

ارزیابی تأثیر سیمان پرتلند آهکی بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی بستر رسی تثبیت شده

سید فرزین فائزی^{۱*}، مهرداد میرشکاریان بابکی^۲، سیدرضا شریفی^۳

۱- استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- دانش آموخته دوره دکتری، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*F.faezi@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۰

چکیده

بسترهای رسی در حالت خشک از استحکام و سختی مناسبی برخوردار هستند ولی در حضور رطوبت مقاومت آنها به شدت افت کرده و بستر مستعد تغییر شکل‌های پلاستیک شده و ظرفیت باربری آن کاهش محسوسی می‌کند. پس هدف از این پژوهش ارزیابی فنی تأثیر سیمان آهکی بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی بر بستر رسی است. بدین منظور ۴۰۰ کیلوگرم نمونه خاک از بستر راه روستایی راز به پشین دره تهیه شد. در مرحله اول آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ و... روی ۲۰ نمونه از خاک انجام شد. مرحله دوم وزن مخصوص خشک بیشترین و میزان رطوبت بهینه مخلوط خاک-سیمان تعیین شد. در این پژوهش برای بررسی تأثیر آهک بر عملکرد بستر رسی، از دو نمونه سیمان پرتلند آهکی با نام‌های PKZ₁ (دارای ۸۰ درصد کلینکر ۱۷+ درصد آهک+۳ درصد گچ) و PKZ₂ (دارای ۸۵ درصد کلینکر ۱۲+ درصد آهک+۳ درصد گچ) استفاده شد. مرحله سوم برای تعیین درصد سیمان آهکی مناسب برای اختلاط، آزمایش تراکم مخلوط خاک-سیمان با درصدهای مختلف (۶٪، ۸٪، ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۴٪) با سیمان آهکی نوع ۱ و نوع ۲ انجام شد. در مرحله چهارم ۲۴ نمونه استوانه‌ای با افزودن (۶٪، ۸٪، ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۴٪) سیمان آهکی نوع ۱ و نوع ۲ به نمونه خاک ساخته شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. در مرحله پنجم مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمایش مدول تنش-کرنش مخلوط خاک-سیمان تعیین شد. نتایج نشان داد دانسیته خشک حداکثر مخلوط خاک-سیمان با افزودن ۱۰ درصد سیمان آهکی نوع ۱ و نوع ۲ به دست می‌آید. همچنین نتایج حاکی از افزایش مقاومت فشاری، مقامت کشش غیر مستقیم مخلوط ساخته شده با سیمان پرتلند آهکی نوع ۱ نسبت به سیمان پرتلند آهکی نوع ۲ داشته و کلیه اینکله نمونه‌ها با عمل آوری ۲۸ روزه مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های ۷ روزه داشتند.

واژگان کلیدی: خصوصیات مکانیکی، بستر رسی، تثبیت، سیمان آهکی

۱. مقدمه

بسترهای رسی مصالحی با مقاومت اندک تلقی می‌شوند که در صورتی که رطوبت آنها افزایش یابد، مصالح رسی دچار تغییر حجم و کاهش شدید ظرفیت باربری می‌شوند. از این رو سیکل‌های ذوب-یخبندان بر رفتار عملکردی این نوع از بستر تاثیر زیادی دارد. برخی از مشکلات مهم رفتاری و مقاومتی خاک‌های رسی نرم عبارت است از: مقاومت کم در حضور رطوبت، نشست‌های قابل توجه، خاصیت پلاستیسیته زیاد، تورم، واگرایی، فرسایش و حساسیت شدید به شرایط محیطی و سیکل ذوب-یخبندان. خاک‌های رسی بیشتر سبب ایجاد مشکلاتی در پروژه‌های راهسازی می‌شوند. در مناطق سردسیر، انجماد و ذوب خاک‌های رسی می‌تواند تغییرات مهمی در مشخصات ژئوتکنیکی خاک به وجود آورد. خاک‌های ریزدانه که تحت یخبندان و ذوب قرار گرفته‌اند، تغییراتی در حجم، مقاومت، تراکم‌پذیری، درصد رطوبت یخ‌زده، ظرفیت باربری و تغییرات ریزساختاری نشان داده‌اند [1, 2, 3]. یکی از رایج‌ترین تثبیت‌کننده‌های لایه روسازی می‌توان به آهک و سیمان پرتلند اشاره کرد. از جمله سیمان‌های پرتلند می‌توان سیمان آهکی را نام برد که از خواص آن می‌توان به دوام بیشتر در برابر املاح یخ زده، پایداری بیشتر در برابر سیکل‌های یخ زدن و آب شدن یخ و نیز پایداری بیشتر در قبال عوامل مهاجم در آب، خاک و در هوا اشاره کرد [4]. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی فنی تاثیر سیمان آهکی بر رفتار مکانیکی و استحکام بستر رسی تثبیت شده است. با توجه به ضرورت اعتبارسنجی روش ارائه شده، یک مطالعه موردی براساس یافته‌های پژوهشی روی راه روستایی راز-پسیندره استان خراسان شمالی انجام شد تا نتایج مورد تحلیل و تفسیر قرار بگیرند. این پژوهش کوشیده است به سوالات زیر پاسخ دهد:

