تاثیر متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه بر مشخصات ژئوتکنیکی ماسه انزلی تثبیت شده با سیمان به روش DSM

الهه خوانین زاده[1]، رضا ضیائی موید[*2]

۱-دانشجو دکتری تخصصی مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
elii.kh94@gmail.com

۲- استاد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران (Corresponding Author, phone: 028-3390-1104; e-mail: Ziaie@eng.ikiu.ac.ir).

چکیده:

بهسازی خاک‌های ماسه‌ای سست در مناطق ساحلی، به‌ویژه در محیط‌های دریایی، یکی از چالش‌های مهم مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. در این پژوهش، تأثیر متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه بر رفتار مکانیکی و سختی ماسه انزلی تثبیت‌شده با سیمان به روش اختلاط عمیق خاک (DSM) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌هایی با ۲۰٪ سیمان و (۳٪،۰٪ متاکائولین و۳٪ ، ۰٪ پسماند کارخانه شیشه) تهیه و پس از عمل‌آوری در دو محیط آب شیرین و آب دریا، تحت آزمایش فشاری محصورنشده و آزمایش سه محوری قرار گرفتند. مدول الاستیسیته سکانت (E_{50}) به‌عنوان شاخص سختی نمونه‌ها، از منحنی‌های تنش–کرنش استخراج شد. نتایج نشان داد که افزودن متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه، به‌صورت مجزا و به‌ویژه به‌صورت ترکیبی، موجب افزایش قابل‌توجه مدول الاستیسیته و بهبود رفتار مکانیکی نمونه‌ها می‌شود. همچنین مشاهده شد که با افزودن ۲۰٪ سیمان، ۳٪ متاکائولین و ۳٪ پسماند کارخانه شیشه، عمل‌آوری در آب دریا منجر به افزایش چشمگیر (E_{50}) نسبت به آب شیرین شده است که این پدیده به اثر هم‌افزایی واکنش‌های پوزولانی، تشکیل فازهای هیدراسیونی پایدارتر و بهبود تراکم ریزساختار در حضور یون‌های محیط شور نسبت داده می‌شود. نتایج نشان داد که ذرات متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه نه تنها تعداد زیادی از کریستال‌های CH[1] را برای تولید CSH[2] مصرف می‌کنند، بلکه اثر پرکنندگی نیز از خود نشان می‌دهند که منجر به کاهش تخلخل، افزایش چگالی، بهبود ریزساختار ناحیه انتقال بین سطحی و عملکرد مکانیکی بهتر می‌شود.

کلمات کلیدی:

بهسازی خاک ماسه‌ای، سیمان، متاکائولین، پسماند کارخانه شیشه، آب شیرین، آب دریا، مدول الاستیسیته، اختلاط عمیق

۱. مقدمه:

امروزه یکی از چالش‌های حوزه مهندسی ژئوتکنیک، توسعه پایدار و بادوام روش‌های بهسازی خاک استفاده‌شده در محیط دریایی می‌باشد. در مهندسی ژئوتکنیک، می‌توان از تکنیک‌های مختلف بهسازی برای بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌های نامطلوب استفاده

[1] Calcium hydroxide
[2] Calcium silicate hydrate

ACCEPTED MANUSCRIPT

کرد که یکی از آنها بهسازی شیمیایی با استفاده از سیمان است. در بهسازی با استفاده از دوغاب سیمان، محققین متعددی از جمله : (دالا روسا و همکاران، کنسولی و همکاران، فارو و همکاران، شوشپاشا و شیروانی، فورکلینی و همکاران، کاردوسو و همکاران، رسولی و همکاران، شلابی و همکاران)[۱-۱۲]. تأثیر سیمان بر خاک‌های ماسه‌ای، رفتار مکانیکی ماسه سیمانی شده و عوامل موثر بر آن مانند مقدار و نوع سیمان، زمان عمل‌آوری و همچنین تخلخل، خواص فیزیکی و شیمیایی، چگالی و اندازه دانه‌های خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. اما همچنان استفاده از سیمان در دوغاب مورد انتقاد می‌باشد چراکه تولید سیمان با انتشار کربن دی‌اکسید اثرات مخربی را بر محیط‌زیست می‌گذارد همین امر مهندسان ژئوتکنیک را به سمت جایگزینی قسمتی از سیمان با سایر افزودنی‌های مانند دوده سیلیس، متاکائولین، زئولیت بنتونیت و...(کنسولی و همکاران، کنیراژ و هونگی، حمیدی و هورسفند، آتف، ملاعباسی و همکاران، قدک‌پور و همکاران،افراکوتی و همکاران،سوتو و همکاران) سوق داده است [۱۳-۱۶]تا در کنار افزایش ویژگی‌های مقاومتی خاک، اثرات مخرب زیست‌محیطی کاهش یابد.

از سوی دیگر استفاده از پسماندهای کارخانه‌ای به عنوان مصالح جایگزی سیمان در بهسازی خاک مخاطرات زیست محیطی را کاهش می‌دهد. از جمله این پسماندها، پسماند کارخانه استخراج و فرآوری مواد اولیه شیشه قزوین می باشد. مطالعات نشان می‌دهند که بیش از ۹۳ درصد این پسماند حاوی اکسید سیلیسیم SiO_2 می‌باشد .با توجه به نتیجه آنالیز شیمیایی و مقایسه آن با نمونه‌های مشابه پژوهشگران دیگر مشخص شد که پسماند موجود ماهیتی دوده سیلیسی[۳] دارد[۱۷, ۱۸]. که خواص شیمیایی، فیزیکی، زیست محیطی و اقتصادی دوده سیلیس، آن را برای فناوری مصالح ساختمانی جذاب کرده است[۱۹]، همچین دوده سیلیس به دلیل مزایای مختلف خود به عنوان یکی از مفیدترین مواد سیمانی مکمل (SCM) طبقه بندی می شود[۲۰]. از منظر مهندسی ژئوتکنیک، تأثیر دوده سیلیس بر ویژگی‌های خاک توسط چندین محقق بررسی شده است[۲۱-۲۵].

از طرف دیگر متاکائولین نیز دارای خاصیت پوزولانی است که در دماهای بالای کائولن (یک ماده آلومینیومی) بین ۷۰۰ تا ۸۵۰۰ درجه سانتیگراد ایجاد می‌شود[۲۶] . ذرات متاکائولن به اندازه دوده سیلیس ریز نیستند، اما از ذرات سیمان کوچکتر هستند. کیفیت مواد اولیه مورد استفاده تأثیر قابل توجهی بر کیفیت و واکنش‌پذیری متاکائولن دارد. متاکائولین یک سیلیکات آلومینا آمورف است که در سیمان واکنش‌پذیر است، متاکائولین نیزهمانند پوزولان‌های طبیعی دیگر مثل خاکستر بادی و دوده سیلیس با هیدروکسید کلسیم (آهک) حاصل از محصولات ایجاد شده در طول هیدراتاسیون سیمان واکنش می‌دهد[۲۷].

در حال حاضر، دو روش رایج برای بهسازی خاک در محل عبارتند از "اختلاط عمیق خاک[۴]" که شامل مخلوط کردن مکانیکی خاک با دوغاب توسط تیغه‌های مخلوط‌کن است و "تزریق جت[۵]" که از جت سیال با انرژی جنبشی بالا برای خرد کردن و شل کردن زمین و مخلوط کردن آن با دوغاب استفاده می‌کند. این فرآیند منجر به تشکیل ستون خاک و سیمان می‌شود که در آن از خاک به عنوان سنگدانه استفاده می‌شود. اختلاط عمیق خاک مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست است زیرا برخلاف روش‌های سنتی (شمع‌های درجا، دیوار حائل، دیوارهای برشی) جابجایی خاک بسیار کم یا بدون جابجایی است و برخلاف بتن سنتی، نیازی به استخراج سنگدانه ندارد. روش اختلاط عمیق (DSM) نزدیک به سال ۱۹۷۰ در ژاپن و کشورهای اسکاندیناوی معرفی شد. از چندین دهه پیش، اختلاط عمیق به عنوان یک تکنیک بهبود زمین شناخته شده است. همچین استاندارد اروپایی برای اجرای اختلاط عمیق «اجرای کارهای

[3] Silica fume
[4] Deep Soil Mixing
[5] Jet Grouting

ACCEPTED MANUSCRIPT

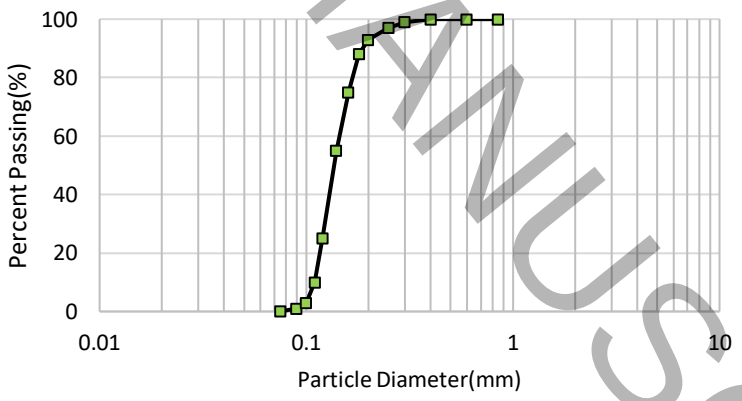
ژئوتکنیکی ویژه - اختلاط عمیق[6]» نیز در سال ۲۰۰۵ منتشر شد. اکثر این پروژه‌های تحقیقاتی بر تثبیت جهانی خاک‌های نرم و چسبنده مانند رس، سیلت و پیت متمرکز بودند[۲۸].

نوآوری و هدف این پژوهش در بررسی هم‌زمان اثر متاکائولین و پسماند شیشه به‌عنوان مواد پوزولانی مکمل سیمان بر رفتار ماسه ساحلی انزلی در شرایط عمل‌آوری با آب دریا و آب شیرین در چارچوب روش اختلاط عمیق (DSM) است. از این رو، در این تحقیق، یک برنامه آزمایشی برای بررسی پتانسیل متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه در بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی ماسه سیمانی شده تهیه شد. همچنین، در این پژوهش علاوه بر ارزیابی مقاومت فشاری تک‌محوری، ارتباط میان نتایج آزمایش‌های سه‌محوری، FESEM و XRD به‌منظور تبیین مکانیزم بهسازی و استخراج پارامترهای مهندسی ژئوتکنیکی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج این مطالعه می‌تواند برای تخمین تأثیر این مصالح افزودنی بر ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختاری ماسه سیمانی شده در طراحی و اجرای پروژه‌های ژئوتکنیکی در مناطق ساحلی مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مصالح

۲. ۱. ماسه

ماسه مورد استفاده در این تحقیق از ساحل خزر در شهر انزلی، واقع در شمال ایران تهیه شده است. با توجه به منحنی دانه‌بندی (شکل۱)، ماسه مورداستفاده طبق سیستم طبقه‌بندی متحد ASTM D2487 و ASTM D854 با نام ماسه بد دانه‌بندی(SP) شناخته می‌شود[۲۹, ۳۰]. (جدول۱) ویژگی های اصلی ماسه انزلی را ارائه می دهد. نوع دانه‌بندی ماسه ازنظر گرد گوشه یا زاویه‌دار بودن آن با توجه به عکسبرداریSEM انجام‌شده با مقیاس ۵۰۰µm نشان داد که ماسه نیمه گرد گوشه می‌باشد.



[6] EN 14679

ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل۱) نمودار دانه‌بندی ماسه انزلی

Figure1: Anzali sand gradation curve

Table1: Physical properties of Anzali sand

جدول۱) مشخصات فیزیکی ماسه انزلی

طبقه‌بندی خاک بر اساس طبقه‌بندی سیستم متحد خاک(USCS)	SP
اندازه مؤثر، $D_{10}(mm)$	۰/۱۱
قطر میانگین ذرات، $D_{50}(mm)$	۰/۱۴
ضریب یکنواختی، C_u	۱/۳۲
ضریب انحنا، C_c	۰/۹۵
چگالی ویژه ذرات جامد، G_s	۲/۷۰
وزن مخصوص خشک خاک در محل $(D_r = 50), \gamma_d(gr/cm^3)$	۱/۵۰
وزن مخصوص خشک حداقل، $\gamma_{d(\min)}(gr/cm^3)$	۱/۳۳
وزن مخصوص خشک حداکثر، $\gamma_{d(\max)}(gr/cm^3)$	۱/۶۵

۲. ۲. سیمان

سیمان پرتلند نوع II از شرکت سیمان آبیک با زمان گیرش اولیه ۱۸۶ min استفاده شد. (جداول ۲ و ۳) به ترتیب مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان را نشان می‌دهند.

Table2: Physical properties of Type II cement

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سیمان تیپ ۲

زمان گیرش اولیه (min)	۱۸۶
انبساط سیمان(٪)	۱۷
بلین (cm^2/g)	۳۰۳۴
مانده بر روی الک ۹۰ µm	۰/۲۷

ACCEPTED MANUSCRIPT

Table3: Chemical specifications of Type II cement

جدول ۳: مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲

۲. ۳. پسماند کارخانه استخراج و فرآوری مواد اولیه شیشه

از پسماند کارخانه استخراج و تولید فرآورده‌های شیشه که در شهرک صنعتی خرمدشت واقع در استان قزوین می‌باشد استفاده شده است(شکل۲). پسماند مذکور به‌صورت ماده‌ای با ماهیت پودری و استخوانی رنگ می‌باشد. بعد از انتقال پسماند به آزمایشگاه، با انجام آزمایشXRF بر روی پسماند، ماهیت پسماند مشخص و نتایج در (جدول۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیش از۹۳

عناصر	Fe_2O_3	SO_3	C_2S	C_3S	C_3A	C_4AF	CaO	MgO	SiO_2	K_2O	Na_2O	Al_2O_3
درصد	۳/۹۴	۱/۹۷	۳۳	۴۳	۸	۱۳	۶۱/۹	۳	۲۰/۳	۰/۶۸	۰/۲	۵/۴

درصد این پسماند حاوی اکسید سیلیسیم می‌باشد. با توجه به نتیجه آنالیز شیمیایی و مقایسه آن با نمونه‌های مشابه پژوهشگران دیگر مشخص شد که پسماند موجود ماهیتی دوده سیلیسی دارد[۱۷, ۱۸] .

