تأثیر متقابل سیمان و سرباره مس بر بهبود خواص مکانیکی خاک مارن شهر قم

محمد کریمی، مهدی خداپرست*، حامد بایسته، محمد حسین محمدرضایی
دانشگاه قم، دانشکده فنی و مهندسی

تاریخ دریافت: ١٤٠٠/٠٤/٠٦ تاریخ پذیرش: ١٤٠٠/٠٩/٢٩

چکیده

خاک مارن، خاکی مساله‌دار است که در بسیاری از مناطق ایران به‌خصوص شهر قم گستردگی قابل توجهی دارد. به‌منظور ساخت‌وساز بر روی خاک‌های مارن، لازم است تا قبل از ساخت، بهسازی این خاک‌ها با روش‌های موجود انجام شود. امروزه یکی از روش‌های رایجی که به‌منظور بهسازی خاک‌های مارنی مورد توجه قرار گرفته‌است، بهسازی با افزودنی‌های مختلف است. در این مقاله اثر متقابل سیمان و سرباره مس بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مارن شهر قم مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مقاله، از سیمان پرتلند تیپ دو و سرباره مس مصرفی از کارخانه ذوب مس تهران به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک مارن استفاده شده‌است. نمونه‌ها با استفاده از منحنی تراکم در درصد تراکم‌های ۹۵ و ۹۰ درصد و با رطوبت‌های سمت خشک و سمت تر منحنی تراکم ساخته شده و افزودنی‌ها به میزان ۵ و ۱۰ درصد وزن خشک خاک با نسبت آب به افزودنی ٤٤ درصد به آن اضافه شده‌اند و نمونه ها در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفته‌اند. همچنین درادامه به منظور بررسی و تحلیل ریزساختاری نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و سرباره مس، نمونه‌ها با استفاده از آزمایش‌های XRD و SEM مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان می‌دهد که افزودن سیمان به تنهایی باعث افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود اما افزودن سرباره مس به تنهایی تغییر چندانی در مقاومت فشاری خاک به همراه ندارد. این در حالیست که با افزودن پنج درصد سیمان، با افزایش مقدار سرباره مس، مقاومت نمونه‌ها کاهش خواهد یافت، اما با اضافه کردن ۱۰ درصد سیمان، افزایش مقدار سرباره‌ی مس منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها خواهد شد. نتایج بدست آمده از آزمایش های XRD و SEM نشان می‌دهد که با افزودن سیمان و سرباره مس به خاک مارن، اندازه ذرات افزایش می‌یابد و ساختار متراکم در خاک تثبیت‌شده ایجاد می‌شود که البته افزایش اندازه ذرات در درصدهای مختلف سیمان و سرباره مس، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد. حد روانی نمونه‌ها نیز با افزایش درصد سیمان افزایش یافته و افزایش درصد سرباره مس باعث کاهش حد روانی می‌شود.

واژگان کلیدی: خاک مارن، سیمان، سرباره مس، تثبیت خاک، بهسازی، مقاومت فشاری تک‌محوری.

* نویسنده مسئول khodaparast@qom.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک به کلیه خاک‌هایی که احداث سازه بر روی آنها با مشکل مواجه بوده و یا تحت تاثیر شرایط آب و هوایی و رطوبت تغییراتی در آن‌ها ایجاد می شود، خاک های مسئله‌دار یا مشکل‌آفرین می‌گویند. خاک‌های مارن، از جمله خاک‌های مساله‌دار هستند که در پروژه‌های عمرانی مشکلات فنی و مهندسی زیادی مانند ریزش، ترک‌خوردگی و نشست ناهمگون سازه‌ها را ایجاد می‌کنند. پیش از ساخت‌وساز برروی خاک‌های مارنی، به‌منظور بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک، لازم است که خاک تثبیت شود. به منظور بهبود عملکرد خاک، افزودنی‌های سنتی مانند ماسه، سیلت، آهک، خاکستر بادی، خاکستر آتشفشانی و... به‌وفور به انواع خاک‌ها اضافه شده‌اند. فقدان ماده‌ی مناسب برای تثبیت خاک مارن، باعث محدودیت استفاده از این خاک در پروژه‌های زیرساختی مانند بزرگراه و راه‌آهن می‌شود[۱]. از طرفی، سرباره‌ها که مواد شیشه‌ای هستند، هنگام استخراج فلزات از سنگ‌های معدنی تحت اثر حرارت، به‌عنوان مواد ضایعاتی باقی می‌مانند و امروزه استفاده از آنها جهت تثبیت خاک، یکی از کاربردهای جدید آنها می‌باشد. همچنین از سیمان به‌صورت سنتی و گسترده در تثبیت انواع خاک‌های مسئله‌دار استفاده می‌شود که خاک‌های مارنی نیز در این مورد مستثنی نبوده‌اند.

بهاراتی و چو (۲۰۱٦) به تثبیت خاک رس ساحلی سنگاپور با استفاده از سیمان و سرباره مس بازیافتی (استفاده‌شده برای سند بلاست کردن بدنه‌ی کشتی‌ها) پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده‌ی این بوده‌است که سرباره مس خاصیت پوزولانی داشته و در مقدار ثابت آب، با افزایش مقدار سرباره، مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان کاهش می‌یابد. با افزایش درصد سیمان و مدت عمل‌آوری، هرچه درصد سرباره مس بیشتر شود، مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان افزایش بیشتری می‌یابد[۲].

گودرزی و سلیمی (۲۰۱۵) تاثیر افزودن سرباره‌ی کوره‌ی پایه اکسیژنی تولید آهن و سرباره‌ی دانه‌ای‌شده‌ی تولید آهن در کوره‌ی بلند (BOFS و GBFS) به خاک رس واگرا را بررسی نموده‌اند. استفاده از هرکدام از این دو ماده، قابلیت واگرایی خاک را از بین برده و باعث کاهش خواص خمیری و افزایش مقاومت فشاری خاک خواهد شد. این در حالی است که BOFS اثر بیشتری دارد و مقدار بهینه آن ۱۰ درصد بوده که نیازمند هفت روز عمل‌آوری می‌باشد[۳].

وکلی و همکاران (۲۰۱٦) به بررسی اثر افزودن سرباره‌ی آهن و سرباره‌ی کروم بر مقاومت برشی خاک رس ترکیه پرداخته‌اند. با افزایش مقدار سرباره‌ی آهن و سرباره‌ی کروم، حد روانی و حد خمیری خاک کاهش می‌یابد. همچنین با افزودن پنج درصد سرباره‌ی کروم، مقاومت تک‌محوری خاک افزایش یافته درحالی‌که با افزودن ۱۰ و ۱۵ درصد از آن، مقاومت تک‌محوری خاک کاهش می‌یابد. همچنین با افزودن مقادیر مختلف سرباره‌ی آهن، مقاومت تک‌محوری خاک افزایش می‌یابد و اثر آن بیش از اثر سرباره‌ی کروم می‌باشد[٤].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

وکیلی و همکاران (۲۰۱٦) به تثبیت خاک رس استرالیا با استفاده از مخلوط سیمان، سدیم سیلیکات و سرباره‌ی فولاد پرداخته‌اند. مطابق نتایج به‌دست آمده، سرباره‌ی فولاد یک تثبیت‌کننده‌ی قوی برای خاک بوده و با افزایش مقدار آن، مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد[۵].

کرامتی‌کرمان و همکاران (۲۰۱٦) اثر افزودن سرباره‌ی دانه‌ای شده‌ی تولید آهن در کوره‌ی بلند (GGBFS) و آهک بر خواص مهندسی خاک رس استرالیا را مورد بررسی قرار داده‌اند. استفاده از سرباره‌ی فولاد باعث افزایش مقاومت کششی و درنتیجه کاهش ترک‌های ناشی از انقباض شده و اثر آن بیش از آهک بوده‌است. افزودن سرباره‌ی فولاد همراه با مقادیر مشخص آهک، باعث افزایش بیشتر مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت برشی خاک در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک، می‌گردد[٦].

