخ ماکروسکوپی تأثیر شوری آب بر مقاومت ماسه-سیمان در درصد‌های مختلف سیمان و نسبت آب به سیمان، بازه مقاومت فشاری کششی حاصل برای نمونه‌های ماسه-سیمان ارائه و با تهیه عکس‌های SEM، به تغییرات ریزساختاری رخ داده و ارتباط آن با پاسخ‌های ماکرومکانیکی پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مورد استفاده

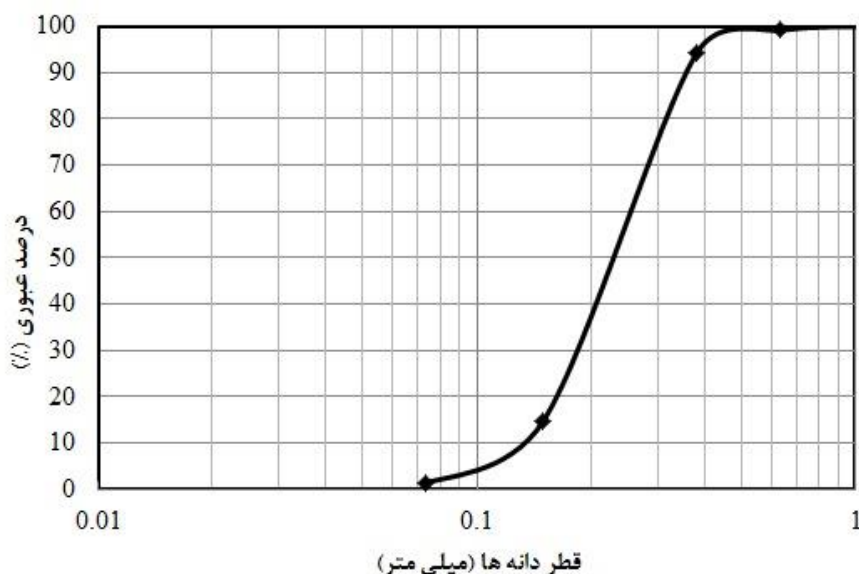
با توجه به اینکه یکی از اهداف تحقیق، مطالعه بر روی خاک ماسه در شرایط طبیعی دریایی می‌باشد، خاک مورد مطالعه از سواحل شمالی ایران در محدوده بندر انزلی تهیه شده است. نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است که در سیستم طبقه بندی یونیفاید (USCS) به عنوان ماسه بد دانه‌بندی (SP)، طبقه‌بندی می‌شود.

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر شوری موجود در آب دریا در رفتار مکانیکی ماسه-سیمان، از ترکیب آب شیرین و آب دریا در غلظت‌های مختلف استفاده شده است. معیار اندازه‌گیری شوری، هدایت الکتریکی خاک^۲ (EC) است که در ادبیات فنی عموماً با واحد میلی‌موس بر سانتی‌متر (mmho/cm) بیان می‌شود. بر این اساس از سه حالت آب شیرین، آب با شوری متوسط (۵۰٪ آب شیرین و ۵۰٪ آب دریا) و آب دریا که به ترتیب دارای هدایت الکتریکی ۰/۶ و ۹/۲ و ۱۶/۵ میلی‌موس بر سانتی‌متر می‌باشند، در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است که بیانگر مقادیر شوری متفاوت است. برای به دست آوردن هدایت الکتریکی، حسگر هدایت الکتریکی غوطه‌ور در

در شوری فراوان خاک و آب محیط ساحلی محو می‌گردد. بررسی ادبیات نشان می‌دهد تأثیر آب شور دریا در ساخت دوغاب بر تغییرات رفتار مقاومتی نمونه‌های ماسه-سیمان کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی تحقیقاتی که تا کنون به بررسی تأثیر شوری آب بر مقاومت ماسه-سیمان پرداخته‌اند [۳۵ و ۳۳ و ۳۲]، عموماً از نمکی با یون مشخص و عموماً از شوری مصنوعی به جای استفاده مستقیم از آب شور دریا در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. در حالی که ترکیبات شیمیایی موجود در آب دریا و نیز کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک متنوع و متفاوت است. بر این اساس نمی‌توان نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و بازه‌های مقاومتی حاصل شده را به شرایط پروژه‌های واقعی تعمیم داد. این موضوع الزام انجام آزمایش با استفاده از ماسه ساحلی و نیز شوری طبیعی آب دریا را تأکید می‌کند. از دیگر سو هر چند تأثیر شوری آب دریا بر رفتار خاک-سیمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است، لیکن در زمینه تأثیر استفاده از آب شور در طرح اختلاط بتن تحقیقات بیشتری صورت گرفته است. برخی مطالعات نشان می‌دهد آب شور باعث افزایش زمان‌گیری اولیه و گیرش نهایی می‌شود [۳۶]. همچنین مقاومت اولیه (۷ روزه) نمونه‌های ساخته شده با آب دریا از مقاومت اولیه (۷ روزه) نمونه‌های ساخته شده با آب شیرین بیشتر است. با افزایش غلظت نمک در آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها، مقاومت با افزایش زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد که دلیل افزایش مقاومت اولیه نمونه‌های ساخته شده با آب دریا، پر شدن منافذ بین دانه‌ها با استفاده از فرآورده‌های هیدراتاسیون و دلیل کاهش مقاومت، خروج آب منفذی یا خارج شدن فرآورده‌های حاصل از هیدراتاسیون در مقایسه بتن‌های ساخته شده با آب شیرین بیان شده است [۳۷]. برخی مطالعات نشان دادند استفاده از آب دریا و ماسه دریایی باعث اندک بهبود در کارایی بتن می‌شود و زمان‌گیری اولیه و نهایی را کاهش می‌دهند [۳۸]. در تحقیقی جدید، یونیس و همکاران^۱ [۳۹] به تحلیل رفتار بتن ساخته شده با آب دریا پرداختند و بیان داشتند با توجه به کمبود آب شیرین، استفاده از آب شور در ساخت بتن در آینده محتمل است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از آب شور در ساخت بتن در مقایسه با استفاده از آب شیرین، تأثیر منفی بر چگالی، تنش جاری شدن و نفوذپذیری بتن تازه ندارد. ولی کاهش قابل توجهی در کارایی و زمان‌گیری اولیه بتن را به همراه دارد.

2 Electrical conductivity (EC)

1 Younis et al (2018)



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد مطالعه (خاک سواحل شمال - بندر انزلی)
Fig. 1. Particle size distribution of the Anzali sand

جدول ۱. مشخصات شیمیایی آب دریا (واحد غلظت بر اساس ppm)
Table 1. Seawater chemical compositions (PPM)

pH	TDS	کلسیم	پتاسیم	منیزیم	سولفات	سدیم	کلر	EC (mmohs/cm)
۸/۲	۱۲۵۰۰	۱۶۰	۱۰۰	۵۰۰	۲۴۷۰	۲۴۷۰	۷۵۱۶	۱۶/۵

غیرمستقیم برزلی طبق استانداردهای 00-ASTM-D 2166 و 95a-ASTM-D 3967 است. نمونه‌های آزمایشگاهی در ۲۷ طرح اختلاط مختلف در ۳ گروه ۹ تایی ساخته شده‌اند و به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری، در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه عمل‌آوری شدند. در طرح اختلاط گروه اول از آب شیرین (L)، گروه دوم از مخلوط آب شور دریا و آب شیرین به طور مساوی (آب با شوری متوسط) (M) و گروه سوم از آب شور دریا (H)، استفاده شده است. علاوه بر آزمایش‌های مکانیکی بر روی نمونه‌های ماسه-سیمان منتخب، تصویربرداری SEM انجام شده است.

انتخاب درصد سیمان و نسبت آب به سیمان بر اساس دامنه متعارف قابل استفاده در پروژه‌های اجرایی خاک-سیمان و بازه معرفی شده مطابق آیین‌نامه بوده است [۴۰]. جهت دسته‌بندی اطلاعات به دست آمده از رفتار مقاومتی نمونه‌های خاک-سیمان، از

آب مقطر (برای نداشتن آلودگی)، در آب مورد نظر قرار داده شد و مقدار هدایت الکتریکی با توجه به دمای محیط به دست آمد. این روند توسط هدایت‌سنج الکتریکی WTW LF 538 Conductivity Meter انجام گردید. سیمان پرتلند مورد استفاده در این آزمایش از نوع ۲ می‌باشد که به طور متداول در پروژه‌های بهسازی ساحلی از این نوع سیمان استفاده می‌شود. مشخصات شیمیایی آب دریا در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- برنامه آزمایش‌ها

برنامه آزمایش‌ها با توجه به هدف این تحقیق مبنی بر بررسی اثر آب شور دریا بر رفتار مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌های ماسه-سیمان نظام یافته است. آزمایش‌های مکانیکی انتخاب شده شامل انجام مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کششی

جدول ۲. مشخصات نمونه های ساخته شده

Table 2. Sample characteristics

نام	هدایت الکتریکی	درصد سیمان	نسبت آب به سیمان	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
L-15-0.75	۰/۱۶	۱۵	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
L-20-0.75	۰/۱۶	۲۰	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
L-25-0.75	۰/۱۶	۲۵	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
L-15-1.00	۰/۱۶	۱۵	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
L-20-1.00	۰/۱۶	۲۰	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
L-25-1.00	۰/۱۶	۲۵	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
L-15-1.25	۰/۱۶	۱۵	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
L-20-1.25	۰/۱۶	۲۰	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
L-25-1.25	۰/۱۶	۲۵	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
M-15-0.75	۹/۲	۱۵	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
M-20-0.75	۹/۲	۲۰	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
M-25-0.75	۹/۲	۲۵	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
M-15-1.00	۹/۲	۱۵	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
M-20-1.00	۹/۲	۲۰	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
M-25-1.00	۹/۲	۲۵	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
M-15-1.25	۹/۲	۱۵	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
M-20-1.25	۹/۲	۲۰	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
M-25-1.25	۹/۲	۲۵	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
H-15-0.75	۱۶/۵	۱۵	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
H-20-0.75	۱۶/۵	۲۰	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
H-25-0.75	۱۶/۵	۲۵	۰/۷۵	✓	✓	✓	✓
H-15-1.00	۱۶/۵	۱۵	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
H-20-1.00	۱۶/۵	۲۰	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
H-25-1.00	۱۶/۵	۲۵	۱/۰۰	✓	✓	✓	✓
H-15-1.25	۱۶/۵	۱۵	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
H-20-1.25	۱۶/۵	۲۰	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓
H-25-1.25	۱۶/۵	۲۵	۱/۲۵	✓	✓	✓	✓