Table4: Results of chemical analysis on glass factory waste

جدول۴) نتایج آزمایش شیمیایی بر روی پسماند کارخانه شیشه

ترکیبات	مقدار(٪)
SiO_2	۹۳/۴۸
Al_2O_3	۲/۶۶
CaO	۰/۷۱
Fe_2O_3	۰/۶۸
K_2O	۰/۶۵
MgO	۰/۱۵
SO_3	۰/۰۷
TiO_2	۰/۱۴

ACCEPTED MANUSCRIPT

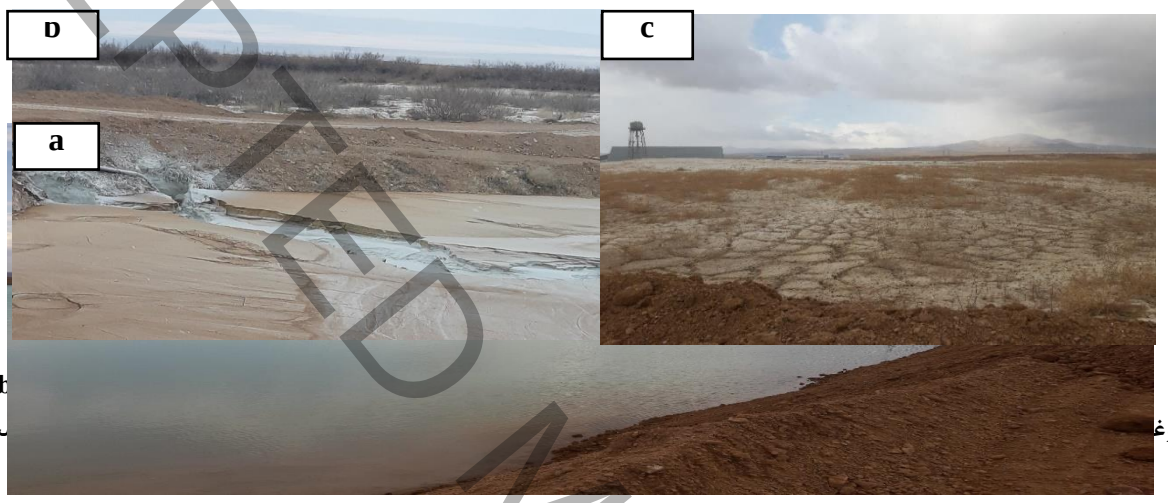


Figure2: (a) General view of the waste slurry disposal area at the glass processing and manufacturing plant in Khoramdasht Industrial Park; (b) waste slurry undergoing drying, with water infiltrating into the underlying soil; and (c) dried waste slurry exhibiting an off-white, bone-like color.

۲. ۴. متاکائولین

متاکائولن[7] یک سیلیکات آلومینیم آمورف مایل به سفید رنگ تا صورتی رنگ می باشد که دارای خواص پوزولانی بوده و بر اساس استاندارد ASTM C 618 در رده پوزولان های کلاس N (پوزولان های طبیعی خام یا کلسینه شده) قرار می گیرد. ساختار این ماده بدون شکل (آمورف) و به حالت بلوری است که با هیدروکسید کلسیم سریعاً و با شدت زیاد وارد واکنش می شود و به دنبال این واکنش ترکیبات چسبنده و سیمانی به وجود می آید. اصلی ترین ماده برای ساخت متاکائولن، رس کائولن می باشد[۳۱].

متاکائولن نیز همانند پوزولان‌های دیگر با هیدروکسید کلسیم ایجاد شده بر اثر هیدراته شدن سیمان واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تولید می کند SiO_2 و Al_2O_3 بیشترین مواد شیمیایی تشکیل دهنده متاکائولن هستند.

در این پژوهش متاکائولین از شرکت صنایع شیمیایی شمران با مشخصات فنی آورده شده در (جدول ۵) استفاده خواهد شد. همچنین (شکل ۳) متاکائولین مورد نظر را نشان می‌دهد.

[7] Metkaolin

ACCEPTED MANUSCRIPT

Table5: Technical specifications of the metakaolin used

جدول۵) مشخصات فنی متاکائولین مورد استفاده

شکل ظاهری	پودر
رنگ	صورتی کمرنگ
چگالی	۲/۴۸ (gr/cm^3)
دمای سوختن	۱۷۹۰ $^{\circ}C$
PH	۸-۶
Al_2O_3	٪۴۰-۲۰



شکل۳) متاکائولین

Figure3: Metakaolin

۳. روش‌های آماده‌سازی نمونه و آزمایش

مقدار سیمان، مقدار افزودنی و زمان عمل‌آوری، پارامترهای متغیر در برنامه آزمایش برای شناسایی تأثیر افزودنی‌ها بر ویژگی‌های ماسه سیمانی شده هستند. متغیرهای مورد بررسی در آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش‌ها در (جدول۶) ارائه شده‌اند. به منظور نزدیک بودن شرایط آزمایش به روش DSM برای تهیه نمونه‌ها ابتدا ماسه مورد نظر را در اون خشک کرده و با نسبت وزنی‌های مشخص شده در (جدول ۶) مواد افزودنی را همراه با آب (به نسبت وزنی آب به چسباننده $\frac{W}{B}=1$) توسط همزن با ۱۵۰rpm به مدت۲minتا۳ مخلوط شدند و سپس این دوغاب به خاک اضافه شده و همچنان با همزن مخلوط شدند، مخلوط حاصل که همگن و روان است مطابق با اجرا در محل بدون وارد شدن هیچگونه ضربه و یا تراکمی داخل قالب استوانه ای مورد نظر (قطر ۴۹mm و ارتفاع۱۰۳mm)که به دلیل روان بودن مصالح از قالب آب بند استفاده شده است، ریخته می‌شود. در این پژوهش، درصد جایگزینی متاکائولین و پسماند شیشه برابر با ۳٪ (بر حسب وزن خشک خاک) انتخاب شد. این مقدار بر اساس نتایج مطالعات پیشین انتخاب گردید که نشان داده‌اند استفاده از مقادیر کم مواد پوزولانی، در حضور سیمان، می‌تواند ضمن افزایش مقاومت و بهبود ریزساختار، از بروز اثرات ناشی از رقیق شدن سیمان و افزایش مصرف مصالح جلوگیری کند[۳۲, ۳۳]. از آنجا که هدف اصلی این پژوهش بررسی عملکرد نمونه‌های تثبیت‌شده در شرایط عمل‌آوری آب دریا و آب شیرین و ارزیابی اثر هم‌زمان متاکائولین و پسماند شیشه بود، درصد جایگزینی ثابت برای هر دو ماده در نظر گرفته شد تا تأثیر شرایط عمل‌آوری و نوع افزودنی با حداقل متغیرهای مداخله‌گر بررسی شود. بررسی درصدهای مختلف افزودنی‌ها می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده باشد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

پس از گذشت زمان گیرش اولیه ۲۴h (طبق آیین نامه FHWA) نمونه ای همگن و بدون خلل و فرج که همراه با قالب درون ظرف دربسته نگهداری شده تا از هدر رفت رطوبت جلوگیری شود، خارج می‌شود[۳۴].

برای تاثیر مناسب مواد افزودنی بر مقاومت ماسه سیمانی شده، واکنش پوزولانی باید رخ دهد. لذا برای رسیدن به این هدف زمان عمل‌آوری باید در نظر گرفته شود. همانطور که در بالا اشاره شد خاک مورد استفاده در این پژوهش مربوط به منطقه ساحلی در بندر انزلی است و اجرای روشDSM در این منطقه باعث می‌شود تا که دوغاب پس از ساخت درون خاکی مخلوط شود که هم آب موجود در محیط و هم خاک دارای شوری ذاتی می‌باشد. لذا به منظور شبیه سازی به محل اجرا نمونه ها برای عمل آوری پس از خروج از قالب درون محفظه‌ی حاوی آب دریا و آب شیرین قرار داده می‌شود. در این مطالعه، به‌منظور بررسی روند توسعه مقاومت و تغییرات ریزساختاری نمونه‌های تثبیت‌شده، سنین عمل‌آوری۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ day انتخاب شدند. سن ۷day برای ارزیابی مقاومت اولیه ناشی از هیدراتاسیون سیمان، سن ۲۸day به عنوان معیار متداول ارزیابی مقاومت مصالح سیمانی و سنین ۵۶ و ۹۰ day به منظور بررسی ادامه واکنش‌های پوزولانی متاکائولین و پسماند شیشه، تشکیل محصولات هیدراتاسیون ثانویه و ارزیابی عملکرد بلندمدت نمونه‌ها در محیط دریایی در نظر گرفته شدند.

جهت دسته‌بندی اطلاعات به‌دست‌آمده از رفتار مقاومتی نمونه‌ها از نشانه‌گذاری استفاده‌شده است.در این نشانه‌گذاری S بیانگر ماسه ،C بیانگر درصد سیمان،SF بیانگر درصد پسماند و MK بیانگر درصد متاکائولین می‌باشد. علاوه بر آن Sea و Fresh نشان‌دهنده عمل آوری در آب دریا و آب شرب است.

۳. ۱. آزمایش تک محوری

در مهندسی ژئوتکنیک، آزمایش تک محوری به عنوان یک آزمایش مهم و سریع، ساده، ارزان و قابل اعتماد در بین آزمایش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی تاثیر مواد افزودنی شیمیایی بر بهبود عملکرد خاک با استفاده از سیمان یا سایر مواد شناخته می‌شود. از این رو، در این مطالعه، آزمایش‌های تک محوری برای بررسی تأثیر پسماند کارخانه شیشه ومتاکائولین بر رفتار مکانیکی ماسه سیمانی شده انجام شد.

برای انجام آزمایش‌های تک محوری، از یک دستگاه بارگذاری خودکار با حداکثر ظرفیت بار ۵۰kN استفاده شد. نمونه‌ها در دستگاه قرار داده شده و به صورت محوری تا زمان شکست با نرخ جابجایی ۱/۲mm/min بر اساس ASTM D2166 بارگذاری شدند. به منظور تأیید نتایج آزمایش‌های تک محوری، هر آزمایش حداقل سه بار انجام شد و مقادیری که بیش از ۵٪ از مقدار میانگین انحراف داشتند، رد شدند[۳۵].

Table6: UCS values (MPa) for various samples

جدول۶) مقادیر UCS(MPa) برای نمونه‌های مختلف

Sample	Curing time (days)				
	7	14	28	56	90

ACCEPTED MANUSCRIPT

S+20%C+3%MK,Sea	1.520	1.866	3.403	2.558	3.936
S+20%C+3%MK,Fresh	1.630	2.603	4.549	3.466	4.424
S+20%C+3%MK+3%SF,Sea	1.775	2.195	2.958	5.751	6.451
S+20%C+3%MK+3%SF,Fresh	1.867	2.273	3.112	5.648	6.347
S+20%C,Sea	1.040	1.948	3.765	1.769	1.271
S+20%C,Fresh	1.360	1.910	3.011	2.334	2.643
S+20%C+3%SF,Sea	0.894	1.639	2.980	3.607	4.107
S+20%C+3%SF,Fresh	0.746	1.328	2.330	4.144	4.644

۳. ۲. آزمایش سه محوری(UU)

بررسی مطالعات مروری نشان می‌دهد بررسی رفتار تنش-تغییرشکل خاک بهسازی شده با مدل DSM نمونه‌ها عمدتاً در شرایط محصورنشده انجام شده است[۲۸]. استفاده از دستگاه سه‌محوری امکان بررسی دقیق‌تر رفتار خاک بهسازی شده به‌ویژه در نظرگیری اثرات تنش محصورکننده را فراهم می‌کند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه سه‌محوری ELE و مطابق استاندارد ASTM D2850 به‌صورت تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده انجام شد و سرعت بارگذاری برای تمامی تنش‌های همه‌جانبه ۰/۵mm/min انتخاب شد.[۳۶]. نمونه‌ها با استفاده از ترکیب بهینه (MK=٪۳ ، SF=٪۳ و C=٪۲۰) به‌دست‌آمده از آزمایش تک‌محوری ساخته شدند و دارای ارتفاع ۱۰۳mm و قطر ۴۹mm بودند. این نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ day آماده شدند. با توجه به اینکه نمونه‌ها کاملاً منسجم بوده و ریزش نداشتند، پس از رسیدن به سن عمل‌آوری مورد نظر، در سلول دستگاه سه‌محوری قرار گرفتند.

۳. ۲. آزمایش‌های FESEM[۸] و XRD[۹]

به طور کلی، ریزساختار مصالح سیمانی تحت تأثیر عواملی مانند نسبت‌های اختلاط، منشاء مصالح، سرعت هیدراتاسیون و شرایط عمل‌آوری قرار می‌گیرد. برای بررسی تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها، آزمایش‌های FESEM و XRD در تحقیق حاضر انجام شد. برای FESEM، برخی از قطعات از قسمت مرکزی نمونه‌های آزمایش‌های تک محوری خشک شده و زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شدند. برای ایجاد رسانایی بهتر، نمونه‌های FESEM قبل از تصویربرداری با یک لایه نازک طلا پوشش داده شدند. علاوه بر این، آنالیزهای XRD نمونه‌های خشک شده با هوا با استفاده از پراش‌سنج[۱۰] انجام شد. نمودارهای XRD با اسکن نمونه‌ها در محدوده مقادیر 2h از ۵ تا ۸۰ با گام ۰/۰۲ به دست آمد. دستگاه با تنظیم جریان ۴۰mA و ولتاژ ۴۰kW کار می‌کرد و از تابش Cu Ka استفاده می‌کرد.

۴. نتایج و بحث

۴. ۱. آزمایش تک محوری

[8] Field Emission Scanning Electron Microscopy
[9] X-Ray Diffraction
[10] Panalytical X'PERT PRO

ACCEPTED MANUSCRIPT

(شکل ۵ و۴) منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمایش‌های فشاری محصور نشده برای ماسه با ۲۰٪ سیمان حاوی درصدهای مختلف متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه پس از گذشت ۲۸day با شرایط عمل‌آوری در آب دریا و آب شیرین را نشان می‌دهد.