سول-سانچز و همکاران (۲۰۱٦) خاک‌های مارنی و رسی تثبیت‌شده در اسپانیا با تولیدات صنعتی (خاکستربادی، سرباره‌ی فولاد و آهک دولومیتی) در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته، به جهت تغییرات pH و دانه‌بندی خاک، بررسی کرده‌اند. آهک دولومیتی به‌مانند آهک هیدراته افزودنی مناسبی برای تثبیت خاک بوده و می‌تواند جایگزین آهک هیدراته شود. سرباره‌ی فولاد به دلیل خاصیت قلیایی، باعث افزایش pH شده و قادر به اصلاح مشخصات خاک می‌باشد. خاکستر بادی اثر کمی در تغییر مشخصات خاک داشته و افزودنی مناسبی نبوده و نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد[۷].

یا او لین و همکاران (۲۰۱۵) از دو ترکیب سرباره کوره آهن-منیزیم (MgO-GGBS) و سرباره کوره آهن-سرباره کاربید (CS-GGBS) به همراه سیمان پرتلند برای تثبیت خاک سیلت ماسه‌دار استفاده کردند و نتیجه گرفتند که در ازای افزودن ۱۰ تا ۲۰ درصد فعال‌کننده، مقاومت فشاری تک‌محوری ۹۰ روزه نمونه تثبیت‌شده با (MgO-GGBS) و (CS-GGBS) به ترتیب ۳/۲-۳ و ۳/۲-۲/٤ برابر نمونه تثبیت‌شده با سیمان است[۸].

پائول سارجنت و همکاران (۲۰۱۳) به تثبیت خاک ماسه‌ای سیلت‌دار با استفاده از سرباره کوره آهن، خاکستر بادی و گچ قرمز به صورت مجزا و ترکیبی پرداختند و با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، دریافتند که در حالت مجزا، سرباره کوره آهن بیشترین مقاومت فشاری و در حالت ترکیبی، سرباره کوره آهن-گچ قرمز بیشترین مقاومت فشاری را در خاک ایجاد می کنند[۹].

علیرغم طراحی مناسب پی و سازه، به دلیل مقاومت کم و تغییر شکل زیاد خاک‌های مارنی، بسیاری از ساختمان‌ها و سازه‌هایی که بر روی این خاک‌ها احداث گشته‌اند، دچار آسیب شده‌اند[۱۰]. نیل به موفقیت در بهبود عملکرد خاک مارن، باعث صرفه‌جویی اقتصادی و افزایش عمر سازه‌های بناشده بر روی این خاک‌ها خواهد شد[۱۱]. خاک مارن هر منطقه نسبت به منطقه‌ی دیگر دارای خصوصیات متفاوتی از جمله رنگ، خواص پلاستیک، ترکیب فیزیکی و شیمیایی و خواص مهندسی می‌باشد[۱۲]. اطلاعات کمی در خصوص تثبیت مارن‌ها به‌دلیل تفاوت مشخصات و خصوصیات مهندسی آنها در هر منطقه (خصوصا شهر قم) وجود دارد [۱]. از طرفی، سرباره‌ها که مواد شیشه‌ای هستند، هنگام استخراج فلزات از سنگ‌های معدنی تحت اثر حرارت، به‌عنوان مواد ضایعاتی باقی می‌مانند و امروزه استفاده از آنها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

جهت تثبیت خاک، یکی از کاربردهای جدید آنها می‌باشد. همچنین از سیمان به‌صورت سنتی و گسترده در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار استفاده می‌شود که خاک‌های مارنی نیز در این مورد مستثنی نبوده‌اند. با توجه به توسعه‌ی ساخت و ساز در شهر قم و وجود لایه‌های مارنی در مناطق مختلف آن، احداث ساختمان‌ها و معابر بر روی این خاک‌ها صورت می‌گیرد. از این‌رو، رفتار این خاک‌ها مبهم بوده و نیازمند تحقیقات جامعی می‌باشد. هرچند تحقیقات نسبی بر روی تثبیت خاک مارن با سیمان صورت گرفته‌است، لیکن در خصوص میزان و عملکرد سیمان بر خاک مارن منطقه قم مطالعات مدونی صورت نگرفته‌است. همچنین تاکنون تاثیرات سربارهٔ مس بر بهسازی خاک مارن بررسی نشده‌است که به‌عنوان هدف این تحقیق مدنظر قرار گرفته‌است.

با مروری بر تحقیقات پیشین در مورد تثبیت خاک و به طور خاص تثبیت با استفاده از مواد ضایعاتی تولیدی به هنگام استخراج فلزات، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزودن این مواد ضایعاتی می‌تواند مقاومت بسیار بالایی در خاک ایجاد کند و امروزه یکی از کاربردهای این مواد، استفاده از آنها در تثبیت خاک می‌باشد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی تاثیر سیمان پرتلند تیپ دو و سرباره مس بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک مارن انجام شده است. بدین منظور خاک مارن از منطقه شهرک قدس شهر قم و سرباره مس مصرفی از کارخانه ذوب مس تهران تهیه شده است.

۲-۲- خاک مورد استفاده

خاک مارن مصرفی در این تحقیق، به رنگ زرد بوده (شکل۱-الف) و در این محل مطابق (شکل۱-ب)، بلورهای ژیپس در اندازه‌های مختلف، به میزان قابل‌توجهی مشاهده شده‌است. پس از تهیه‌ی نمونه‌های خاک، آزمایش‌های شناسایی با هدف شناخت خاک مورد آزمایش، انجام گرفت. این آزمایش‌ها شامل تعیین درصد رطوبت، دانسیته در محل، دانه‌بندی و هیدرومتری، چگالی مخصوص، حدود اتربرگ، XRD و تراکم می‌باشند.



الف

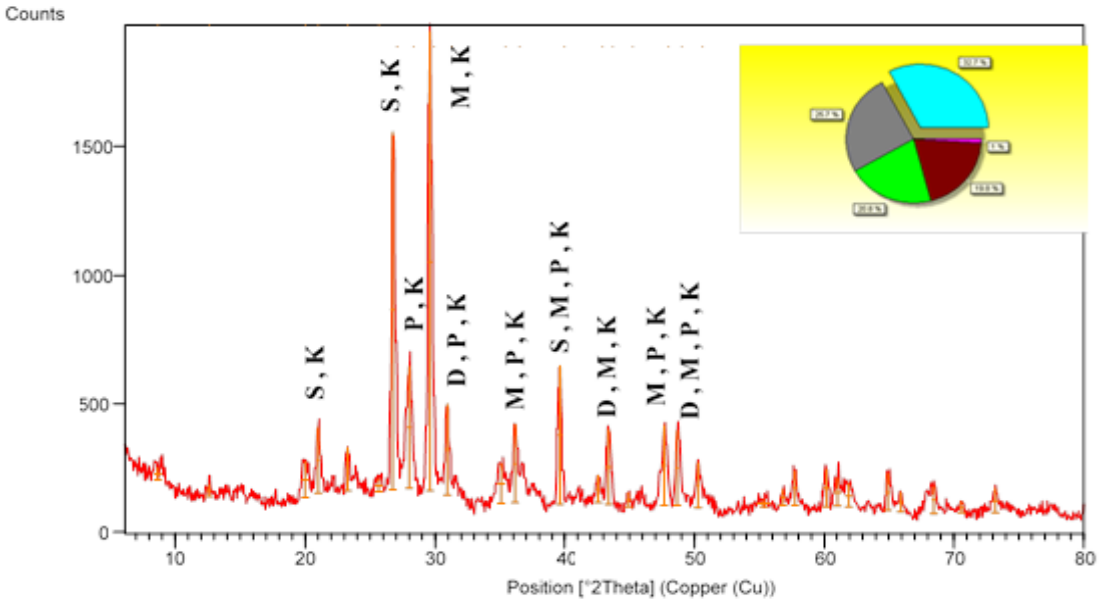


ب

شکل۱- الف: نمایی از توده خاک مارن مصرفی در این مطالعه ب: وجود بلورهای ژیپس در خاک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

نتایج آنالیز XRD خاک نیز در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده‌است.



