

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: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

چکیده

خاک مارن، خاکی مساله‌دار است که در بسیاری از مناطق ایران به‌خصوص شهر قم گسترده‌گی 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 ۴۴ درصد به آن اضافه شده‌اند و نمونه‌ها در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفته‌اند. همچنین در ادامه 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 تغییری 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 آزمایش‌های 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

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 می‌شود، خاک‌های 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 بر روی خاک‌های مارنی، به‌منظور بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک، لازم است که خاک تثبیت شود. به‌منظور 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 (۲۰۱۶) به تثبیت خاک رس ساحلی سنگاپور با استفاده از سیمان و سرباره مس بازبافتی (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 (۲۰۱۶) 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 [۴].

وکیلی و همکاران (۲۰۱۶) 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].

کرامتی کرمان و همکاران (۲۰۱۶) 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 در نتیجه 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 [۶].

سول-سانچز و همکاران (۲۰۱۶) خاک‌های مارنی و رسی تثبیت‌شده در اسپانیا با تولیدات صنعتی (خاکستر بادی، 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 ۳-۳/۲ و ۲/۴-۳/۲ 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 می‌کنند [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 بنا شده 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 به دلیل تفاوت مشخصات و خصوصیات مهندسی آنها در هر منطقه (خصوصاً 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

جهت تثبیت خاک، یکی از کاربردهای جدید آنها می‌باشد. همچنین از سیمان به صورت سنتی و گسترده در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار استفاده می‌شود که خاک‌های ماری نیز در این مورد مستثنی نبوده‌اند. با توجه به توسعه‌ی ساخت و ساز در شهر قم و وجود لایه‌های ماری در مناطق مختلف آن، احداث ساختمان‌ها و معابر بر روی این خاک‌ها صورت می‌گیرد. از این رو، 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 سرباره‌ی 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

۱-۲- 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 (شکل ۱-الف) و در این محل مطابق (شکل ۱-ب)، بلورهای ژپس در اندازه‌های مختلف، به میزان قابل توجهی 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.



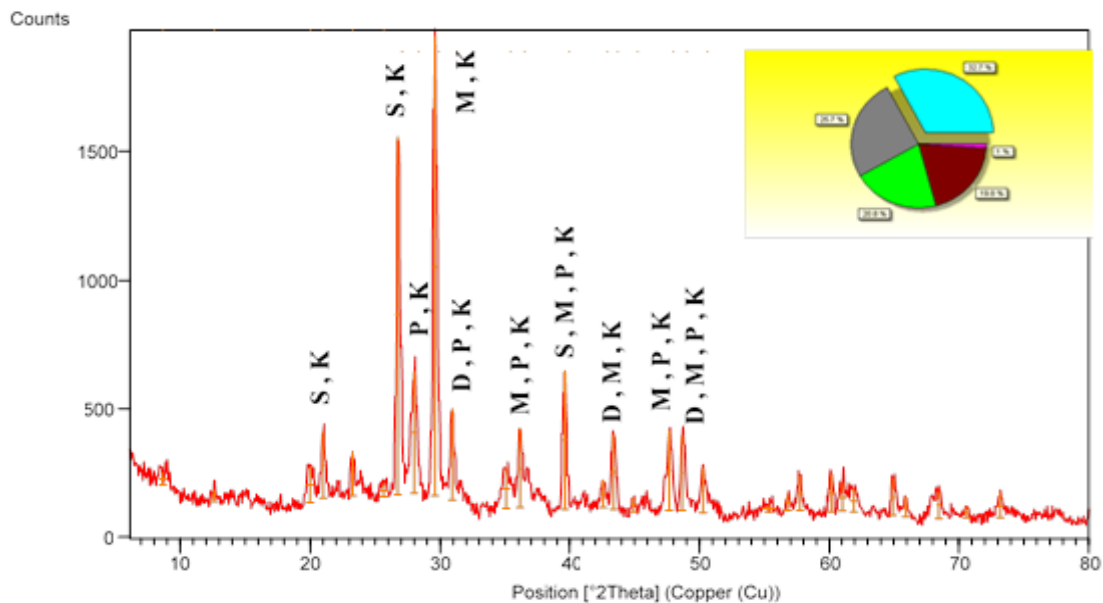
ب



الف

شکل ۱- الف: نمایی از توده خاک مارن مصرفی در این مطالعه ب: وجود بلورهای ژپس در خاک