عمل آوری است. به طور مثال در نمونه‌ای که دارای نام L-15-0.75-07 است، به ترتیب L نشان دهنده آب شیرین، ۱۵ درصد سیمان نسبت به وزن ماسه خشک، ۰/۷۵ نسبت آب به سیمان و ۷ روز از

نام گذاری چهار بخشی نظیر L-۱۵-۰/۷۵-۰۷- استفاده شده است. در این نام گذاری، حرف اول بیانگر شوری آب، عدد دوم بیانگر درصد سیمان، عدد سوم بیانگر نسبت آب به سیمان و عدد چهارم بیانگر زمان

می گردد (شکل ۲-ج)، سپس به مدت ۴۸ ساعت در قالب در شرایط مرطوب نگهداری شده (شکل ۲-د) و پس از آن در حوضچه حاوی آب ۲۵ درجه سانتی گراد به مدت ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری شدند (شکل ۲-ح). به منظور شبیه سازی شرایط واقعی عمل آوری، در حوضچه نگهداری نمونه ها از آب دریا استفاده شده است. در نهایت آزمایش های مقاومتی شامل تک محوری و کشش غیرمستقیم برزیلی بر روی نمونه ها انجام شده است. درصد سیمان ۱۵ تا ۲۵ درصد بر اساس توصیه های مراجع انتخاب شده است [۴۰ و ۴]. طرح اختلاط نمونه ها مطابق با روابط FHWA تهیه شده است [۴۰]. طرح اختلاط به نحوی صورت گرفته است که بیانگر شرایط واقعی اجرا مطابق با ستون های خاک-سیمان در سواحل شمالی ایران باشد. در طرح اختلاط نمونه ها، میزان خاک، سیمان و آب به نحوی با یکدیگر ترکیب شده اند که شرایط خاک-سیمان ایجاد شده در محل رعایت شود. بر این اساس وزن مخصوص خاک در محاسبات ثابت نگه داشته شده است، لیکن متناسب با میزان سیمان و منظور ساختن چگالی آن، وزن مخصوص نمونه ها طبیعتاً با یکدیگر اختلافاتی خواهد داشت که در شرایط واقعی نیز چنین است. قابل ذکر است در یک شرایط خاص با یک درصد سیمان و نسبت آب به سیمان مشخص، سه سری نمونه با شوری های مختلف ساخته شده اند. بر این اساس، در این

گذشت زمان عمل آوری است. در جدول ۲ مشخصات کلیه نمونه های ساخته شده و نام گذاری آن ها ارائه شده است.

۲-۳- نحوه آماده سازی نمونه ها

برای برقرار بودن نسبت ۲ برابری ارتفاع نمونه نسبت به قطر نمونه در آزمون تک محوری، ابعاد قالب ها با قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شده اند. نحوه نمونه سازی بر اساس توصیه مراجع مطابق با روش ژاپنی ها انتخاب شده است [۴]. مراحل کلی تهیه نمونه ها در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس روش ژاپنی ها در ساخت نمونه های آزمایشگاهی خاک-سیمان، ابتدا خاک، آب و سیمان بر اساس طرح اختلاط مشخص وزن و به مدت ۳ دقیقه کاملاً با هم مخلوط می شوند. در ادامه مخلوط خاک و سیمان آماده شده در همزن اختلاط ریخته و حین مخلوط شدن، آب به تدریج به آن اضافه می گردد و به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط توسط همزن تا زمان رسیدن به مخلوط همگن کاملاً هم زده می شود (شکل ۲-ب). برای قالب گیری نمونه های ماسه-سیمان، بهترین روش میله زنی (Rodding) است [۱۹]. در این روش به منظور متراکم کردن مخلوط خاک-سیمان، نمونه ها در ۶ لایه مساوی ریخته شده و هر لایه ۳۰ بار توسط یک میله به قطر ۲ سانتی متر به آرامی متراکم



شکل ۲. مراحل نمونه سازی (الف) تهیه قالب مناسب (ب) استفاده از دستگاه همزن جهت مخلوط کردن مواد (ج) ریختن مواد در قالب و متراکم کردن آن (د) نگهداری مخلوط در قالب ها به مدت ۴۸ ساعت (ح) عمل آوری نمونه ها
Fig. 2. Stages of the sampling: a) molds, b) mixing with the standard mixer, c) compacting on the mold, d) curing on the basin (2 days), e) curing of the samples

سن ۹۰ روز، بیانگر استفاده از آب شور در ساخت نمونه های خاک-سیمان است. وقتی از آب شور در طرح اختلاط نمونه ها استفاده می شود به دلیل پیوند فیزیکی بلوره های نمک با ذرات ماسه، مقاومت کششی با افزایش میزان شوری روندی افزایشی داشته است.

مقایسه نتایج اصل از این تحقیق با ادبیات فنی، نشان می دهد آب شور موجود در ساخت دوغاب مقاومت فشاری اولیه (۷ روزه) را اندکی افزایش داده، لیکن با افزایش زمان عمل آوری باعث کاهش اندک مقاومت فشاری می شود [۳۹]. همچنین تحقیقاتی همچون [۳۳ و ۳۲ و ۲۵] نشان دادند کاهش مقاومت در دراز مدت نیز مشاهده نشده است که این مهم به میزان سیمان مورد استفاده ارتباط دارد. خوش سیرت و همکاران [۳۵] عدم کاهش مقاومت در آب شور را برای خاک-سیمان سواحل استان بوشهر و در معرض آب شور خلیج فارس در محدوده های سیمان بین ۲۰ تا ۳۰ درصد سیمان نشان دادند. البته آیین نامه بتن ایران الزام بر عدم استفاده از آب شور در ساخت بتن دارد. بدیهی است رفتار بتن تفاوت هایی با خاک-سیمان دارد. بتن سیمان، سنگدانه های تمیز و آب قبل از بتن ریزی در محیط دریایی با یکدیگر خوب مخلوط شده و پس از مدت زمانی از اختلاط، بتن ریزی صورت می گیرد. لیکن در ساخت خاک-سیمان، در زیر بستر ساحل فضایی متشکل از خاک کاملاً شور در مجاورت آبی کاملاً شور قرار دارد. در این راستا سیمان و آب با یکدیگر مخلوط شده و بلافاصله در خاک شور تزریق می شوند. لذا از منظر زمان اختلاط سیمان با آب، خاک/سنگدانه های تشکیل دهنده خاک-سیمان و نیز محیط عمل آوری، تفاوت هایی بین بتن و خاک-سیمان به وجود خواهد آمد که برخی نتایج آن قابل مقایسه نخواهد شد. آیین نامه ای نیز در کشور در راستای خاک-سیمان وجود ندارد و الزام استفاده از آب شیرین در مرجعی تأکید نشده است.

۳-۱-۲- تأثیر شوری بر ریزساختار نمونه های ماسه-سیمان

تأثیر شوری در عکس SEM سه نمونه ما سه-سیمان ۲۸ روزه با نسبت آب به سیمان ۱/۲۵ و با ۲۵ درصد سیمان به ترتیب برای نمونه ساخته شده با آب شیرین، با آب با شوری متوسط و با آب دریا در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود نمونه ساخته شده با آب با شوری متوسط به دلیل غلظت کم بلوره های سوزنی هیدروکسید کلسیم و واکنش بیشتر با سیلیکات های حاصل از هیدراتاسیون دارای

سری نمونه ها، تراکم یکسان است. چرا که مقدار سیمان، مقدار آب و مقدار خاک یکسان بوده و حجم ظرف نیز ثابت است. لیکن تفاوت ها در میزان شوری آب است و بر این اساس تفاوت نتایج، صرفاً ناشی از تأثیر یا عدم تأثیر شوری آب است.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۳ خلاصه نتایج اخذ شده حاصل از تأثیر متغیرهای مختلف چون درصد سیمان، نسبت آب به سیمان، شوری و سن بر رفتار ماسه-سیمان نشان داده شده است. در ادامه تأثیر متغیرهایی مانند سیمان، آب شور، نسبت آب به سیمان و زمان عمل آوری بر رفتار نمونه های ماسه-سیمان بحث و بررسی شده اند. جهت تحلیل نتایج، ابتدا در هر بخش نتایج خام به دست آمده ارائه و سپس تفسیر آن ها از نقطه نظر مکانیکی و ریزساختاری و مقایسه با تحقیقات موجود بیان شده است.