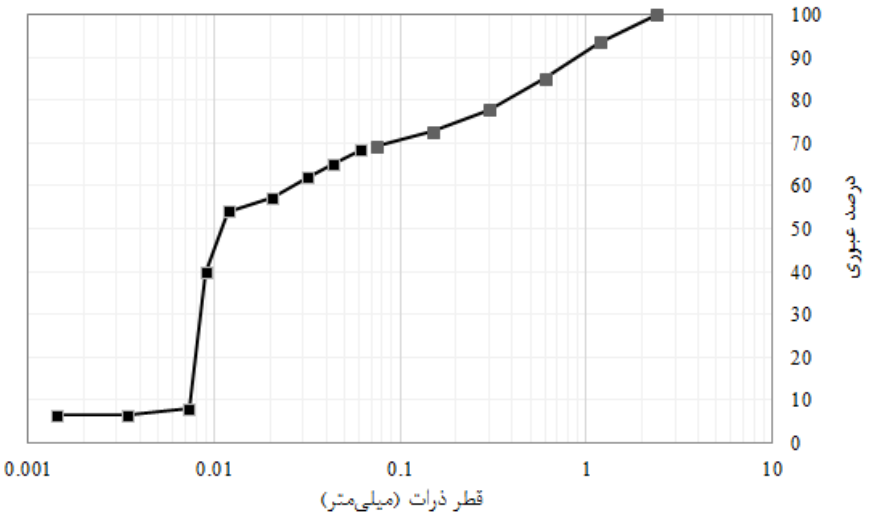
شکل ۲-آنالیز XRD نمونه مارن

جدول ۱- مشخصات شیمیایی نمونه مارن

ماده تشکیل‌دهنده		نام اختصاری	درصد (٪)
کیانیت	Al_2SiO_5	K	۳۲/۷
منیزیم کلسیت	$Ca_{0.94}Mg_{0.06}CO_3$	M	۲۵/۷
کوارتز	SiO_2	S	۲۰/۸
پروتو انستاتیت	$MgSiO_3$	P	۱۹/۸
دولومیت	$CaMg(CO_3)_2$	D	۱

براساس جدول ۱، ۲۶/۷ درصد خاک مارن از مواد کربناتی و ۷۳/۳ درصد آن از مواد سیلیسی تشکیل شده‌است. آزمایش دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM-D422 بر روی نمونه‌ی مارن انجام شده‌است[۱۳]. منحنی دانه‌بندی خاک مصرفی در شکل ۳ نمایش داده شده‌است. نتایج حاصل شده از آزمایش های شناسایی خاک، در جدول ۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی نمونه‌ی مارن مورد مطالعه

جدول۲- مشخصات فیزیکی نمونه مارنی مصرفی

رطوبت طبیعی (٪)	۲
دانسیته در محل (تن بر متر مکعب)	۱/٦
حد روانی (٪)	۳۹/۸
حد خمیری (٪)	۲۰/٦
شاخص خمیری (٪)	۱۹/۲
وزن مخصوص خشک حداکثر خاک (تن بر متر مکعب)	۱/۷۷
رطوبت بهینه (٪)	۱۳/۷
چگالی مخصوص	۲/۵۲
رده خاک (طبقه‌بندی متحد)	CL

با توجه اینکه بیش از ۵۰ درصد ذرات خاک، از الک ۲۰۰ عبور کرده و مقادیر حد روانی و شاخص پلاستیک خاک به‌ترتیب برابر ۳۹/۸ و ۱۹/۲ می‌باشد، بنابراین براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک مورد آزمایش در طبقه CL قرار می‌گیرد.

۲-۳- سیمان مصرفی

با توجه به دسترسی آسان و درنظر گرفتن جنبه‌های اجرایی، سیمان یکی از افزودنی‌هایی است که در این تحقیق جهت تثبیت خاک مارن استفاده شده‌است. بدین منظور از سیمان پرتلند معمولی تیپ دو ساخت کارخانه دلیجان، استفاده شده‌است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی، به ترتیب در جدول (۳) و جدول (٤) مشاهده می‌گردد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۳-مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

شاخص	سطح مخصوص (cm^2/g)	انبساط اتوکلاو (٪)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)			زمان گیرش ابتدایی (دقیقه)	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه		
مقدار	۳۰۰۰	۰/۰۹	۳۰۰	٤۰۰	۵۵۰	۱٦۰	۲٦۰

جدول٤- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی.

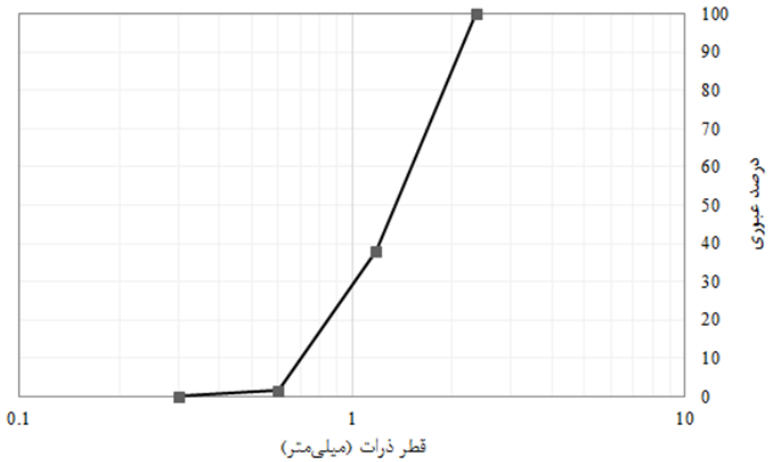
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	K_2O	LOI	C_2S	C_3S	C_3A	C_4AF
۲/۷۷	٤/۹۵	۳/٦٦	٦٤/۷	۰/٤٦	۱/۵۳	۰/۵۵	۱/۲٦	۱۳/۳۳	٦۱/۲۵	٦/۹۲	۱۱/۱٤

۲-٤- سرباره مس مصرفی

سرباره‌ی مس مصرفی، در کارخانه‌ی ذوب مس تهران تولید شده و با استفاده از سنگ‌شکن، خرد شده‌است (شکل ٤). منحنی دانه‌بندی سرباره‌ی مس مصرفی مطابق شکل ۵ و مقدار G_s سرباره‌ی مس مصرفی، ۳/۸۵ بوده است. همچنین آنالیز XRD نیز بر روی نمونه‌ی سرباره انجام شده و بر اساس نتایج مواد تشکیل دهنده آن شامل مگنتیت (Fe_3O_4)، آهن‌سیلیکات‌اکسید (Fe_2+2SiO_4) و هدنبرگیت ($CaFeO_6Si_2$) می‌باشد که این نتایج در شکل ٦ نمایش داده شده‌است.

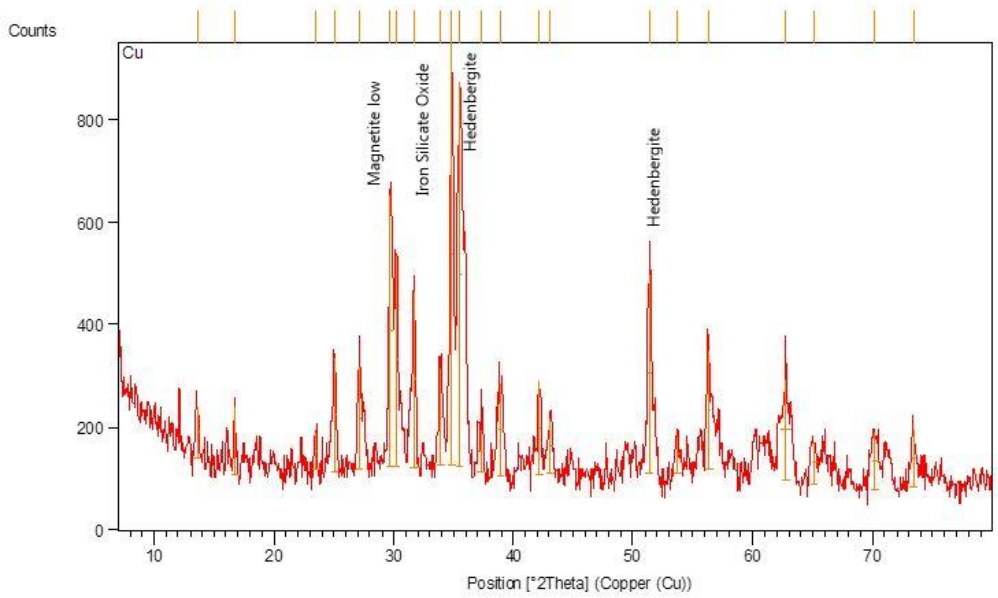


شکل ٤-سرباره مس مصرفی



شکل ۵- منحنی دانه بندی سرباره مس مصرفی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



