

مشخصات مکانیکی و دوام بستر رسی تثبیت شده با ترکیب باطله سنگ آهن و آهک شکفته

علیرضا غنی زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

مهدی ذوالفقاری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

حانیه عباسلو، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

Email: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

چکیده

از جمله راهکارهای مناسب برای برخورد با خاک‌های کم‌مقاومت و مسئله‌دار در راه‌سازی، تثبیت خاک است. از طرفی، بهره‌گیری از ضایعات معدنی، از جمله باطله سنگ آهن، در مصالح ساختمانی به دلایل زیست‌محیطی و اقتصادی در چند سال اخیر مد نظر قرار گرفته است. هدف این تحقیق، تثبیت خاک رس سرخه با استفاده از آهک شکفته و باطله سنگ آهن است. برای این منظور، نمونه‌هایی با صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد آهک هیدراته و صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد باطله سنگ آهن در سه درصد مختلف رطوبت (بهینه، سمت مرطوب و سمت خشک) تراکم گردیده و سپس جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) به مدت ۷، ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری شدند. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که با فرض ثابت بودن درصد باطله، افزایش درصد آهک تا یک مقدار مشخص (۴٪) باعث افزایش مقاومت فشاری و مدول یانگ می‌گردد و پس از آن سبب کاهش مقاومت فشاری و مدول یانگ نمونه‌ها می‌شود. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ، با افزایش درصد رطوبت تراکم کاهش می‌یابند و برعکس، با کاهش درصد رطوبت، این دو پارامتر افزایش می‌یابند. مقاومت فشاری نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه با توجه به درصد آهک و درصد رطوبت تراکم به ترتیب افزایش ۸۴ الی ۲۵۹، ۹۷ الی ۲۹۰ و ۱۱۰ الی ۳۴۲ درصدی از خود نشان داد. نتایج آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان نشان داد که افزایش درصد باطله سنگ آهن تا یک مقدار مشخص (بین ۲ الی ۴ درصد) باعث کاهش افت وزنی و حجمی می‌شود و پس از آن، افت وزنی و حجمی افزایش می‌یابد. با لحاظ نمودن 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 تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: خاک رس، باطله سنگ آهن، آهک شکفته، مقاومت و دوام

۱. مقدمه

سنگ آهن در مهندسی عمران و بخصوص مصالح راه-سازي انجام شده است. در ادامه، به تحقیقات انجام شده در این خصوص اشاره شده است.

شو و همکاران (۲۰۱۳) امکان استفاده از باطله سنگ آهن و سیمان در لایه اساس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان بیشتر از ۱۵٪ باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری محصور نشده می شود و می توان مصالح تثبیت شده را در لایه اساس و زیراساس راه های کم تردد استفاده نمود. ارزیابی های انجام شده توسط هانگبین (۲۰۱۴) نشان داد که استفاده از باطله سنگ آهن در اساس ماکادامی تثبیت شده با سیمان، از یک سو می تواند مقدار زیادی از این مواد را مصرف کند و از سوی دیگر می تواند آسیب های ناشی از انباشت آن را کاهش دهد. کورانچی (۲۰۱۵) تحقیقی با هدف بررسی رفتار بار-نشست پی نواری احداث شده روی ضایعات سنگ آهن انجام داد. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری و مدول عکس العمل بستر با افزایش عمق پایه و تراکم نسبی ضایعات، افزایش می یابد که در مقایسه با خاک ماسه ای، دارای ظرفیت باربری و سختی قابل توجهی است. قاسمی و نظام آبادی (۱۳۹۵-الف) در تحقیق خود به بررسی تأثیر ضایعات معدن سنگ آهن بر مقاومت فشاری شفته آهک پرداختند. نتایج نشان داد که اضافه کردن ضایعات معدن سنگ آهن به شفته آهک باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری می شود. این تحقیق نشان داد که میزان بهینه ضایعات ۲۰٪ و بهینه آهک نیز ۲٪ است. قاسمی و نظام آبادی (۱۳۹۵-ب) تأثیر ضایعات معدن سنگ آهن بر مقاومت ملات ماسه سیمان را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که اضافه کردن ضایعات معدن سنگ آهن به سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری می شود. همچنین، این تحقیق نشان داد که میزان بهینه ضایعات ۱۰٪ و بهینه سیمان نیز ۶٪ است. باستوس و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی قابلیت استفاده از باطله سنگ آهن به عنوان مواد جایگزین برای زیرسازی جاده ها پرداختند. نتایج نشان

نیاز به ساخت زیرساخت های حمل و نقل روی بسترهای ضعیف و خاک های مسئله دار، مهندسين را به سمت بهره گیری از روش های بهسازی و تثبیت خاک با هدف افزایش توان باربری خاک بستر سوق داده است. تثبیت خاک های ضعیف و مسئله دار به کمک افزودنی های شیمیایی همچون آهک یا سیمان از جمله روش های کاربردی هستند که در بیشتر پروژه های عمرانی، به خصوص در راه سازی، استفاده می شوند (کنسولی و همکاران، ۲۰۰۲). تثبیت خاک رس به وسیله آهک شامل اختلاط آهک با خاک رس و سپس متراکم کردن آن در درصد رطوبت بهینه است. آهکی که برای تثبیت خاک های ریزدانه مورد استفاده قرار می گیرد معمولاً به صورت آهک شکفته، آهک زنده یا آهک زنده دولومیتی است. در تثبیت خاک با آهک، قسمتی از مواد پوزولانی توسط خاک تأمین می شود و احتیاج به مواد پوزولانی دیگر مثل سیمان نیست (تیموری و تیموری یانسری، ۱۳۹۳).

افزودنی های معمول برای تثبیت خاک، شامل آهک، سیمان و قیر می باشند. با این وجود، پژوهشگران به استفاده نوآورانه از مواد زائد روی آورده اند و به طور مداوم در حال پژوهش در این زمینه هستند. این تحقیقات شامل قابلیت استفاده، امکان پذیر بودن، سازگاری با محیط زیست و کارایی این مواد زائد است (کولینز و سیسیلسکی، ۱۹۹۳).

تحقیقات انجام شده در خصوص تثبیت خاک رس با استفاده از آهک نشان دهنده بهبود مشخصات مهندسی خاک از جمله حدود اتربرگ، سی بی آر، مقاومت فشاری و مدول یانگ خاک پس از تثبیت با آهک است (دهر و حسین، ۲۰۱۹؛ جهانداری و همکاران، ۲۰۱۹؛ سریدوی و همکاران، ۲۰۱۹). برخی از نتایج تحقیقات پیشین در خصوص تثبیت خاک با استفاده از آهک به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. با این وجود، تا کنون تحقیقات محدودی در زمینه به کارگیری باطله

و ۲۸ روزه، افزایش و پس از آن کاهش داد. همچنین، با افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن تا ۸٪، مقدار CBR اشباع و غیراشباع به حداکثر مقدار خود رسید و پس از آن کاهش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار بهینه آهک ۸٪ و مقدار بهینه ضایعات سنگ آهن نیز ۸٪ است. در جدول ۱، نتایج برخی از تحقیقات انجام شده در مورد تثبیت خاک‌های رسی با آهک نشان داده شده است. با توجه به پیشینه تحقیق ارائه شده، تا کنون تأثیر باطله معدن سنگ آهن گل گهر سیرجان بر مقاومت فشاری محصور نشده، مدول یانگ و دوام خاک رس تثبیت شده با آهک بررسی نشده است. در تحقیق حاضر، مقاومت فشاری، مدول یانگ، نسبت باربری کالیفرنیا و دوام در برابر سیکل‌های ذوب-یخبندان خاک رس تثبیت شده با آهک و باطله سنگ آهن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

داد که باطله سنگ آهن امکان استفاده در لایه‌های روسازی پس از تثبیت شیمیایی را دارد. همچنین، سیمان مؤثرترین تثبیت‌کننده باطله سنگ آهن در بین سایر افزودنی‌ها بود. ناگارج و شیرپاسوی (۲۰۱۷) تحقیقی با هدف بررسی استفاده از باطله سنگ آهن در آماده‌سازی بلوک‌های تثبیت‌شده‌ی متراکم انجام دادند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری بلوک‌ها با افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری، افزایش می‌یابد. اُسینوبی و همکاران (۲۰۱۷) تثبیت خاک پنبه سیاه با آهک و ضایعات سنگ آهن را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن تا ۸٪، دانسیته خشک افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن، مقدار رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. به‌علاوه، افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن تا ۸٪، مقاومت فشاری محصور نشده را برای دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴

جدول ۱. برخی از نتایج تحقیقات انجام شده در خصوص تثبیت خاک‌های رسی با آهک

مرجع	خمیری زیاد / خمیری کم	آزمایش‌های انجام شده	نتیجه
حسین و همکاران (۲۰۰۷)	خمیری زیاد خمیری کم	تراکم پراکنور استاندارد	- کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه
هریکین و همکاران (۲۰۱۱)	خمیری زیاد خمیری کم	تراکم پراکنور استاندارد	- کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه
		حدود اتربرگ	- کاهش دامنه خمیری
حسینی و همکاران (۱۳۹۳)	خمیری کم	تراکم پراکنور استاندارد	- کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه
		مقاومت فشاری تک‌محوری	- تا یک مقدار معین افزایش و سپس کاهش
		نسبت باربری کالیفرنیا	- افزایش نسبت باربری کالیفرنیا
		حدود اتربرگ	- کاهش دامنه خمیری
		تراکم پراکنور استاندارد	- کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه
روح‌بخشان و کلانتری (۱۳۹۳)	خمیری کم	مقاومت فشاری تک‌محوری	- تا یک مقدار معین افزایش و سپس کاهش
		نسبت باربری کالیفرنیا	- تا یک مقدار معین افزایش و سپس کاهش
عبدی و رهبر عربانی (۱۳۹۴)	خمیری کم	مقاومت فشاری	- افزایش مقاومت فشاری

