

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر

مژده زیلائی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان
علیرضا غنی زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

Email: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۷

چکیده

به منظور کاهش تأثیرات زیست محیطی ناشی از باطله سنگ آهن و همچنین کاهش استفاده از مصالح سنگدانه‌ای طبیعی، می‌توان پس از تثبیت این مصالح با افزودنی‌های شیمیایی، از این مصالح به عنوان مصالح روسازی استفاده نمود. در این تحقیق، امکان استفاده از باطله سنگ آهن معدن گل گهر سیرجان تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان به عنوان مصالح اساس، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، آزمایش‌های تراکم پروکتور اصلاح شده، مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش ذوب - یخبندان روی ترکیب‌های مختلف باطله سنگ آهن و سیمان انجام گرفت. نتایج آزمایش تراکم نشان داد که افزایش سیمان باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش حداکثر چگالی خشک می‌شود. سپس، نمونه‌های مربوط به مقاومت فشاری تک‌محوری با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان و رطوبت سمت خشک، بهینه و سمت مرطوب، در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه ساخته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان سیمان از ۴٪ به ۸٪، برای کلیه زمان‌های عمل‌آوری، مقاومت فشاری بین ۱/۴۵ تا ۲/۱۵ برابر افزایش یافته است. همچنین، مقاومت در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه و ۵۶ روزه به ترتیب در حدود ۱/۷۳ برابر و ۲/۳۴ برابر مقاومت ۷ روزه می‌باشد. نتایج آزمایش دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان نشان داد که با افزایش درصد سیمان، دوام مصالح تثبیت شده افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در نمونه‌های با درصد سیمان بیشتر، کمترین درصد افت وزنی و کاهش حجم مشاهده می‌شود. در نهایت، مشخص گردید که باطله سنگ آهن تثبیت شده با حداقل ۴٪ سیمان، معیارهای مقاومتی لازم برای به کارگیری در لایه اساس را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تثبیت، باطله سنگ آهن معدن، سیمان پرتلند، مصالح راه‌سازی، مقاومت فشاری، دوام

۱. مقدمه

سنگ آهن تولید می شود (پایدار، ۱۳۹۷). تثبیت باطله های سنگ آهن؛ یکی از راه حل های کم هزینه و ساده برای مقابله با این مشکلات می باشد. به طوری که استفاده مجدد و بازیافت باطله ها برای ساخت و ساز و راه سازی باعث مصرف شدن باطله ها و جلوگیری از خطرات ناشی از آلودگی باطله های معدنی می شود.

تا کنون تحقیقات محدودی در خصوص امکان سنجی فنی استفاده از باطله سنگ آهن تثبیت شده به عنوان مصالح راه سازی انجام شده است. سان و همکاران (۲۰۱۱) تثبیت باطله سنگ آهن با استفاده از سیمان را به عنوان مصالح راه سازی مورد بررسی قرار دادند. روی نمونه ها، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده^۷، مقاومت کششی غیرمستقیم^۸ و مقاومت فشاری پس از اعمال چرخه های ذوب- یخبندان^۹ و چرخه های تر و خشک شدن^{۱۰} انجام شد. نتایج نشان می دهد که ترکیب باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتر و همچنین دوام در برابر یخبندان و دوام در برابر سیکل های تر و خشک شدن مطلوب و مناسبی دارد. همچنین، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه ها، معیارهای مقاومتی مورد نیاز برای مصالح زیراساس^{۱۱} و مصالح اساس^{۱۲} را برآورده می کند. شو (۲۰۱۳) در پژوهشی، باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان را به عنوان مصالح اساس مورد بررسی قرار داد. نمونه ها تحت آزمایش های تراکم^{۱۱} و مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان سیمان بیش از ۱۵٪ می تواند مشخصات مورد نیاز برای مصالح اساس و زیراساس برای راه های کم تردد را برآورده نماید. علاوه بر این، با افزایش سیمان تا ۱۵٪، دانسیته خشک حداکثر^{۱۲} افزایش

گسترده گی فعالیت های معدنی به طور مداوم باعث افزایش باطله های معدنی^۱ اعم از باطله حاصل از خاک- برداری جهت رسیدن به ماده معدنی و همچنین باطله حاصل از فرآوری مواد معدنی می شود. عدم مدیریت صحیح و انباشت این باطله ها در اطراف معادن، می تواند علاوه بر اشغال فضای بسیار زیاد، آثار سوء زیست- محیطی در پی داشته باشد. به طوری که باطله های معدنی ذخیره شده در سدهای باطله^۲ می توانند با توجه به عدم پایداری ژئوتکنیک، فیزیکی و شیمیایی، تأثیرات منفی بر محیط زیست داشته باشند. از اثرات منفی زیست محیطی ناشی از تجمع باطله ها می توان به حذف پوشش گیاهی، جنگل زدایی، تغییرات شیب زمین، افزایش خطر فرسایش، آلودگی آب، محصولات کشاورزی و خطر سلامتی انسان اشاره کرد (کاسترو گومس و همکاران، ۲۰۱۲). استفاده مجدد از این باطله ها در حجم زیاد در پروژه های عمرانی و راه سازی یکی از پایدارترین روش ها برای حل این مشکل است. به منظور افزایش ظرفیت باربری مصالح باطله معدن می توان این مصالح را با استفاده از افزودنی های مختلف تثبیت^۳ نمود. منطقه معدنی گل گهر، با داشتن معادن غنی از سنگ آهن، به عنوان یکی از مطرح ترین قطب های فعال معدنی و صنعتی در خاورمیانه مطرح است. این ذخایر معدنی در استان کرمان و در ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان سیرجان واقع شده است. منطقه معدنی گل گهر در شش بخش مجزا در محدوده ای به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۴ کیلومتر قرار گرفته است (سایت شرکت معدنی و صنعتی گل گهر، ۱۳۹۸). در شرکت گل گهر سیرجان، سالانه در حدود ۳۴۳۱۷۵۰۰ تن ضایعات

^۷- Freezing-thawing

^۸- Wetting-drying

^۹- Subbase

^{۱۰}- Base

^{۱۱}- Compaction

^{۱۲}- Maximum dry density

^۱- Mine tailings

^۲- Tailings dam

^۳- Stabilization

^۴- Iron ore tailings

^۵- Unconfined compressive strength

^۶- Modulus of resilience

برای تثبیت خاک پنبه سیاه (رس با خمیری زیاد) استفاده کردند. نمونه‌ها به مدت زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری^۵ شدند. آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری و CBR روی نمونه‌ها انجام شد. بر اساس نتایج این تحقیق، با افزایش درصد آهک^۶ و باطله سنگ‌آهن، وزن مخصوص افزایش، ظرفیت تبادل کاتیون^۶ (CEC) کاهش، حد روانی و حد خمیری کاهش و مقدار رطوبت بهینه^۷ کاهش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب آهک و IOT به‌طور قابل توجهی خواص خاک را بهبود می‌بخشد. در این پژوهش، میزان بهینه آهک و باطله سنگ‌آهن به ترتیب برابر با ۸٪ و ۸٪ تعیین شد. غنی زاده و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیق خود به تثبیت خاک رس سرخه با استفاده از آهک شکفته و باطله سنگ‌آهن پرداختند. طبق نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، با فرض ثابت بودن درصد باطله، افزایش درصد آهک تا یک مقدار مشخص (۴٪) باعث افزایش یافتن مقاومت فشاری و مدول یانگ می‌شود و پس از آن باعث کاهش مقاومت فشاری و مدول یانگ نمونه‌ها می‌گردد. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش درصد رطوبت باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ می‌شود و برعکس، با کاهش درصد رطوبت، مقاومت فشاری و مدول یانگ افزایش می‌یابند. با توجه به نتایج آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان مشاهده شد که با افزایش درصد باطله سنگ‌آهن تا یک مقدار مشخص (بین ۲ الی ۴ درصد) کاهش افت وزنی و حجمی رخ می‌دهد و پس از آن، افت وزنی و حجمی افزایش می‌یابد. با توجه به دو معیار مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان، درصد بهینه آهک به ترتیب برای جایگزینی ۲۰ و ۱۰ درصد باطله برابر با ۲ و ۴ درصد مشخص گردید. غنی زاده و همکاران (۲۰۲۰) خصوصیات مکانیکی و همچنین مقاومت در

و پس از آن دانسیته خشک کاهش می‌یابد. لی (۲۰۱۴) تحقیقی روی خواص مکانیکی و عملکرد روسازی‌های^۱ شامل اساس باطله سنگ‌آهن تثبیت شده با سیمان انجام داد. این مصالح با اشغال کردن فضای زیادی از رودخانه‌ها و زمین‌ها، باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شوند. آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری محدود نشده، و دوام در برابر چرخه‌های یخبندان-ذوب روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از باطله سنگ‌آهن در اساس ماکادامی تثبیت شده با سیمان، از یک طرف باعث مصرف شدن حجم زیادی از این مصالح می‌شود و از طرف دیگر آسیب‌های ناشی از انباشت و تجمع باطله در محیط را کاهش می‌دهد. کورانچی (۲۰۱۵) پژوهشی با هدف بررسی آزمایشگاهی رفتار بار-نشست یک پی نواری روی سازه‌های پرشده با باطله سنگ‌آهن انجام داد. نتایج به‌دست آمده از باطله سنگ‌آهن را با نتایج حاصل از خاک ماسه‌ای مقایسه کرد. مشاهده شد که با افزایش عمق مدفون‌شدگی پی و چگالی نسبی، ظرفیت باربری و سختی آن افزایش می‌یابد، که در مقایسه با خاک ماسه‌ای ظرفیت باربری^۲ و سختی قابل توجهی دارد. باستوس و همکاران (۲۰۱۶) تحقیقی با هدف امکان‌پذیری استفاده از باطله‌های سنگ‌آهن به‌عنوان یک ماده جایگزین برای مصالح راه‌سازی انجام دادند. نمونه‌ها تحت آزمایش تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)^۳، مقاومت فشاری و دوام قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که باطله سنگ‌آهن پس از تثبیت شیمیایی، یک راه‌حل عملی برای استفاده در لایه‌های روسازی است. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سربراره بیشتر است و نمونه باطله تثبیت شده با سربراره، معیار دوام مصالح را برآورده نمی‌سازد. اتمیم و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی، از آهک و باطله سنگ‌آهن (IOT)