با توجه به (شکل۴) در شرایط عمل‌آوری در آب دریا، در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ سیمان به سبب تشکیل فازهای تخریبی نظیر هیدروکسید منیزیم و نمک فریدل که درآب دریا تشکیل می‌شوند و باعث تضعیف ساختار پیوندهای هیدراته سیمان می‌شوند، مقاومت فشاری در کمترین حالت (۱/۱۲۹MPa) خود قرار می‌گیرد. این تفسیر با نتایج گزارش‌شده توسط مرجع [۳۷] همخوانی دارد. اما با افزودن ۲۰٪سیمان و ۳٪ متاکائولین به ماسه مقاومت فشاری بیشتری در حدود ۱۵/۵۴٪ افزایش نسبت به حالت قبل رخ می‌دهد. که این افزایش مقاومت ناشی از واکنش پوزولانی متاکائولین با هیدروکسید کلسیم و تشکیل فازهای ثانویه C–S–H و C–A–Hاست که منجر به بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل در ماتریس سیمان می‌شود[۳۸] .

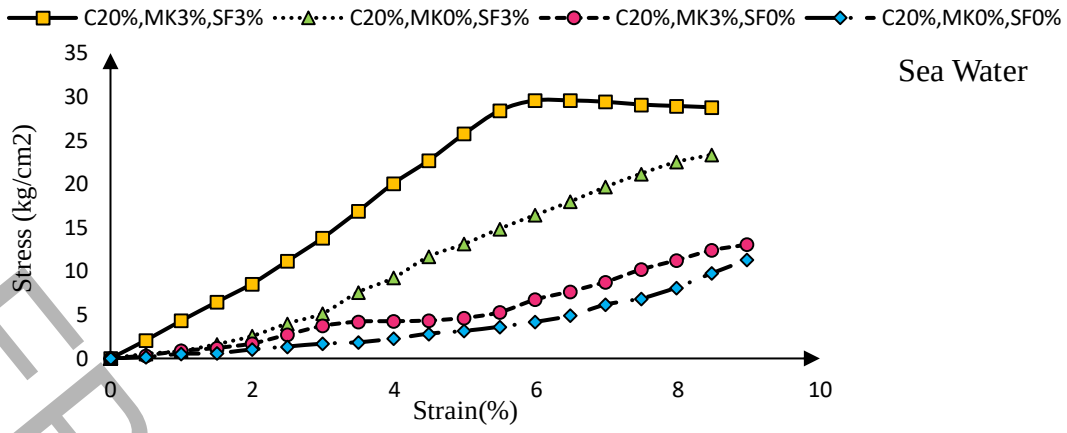
با توجه به (شکل۴) با افزودن ترکیب ۲۰٪ سیمان و۳٪ پسماند کارخانه شیشه به ماسه در حالت عمل‌آوری درآب دریا به سبب وجود یون‌های کلرید کلسیم در آب دریا خاصیت قلیایی محیط افزایش پیدا کرده و واکنش‌های پزولانی بین سیلیس موجود در پسماند کارخانه شیشه و پزولان‌های سیمان تسریع پیدا کرده و موجب افزایش مقاومت از ۱/۱۲۹MPa به ۲/۳۳۵MPa شد که نسبت به نمونه مرجع، معادل ۱۰۶/۸٪ افزایش را نشان می‌دهد. روند مشاهده‌شده با نتایج لفورت و همکاران سازگار است[۳۹].

در نهایت با ترکیب ۲۰٪ سیمان، ۳٪ متاکائولین و ۳٪ پسماند کارخانه شیشه به ماسه در شرایط عمل‌آوری آب دریا، به دلیل تشکیل فازهای ترکیبی پایدار نظیر C-S-H غنی از آلومینا، پر شدن حفرات خمیر سیمان به وسیله محصولات ثانویه واکنش پسماند کارخانه شیشه و متاکائولین و بهبود چسبندگی در حضور یون‌های کلرید و سدیم مقاومت با مقدار بالاتر و شیب اولیه بیشتر(۵/۰۸٪) قابل مشاهده است.

در ادامه با توجه به (شکل۵) عمل‌آوری در آب شیرین، در نمونه حاوی۲۰٪ سیمان، نمونه دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به حالت عمل‌آوری در آب دریا می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان به کاهش نفوذ یون‌های کلرید و منیزیم در محیط آب شیرین دانست[۳۷]. همچنین با ترکیب ۲۰٪ سیمان و ۳٪ متاکائولین به ماسه می‌توان مشاهده کرد که در شرایط عمل‌آوری آب شیرین مقاومت بالاتر با شیب اولیه بیشتر نسبت به عمل‌آوری در آب دریا از خود نشان دادند. اما در ترکیب ۲۰٪ سیمان و ۳٪ پسماند کارخانه شیشه با ماسه مقاومت نمونه به سبب انحلال جزئی سیلیس آمورف و کاهش پیوستگی بین ذرات سیمان در محیط فاقد یون‌های فعال قلیایی کاهش یافته است[۳۹].

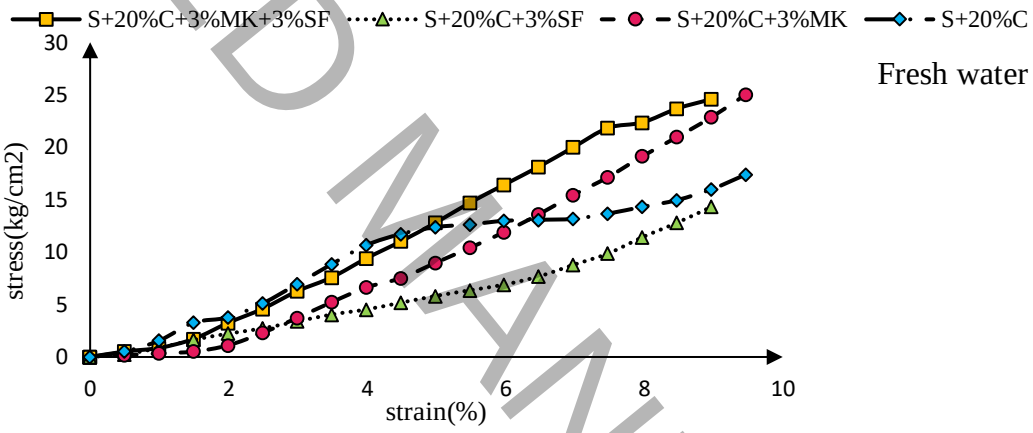
اما در ترکیب نهایی ۲۰٪ سیمان، ۳٪ متاکائولین و ۳٪ پسماند کارخانه شیشه به ماسه در شرایط عمل‌آوری آب شیرین مانند آب دریا مقاومت افزایش یافته و به بیشتری حالت خود نسبت به ترکیب‌های دیگر رسیده است، اما این مقاومت نسبت به حالت عمل آوری در آب دریا به سبب کاهش نفوذ یون‌های کلرید و منیزیم و نبود محیط قلیایی میزان کمتری افزایش یافته است.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۴) منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمایش‌های فشاری محصور نشده برای ماسه با ۲۰٪ سیمان حاوی درصدهای مختلف متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه پس از گذشت day۲۸ با عمل آوری در آب دریا

Figure4: Stress-strain curves obtained from unconfined compression tests on sand stabilized with 20% cement and varying percentages of metakaolin and glass factory waste, after 28 days of seawater curing



شکل۵) منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمایش‌های فشاری محصور نشده برای ماسه با ۲۰٪ سیمان حاوی درصدهای مختلف متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه پس از گذشت day۲۸ در آب شیرین

Figure5: Stress-strain curves obtained from unconfined compression tests for sand with 20% cement containing varying percentages of metakaolin and glass factory waste, after 28 days of curing in fresh water.

نمودارهای(۷ و۶) مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان در حضور افزودنی‌های پسماند کارخانه شیشه و متاکائولین، تحت عمل‌آوری در دو محیط آب شیرین و آب دریا در سنین عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ day، نشان می‌دهند.

با توجه به (شکل ۶)، در حالت پایه که نمونه‌ها تنها حاوی ۲۰٪ سیمان می‌باشند، از سن ۷ تا ۲۸ day زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری با شیب تقریباً ۱۲/۹٪ افزایش می‌یابد. این روند افزایشی عمدتاً ناشی از ادامه‌ی واکنش‌های هیدراتاسیون و تشکیل ژل‌های C–S–H و C–A–H است که موجب پر شدن خلل و فرج خاک و افزایش چسبندگی بین ذرات می‌گردد [40, 41].در مراحل اولیه، واکنش سیمان با آب منجر به تولید محصولات هیدراتاسیونی با ساختار بلوری نامنظم اما پیوسته می‌شود که مقاومت فشاری را

ACCEPTED MANUSCRIPT

به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش تراکم ماتریس و کاهش تخلخل مؤثر در دوره‌ی day۲۸، سهم مهمی در این روند صعودی دارد. تفسیر ارائه‌شده توسط باکرا و همکاران این رفتار را تأیید می‌کند[۴۲].

با گذشت زمان عمل‌آوری تا سن day۹۰ ، مقاومت فشاری با شیب حدود ۸/%۹ کاهش یافته و تقریباً به مقدار مقاومت day۷ بازمی‌گردد. علت این افت می‌تواند به چند عامل مرتبط باشد. نخست، در نبود افزودنی‌های پوزولانی فازهای هیدراته‌ی اولیه پایداری کافی در برابر مهاجرت یون‌ها و تبادل یونی با محیط عمل‌آوری ندارند، در نتیجه بخشی از فازهای C–S–H ممکن است دچار بازآرایی یا تجزیه شوند[۴۳]. همچنین در صورتی که عمل‌آوری در محیط حاوی یون‌های کلرید یا سولفات (نظیر آب دریا) انجام گیرد، فرآیندهای حمله شیمیایی می‌توانند باعث انحلال جزئی فازهای سیمانی و تضعیف ساختار پیوندی شوند. رفتار مشاهده‌شده مشابه نتایج وو و همکاران و میائو و همکاران است[۴۰, ۴۴] علاوه بر این، به دلیل مقدار نسبتاً پایین سیمان (۲۰٪)، حجم محصولات هیدراتاسیون کافی برای پایدارسازی کامل ماتریس خاک وجود ندارد و در بلندمدت، شست‌وشوی یون‌های کلسیم وخاصیت قلیایی سیستم موجب افت مقاومت می‌شود[۴۵] .

به طور خلاصه، نمودار (شکل۶) حالت پایه نشان می‌دهد که در سیستم فاقد افزودنی پوزولانی، مقاومت فشاری اگرچه در کوتاه‌مدت رشد قابل توجهی دارد، اما در بلندمدت به‌دلیل ناپایداری فازهای سیمانی و نفوذ یون‌های مهاجم، افت محسوسی را تجربه می‌کند؛ این رفتار را می‌توان به تفاوت در فرآیندهای هیدراتاسیون و واکنش‌های شیمیایی در محیط دریایی نسبت داد. در نمونه فاقد مواد پوزولانی، اگرچه حضور یون‌های موجود در آب دریا در سنین اولیه موجب تسریع هیدراتاسیون سیمان و افزایش مقاومت می‌شود، اما در ادامه، نفوذ یون‌های کلرید و سولفات و تشکیل محصولات انبساطی نظیر اترینگایت ثانویه و ژیپس می‌تواند موجب ایجاد ریزترک، افزایش تخلخل و در نهایت کاهش مقاومت فشاری شود. نتیجه‌ای که با مطالعات مشابه در محیط‌های دریایی و سیمان‌های با محتوای پایین پوزولان مطابقت دارد[۴۶].

با افزودن ۳٪ متاکائولین (MK) به ترکیب پایه، افزایش قابل‌توجهی در مقاومت فشاری تا سن day۲۸ مشاهده می‌شود؛ این رشد عمدتاً به دلیل واکنش پوزولانی فعال بین متاکائولین و هیدروکسید کلسیم آزاد (CH) حاصل از هیدراتاسیون سیمان است، به‌طوری‌که MK با CH واکنش داده و فازهای هیدراته متراکمی مانند C–(A)–S–H و هیدروآلومات‌ها تشکیل می‌دهد که منجر به کاهش تخلخل و افزایش چگالی ماتریس سیمانی می‌گردد: در ادامه، کاهش نسبی مقاومت فشاری در سن day۵۶ می‌تواند ناشی از دو عامل باشد: نخست، کند شدن نسبی واکنش‌های پوزولانی به دلیل کمبود نسبی CH آزاد و کاهش سرعت ترسیب فازهای جدید؛ و دوم، تأثیر انقباض خشک‌شدن[11] و ایجاد ترک‌های میکروسکوپی در ماتریس سیمانی که بر انتقال نیرو تأثیر می‌گذارند[۴۷]. در نهایت، در سن day۹۰ مقاومت فشاری مجدداً افزایش می‌یابد؛ این افزایش به علت ادامه واکنش پوزولانی متاکائولین و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون سیمان است، که منجر به رشد فازهای ثانویه چگال‌تر، کاهش تخلخل و بهبود پیوستگی داخلی ماتریس می‌گردد. این یافته با گزارش ال هاشم قابل توجیه است [۴۸].