مشخصات مکانیکی و دوام بستر رسی تثبیت شده با ترکیب باطله سنگ آهن و آهک شکفته

عابدی کوپایی و همکاران (۲۰۱۵)	خمیری کم	تراکم پراکتور استاندارد - کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه	- کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه
گارزیون و همکاران (۲۰۱۶)	خمیری زیاد	مقاومت فشاری تک محوری حدود اتربرگ	- افزایش مقاومت فشاری - کاهش دامنه خمیری
نوهو (۲۰۱۷)	خمیری زیاد	تراکم پراکتور استاندارد حدود اتربرگ	- کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه - کاهش دامنه خمیری
هریش (۲۰۱۷)	خمیری زیاد	مقاومت فشاری تک محوری حدود اتربرگ	- افزایش مقاومت فشاری - کاهش دامنه خمیری
ایتیم و همکاران (۲۰۱۷)	خمیری زیاد	تراکم پراکتور استاندارد نسبت باربری کالیفرنیا	- کاهش حداکثر چگالی خشک - افزایش رطوبت بهینه - افزایش مقاومت فشاری نسبت باربری کالیفرنیا

۲. مواد و مصالح

۱-۲. خاک و باطله سنگ آهن

خصوصیات خاک رس سرخه و باطله سنگ آهن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، ترکیبات شیمیایی خاک رس سرخه و باطله سنگ آهن در جدول ۳ آورده شده است. علاوه بر این، نمودار دانه بندی خاک رس سرخه و باطله سنگ آهن در شکل ۱ و تحلیل تفرق اشعه ایکس (XRD) خاک رس سرخه و باطله سنگ آهن در شکل ۲ نشان داده شده است.

خاک مورد بررسی در این پژوهش، خاک رس سرخه بود که از محلی در ۶۰ کیلومتری شهرستان سیرجان واقع در استان کرمان جمع آوری شده بود. همچنین، در این پژوهش، از باطله سنگ آهن معدن گل گهر سیرجان که در کیلومتر ۵۰ جاده شیراز قرار دارد، استفاده شده است.

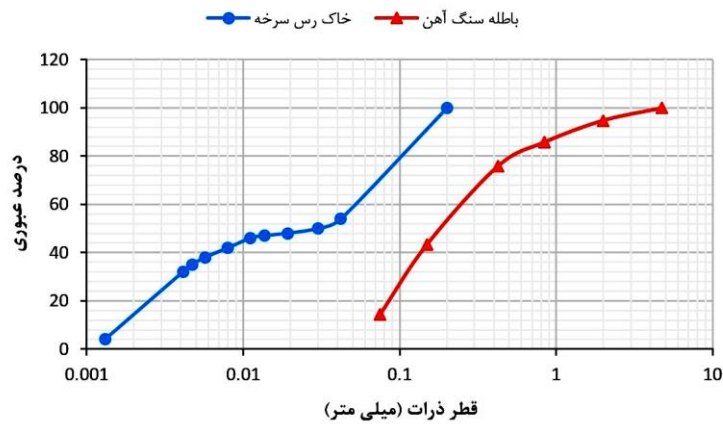
جدول ۲. مشخصات خاک رس با میزان خمیری کم و باطله سنگ آهن

مشخصات	استاندارد	خاک رس	باطله سنگ آهن
طبقه بندی آشتو	ASTM D3282	A-6	A-2-4
طبقه بندی یونیفاید	ASTM D2487	CL	SM
چگالی دانه ها (G _s)	ASTM D854	۲/۴۵	۲/۹۵
حد روانی	ASTM D4318	۳۶/۵۸	NP
حد خمیری	ASTM D4318	۲۲/۲۴	NP
شاخص خمیری	ASTM D4318	۱۴/۳۴	NP
حد انقباض	ASTM D427	۱۷/۷۶	۳۰/۴۳
pH	ASTM D4972	۷/۷۰	۸/۸۱

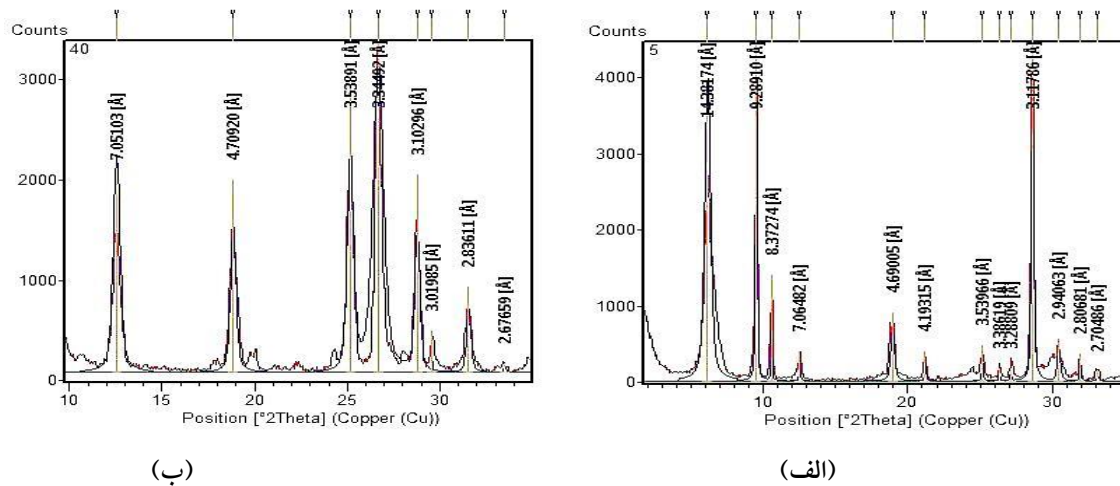
NP: Non Plastic

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی خاک رس و باطله سنگ آهن مصرفی

ترکیبات	خاک رس (%)	باطله سنگ آهن (%)
SiO ₂	۴۹/۴۸۲	۳۵/۹۵۲
Al ₂ O ₃	۱۲/۳۷۷	۵/۹۰۷
Fe ₂ O ₃	۷/۵۹۲	۲۲/۱۷۴
CaO	۹/۰۹۹	۹/۲۴۹
Na ₂ O	۰/۴۹۳	۰/۹۳۷
MgO	۴/۵۵۸	۱۴/۱۵۸
K ₂ O	۲/۸۵۶	۱/۸۵۵
TiO ₂	۰/۶۴۳	۰/۶۲۹
MnO	۰/۰۹۸	۰/۰۷۷
P ₂ O ₅	۰/۰۹۳	۰/۴۵۱
LOI	۱۲/۵	۱/۸



شکل ۱. نمودار دانه بندی خاک رس و باطله سنگ آهن



شکل ۲. تحلیل عنصری مصالح مصرفی: الف) خاک رس و ب) باطله سنگ آهن

در این پژوهش، ابتدا درصدهای مختلف باطله سنگ آهن (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به خاک رس اضافه و سپس هر یک از ترکیبات خاک به دست آمده با درصدهای مختلف آهک (صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد) تثبیت شد. به منظور تعیین درصد رطوبت بهینه جهت طرح اختلاط، از آزمایش تراکم پراکتور استاندارد استفاده شد که مطابق گزارش دپارتمان حمل و نقل ایندیانا (۲۰۰۸) برای خاک‌های عبوری از الک نمره ۴ مطابق AASHTO T-99 یا ASTM D698 انجام می‌شود. به این صورت که روی هر ترکیب (مقدار مشخصی از رس، باطله سنگ آهن و آهک) به روش پنج نقطه‌ای (پنج درصد رطوبت مختلف) آزمایش تراکم انجام و پس از ترسیم نمودار تغییرات درصد رطوبت در مقابل چگالی خشک، مقدار رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک برای ترکیب مورد نظر تعیین شد. در مجموع، ۱۲۰ آزمایش پراکتور به منظور تعیین رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک ترکیب‌های مختلف انجام شد.

۲-۳. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

(UCS)

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D2166 انجام شد. بدین صورت که نمونه‌های مختلفی از هر ترکیب با سه درصد رطوبت مختلف (رطوبت بهینه، ۱۰ درصد بیشتر از رطوبت بهینه (سمت مرطوب)، ۱۰ درصد کمتر از رطوبت بهینه (سمت خشک)) به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۵۰ میلی‌متر ساخته شد. در مجموع، تعداد ۱۴۴ نمونه مقاومت فشاری ساخته شد. سپس، این نمونه‌ها به مدت ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در کیسه پلاستیکی عمل‌آوری شدند (شکل ۳-الف). به منظور تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری، نمونه‌ها در زیر دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شدند (شکل ۳-ب). همچنین، مدول یانگ با استفاده از شیب نمودار تنش و کرنش حاصل از نتایج آزمایش مقاومت فشاری

با توجه به شکل ۲، خاک رس سرخه دارای کانی‌های اسمکتایت، میکا، گچ، کائولینایت، کوارتز و مگنتیت و باطله سنگ آهن دارای کانی‌های هماتیت، مگنتیت، کوارتز، فلدسپار و اسپینل است.

۲-۲. آهک

آهک مورد استفاده در این پژوهش آهک هیدراته بود که از شرکت زلال‌سازان جاده مخصوص کرج تهیه شده بود و با معیارهای استاندارد ASTM C977 مطابقت داشت. مشخصات و ترکیبات شیمیایی آهک هیدراته به ترتیب در جداول ۴ و ۵ داده شده است.