⁵- Lime oxide

⁶- Cation Exchange Capacity

⁷- Optimal moisture

¹- Pavement

²- Bearing capacity

³- California Bearing Ratio

⁴- Curing

قابل ملاحظه هزینه تأمین مصالح سنگدانه‌ای قشر اساس شده است. مصالح باطله سنگ آهن به صورت دپوهای گسترده در منطقه گل گهر موجود می‌باشند و بنابراین جهت تأمین مصالح باطله فاصله حمل بسیار کم است و نیاز به عملیات پردازش مصالح نمی‌باشد. علاوه بر این، مصالح باطله تثبیت شده با سیمان در قشر اساس به دلیل داشتن ظرفیت باربری بیشتر نسبت به مصالح اساس سنگدانه‌ای سبب کاهش ضخامت لایه‌های روسازی می‌شوند که این مزیت در کنار کاهش هزینه تهیه مصالح باطله خام می‌تواند جبران کننده هزینه ناشی از تثبیت این مصالح با سیمان باشد.

همانگونه که پیشینه تحقیق نشان می‌دهد، تاکنون تحقیقی در خصوص تثبیت باطله سنگ آهن معدن گل گهر سیرجان با درصد‌های کم سیمان پرتلند انجام نشده است. همچنین، در تحقیقات گذشته، پارامترهایی از جمله مدول یانگ، کرنش شکست و دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان باطله تثبیت شده با سیمان مورد ارزیابی قرار نگرفته است. بنابراین، هدف از این تحقیق، بررسی پارامترهای مقاومتی (مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ و کرنش شکست) و همچنین دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان است.

۲. مواد و مصالح

۲-۱. باطله سنگ آهن

در این پژوهش، از باطله سنگ آهن معدن گل گهر سیرجان استفاده شده است. آزمایش دانه‌بندی باطله سنگ آهن مطابق استاندارد ASTM D 422 (۲۰۱۶) انجام شد. نمودار دانه‌بندی باطله سنگ آهن در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودار دانه‌بندی نشان می‌دهد که بیش از ۸۶٪ وزنی این مصالح دارای اندازه ماسه می‌باشد و تنها ۱۴٪ وزنی مصالح از الک نمره ۲۰۰ (الک ۰/۰۷۵

برابر چرخه‌های یخبندان و ذوب (F-T) خاک رس با خاصیت خمیری کم، با درصد‌های مختلف سیمان پرتلند^۱ و مقادیر متفاوت باطله سنگ آهن را بررسی کردند. طبق نتایج، با افزایش درصد سیمان، UCS، E0 و ITS^۲ افزایش می‌یابد. همچنین، مشخص شد که باطله معدن در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۱۴ روز، تأثیر مثبت و در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روز، تأثیر منفی بر پارامترهای مقاومت دارد. در مجموع، مشخص شد که ۱۲٪ سیمان پرتلند و ۱۰ تا ۴۰ درصد باطله معیارهای UCS و F-T را برای تثبیت خاک‌های رسی با قابلیت خمیری کم را برآورده می‌کند. در حالی که خاک رس (بدون باطله) حداقل به ۱۵٪ سیمان پرتلند برای تثبیت نیاز دارد. براتی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی، باطله سنگ آهن معدن گل گهر سیرجان را با استفاده از ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بنتونیت و ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان و با زمان‌های عمل‌آوری صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تثبیت کردند. نتایج نشان داد که افزودن بنتونیت و سیمان به باطله سنگ آهن رطوبت بهینه را افزایش و وزن مخصوص خشک را کاهش می‌دهد. همچنین، افزودن بنتونیت، مقاومت فشاری محصور نشده را به مقدار کمی افزایش می‌دهد؛ در حالی که ترکیب باطله با سیمان مقاومت خیلی بالایی را ایجاد می‌کند.

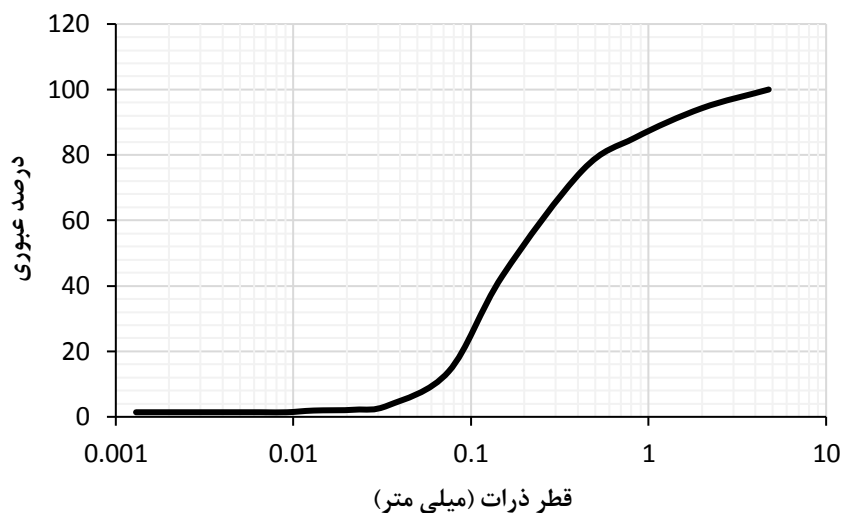
باطله سنگ آهن به‌عنوان یک ماده آلاینده محیط‌زیست مطرح است و در صورت استفاده از آن به عنوان مصالح راه‌سازی می‌توان آثار مخرب آن بر محیط‌زیست را کاهش داد. علاوه بر این، در منطقه صنعتی و معدنی گل گهر، به دلیل ساخت و ساز گسترده طی یک دهه اخیر، منابع مصالح سنگدانه‌ای به شدت کاهش داشته است. به طوری که تأمین مصالح سنگدانه‌ای مورد نیاز برای پروژه‌های راه‌سازی منطقه نیازمند فواصل حمل بسیار طولانی و پردازش مصالح سنگدانه‌ای (شکستن و خرد کردن مصالح) است که این موضوع سبب افزایش

^۲- Indirect Tensile Strength

^۱- Portland cement

نسبتاً زیادی (۲/۹۱) هستند. ترکیبات شیمیایی باطله سنگ آهن بر اساس نتایج^۱ XRF در جدول ۲ آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، عمده ترین اکسیدهای موجود در باطله سنگ آهن معدن گل گهر به ترتیب فراوانی شامل اکسید سیلیس، اکسید آهن، اکسید منیزیم و اکسید آلومینیوم می باشند.

میلی متر) عبور می کند. مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیک باطله سنگ آهن معدن گل گهر سیرجان در جدول ۱ آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، طبقه بندی باطله سنگ آهن حاصل از فرآوری به صورت ماسه لای دار است. همچنین، این مصالح غیر خمیری می باشند و با توجه به وجود کانی آهن دارای چگالی



شکل ۱. نمودار دانه بندی باطله سنگ آهن

جدول ۱. مشخصات باطله سنگ آهن

| مشخصات | استاندارد | باطله سنگ آهن |
|--------------------|-------------------|---------------|
| طبقه بندی آشتو | ASTM D3282 (2015) | A-2-4 |
| طبقه بندی یونیفاید | ASTM D2487 (2015) | SM |
| چگالی دانه ها (GS) | ASTM D854 (2014) | ۲/۹۱ |
| حد روانی | ASTM D4318 (2014) | NP |
| حد خمیری | ASTM D4318 (2014) | NP |
| شاخص خمیری | ASTM D4318 (2014) | NP |
| pH | ASTM D4972 (2013) | ۷/۱۵ |

^۱ - X-Ray Fluorescence

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر

NP: Non-plastic

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی باطله سنگ آهن بر اساس تحلیل XRF

| ترکیب | باطله سنگ آهن (%) |
|--------------------------------|-------------------|
| SiO ₂ | ۳۵/۹۵۲ |
| Al ₂ O ₃ | ۵/۹۰۷ |
| Fe ₂ O ₃ | ۲۲/۱۷۴ |
| CaO | ۹/۲۴۹ |
| Na ₂ O | ۰/۹۳۷ |
| MgO | ۱۴/۱۵۸ |
| K ₂ O | ۱/۸۵۵ |
| TiO ₂ | ۰/۶۲۹ |
| MnO | ۰/۰۷۷ |
| P ₂ O ₅ | ۰/۴۵۱ |
| LOI | ۱/۸ |

۲-۲. سیمان

ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق در

جدول ۳ آورده شده است.

در این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ ۲ که از شرکت

مه‌ریز یزد، جاده یزد - مه‌ریز، تهیه شده بود، استفاده شد.

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی سیمان بر اساس تحلیل XRF

| ترکیب | مقدار (%) |
|--------------------------------|-----------|
| SiO ₂ | ۲۰ ≤ |
| Al ₂ O ₃ | ۶ ≥ |
| Fe ₂ O ₃ | ۶ ≥ |
| MgO | ۵ ≥ |
| SO ₃ | ۳ ≥ |
| LOI | ۳ ≥ |
| IR | ۰/۷۵ ≥ |
| C ₃ A | ۸ ≥ |

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱. آزمایش تراکم

در این پژوهش، باطله سنگ آهن معدن با مقادیر مختلف

سیمان پرتلند (۴، ۶ و ۸ درصد) تثبیت شد. برای تعیین

درصد رطوبت بهینه و تعیین طرح اختلاط مربوط به هر

ترکیب از آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده مطابق

برای هر یک از نمونه‌ها تعیین شد. در این پژوهش، در مجموع ۲۰ آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده پنج-نقطه‌ای برای تعیین رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک نمونه‌های مختلف انجام گرفت. مشخصات قالب، تعداد لایه‌ها، تعداد ضربه و سایر جزئیات برای روش تراکم پروکتور اصلاح شده در جدول ۴ آورده شده است.