۳-۱-۱- بررسی تأثیر آب شور دریا

۳-۱-۱-۱- تأثیر آب شور دریا بر مقاومت فشاری و کششی

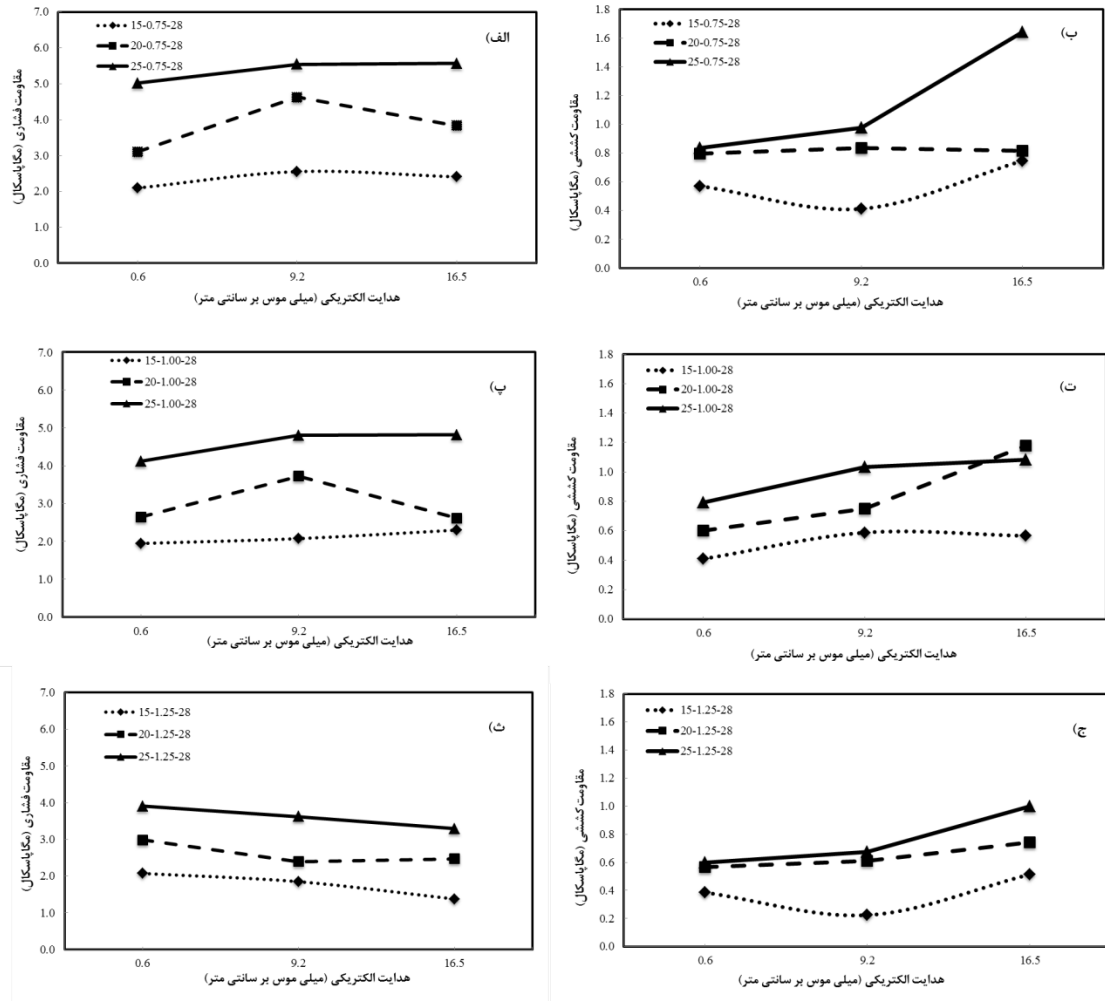
در شکل ۳ تأثیر شوری آب بر نتایج به دست آمده از انجام آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه ها در سن ۲۸ روزه در نسبت های آب به سیمان ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵، نشان داده شده است. جهت نمایش اثر شوری آب دریا بر مقاومت فشاری، از معیار هدایت الکتریکی (EC) (با واحد میکروموس بر سانتی متر) استفاده شده است. در کل مشاهده می شود افزایش شوری تأثیر چشمگیری در کاهش مقاومت فشاری تک محوری نداشته است. به صورت جزئی تر، روند کسب مقاومت نمونه ها نشان می دهد، نمونه هایی که در آن ها از آب با شوری متوسط استفاده شده است، نسبت به نمونه هایی که از آب شیرین و یا آب دریا ساخته شده اند، مقاومت بیشتری اخذ شده است. این روال در نمونه های ساخته شده با درصد سیمان ۱۵ تا ۲۵ درصد مشاهده می شود.

مشاهده می شود همانند نمودارهای مقاومت فشاری که با شوری نسبت مستقیم داشته و در برخی موارد با افزایش شوری از مقاومت آنان افزایش یا ثابت می ماند، مقاومت کششی با افزایش شوری روندی صعودی داشته و در برخی نقاط تقریباً ثابت باقی مانده است. تأثیر ناچیز میزان شوری هم بر مقاومت فشاری هم بر مقاومت کششی تا

جدول ۳. خلاصه نتایج به دست آمده از آزمایش های مقاومتی

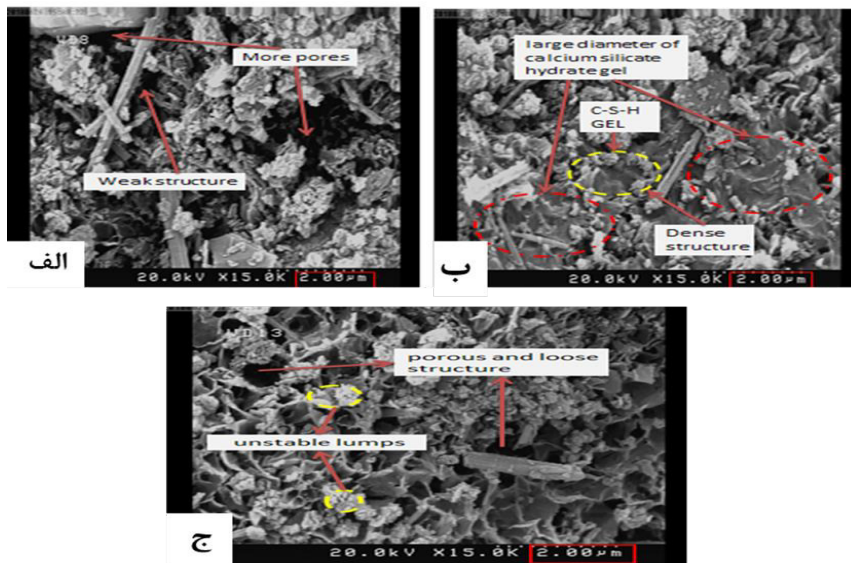
Table 3. Summary of the results of the mechanical tests

Test ID	7 Day			14 Day			28 Day			90 Day			
	UCS	Ts	$\frac{UCS(15\% CEMENT)}{UCS}$	UCS	Ts	$\frac{UCS(15\% CEMENT)}{UCS}$	UCS	Ts	$\frac{UCS(15\% C)}{UCS}$	UCS	Ts	$\frac{UCS(15\% C)}{UCS}$	
L-15-0.75	1.5	0.3	0.2	1.8	0.2	0.11	2.1	0.3	1	0.14	3.2	0.2	1
L-20-0.75	2.3	0.1	0.04	3	0.1	0.03	3.1	0.3	1.48	0.1	4.5	0.2	1.41
L-25-0.75	3.4	0.1	0.03	4	0.2	0.05	5	0.2	2.3	0.04	5.8	0.1	1.81
L-15-1.00	1.3	0.2	0.15	1.5	0.2	0.13	1.9	0.2	1	0.11	2.80	0.2	1
L-20-1.00	3.2	0.2	0.09	2.4	0.2	0.08	2.2	0.2	1.37	0.08	4.2	0.2	1.5
L-25-1.00	2.9	0.2	0.07	3.5	0.2	0.06	4.1	0.2	2.16	0.05	5.2	0.2	1.86
L-15-1.25	1.1	0.1	0.09	1.5	0.1	0.07	2.1	0.2	1	0.1	2.5	0.2	1
L-20-1.25	1.8	0.2	0.11	2.1	0.2	0.1	3	0.2	1.43	0.07	3.8	0.2	1.5
L-25-1.25	2.3	0.1	0.04	3.1	0.2	0.06	3.9	0.2	1.86	0.05	3.9	0.2	1.56
M-15-0.75	1.6	0.2	0.13	2.3	0.2	0.09	2.6	0.2	1	0.08	4	0.2	1
M-20-0.75	3.2	0.2	0.06	3.4	0.2	0.06	4	0.2	1.54	0.05	6.1	0.2	1.53
M-25-0.75	5	0.1	0.02	5.2	0.1	0.02	5.5	0.3	2.12	0.05	7.7	0.2	1.93
M-15-1.00	1.5	0.2	0.13	1.6	0.3	0.19	2.1	0.2	1	0.1	3.5	0.2	1
M-20-1.00	2.5	0.2	0.08	2.7	0.2	0.07	3.7	0.2	1.76	0.05	4.7	0.2	1.34
M-25-1.00	2.7	0.3	0.11	4.2	0.2	0.05	4.8	0.2	2.29	0.04	4.9	0.2	1.4
M-15-1.25	1	0.2	0.2	1.3	0.2	0.15	1.9	0.1	1	0.05	2.2	0.1	1
M-20-1.25	1.5	0.2	0.13	2.1	0.2	0.1	2.4	0.3	1.36	0.13	3.6	0.3	1.64
M-25-1.25	2.1	0.3	0.14	2.9	0.2	0.07	3.6	0.2	1.89	0.06	4.7	0.2	2.14
H-15-0.75	2	0.2	0.1	2	0.2	0.10	2.4	0.3	1	0.13	4.1	0.2	1
H-20-0.75	2.3	0.3	0.13	2.3	0.2	0.09	3.8	0.2	1.58	0.05	5.5	0.2	1.34
H-25-0.75	3.6	0.4	0.11	4	0.3	0.08	5.6	0.3	2.33	0.05	6.4	0.2	1.56
H-15-1.00	1.5	0.2	0.13	2	0.2	0.1	2.3	0.2	1	0.09	3.3	0.2	1
H-20-1.00	2.4	0.3	0.13	2.3	0.3	0.13	2.6	0.5	1.13	0.19	3.7	0.2	1.12
H-25-1.00	3.8	0.4	0.05	2.7	0.5	0.19	4.8	0.2	3.09	0.04	6.9	0.2	2.09
H-15-1.25	0.8	0.4	0.5	1.4	0.3	0.21	1.4	0.4	1	0.29	1.4	0.3	1
H-20-1.25	1	0.2	0.2	1.9	0.3	0.16	2.5	0.3	1.79	0.12	2.9	0.2	2.07
H-25-1.25	2.26	0.3	0.12	2.9	0.3	0.1	3.3	0.3	2.36	0.09	3.9	0.2	2.79



شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه نمونه های ماسه-سیمان در برابر افزایش میزان شوری (هدایت الکتریکی): الف و ب) نسبت آب به سیمان ۰/۷۵، پ و ت) نسبت آب به سیمان ۱، ث و ج) نسبت آب به سیمان ۱/۲۵

Fig. 3. UCS and tensile strength vs. EC: a,b) W/C=0.75 c,d) W/C=1 e,f)W/C=1.25



شکل ۴. نمونه ماسه سیمان ۲۸ روزه با نسبت آب به سیمان ۱/۲۵ و با ۲۵ درصد سیمان: الف) نمونه ساخته شده با آب شیرین ب) برای نمونه ساخته شده با آب دارای شوری متوسط ج) نمونه ساخته شده با آب دریا

Fig. 4. SEM of the soilcrete with W/C=1.25 and 25% cement content: a) tap water, b) bralish water, c) seawater

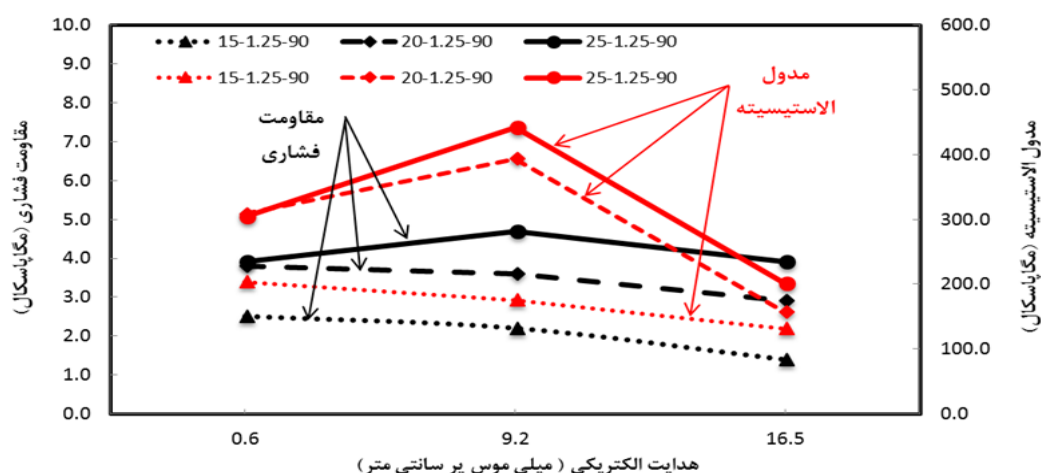
برخی مراجع نیز اشاره شده است [۴۱]. دلیل دیگر برای کاهش مدول الاستیسیته در حضور آب شور، افزایش کرنش متناظر با تنش ماکزیمم نمونه ها به دلیل حضور یون کلر است که مورد توجه مراجع قرار گرفته است [۴۲].