جدول ۴. مشخصات آهک هیدراته

مشخصات	
نام	آهک هیدراته
فرمول خطی	Ca(OH) ₂
وزن مولکولی	۷۴ گرم بر مول
فرم	پودر
چگالی	۴۵۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب
pH	۱۱ تا ۱۲ در ۲۰ درجه سلسیوس

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی آهک هیدراته

ترکیبات شیمیایی (%)	
۹۰	هیدروکسید کلسیم (Ca(OH) ₂)
۱/۵	اکسید کلسیم - آهک زنده
۱	CaO(free)
۰/۶	اکسید منیزیم (MgO)
۰/۵	دی اکسید سیلیسیم (SiO ₂)
۰/۲	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃)
۱/۶	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)(III)
۴/۶	اکسید استرانسیم (SrO)
	درصد کاهش وزن ناشی از احتراق (LoI)
	مقدار ناچیز
	تری اکسید گوگرد (SO ₃)

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱. آزمایش تراکم

مدول یانگ سکانت (E50) و کرنش شکست (ε_f) در جدول پیوست (الف) آورده شده است.



(ب)

تک محوری تعیین شد. نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری تک محوری شامل مقاومت فشاری (UCS)،



(الف)

شکل ۳. الف) نحوه عمل آوری نمونه‌های مقاومت فشاری تک محوری در کیسه پلاستیکی و ب) دستگاه مقاومت فشاری تک محوری متصل به رایانه

یخبندان تکمیل می‌شود (شکل ۴). کاهش حجم و وزن نمونه‌ها پس از ۵ سیکل ذوب و یخبندان به ترتیب از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند.

$$\text{کاهش حجم} = \frac{W_{d1} - W_{d2}}{\gamma_d} \quad (5)$$

$$\text{کاهش وزن} = \frac{W_{d1} - W_{d2}}{W_{d1}} \quad (6)$$

که در این روابط، W_{d1} وزن خشک نمونه قبل از قرار دادن در دستگاه ذوب و یخبندان (گرم)، W_{d2} وزن خشک نمونه بعد از طی کردن سیکل‌های ذوب و یخبندان (گرم) و γ_d حداکثر چگالی خشک خاک (گرم بر سانتی متر مکعب) است.



شکل ۴. نمونه‌ها در دستگاه ذوب و یخبندان پس از طی ۵ سیکل

۳-۳. آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و

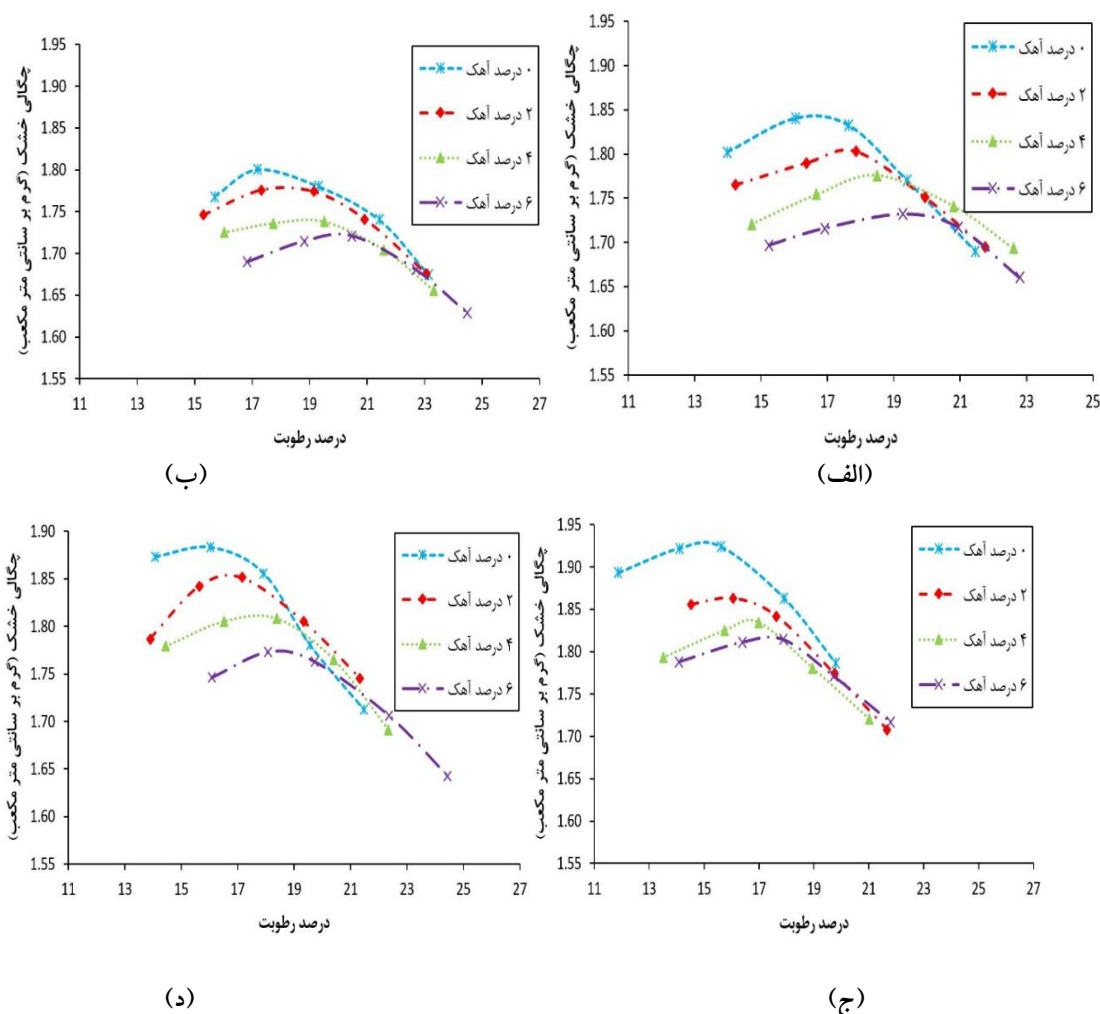
یخبندان (F-T)

بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، درصد بهینه آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک رس سرخه حاوی باطله سنگ آهن تعیین شد. از این رو، آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان تنها برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه آهک انجام شد. برای کلیه نمونه‌ها، آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان در ۵ سیکل مطابق استاندارد ASTM C1262 انجام شد. نمونه‌ها ابتدا در درصد رطوبت بهینه و مطابق انرژی اعمال شده در آزمایش پراکتور استاندارد متراکم و سپس به مدت ۷ روز عمل آوری شدند. نمونه‌های عمل آوری شده در دستگاه ذوب و یخبندان تحت اثر پنج سیکل ذوب و یخبندان در داخل ۱/۵ سانتی متر محلول آب نمک ۳٪ قرار داده شدند. دستگاه ذوب و یخبندان ابتدا نمونه‌ها را در دمای ۱۸- درجه سلسیوس به مدت ۴ تا ۵ ساعت قرار می‌دهد تا چرخه انجماد انجام شود و سپس نمونه‌ها را در دمای ۲۴ درجه سلسیوس به مدت ۲/۵ ساعت قرار می‌دهد تا چرخه ذوب تکمیل گردد. با انجام یک چرخه انجماد و ذوب، یک سیکل ذوب و

۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمایش تراکم ترکیب‌های مختلف خاک، باطله سنگ آهن و آهک در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵. نمودارهای تراکم خاک، آهک و درصد‌های مختلف باطله سنگ آهن. الف) صفر درصد باطله سنگ آهن، ب) ۱۰ درصد باطله سنگ آهن، ج) ۲۰ درصد باطله سنگ آهن، د) ۳۰ درصد باطله سنگ آهن

چگالی خشک می‌تواند به دلیل وزن مخصوص نسبتاً بیشتر باطله سنگ آهن باشد که با وزن مخصوص ۲/۹۵ جایگزین ذرات خاک با وزن مخصوص ۲/۴۵ شده است. نتایج مشابهی توسط سایر محققین گزارش شده است (کلاگری و همکاران، ۱۳۹۵؛ اریول و موزز، ۲۰۱۰؛ آسینوبی و همکاران، ۲۰۱۵). کاهش رطوبت بهینه احتمالاً می‌تواند ناشی از افزایش ریزدانه (آهک و باطله سنگ آهن) باشد. به طور کلی، باطله سنگ آهن و آهک

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد باطله سنگ آهن در درصد‌های مختلف آهک، رطوبت بهینه کاهش و حداکثر چگالی خشک افزایش می‌یابد. افزایش مقدار حداکثر چگالی خشک، احتمالاً حاصل پر شدن حفرات ماتریس خاک با ذرات آهک و باطله سنگ آهن است که باعث فولکوله و توده شدن ذرات خاک به علت تبادل کاتیونی می‌شود (أفلاهرتی، ۱۹۸۸؛ آسینوبی، ۲۰۰۰). علاوه بر این، افزایش حداکثر

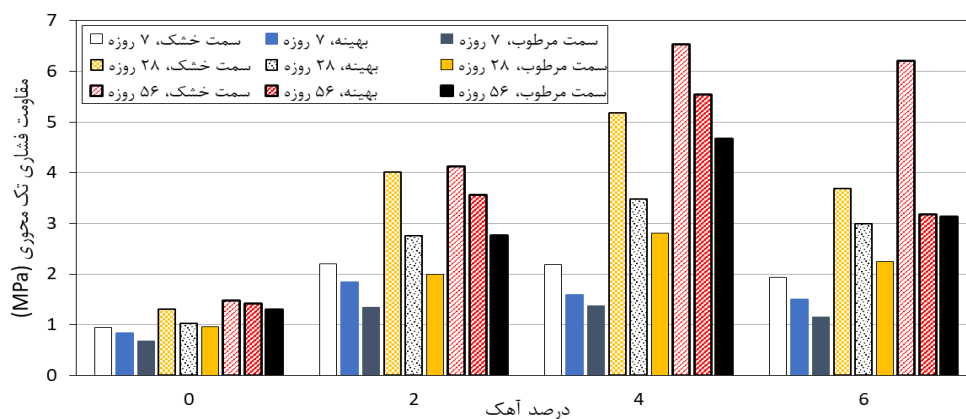
آهک بود. همچنین، بیشترین وزن مخصوص (۱/۹۲ گرم بر سانتی متر مکعب) مربوط به نمونه خاک حاوی ۳۰٪ باطله و بدون آهک و کمترین وزن مخصوص (۱/۷۱ گرم بر سانتی متر مکعب) مربوط به نمونه خاک حاوی ۶٪ آهک و بدون باطله می باشد.