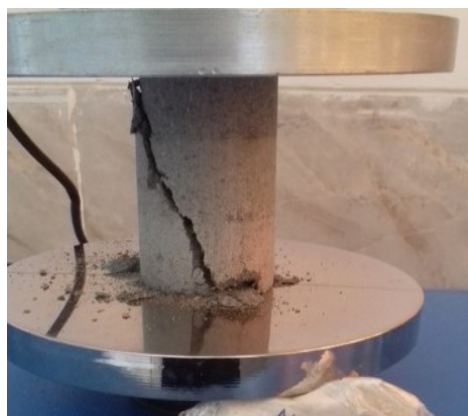
استاندارد ASTM D1557 (۲۰۱۵) استفاده شد. آزمایش تراکم روی هر نمونه (مقدار معینی باطله سنگ آهن و سیمان) به روش تراکم پنج نقطه‌ای (پنج درصد مختلف رطوبت) انجام شد. پس از انجام آزمایش، نمودار تغییرات درصد رطوبت در مقابل چگالی خشک ترسیم شد و از روی نمودار مقدار رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک

جدول ۴. مشخصات آزمایش پروکتور اصلاح شده

| پارامتر | مقدار |
|-------------------------------|------------------------------|
| حجم قالب | ۰/۰۳۳۳ فوت مکعب |
| قطر قالب | ۰/۳۳۳ فوت |
| ارتفاع قالب | ۰/۳۸۱۵ فوت |
| وزن چکش | ۱۰ پوند |
| تعداد لایه‌ها | ۵ |
| ارتفاع سقوط چکش | ۱/۵ فوت |
| تعداد ضربات روی هر لایه | ۲۵ |
| انرژی تراکم حاصله در واحد حجم | ۵۶۳۰۰ پوند - فوت بر فوت مکعب |

رطوبت تراکم (سمت بهینه، سمت مرطوب (۲۰٪ بیشتر از رطوبت بهینه)، سمت خشک (۲۰٪ کمتر از رطوبت بهینه)) در قالب‌هایی به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۵۰ میلی‌متر متراکم و ساخته شدند. سپس، این نمونه‌ها به مدت ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در کیسه‌های نایلونی عمل‌آوری شدند (شکل ۲- الف).

۲-۳. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)
آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D 2166 (۲۰۱۵) انجام شد. به منظور انجام این آزمایش، ابتدا نمونه‌های باطله سنگ آهن تثبیت شده با سه مقدار مختلف سیمان (۴، ۶ و ۸ درصد) با سه درصد



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف: نحوه عمل‌آوری نمونه‌های مقاومت فشاری تک‌محوری در کیسه‌های نایلونی و ب: نمونه گسیخته شده پس از بارگذاری توسط دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری

شدند تا اشباع شوند. هر چرخه ذوب- انجماد شامل قرارگیری نمونه در دمای ۲۰- درجه سلسیوس برای ۶ ساعت (مرحله انجماد) و سپس قرارگیری نمونه در دمای ۲۵+ درجه سلسیوس برای ۶ ساعت (مرحله ذوب) بود. این روش توسط سایر محققان، از جمله کی و همکاران (۲۰۰۴) و گلچین فر و عباسی (۱۳۹۲) استفاده شده است. هر بار تکرار ذوب و انجماد، یک چرخه ذوب و یخبندان تکمیل می‌شود. پس از ۱۲ چرخه ذوب و یخبندان (شکل ۳)، کاهش حجم و وزن نمونه‌ها به ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$\text{کاهش حجم} = \frac{W_{w1} - W_{w2}}{\gamma_s} \quad (1)$$

$$\text{اتلاف وزن} = \frac{W_{w1} - W_{w2}}{W_{w1}} \quad (2)$$

که در این روابط، W_{w1} وزن نمونه قبل از قرار گرفتن در دستگاه ذوب و یخبندان (گرم)، W_{w2} وزن نمونه بعد از طی کردن چرخه‌ها در دستگاه ذوب و یخبندان (گرم) و γ_s حداکثر چگالی خاک اشباع شده (گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد.



(ب)

در مجموع، تعداد ۵۴ نمونه مقاومت فشاری تک‌محوری (۲۷ نمونه با دو تکرار) ساخته شد. جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری، نمونه‌ها پس از پایان زمان عمل‌آوری، با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری، با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شدند. در حین انجام آزمایش، نمودار تنش در مقابل کرنش برای هر نمونه ترسیم گردید. با استفاده از نمودار تنش و کرنش ترسیم شده، پارامترهای مقاومت فشاری، مدول یانگ و کرنش شکست هر نمونه تعیین گردید. شکل ۲-ب، نمونه گسیخته شده در آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

۳-۳. آزمایش ذوب- یخبندان (F-T)

برای انجام آزمایش دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، تعداد سه نمونه با سیمان ۴، ۶ و ۸ درصد و رطوبت‌های بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم، مطابق با انرژی اعمال شده در آزمایش پروکتور اصلاح شده، متراکم و به مدت ۷ روز عمل‌آوری شدند. سپس، نمونه‌ها در داخل ۱/۵ سانتی‌متر محلول آب و نمک ۳٪ قرار داده



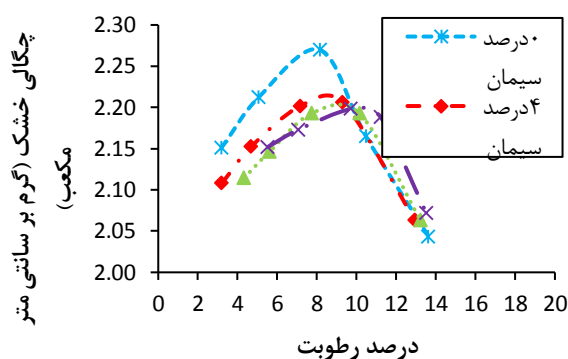
(الف)

شکل ۳. الف: دستگاه ذوب و یخبندان به همراه نمونه‌های درون آن و ب: نمونه‌های ذوب و یخبندان پس از قرار گرفتن در معرض ۱۲ چرخه یخبندان- ذوب

۴. نتایج آزمایشگاهی

۴-۱. نتایج آزمایش تراکم

نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم روی نمونه باطله سنگ آهن بدون سیمان و نمونه‌های باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان، در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴. نمودار مربوط به آزمایش تراکم باطله سنگ آهن و باطله سنگ آهن تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان

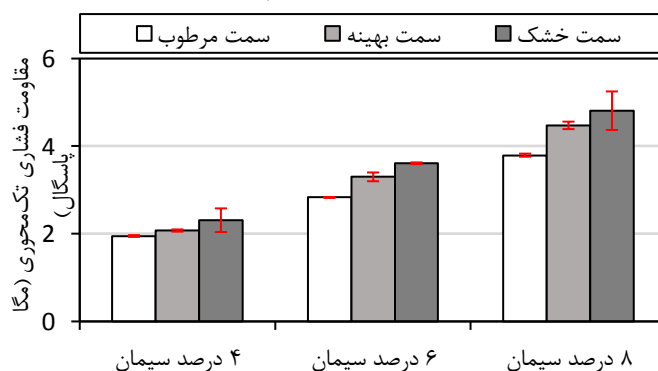
می‌کند و باعث تخلخل بیشتر و چگالی کمتر می‌شود (براتی و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج باستوس و همکاران (۲۰۱۶) و براتی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط این محققین نیز نشان می‌دهد که با افزایش درصد سیمان، رطوبت بهینه افزایش و حداکثر چگالی خشک کاهش می‌یابد.

۲-۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS)

در شکل‌های ۵ تا ۷، نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان آورده شده است. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری برای باطله تثبیت نشده بسیار کم و در حدود ۰/۳۵ مگاپاسگال بوده است.

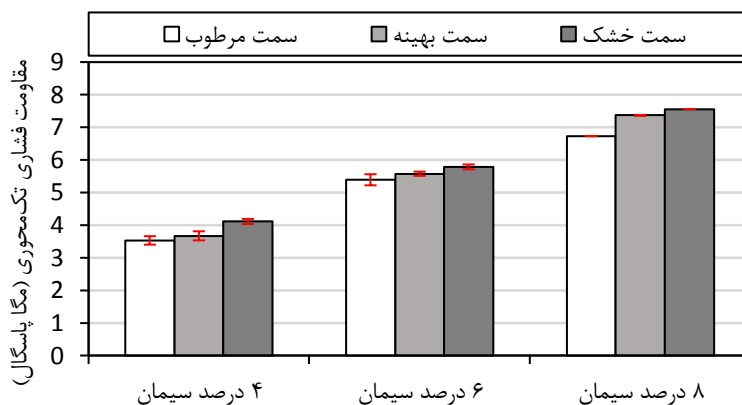
همان گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش درصد سیمان باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش حداکثر چگالی خشک می‌شود. طبق نتایج به دست آمده، میزان رطوبت بهینه بین ۸ تا ۱۰/۳ درصد و حداکثر چگالی خشک بین ۲/۲۰ تا ۲/۲۷ گرم بر سانتی متر مکعب متغیر می‌باشد. با اضافه شدن سیمان، چگالی کاهش می‌یابد. با این وجود، با افزایش درصد سیمان از ۴٪ به ۸٪، حداکثر چگالی خشک تغییر محسوسی از خود نشان نمی‌دهد.