شکل ٦- آنالیز XRD نمونه سرباره

٢-٥- آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

در این تحقیق برای بررسی اثر افزودن سیمان، مقادیر سیمان افزودنی و سرباره مس به خاک، معادل پنج و ده درصد وزن خشک خاک انتخاب شده‌است. همچنین نسبت آب به مقدار سیمان و سرباره‌ی مس، با تکیه بر مطالعات گذشته، ٠/٤٤ لحاظ شده‌است[١٤]. حداکثر مقدار مواد افزودنی به خاک نیز محدود به ١٥ درصد شده و درصد رطوبت خاک در نمونه ها ٢/٥، ٦، ١٣/٧، ٢٠/٥ و ٢٤ درصد و وزن مخصوص خشک خاک در آنها ١/٦، ١/٦٨ و ١/٧٧ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. لازم به ذکر است که برای هر سری آزمایش مطابق با الزامات ذکرشده، چهار نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته شده و یک نمونه به مدت هفت روز و سه نمونه به مدت ٢٨ روز عمل‌آوری شده‌اند.

٢-٥-١- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها به‌منظور انجام آزمایش، ابتدا نمونه‌ی خاک در دمای اتاق، به‌صورت طبیعی خشک گردید. سپس به‌منظور تسهیل هیدراسیون و واکنش با افزودنی‌ها، حداکثر اندازه‌ی ذرات خاک با جداسازی به‌وسیله‌ی الک شماره‌ی هشت، به دو میلی‌متر محدود شده‌است[١٥]. برای اختلاط مواد، از روش خشک آیین‌نامه‌ی FHWA (ابتدا مخلوط کردن مصالح خشک و سپس اضافه کردن آب به مخلوط) استفاده شده‌است[١٦]. پس از آن، نمونه‌ها درون قالب قرار داده شده و در پنج لایه با کوبیدن میله[١٧] به تراکم موردنظر (٩٠ و ٩٥ درصد با هر دو رطوبت سمت مرطوب و سمت خشک منحنی تراکم) رسانده شده‌است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

۲-۵-۲- عمل‌آوری نمونه‌ها

بر اساس نتایج تحقیقات گذشته دمای مناسب برای عمل‌آوری نمونه‌ها، ۳ ± ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد [۱۶]. دماهای بالاتر از دمای مذکور سبب تندی واکنش‌های شیمیایی و ایجاد تغییرات در دوام نمونه‌ها و دماهای پایین‌تر از آن، سبب کمتر شدن واکنش‌های هیدراسیون می‌گردد؛ به‌نحوی که در دمای کمتر از ٤ درجه‌ی سانتی‌گراد، این واکنش‌ها عملا انجام نخواهد شد[۱۸]. برای عمل‌آوری نمونه‌ها، پس از ساخت آنها در قالب، جهت گیرش اولیه و جداشدن آسان نمونه‌ها از قالب، نمونه‌ها یک روز در قالب در محیطی مرطوب نگهداری شده‌اند. پس از آن، از قالب جدا گردیده و نمونه‌های ساخته‌شده با سمت تر منحنی تراکم درون آب و نمونه‌های ساخته‌شده با سمت خشک منحنی تراکم در همان محیط مرطوب نگهداری شده‌اند (به‌دلیل جداشدن دانه‌ها از یکدیگر درصورت نگهداری درون آب). همچنین برای تنظیم دمای آب نیز از بخاری آکواریومی اتومات استفاده شده‌است.

۳-نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام‌شده مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی اثر افزودن سیمان و سرباره‌ی مس بر منحنی تنش-کرنش، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، اندازه‌ی ذرات و حد روانی نمونه‌های مارنی انجام شده‌اند.

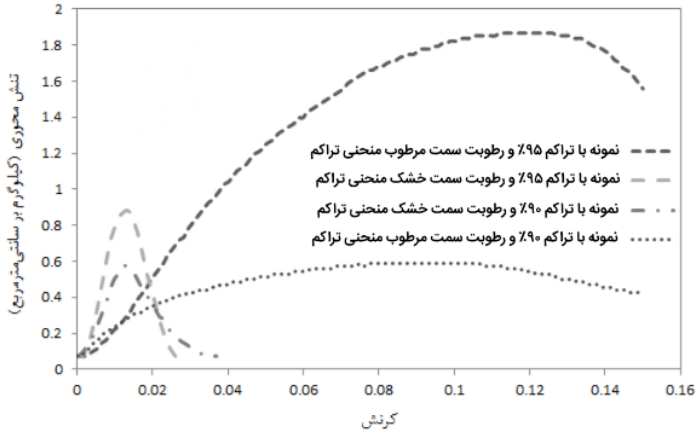
۳-۱- منحنی تنش-کرنش

نمودار تغییرات تنش محوری در برابر کرنش برای تعدادی از نمونه‌ها با مقادیر مختلف افزودنی در شکل ۷ تا شکل ۹ نشان داده شده‌است. در شکل ۷ نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های بدون افزودنی در درصد تراکم‌های متفاوت مشاهده می‌شود. مطابق این نمودار، منحنی تنش-کرنش نمونه‌های با درصد تراکم بیشتر، بالاتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. همچنین نمونه‌های کوبیده‌شده با رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم تا رسیدن به کرنش ۱۵ درصد، تغییرشکل داده درحالی که نمونه‌های کوبیده‌شده با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم، قبل از رسیدن به کرنش ۱۵ درصد (کرنش بین سه تا چهار درصد)، دچار شکست شده و دانه‌ها از یکدیگر جدا شده و نمونه کاملا خرد می‌شود.

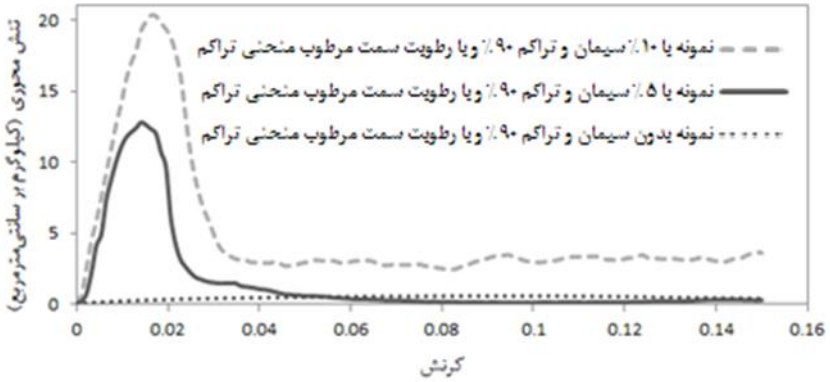
شکل ۸ نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان در تراکم ۹۰ درصد و عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز، نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، منحنی تنش-کرنش نمونه‌های با درصد سیمان بیشتر، بالاتر از دیگر منحنی‌ها می‌باشد.

در شکل ۹ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان و تراکم ۹۵ درصد با مقادیر مختلف سرباره‌ی مس و عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز مشاهده می‌گردد. همانگونه که از نمودار مشخص است، تغییرات مقادیر سرباره‌ی مس، تاثیر چندانی بر منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها ندارد.