۱- سیمان آهکی چه تاثیر بر رفتار مکانیکی و پارامترهای مقاومتی بستر رسی تثبیت شده دارد و مقدار آهک موجود در سیمان آهکی آیا نقشی در افزایش یا کاهش مقاومت

بستر دارد؟

۲- آیا سیمان آهکی در مقایسه با دیگر افزودنی‌های تثبیت‌کننده موجود در بازار، سبب ملاحظات اقتصادی و صرفه مالی در هزینه اجرای پروژه‌ها می‌شود؟

۳- مدت زمان عمل‌آوری چه تاثیر در روند افزایش مقاومت بسر رسی تثبیت شده با سیمان آهکی دارد؟
از جنبه‌های نوآوری در این پژوهش، بررسی تاثیر سیمان آهکی به عنوان ماده افزودنی همگن روی استحکام خاک رسی تثبیت شده است. تاثیر سیمان آهکی روی خاک‌های رسی تثبیت شده هرگز بررسی نشده و برای اولین بار در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته است [5, 6, 7, 8].

سیمان پرتلند آهکی^۱ ماده چسباننده از خانواده سیمان پرتلند است که از آسیاب نمودن مخلوط ۶ الی ۲۰ درصد سنگ آهک ویژه همراه با درصد مناسبی سنگ گچ (سولفات کلسیم متبلور) و حداقل ۸۰ درصد کلینکر سیمان پرتلند، به دست می‌آید [9] این سیمان در تهیه ملات و بتن و در کلیه مواردی که سیمان پرتلند نوع ۳۲۵-۱ به کار می‌رود، قابلیت کاربرد دارد. به علاوه به دلیل انسداد مجاری موئینه و حفره‌ها و فضاهای خالی در ژل این نوع سیمان، نفوذپذیری بتن کاهش یافته و در نتیجه دوام بتن سخت شده حاوی این نوع سیمان در برابر یخ زدن و آب شدن املاح یخ‌زده و عوامل شیمیایی بهبود می‌یابد. مهمترین خواص کیفی سیمان پرتلند آهکی، مقاومت مناسب در مقابل سیکل‌های یخ زدن و آب شدن است [10, 11].

پژوهش یونس فرد و همکاران (۱۳۹۰) در مورد پتانسیل ماده شیمیایی آهک برای تثبیت و اصلاح خاک مارن در شرایط یخبندان-ذوب یخ ثابت کرد نمونه‌های خاک مارن در حین اولین سیکل یخبندان-ذوب یخ کاملاً از هم پاشیده و مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند. همچنین افزایش مقاومت فشاری با گذشت زمان عمل‌آوری، ناشی از پیوند ایجاد شده بین دانه‌ها توسط ترکیبات شیمیایی حاصل از واکنش آهک با سیلیکا و آلومینای موجود در رس خاک مارن است [12].

1. PKZ (Portland Kalstein Zement) یا PLC (Portland Limestone Cement)

نمونه‌های غیراشباع که تحت چرخه انجماد و ذوب یخ قرار گرفته بودند مربوط به ترکیب ژئوفیبر (۴۹ درصد) است [22]. در این پژوهش با استفاده از دو نوع سیمان آهکی به بررسی ویژگی‌های و رفتار مکانیکی و عملکردی بستر رسی پرداخته خواهد شد. بدین منظور از دونوع سیمان آهکی با درصد آهک متفاوت استفاده خواهد و همچنین تأثیر مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها بر ویژگی‌های آنها بررسی می‌شود.