دلیل افزایش درصد رطوبت بهینه این است که با افزایش درصد سیمان، به دلیل انجام واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی، میزان آب مورد نیاز برای تراکم بهتر، افزایش می‌یابد (رستگار و کاوسی، ۱۳۹۴). همچنین، کاهش وزن مخصوص خشک خاک با افزایش درصد سیمان نیز به این علت می‌باشد که با افزایش درصد سیمان، نمونه در برابر فشردگی و تراکم مقاومت

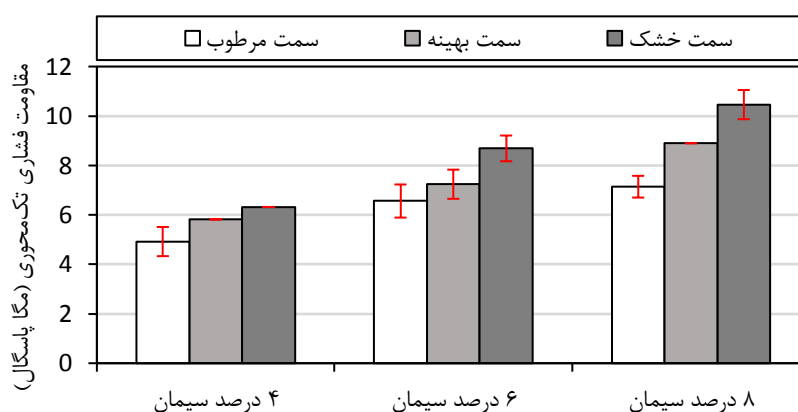


شکل ۵. مقاومت فشاری تک محوری باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان با زمان عمل آوری ۷ روزه

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر



شکل ۶. مقاومت فشاری تک محوری باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان با زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۷. مقاومت فشاری تک محوری باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان با زمان عمل آوری ۵۶ روزه

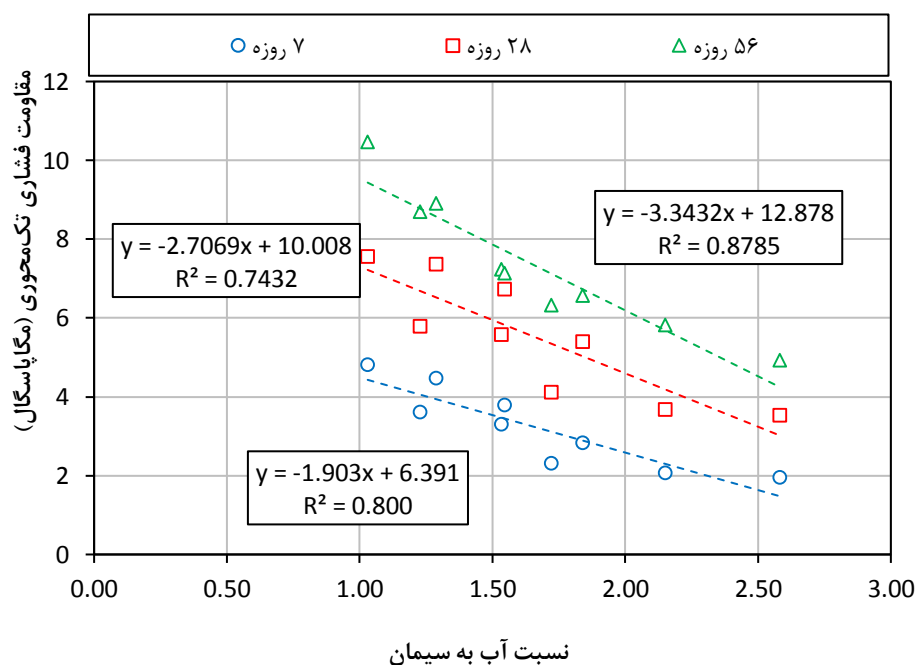
همچنین، نتایج آزمایش مقاومت فشاری ماسه لای دار تثبیت شده با سیمان در پژوهش اثنی عشری و مرغائی زاده (۱۳۹۰) و رستگار و کاووسی (۱۳۹۴)، با نتایج مقاومت فشاری باطله تثبیت شده با سیمان مطابقت دارد. همچنین، تأثیر رطوبت بر مقاومت فشاری نشان می دهد که رطوبت سمت خشک، بهینه و مرطوبت به ترتیب بیشترین مقاومت فشاری را ایجاد می کنند. این موضوع را همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است می توان به نسبت آب به سیمان ارتباط داد. در حقیقت، همانند بتن، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت کاهش می یابد و برعکس. طبق شکل ۵، در زمان عمل آوری ۷ روزه، با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۶٪، مقدار مقاومت فشاری برای نمونه های سمت خشک، بهینه و مرطوب در حدود

با توجه به شکل ۵، با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری تک محوری نمونه های ۷ روزه افزایش می یابد. افزایش مقاومت نمونه های تثبیت شده با سیمان پرتلند در درجه اول به دلیل وجود تری کلسیم سیلیکات (C3S) و دی کلسیم سیلیکات (C2S) در سیمان پرتلند است که هر دو ترکیب هیدراتاسیون مشابهی تولید می کنند. از مهم ترین این ترکیبات می توان به هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) و هیدرات های سیلیکات کلسیم (C-S-H) (C3S و C2S) اشاره کرد که بیشترین نقش را در مقاومت ملات سیمان دارند (مانژوناتا و سانیل، ۲۰۱۳). نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج محققینی مانند سان و همکاران (۲۰۱۱)، مانژوناتا و سانیل (۲۰۱۳)، شو (۲۰۱۳) و براتی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد.

مقاومت فشاری نیز بیشتر می‌شود، زیرا با فراهم بودن شرایط عمل‌آوری و حفظ رطوبت نمونه‌ها، عملیات هیدراتاسیون ادامه پیدا می‌کند و با گذشت زمان، مقاومت نمونه بیشتر می‌شود. نتیجه این تحقیق با نتایج محقیقی از جمله سان و همکاران (۲۰۱۱)، مانژوناتا و سانیل (۲۰۱۳)، کاووسی و صائی (۱۳۹۵) و براتی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. بنابراین، در مقایسه کلی بین زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۵۶ روزه و درصد رطوبت تراکم سمت خشک، بهینه و مرطوب و همچنین مقدار سیمان ۴، ۶ و ۸ درصد، کمترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری مربوط به نمونه باطله سنگ‌آهن تثبیت‌شده با ۴٪ سیمان در رطوبت تراکم سمت مرطوب با زمان عمل‌آوری ۷ روزه برابر با ۱/۹۵ مگاپاسگال و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه باطله سنگ‌آهن تثبیت‌شده با ۸٪ سیمان، در رطوبت تراکم سمت خشک، با زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه، برابر با ۱۰/۴۶ مگاپاسگال بوده است.

۱/۴۵ تا ۱/۵۹ برابر افزایش یافته است. همچنین، با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪ نیز مقاومت فشاری ۱/۳۳ تا ۱/۳۵ برابر افزایش یافته است. همچنین، مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه (شکل ۶) با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۶٪ به ازای رطوبت تراکم سمت خشک، بهینه و مرطوب در حدود ۱/۴۱ تا ۱/۵۳ برابر افزایش و با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪ نیز مقاومت فشاری ۱/۲۵ تا ۱/۳۲ برابر افزایش داشته است. برای زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه مطابق شکل ۷، با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۶٪، مقدار مقاومت فشاری برای رطوبت تراکم سمت خشک، بهینه و مرطوب در حدود ۱/۲۴ تا ۱/۳۸ برابر افزایش داشته است. همچنین، با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪ نیز مقاومت فشاری ۱/۰۹ تا ۱/۲۳ برابر افزایش یافته است.

تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نیز نشان می‌دهد که هر چه زمان عمل‌آوری بیشتر باشد



شکل ۸. رابطه بین نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری تک‌محوری

در جدول ۵، رابطه بین مقاومت فشاری در زمان‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه نشان داده شده است.

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر

جدول ۵. رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل آوری

| R | P | F _{stat} | معادله | زمان های عمل آوری (روز) |
|-------|----------|-------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| ۰/۹۷۱ | ۰/۰۰۰۰۰۳ | ۱۳۱/۳۷۶۶ | UCS ₂₈ = 1.68 UCS ₇ | ۲۸ و ۷ |
| ۰/۸۵۲ | ۰/۰۰۱۷۲۴ | ۲۱/۲۸۵۸۹ | UCS ₅₆ = 2.21 UCS ₇ | ۵۶ و ۷ |
| ۰/۸۳۶ | ۰/۰۰۲۵۶۵ | ۱۸/۶۱۴۲۹ | UCS ₅₆ = 1.31 UCS ₂₈ | ۵۶ و ۲۸ |

در این تحقیق، معادله (۳) به منظور برقراری ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری به عنوان پارامتر مجهول و درصد سیمان و درصد رطوبت به عنوان پارامترهای معلوم پیشنهاد شده است.

$$UCS = a + bx + c \ln y \quad (3)$$

در این معادله، UCS مقدار مقاومت فشاری تک محوری برحسب مگاپاسگال، x درصد سیمان و y درصد رطوبت است. ضرایب ثابت a، b و c برای نمونه‌های عمل آوری شده در سه زمان مختلف عمل آوری، به همراه پارامترهای برازش، در جدول ۶ آورده شده است.

مطابق جدول ۵، معادلات به دست آمده بین مقاومت‌های فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌های ۷ و ۵۶ روزه و نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه نشان می‌دهند که مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ۱/۶۸ برابر مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۶ روزه ۲/۲۱ برابر مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه و مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۶ روزه ۱/۳۱ برابر مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه است. در این جدول، آماره F به همراه سطح معنی دار بودن هر یک از معادلات نشان‌دهنده دقت مناسب معادلات رگرسیون است. همچنین، همانگونه که ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی در کلیه معادلات بیش از ۰/۸۳ است.