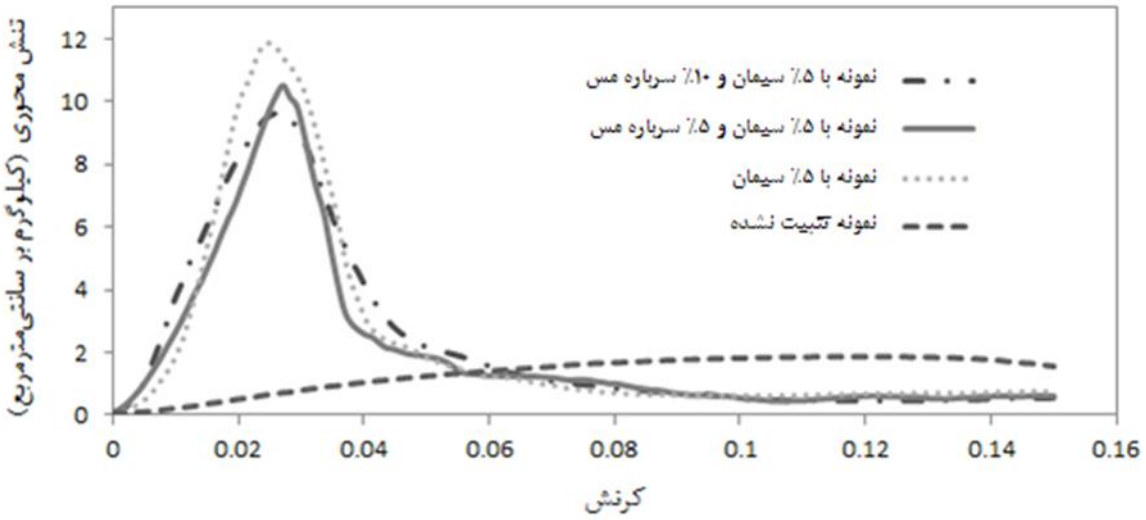
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



شکل ۷- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بدون افزودنی



شکل۸-نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان در تراکم ۹۰ درصد و عمل‌آوری شده به‌مدت ۲۸ روز



شکل۹-نمودار تنش-کرنش نمونه های کوبیده شده با تراکم ۹۵ درصد و با رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم با مقادیر مختلف سیمان و سرباره‌ی مس و عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز

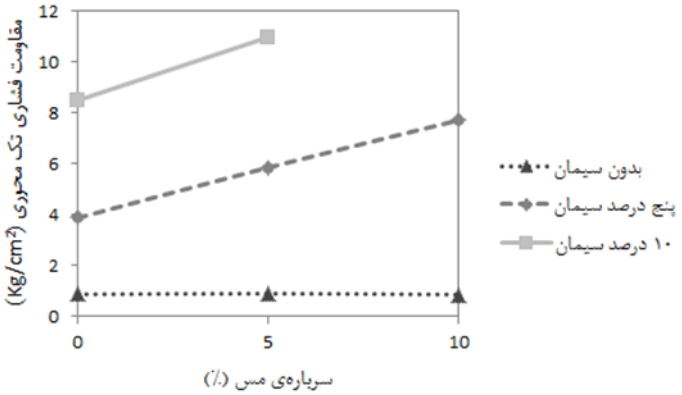
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

۳-۲- مقاومت فشاری تک محوری

در این بخش تاثیر عوامل درصد سیمان، درصد سرباره‌ی مس، زمان عمل‌آوری، تراکم و رطوبت بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲-۱- اثر سرباره مس

شکل ۱۰ اثر افزودن میزان سرباره‌ی مس به ازای درصدهای مختلف سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه و کوبیده‌شده با تراکم ۹۵ درصد و شکل ۱۱ بر نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۰ درصد را نشان می‌دهند. مطابق این دو شکل، در نمونه‌های کوبیده‌شده با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم، با افزایش مقدار سرباره‌ی مس، میزان آب آزاد مخلوط افزایش یافته و درنتیجه آب بیشتری برای گیرش سیمان وجود خواهد داشت. بنابراین با افزایش میزان سرباره‌ی مس، مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط افزایش خواهد یافت.

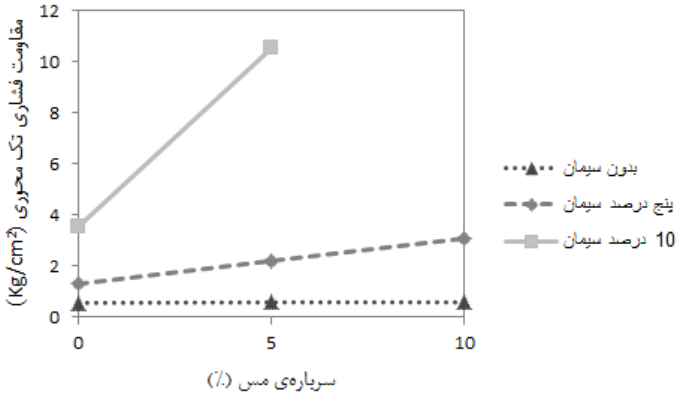


شکل۱۰-اثر سرباره‌ی مس بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه

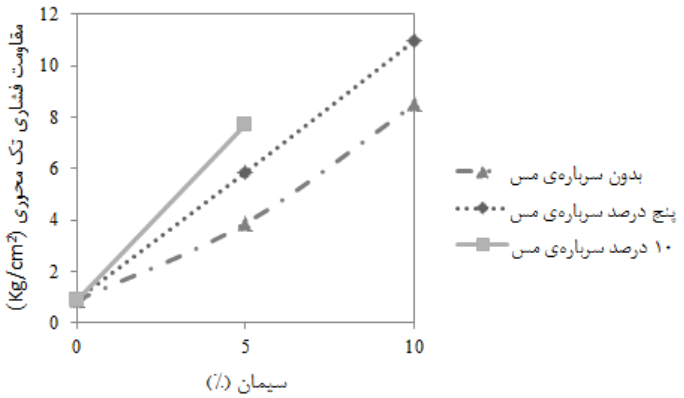
۳-۲-۲- اثر سیمان

در شکل ۱۲ اثر سیمان به ازای درصدهای مختلف سرباره‌ی مس بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه و کوبیده‌شده با تراکم ۹۵ درصد و در شکل ۱۳ بر نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۰ درصد نشان داده شده‌است. در این دو شکل نیز مشخص است که مقدار سیمان رابطه مستقیمی با مقاومت فشاری تک‌محوری خاک داشته و با افزایش مقدار سیمان، مقاومت خاک افزایش می‌یابد.

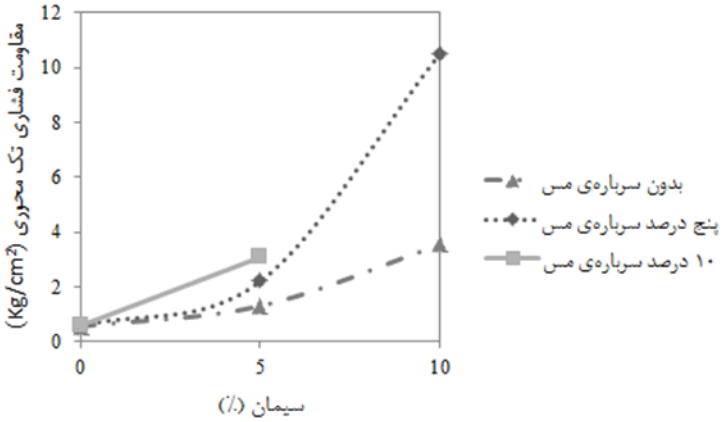
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۱۱-اثر سرباره‌ی مس بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه