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



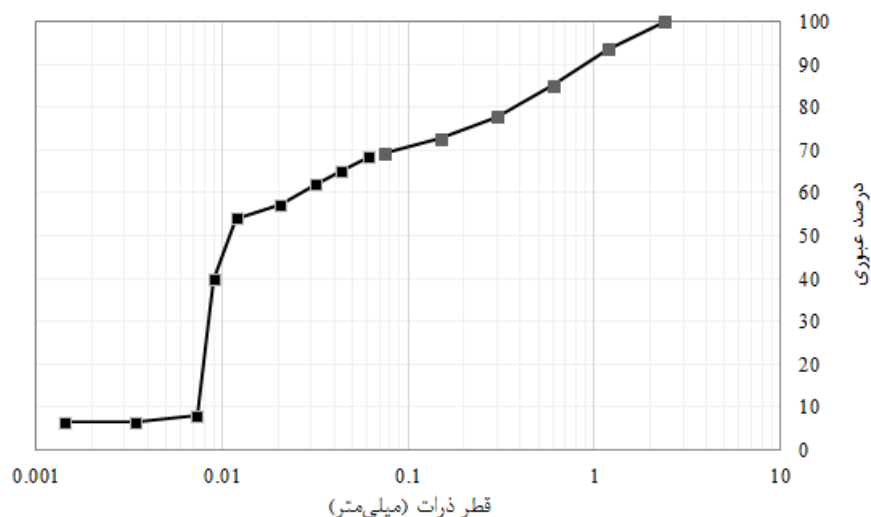
شکل ۲- آنالیز XRD نمونه مارن

جدول ۱- مشخصات شیمیایی نمونه مارن

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

براساس جدول ۱، ۲۶/۷ درصد خاک مارن از مواد کربناتی و ۷۳/۳ درصد آن از مواد سیلیسی تشکیل شده است.

آزمایش دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM-D422 بر روی نمونه‌ی مارن انجام شده است [۱۳]. منحنی دانه‌بندی خاک مصرفی در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج حاصل شده از آزمایش‌های شناسایی خاک، در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی نمونه‌ی مارن مورد مطالعه

جدول ۲- مشخصات فیزیکی نمونه مارنی مصرفی

۲	رطوبت طبیعی (%)
۱/۶	دانسیته در محل (تن بر متر مکعب)
۳۹/۸	حد روانی (%)
۲۰/۶	حد خمیری (%)
۱۹/۲	شاخص خمیری (%)
۱/۷۷	وزن مخصوص خشک حداکثر خاک (تن بر متر مکعب)
۱۳/۷	رطوبت بهینه (%)
۲/۵۲	چگالی مخصوص
CL	رده خاک (طبقه‌بندی متحد)

با توجه اینکه بیش از ۵۰ درصد ذرات خاک، از الک ۲۰۰ عبور کرده و مقادیر حد روانی و شاخص پلاستیک خاک به ترتیب 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 در نظر گرفتن جنبه‌های اجرایی، سیمان یکی از افزودنی‌هایی است که در این تحقیق جهت تثبیت خاک مارن استفاده شده است. بدین منظور از سیمان پرتلند معمولی تپ دو ساخت کارخانه دلیجان، استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی، به ترتیب در جدول (۳) و جدول (۴) مشاهده می‌گردد.

جدول ۳- 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)
			۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه		
مقدار	۳۰۰۰	۰/۰۹	۵۵۰	۴۰۰	۳۰۰	۱۶۰	۲۶۰

جدول ۴- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی.

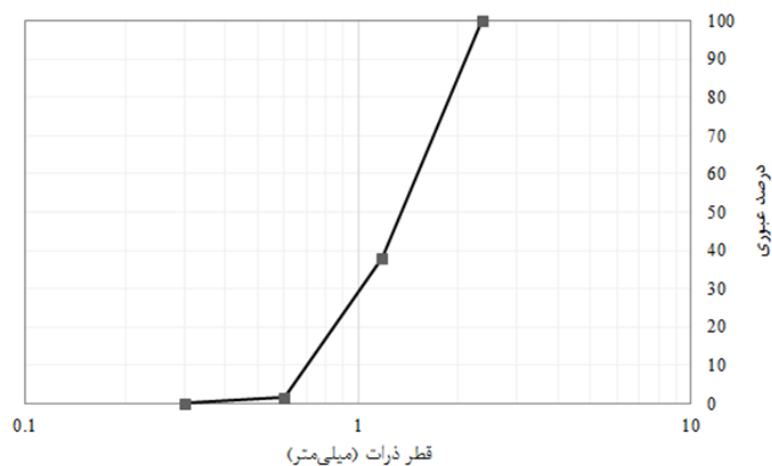
C ₄ AF	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S	LOI	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۱۱/۱۴	۶/۹۲	۶۱/۲۵	۱۳/۳۳	۱/۲۶	۰/۵۵	۱/۵۳	۰/۴۶	۶۴/۷	۳/۶۶	۴/۹۵	۲/۷۷

۲-۴- سرباره مس مصرفی

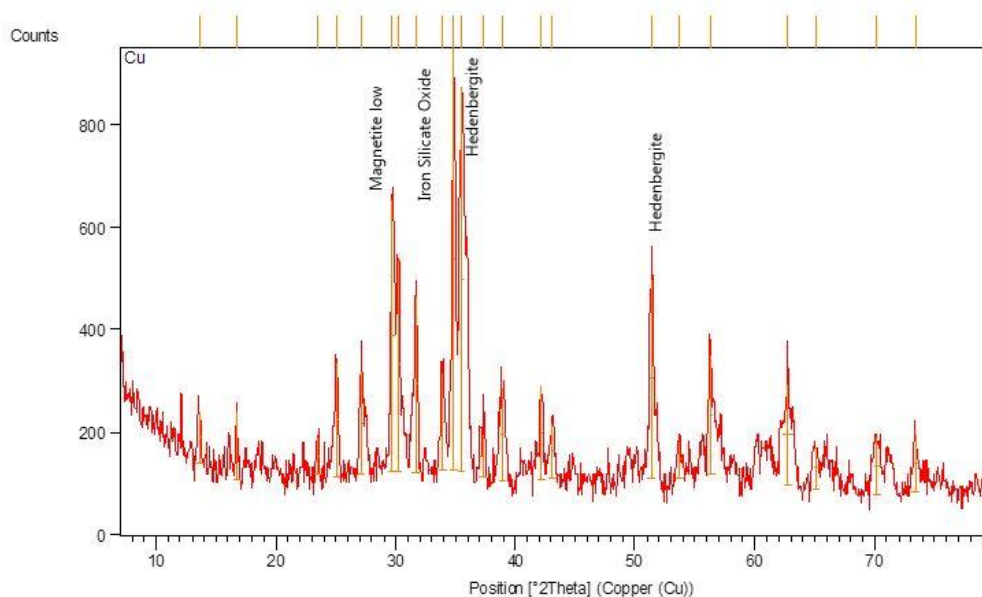
سرباره‌ی مس مصرفی، در کارخانه‌ی ذوب مس تهران تولید شده و با استفاده از سنگ‌شکن، خرد شده است (شکل ۴). منحنی دانه‌بندی سرباره‌ی مس مصرفی مطابق شکل ۵ و مقدار G_s سرباره‌ی مس مصرفی، ۳/۸۵ بوده است. همچنین آنالیز XRD نیز بر روی نمونه‌ی سرباره انجام شده و بر اساس نتایج مواد تشکیل دهنده آن شامل مگنتیت (Fe₃O₄)، آهن سیلیکات اکسید (Fe₂+2SiO₄) و هیدنبرگیت (CaFeO₆Si₂) می‌باشد که این نتایج در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۴- سرباره مس مصرفی