با افزودن ۳٪ پسماند کارخانه شیشه به ترکیب پایه، مقاومت فشاری از سن ۷ تا day۹۰ با شیب ملایم افزایش می‌یابد؛ این افزایش با پیشرفت سن عمل‌آوری تقویت می‌شود، زیرا با گذر زمان واکنش‌های پوزولانی سیلیس فعال موجود در شیشه با هیدروکسید کلسیم آزاد از هیدراتاسیون سیمان ادامه یافته و ژل C–S–Hثانویه تشکیل می‌شود. علاوه بر این، ذرات شیشه به‌عنوان هسته‌های

[11] drying shrinkage

ACCEPTED MANUSCRIPT

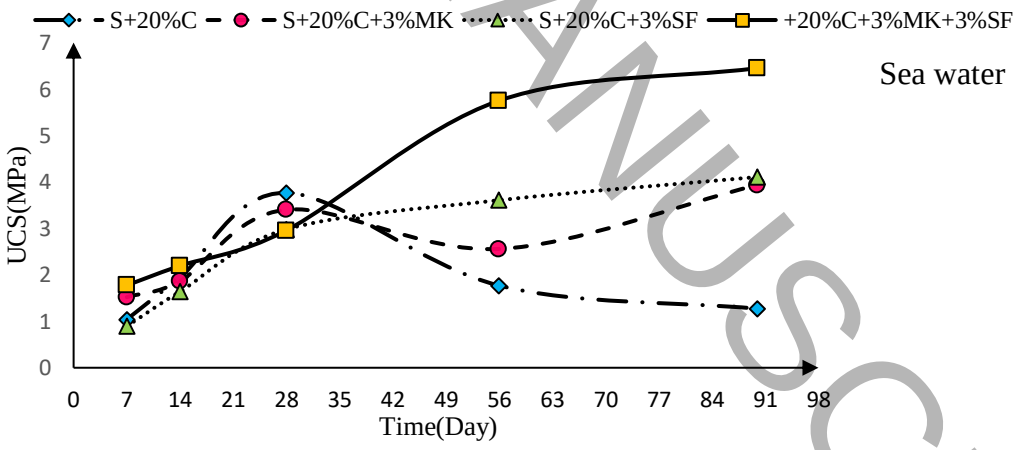
کریستالی[12] عمل کرده و فرآیند هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کنند، که منجر به کاهش تخلخل، افزایش چگالی و بهبود پیوستگی ماتریس سیمانی می‌گردد. رفتار مشاهده‌شده مشابه نتایج شی و همکاران است[۴۹].

در نهایت با افزودن هر دو پوزولان پسماند کارخانه شیشه و متاکائولین به ترکیب پایه مشاهده شد که مقاومت فشاری با افزایش عمل‌آوری بدون هیچ افتی و به صورت پیوسته افزایش یافت ومیزان مقاومت فشاری از هر سه ترکیب قبلی به میزان قابل توجهی بهبود داشته است. که علت این امر را می‌توان در اثر هم‌افزایی[13] بین متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه دانست .حضور همزمان این دو ماده باعث می‌شود واکنش‌های پوزولانی در سنین مختلف فعال بماند و محصولات هیدراتاسیون ثانویه از جمله ژل‌های C–A–S–H و C–S–H متراکم‌تر به شکل مستمر تولید شوند. این فرآیند موجب:

- پرشدن ریزحفرات و کاهش تخلخل کل،
- کاهش نفوذپذیری و محدود شدن مهاجرت یون‌های مهاجم (به‌ویژه در محیط‌های دریایی)،
- افزایش پیوستگی ماتریس سیمانی و بهبود چسبندگی بین ذرات خاک،
- و پایداری ساختاری بهتر در سنین بالا

می‌شود.

درشرایط عمل‌آوری در آب شیرین نیز (شکل۷)، مقاومت تک محوری با افزودن ۳٪ پسماند کارخانه شیشه و ۳٪ متاکائولین به ترکیب ماسه و۲۰٪ سیمان با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافته اما میزان این افزایش نسبت به حالت عمل‌آوری در آب دریا به سبب نبود محیط قلیایی مناسب برای واکنش‌های پزولانی این افزودنی‌ها کمتر است.

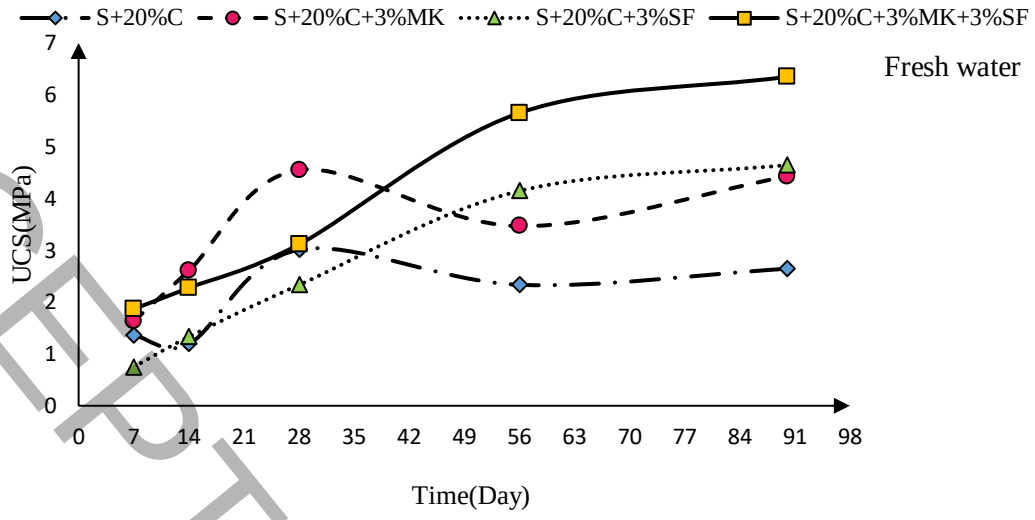


شکل۶)مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان در حضور افزودنی‌های پسماند کارخانه شیشه و متاکائولین در آب دریا

Figure6: Compressive strength of cement-stabilized samples containing glass factory waste and metakaolin additives in seawater

[12] nucleation sites
[13] Synergistic Effect

ACCEPTED MANUSCRIPT



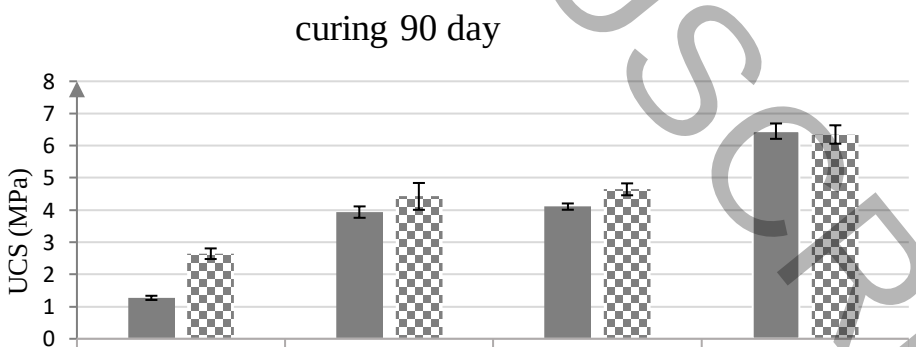
شکل۷) مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان در حضور افزودنی‌های پسماند کارخانه شیشه و متاکائولین در آب شیرین

Figure7: Compressive strength of cement-stabilized samples containing glass factory waste and metakaolin additives in fresh water

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پسماند شیشه به دلیل دارا بودن سیلیس آمورف، در حضور هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان، واکنش پوزولانی شدیدتری نسبت به سیمان خالص ایجاد می‌کند[50] . از سوی دیگر، متاکائولین با داشتن آلومینای فعال، C–A–S–H ژل‌های پایدارتر تولید می‌کند که در محیط‌های کلریدی از تجزیه‌ی فازهای سیمانی جلوگیری می‌نمایند[۴۱, ۴۲] . ترکیب این دو پوزولان، به دلیل تفاوت ماهیت شیمیایی (Al-rich وSi-rich)، سبب ایجاد محصولات هیدراتاسیونی چندفازی و بسیار متراکم می‌شود که به‌طور مؤثری مقاومت فشاری و دوام مخلوط را افزایش می‌دهد. نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین همسو است[44, 45]..

بنابراین، روند افزایشی مقاومت فشاری تا ۹۰day در ترکیب ۲۰٪ سیمان، ۳٪ متاکائولین و ۳٪ پسماند کارخانه شیشه، نتیجه‌ی مستقیم پوزولانی بودن دوگانه، کاهش

$Ca(OH)_2$آزاد، تشکیل ژل‌های پایدار و اصلاح ریزساختار است؛ روندی که در ترکیبات فاقد پوزولان مشاهده نشد.



ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل۸) مقایسه مقادیر میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و انحراف معیار نمونه‌های تثبیت‌شده با ترکیبات مختلف سیمان، متاکائولین و پسماند شیشه پس از ۹۰ روز عمل‌آوری در دو محیط آب شیرین و آب دریا.

Figure8: Comparison of mean Unconfined Compressive Strength (UCS) values and standard deviations of samples stabilized with various combinations of cement, metakaolin, and waste glass after 90 days of curing in freshwater and seawater environments.

به‌منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، برای هر طرح اختلاط سه نمونه مستقل تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفت. سپس میانگین، انحراف معیار (SD) و ضریب تغییرات (CV) محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقادیر CV برای تمامی طرح‌های اختلاط در بازه (۲/۳۸٪ تا ۹/۴۳٪) بوده است. با توجه به مطالعات پیشین این مقادیر بیانگر پراکندگی کم داده‌ها و تکرارپذیری مناسب آزمایش‌ها است[58]. بنابراین اختلاف مشاهده‌شده در مقاومت نمونه‌ها را می‌توان ناشی از تأثیر واقعی افزودنی‌ها و شرایط عمل‌آوری دانست. نمودار (شکل۸) این مقادیر را برای زمان عمل آوری ۹۰روز نشان می دهد.

۴. ۲. سختی نمونه‌ها

سختی به‌عنوان شاخصی از مقاومت در برابر تغییرشکل ناشی از اعمال بار تعریف می‌شود و یکی از پارامترهای کلیدی در تعیین رفتار عملکردی و عمر مفید روسازی‌ها و سازه‌هایی به شمار می‌رود که در آن‌ها از خاک تثبیت‌شده استفاده شده است[۵۱]. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی اثر پسماند کارخانه شیشه و متاکائولین بر سختی نمونه‌ها، شیب خط سکانت ترسیم‌شده تا ۵۰٪ از حداکثر مقاومت در منحنی‌های تنش–کرنش به‌عنوان مدول الاستیسیته سکانت (E_{50}) در نظر گرفته شد؛ پارامتری که به‌طور گسترده به‌عنوان یکی از شاخص‌های بنیادین در برآورد نشست خاک در مسائل مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. (شکل ۹) تأثیر درصد جایگذاری ترکیبات مختلف افزودنی بر روی مدول الاستیسیته در سن ۲۸day برای نمونه‌های حاوی ۲۰٪ سیمان در حالت عمل‌آوری در آب دریا و آب شیرین را نشان می‌دهد. برای ترکیب پایه که شامل ۲۰٪ سیمان می‌باشد، مدول الاستیسیته در حالت عمل‌آوری در آب شیرین به سبب انجام کامل‌تر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و تشکیل پیوسته‌تر محصولات هیدراسیونی نظیر ژل C–S–H و در نتیجه افزایش پیوستگی و سختی ریزساختار مقدار بیشتری نسبت به حالت عمل‌آوری در آب دریا می‌باشد. محققان مختلفی همچون کنسولی و همکاران و هورپیبلاسک و همکاران نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و گزارش کردند که حضور یون‌های مهاجم موجود در آب دریا می‌تواند با ایجاد اختلال در فرآیند هیدراسیون، منجر به کاهش مدول الاستیسیته خاک‌های تثبیت‌شده شود[۵۲, ۵۳].

با افزودن تنها ۳٪ متاکائولین به ترکیب فوق، مجدداً مدول الاستیسیته در حالت عمل‌آوری در آب شیرین بیشتر از آب شور می‌باشد، با این تفاوت که میزان این اختلاف نسبت به حالت قبل کمتر می‌باشد که علت آن نقش پوزولانی متاکائولین در مصرف هیدروکسید کلسیم آزاد و تشکیل فازهای ثانویه پایدارتر نظیر C–A–S–H است که موجب بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت نمونه در برابر اثرات نامطلوب یون‌های موجود در آب دریا می‌شود.

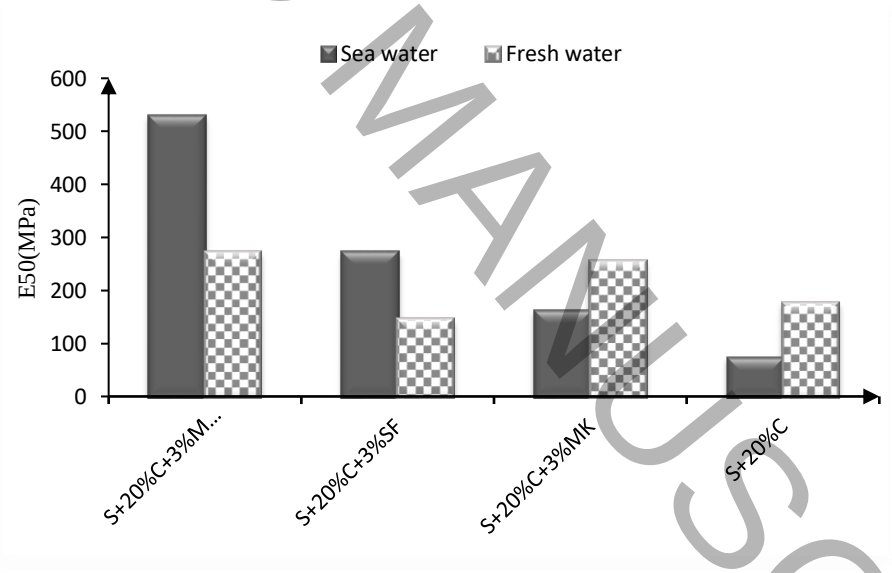
اما با افزودن ۳٪ پسماند کارخانه شیشه به ترکیب پایه، مدول الاستیسیته در حالت عمل‌آوری در شرایط آب شور، برخلاف حالت قبل، میزان بیشتری نسبت به عمل‌آوری در آب شیرین می‌باشد و علت آن فعالیت پوزولانی ذرات شیشه‌ای غنی از سیلیس آمورف و واکنش آن‌ها با هیدروکسید کلسیم آزاد در محیط‌های حاوی یون‌های کلرید و سدیم است که منجر به تشکیل محصولات هیدراسیونی ثانویه پایدارتر و کاهش اثرات مخرب محیط شور می‌شود .میزان مدول الاستیسیته در این حالت بیشتر از دو حالت قبل می‌باشد که این امر به سبب تراکم بیشتر ریزساختار، پرشدن حفرات توسط محصولات واکنش پوزولانی و بهبود پیوستگی ماتریس

ACCEPTED MANUSCRIPT

سیمانی–خاکی ناشی از نقش پرکنندگی[14] پسماند شیشه رخ داده است. این نتیجه با یافته‌های شاو همکاران، دیر و دهیر، توپکو وکنیاز همخوانی دارد[55 ,54 ,39].