شکل ۶ داده های مدول الاستیسیته را در برابر مقاومت فشاری در حالات مختلف آزمایش در مقایسه با روابط توصیه شده مدول الاستیسیته در برابر مقاومت فشاری از دیگر مراجع را نشان می دهد. مشاهده می شود مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری رابطه ای خطی دارد و با افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته نیز افزایش می یابد. مطابق بر طبق مرجع [۴۳]، مدول الاستیسیته ۱۰۰ تا ۳۰۰ برابر مقاومت فشاری است. داده های حاصل از این تحقیق که در شکل ۶ نشان داده شده است. اعداد مدول الاستیسیته حاصل از این تحقیق عموماً بین محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ برابر مقاومت فشاری بوده است. علت کمتر بودن این اعداد نسبت به تحقیقات موجود، اندازه گیری کرنش در ابتدا و انتهای نمونه است. در صورتی که میزان کرنش در مرکز نمونه توسط کرنش سنج محاسبه گردد، عموماً اعداد بیشتری حاصل می گردد. به طور کلی نتایج این نمودار گواه عدم تأثیرات آب شور بر بازه های مدول الاستیسیته حاصل شده در نمونه های ماسه-سیمان است.

ساختار متراکم تر با میزان تخلخل و حجم منافذ کمتر است که در تحقیقات پیشین نیز تأکید شده است [۷]، همین موضوع دلیل مناسب بر مقاومت نسبتاً بالاتر نمونه های ساخته شده با آب دارای شوری متوسط نسبت به دیگر نمونه ها است.

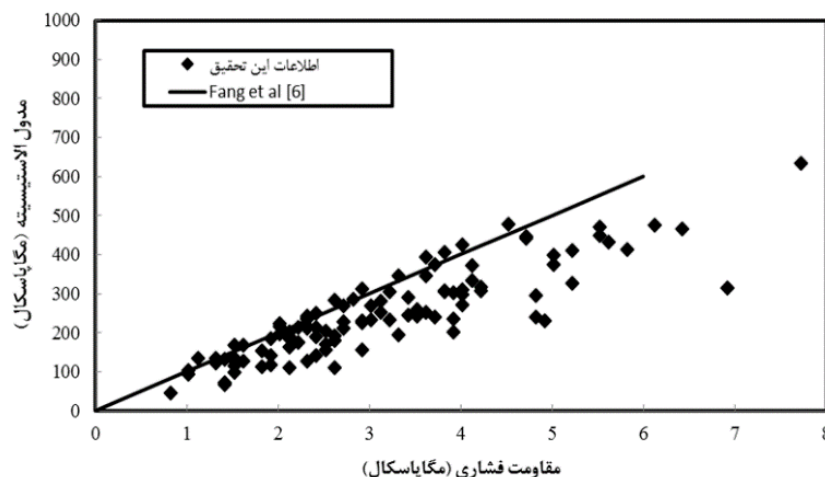
۳-۱-۳- تأثیر شوری بر مدول الاستیسیته

تأثیر شوری بر منحنی تنش-کرنش در درصدهای مختلف سیمان و نسبت های آب به سیمان (۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵) و در سنین مختلف بررسی شده است. شکل ۵ تأثیر شوری بر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری در درصد های مختلف سیمان (۱۵، ۲۰ و ۲۵) برای نسبت آب به سیمان ۱/۲۵ در سن ۹۰ روزه نشان می دهد. برای دیگر نمونه های ساخته شده در نسبت های آب به سیمان متفاوت، در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق آن روند تغییرات مدول الاستیسیته مشابه روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه است. مشاهده می شود با افزایش میزان شوری مدول الاستیسیته تغییرات چشمگیری ندارد. البته به سبب تشکیل ساختار منسجم و یکپارچه در برخی نمونه ها، تفاوت های جزئی مشاهده می شود. عموماً با افزایش درصد شوری زیاد (نمونه های ساخته شده با آب دریا) به دلیل تشکیل بلوره های نمک، مدول الاستیسیته آن ها کاهش می یابد که این رویکرد در



شکل ۵. تأثیر شوری بر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ۹۰ روزه در درصد های مختلف سیمان برای نسبت آب به سیمان ۱/۲۵

Fig. 5. Effect of water salinity on the UCS and modulus of elasticity (E) of soilcrete



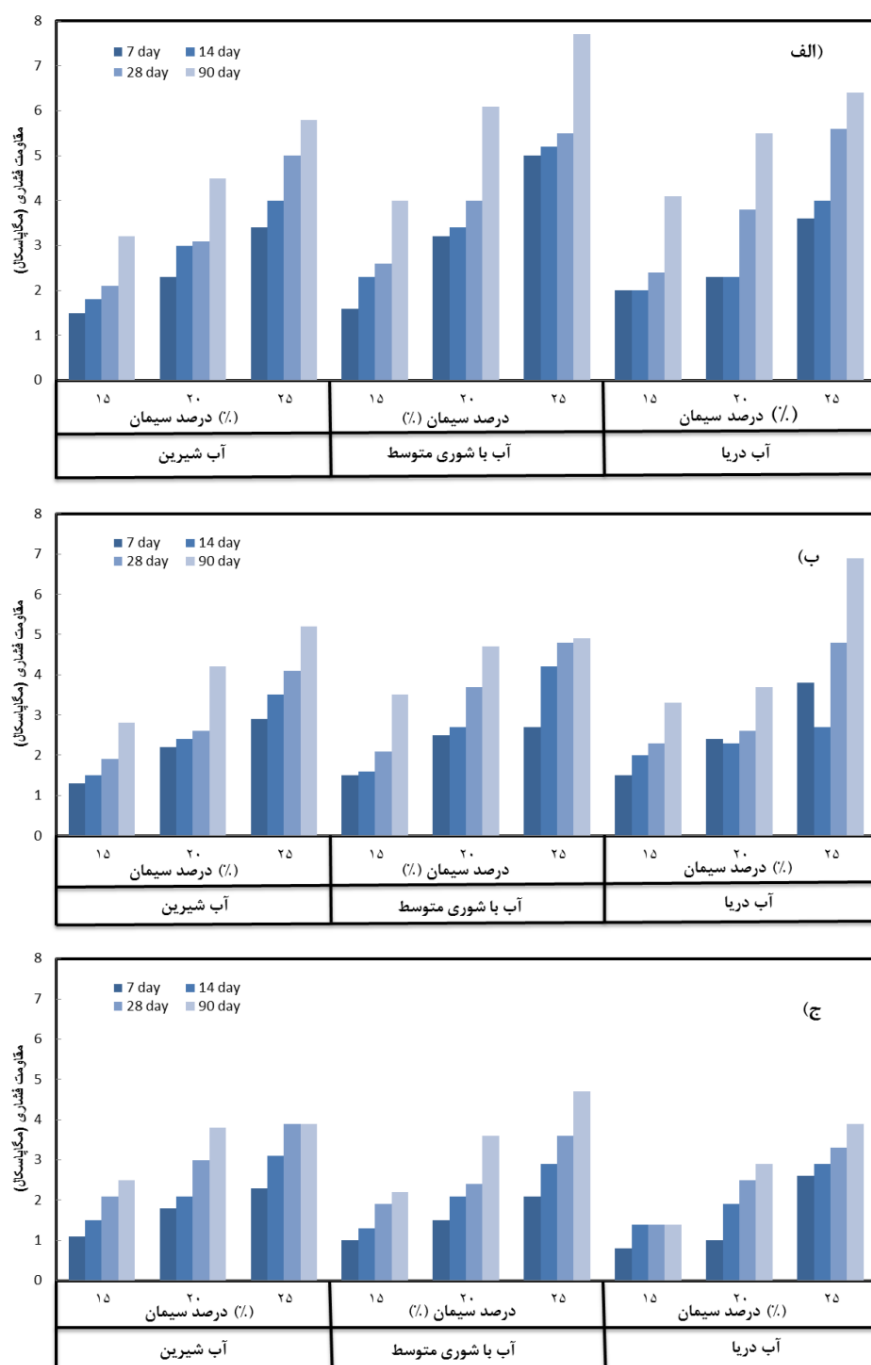
شکل ۶. مقایسه محدوده مدول الاستیسیته نمونه های ماسه-سیمان با معادله به دست آمده از مرجع [۴۳]
Fig. 6. Relationship between UCS and modulus of elasticity

و سیلیکات دو کلسیم (C_2S) در حضور یون های سولفات و افزایش حلالیت آن ها در محلول سولفات ها باشد که باعث افزایش فرآیند هیدراتاسیون می شود و این موضوع در مراجع [۳۷ و ۳۹] نیز اشاره شده است. با افزایش نسبت آب به سیمان نقاط بیشینه و میانگین مقاومت فشاری نمونه ها کاهش یافته است. همچنین با افزایش سن، مقاومت فشاری تک محوری نمونه های ماسه-سیمان ساخته شده با آب با شوری متوسط در نسبت های مختلف آب به سیمان از مقاومت فشاری تک محوری نمونه های ماسه-سیمان ساخته شده با آب شیرین و آب دریا بیشتر است. به طور میانگین روند تغییرات مقاومت فشاری تک محوری با افزایش زمان عمل آوری به صورت افزایشی است [۴۱]. روند افزایش مقاومت نمونه های ساخته شده با آب دریا در دراز مدت (با افزایش زمان عمل آوری) را می توان به خارج شدن فرآورده های حاصل از هیدراتاسیون یا خروج آب منفذی هم ربط داد [۳۸]. زمانی که از آب شور در ساخت نمونه ها استفاده می شود به دلیل وجود یون های کلرید و برخی نمک ها، زمان گیرش اولیه کاهش می یابد [۳۹ و ۳۸]. وقتی یون کلر وارد طرح اختلاط می شود در سنین اولیه (۷ و ۱۴ روزه) تمایل فراوانی به برقراری ارتباط با آلومینات سه کلسیم (C_3A) دارد. C_3A با آب سریع واکنش داده در نتیجه باعث گیرش ناگهانی خمیر سیمان می شود [۴۴]. کاهش زمان گیرش اولیه منجر به افزایش سرعت فرآیند هیدراتاسیون سیمان شده در نتیجه فرآورده های سیمانی بیشتری تولید می شوند، که