شکل۱۲-اثر سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه

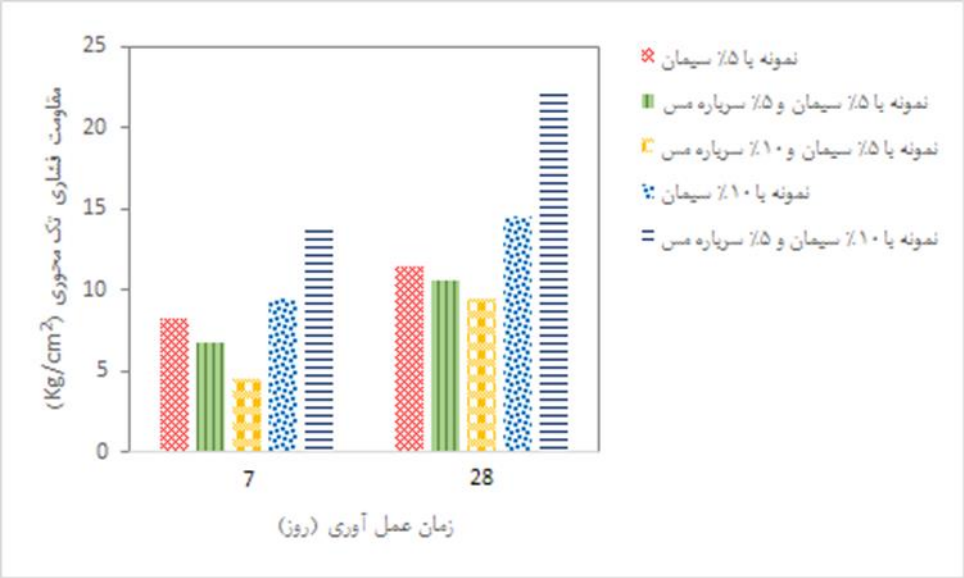


شکل۱۳-اثر سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

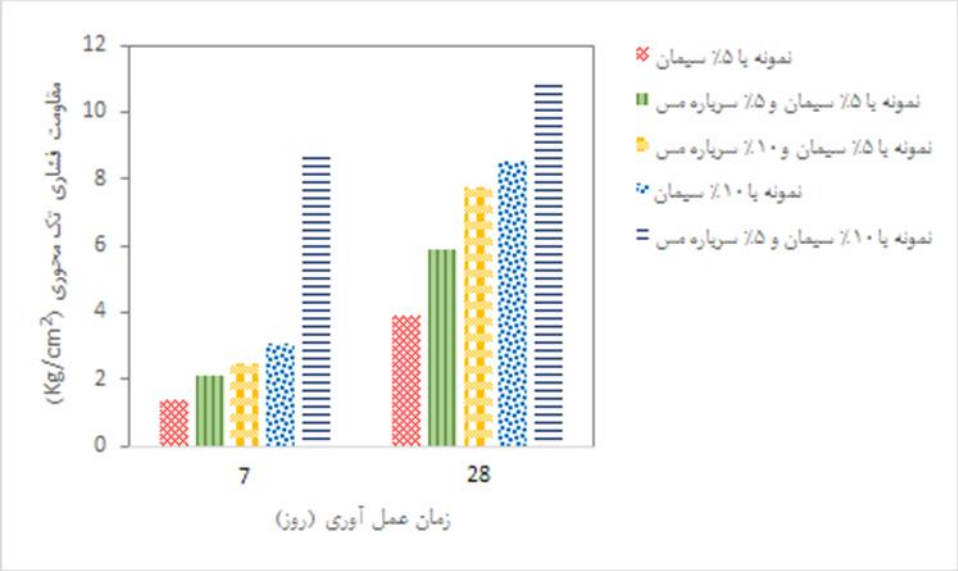
۳-۲-۳-اثر زمان عمل آوری

برای بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط رس-سیمان-سرباره، نمونه‌ها به مدت هفت و ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند. شکل ١٤ تا شکل ١٧ تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری به زمان عمل‌آوری مخلوط با درصد تراکم و رطوبت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. مطابق شکل ١٤ که تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم را نشان می‌دهد، روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در نمونه تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان کمترین مقدار (۳۸ درصد افزایش مقاومت) و در نمونه تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان و ۱۰ درصد سرباره‌ی مس بیشترین مقدار (۱۰۹ درصد افزایش مقاومت) را دارد. مطابق شکل ۱۵ که تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در آن نشان داده شده‌است، روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در نمونه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان کمترین مقدار (٢٤ درصد افزایش مقاومت) و در نمونه تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان و ۱۰ درصد سرباره‌ی مس بیشترین مقدار (۲۱۱ درصد افزایش مقاومت) را دارد.



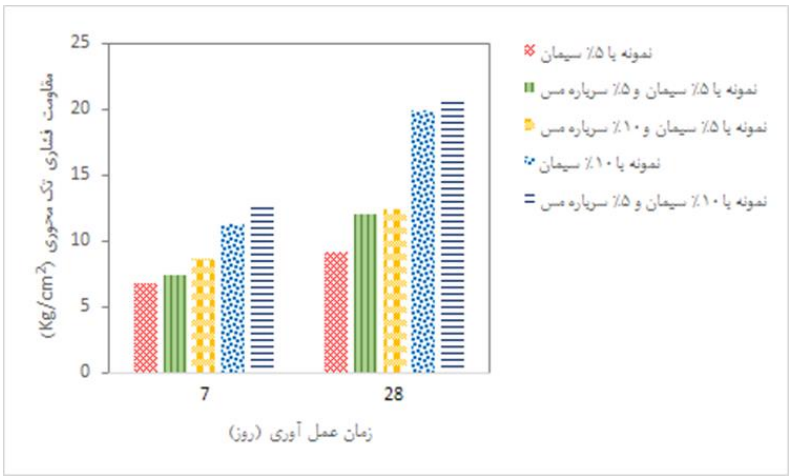
شکل١٤-تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



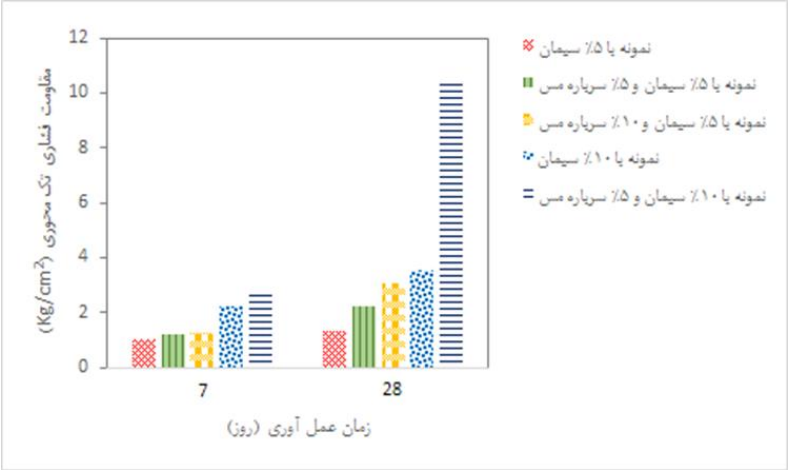
شکل۱۵-تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم

براساس شکل ١٦ که تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم را نشان می‌دهد، روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در نمونه تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان و ۱۰ درصد سرباره‌ی مس کمترین مقدار (٣٤ درصد افزایش مقاومت) و در نمونه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان بیشترین مقدار (۷۷ درصد افزایش مقاومت) را دارد. همچنین مطابق شکل ۱۷ که تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم را نشان می‌دهد،



شکل١٦-تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۱۷-تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم

روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در نمونه تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان کمترین مقدار (۲۶ درصد افزایش مقاومت) و در نمونه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان و پنج درصد سرباره‌ی مس بیشترین مقدار (۷۷ درصد افزایش مقاومت) را دارد. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی از این بخش می‌توان گفت که افزایش مدت عمل‌آوری باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده و در بیشتر نمونه‌های دارای سرباره‌ی مس، درصد افزایش مقاومت، بیشتر از نمونه‌های بدون سیمان بوده‌است.

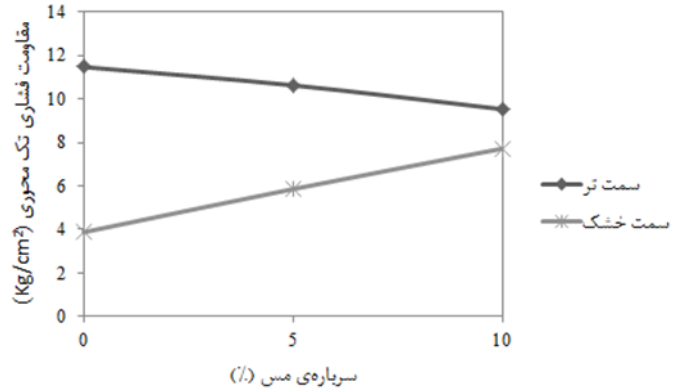
۳-۲-٤- اثر رطوبت

نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته‌شده با رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم با مقادیر مختلف افزودنی‌ها، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم دارد. مثلا براساس شکل ۱۸ مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ی تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان در تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در عمل‌آوری ۲۸ روزه، ۳/۸۸ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بوده در حالی مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ی تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان در تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم در عمل‌آوری ۲۸ روزه، ۱۱/٤۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشد. در تشریح این اتفاق باید گفت که در نمونه‌های با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم، مقدار آب لازم برای انجام واکنش‌های هیدراسیون تامین نشده و در نتیجه فرآیند هیدراسیون کامل انجام نمی‌شود و مقاومت نمونه‌ها کمتر از مقاومت نمونه‌های با رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم خواهد شد.