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مقادیر گزارش‌شده برای مقاومت فشاری تک‌محوری ستون‌های اختلاط عمیق در خاک‌های ماسه‌ای، در بازه‌ای حدود ۱/۵ تا بیش از ۲ MPa قرار می‌گیرند. این گستره بیانگر تنوع معیارهای طراحی و کاربردی در مطالعات مختلف است. در پژوهش حاضر، با استناد به توصیه‌های دستورالعمل FHWA و به‌منظور تأمین الزامات عملکردی و ایجاد حاشیه اطمینان مناسب، مقدار ۲ MPa به‌عنوان مقاومت فشاری تک‌محوری هدف در نظر گرفته شده است[۳۴]. بر این اساس در نمونه‌های ساخته‌شده با آب دریا بیشترین مقاومت در نمونه‌های حاوی ٪۲۰ سیمان، ٪۳ متاکائولین و ٪۳ پسماند کارخانه شیشه به دلیل دستیابی به مقاومت موردنظر و مصرف کمتر متاکائولین، به‌عنوان طرح اختلاط بهینه انتخاب شدند. همچنین این نمونه‌ها توانسته‌اند در مدت‌زمان کمتری به مقاومت مطلوب دست یابند و با افزایش زمان، مقاومت این نمونه‌ها همچنان افزایش می‌یابد.

در نهایت، هر دو افزودنی متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه به ترکیب پایه افزوده شد به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه در ترکیب‌های حاوی ٪۲۰ سیمان، با ایجاد اثر هم‌افزایی در واکنش‌های پوزولانی و بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی– خاکی، منجر به افزایش قابل‌توجه مدول الاستیسیته تا میزان ۶۲۵/۷۷ شده است؛ به‌ویژه در شرایط عمل‌آوری در آب شور که این ترکیب با کاهش حساسیت سیستم به یون‌های مهاجم و افزایش پایداری فازهای هیدراسیونی، عملکرد مکانیکی برتری از خود نشان داده است. نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین هم راستا است[۵۶-۵۸].



شکل۹) تأثیر درصد جایگذاری ترکیبات مختلف افزودنی بر روی مدول الاستیسیته در سن day۲۸ حاوی ۲۰ % سیمان

Figure9: Effect of the percentage of various additives on the modulus of elasticity at 28 days in mixtures containing 20% cement.

[14] filler effect

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴. ۳. آزمایش سه محوری

فشار همه‌جانبه یکی از پارامترهای مهم و مؤثر بر رفتار نمونه‌های خاک سیمانته‌شده است. این فشار از طریق اسکلت خاک منتقل می‌شود و بر ویژگی‌هایی مانند مقاومت، تغییرشکل و نفوذپذیری تأثیر می‌گذارد. در این بخش، نتایج آزمایش سه‌محوری UU با هدف بررسی اثر فشار همه‌جانبه بر رفتار نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

بر اساس (شکل ۱۰)، با افزایش تنش همه‌جانبه، مقدار تنش انحرافی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار تنش انحرافی در سن ۹۰day و تحت تنش همه‌جانبه ۱۵۰kPa ، برابر با ۶/۳۵MPa ، و کمترین مقدار آن در تنش همه‌جانبه ۵۰kPa ، برابر با ۲/۶۴MPa ، به دست آمده است.

در تنش همه‌جانبه ۵۰kPa (شکل ۱۰a)، تمامی نمونه‌های بهسازی‌شده با سیمان، متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه روند افزایش تنش انحرافی را تا رسیدن به مقاومت اوج نشان می‌دهند. با این حال، تفاوت محسوسی در رفتار پس از اوج میان زمان‌های مختلف عمل‌آوری مشاهده می‌شود. نمونه ۲۸day دارای کمترین مقاومت اوج بوده و پس از رسیدن به تنش حداکثر، افت شدید مقاومت را تجربه می‌کند. این کاهش سریع تنش پس از اوج نشان‌دهنده وقوع گسیختگی ترد و توسعه سریع ترک‌های برشی در ساختار نمونه است. در نمونه ۵۶day ، مقاومت اوج به طور قابل توجهی افزایش یافته و گسیختگی در کرنش بزرگ‌تری نسبت به نمونه ۲۸day رخ می‌دهد. اگرچه افت تنش پس از اوج همچنان مشاهده می‌شود، اما شیب کاهش مقاومت کمتر بوده و وجود مقداری مقاومت باقیمانده نشان‌دهنده حفظ نسبی ظرفیت باربری پس از گسیختگی است. نمونه ۹۰day بیشترین مقاومت اوج را نشان می‌دهد، اما افت تنش پس از رسیدن به پیک بسیار شدید است. این رفتار بیانگر افزایش شکنندگی نمونه در اثر ادامه واکنش‌های پوزولانی و تشکیل بیشتر محصولات سیمانی است. در این حالت، ساختار خاک بهسازی شده متراکم‌تر و سخت‌تر شده و ظرفیت تغییر شکل پلاستیک کاهش یافته است. بنابراین گسیختگی نمونه ۹۰day را می‌توان با شاخص شکنندگی (BI= ۰/۷۴) از نوع بسیار ترد همراه با نرم‌شدگی کرنشی[15] قابل توجه دانست. به طور کلی، در تنش همه‌جانبه ۵۰kPa ، افزایش زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت اوج و در عین حال افزایش شکنندگی نمونه‌ها شده است و گسیختگی در تمامی نمونه‌ها در نقطه حداکثر تنش انحرافی رخ داده است.

با افزایش تنش همه‌جانبه به ۱۰۰kPa (شکل ۱۰b)، مقاومت نمونه‌ها نسبت به حالت قبل افزایش یافته و رفتار آن‌ها شکل‌پذیرتر می‌شود. نمونه ۲۸day کمترین مقاومت اوج را نشان می‌دهد و پس از رسیدن به اوج، افت تنش بسیار ملایمی دارد. این موضوع بیانگر آن است که اگرچه گسیختگی رخ داده است، اما نمونه هنوز بخشی از ظرفیت باربری خود را حفظ می‌کند و رفتار آن نسبت به حالت ترد به سمت رفتار شکل‌پذیر متمایل شده است. در نمونه ۵۶day ، مقاومت اوج به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و پس از رسیدن به تنش حداکثر، افت مقاومت مشاهده می‌شود. وجود بخش نزولی پس از اوج نشان می‌دهد که گسیختگی از نوع ترد است، اما شدت شکنندگی نسبت به شرایط تنش همه‌جانبه پایین‌تر کاهش یافته است. نمونه ۹۰day بیشترین مقاومت را در این سطح از تنش همه‌جانبه نشان می‌دهد. با وجود وقوع گسیختگی در نقطه اوج، افت تنش پس از اوج نسبت به (شکل9a) تدریجی‌تر است. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش تنش محصورکننده موجب محدود شدن رشد ترک‌های برشی و تأخیر در تخریب ساختار بهسازی شده است. بنابراین اگرچه نمونه همچنان رفتار ترد دارد، اما میزان شکنندگی آن نسبت به حالت ۵۰kPa با (BI= ۰/۵۵) کاهش یافته است. در مجموع، افزایش تنش همه‌جانبه از ۵۰kPa به ۱۰۰ موجب افزایش شکل‌پذیری و کاهش شدت گسیختگی ترد شده است، در حالی که افزایش زمان عمل‌آوری همچنان باعث افزایش مقاومت اوج می‌شود.

[15] Strain Softening

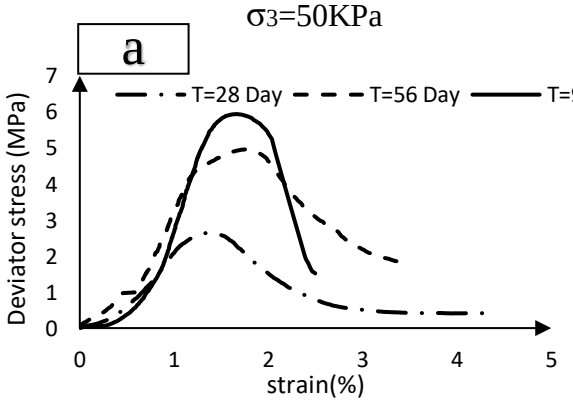
ACCEPTED MANUSCRIPT

در تنش همه‌جانبه ۱۵۰kPa (شکل۱۰c) تأثیر فشار محصورکننده بر رفتار نمونه‌ها کاملاً مشهود است. نمونه ۲۸day پس از رسیدن به مقاومت اوج، افت تنش بسیار محدودی را تجربه می‌کند و بخش پس از اوج تقریباً به صورت پایدار ادامه می‌یابد. این رفتار بیانگر افزایش قابل توجه شکل‌پذیری و کاهش شدت گسیختگی ترد در اثر افزایش فشار محصورکننده است. نمونه ۵۶day مقاومت اوج بیشتری نسبت به نمونه ۲۸day دارد و پس از رسیدن به اوج، افت تنش متوسطی را نشان می‌دهد. وجود بخش نرم‌شوندگی پس از اوج بیانگر وقوع گسیختگی است، اما فشار محصورکننده بالا مانع از افت ناگهانی مقاومت شده است. نمونه ۹۰day همچنان بیشترین مقاومت اوج را نشان می‌دهد. با این حال، برخلاف حالت تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال، افت تنش پس از اوج به صورت تدریجی‌تر رخ می‌دهد و مقدار قابل توجهی مقاومت باقیمانده حفظ می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که فشار محصورکننده بالا از گسترش سریع ترک‌های برشی جلوگیری کرده و با (BI= ۰/۴۶) موجب کاهش شدت رفتار ترد شده است. به طور کلی، نتایج (شکل۹c) نشان می‌دهد که افزایش تنش همه‌جانبه تا ۱۵۰kPa باعث تغییر رفتار نمونه‌ها از حالت نسبتاً ترد به سمت رفتار شکل‌پذیرتر شده است. با وجود آنکه نمونه‌های ۹۰dayهمچنان بیشترین شکنندگی را در میان زمان‌های عمل‌آوری مختلف دارند، شدت این شکنندگی به طور محسوسی کمتر از شرایط تنش همه‌جانبه پایین‌تر است.

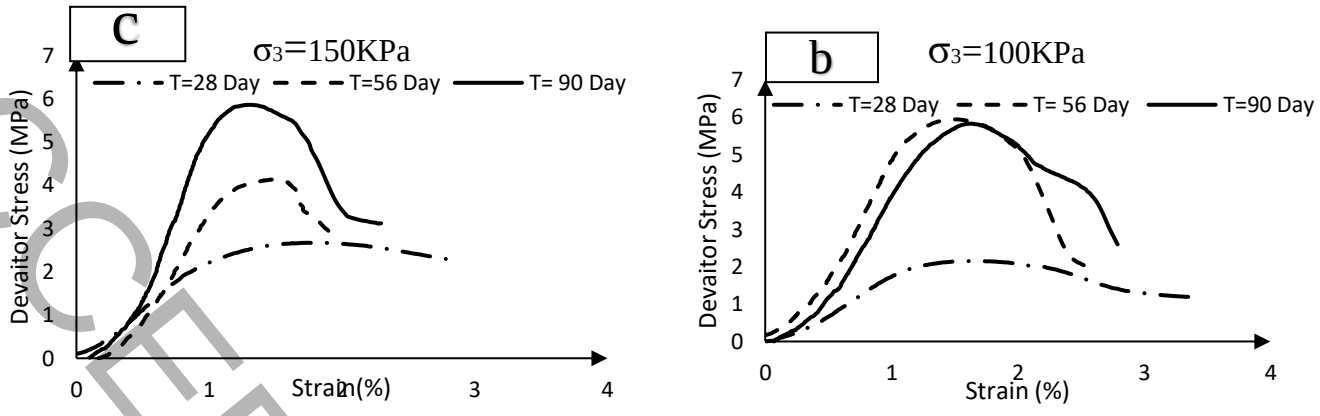
در سنین پایین عمل‌آوری، نمونه‌ها تغییرشکل جانبی بیشتری از خود نشان می‌دهند و مقاومت کمتری در برابر نیروهای فشاری دارند. این موضوع ناشی از ضعیف بودن همبستگی بین سنگدانه‌ها است که در اثر ناکامل بودن فرایند هیدراتاسیون رخ می‌دهد. اعمال فشار همه‌جانبه موجب کاهش تغییرشکل جانبی و افزایش فشردگی ذرات خاک می‌شود. در نتیجه، نیروها از طریق ذرات به اسکلت خاک منتقل شده و ضعف باندهای ناشی از هیدراتاسیون در سنین پایین تا حدی جبران می‌شود.

با افزایش سن نمونه‌ها، تأثیر فشار همه‌جانبه بر رفتار آن‌ها کاهش می‌یابد(شکل۱۰). زیرا با افزایش سن عمل‌آوری، باندهای حاصل از فرایند هیدراتاسیون سخت‌تر و مقاوم‌تر می‌شوند. در این شرایط، تغییرشکل جانبی نمونه‌ها کاهش یافته و نقش فشار همه‌جانبه در فشرده‌سازی و کنترل تغییرشکل جانبی کمتر می‌شود. در مقابل، سهم باندهای حاصل از هیدراتاسیون در انتقال و تحمل مقاومت فشاری در اسکلت خاک افزایش می‌یابد.

مطابق مطالعات پیشین، افزایش زمان عمل‌آوری در خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و مواد پوزولانی موجب تشکیل بیشتر محصولات هیدراتاسیون و افزایش پیوند بین ذرات خاک می‌شود که نتیجه آن افزایش مقاومت اوج و در عین حال افزایش رفتار شکننده است. از سوی دیگر، افزایش تنش همه‌جانبه سبب محدود شدن رشد و گسترش ترک‌های برشی شده و در نتیجه شدت نرم‌شوندگی کرنشی و افت تنش پس از اوج کاهش می‌یابد. رفتار مشاهده‌شده در نمونه‌های حاضر نیز با نتایج گزارش‌شده در مطالعات وانگ و همکاران، نامیکاوا وهمکارن و ین و همکاران همخوانی مناسبی دارد[61-59].