۳-۱-۴- تأثیر آب شور بر مشخصات خاک-سیمان در طول زمان یکی از نگرانی ها در استفاده از آب شور در خاک-سیمان، رفتار تابع زمان است. در این راستا اثرات زمان تا ۹۰ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۷ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه های ماسه-سیمان در برابر افزایش زمان عمل آوری، با نسبت آب به سیمان و درصد های سیمان مختلف را نشان می دهد. مشاهده می شود با گذشت زمان، مقاومت نمونه های ساخته شده با آب دریا افت مقاومت نداشته است. البته در مقاومت های کوتاه مدت نمونه ها شوری آب تأثیرات ناچیزی دارد. به طور کلی زمان عمل آوری و ایجاد فرصت برای خمیر ماسه-سیمان جهت اطمینان از این که فرآیند هیدراتاسیون کامل صورت گیرد امری ضروری است [۳۶]. هر چند با افزایش زمان عمل آوری مقاومت نمونه ها افزایش می یابد، ولی میزان و نرخ افزایش مقاومت به عوامل مختلفی بستگی دارد. از جمله عوامل مؤثر بر تغییرات نرخ افزایش مقاومت، زمان گیرش اولیه و نهایی است. افزایش مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با آب دریا در سنین کم (۷ روزه) نسبت به سایر نمونه ها بهتر است. چرا که منافذ و تخلخل های موجود در این نمونه ها در سنین کم، بهتر از سایر نمونه ها با استفاده از فرآورده های حاصل از هیدراتاسیون کاهش می یابد که مورد تأکید مراجع نیز می باشد [۳۸]. این رفتار بیشتر می تواند به دلیل کاهش زمان گیرش اولیه به دلیل حضور یون های کلرید بعضی از نمک ها و تسریع شدن واکنش های هیدراتاسیون سیلیکات سه کلسیم (C_3S)

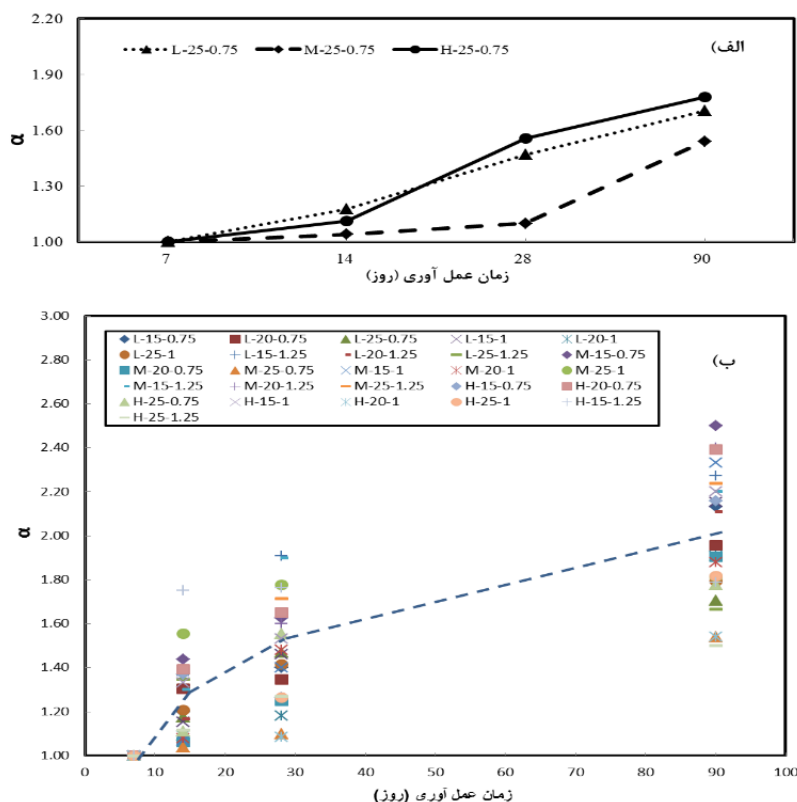
نرخ افزایش بلندمدت مقاومت بتن بیان کرده اند [۳۸ و ۳۷]. درصد افزایش این مقدار برای نمونه های ساخته شده با آب دریا نسبت به نمونه های ساخته شده با دو نوع آب دیگر کمتر است. می توان گفت این موضوع به دلیل تشکیل بلوره های نمک است. در راستای بررسی تأثیر شوری بر مقاومت فشاری نمونه های

باعث پر شدن منافذ موجود در ساختار نمونه ها می شوند [۳۵]. با افزایش زمان عمل آوری تمایل یون کلر به برقراری ارتباط با C_4A کاهش می یابد و یون کلر از حالت پیوند یافته خارج شده و به یون کلر آزاد که تمایل به برقراری ارتباط ندارد، تبدیل شده و تأثیری بر کاهش زمان گیرش نهایی ندارد. مراجع این دلیل را برای کاهش



شکل ۷. تأثیر زمان بر تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه های ماسه-سیمان ساخته شده با آب دارای شوری های متفاوت: (الف) نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ (ب) نسبت آب به سیمان ۱ (ج) نسبت آب به سیمان ۱/۲۵

Fig. 7. Effect of time and salinity on the UCS of sand-cement mixtures: a) W/C=0.75, a) W/C=1, a) W/C=1.25



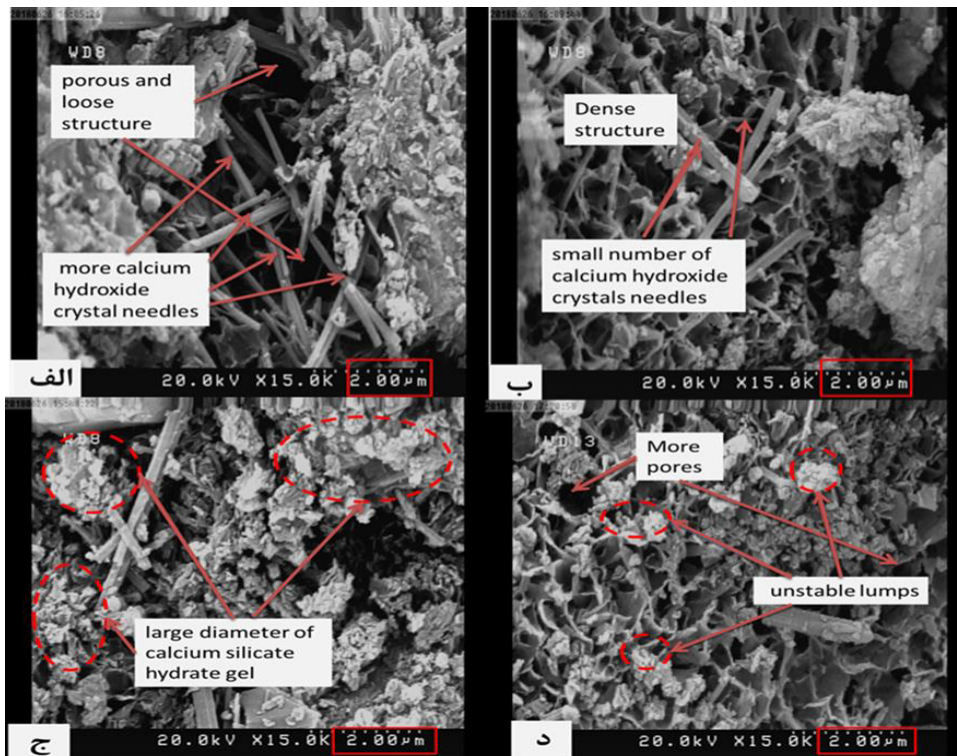
شکل ۸. تأثیر آب شور بر افزایش مقاومت تابع زمان نسبت به مقاومت سنین اولیه: الف) در نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ (ب) در تمام حالات نمونه های ماسه-سیمان

Fig. 8. Effect of water salinity on the strength of soilcrete vs. curing time

سیر صعودی دارد و در طی زمان نمونه ها افزایش مقاومتی تا ۲/۵ برابر را نسبت به مقاومت ۷ روزه از خود نشان داده اند.

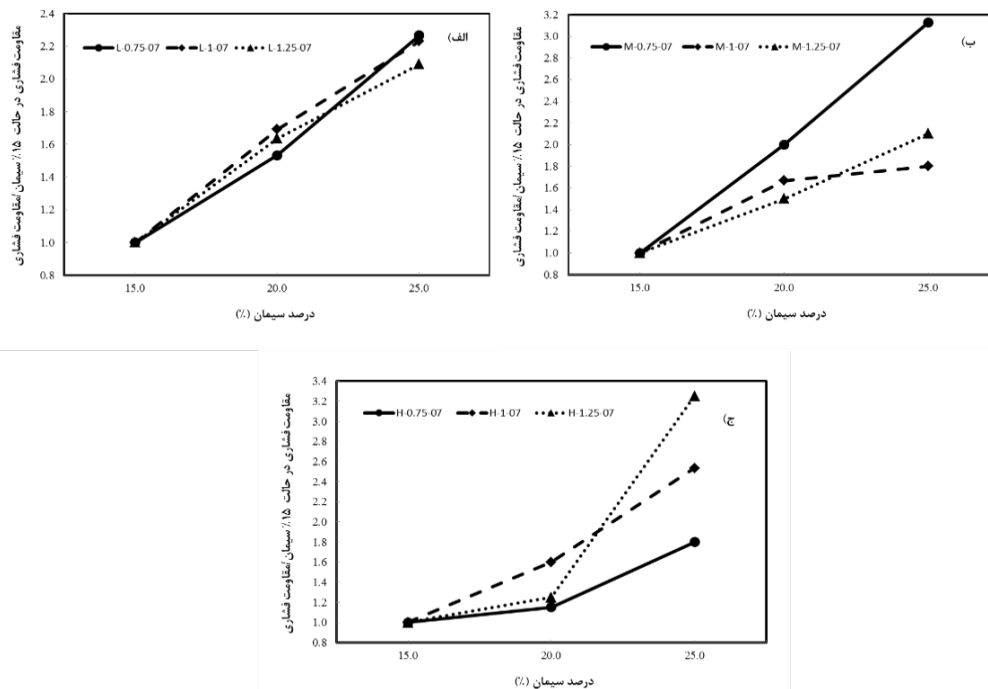
شکل ۹ تصاویر ریزساختاری نمونه های ساخته شده با آب دریا و همچنین آب شیرین در سنین ۷ و ۲۸ روزه با نسبت آب به سیمان ثابت (۱/۲۵) و مقدار سیمان ۱۵ و ۲۵ درصد نشان می دهد. میزان بیشتر بلوره های سوزنی هیدروکسید کلسیم نسبت به ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده (C-S-H) برای نمونه ۷ روزه ساخته شده با آب شیرین مشاهده می شود (شکل ۹-الف). اتصال بلوره های سوزنی به ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده (C-S-H) نشان دهنده این موضوع است که واکنش های هیدراتاسیون به طور کامل انجام نشده است [۷]. در شکل ۹-ب ساختار ریز متراکم برای نمونه ۷ روزه ساخته شده با آب دریا، نشان دهنده روند افزایش هیدراتاسیون سیمان به خاطر حضور یون های نمک در مخلوط است که منجر به تولید بیشتر ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده (C-S-H) و واکنش بیشتر با بلوره های سوزنی هیدروکسید کلسیم و تولید ساختار فشرده تر با