جدول ۶. تعیین مقاومت فشاری تک محوری با توجه به درصد سیمان و درصد رطوبت

| F _{stat} | FitStdErr | R | c | b | a | زمان عمل آوری (روز) |
|-------------------|-----------|------|-------|------|-------|---------------------|
| ۱۶۵/۹۵ | ۰/۱۵۸ | ۰/۹۹ | -۱/۷۵ | ۰/۶۴ | ۳/۲۹ | ۷ |
| ۵۲۹/۱۳ | ۰/۱۳ | ۰/۹۹ | -۱/۴۸ | ۰/۹۳ | ۳/۲۴ | ۲۸ |
| ۶۱/۵۷ | ۰/۴۳ | ۰/۹۷ | -۵/۶۳ | ۱/۰۴ | ۱۳/۶۱ | ۵۶ |

۴-۳. تأثیر درصد سیمان، درصد رطوبت و زمان

عمل آوری بر مدول یانگ سکانت (E50)

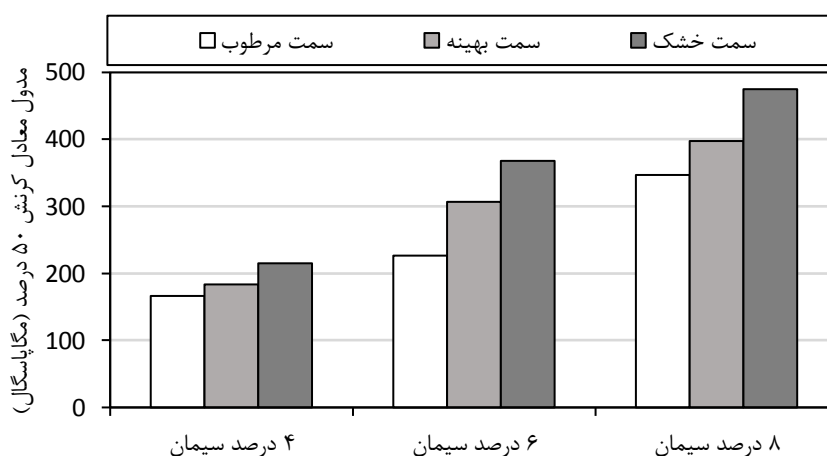
مدول یانگ سکانت معادل کرنش ۵۰ درصد (E50) که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است، از نمودارهای مقاومت فشاری تک محوری به دست می‌آید. روند تغییرات مدول یانگ مشابه روند تغییرات مقاومت فشاری تک محوری است و با افزایش درصد سیمان، افزایش زمان عمل آوری و کاهش درصد رطوبت، مدول یانگ افزایش می‌یابد. در زمان عمل آوری ۷ روزه (شکل ۹) با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۶٪، مدول یانگ

طبق جدول ۶، ضریب همبستگی در کلیه زمان‌های عمل آوری بیش از ۰/۹۷ است که نشان‌دهنده دقت بالای معادله پیشنهادی است. از معادلات به دست آمده می‌توان برای پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری تک محوری استفاده کرد. همچنین، طبق جدول ۶، در کلیه زمان‌های عمل آوری ضریب c منفی است که نشان‌دهنده رابطه معکوس بین مقاومت فشاری و درصد رطوبت است. به عبارت دیگر، افزایش درصد رطوبت تأثیر منفی بر مقاومت فشاری تک محوری دارد و باعث کاهش آن می‌شود.

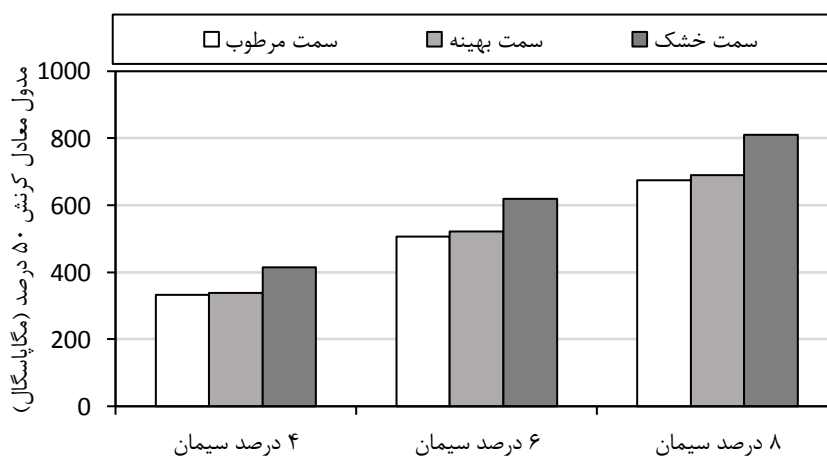
مربوط به نمونه‌های سمت خشک، بهینه و مرطوب در حدود ۱/۳۶ تا ۱/۷۱ برابر افزایش پیدا کرده است. همچنین، با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪ نیز مدول یانگ بین ۱/۲۹ تا ۱/۵۳ برابر افزایش یافته است. در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه (شکل ۱۰) با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۶٪، مدول یانگ بین ۱/۵۰ تا ۱/۵۴ برابر و با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪ بین ۱/۳۱ تا ۱/۳۳ برابر افزایش یافته است. در زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه (شکل ۱۱) با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۶٪، مدول یانگ بین ۱/۲۸ تا ۱/۴۷ برابر و با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪، بین ۱/۱۹ تا ۱/۳۳ برابر افزایش یافته است. طبق نتایج بیشترین میزان مدول یانگ مربوط به باطله تثبیت شده با سیمان ۸٪، در رطوبت تراکم سمت خشک، با زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه، برابر ۱۱۶۵/۶۷ مگاپاسگال و کمترین میزان مدول یانگ مربوط به باطله تثبیت شده با سیمان ۴٪، در رطوبت تراکم سمت مرطوب، با زمان عمل‌آوری ۷ روزه، برابر با ۱۶۶/۶۵ مگاپاسگال می‌باشد.

مدول معادل کرنش ۵۰ درصد (مگاپاسگال)

| مقدار سیمان | سمت مرطوب | سمت بهینه | سمت خشک |
|--------------|-----------|-----------|---------|
| ۴ درصد سیمان | ~160 | ~180 | ~210 |
| ۶ درصد سیمان | ~230 | ~310 | ~370 |
| ۸ درصد سیمان | ~350 | ~400 | ~480 |

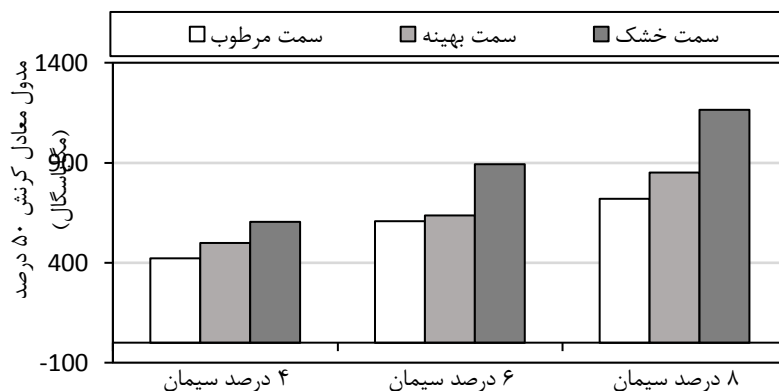


شکل ۹. مدول یانگ (E50) باطله تثبیت شده با سیمان با زمان عمل‌آوری ۷ روزه



شکل ۱۰. مدول یانگ (E50) باطله تثبیت شده با سیمان با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر



شکل ۱۱. مدول یانگ (E50) باطله تثبیت شده با سیمان با زمان عمل آوری ۵۶ روزه

در جدول ۷، رابطه بین مدول یانگ در زمان‌های عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه نشان داده شده است.

جدول ۷. رابطه بین مدول یانگ نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل آوری

| R | P | F _{stat} | معادله | زمان های عمل آوری (روز) |
|-------|----------|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| ۰/۹۵۵ | ۰/۰۰۰۰۱۷ | ۸۳/۵۸۶۲۳ | $E50_{28} = 1.80 E50_7$ | ۲۸ و ۷ |
| ۰/۹۴۲ | ۰/۰۰۰۰۴۷ | ۶۲/۸۰۹۹۱ | $E50_{56} = 2.35 E50_7$ | ۵۶ و ۷ |
| ۰/۹۲۶ | ۰/۰۰۰۱۱۹ | ۴۸/۲۶۹۵۰ | $E50_{56} = 1.30 E50_{28}$ | ۵۶ و ۲۸ |

در این تحقیق، همانند مقاومت فشاری، معادله (۴) به منظور برقراری ارتباط بین مدول یانگ سکانت معادل کرنش ۵۰٪ به عنوان پارامتر مجهول و درصد سیمان و درصد رطوبت به عنوان پارامترهای معلوم پیشنهاد شده است.

(۴)

$$E50 = a + bx + c \ln y$$

در این معادله، E50 برابر با مدول یانگ سکانت معادل کرنش ۵۰٪ برحسب مگاپاسگال، x درصد سیمان و y درصد رطوبت است. ضرایب ثابت a، b و c و سایر داده‌ها در جدول ۸ آورده شده است.