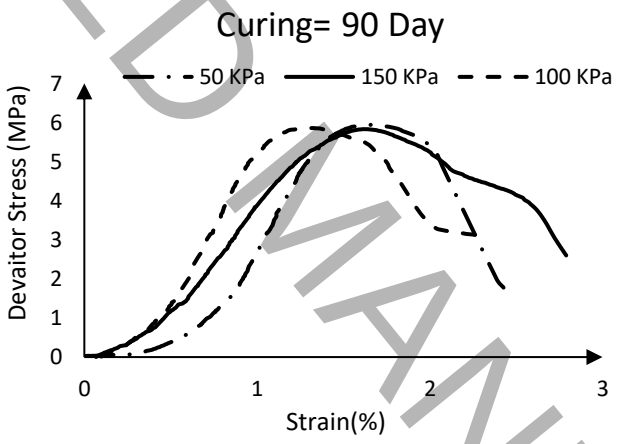


ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۰)تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری برای نمونه بهینه با فشار همه‌جانبه a) ۵۰kPa b) ۱۰۰kPa c) ۱۵۰kPa

Figure10: Deviatoric stress versus axial strain for the optimal specimen at confining pressures of a) 50 kPa, b) 100 kPa, and c) 150 kPa.

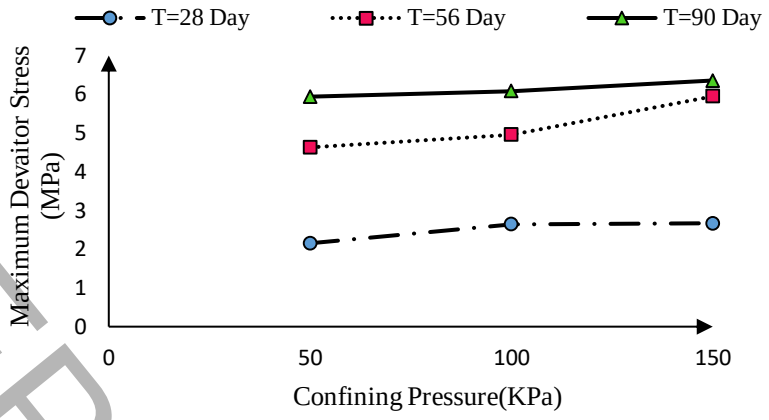


شکل۱۱)تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری برای نمونه بهینه با فشار همه‌جانبه ۵۰kPa، ۱۰۰ و ۱۵۰ در زمان عمل آوری ۹۰day

Figure11: Deviatoric stress versus axial strain for the optimal specimen at confining pressures of 50, 100, and 150 kPa after 90 days of curing.

همچنین نتایج آزمایش‌های سه‌محوری نشان می‌دهد که با افزایش فشار همه‌جانبه، تنش انحرافی بیشینه نمونه‌ها در تمامی سنین عمل‌آوری افزایش می‌یابد (شکل۱۱و ۱۲). این رفتار ناشی از آن است که فشار همه‌جانبه موجب فشردگی و درهم‌قفل‌شدن دانه‌های ماسه شده و در نتیجه، انتقال تنش در اسکلت دانه‌ای نمونه را تقویت می‌کند. علاوه بر این، تنش اعمال‌شده را به‌صورت مؤثرتری به شبکه سیمانی ایجادشده بر اثر هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی متاکائولین بین دانه‌ها منتقل می‌سازد؛ در نتیجه، مقاومت کلی نمونه افزایش می‌یابد. در فشار همه‌جانبه پایین، مقاومت عمدتاً ناشی از پیوندهای سیمانی است؛ اما با افزایش فشار همه‌جانبه، اصطکاک بین دانه‌ها و فشردگی اسکلت ماسه نیز فعال شده و مقاومت ترکیبی حاصل از اثرات سیمانی و اصطکاکی افزایش می‌یابد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۲) تغییرات حداکثر تنش انحرافی بر اساس فشار همه‌جانبه در سنین عمل‌آوری مختلف

Figure12: Variations in maximum deviatoric stress based on confining pressure at different curing ages

۴.۴. آنالیزهای ریزساختار

آزمایش‌های FESEM و XRD

(شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵) نمودارهای XRD نمونه‌های ماسه انزلی سیمانی‌شده با مقادیر مختلف متاکائولین و پسماندکارخانه شیشه را پس از ۹۰ روز نشان می‌دهند.

نتایج XRD (شکل۱۳) در نمونه های حاوی متاکائولین فازهای بلوری زیر شناسایی شدند: کوارتزکه حضور آن عمدتاً به فازهای معدنی خاک اولیه نسبت داده می‌شود. کلسیت که می‌تواند ناشی از کربناته‌شدن ثانویه محصولات هیدراتاسیون سیمان، به‌ویژه در محیط غنی از یون‌های محلول آب دریا باشد. پورتلندیت که نشان‌دهنده هیدراتاسیون فازهای کلینکری سیمان است و اترینگایت که تشکیل آن به واکنش آلومینات‌های سیمان با سولفات‌ها نسبت داده می‌شود؛ حضور این فاز با توجه به عمل‌آوری در آب دریا قابل انتظار است. در کنار فازهای بلوری، وجود برآمدگی [16] پهن در بازه زاویه‌ای تقریباً ۲۰°C تا ۳۵°C 2θ نشان‌دهنده تشکیل فازهای ژل C-S-H و C-A-S-H با ماهیت نیمه‌آمورف است. این فازها محصول اصلی هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی متاکائولین با پورتلندیت هستند. کاهش نسبی شدت پیک‌های پورتلندیت در مقایسه با شدت بالای فازهای آمورف، بیانگر مصرف $Ca(OH)_2$ در واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل‌های پایدارتر می‌باشد. حضور شدید کلسیت همراه با باقی‌ماندن مقدار محدودی پرتلندیت بیانگر وقوع همزمان هیدراتاسیون سیمان، واکنش پوزولانی متاکائولین و فرآیند کربناته شدن است. همچنین تشکیل اترینگایت و احتمال حضور مقادیر قابل توجه ژل‌های C-S-H و C-A-S-H نشان می‌دهد که متاکائولین در مصرف هیدروکسید کلسیم و تولید محصولات سیمانی ثانویه نقش مؤثری داشته است. این ریزساختار متراکم معمولاً با افزایش مقاومت فشاری و بهبود رفتار مهندسی خاک تثبیت‌شده همراه است. (شکل۱۴) حضور فازهای اصلی SiO_2، C-S-H، C-A-S-H/C-A-O-S و $Ca(OH)_2$ را نشان می‌دهد. تشکیل

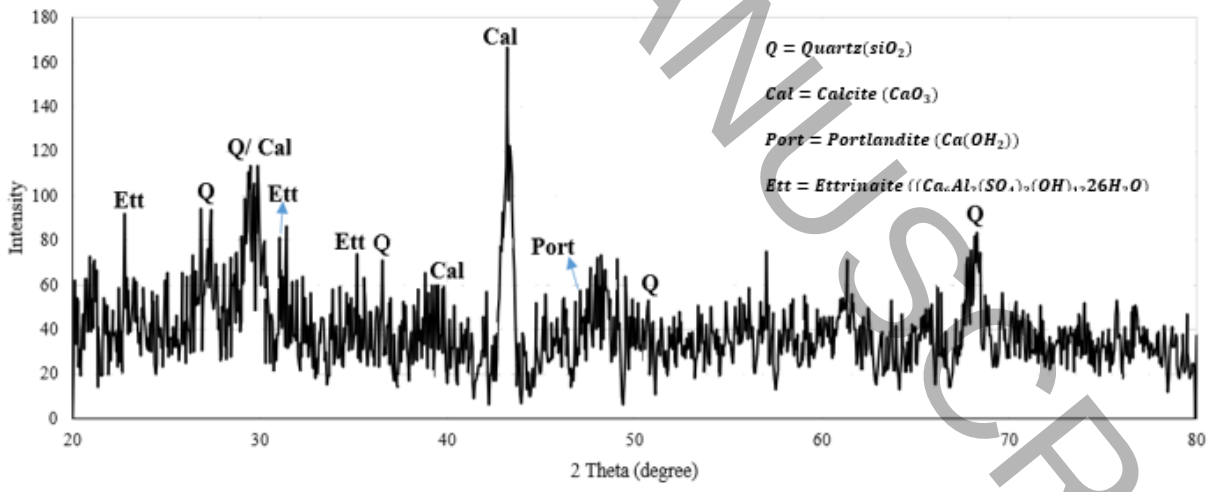
[16] hump

ACCEPTED MANUSCRIPT

گسترده محصولات هیدراتاسیون ثانویه در این نمونه بیانگر پیشرفت واکنش‌های پوزولانی و توسعه یک ریزساختار متراکم است. حفظ اوج‌های SiO_2 در سن ۹۰day نشان می‌دهد که بخشی از سیلیس هنوز به صورت بلوری باقی مانده، اما همزمان بخش قابل توجهی از آن در واکنش‌های پوزولانی مصرف شده است. همچنین وجود چندین اوج C-S-H در نمونه ۹۰day نشان می‌دهد که، هیدراتاسیون سیمان به خوبی پیشرفت کرده است، واکنش پوزولانی پسماند ادامه یافته است و بخش قابل توجهی از $Ca(OH)_2$ مصرف شده و به ژل‌های مقاوم‌تر تبدیل شده است. در نهایت هیدراتاسیون سیمان به مقدار زیادی تکمیل شده است که موجب حضور فعال پسماند در واکنش پزولانی و تشکیل قابل توجه محصولات ثانویه C-S-H وC-A-S-H شده است و ساختار داخلی متراکمی را ایجاد کرده است که این تغییرات معمولا با افزایش مقاومت فشاری ، مدول سختی و کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام همراه هستند.

الگوی XRD (شکل۱۵) حضور فازهای (SiO_2) Quartz، $(CaCO_3)$ Calcite، $(Ca(OH)_2)$ Portlandite، Ettringite و محصولات سیلیکاتی و آلومینوسیلیکاتی حاصل از واکنش پوزولانی را نشان می‌دهد. اوج‌های بسیار مشخص کلسیت در حدود C° ۴۰،۲۹، ۴۶و ۵۵ دیده می‌شوند. فراوانی این فاز نشان می‌دهد که در سن ۹۰day بخشی از ترکیبات کلسیمی حاصل از هیدراتاسیون دچار کربناته شدن شده‌اند. تشکیل کلسیت معمولاً سبب کاهش تخلخل، افزایش تراکم ساختار و بهبود پایداری بلندمدت می‌شود. همچنین اوج‌های اترینگایت در حدود۲۲ C° و ۳۳ مشاهده می‌شوند. وجود اترینگایت پس از ۹۰day نشان‌دهنده ادامه واکنش بین سولفات‌ها و ترکیبات آلومیناتی سیمان است. از آنجا که متاکائولین منبع آلومینای فعال محسوب می‌شود، حضور آن می‌تواند تشکیل اترینگایت را تقویت کرده باشد. وجود همزمان متاکائولین و پسماند باعث ایجاد یک سیستم پوزولانی مکمل شده است. پسماند کارخانه شیشه، سیلیس فعال فراوان تأمین می‌کند و تولید C-S-H را افزایش می‌دهد. متاکائولین موجود در نمونه باعث فعال شدن

آلومینا و تشکیل C-A-S-H و اترینگایت را تسهیل می‌کند .در نتیجه شبکه متراکم‌تری از محصولات هیدراتاسیون ایجاد می‌شود. این نتایج در تطابق با تحقیقات محققانی همچون مکسول و همکاران و گارسیا و همکاران می‌باشد [۶۲-۶۴].

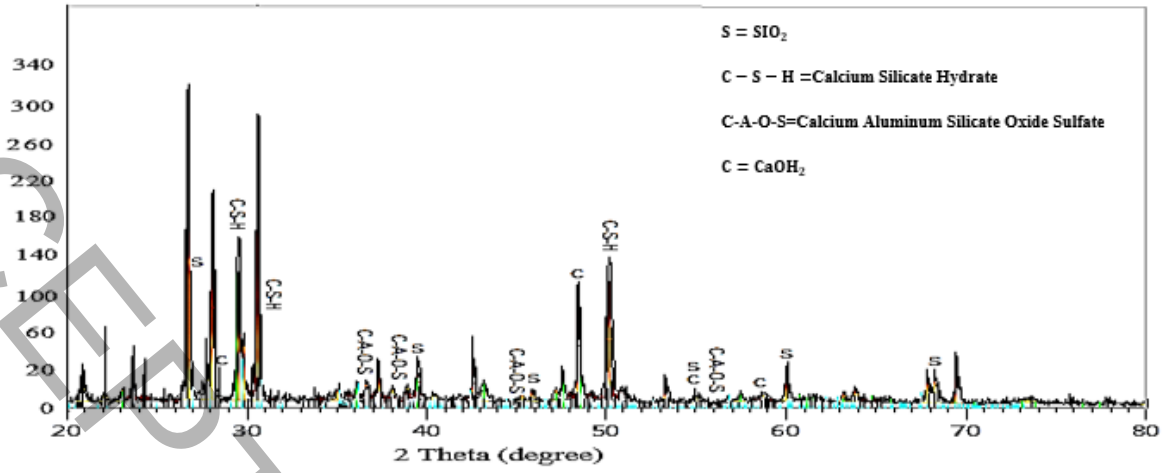


شکل۱۳) نمودار نتایج آزمایش XRD نمونه بهسازی شده با۳ ٪ متاکائولین

Figure13: XRD pattern of the treated soil specimen containing

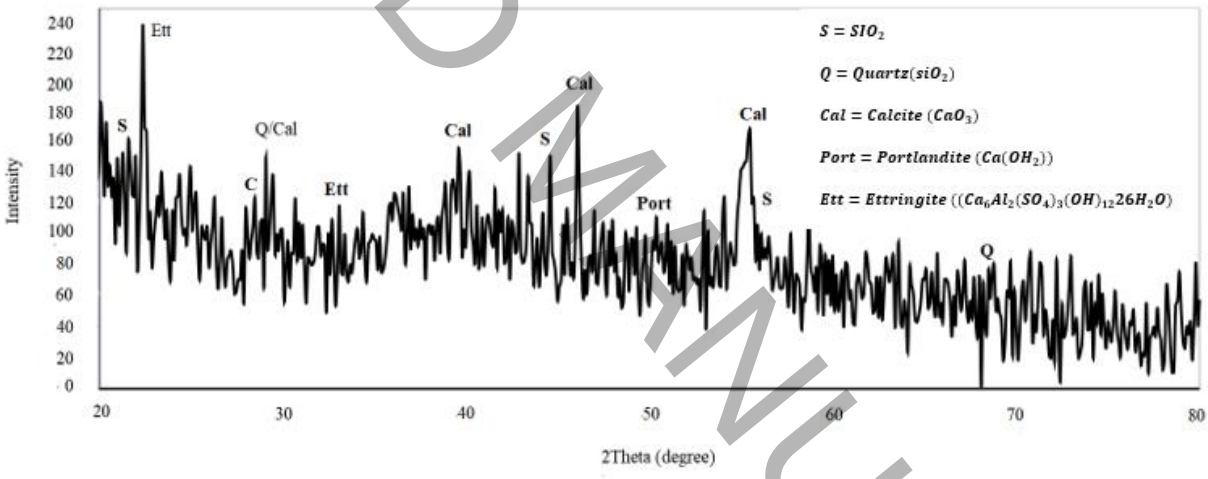
ACCEPTED MANUSCRIPT

3% metakaolin



شکل۱۴) نمودار نتایج آزمایش XRD نمونه بهسازی شده با ۳٪ پسماند کارخانه شیشه

Figure14: XRD pattern of the treated soil specimen containing 3% glass-factory waste.