شکل ۵- منحنی دانه بندی سرباره مس مصرفی



شکل ۶- آنالیز XRD نمونه سرباره

۲-۵- 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، ۰/۴۴ لحاظ شده‌است [۱۴]. حداکثر مقدار مواد افزودنی به خاک نیز محدود به ۱۵ درصد شده و درصد رطوبت خاک در نمونه‌ها ۲/۵، ۶، ۱۳/۷، ۲۰/۵ و ۲۴ درصد و وزن مخصوص خشک خاک در آنها ۱/۶، ۱/۶۸ و ۱/۷۷ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. لازم به ذکر است که برای هر سری آزمایش مطابق با الزامات ذکر شده، چهار نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته شده و یک نمونه به مدت هفت روز و سه نمونه به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند.

۲-۵-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش، ابتدا نمونه‌ی خاک در دمای اتاق، به صورت طبیعی خشک گردید. سپس به منظور تسهیل هیدراسیون و واکنش با افزودنی‌ها، حداکثر اندازه‌ی ذرات خاک با جداسازی به وسیله‌ی الک شماره‌ی هشت، به دو میلی‌متر محدود شده‌است [۱۵]. برای اختلاط مواد، از روش خشک آیین‌نامه‌ی FHWA (ابتدا مخلوط کردن مصالح خشک و سپس اضافه کردن آب به مخلوط) استفاده شده‌است [۱۶]. پس از آن، نمونه‌ها درون قالب قرار داده شده و در پنج لایه با کوبیدن میله [۱۷] به تراکم مورد نظر (۹۰ و ۹۵ درصد با هر دو رطوبت سمت مرطوب و سمت خشک منحنی تراکم) رسانده شده‌است.

۲-۵-۲- عمل‌آوری نمونه‌ها

بر اساس نتایج تحقیقات گذشته دمای مناسب برای عمل‌آوری نمونه‌ها، 20 ± 3 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 ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد، این واکنش‌ها عملاً 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 در صورت نگهداری درون آب). همچنین برای تنظیم دمای آب نیز از بخاری آکواریومی اتومات استفاده شده‌است.

۳- نتایج و بحث

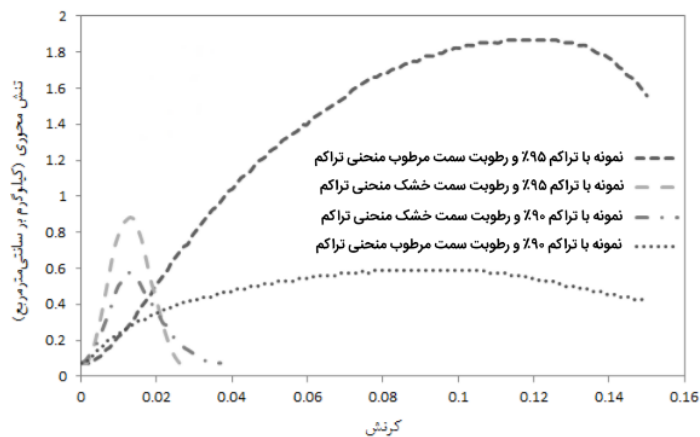
در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام‌شده مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی اثر افزودن سیمان و سرباره‌ی مس بر منحنی تنش-کرنش، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، اندازه‌ی ذرات و حد روانی نمونه‌های مارنی انجام شده‌اند.