۳-۳-مدول الاستیسیته مخلوط رس-سیمان-سرباره

نحوه‌ی تاثیر این عوامل بر مدول الاستیسیته بسیار مشابه نحوه‌ی تاثیر آنها بر مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط بوده و بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوری، رابطه مستقیمی وجود دارد. برای محاسبه‌ی مقدار مدول الاستیسیته نیز از نتایج آزمایش تک‌محوری استفاده شده و از تقسیم مقاومت فشاری تک‌محوری خاک بر کرنش متناظر آن، مدول الاستیسیته نمونه به‌دست می‌آید. به جهت مقایسه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته مخلوط، مقادیر این دو پارامتر در درصدهای تراکم، رطوبت و افزودنی متفاوت مطابق شکل ۱۹ با یکدیگر مقایسه

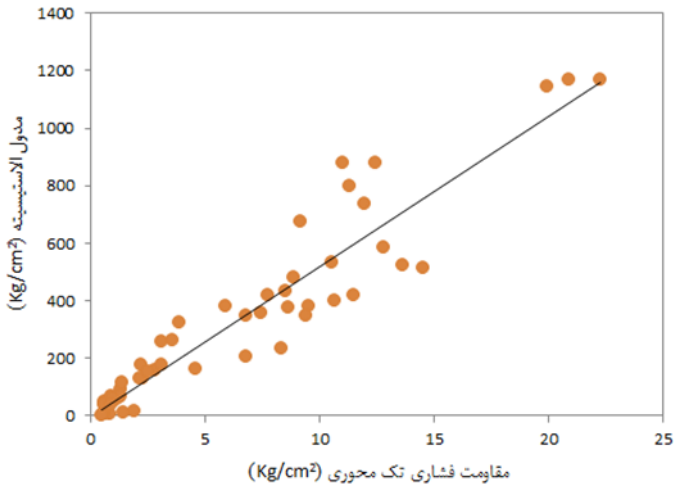
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۱۸-تاثیر میزان رطوبت بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های با پنج درصد سیمان و کوبیده‌شده با تراکم ۹۵ درصد در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه

شده‌اند. مدول الاستیسیته در حدود ۵۰ برابر مقاومت فشاری تک‌محوری بوده و رابطه‌ی ۱ با مقدار ضریب همبستگی ۰/۸۹ بین آنها به‌دست آمده‌است. مطابق مطالعات صورت گرفته قبلی، مدول الاستیسیته مخلوط رس-سیمان در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ برابر مقاومت فشاری تک‌محوری بوده [۱۹]، در حالی که در این تحقیق در حدود ۵۰ برابر آن به‌دست آمده‌است.

$$E\ (kg/cm^2) = 52.2q_u\ (kg/cm^2) + 0.41 \quad (۱)$$



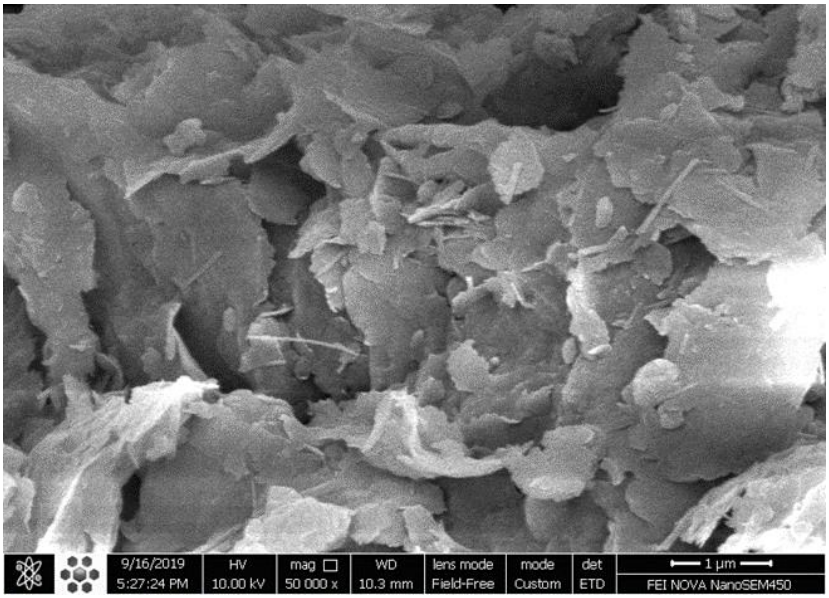
شکل۱۹-مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری در برابر مدول الاستیسیته

۳-٤- نتایج ریزساختاری

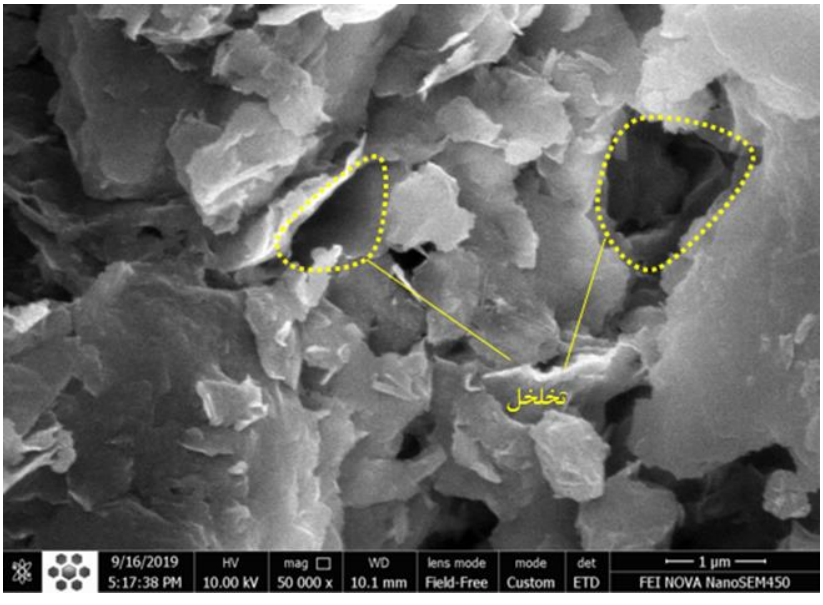
به‌منظور بررسی اثر افزودن سیمان و سربارهٔ‌ی مس بر خصوصیات ریزساختاری نمونه‌ها، چهار نمونه انتخاب شده و بر روی آنها عکسبرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گرفته‌است که تصاویر آن در شکل ۲۰ تا شکل ۲۳ قابل مشاهده می‌باشند. مقیاس این تصاویر یک میکرومتر می باشد. شکل ۲۰ نشان‌دهندهٔ‌ی ریزساختار خاک مارن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

تثبیت‌نشده می‌باشد و مطابق آن خاک مارن دارای ذرات منفرد جدا از هم بوده که بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. از شکل ۲۱ که ریزساختار خاک مارن تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان را نشان داده شده‌است، نتیجه می‌شود که با افزودن پنج درصد سیمان، ذرات خاک به یکدیگر چسبیده و دانه‌های بزرگتری را تشکیل می‌دهند؛ اما حفرات خالی در آن مشاهده می‌شود. اگر به خاک ۱۰ درصد سیمان افزوده شود (شکل ۲۲) خاک مارن دارای ساختارهای متراکمی گشته و حفرات بسیار کمی در آن مشاهده می‌شود. باتوجه به شکل ۲۳ که مارن تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان و پنج درصد سرباره‌ی مس را نشان می‌دهد، نتیجه می‌شود که وجود سرباره‌ی مس باعث تشکیل ساختارهای بزرگتری نسبت به نمونه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان خواهد شد.