۴-۲. تأثیر درصد آهک، درصد باطله، رطوبت تراکم و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری (UCS)

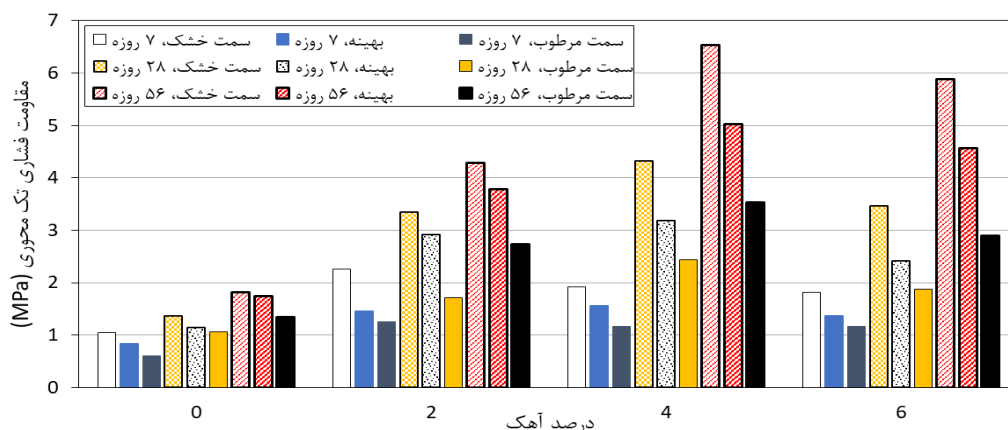
در شکل های ۶ الی ۹، نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مخلوط خاک، آهک و باطله سنگ آهن که به مدت ۷، ۲۸ و ۵۶ روز عمل آوری شده اند، نشان داده شده است.

سطح زیادی را پوشش می دهند که برای انجام واکنش نیاز به آب بیشتری می باشد. همچنین، می تواند به علت حجم بیشتری از آب مورد نیاز برای هیدراته شدن مخلوط خاک، آهک و باطله سنگ آهن باشد. نتایج مشابهی توسط سایر محققین گزارش شده است (کلاگری و همکاران، ۱۳۹۵؛ اریول و موزز، ۲۰۱۰؛ اُسینوی و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر این، احتمالاً می تواند به علت جذب کل آب توسط خاک باشد که در آن تمام آب مورد استفاده قرار می گیرد و منجر به کاهش هیدراتاسیون می شود (موزز و همکاران، ۲۰۱۲).

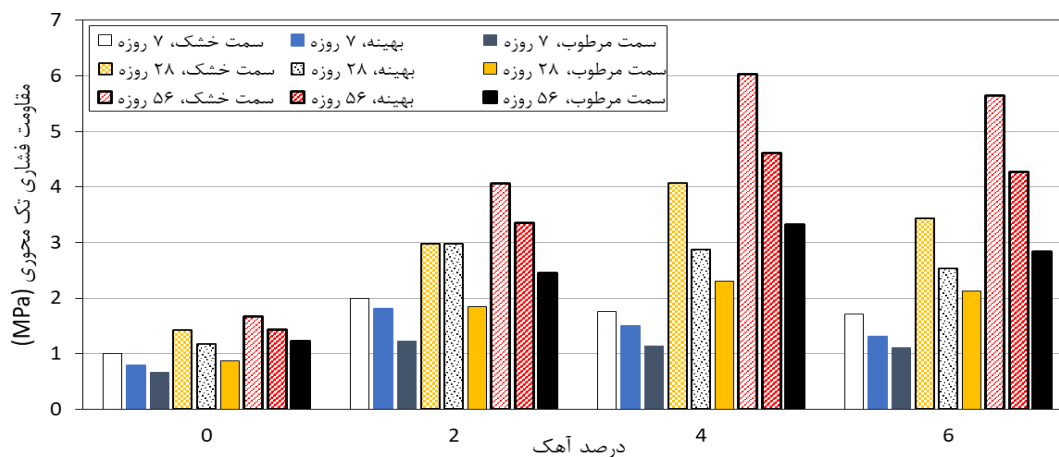
با توجه به بررسی انجام شده، بیشترین درصد رطوبت بهینه (۲۰٪) مربوط به نمونه خاک بدون باطله و حاوی ۶٪ آهک و کمترین درصد رطوبت بهینه (۱۵/۳ درصد) مربوط به نمونه خاک حاوی ۳۰٪ باطله و بدون



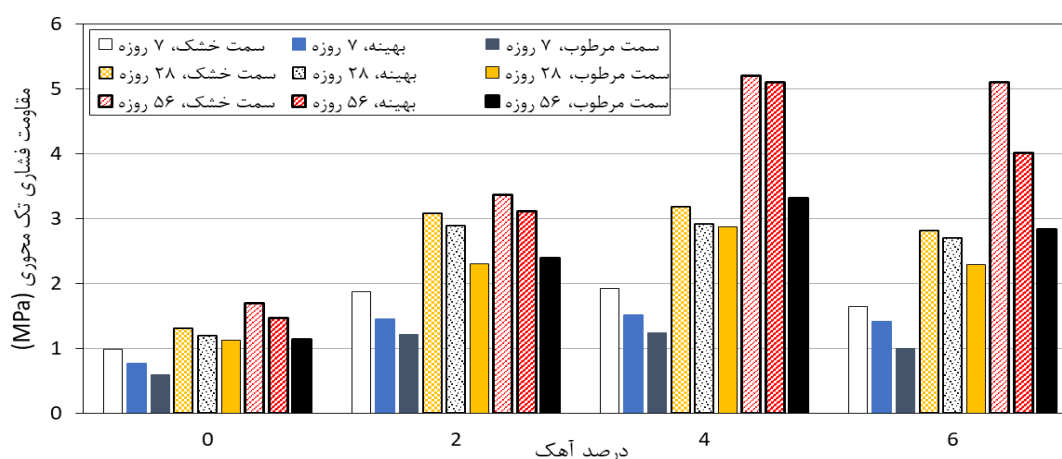
شکل ۶. مقاومت فشاری تک محوری مخلوط خاک و آهک (بدون باطله سنگ آهن) در زمان های مختلف عمل آوری



شکل ۷. مقاومت فشاری تک محوری مخلوط خاک، آهک و ۱۰٪ باطله در زمان های مختلف عمل آوری



شکل ۸. مقاومت فشاری تک محوری مخلوط خاک، آهک و ۲۰٪ باطله در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۹. مقاومت فشاری تک محوری مخلوط خاک، آهک و ۳۰٪ باطله در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

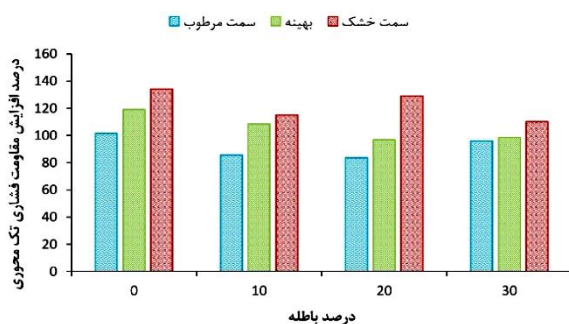
وجود سیلیکا و آلومینای کافی در سیستم برای تداوم واکنش‌های پوزولانی است. در این شرایط، آهک به صورت آزاد در محیط باقی مانده و اصطکاک و چسبندگی کم آن سبب کاهش مقاومت می‌شود. درصد بهینه آهک با توجه به زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز بین ۲ الی ۴ درصد و در زمان عمل‌آوری ۵۶ روز ۴٪ در حقیقت، در زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، واکنش پوزولانی آهک با خاک رس سرخه و باطله سنگ آهن هنوز کامل نشده و به همین دلیل میزان بهینه آهک در ترکیب بین ۲ الی ۴ درصد متغیر است. در زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه، واکنش پوزولانی آهک با خاک رس سرخه و باطله سنگ آهن به طور کامل انجام و کل آهک مورد استفاده مصرف می‌شود و به همین دلیل درصد بهینه