۳-۱- منحنی تنش-کرنش

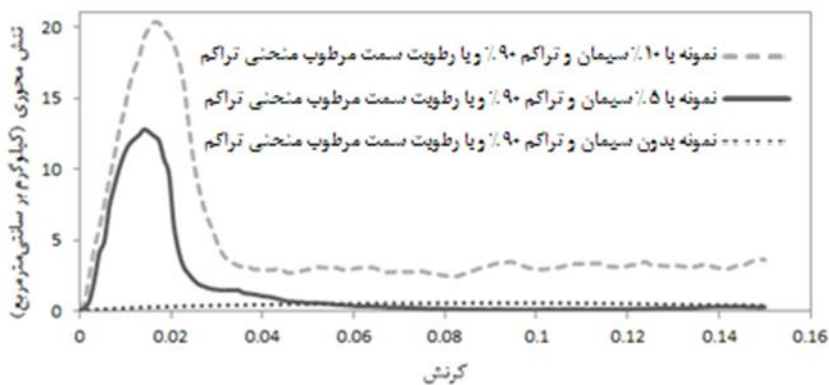
نمودار تغییرات تنش محوری در برابر کرنش برای تعدادی از نمونه‌ها با مقادیر مختلف افزودنی در شکل ۷ تا شکل ۹ نشان داده شده‌است. در شکل ۷ نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های بدون افزودنی در درصد تراکم‌های متفاوت مشاهده می‌شود. مطابق این نمودار، منحنی تنش-کرنش نمونه‌های با درصد تراکم بیشتر، بالاتر از سایر نمونه‌ها 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 کاملاً 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.

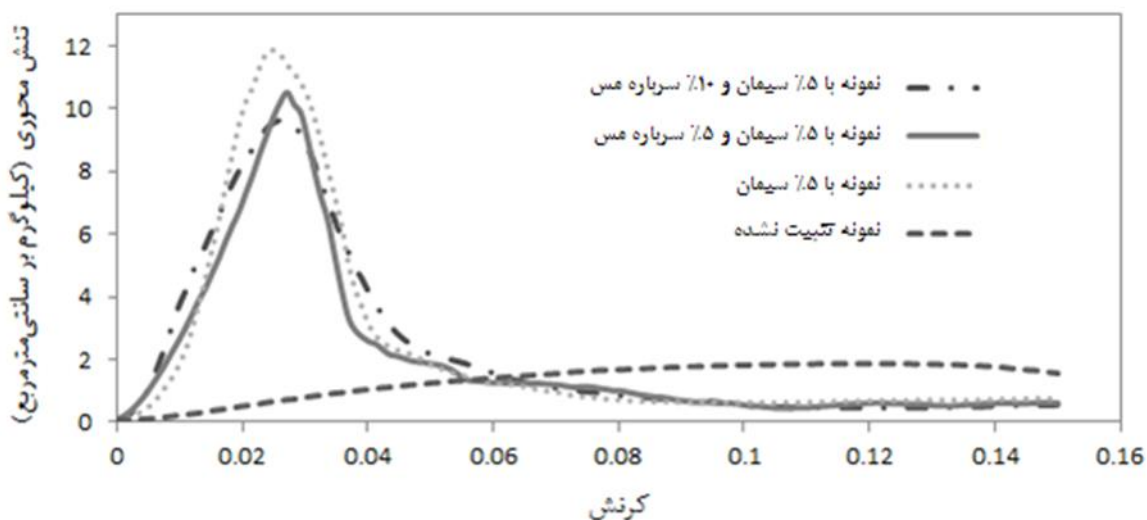
در شکل ۹ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان و تراکم ۹۵ درصد با مقادیر مختلف سرباره‌ی مس و عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز مشاهده می‌گردد. همانگونه که از نمودار مشخص است، تغییرات مقادیر سرباره‌ی مس، تأثیر چندانی بر منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها ندارد.



شکل ۷- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بدون افزودنی



شکل ۸- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در تراکم ۹۰ درصد و عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز



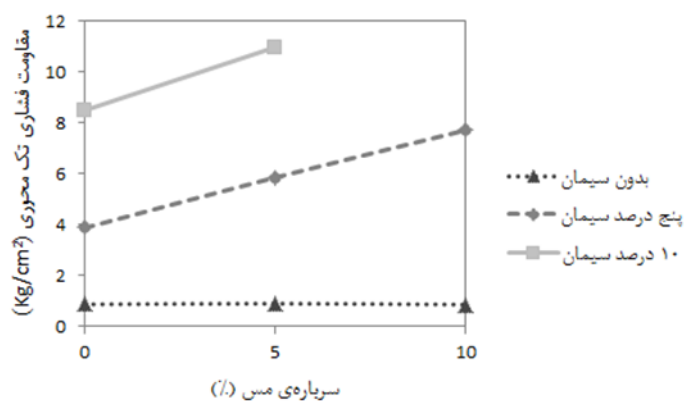
شکل ۹- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های کوبیده شده با تراکم ۹۵ درصد و با رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم با مقادیر مختلف سیمان و سربراه‌ی مس و عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز

۲-۳- مقاومت فشاری تک محوری

در این بخش تاثیر عوامل درصد سیمان، درصد سرباره مس، زمان عمل آوری، تراکم و رطوبت بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲-۱- اثر سرباره مس

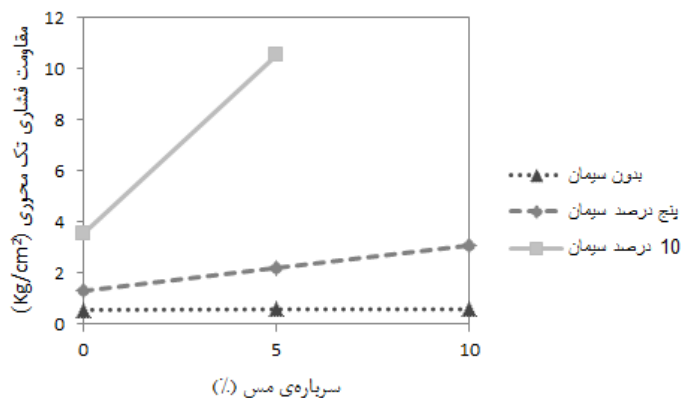
شکل ۱۰ اثر افزودن میزان سرباره مس به ازای درصدهای مختلف سیمان بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل آوری ۲۸ روزه و کوبیده شده با تراکم ۹۵ درصد و شکل ۱۱ بر نمونه‌های کوبیده شده با تراکم ۹۰ درصد را نشان می‌دهند. مطابق این دو شکل، در نمونه‌های کوبیده شده با رطوبت سمت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