مورد آزمایش در سنین مختلف، ضریبی به نام آلفا (α) که نشان دهنده مقاومت فشاری در هر سنی نسبت به سن ۷ روزه است، تعریف شده است. شکل ۸-الف تغییرات این ضریب را در زمان های مختلف در درصد سیمان ۲۵٪ و نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ نشان می دهد. اعداد بیش از یک بیانگر این مفهوم هستند که با گذشت زمان، مقاومت نسبت به مقاومت ۷ روزه در حال افزایش است. مشاهده می شود بیشترین درصد افزایش مقاومت ۹۰ روزه نسبت به ۷ روزه در نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ مربوط به آب شور است. مقدار نسبت افزایش مقاومت ۹۰ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه نمونه های ساخته شده با شیرین در حد وسط قرار دارد. این موضوع نشان دهنده آن است که با وجود شوری (متوسط و زیاد) نمونه های ماسه-سیمان به افزایش مقاومت خود در سنین بالا ادامه می دهند و نگرانی از بابت استفاده از آب شور در مقاومت بلندمدت نمونه ها وجود ندارد. شکل ۸-ب به بررسی رفتار کلیه نمونه ها در نسبت مقاومت سنین مختلف به مقاومت ۷ روزه می پردازد. مشاهده می شود با افزایش سن مقاومت



شکل ۹. تأثیر شوری بر ریزساختار نمونه های ماسه سیمان با نسبت آب به سیمان ۱/۲۵ و با ۲۵ درصد سیمان: الف) نمونه ساخته شده با آب شیرین در سن ۷ روز ب) نمونه ساخته شده با آب دریا در سن ۷ روز ج) نمونه ساخته شده با آب شیرین در سن ۲۸ روز د) نمونه ساخته شده با آب دریا در سن ۲۸ روز

Fig. 9. Effect of the salinity on the microstructure of the soicrete in W/C=1.25 and 25% cement content: a) tap water in 7 days, b) seawater in 7 days, c) tap water in 28 days, d) seawater in 28 days



شکل ۱۰. تأثیر درصد سیمان و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بی بعد شده: الف) نمونه های ساخته شده با آب شیرین ب) نمونه های ساخته شده با شور متوسط ج) نمونه های ساخته شده با آب دریا

Fig. 10. Effect of cement content and W/C on UCS: a) tap water, b) brakish water, c) seawater

جدول ۴. میانگین افزایش مقاومت فشاری با افزایش درصد سیمان از ۱۵ به ۲۵ درصد

Table 4. The average of increasing in UCS with increasing cement from 15% to 25%

نوع آب	نسبت آب به سیمان	میانگین افزایش مقاومت فشاری با افزایش درصد سیمان از ۱۵٪ تا ۲۵٪
آب شیرین	۰/۷۵	۲/۱۶
	۱	۲/۱۴
	۱/۲۵	۱/۸۹
آب با شوری متوسط	۰/۷۵	۲/۳۵
	۱	۲/۰۳
	۱/۲۵	۲/۰۸
آب دریا	۰/۷۵	۱/۹
	۱	۲
	۱/۲۵	۲/۶۱

برابر شده و با افزایش درصد سیمان از ۲۰ درصد تا ۲۵ درصد مقاومت فشاری ۱/۵ برابر شده است. این مقادیر در نسبت آب به سیمان ۱ به ترتیب برابر با ۱/۷ و ۱/۱ و در نسبت آب به سیمان ۱/۲۵ برابر با ۱/۵ و ۱/۴ است. با توجه به نسبت های به دست آمده می توان مشاهده نمود با افزایش نسبت آب به سیمان، نرخ صعودی نسبت مقاومت کاهش می یابد.

این موضوع گواه آن است که حضور آب در کسب مقاومت تأثیر فراوان و منفی دارد. در نتیجه وجود نسبت آب به سیمان بیشتر، باعث ورود آب بیشتر به طرح اختلاط و افزایش تخلخل و نفوذپذیری شده و کاهش مقاومت را در مقایسه با نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ دارد. جدول ۴ میانگین افزایش مقاومت با افزایش درصد سیمان از ۱۵ درصد به ۲۵ درصد را برای نمونه ها نشان می دهد.

شکل ۱۱ تأثیر درصد سیمان و نسبت آب به سیمان در تمام حالات آب مصرفی بر تغییرات مقاومت فشاری و کششی در سن ۷ روزه نشان داده شده است. مشاهده می شود با افزایش درصد سیمان و مستقل از میزان شوری، مقاومت افزایش داشته است و واکنش های هیدراتاسیون شکل گرفته است. با افزایش مقدار آب یا کاهش مقدار سیمان، موارد سیمانی مورد نیاز جهت انجام هیدراتاسیون کامل حضور ندارند و با کاهش مقدار سیمان یا افزایش مقدار آب، تکمیل فرایند سیمانی شدن و به تبع آن تشکیل کلوخه های خاک سیمان کاهش می یابد و منجر به کاهش نرخ افزایش مقاومت می گردد. همچنین

منافذ کمتر است. این موضوع تأییدی بر علت افزایش مقاومت این نمونه ها در سن ۷ روزه نسب به مقاومت نمونه ساخته شده با آب شیرین است [۳۷]. ولی با افزایش زمان عمل آوری (۹۰ و ۲۸) نرخ افزایش مقاومت به دلیل خارج شدن آب منفذی و افزایش تعداد منافذ کاهش یافته است [۳۸].

۳-۲- اثر درصد سیمان و میزان آب به سیمان

در حالت کلی تأثیرات سیمان و میزان آب به سیمان بر رفتار خاک-سیمان در مراجع به خوبی اشاره شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. لیکن از آنجا که در این تحقیق رفتار تابع شوری مطالعه شده است، در این بخش تأثیر این دو عامل مهم تحت هم زمانی اثر آب شور نیز مجدداً بررسی شده است. شکل ۱۰ تغییرات مقاومت فشاری در درصد های سیمان مختلف نسبت به مقاومت فشاری در ۱۵٪ سیمان در نسبت های آب به سیمان ۱/۲۵ را نشان می دهد. محور قائم در این نمودارها بیانگر مقاومت فشاری درصد های مختلف سیمان است که نسبت به سیمان ۱۵ درصد بی بعد شده است. مشاهده می شود با افزایش درصد سیمان در تمام حالات نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری افزایش می یابد. میزان این افزایش در نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ بیشتر و در نسبت آب به سیمان ۱/۲۵ کمتر است. به عنوان مثال در سن ۷ روز در نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ برای نمونه های ساخته شده با آب دارای شوری متوسط، با افزایش درصد سیمان از ۱۵ درصد تا ۲۰ درصد، مقاومت فشاری ۲

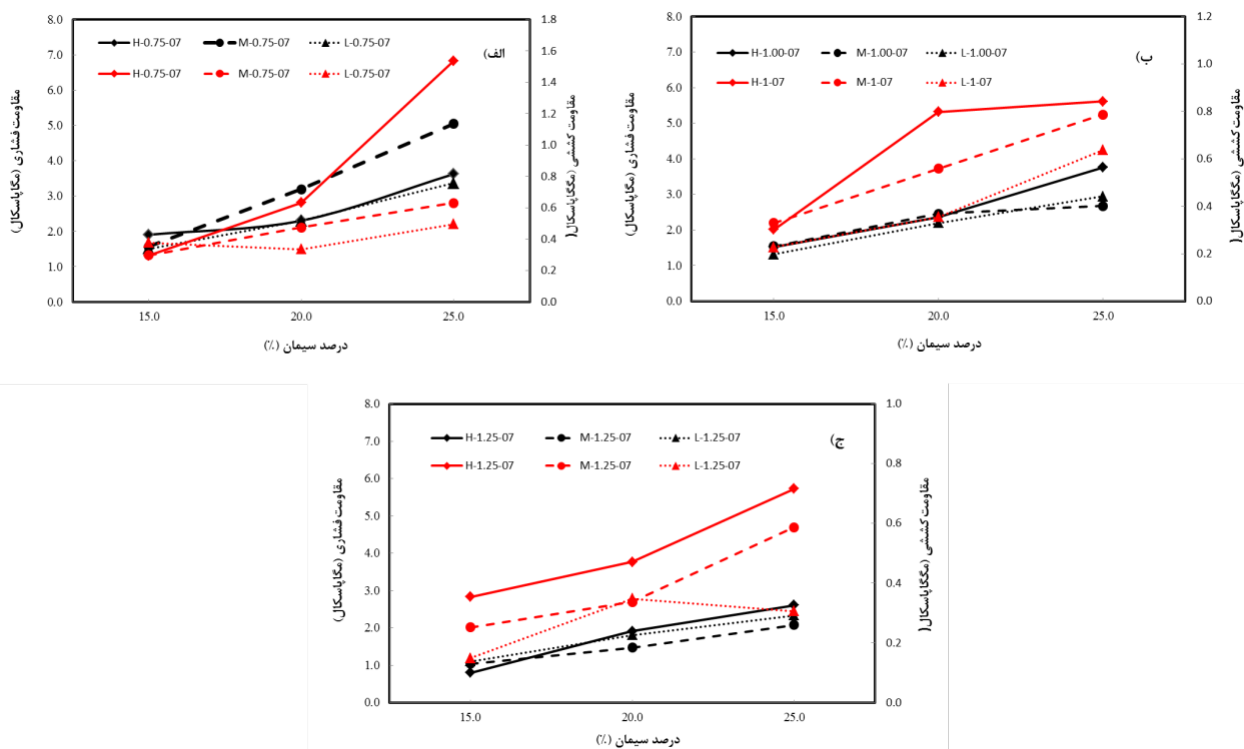
الف تا ج در شکل ۱۲ می توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد سیمان در تمام حالات آب مصرفی، روند تغییرات مدول الاستیسیته افزایشی می باشد. این افزایش در نمونه های ساخته شده با آب با شوری متوسط بیشتر است و همانند مقاومت فشاری بیشترین مقدار مدول الاستیسیته مربوط به نمونه های ساخته شده با آب با شوری متوسط است. با افزایش نسبت آب به سیمان مدول الاستیسیته کاهش می یابد که به دلیل حضور آب بیشتر در حفرات موجود در مخلوط به دست آمده از طرح اختلاط است.