با توجه به شکل ۶ ملاحظه می‌شود که در درصد‌های ثابت باطله، با افزایش آهک تا یک مقدار مشخص، مقاومت فشاری تک محوری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بنابراین، افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با افزایش درصد آهک تا یک مقدار مشخص امکان پذیر بوده و افزایش آهک به بیش از این مقدار تأثیری در بیشتر شدن مقاومت نخواهد داشت که با نتایج سایر محققین مطابقت دارد (طباطبایی و سلامت، ۱۳۹۲؛ روح بخشان و کلانتری، ۱۳۹۳؛ کلاگری و همکاران، ۱۳۹۵؛ بل، ۱۹۹۶؛ خمیسا و محامدی، ۲۰۱۴؛ عسگری و همکاران، ۲۰۱۵؛ گودرزی، ۲۰۱۷). گودرزی (۲۰۱۷) بیان نموده که علت کاهش مقاومت خاک در حضور مقادیر زیاد آهک، انحلال کامل ذرات رس و عدم

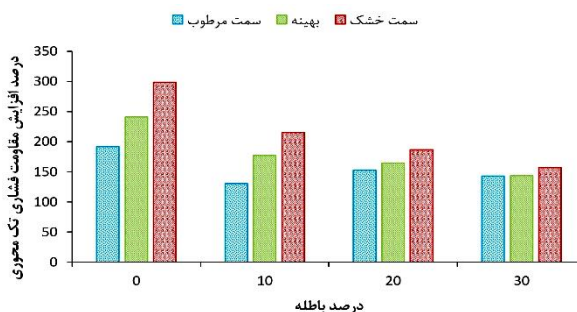
که این پارامتر نظیر افزایش نسبت آب به سیمان در بتن سبب کاهش مقاومت فشاری خاک می‌گردد. بنابراین، می‌توان دید که از نظر اجرایی، تراکم لایه تثبیت شده با رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه، سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خواهد شد. البته باید توجه داشت که در این حالت، با توجه به کاهش کارپذیری خاک تثبیت شده، نیاز است تا از غلظت‌های سنگین‌تری استفاده شود. از دیدگاه مقاومت فشاری، درصد بهینه آهک با توجه به زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز، بین ۲ الی ۴ درصد و با توجه به زمان عمل‌آوری ۵۶ روز، ۴٪ می‌باشد. حداکثر درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها به ازای درصد آهک بهینه برای زمان‌های مختلف عمل‌آوری در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ ارائه شده است.

آهک در ترکیب ۴٪ است. همچنین، ملاحظه می‌شود که رابطه مشخصی بین درصد باطله سنگ‌آهن و مقاومت فشاری تک‌محوری وجود ندارد. همچنین، مطابق انتظار، با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

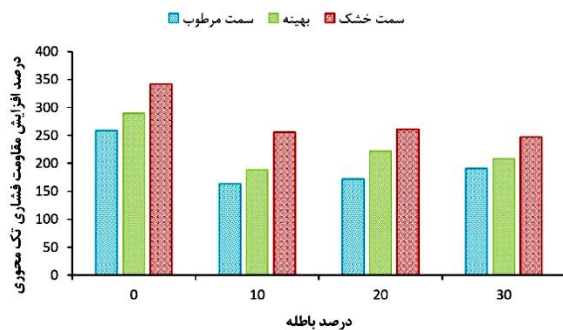
ارزیابی تأثیر رطوبت تراکم (بهینه، سمت خشک و سمت مرطوب) بر مقاومت فشاری نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بدون توجه به زمان افزایش رطوبت تراکم کاهش و با کاهش رطوبت تراکم افزایش می‌یابد. این نتیجه با تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین انطباق دارد (میورا و همکاران، ۲۰۰۲؛ عسگری و همکاران، ۲۰۱۵). در حقیقت، با افزایش درصد رطوبت، نسبت آب به آهک در خاک تثبیت شده اضافه می‌شود



شکل ۱۰. حداکثر درصد افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها به ازای درصد آهک بهینه و عمل‌آوری ۷ روز



شکل ۱۱. حداکثر درصد افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها به ازای درصد آهک بهینه و عمل‌آوری ۲۸ روز



شکل ۱۲. حداکثر درصد افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها به ازای درصد آهک بهینه و عمل آوری ۵۶ روز

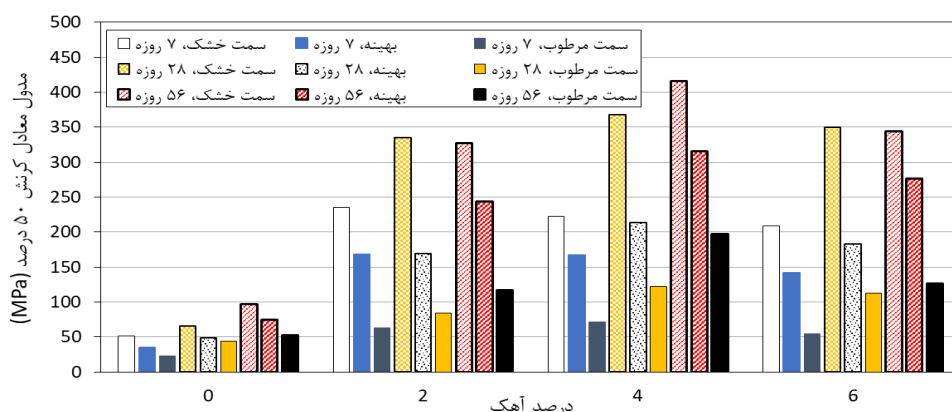
مقاومت فشاری تک محوری است که این نتیجه با نتایج سایر محققین در خصوص خاک‌های تثبیت شده با آهک انطباق دارد (بوز و همکاران، ۲۰۱۸؛ دهر و حسین، ۲۰۱۹). به این صورت که با فرض ثابت بودن درصد باطله، با افزایش درصد آهک تا یک مقدار مشخص، مدول یانگ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. از دیدگاه دستیابی به حداکثر مقدار مدول یانگ، درصد بهینه آهک، با توجه به زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روز بین ۲ الی ۴ درصد و با توجه به زمان عمل آوری ۵۶ روز، ۴٪ است. همچنین، ملاحظه می‌شود که رابطه مشخصی بین درصد باطله سنگ آهن و مدول یانگ وجود ندارد.

ارزیابی تأثیر رطوبت تراکم (بهبه، سمت خشک و سمت مرطوب) بر مدول یانگ نیز نشان می‌دهد که همانند مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ با افزایش رطوبت تراکم کاهش و با کاهش رطوبت تراکم افزایش می‌یابد.

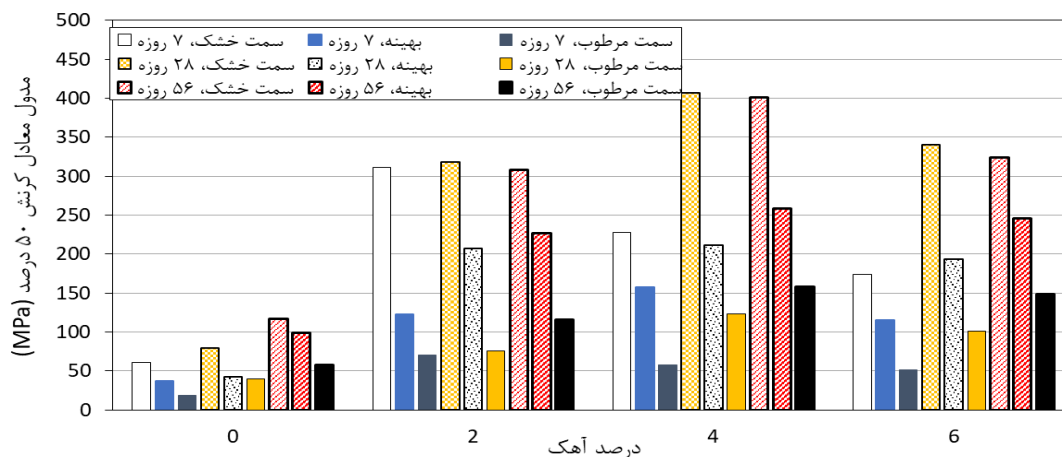
با توجه به شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، ملاحظه می‌شود که حداکثر افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه به ترتیب برای رطوبت سمت مرطوب به ترتیب در حدود ۸۴ تا ۱۰۱، ۱۳۰ تا ۱۹۲ و ۱۹۱ تا ۲۵۹ درصد، برای رطوبت بهینه در حدود ۹۷ تا ۱۱۹، ۱۴۴ تا ۲۴۱ و ۱۸۹ تا ۲۹۰ درصد و برای رطوبت سمت خشک در حدود ۱۱۰ تا ۱۳۴، ۱۵۷ تا ۲۹۸ و ۲۴۸ تا ۳۴۲ درصد است.