مطابق جدول ۷، رابطه به دست آمده بین مدول یانگ نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌های ۷ و ۵۶ روزه و نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه نشان می‌دهد که مدول یانگ نمونه‌های ۲۸ روزه برابر مدول یانگ نمونه‌های ۷ روزه، مدول یانگ نمونه‌های ۵۶ روزه برابر مدول یانگ نمونه‌های ۷ روزه و مدول یانگ نمونه‌های ۵۶ روزه برابر مدول یانگ نمونه‌های ۲۸ روزه است. در این جدول، آماره F به همراه سطح معنی دار بودن هر یک از معادلات نشان‌دهنده دقت مناسب معادلات رگرسیون است. همچنین، همانگونه که ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی در کلیه معادلات بیش از ۰/۹۲ است.

جدول ۸. تعیین مدول یانگ معادل کرنش ۵۰٪ با توجه به درصد سیمان و درصد رطوبت

| F _{stat} | FitStdErr | R | C | b | a | زمان عمل آوری (روز) |
|-------------------|-----------|------|---------|--------|--------|---------------------|
| ۹۶/۹۴ | ۲۱/۳۴ | ۰/۹۸ | -۲۶۰/۵۶ | ۶۶/۳۱ | ۴۷۹/۲۵ | ۷ |
| ۱۸۵/۰۵ | ۲۴/۲۴ | ۰/۹۹ | -۲۷۸/۰۶ | ۱۰۳/۴۴ | ۵۴۲/۱۹ | ۲۸ |
| ۴۰/۹۴ | ۶۸/۶۸ | ۰/۹۶ | -۷۵۶/۰۵ | ۱۳۴/۹۷ | ۱۵۷۹/۸ | ۵۶ |

مقاومت فشاری و کرنش لحظه شکست توسط سایر محققان اثبات شده است (باشا و همکاران، ۲۰۰۵؛ جهانداری و همکاران، ۲۰۱۹). کرنش لحظه شکست برای زمان عمل‌آوری ۷ روزه با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۸٪ مربوط به نمونه‌های سمت خشک، بهینه و مرطوب در حدود ۰/۹۷ تا ۰/۹۸ برابر و با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪ بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۸ برابر کاهش یافته است. همچنین، در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۸٪ کرنش لحظه شکست بین ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ برابر و با افزایش درصد سیمان از ۶٪ به ۸٪ بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۸ برابر کاهش یافته است. در زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه، با افزایش مقدار سیمان از ۴٪ به ۸٪ کرنش لحظه شکست بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۹ برابر و با افزایش مقدار سیمان از ۶٪ به ۸٪ بین ۰/۹۷ تا ۰/۹۸ برابر کاهش پیدا کرده است.

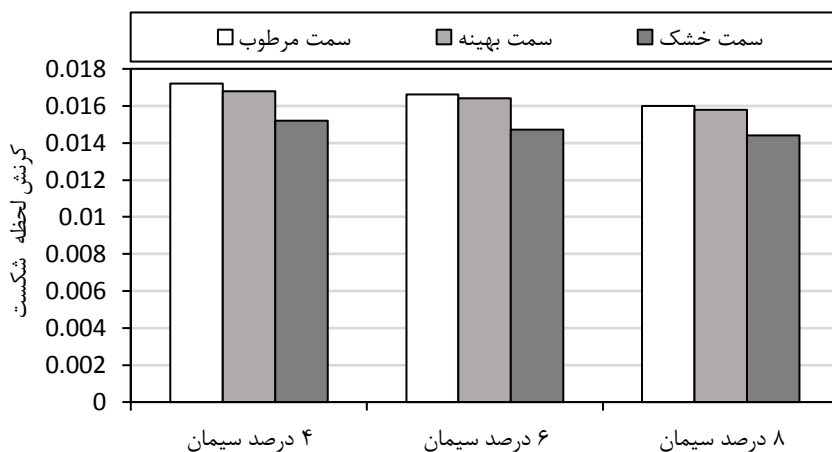
بیشترین مقدار برای کرنش لحظه شکست برابر با ۰/۱۷۲ مربوط به نمونه تثبیت شده با ۴٪ سیمان با رطوبت سمت مرطوب و عمل‌آوری ۷ روزه می‌باشد و کمترین مقدار برابر با ۰/۱۳۶ مربوط به نمونه تثبیت شده با ۸٪ سیمان با رطوبت سمت خشک و عمل‌آوری ۵۶ روزه می‌باشد.

طبق جدول ۸، ضریب همبستگی در کلیه زمان‌های عمل‌آوری بیش از ۰/۹۶ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای معادله پیشنهادی است. همچنین، طبق جدول ۸ در کلیه زمان‌های عمل‌آوری، ضریب c منفی است که نشان‌دهنده رابطه معکوس بین مدول یانگ و درصد رطوبت می‌باشد. به عبارت دیگر، افزایش درصد رطوبت تأثیر منفی بر مدول یانگ می‌گذارد و باعث کاهش آن می‌شود.

۴-۴. تأثیر درصد سیمان، درصد رطوبت و زمان

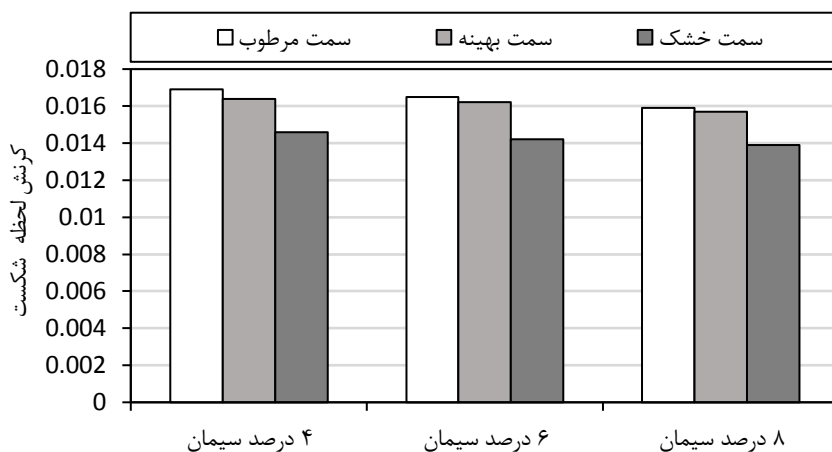
عمل‌آوری بر کرنش لحظه شکست (۴)

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، نمودارهای مربوط به کرنش لحظه شکست که از روی نمودار مقاومت فشاری تک‌محوری به دست آمده‌اند را نشان می‌دهند. روند تغییرات کرنش لحظه شکست رابطه عکس با روند تغییرات مقاومت فشاری دارد، به طوری که با افزایش درصد سیمان، افزایش زمان عمل‌آوری و کاهش درصد رطوبت، کرنش لحظه شکست کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان به رفتار ترد شکن مصالح با مقاومت زیاد نسبت داد. نتایج این تحقیق از دیدگاه رابطه عکس

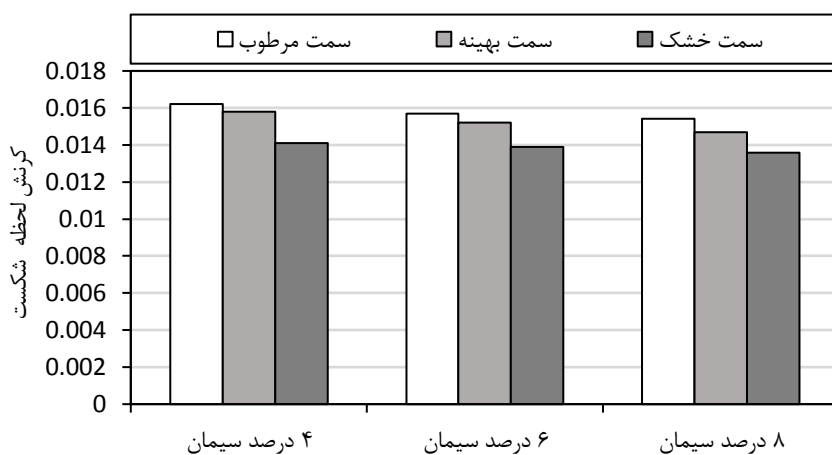


شکل ۱۲. کرنش لحظه شکست باطله تثبیت شده با سیمان با زمان عمل‌آوری ۷ روزه

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر



شکل ۱۳. کرنش لحظه شکست باطله تثبیت شده با سیمان با زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۴. کرنش لحظه شکست باطله تثبیت شده با سیمان با زمان عمل آوری ۵۶ روزه

در جدول ۹، رابطه بین کرنش لحظه شکست در زمان‌های عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه نشان داده شده است.

جدول ۹. رابطه بین کرنش لحظه شکست نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل آوری

| R | p | F _{stat} | معادله | زمان های عمل آوری (روز) |
|-------|----------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| ۰/۹۸۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰ | ۲۱۱/۳۸۰۳ | $\epsilon_{28} = 0.98 \epsilon_7$ | ۲۸ و ۷ |
| ۰/۹۸۱ | ۰/۰۰۰۰۰۱ | ۲۰۶/۰۱۹۴ | $\epsilon_{56} = 0.94 \epsilon_7$ | ۵۶ و ۷ |
| ۰/۹۶۶ | ۰/۰۰۰۰۰۵ | ۱۱۴/۵۱۸۷ | $\epsilon_{56} = 0.96 \epsilon_{28}$ | ۵۶ و ۲۸ |

کرنش شکست نمونه‌های ۷ روزه، کرنش شکست نمونه‌های ۵۶ روزه ۰/۹۴ برابر کرنش شکست نمونه‌های ۷ روزه و کرنش شکست نمونه‌های ۵۶ روزه ۰/۹۶ برابر کرنش شکست نمونه‌های ۲۸ روزه است. در این جدول،

مطابق جدول ۹، معادلات به دست آمده بین کرنش لحظه شکست نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌های ۷ و ۵۶ روزه و نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه نشان می‌دهند که کرنش لحظه شکست نمونه‌های ۲۸ روزه ۰/۹۸ برابر

شکست به عنوان پارامتر مجهول و درصد سیمان و درصد رطوبت به عنوان پارامترهای معلوم پیشنهاد شده است.

$$\varepsilon = a + bx + c \ln y \quad (5)$$

در این معادله، ε کرنش لحظه شکست، x درصد سیمان و y درصد رطوبت است. ضرایب ثابت a ، b و c و سایر داده‌ها در جدول ۱۰ آورده شده است.