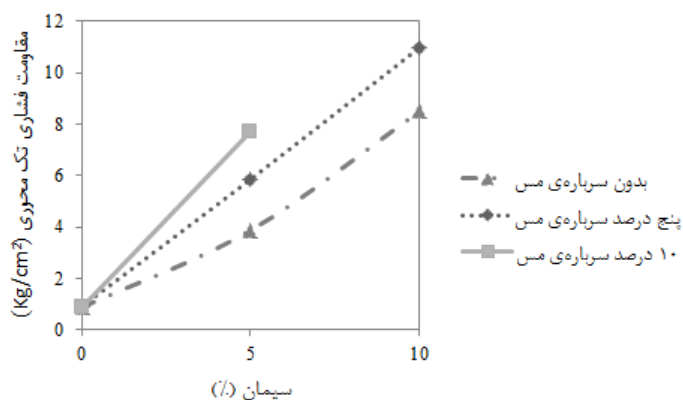
شکل ۱۰- اثر سرباره مس بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های کوبیده شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل آوری ۲۸ روزه

۳-۲-۲- اثر سیمان

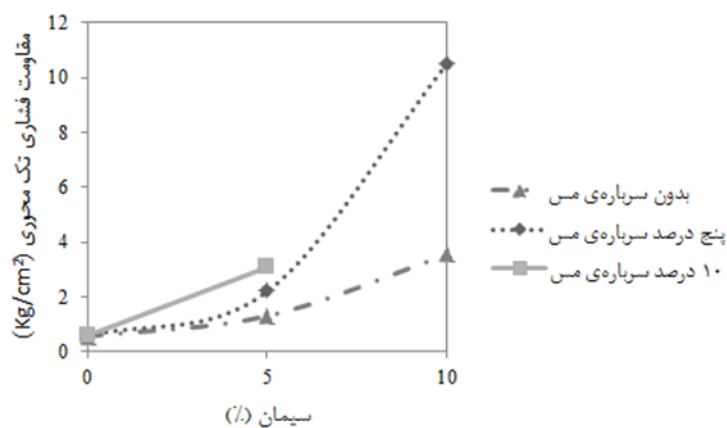
در شکل ۱۲ اثر سیمان به ازای درصدهای مختلف سرباره مس بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل آوری ۲۸ روزه و کوبیده شده با تراکم ۹۵ درصد و در شکل ۱۳ بر نمونه‌های کوبیده شده با تراکم ۹۰ درصد نشان داده شده است. در این دو شکل نیز مشخص است که مقدار سیمان رابطه مستقیمی با مقاومت فشاری تک محوری خاک داشته و با افزایش مقدار سیمان، مقاومت خاک افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- اثر سرباره‌ی مس بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۲- اثر سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۳- اثر سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کوبیده‌شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه

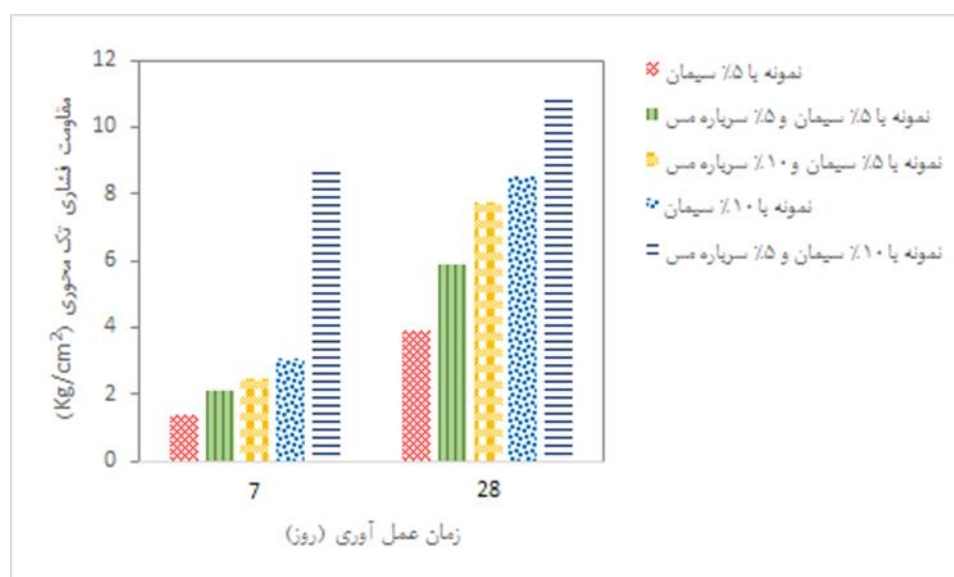
۳-۲-۳- اثر زمان عمل آوری

برای بررسی اثر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط رس-سیمان-سرباره، نمونه‌ها به مدت هفت و ۲۸ روز عمل آوری شده‌اند. شکل ۱۴ تا شکل ۱۷ تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری به زمان عمل آوری مخلوط با درصد تراکم و رطوبت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۴ که تاثیر زمان عمل آوری 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 عمل آوری 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 (۲۴ درصد افزایش مقاومت) و در نمونه تثبیت‌شده با پنج درصد سیمان و ۱۰ درصد سرباره‌ی مس بیشترین مقدار (۲۱۱ درصد افزایش مقاومت) را دارد.