۳-۴. تأثیر درصد آهک، درصد باطله، رطوبت تراکم و زمان عمل آوری بر مدول یانگ سکانت (E50)

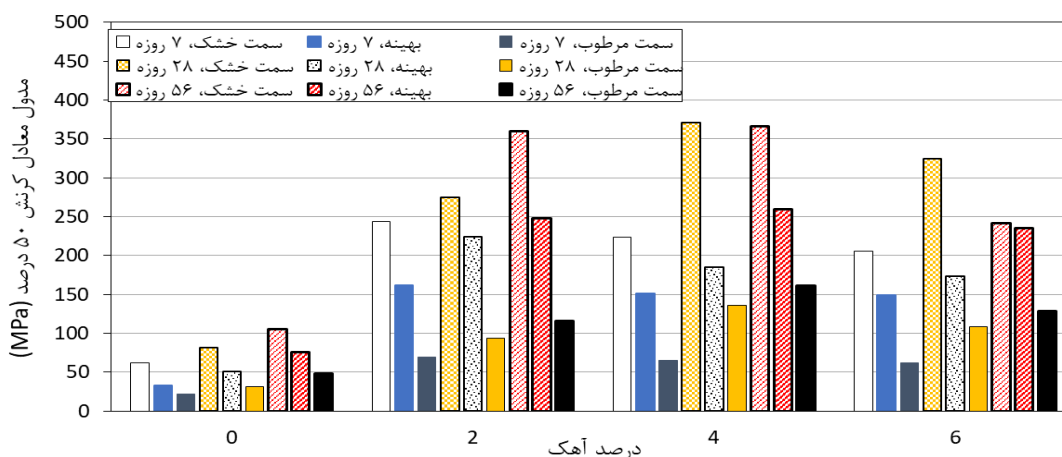
مدول یانگ سکانت معادل کرنش ۰.۵٪ (E50) حاصل آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، روند تغییرات مدول یانگ، مشابه روند تغییرات



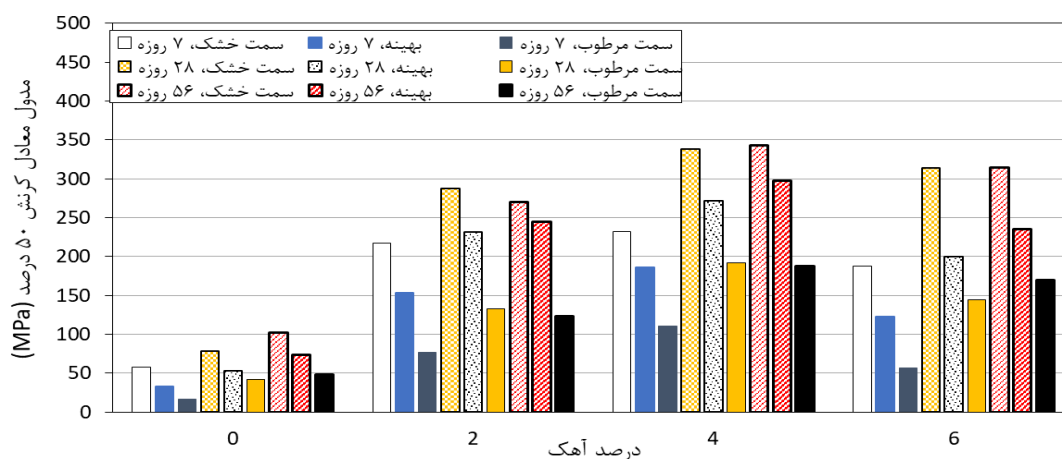
شکل ۱۳. مدول یانگ (E50) مخلوط خاک و آهک (بدون باطله سنگ آهن) در زمان‌های مختلف عمل آوری



شکل ۱۴. مدول یانگ (E_{50}) مخلوط خاک، آهک و ۱۰٪ باطله در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۱۵. مدول یانگ (E_{50}) مخلوط خاک، آهک و ۲۰٪ باطله در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

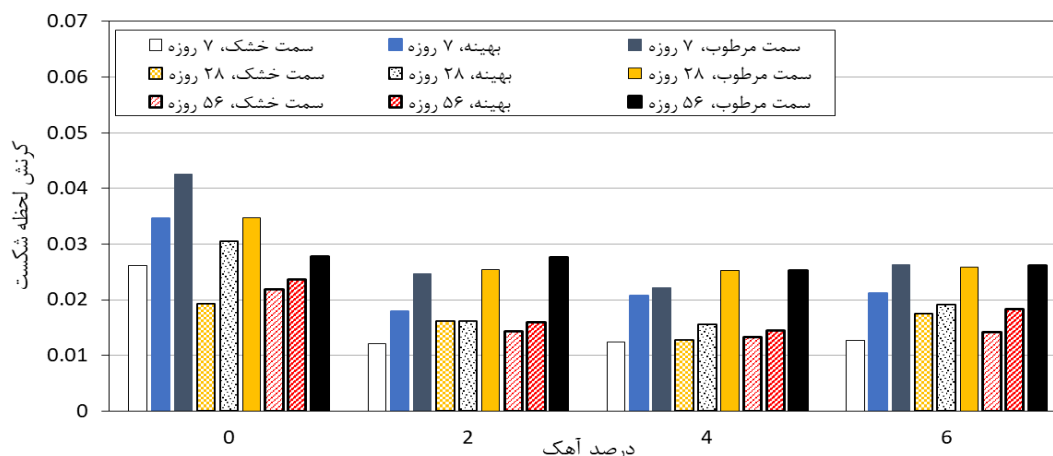


شکل ۱۶. مدول یانگ (E_{50}) مخلوط خاک، آهک و ۳۰٪ باطله در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

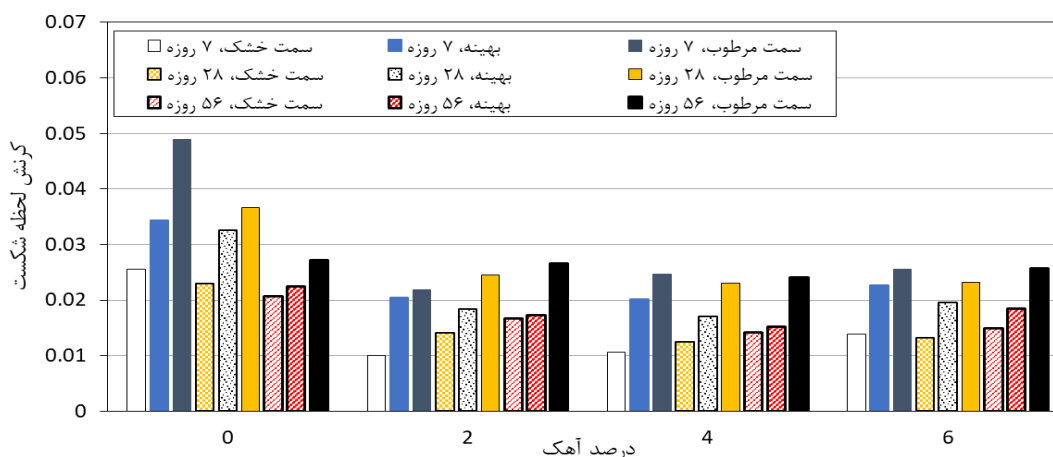
تحقیق از دیدگاه ارتباط معکوس مقاومت فشاری و کرنش شکست توسط سایر محققین نیز به اثبات رسیده است (باشا و همکاران، ۲۰۰۵؛ جهاننداری و همکاران، ۲۰۱۹).

به علاوه، ملاحظه می شود که کرنش شکست برای نمونه های متراکم شده در سمت خشک، کمتر از نمونه های متراکم شده در سمت مرطوب است. کرنش شکست نمونه های ۷ روزه در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵۱، نمونه های ۲۸ روزه در محدوده ۰/۱۲ الی ۰/۳۵ و نمونه های ۵۶ روزه در محدوده ۰/۱۱ الی ۰/۲۹ قرار دارد.

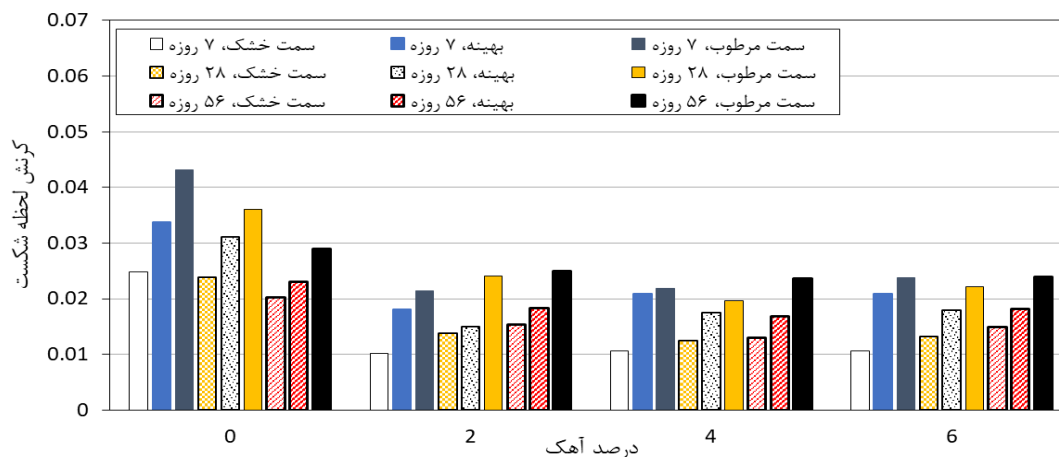
۴-۴. تأثیر درصد آهک، درصد باطله، رطوبت تراکم و زمان عمل آوری بر کرنش لحظه شکست همانطور که در شکل های ۱۷ الی ۲۰ ملاحظه می شود، روند تغییرات کرنش شکست عکس روند تغییرات مقاومت فشاری است. به عبارت دیگر، در درصد های ثابت باطله، با افزایش آهک تا یک مقدار مشخص، کرنش شکست کاهش و سپس افزایش می یابد. علت این امر را می توان به ترد و سخت شدن نمونه های دارای مقاومت فشاری بیشتر ارتباط داد که سبب می شود تا این نمونه ها کرنش کمتری را قبل از شکست تحمل کنند. نتایج این