آماره F به همراه سطح معنی‌دار بودن هر یک از معادلات نشان‌دهنده دقت مناسب معادلات رگرسیون است. همچنین، همانگونه که ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی در کلیه معادلات بیش از ۰/۹۶ است. در این تحقیق، همانند سایر پارامترهای بررسی شده، معادله (۵) به منظور برقراری ارتباط بین کرنش لحظه

جدول ۱۰. تعیین کرنش لحظه شکست با توجه به درصد سیمان و درصد رطوبت

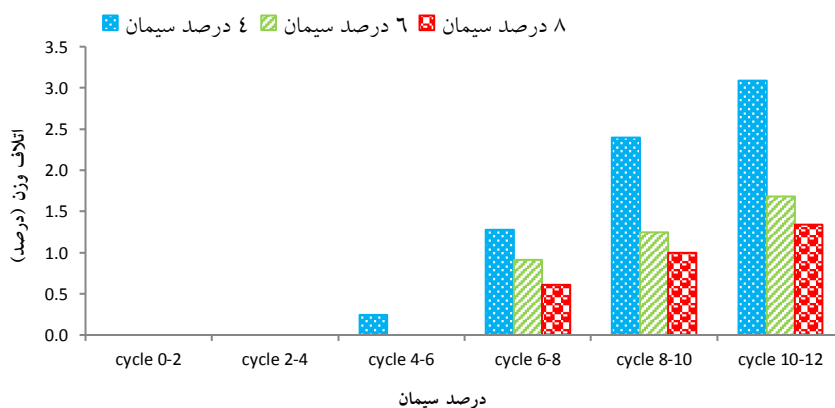
| Fstat | FitStdErr | R | c | b | a | زمان عمل‌آوری (روز) |
|-------|-----------|------|--------|----------|-------|---------------------|
| ۲۹/۱ | ۰/۰۰۰۳۴ | ۰/۹۵ | ۰/۰۰۵ | -۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۸ | ۷ |
| ۲۶/۰۵ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۵ | ۰/۰۰۵۵ | -۰/۰۰۰۴۴ | ۰/۰۰۶ | ۲۸ |
| ۶۲/۱۳ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۹۷ | ۰/۰۰۵ | -۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۷ | ۵۶ |

افزایش درصد سیمان تأثیر منفی بر کرنش لحظه شکست می‌گذارد و باعث کاهش آن می‌شود.

۴-۵. نتایج آزمایش یخبندان- ذوب (F-T)

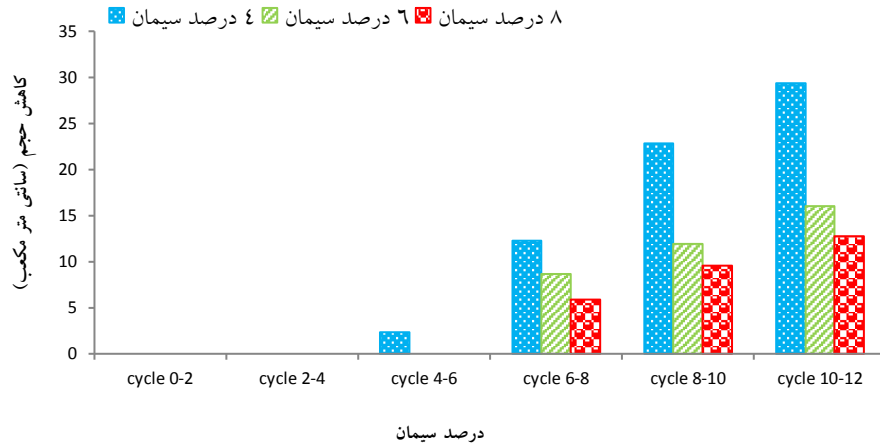
در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، نمودارهای اتلاف وزن و کاهش حجم نمونه‌های باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان در اثر ۱۲ چرخه ذوب و یخبندان آورده شده است.

طبق جدول ۱۰، ضریب همبستگی در کلیه زمان‌های عمل‌آوری بیش از ۰/۹۵ به دست آمده است که نشان‌دهنده دقت زیاد معادله پیشنهادی می‌باشد. از معادلات به دست آمده می‌توان برای پیش‌بینی مقادیر کرنش لحظه شکست استفاده کرد. همچنین، طبق جدول ۱۰، در کلیه زمان‌های عمل‌آوری، ضریب b منفی می‌باشد، که نشان‌دهنده رابطه معکوس بین کرنش لحظه شکست و درصد سیمان می‌باشد. به عبارت دیگر،



شکل ۱۵. نمودار اتلاف وزن باطله تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان در اثر ۱۲ چرخه یخبندان- ذوب

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر



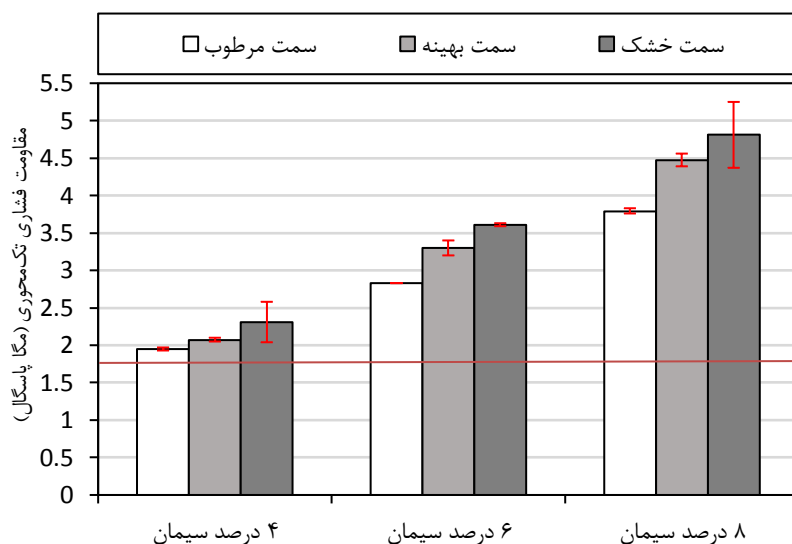
شکل ۱۶. نمودار کاهش حجم باطله تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان در اثر ۱۲ چرخه یخبندان- ذوب

اساس تثبیت شده با سیمان پرتلند برابر با ۲/۱ مگاپاسگال (۳۰۰ PSI) پیشنهاد شده است (لوئیس و همکاران، ۲۰۰۶؛ سید، ۲۰۰۷؛ موریان و همکاران، ۲۰۱۲). در حقیقت، مقاومت فشاری کمتر از ۲/۱ مگاپاسگال منجر به کاهش ظرفیت باربری روسازی تحت بار ترافیک می شود. از طرف دیگر، استفاده از درصدهای زیاد سیمان سبب افزایش بیش از اندازه مقاومت فشاری و در نتیجه افزایش احتمال بروز ترک های انقباضی در لایه تثبیت شده می شود. بنابراین، حداکثر مقدار مقاومت فشاری تک-محوری مصالح اساس تثبیت شده با سیمان به ۲/۸ تا ۳/۵ مگاپاسگال (۵۰۰-۴۰۰ PSI) محدود شده است (ویرتگن، ۲۰۰۴؛ میلر و همکاران، ۲۰۰۶؛ براون، ۲۰۰۶؛ سید، ۲۰۰۷؛ گوتیری و همکاران، ۲۰۰۷؛ بنگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ یوان و همکاران، ۲۰۱۱؛ موریان و همکاران، ۲۰۱۲؛ یانگ و وو، ۲۰۱۴). در این تحقیق، نشریه شماره ۲۶۸ (دفتر امور فنی و تدوین معیارها، ۱۳۸۲) معیار ارزیابی حداقل مقدار مجاز مقاومت فشاری قرار گرفت. مطابق شکل ۱۷ که مقاومت فشاری نمونه های ۷ روزه تثبیت شده با سیمان را نشان می دهد، نمونه تثبیت شده با ۴ درصد سیمان این معیار را برآورده می سازد. بنابراین، مقدار بهینه سیمان از دیدگاه فنی و اقتصادی برابر با ۴٪ است.

طبق شکل های ۱۵ و ۱۶، دوام نمونه ها در برابر چرخه های ذوب و یخبندان با افزایش درصد سیمان افزایش پیدا کرده است. همچنین، با افزایش تعداد چرخه ها، درصد اتلاف وزن و کاهش حجم بیشتر می شود. در چرخه های ابتدایی، کاهش حجم و اتلاف وزن رخ نداده است و از چرخه ۴، نمونه ای که کمترین درصد سیمان را داشت دچار کاهش حجم و کاهش وزن شده است. بیشترین اتلاف وزن مشاهده شده برابر با ۳/۰۹ درصد و بیشترین کاهش حجم ۲۹/۳۴ سانتی متر مکعب مربوط به نمونه تثبیت شده با ۴٪ سیمان بود. طبق نشریه شماره ۲۶۸ (دفتر امور فنی و تدوین معیارها، ۱۳۸۲)، حداکثر درصد افت وزن مجاز برای خاک های گروه A-2-4 تثبیت شده با سیمان برابر با ۱۴٪ است. بنابراین، برای تمامی نمونه ها این معیار رعایت می شود.