شکل۱۵) نمودار نتایج آزمایش XRD نمونه بهسازی شده با ۳٪ متاکائولین و۳٪ پسماند کارخانه شیشه

Figure15: XRD pattern of the treated soil specimen containing 3% glass-factory waste and 3% metakaolin

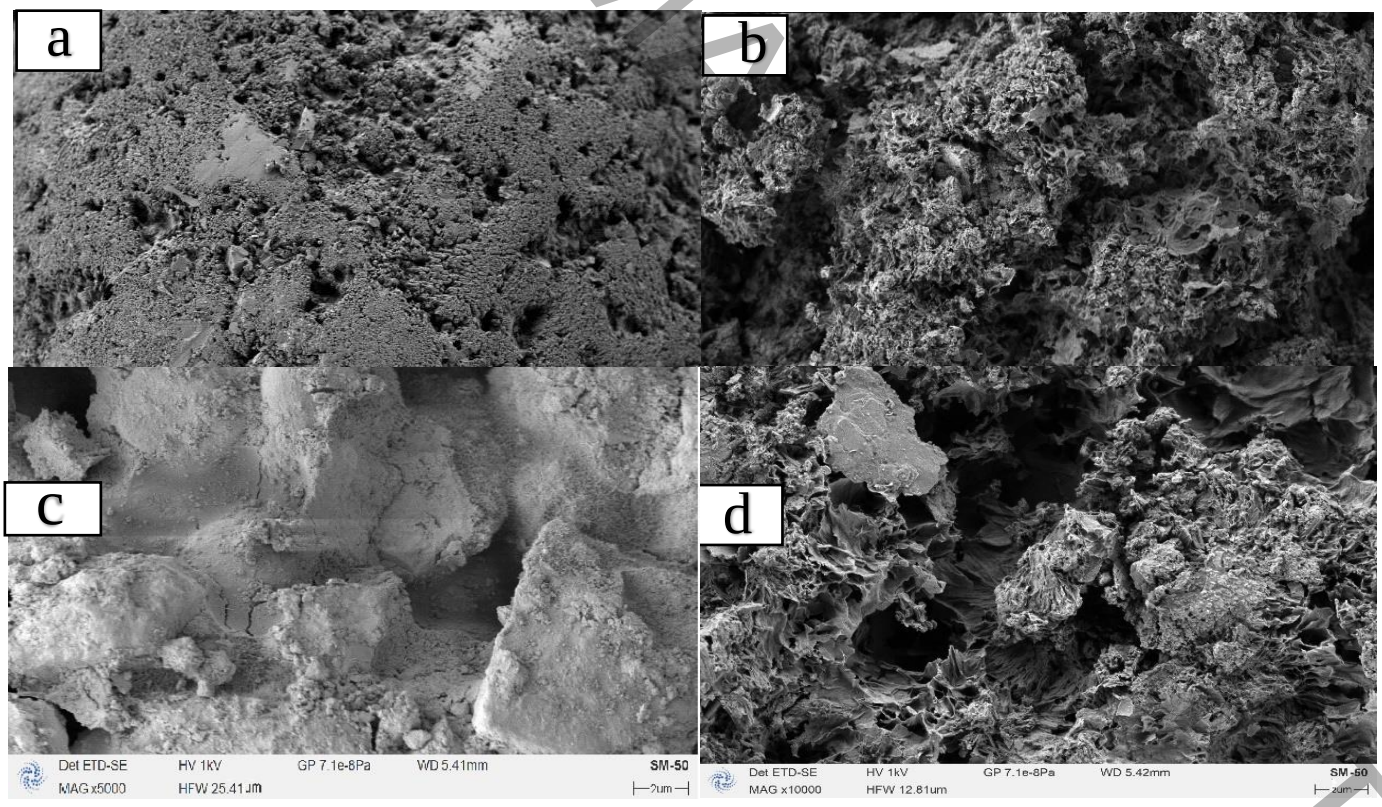
(شکل ۱۶) تصاویر SEM از ماسه انزلی و ماسه انزلی سیمانی شده با ۳٪ پسماند کارخانه شیشه و ۳٪ متاکائولین را در زمان عمل‌آوری ۹۰day نشان می‌دهند. همانطور که در (شکل ۱۶a) مشاهده می‌شود، ریزساختار مخلوط ماسه انزلی مشخص میشود که ذرات خاک مبنا به‌صورت نیمه گرد گوشه، سست و متخلخل است. در (شکل ۱۶b)، می‌توان مشاهده کرد که محصولات هیدراتاسیون به‌صورت توده‌های ژل‌مانند و نسبتاً آمورف مشاهده می‌شوند که بخش عمده‌ای از فضای خالی را پر کرده و موجب ایجاد پیوند بین ذرات ماسه شده‌اند. ریز ساختار های‌سوزنی پراکنده که از نظر مورفولوژیکی با اترینگایت سازگار هستند مشاهده شد. با این حال، عدم مشاهده ترک‌های انبساطی گسترده یا گسیختگی ریزساختاری نشان می‌دهد که میزان تشکیل اترینگایت در شرایط این تحقیق در محدوده غیرمخرب قرار داشته است. همچنین تراکم قابل توجه محصولات ژلی در تصاویر SEM نشان می‌دهد که متاکائولین با انجام واکنش

ACCEPTED MANUSCRIPT

پوزولانی، بخشی از هیدروکسید کلسیم را مصرف و در تشکیل فازهای C-A-S-H مشارکت کرده است. این فرآیند منجر به متراکم‌تر شدن ریزساختار و کاهش تخلخل مؤثر نمونه شده است.

(شکل۱۶c) نشان می‌دهد که به دلیل توانایی ذرات پسماند کارخانه شیشه در تولید CSH اضافی و پر کردن منافذ، تا حدودی بهبود یافته است. اما نواحی متراکم شده از پسماند در ریزساختار ماسه سیمانی شده با ۳٪ پسماند وجود دارد. این امر را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که با افزایش ذرات پسماند در نمونه، تعداد آنها در یک حجم ثابت افزایش می‌یابد. از این رو، این ذرات احتمالاً به هم می‌چسبند و کلوخه‌های ضعیف و ناپایدار تشکیل می‌دهند. این موضوع منجر به آسیب‌پذیری نمونه‌های حاوی پسماند بالا در برابر بار می‌شود. این موضوع با استفاده از نتایج آزمایش‌های فشاری محصور نشده تأیید شده است.

در نهایت با ترکیب متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه به میزان ۳٪ در (شکل۱۶d) مشاهده می‌شود به دلیل فعالیت پوزولانی زیاد پسماند و متاکائولین، تعداد زیادی از مکان‌های هسته‌زایی برای رسوب محصولات هیدراتاسیون با پخش پسماند و متاکائولین در خمیر سیمان ایجاد می‌شود. بنابراین، واکنش‌های هیدراتاسیون تسریع می‌شوند و توزیع منافذ ریز بهتر می‌شود. این امر باعث ایجاد ریزساختار یکنواخت‌تر، همگن‌تر و متراکم‌تر می‌شود. در نتیجه، ژل CSH بیشتری تولید می‌شود که به مخلوط ماسه-سیمان خواص بهبود یافته‌ای مانند بهبود سختی می‌دهد. به‌طور کلی، تثبیت ماسه انزلی با سیمان،متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه موجب تبدیل ساختار دانه‌ای گسسته به یک ماتریس ژلی نسبتاً متراکم شده است.



ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۶) تصاویر SEM a) خاک ماسه انزلیb) نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ سیمان و ۳٪ متاکائولینc) نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ سیمان و ۳٪ پسماند کارخانه شیشهd) نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ سیمان و ۳٪ متاکائولین و ۳٪ پسماند کارخانه شیشه

Figure16: SEM images of: a) Anzali sandy soil; b) sample stabilized with 20% cement and 3% metakaolin; c) sample stabilized with 20% cement and 3% glass factory waste; d) sample stabilized with 20% cement, 3% metakaolin, and 3% glass factory waste.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه بر مشخصات ژئوتکنیکی ماسه انزلی تثبیت شده با سیمان به روش DSM ارزیابی شد. نتایج نشان داد که ذرات متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه نه تنها تعداد زیادی از کریستال‌های CH را برای تولید CSH مصرف می‌کنند، بلکه اثر پرکنندگی نیز از خود نشان می‌دهند که منجر به کاهش تخلخل، افزایش چگالی، بهبود ریزساختار ناحیه انتقال بین سطحی و عملکرد مکانیکی بهتر می‌شود. نتایج را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- ذرات متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون را تسریع کرده و پیوند بین ماسه و ماتریس سیمان هیدراته را به دلیل تبدیل CH به CSH بهبود می‌بخشند. از این رو، نمونه‌های ماسه سیمانی شده با این ذرات مقادیر مقاومت بالایی را نشان دادند. علاوه بر این، سختی نمونه‌ها با افزودن هر دو افزودنی متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه به طور قابل توجهی افزایش یافت که ممکن است به محصول بسیار متراکم‌تر و همگن‌تر در چگالی، به ویژه در ناحیه انتقال بین سطحی بین ذرات ماسه و خمیر سیمان نسبت داده شود.

۲- ترکیب هم‌زمان متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه بیشترین مقدار مدول الاستیسیته را در مقایسه با سایر ترکیبات نشان داد، به‌خصوص در محیط آب شور، که این موضوع بیانگر اثر هم‌افزایی واکنش‌های پوزولانی، تسریع تشکیل فازهای پایدار C–S–H و C–A–S–H و افزایش تراکم ریزساختار می‌باشد.

۳- ، با افزایش زمان عمل‌آوری تنش انحرافی بیشینه نمونه‌ها در فشار همه جانبه یکسان، افزایش یافت. همچنین افزایش فشار همه‌جانبه منجر به افزایش تنش انحرافی بیشینه نمونه‌ها در تمام سنین عمل‌آوری شد. فشار همه‌جانبه باعث فشردگی و درهم‌قفل‌شدن دانه‌های ماسه می‌شود و انتقال تنش از طریق اسکلت دانه‌ای نمونه را افزایش می‌دهد. همچنین تنش وارد بر نمونه را به طور مؤثرتری به شبکه سیمانی حاصل از هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی متاکائولین بین دانه‌ها منتقل می‌کند، به طوری که مقاومت کلی نمونه افزایش می‌یابد.

۴- نتایج FESEM نشان داد که وجود متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه در مخلوط‌های ماسه و سیمان می‌تواند ویژگی‌های ریزساختار بین‌سطحی را بهبود بخشد، فرآیند هیدراتاسیون را (تا درصد بهینه) افزایش دهد، حجم منافذ بزرگ را کاهش دهد و ریزساختار ماسه سیمانی شده را یکنواخت‌تر و متراکم‌تر کند. علاوه بر آن مقایسه الگوهای XRD نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی متاکائولین و پسماند شیشه، شدت نسبی پیک پرتلندیت $Ca(OH)_2$ نسبت به نمونه حاوی تنها سیمان کاهش یافته است؛ در مقابل، حضور و تقویت پیک‌های مربوط به محصولات هیدراتاسیون نظیر C-S-H و فازهای آلومینوسیلیکاتی هیدراته و همچنین اترینگایت مشاهده می‌شود. کاهش نسبی شدت پیک پرتلندیت بیانگر مصرف $Ca(OH)_2$ در واکنش‌های پوزولانی است، در حالی که افزایش نسبی محصولات هیدراتاسیون با نتایج مقاومت فشاری و تصاویر FESEM همخوانی دارد و بیانگر متراکم‌تر شدن ریزساختار نمونه‌های حاوی افزودنی است. اگرچه نتایج آزمایش‌های XRD و FESEM شواهد مناسبی از تشکیل محصولات هیدراتاسیون و بهبود ریزساختار در نمونه‌های حاوی متاکائولین و پسماند شیشه ارائه می‌کنند، تفسیر این نتایج در پژوهش حاضر عمدتاً بر مبنای تحلیل کیفی انجام شده است. استفاده از روش‌های تحلیل کمی مانند آنالیز ریتولد بر داده‌های XRD و آزمایش‌های TG/DTG

به‌منظور تعیین میزان مصرف پرتلندیت و برآورد کمی محصولات هیدراتاسیون می‌تواند در مطالعات آینده به درک دقیق‌تر مکانیزم‌های واکنش و اعتبارسنجی بیشتر نتایج کمک کند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از متاکائولین و پسماند کارخانه شیشه، به‌ویژه به‌صورت ترکیب (۲۰٪ سیمان+ ۳٪متاکائولین+۳٪پسماند کارخانه شیشه)، می‌تواند راهکاری مؤثر، پایدار و اقتصادی برای بهبود سختی و رفتار مکانیکی خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در شرایط محیطی دریایی و ساحلی باشد.