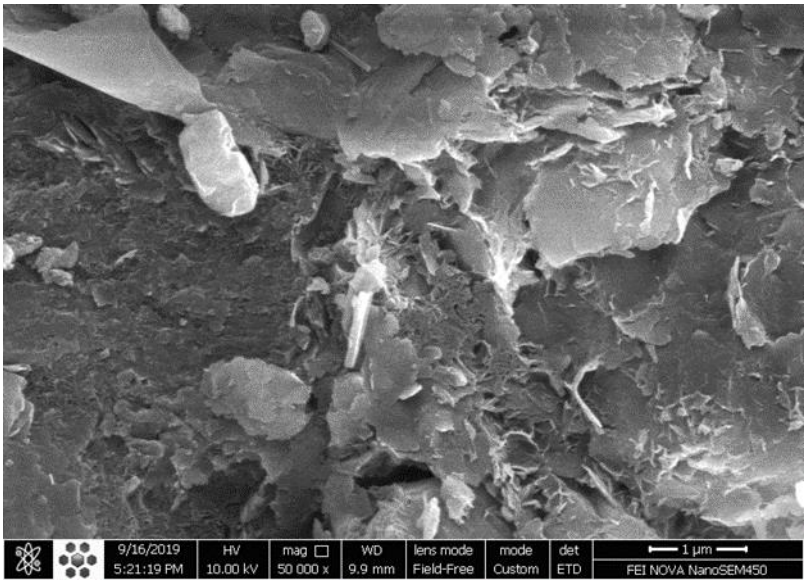


شکل ۲۰- خاک مارن مورد مطالعه و بدون افزودنی

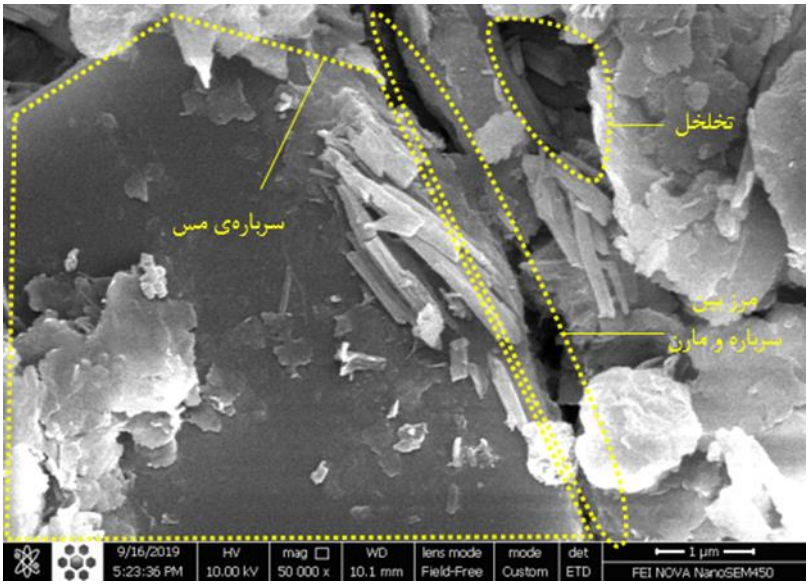


شکل ۲۱- خاک مارن مورد مطالعه تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۲۲- خاک مارن مورد مطالعه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان



شکل۲۳- خاک مارن مورد مطالعه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان و پنج درصد سربارهٔ مس

٤-نتیجه گیری

در این قسمت به ارائهٔ خلاصه‌ای از یافته‌های تحقیق جاری پرداخته و خلاصه نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده و ارتباط آنها با یکدیگر ارائه می‌شود.

الف- سربارهٔ مس به‌تنهایی مادهٔ مناسبی جهت بهبود خاک مارن نبوده و باید همراه با سیمان به‌کار رود.

ب- افزایش مدت عمل‌آوری، باعث افزایش مقاومت مخلوط مارن-سیمان و مارن-سیمان-سرباره خواهد شد.

ج- تثبیت خاک با درصدهای متفاوت سیمان و سربارهٔ مس منجر به افزایش مقاومت نمونهٔ مارنی شده‌است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

د- افزودن ۱۰ درصد سیمان با وزن مخصوص خشک ۱/٦ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت ٢٤ درصد منجر به حصول بهترین نتیجه در مخلوط مارن- سیمان شده‌است.

ر- افزودن ۱۰ درصد سیمان با وزن مخصوص خشک ۱/٦٨ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت ۲۰/۵ درصد منجر به حصول بهترین نتیجه در مخلوط مارن- سیمان-سرباره شده‌است.

ز- افزودن سرباره‌ی مس به خاک تثبیت‌نشده و خاک تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان، باعث کاهش مقاومت نمونه‌ی مارن-سیمان شده‌است. این درحالی است که با افزودن پنج درصد سرباره‌ی مس به خاک تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان، مقاومت آن افزایش خواهد یافت.

س- با افزودن مخلوط سیمان و سرباره‌ی مس به خاک اندازه ذرات آن افزایش یافته‌است.

مراجع

1. Bahadori, H., Hasheminezhad, A., Taghizadeh, F. (2019). "Experimental Study on Marl Soil Stabilization Using Natural Pozzolans", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, No. 2, pp: 04018363.
2. Bharati, S.K., Chew, S.H. (2016). "Geotechnical behavior of recycled copper slag-cement-treated Singapore marine clay", *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 34, No. 3, pp: 835-845.
3. Goodarzi, A., Salimi, M. (2015). "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag", *Applied Clay Science*, vol. 108, No. pp: 61-69.
4. Vekli, M., Çadır, C.C., Şahinkaya, F. (2016). "Effects of iron and chrome slag on the index compaction and strength parameters of clayey soils", *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, No. 5, pp: 425.
5. Vakili, M.V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., Keramatikerman, M. (2016). "Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag", *Applied Clay Science*, vol. 124, No. pp: 243-251.
6. Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., Nikraz, H. (2016). "Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay", *Applied Clay Science*, vol. 132, No. pp: 722-730.
7. Sol-Sánchez, M., Castro, J., Ureña, C., Azañón, J. (2016). "Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators", *Engineering geology*, vol. 200, No. pp: 10-17.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

8. Yi, Y., Zheng, X., Liu, S. and Al-Tabbaa, A. "Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activatedground granulated blastfurnace slag and Portland ce-ment for stabilisation of a natural soil", *Applied ClayScience*,111, pp. 21-26 (2015).
9. Sargent, P., Hughes, P.N., Rouainia, M. and et al. "The use of alkali activated waste binders in enhancing the me-chanical properties and durability of soft alluvial soils", *Engineering Geology*,152(1), pp. 96-108 (2013).
10. Hooshmand, A., Aminfar, M.H., Asghari, E., Ahmadi, H. (2012). "Mechanical and physical characterization of Tabriz marls, Iran", *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 30, No. 1, pp: 219-232.
11. Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K., Al-Kahtani, N.S. (2010). "Stabilization of a Saudi calcareous marl soil", *Construction and Building Materials*, vol. 24, No. 10, pp: 1848-1854.
12. Aiban, S.A. (1995). "Strength and compressibility of Abqaiq marl, Saudi Arabia", *Engineering Geology*, vol. 39, No. 3-4, pp: 203-215.
13. ASTM. (2007). "ASTM D422-63: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils". *ASTM International West Conshohocken*^ ePA PA.
14. Nazer, A., Payá, J., Borrachero, M.V., Monzó, J. (2016). "Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices", *Journal of environmental management*, vol. 167, No. pp: 115-123.
15. Sol-Sánchez, M., Castro, J., Ureña, C., Azañón, J. (2016). "Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators", *Engineering geology*, vol. 200, No. pp: 10-17.
16. Bruce, M.E.C., Berg, R.R., Collin, J.G., Filz, G.M., Terashi, M., Yang, D.S., Geotechnica, S. (2013). "Federal Highway Administration design manual: Deep mixing for embankment and foundation support". *United States. Federal Highway Administation*. Offices of Research & Development.
17. Kitazume, M., Grisolia, M., Leder, E., Marzano, I.P., Correia, A.A.S., Oliveira, P.J.V., Åhnberg, H., Andersson, M. (2015). "Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method", *Soils and Foundations*, vol. 55, No. 4, pp: 761-777.
18. Park, S.-S. (2010). "Effect of wetting on unconfined compressive strength of cemented sands", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 136, No. 12, pp: 1713-1720.
19. Croce, P., Flora, A., Modoni, G. (2014). "Jet grouting: technology, design and control". *CRC Press.*

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]