۳-۳- محدوده های مقاومتی حاصل شده

به منظور تحلیل رفتار مقاومتی نمونه های ماسه-سیمان و استفاده از نتایج آن در مطالعات مربوط به طراحی ستون های ماسه-سیمان، سعی بر این شده است که ارتباط بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری نمونه های ماسه-سیمان را در تمامی حالات مختلف شوری و درصد های مختلف سیمان و همچنین نسبت های مختلف

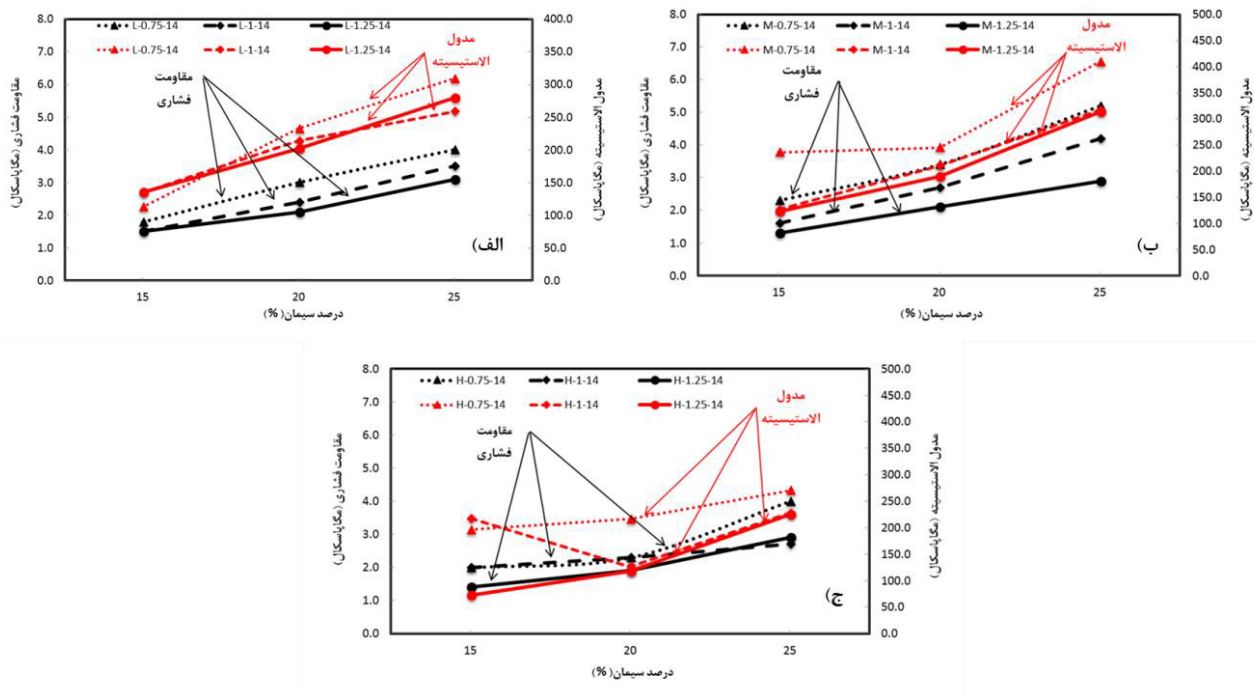
مشاهده می شود مقاومت کششی رفتاری مشابه با مقاومت فشاری متأثر از درصد سیمان و میزان آب به سیمان دارد. به عنوان مثال می توان مشاهده نمود در نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ در سن ۷ روزه در حالت استفاده از آب با شوری متوسط، نمونه ها با افزایش درصد سیمان از ۱۵٪ تا ۲۰٪ افزایش مقاومت ۵۷٪ و با افزایش درصد سیمان از ۲۰٪ تا ۲۵٪ افزایش مقاومتی ۳۴٪ را تجربه کرده است. در دیگر نسبت های آب به سیمان این مقادیر در نسبت آب به سیمان ۱ به ترتیب برابر با ۷۰٪ و ۴۱٪ و در نسبت آب به سیمان ۱/۲۵ به ترتیب برابر با ۳۶٪ و ۷۳٫۵٪ است.

شکل ۱۲ تأثیر درصد سیمان و نسبت آب به سیمان بر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری در درصد های مختلف سیمان (۲۵، ۲۰، و ۱۵) در سن ۱۴ روزه در نسبت های آب به سیمان ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ در تمام حالات آب مصرفی را نمایش می دهد. مطابق آن روند تغییرات مدول الاستیسیته نمونه ها مطابق با روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها می باشد و روندی افزایشی دارد. با مقایسه قسمت



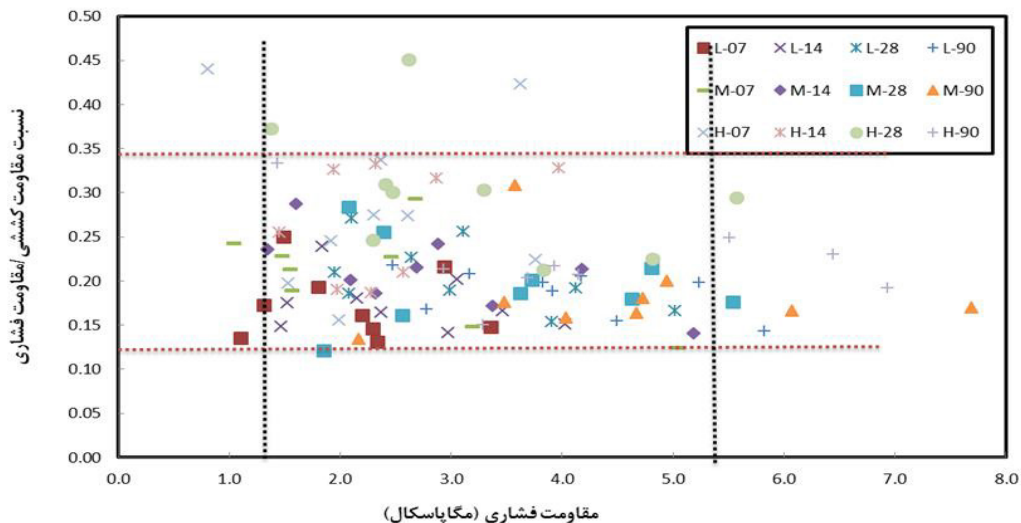
شکل ۱۱. تأثیر درصد سیمان بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی ۷ روزه در حالات مختلف آب مصرفی در نسبت آب به سیمان الف) ۰/۷۵ (ب) ۱ و ج) ۱/۲۵

Fig. 11. Effect of cement content on the UCS and tensile strength in various water salinities: a) W/C=0.75, b) W/C=1, c) W/C=1.25



شکل ۱۲. تأثیر درصد سیمان و نسبت آب به سیمان بر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری در درصدهای مختلف سیمان (۱۵ و ۲۰، ۲۵) در سن ۱۴ روزه در حالت استفاده از الف) آب شیرین ب) آب با شوری متوسط ج) آب دریا

Fig. 12. Effect of the cement content and W/C on the UCS and E in various cement content (15%, 20%, 25%) in 14 days: a) tap water, b) brackish water, c) seawater



شکل ۱۳. نمودار نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری نمونه های ماسه-سیمان در برابر مقاومت فشاری

Fig. 13. The ratio of tensile strength to UCS

برای نمونه های ساخته شده با آب دریا، آب با شوری متوسط و آب شیرین به ترتیب برابر با (۰/۱۵ تا ۰/۳۵)، (۰/۱۴ تا ۰/۳) و (۰/۱۳ تا ۰/۲۵) است. جهت دستیابی به محدوده مقاومتی و همچنین ارتباط

آب به سیمان تعیین شود. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با آب های مختلف در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این نسبت به ترتیب

مقاومت فشاری را برابر (۰/۳ تا ۰/۱۵)، همچنین محدوده مقاومت فشاری نمونه ها برابر (۶ تا ۱/۵) مگاپاسکال را معرفی می کند. ۶- نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص عدم تأثیر شوری آب بر مقاومت خاک-سیمان، صرفاً برای حالت خاک-سیمان غیر مسلح صادق است و چنانچه از آرماتور جهت تسلیح خاک-سیمان استفاده گردد، ممکن است شوری آب تأثیرات منفی بر رفتار خاک-سیمان مسلح داشته باشد و بر این اساس نتایج این تحقیق در خصوص آن صادق نیست. همچنین از آنجا که در این تحقیق تأثیر زمان عمل آوری تا ۹۰ روز بر رفتار ماسه-سیمان بررسی شده است، لازم است در تحقیقات آتی، تأثیرات زمان های بیش از ۹۰ روز نیز در راستای تأثیر شوری آب بر رفتار خاک-سیمان ارزیابی گردد.