The Effect Of Metakaolin And Glass Factory Waste On The Geotechnical Properties Of Cement-Stabilized Anzali Sand Using The DSM Method

ABSTRACT:

The improvement of loose sandy soils in coastal areas, especially in marine environments, is one of the major challenges in geotechnical engineering. In this study, the effect of metakaolin and glass factory waste on the mechanical behavior and hardness of cement-stabilized Anzali sand using the deep soil mixing (DSM) method was investigated. For this purpose, samples were prepared with 20% cement and (3%, 0% metakaolin and 3%, 0% glass factory waste) and after curing in two environments of fresh water and seawater, they were subjected to unconfined compression and triaxial tests. The secant modulus of elasticity (E_{50}) as an index of the hardness of the samples was extracted from the stress-strain curves. The results showed that the addition of metakaolin and glass factory waste, separately and especially in combination, significantly increased the modulus of elasticity and improved the mechanical behavior of the samples. It was also observed that by adding 20% cement, 3% metakaolin and 3% glass factory waste, curing in seawater resulted in a significant increase in E_{50} compared to fresh water, which is attributed to the synergistic effect of pozzolanic reactions, the formation of more stable hydration phases and the improvement of microstructure compaction in the presence of saline ions. The results showed that metakaolin and glass factory waste particles not only consume a large number of CH crystals to produce CSH, but also exhibit a filling effect, which leads to reduced porosity, increased density, improved microstructure of the interfacial transition zone and better mechanical performance.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Key words:

Sandy soil improvement, cement, metakaolin, glass factory waste, fresh water, seawater, modulus of elasticity, deep soil mixing

Refrences

[١]N.C. Consoli, P.D.M. Prietto, L.A. Ulbrich, INFLUENCE OF FIBER AND CEMENT ADDITION ON BEHAVIOR OF SANDY SOIL, Geotech. Geoenviron. Eng., 124 (1998) 1211–1214.
[٢]F. Dalla Rosa, N.C. Consoli, B.A. Baudet, An experimental investigation of the behaviour of artificially cemented soil cured under stress, Géotechnique, 58(8) (2008) 675–679.
[٣]N.C. Consoli, A.V.d. Fonseca, R.C. Cruz, K.S. Heineck, Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand, Geotech. Geoenviron. Eng., 135 (2009) 1347–1353.
[٤]N.C. Consoli, M.A. Vendruscolo, A. Fonini, F.D. Rosa, Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range, Geotextiles and Geomembranes, 27(3) (2009) 196–203.
[٥]N.C. Consoli, R.C. Cruz, M.F. Floss, L. Festugato, Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand, Geotech. Geoenviron. Eng., 136 (2010) 759–763.
[٦]N.C. Consoli, B.S. Consoli, L. Festugato, A practical methodology for the determination of failure envelopes of fiber-reinforced cemented sands, Geotextiles and Geomembranes, 41 (2013) 50–54.
[٧]V.P. Faro, N.C. Consoli, F. Schnaid, A. Thomé, L. da Silva Lopes, Field Tests on Laterally Loaded Rigid Piles in Cement Treated Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(6.(٢٠١٥) (
[٨]I. Shooshpasha, R. Alijani Shirvani, Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils, Geomechanics and engineering, 8 (2015) 17–31.
[٩]M. Forcelini, G.R. Garbin, V.P. Faro, N.C .Consoli, Mechanical Behavior of Soil Cement Blends with Osorio Sand, Procedia Engineering, 143 (2016) 75–81.
[١٠]H. Rasouli, H. Takhtfirouzeh, A. Taghavi Ghalesari, R. Hemati, Bearing Capacity Improvement of Shallow Foundations Using Cement-Stabilized Sand, Key Engineering Materials, 723 (2016) 795–800.
[١١]R. Cardoso, D. Ribeiro, R. Néri, Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures, Soils and Foundations, 57(4) (2017) 655–668.
[١٢]F.I .Shalabi, J. Mazher, K. Khan, M. Alsuliman, I. Almustafa, W. Mahmoud, N. Alomran, Cement-Stabilized Waste Sand as Sustainable Construction Materials for Foundations and Highway Roads, Materials (Basel), 12(4.(٢٠١٩) (
[١٣]S.R. Kaniraj, V.G. Havanagi, BEHAVIOR OF CEMENT-STABILIZED FIBER-REINFORCED FLY ASH-SOIL MIXTURES, GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING 127 (2001) 574–584.
[١٤]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 (2003) 96–101.
[١٥]N.C. Consoli, L. Festugato, C.G. da Rocha, R.C. Cruz, Key parameters for strength control of rammed sand–cement mixtures: Influence of types of portland cement, Construction and Building Materials.٥٩٧–٥٩١ (٢٠١٣) ٤٩ ,
[١٦]A. Hamidi, M. Hooresfand, Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand, Geotextiles and Geomembranes, 36 (2013) 1–9.
[١٧]Y. Ju, K. Tian, H. Liu, H.W. Reinhardt, L. Wang, Experimental investigation of the effect of silica fume on the thermal spalling of reactive powder concrete, Construction and Building Materials, 155 (2017) 571–583.
[١٨]K. Kupwade-Patil, S.D. Palkovic, A. Bumajdad, C. Soriano, O. Büyüköztürk, Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography, Construction and Building Materials, 158 (2018) 574–590.
[١٩]D.D.L. Chang, Review Improving cement-based materials by using silica fume, materials science 37, (2002) 673–682.
[٢٠]M.C.G. Juenger, R. Siddique, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, Cement and Concrete Research, 78 (2015) 71–80.
[٢١]M.S.I. Zaini, H. Muzamir, Effect of optimum utilization of silica fume and lime on the stabilization of problematic soils., International Journal of Integrated Engineering, 15 (2023) 352–366.
[٢٢]S. Almuaythir, M.S.I. Zaini, M. Hasan, Shear strength, compressibility, and consolidation behaviour of expansive clay soil stabilized with lime and silica fume, Sci Rep, 15(1) (2025) 26185.
[٢٣]M.H. Shahnazi, V. Toufigh, S.J. Ramezani, M.M. Toufigh, Performance assessment of waste glass powder in sandy soil stabilization: Effect of alkaline activator on mechanical and microstructural properties, Results in Engineering, 27.(٢٠٢٥)

ACCEPTED MANUSCRIPT

[٢٤]A. Tabaroei, F. Bozorgvar, Mechanical and microstructural enhancement of clayey soils through recycled glass powder stabilization, Sci Rep, 15.٣٦٧٠٢ (٢٠٢٥) (١)
[٢٥]X. Zhuang, T. Li, D. Yang, Dynamic properties and microstructural mechanisms of cement-stabilized soils improved with industrial by-product silica fume, Journal of Engineering and Applied Science, 72(1.(٢٠٢٥) (
[٢٦]J.A. Kostuch, G.V. Walters, T.R. Jones, High performance concretes incorporating metakaolin, a review." Concrete 2, (2000) 1799–1811.
[٢٧]P.H. Krishna, S. Azaruddin, P. Bala Krishna, EFFECT OF NANO-SILICA AND METAKAOLIN ON PROPERTIES OF RECYCLED COARSE AGGREGATE CONCRETE ,International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 04 (2017) 831–838.
[٢٨]J.-J. HESSOUH, J. Eslami, A.-L. Beaucour, A. NOUMOWE, F. MATHIEU, P. GOTTELAND, Physical and Mechanical Characterization of Deep Soil Mixing (Dsm) Materials: Laboratory vs Construction Site, SSRN Electronic Journal.(٢٠٢٢) ,
[٢٩]A.-D. 854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, in: ASTM standards, 2002, pp. 7.
[٣٠]ASTM-D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)1, ASTM Standards, 1 (2017) 1–10.
[٣١]P. Suraneni, L. Burris, C.R. Shearer, R.D. Hooton, ASTM C618 fly ash specification: Comparison with other specifications, shortcomings, and solutions, ACI Materials Journal, 118(1) (2021) 157–167.
[٣٢]N.T. Abd, J.M. Abbas, Effect of Metakaolin on the Swelling and Shrinkage Behaviour of a highly Expansive Soil, Diyala Journal of Engineering Sciences, (2023) 60–67.
[٣٣]A.S.A. Al-Gharbawi, A.M. Najemalden ,M.Y. Fattah, Expansive Soil Stabilization with Lime, Cement, and Silica Fume, Applied Sciences (Switzerland), 13(1.(٢٠٢٣) (
[٣٤]FHWA., Deep mixing for embankment and foundation support. in Report No FHWAHRT- 13-046, 2013.
[٣٥]A. -D2166, “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil1” {, #20}, ASTM Standards, 1 (2016) 1–6.
[٣٦]ASTM-D2850, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, ASTM Standards, 1 (2007) 1–6.
[٣٧]A.M. Neville, Properties of concrete Fifth Edition, 2011.
[٣٨]B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cement & Concrete Composites 23 (2001) 441–454.
[٣٩]Y. Shao , T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research, 30 (2000) 91–100.
[٤٠]Z. Wu, C. Shi, K.H. Khayat, Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC), Cement and Concrete Composites, 71 (2016) 97–109.
[٤١]J. Ahmad, M. Noman, A. Khan, Mechanical, durability and microstructure analysis of metakaolin-based concrete, Buildings, 9.(٢٠٢٢)
[٤٢]A.T. Bakeraa, N. EI-Jazain, A. Kakodkar, P. Kumar ,Use of metakaolin as a supplementary cementitious material, durability properties of concrete, 4 (2019) 94–99.
[٤٣]J.X. Lu, P. Shen, H. Zheng, B. Zhan, C.S. Poon, Early-age and microstructural properties of glass powder (WGP) concrete prepared with seawater., Cement and Concrete Composites.(٢٠٢١) ,
[٤٤]X.e.a. Miao, Valorization of waste glass into sustainable cementitious materials: mechanical and durability performance review, Journal of Cleaner Production.(٢٠٢٥) ,
[٤٥]I. Haider, E. Al, Investigating the synergistic effects of metakaolin and silica fume on cementing composites., 2025.
[٤٦]P. Sikora, Z. Kowalewaski, Seawater-mixed lightweight aggregate concretes with dune sand and glass powder: performance and microstructure., International Journal of Concrete Structures and Materials, 17(64.(٢٠٢٣) (
[٤٧]O. Afolyan, A. Adetoye, A Review on the Effect of Pozzolanic Properties of Metakaolin in Concrete, Structures and Buildings, 4 (2022) 8–16.
[٤٨]M. Al-Hashem, Mechanical and Durability Evaluation of Metakaolin as Cement Replacement, Materials, PMC, 12 (2022) 167–179.
[٤٩]Z. Shi, Y. Wei, B. Tuyan, Combined effect of metakaolin and sea water on mechanical properties of concrete, Construction and Building Materials, 86 (2015) 72–80.
[٥٠]O. Semmana ,L. Wang, D.D.L. Chung, A systematic review of the strength, durability and microstructure of waste glass powder in cement-based materials., 2025.
[٥١]A. Puppala, Estimating stiffness of subgrade and unbound materials for pavement design, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.(٢٠٠٨) ,
[٥٢]N.C. Consoli, D. Foppa, L. Festugato, K.S. Heineck, Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils, Geotech. Geoenviron. Eng., 133 (2007) 197–205.
[٥٣]S. Horpibulsak, R. Rachan ,A. Suddeepong, A. Chinkulkjiniwat, Strenght development in cement stabilized low plasticity coarse-grained soils, 52(2) (2012) 351–366.
[٥٤]T.D. Dyer, R.K. Dhir, CHEMICAL REACTIONS OF GLASS CULLET USED AS CEMENT COMPONENT, Mater. Civ. Eng, 13 (2001) 41.٤١٧–٢
[٥٥]İ.B. Topçu, M. Canbaz, Properties of concrete containing waste glass, Cement and Concrete Research, 34(2) (2004) 267–274.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[٥٦]Relative strenght, pozzoplanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete., Cement & Concrete Composites, 26(10) (1996) 1537–1544.
[٥٧]C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, H. Wang, Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research, 35(5) (2005) 987–993.
[٥٨]A. Behnood, J. Olek, Effects of metakaolin on strenght and durability propertise of concrete., Construction and Building Materials, 147 (2017) 178–186.
[٥٩]T. Namikawa, S. Hiyama, Y. Ando, T. Shibata, Failure behavior of cement-treated soil under triaxial tension conditions, Soils and Foundations, 57(5) (201.٨٢٧–٨١٥ (٧
[٦٠]S. Wang, Z. Xingjin, Z. Peng, C. Zewei, Strenght performance and stabilizaition machanism of fine sandy soils stabilized with cement and metacaolin., Sustainability15, no.4 (2023) 31–34.
[٦١]T. Yan, X. Zhang, S. Cai, Z. Zhou, R. An, X .Zhang, Mechanical Characteristics and Damage Constitutive Model of Fiber-Reinforced Cement-Stabilized Soft Clay, Applied Sciences, 14(4.(٢٠٢٤) (
[٦٢]J.R. Houston, R.S. Maxwell, S.A. Carroll, Transformation of meta-stable calcium silicate hydrates to tobermorite: reaction kinetics and molecular structure from XRD and NMR spectroscopy, Geochem Trans, 10 (2009) 1.
[٦٣]N. Farzadnia, A.A. Abang Ali, R. Demirboga, M.P. Anwar, Characterization of high strength mortars with nano Titania at elevated temperatures ,Construction and Building Materials, 43 (2013) 469–479.
[٦٤]D. Cristina Silva Garcia, M. Maira Nascimento de Souza Soares, A. Cesar da Silva Bezerra, M. Teresa Paulino Aguilar, R. Braga Figueiredo, Microstructure and hardness of cement pastes with mineral admixture, REVISTMATEERIA, 22N.02 (2017) 1–10.

ACCEPTED MANUSCRIPT