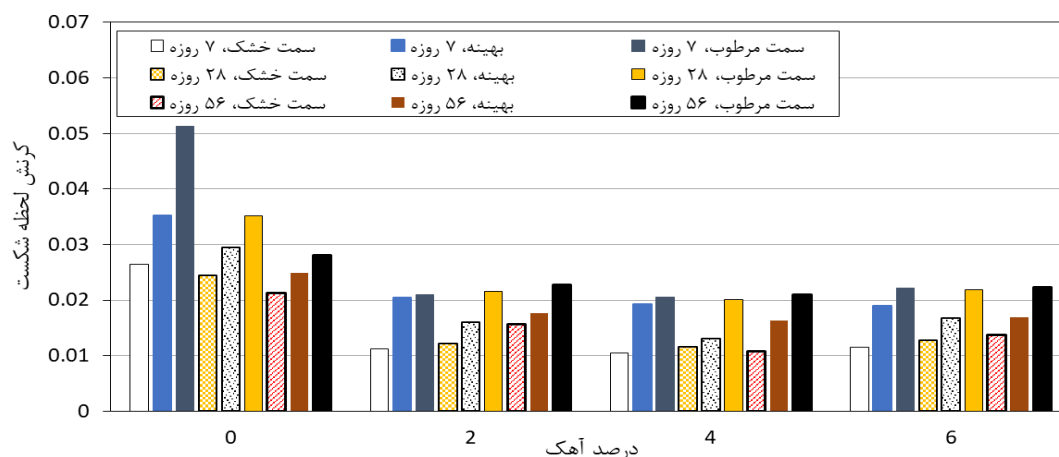
شکل ۱۷. کرنش شکست مخلوط خاک و آهک (بدون باطله سنگ آهن) در زمان های مختلف عمل آوری



شکل ۱۸. کرنش شکست مخلوط خاک، آهک و ۱۰٪ باطله در زمان های مختلف عمل آوری



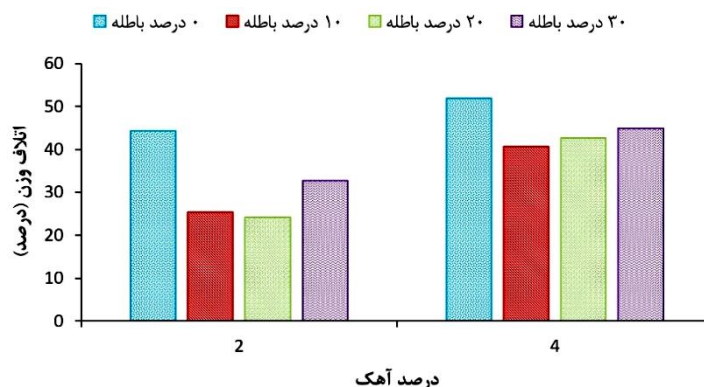
شکل ۱۹. کرش شکست مخلوط خاک، آهک و ۲۰٪ باطله در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



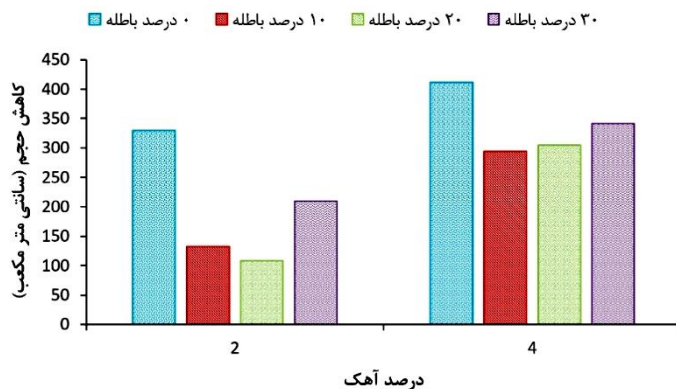
شکل ۲۰. کرش شکست مخلوط خاک، آهک و ۳۰٪ باطله در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

۴-۵. نتایج آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان (F-T)

آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان برای ترکیب‌های مختلف خاک و باطله سنگ‌آهن تثبیت شده با ۲ و ۴ درصد آهک، در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۲۱. نمودار اتلاف وزن ترکیبات خاک و باطله سنگ‌آهن با درصد بهینه آهک در اثر ۵ سیکل ذوب و یخبندان



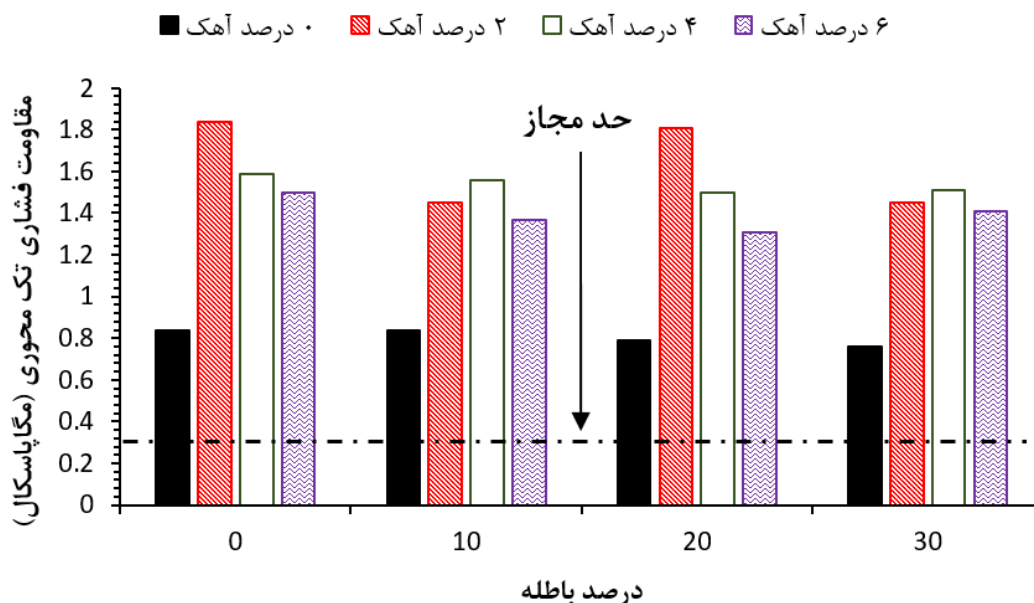
شکل ۲۲. نمودار کاهش حجم ترکیبات خاک و باطله سنگ آهن با درصد بهینه آهک در اثر ۵ سیکل ذوب و یخبندان

ضوابط و معیارهای تعیین شده برای خاک بستر تثبیت شده با آهک لازم می‌دانند که خاک تثبیت شده پس از عمل‌آوری به مدت ۷ روز، حداقل افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری ۰/۳۴۵ مگاپاسکال (۵۰ پوند بر اینچ مربع) را کسب نماید (گوکر و همکاران، ۱۹۵۶؛ بکام و هایکینز، ۱۹۹۸؛ دیارتمان حمل و نقل تگزاس، ۲۰۰۲؛ هریس و همکاران، ۲۰۰۶؛ دهر و حسین، ۲۰۱۹). نمودار تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه به ازای درصد‌های مختلف آهک و باطله سنگ آهن در شکل ۲۳ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، از دیدگاه مقاومت فشاری تک‌محوری، تثبیت خاک رس سرخه با بیش از ۲٪ آهک و اضافه نمودن باطله سنگ آهن به میزان صفر الی ۳۰ درصد این معیار را برآورده می‌سازد. لازم به ذکر است که نمونه‌های تثبیت نشده با وجود اینکه مقاومت قابل قبولی دارند، ولی در زمان جذب آب و اشباع شدن متورم شده و مقاومت خود را به شدت از دست می‌دهند. با این وجود، معیار دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان، درصد بهینه باطله سنگ آهن را بین ۱۰ الی ۲۰ درصد تعیین می‌کند. بنابراین، به منظور استفاده هر چه بیشتر از مصالح باطله در جهت کاهش اثرات سوء زیست‌محیطی این مصالح، درصد بهینه باطله برابر با ۲۰٪ و از نظر اقتصادی کمترین میزان آهک مورد نیاز برابر با ۲٪ تعیین می‌گردد.

بررسی این دو شکل نشان می‌دهد که با افزایش درصد باطله، دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین دوام در نمونه‌های حاوی ۲٪ آهک با افزودن ۲۰٪ باطله و بیشترین دوام در نمونه‌های حاوی ۴٪ آهک با افزودن ۱۰٪ باطله حاصل می‌شود. همچنین، باید توجه داشت که دوام نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد باطله بسیار نزدیک به هم است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن باطله سنگ آهن به خاک رس تثبیت شده با آهک تا میزان ۳۰٪ وزنی سبب افزایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان خاک تثبیت شده می‌شود.

مطابق شکل ۲، دانه‌بندی خاک رس سرخه میان‌تهی و دانه‌بندی باطله به صورت یکنواخت است. با توجه به یکسان بودن حدود ۵۰٪ وزنی این دو خاک از نظر ابعاد مصالح، اضافه شدن این دو خاک به یکدیگر تا محدوده مشخصی باعث نزدیک شدن دانه‌بندی به حالت متراکم (خوب دانه‌بندی شده) می‌شود و همین بهبود منحنی دانه‌بندی سبب افزایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان خواهد شد.

۵. تعیین درصد بهینه آهک و باطله سنگ آهن جهت تثبیت خاک رس سرخه



شکل ۲۳. نمودار مقاومت فشاری ۷ روزه مخلوط خاک، آهک و باطله سنگ آهن (در رطوبت بهینه)

۶. نتیجه گیری

تک محوری با افزایش درصد آهک تا یک مقدار مشخص افزایش و سپس کاهش می یابد، مدول یانگ نیز با افزایش درصد آهک تا یک مقدار مشخص افزایش و سپس کاهش می یابد.

- با افزایش آهک در درصدهای ثابت باطله سنگ آهن، تا یک مقدار معین کرنش شکست نمونه ها کاهش و سپس افزایش

می یابد. همچنین، افزایش رطوبت تراکم باعث افزایش کرنش شکست نمونه ها و کاهش رطوبت تراکم باعث کاهش کرنش شکست نمونه ها می شود.