۴-۶. تعیین درصد بهینه سیمان

با توجه به نمودار دانه بندی خاک، و طبق نشریه شماره ۲۶۸ (دفتر امور فنی و تدوین معیارها، ۱۳۸۲) حداقل مقاومت فشاری ۷ روزه قابل قبول برای خاک های تثبیت شده با سیمان ۱/۷۹ مگاپاسگال (۲۶۰ PSI) می باشد. همچنین، حداقل مقدار مجاز مقاومت فشاری ۷ روزه



شکل ۱۷. درصد بهینه سیمان با توجه به مقاومت فشاری تک‌محوری ۷ روزه باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان

۵. نتیجه گیری

کرنش لحظه شکست کاهش می‌یابد. همچنین، با کاهش درصد رطوبت، کرنش کاهش می‌یابد.

- نتایج نشان داد که با افزایش میزان سیمان از ۴٪ به ۸٪، برای کلیه زمان‌های عمل‌آوری، مقاومت فشاری بین ۱/۴۵ تا ۲/۱۵ برابر افزایش یافته است. همچنین، مقاومت در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه و ۵۶ روزه به ترتیب در حدود ۱/۷۳ برابر و ۲/۳۴ برابر مقاومت ۷ روزه می‌باشد.

- نتایج آزمایش دوام در برابر چرخه‌های یخبندان و ذوب نشان می‌دهد که با افزایش درصد سیمان، درصد اتلاف وزن و کاهش حجم کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشترین درصد اتلاف وزن و کاهش حجم مربوط به نمونه باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴٪ سیمان و کمترین کاهش وزن و حجم مربوط به باطله تثبیت شده با ۸٪ سیمان بود.

- باطله سنگ آهن تثبیت شده با ۴٪ سیمان طبق نشریه ۲۶۸ معیارهای مقاومت فشاری و دوام در برابر سیکل‌های یخبندان و ذوب را برآورده می‌کند و بنابراین مقدار بهینه سیمان جهت تثبیت باطله برابر با ۴٪ تعیین گردید.

نتایج به دست آمده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده نشان داد که با افزایش درصد سیمان، حداکثر چگالی خشک کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

- مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ تحت تأثیر درصد سیمان، زمان عمل‌آوری و درصد رطوبت می‌باشد. با افزایش درصد سیمان و زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ افزایش و با کاهش درصد رطوبت افزایش می‌یابند. بنابراین، رطوبت سمت خشک نسبت به رطوبت سمت بهینه و سمت بهینه نسبت به سمت مرطوب بیشترین مقاومت فشاری و مدول یانگ را دارد.

- از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌توان نتیجه گرفت که همه‌ی نمونه‌ها معیارهای مقاومتی ۷ روزه را برآورده می‌سازند.

- کرنش لحظه شکست رابطه غیرمستقیم با روند تغییرات در مقاومت فشاری تک‌محوری دارد. با افزایش درصد سیمان، به علت مقاومت زیاد نمونه و ترد بودن، کرنش لحظه شکست کاهش می‌یابد. با افزایش زمان عمل‌آوری،

۶. تشکر و قدردانی

بدینوسیله از پژوهشکده فولاد و سنگ آهن گل گهر و کارشناسان محترم این پژوهشکده به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی از این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

۷. مراجع

اثنی عشری، م. و مرغائی زاده، ا. ۱۳۹۰. "بررسی تأثیر میزان لای بر رفتار و مشخصه‌های مقاومتی خاک تثبیت شده با سیمان". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت ماه، دانشگاه سمنان.

رستگار، پ. و کاووسی، ا. ۱۳۹۴. "تقویت بستر روسازی در مناطق دارای خاک ماسه‌ی لای‌دار با استفاده از الیاف خرما، سیمان و آهک". سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، ۱۰-۸ دی ماه، تهران.

کاووسی، ا. و صائبی، ج. ۱۳۹۵. "تثبیت خاک نامرغوب ساحلی با استفاده از سیمان و الیاف نخل خرما برای بستر روسازی‌ها". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۴): ۷۲-۶۱.

پایدار، ع. ۱۳۹۷. "گزارش سالیانه استخراج، متوسط میزان مصالح استخراجی و دپو شده باطله و سنگ آهن". دفتر فنی مشارکت معدن ۴ گل گهر، سیرجان.

غنی زاده، ع.، ذوالفقاری، م. و عباسلو، ح. ۱۳۹۹. "مشخصات مکانیکی و دوام بستر رسی تثبیت شده با ترکیب باطله سنگ آهن و آهک شکفته". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۶(۳): ۸۸-۶۹.

گلچین فر، ن. و عباسی، ن. ۱۳۹۲. "اثر ذوب و یخبندان‌های مکرر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن". مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۴۵(۲): ۱۲-۱.

نشریه شماره ۲۶۸. ۱۳۸۲. "دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاک‌ریز و روسازی راه‌ها". انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، تهران.

- ASTM D 4972. 2013. "Standard test method for pH of soils". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 854. 2014. "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer on soil". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4318. 2014. "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1557. 2015. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lb/ft³ (2,700 kN-m/m³))". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2166. 2015. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2487. 2015. "Standard test method practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 3282. 2015. "Standard test method practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 422. 2016. "Standard test method for particle-size analysis of soils". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Bang, S., Lein, W., Comes, B., Nehl, L., Anderson, J., Kraft, P. and Huft, D. 2011. "Quality base material produced using full depth reclamation on existing asphalt pavement structure—Task 4: Development of FDR mix design guide (No. FHWA-HIF-12-015)". Federal Highway Administration, Office of Pavement Technology, USA.

- Barati, S., Shourijeh, P. T., Samani, N. and Asadi, S. 2020. "Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: A case study on Golgohar mine". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Published online: 23 May 2020.
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B. and Muntohar, A. S. 2005. "Stabilization of clay and residual soils using cement-rice husk ash mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 5(1): 448-453.
- Bastos, C. A. L., Silva, C. G., Mendes, C. J. and Peixoto, F. A. R. 2016. "Using iron ore tailings from tailing dams as road material". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(10): 1-9.
- Brown, A. V. 2006. "Cement stabilization of aggregate base materials blended with reclaimed asphalt pavement". MSc., Thesis, Brigham Young University.
- Castro-Gomes, J. P., Silva, A. P., Cano, R. P., Durán Suarez, J. and Albuquerque, A. 2012. "Potential for reuse of tungsten mining waste-rock in technical-artistic value-added products". *J. Clean. Prod.*, 25: 34-41.
- Etim, R. K., Eberemu, A. O. and Osinubi, K. J. 2017. "Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture". *Transport. Geotech.*, 10: 85-95.
- Ghanizadeh, A. R., Yarmahmoudi, A. and Abbaslou, H. 2020. "Mechanical properties of low plasticity clay soil stabilized with iron ore mine tailing and Portland cement". *J. Min. Environ.*, 11(3): 837-853.
- Guthrie, W. S., Brown, A. V. and Eggett, D. L. 2007. "Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement". *Transport. Res. Record*, 2026(1): 47-53.
- Jahandari, S., Saberian, M., Zivari, F., Li, J., Ghasemi, M. and Vali, R. 2019. "Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid". *Int. J. Geotech. Eng.*, 13(2): 172-183.
- Kuranchie, F. A. 2015. "Characterisation and applications of iron ore tailings in building and construction projects". Ph.D Dissertations, School of Engineering, Faculty of Health, Engineering and Science, Edith Cowan University, Perth, Australia.
- Lewis, D. E., Jared, D. M., Torres, H. and Mathews, M. 2006. "Georgia's use of cement-stabilized reclaimed base in full-depth reclamation". *Transport. Res. Record*, 1952(1): 125-133.
- Li., H. B. 2014. "Experimental research on performance of road base with cement stabilized iron tailings sand". *Applied Mechanics and Materials*, 513-517, 60-64.
- Manjunatha, L. S. and Sunil, B. M. 2013. "Stabilization/solidification of iron ore mine tailings using cement, lime and fly ash". *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 2(12): 625-635.
- Miller, H. J., Guthrie, W. S., Crane, R. A. and Smith, B. 2006. "Evaluation of cement-stabilized full-depth-recycled base materials for frost and early traffic conditions". Final Report, No. 01531742, Recycled Materials Resource Center.
- Morian, D. A., Solaimanian, M., Scheetz, B. and Jahangirnejad, S. 2012. "Developing standards and specifications for full depth pavement reclamation (No. FHWA-PA-2012-004-090107)". Pennsylvania Department of Transportation, USA.
- Qi, J. L., Zhang, J. M. and Zhu, Y. L. 2004. "Influence of freezing–thawing on soil structure and its soils mechanics significance". *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 22(2): 2690–2694.
- Sherkat-e-Madani va Sanati Golgohar. 1398. Site Sherkat-e-Madani va Sanati Golgohar. <http://www.geg.ir/index.aspx?siteid=1&fkeyid=&siteid=1&pageid=173>.
- Sun, J. S., Dou, Y. M., Chen, Z. X. and Yang, C. F. 2011. "Experimental study on the performances of cement stabilized iron ore tailing gravel in highway application". *Appl. Mech. Mater.*, 97: 425-428.
- Syed, I. M. 2007. "Full-depth reclamation with Portland cement: A study of long-term performance". Portland Cement Association, No. 09-3465. 2009.
- Wirtgen GmbH. 2004. "Cold recycling manual". 2nd edition, Windhagen, Germany.
- Xu, S. 2013. "Research on application of iron tailings on road base". *Adv. Mater. Res.*, 743: 54-57.
- Yang, Y. H. and Wu, Y. B. 2014. "Mix design for full-depth reclaimed asphalt pavement with cement as stabilizer". *Advanced Characterization of Asphalt and Concrete Materials*, International Conference on Sustainable Civil Infrastructure, Yichang Hubei, China.
- Yuan, D., Nazarian, S., Hoyos, L. R. and Puppala, A. J. 2011. "Evaluation and mix design of cement-treated base materials with high content of reclaimed asphalt pavement". *Transport. Res. Record*, 2212(1): 110-119.

مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل گهر