شکل ۱۴-تأثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت

مرطوب منحنی تراکم



شکل ۱۵- تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ساخته شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت

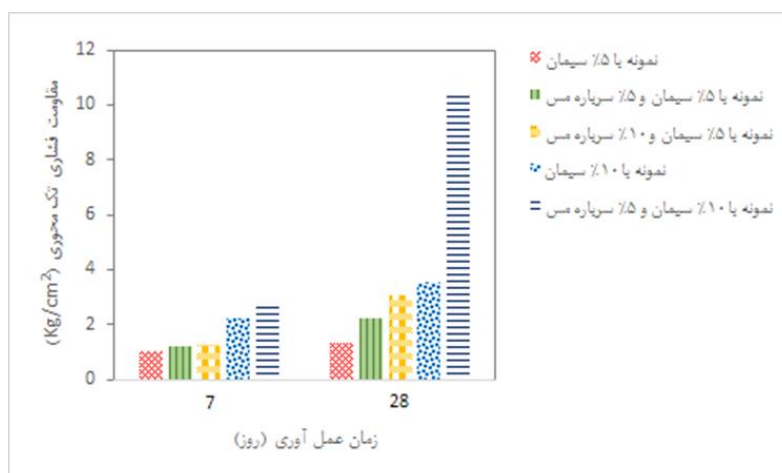
خشک منحنی تراکم

بر اساس شکل ۱۶ که تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ساخته شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم را نشان می‌دهد، روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در نمونه تثبیت شده با پنج درصد سیمان و ۱۰ درصد سرباره‌ی مس کمترین مقدار (۳۴ درصد افزایش مقاومت) و در نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سیمان بیشترین مقدار (۷۷ درصد افزایش مقاومت) را دارد. همچنین مطابق شکل ۱۷ که تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ساخته شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم را نشان می‌دهد،



شکل ۱۶- تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ساخته شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت

مرطوب منحنی تراکم



شکل ۱۷- تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ساخته شده با تراکم ۹۰ درصد و رطوبت سمت

خشک منحنی تراکم

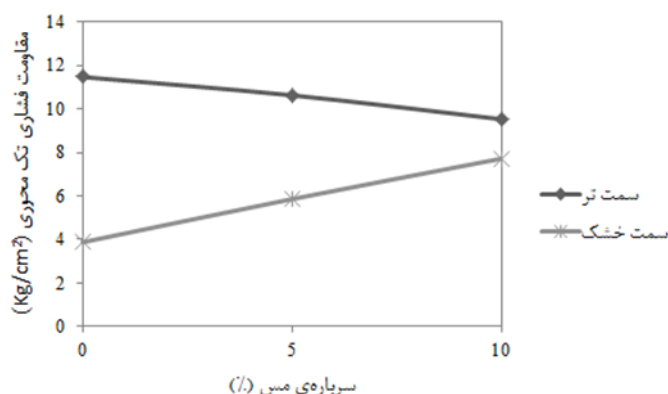
روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در نمونه تثبیت شده با پنج درصد سیمان کمترین مقدار (۲۶ درصد افزایش مقاومت) و در نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سیمان و پنج درصد سرباره‌ی مس بیشترین مقدار (۷۷ درصد افزایش مقاومت) را دارد. به عنوان نتیجه گیری کلی از این بخش می توان گفت که افزایش مدت عمل آوری باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده و در بیشتر نمونه‌های دارای سرباره‌ی مس، درصد افزایش مقاومت، بیشتر از نمونه‌های بدون سیمان بوده است.

۳-۲-۴- اثر رطوبت

نتایج نشان می دهد که نمونه‌های ساخته شده با رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم با مقادیر مختلف افزودنی‌ها، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با رطوبت سمت خشک منحنی تراکم دارد. مثلاً براساس شکل ۱۸ مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ی تثبیت شده با پنج درصد سیمان در تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت خشک منحنی تراکم در عمل آوری ۲۸ روزه، ۳/۸۸ کیلوگرم بر سانتی مترمربع بوده در حالی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ی تثبیت شده با پنج درصد سیمان در تراکم ۹۵ درصد و رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم در عمل آوری ۲۸ روزه، ۱۱/۴۷ کیلوگرم بر سانتی مترمربع می باشد. 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 نمی شود و مقاومت نمونه‌ها کمتر از مقاومت نمونه‌های با رطوبت سمت مرطوب منحنی تراکم خواهد شد.