مراجع

- [1] Y. Liu, Y. Jiang, H. Xiao, F. Lee, Determination of representative strength of deep cement-mixed clay from core strength data, *Geotechnique*, 67(4) (2017) 350-64.
- [2] C.A. Anagnostopoulos, Strength properties of an epoxy resin and cement-stabilized silty clay soil, *Applied Clay Science*, 114 (2015) 517-29.
- [3] B. Nikbakhtan, M. Osanloo, Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3) (2009) 498-505.
- [4] M. Kitazume, M. Terashi, *The Deep Mixing Method*, CRC Press (2013).
- [5] O. Helson, A. L. Beaucour, J. Eslami, A. Noumowe, P. Gotteland, Physical and mechanical properties of soilcrete mixtures: Soil clay content and formulation parameters, *Construction and Building Materials*, 131 (2017) pp: 775-83.
- [6] S. Yoon, M. Abu-Farsakh, Laboratory Investigation on the Strength Characteristics of Cement-Sand as Base Material, *Ksce Journal of Civil Engineering*, 13(1) (2009) 15-22.
- [7] A. Janalizadeh Choobbasti, S. Soleimani Kutanaei, Microstructure characteristics of cement stabilized sandy soil using nanosilica, *Journal of Rock Mechanics and*

بین مقاومت کششی و فشاری، مقاومت همه نمونه ها را در این نمودار رسم شده است که طبق آن محدوده نسبت مقاومت کششی به فشاری برابر (۰/۱۵ تا ۰/۳) است. این نسبت مقاومت فشاری به کششی در محدوده های توصیه شده در مراجع قرار گرفته است [۳۸]. همچنین محدوده مقاومت فشاری نمونه ها برابر (۱/۵ تا ۶) مگاپاسکال است.

۴- نتیجه گیری

از آنجا که تأثیر استفاده از آب شور (دریای خزر) در ساخت دوغاب بر تغییرات رفتار مکانیکی و ریزساختاری نمونه های خاک-سیمان در شرایط محیطی دریایی کمتر بررسی شده است، در این تحقیق تأثیر هم زمان متغیرهایی مانند درصد سیمان، نسبت آب به سیمان، زمان عمل آوری و شوری آب بر خواص مقاومت فشاری و کششی، مدول الاستیسیته و ریزساختاری نمونه های ماسه-سیمان بررسی و نتایج زیر اخذ گردید:

- ۱- استفاده از آب شور به جای آب شیرین در طرح اختلاط نمونه های ماسه-سیمان بلامانع است. افزایش میزان شوری تأثیر منفی چشمگیری بر مقاومت فشاری نمونه ها نداشته است. این نتیجه برای محدوده سیمان ۱۵ تا ۲۵ درصد در طرح اختلاط حاصل شده است.
- ۲- آب شور موجود در ساخت دوغاب بر مقاومت بلندمدت نمونه ها بی تأثیر بوده و بر این اساس نگرانی بابت کاهش مقاومت درازمدت در شرایط محیطی دریایی وجود ندارد.
- ۳- محدوده نسبت مقاومت فشاری به کششی برای نمونه های ساخته شده با آب دریا، آب با شوری متوسط و آب شیرین به ترتیب برابر با (۰/۱۵ تا ۰/۳۵)، (۰/۱۴ تا ۰/۳) و (۰/۱۳ تا ۰/۲۵) است. متوسط مقاومت فشاری نمونه ها در شرایط آزمایشگاهی این تحقیق در محدوده ۴ مگاپاسکال می باشد.
- ۴- تأثیرات کاهش نسبت آب به سیمان بر مقاومت، بیش از افزایش درصد سیمان است. بر این اساس در پروژه های واقعی و به منظور افزایش مقاومت نمونه های واقعی، اقتصادی ترین راه، کاهش نسبت آب به سیمان است.

۵- نتایج این تحقیق به منظور تحلیل رفتار مقاومتی نمونه های ماسه-سیمان و استفاده از نتایج آن در مطالعات مربوط به طراحی ستون های ماسه-سیمان محدوده نسبت مقاومت کششی به

- The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil, *Construction and Building Materials*, 118 (2016) 294–306.
- [19] M. Kitazume, M. Grisolia, E. Leder, I.P. Marzano, A. Alberto, S. Correiac, P.J.V. Oliveira, H. Åhnberg, M. Andersson, Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method, *Soils and Foundations*, 55(4) (2015) 761–777.
- [20] B.V. V. Reddy, A. Gupta, Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil–cement block masonry, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 1614–1623.
- [21] H.M. Kwon, A.T. Le, N.T. Nguyen, Influence of Soil Grading on Properties of Compressed Cement-soil, *Ksce Journal of Civil Engineering*, 14(6) (2010) 845-853.
- [22] S.H. Bahmani, B.B.K. Huat, A. Asadi, N. Farzadnia, Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement, *Construction and Building Materials*, 64 (2014) 350–359.
- [23] A. Sreekrishnavilasam, S. Rahardja, R. Kmetz, M. Santagata, Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 318–327.
- [24] K.A. Tariq, T. Maki, Mechanical behaviour of cement-treated sand, *Construction and Building Materials*, 58 (2014) 54–63.
- [25] L. Festugato, E. Menger, F. Benezra, E.A. Kipper, Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length, *Geotextiles and Geomembranes* 45 (2017) 77-82.
- [26] R. Starcher, C.H. Liu, Mechanical Behavior of Cement-and Cement-Fiber-Improved Soft Soils, *Geo-Congress 2013*, ASCE (2013).
- [27] M. Mackevičius, D. Sližytė, T. Zhilkina, Influence of calcite particles on mechanical properties of grouted sandy soil, *Procedia Engineering*, 172 (2017) 681 – 684.
- [28] N.C. Consoli, M.A. Vendruscolo, P.D.M. Prietto, Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber, *Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(1) (2003) 96-103.
- Geotechnical Engineering, (2017).
- [8] P. Dr.Eng. Jamsawang, P. Dr.Eng. Voottipruex, S. Ph.D. Horpibulsuk, Flexural Strength Characteristics of Compacted Cement-Polypropylene Fiber Sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 27, 9, (2015).
- [9] M. Esmaeili, F.Astaraki, H.Khajehei, Laboratory investigation on the effect of microsilica additive on mechanical properties of deep soil mixing columns in loose sandy soils, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, ISSN: 1964-8189 (2017) 2116-7214.
- [10] N.C.Consoli, R.C. Cruz, A.V.D. Fonseca, M.R. Coop, Influence of Cement-Voids Ratio on Stress-Dilatancy Behavior of Artificially Cemented Sand, *Geotech. Geoenviron. Eng.*, 138(1) (2012) 100-109.
- [11] X. Wei, T. Ku, New design chart for geotechnical ground improvement: characterizing cement-stabilized sand, *Acta Geotechnica*, (2019).
- [12] I.N. Markou, D.N. Christodoulou, M. Atmatzidis, Effect of Sand Gradation on the Groutability of Cement Suspensions, *Grouting and Deep Mixing*, ASCE (2012).
- [13] M.Tajdini, M. Hajialilue Bonab, S. Golmohamadi, An Experimental Investigation on Effect of Adding Natural and Synthetic Fibres on Mechanical and Behavioural Parameters of Soil–Cement Materials, *Iran University of Science and Technology*, (2017).
- [14] M. Ismail, H.A Joer, W.H. Sim, M.F. Randolph, Effect of Cement Type on Shear Behavior of Cemented Calcareous Soil, *Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(6) (2002) 520-529.
- [15] H. Shoukry, M.F. Kotkata, S.A. Abo-EL-Enein, M.S. Morsy, S.S. Sheb, Enhanced physical. mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 276–283.
- [16] H. Hyashi, J. Nishikawa, K. Ohish, M. Terashi, Field Observation Of Long- Term Strength Of Cement Treated Soil, *Grouting and Ground Treatment*, (2003).
- [17] A.T.M.Z. Rabbi, J. Kuwano, Effect of Curing Time and Confining Pressure on the Mechanical Properties of Cement-treated Sand, *GeoCongress. 2012*, ASCE (2012).
- [18] S.H. Bahmani, N. Farzadnia, A. Asadi, B.B.K. Huat,

- Structural Concrete Exposed to a Marine Environment, Civil Engineering Department. University of Roorkee, Roorkee-247 667, 17 (1995) 177-185.
- [38] J.A.C. Xiao, C.H. Qiang, A. Nanni, K. Zhang, Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities, *Construction and Building Materials*, 155 (2017) 1101-111.
- [39] A. Younis, U. Ebead, P. Suraneni, A. Nanni, Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 276-286.
- [40] M. Bruce, R. Berg, J. Collin, G. Filz, M. Terashi, D. Yang, Federal Highway Administration Design Manual. Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, Publication No. FHWA-HRT-13-046. US Department of Transportation, (2013).
- [41] F.M. Wegian, Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, ISSN: 1937-3260, 3(4) (2010) 1937-3279.
- [42] A. ZhoU, R. Qin, C.H.L.Chow, D. Lau, Structural performance of FRP confine seawater concrete columns under chloride environment, *Composite Structures*, (2019).
- [43] P. Croce, A. Flora, G. Modoni, Jet grouting: technology. design and control, CRC Pres, (2014).
- [44] P. Ghodousi, A. Ganjian, T. Parhizkar, A.A. ramezaniapour, Concrete technology in Persian Gulf environment: Pathology of concrete and evaluation, Road, Housing & Urban Development Research Center, (1378), In Persian.
- 101.
- [29] A. Ates, Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC), *Composites*, 96 (2016) 295-304.
- [30] P.Sukontasukkul, P. Jamsawang, Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column, *Construction and Building Materials*, 29 (2012) 201-205.
- [31] L. Ali, R.D. Woods, Creating Artificially Cemented Sand Specimen with Foamed Grout, *Geotechnical Special Publication No. 197. GeoHunan International Conference 2009*, (2009).
- [32] Y. Yang, G. Wang, S. Xie, X. Tu, X. Huang, Effect of mechanical property of cemented soil under the different pH value, *Applied Clay Science*, 79 (2013) 19-24.
- [33] M.K. Karim, M.D.J. Alam, M.D.SH. Hoque, Effect of salinity of water in lime-fly ash treated sand, *Geo-Engineering*, (2017).
- [34] T. Meng, Y. Qiang, A. Hu, C.H. Xu, L. Lin, Effect of compound nano-CaCO₃ addition on strength development and microstructure of cement-stabilized soil in the marine environment, *Construction and Building Materials*, 151 (2017) 775-781.
- [35] V. Khoshirat, H. Bayesteh, M. Sharifi, Effect of high salinity in grout on the performance of cement-stabilized marine clay, *Construction and Building Materials*, 217 (2019) 93-107.
- [36] E.M. Mbadike, A.U. Elinwa, Effect of salt water in the production of concrete, *Nigerian Journal of Technology*, 30(2) June (2011).
- [37] S. K. Kaushik, S. Islam, Suitability of Sea Water for Mixing

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Geravand, H. Bayesteh, M. Sharifi, Effect of seawater in grout on the mechanical behavior of cement stabilized marine sand. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 2277-2296

DOI: [10.22060/ceej.2020.17372.6540](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17372.6540)