- در آزمایش دوام در برابر سیکل های ذوب و یخبندان، کمترین اتلاف وزن و کاهش حجم مربوط به ۱۰ و ۲۰ درصد باطله سنگ آهن است.

- افزایش درصد باطله سنگ آهن به ازای ۲ و ۴ درصد آهک تا یک مقدار مشخص باعث افزایش دوام و سپس باعث کاهش دوام خاک تثبیت شده می شود.

- درصد بهینه باطله و آهک هیدراته برای تثبیت بسترهای رسی با خمیری کم به ترتیب برابر با ۲۰ و ۲ درصد است.

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر قابل بیان می باشند:

- نتایج آزمایش تراکم نشان داد که افزایش آهک باعث افزایش رطوبت و کاهش حداکثر چگالی خشک ترکیب خاک رس سرخه و باطله سنگ آهن می شود. همچنین، افزایش درصد باطله سنگ آهن باعث کاهش رطوبت و افزایش حداکثر چگالی خشک می شود.

- مقاومت فشاری تک محوری به شدت تحت تأثیر زمان عمل آوری و رطوبت است. به گونه ای که با افزایش رطوبت، مقاومت فشاری تک محوری کاهش و با کاهش رطوبت و افزایش زمان عمل آوری، مقاومت فشاری تک محوری افزایش می یابد. مقاومت فشاری نمونه های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه با توجه به درصد آهک و درصد رطوبت تراکم به ترتیب افزایش ۸۴ الی ۲۵۹، ۹۷ الی ۲۹۰ و ۱۱۰ الی ۳۴۲ درصدی از خود نشان می دهند.

- مدول یانگ نسبت مستقیم با مقاومت فشاری تک محوری دارد و همان طور که مقاومت فشاری

۷. مراجع

- توکلی کلاگری، ا.، شوش پاشا، ع. و دهستانی، م. ۱۳۹۵. "تثبیت خاک رس با استفاده از آهک و باطله ذغال سنگ". چهارمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- تیموری، ا. و تیموری یانسری، م. ۱۳۹۳. "تثبیت خاک و مصالح شنی با آهک در طرح روسازی". ماهنامه بین‌المللی راه و ساختمان، ۹۷: ۱۲-۱۹.
- حسینی، ر.، رهنما، ج. و سلوکی، ح. ۱۳۹۳. "بررسی تثبیت خاک با استفاده از آهک به منظور بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های ریزدانه برای اهداف راه‌سازی در دشت سیستان". اولین همایش ملی معماری، عمران و محیط‌زیست شهری. روح‌بخشان، آ. و کلاتری، ب. ۱۳۹۳. "تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی". نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۴۸(۴): ۴۳۸-۴۲۹.
- نظام‌آبادی، ب. و قاسمی، م. ۱۳۹۵-الف. "بررسی تأثیر ضایعات معدن سنگ آهن بر مقاومت فشاری شفته آهک". سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران.
- نظام‌آبادی، ب. و قاسمی، م. ۱۳۹۵-ب. "بررسی تأثیر ضایعات معدن سنگ آهن بر مقاومت ملات ماسه سیمان". سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران.
- AASHTO. 2004. "Moisture-density relations of soils using a 2.5-kg (5.5-lb) rammer and a 305-mm (12-in.) drop". The National Academies Press.
- Abedi Koupai, J., Norouzian, K. and Abbasi, N. 2015. "Evaluation of durability and stability of clay soils stabilized using hydrated lime nearby hydraulic structures". J. Water Soil Sci., 19(73): 249-261.
- Asgari, M. R., Baghebanzadeh Dezfuli, A. and Bayat, M. 2015. "Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. Arab. J. Geosci., 8(3): 1439-1452.
- ASTM. 2008. "Test method for shrinkage factors of soils by the mercury method". D427-04, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2010. "Standard specification for quicklime and hydrated lime for soil stabilization". C977-10, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2010. "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass". D2216-10, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2011. "Standard specification for fly ash and other pozzolans for use with lime for soil stabilization". C593-06, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2012. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))". D698-12, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2013. "Standard test method for pH of soils". D4972-13, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2014. "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer". D854-14, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2015. "Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes". D3282-15, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2016. "Standard test method for particle-size analysis of soils". D422-63, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2016. "Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants". D421-85, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2016a. "Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils". D1883-16, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2016b. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil". D2166-16, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2017a. "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils". D4318-17e1, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM. 2017b. "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)". D2487-17, West Conshohocken, PA, United States.
- Basha, E. A. R., Hashim, Mahmud, H. B. and Muntohar, A. S. 2005. "Stabilization of clay and residual soils using cement-rice husk ash mixtures". Constr. Build. Mater., 19(6): 448-453.
- Bastos, L. A. D. C., Silva, G. C., Mendes, J. C. and Peixoto, R. A. F. 2016. "Using iron ore tailings from tailing dams as road material". J. Mater. Civ. Eng., 28(10): 1-9.

- 1- Beckham, T. L. and Hopkins, T. C. 1998. "Use of hydrated lime byproduct for stabilization of subgrade soils". Kentucky Transportation Center Research Report.
- Bell F. G. 1996. "Lime stabilization of clay minerals and soils". Eng. Geol., 42(4): 223-237.
- Boz, A., Sezer, A., Özdemir, T., Hizal, G. E. and Dolmacı, Ö. A. 2018. "Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers". Arab. J. Geosci., 11(6): 122-136.
- Collins, R. J. and Ciesielski, S. K. 1993. "Recycling and use of waste materials or byproducts in highway construction". NCHRP Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board, 92 p.
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D. M. and Pasa, G. S. 2002. "Engineering behavior of sand reinforced with plastic waste". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 128(6): 462-472.
- Dhar, S. and Hussain, M. 2019. "The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade soil in road construction". Int. J. Geotech. Eng., DOI: 10.1080/19386362.2019.1598623.
- Etim, R., Eberemu, A. and Osinubi, K. 2017. "Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture". Transport. Geotech., 10: 85-95.
- Garzón, E., Cano, M., OKelly, B. C. and Sánchez-Soto, P. J. 2016. "Effect of lime on stabilization of phyllite clays". Appl. Clay Sci., 123: 329-334.
- Goecker, W., Moh, Z., Davidson, D. and Chu, T. 1956. "Stabilization of fine and coarse-grained soils with lime-fly ash admixtures". Highway Res. Board Bull., 129: 63-82.
- Goodarzi, A. R. 2017. "Effect of curing temperature and SiO₂-nanoparticles on the engineering properties of lime treated expansive soil". Modares Civ. Eng. J., 17(3): 132-144.
- Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. 2011. "Effect of curing time on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana". Int. J. Civ. Eng., 9(2): 90-96.
- Harish, G. 2017. "Studies on stabilization of black cotton soil using lime". Int. Res. J. Eng. Technol., 4(6): 1725-1727.
- Harris, P., Von Holdt, J., Sebesta, S. and Scullion, T. 2006. "Recommendations for stabilization of high-sulfate soils in Texas". Transport. Res. Record, 1952(1): 71-79.
- Hossain, K., Lachemi, M. and Easa, S. 2007. "Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of papua new guinea". Resour., Conserv. Recy., 51(4): 711-731.
- Indiana Department of Transportation. 2008. "Design procedures for soil modification or stabilization". Office of Geotechnical Engineering, Indianapolis, IN.
- 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.
- Khemissa, M. and Mahamedi, A. 2014. "Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay". Appl. Clay Sci., 95: 104-110.
- Kuranchie, F. A. 2015. "Characterization and applications of iron ore tailings in building and construction projects". PhD Dissertation, Edith Cowan University.
- Li, H. B. 2014. "Experimental research on performance of road base with cement stabilized iron tailings sand". Appl. Mech. Mater., 513-517: 60-64.
- Miura, N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T. S. 2002. "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content". Soils Found., 41(5): 33-45.
- Moses, G., Saminu, A. and Oriola, F. O. P. 2012. "Influence of compactive efforts on compacted foundry sand treated with cement kiln dust". Civ. Environ. Res., 2: 11-24.
- Nagaraj, H. B. and Shreyasvi, C. 2017. "Compressed stabilized earth blocks using iron mine spoil waste- an explorative study". Proced. Eng., 180: 1203-1212.
- Noohu, N. K. 2017. "Effect of lime on geotechnical properties of marine clay". Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol., 6(4).
- O'Flaherty, C. A. 1988. "Highway volume 2: Highway Engineering". Edward Arnold, London.
- Oriola, F. and Moses, G. 2010. "Groundnut shell ash stabilization of black cotton soil". Electron. J. Geotech. Eng., 15(1): 415-428.
- Osinubi, K. J. 2000. "Stabilization of tropical black clay with cement and pulverized coal bottom ash admixture". PP. 289-302. In: Cheuler, D., Sandra, L. H. and Chang, N. Y. (Eds.), Advances in Unsaturated Geotechnics, ASCE GSP, No. 99.
- Osinubi, K. J., Yohanna, P. and Eberemu, A. O. 2015. "Cement modification of tropical black clay using iron ore tailings as admixture". Transport. Geotech., 5: 35-49.
- Osinubi, K. J., Etim, R. K. and Eberemu, A. O. 2017. "Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture". Transport. Geotech., 10: 85-95.
- Sridevi, G., Sahoo, S. and Sen, S. 2019. "Stabilization of expansive soil with red mud and lime". In: Thyagaraj, T. (Ed.), Ground Improvement Techniques and Geosynthetics, Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 14, Springer, Singapore.