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

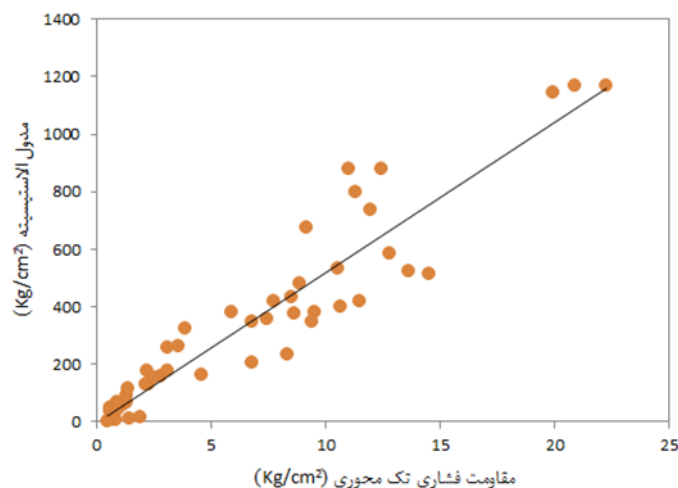
نحوه‌ی تاثیر این عوامل بر مدول الاستیسیته بسیار مشابه نحوه‌ی تاثیر آنها بر مقاومت فشاری تک محوری مخلوط بوده و بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوری، رابطه مستقیمی وجود دارد. برای محاسبه‌ی مقدار مدول الاستیسیته نیز از نتایج آزمایش تک محوری استفاده شده و از تقسیم مقاومت فشاری تک محوری خاک بر کرنش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



شکل ۱۸- تاثیر میزان رطوبت بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های با پنج درصد سیمان و کوبیده شده با تراکم ۹۵ درصد در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه

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

$$E \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 52.2q_u \text{ (kg/cm}^2\text{)} + 0.41 \quad (1)$$

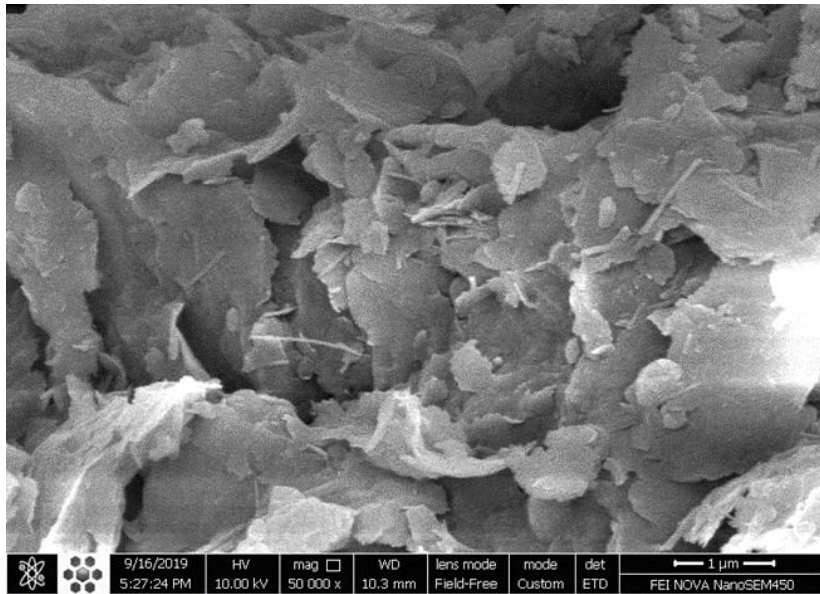


شکل ۱۹- مقادیر مقاومت فشاری تک محوری در برابر مدول الاستیسیته

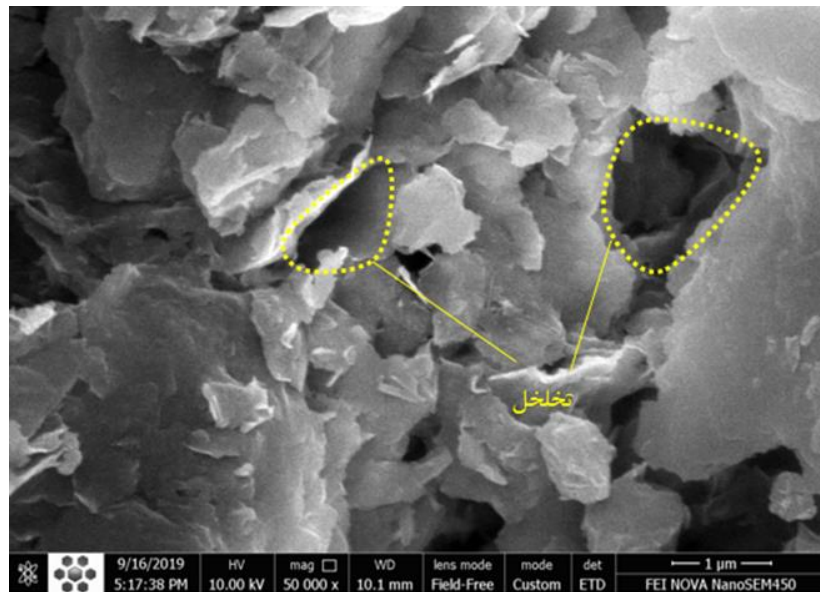
۳-۴- نتایج ریزساختاری

به منظور بررسی اثر افزودن سیمان و سرپاره‌ی 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 نشان‌دهنده‌ی ریزساختار خاک مارن

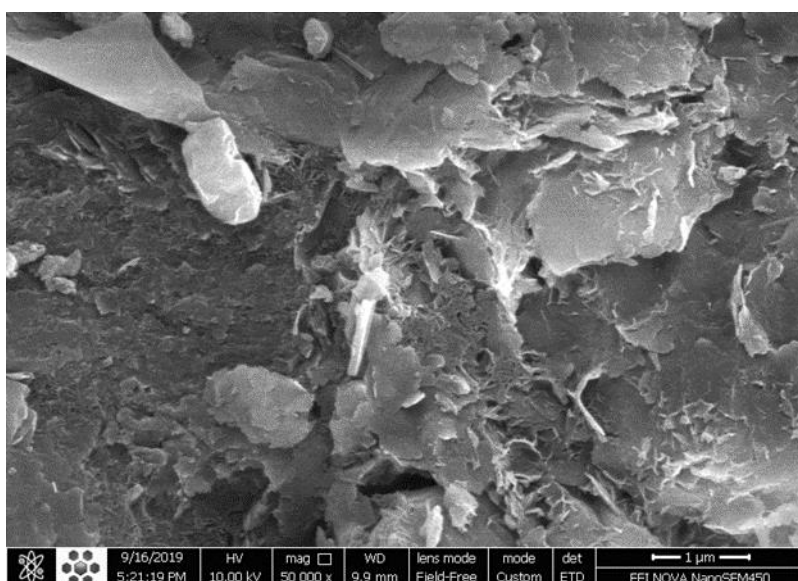
تثبیت نشده می باشد و مطابق آن خاک مارن دارای ذرات منفرد جدا از هم بوده که بر روی یکدیگر قرار گرفته اند. از شکل ۲۱ که ریزساختار خاک مارن تثبیت شده با پنج درصد سیمان را نشان داده شده است، نتیجه می شود که با افزودن پنج درصد سیمان، ذرات خاک به یکدیگر چسبیده و دانه های بزرگتری را تشکیل می دهند؛ اما حفرات خالی در آن مشاهده می شود. اگر به خاک ۱۰ درصد سیمان افزوده شود (شکل ۲۲) خاک مارن دارای ساختارهای متراکمی گشته و حفرات بسیار کمی در آن مشاهده می شود. با توجه به شکل ۲۳ که مارن تثبیت شده با ۱۰ درصد سیمان و پنج درصد سربراه مس را نشان می دهد، نتیجه می شود که وجود سربراه مس باعث تشکیل ساختارهای بزرگتری نسبت به نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سیمان خواهد شد.



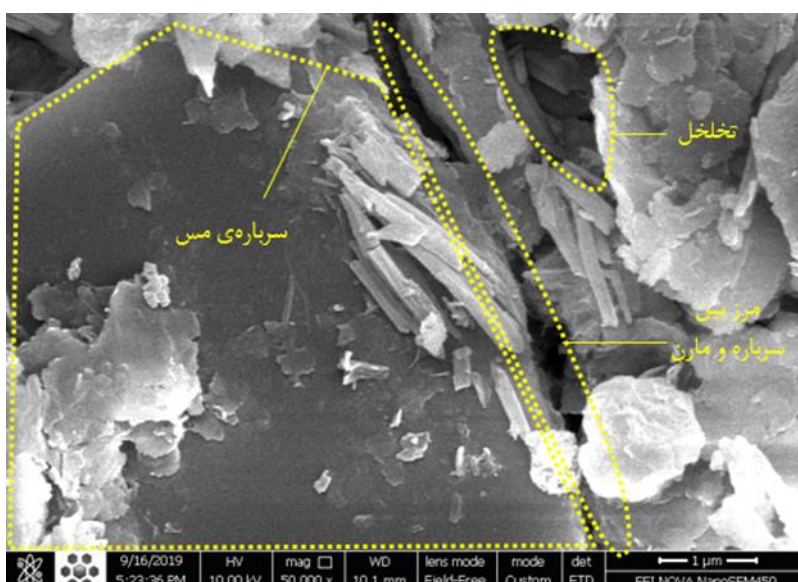
شکل ۲۰- خاک مارن مورد مطالعه و بدون افزودنی



شکل ۲۱- خاک مارن مورد مطالعه تثبیت شده با پنج درصد سیمان



شکل ۲۲- خاک مارن مورد مطالعه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان



شکل ۲۳- خاک مارن مورد مطالعه تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان و پنج درصد سرباره مس

۴- نتیجه گیری

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

- الف- سرباره مس به‌تنهایی ماده‌ی 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 سرباره مس منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ی مارنی شده‌است.

- د- افزودن ۱۰ درصد سیمان با وزن مخصوص خشک ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب و رطوبت ۲۴ درصد منجر به حصول بهترین نتیجه در مخلوط مارن-سیمان شده است.
- ر- افزودن ۱۰ درصد سیمان با وزن مخصوص خشک ۱/۶۸ گرم بر سانتی متر مکعب و رطوبت ۲۰/۵ درصد منجر به حصول بهترین نتیجه در مخلوط مارن-سیمان-سرباره شده است.
- ز- افزودن سرباره‌ی مس به خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت شده با پنج درصد سیمان، باعث کاهش مقاومت نمونه‌ی مارن-سیمان شده است. این درحالی است که با افزودن پنج درصد سرباره‌ی مس به خاک تثبیت شده با ۱۰ درصد سیمان، مقاومت آن افزایش خواهد یافت.
- س- با افزودن مخلوط سیمان و سرباره‌ی مس به خاک اندازه ذرات آن افزایش یافته است.

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.

8. Yi, Y., Zheng, X., Liu, S. and Al-Tabbaa, A. "Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil", *Applied Clay Science*, 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 mechanical 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 Administration*. 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*.