۲. روش انجام تحقیق

۲.۱ مواد و مصالح مصرفی

خاک مورد استفاده در این پژوهش، خاک رس تهیه شده از بستر طبیعی راه روستایی راز-پسیندره استان خراسان شمالی است. بدین منظور ۴۰۰ کیلوگرم خاک براساس استاندارد ASTM D3665 در چندین نقطه از کیلومتر ۱۰+۰۰۰ الی ۱۴+۵۰۰ مسیر مذکور نمونه‌گیری شد (شکل ۱). نتایج حاصل از مشخصات خاک در جدول (۱) بیان شده است.

شکل ۱. نمونه‌برداری خاک



Fig. 1. Soil sampling

سیمان استفاده شده در این پژوهش از نوع سیمان آهکی و در مقیاس آزمایشگاهی به وزن ۸۰ کیلوگرم و در دو نوع تولید شد. بدین منظور کلینکر به همراه سنگ گچ و سنگ آهک در آسیاب با ظرفیت ۳ کیلوگرم تهیه شد (شکل ۲). ویژگی‌های سیمان پرتلند آهکی مطابق با استاندارد ملی ایران ۴۲۲۰ و نتایج شیمیایی نمونه سنگ آهک کارخانه در جدول (۲ و ۳) ارائه شده است. در این پژوهش از دو نمونه سیمان پرتلند آهکی با نام‌های PKZ₁ (نوع ۱) دارای ۸۰ درصد

نتایج پژوهش برئی ماسه لای‌دار نشان داد که برای تعیین آثار سیکل ذوب و یخ بر استحکام مقاومت برشی ماسه لای‌دار تثبیت شده با سیمان پرداخته است. سیکل یخ و ذوب روی ماسه و ماسه لای‌دار تثبیت شده با ۴ درصد سیمان آزمایش شد. نتایج نشان داد مقاومت برشی در اثر سیکل یخ و ذوب کاهش یافته است [13, 14, 15]. روستایی حسین‌آبادی (۱۳۹۲) به بررسی راهکارهای کاهش آثار سوء یخبندان راه‌های مناطق سردسیر کشور پرداخته است. نتایج نشان دادند مسلح‌سازی خاک به‌طور چشمگیری در کاهش مقاومت خاک در طول سیکل‌های یخبندان موثر است [16]. براساس یافته‌های پژوهش گلچین‌فر و عباسی (۱۳۹۳) مشخص شد که نمونه تثبیت شده با ۴ درصد آهک و تسلیح شده با ۲/۰ درصد الیاف پلی‌پروپیلن که دوره‌های انجماد و ذوب مختلف را بدون کاهش در مقادیر مقاومت و مدول الاستیک طی نموده بود، به عنوان مناسب‌ترین ترکیب برای تثبیت و تسلیح خاک مورد آزمایش تعیین شد [17].

طاهرخانی (۱۳۹۵) در پژوهشی به اثر تثبیت کننده سیمان، آهک و نانو پلیمر بر روی دو نوع خاک رس، یکی با دامنه خمیری پایین و دیگری با دامنه خمیری بالا پرداخته است. نتایج نشان داد اثر آهک در کاهش دامنه خمیری خاک رس با دامنه خمیری بالا بیش از دو افزودنی دیگر است [18, 19]. کمان بدست و آقامجیدی (۱۳۹۷) در مقاله‌ای به بررسی تأثیر سیمان و تغییرات تراکم بر مدول الاستیسیته خاک‌های رسی پرداخته‌اند. آنها دریافتند که مدول الاستیسیته با افزایش زمان ماندگاری سیمان افزایش می‌یابد [20]. شوش پاشا و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی، به بررسی تأثیر ترکیبی سیمان و نانوسیلیس بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای در فواصل زمانی ۷ و ۲۸ روزه پرداختند. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که با افزایش میزان سیمان، مقاومت برشی نمونه‌ها، ۶۷ درصد افزایش یافت [21].

حزیربابا و گالا (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر الباف ژئوفیبر به خاک تثبیت شده و مقاومت آن در برابر سیکل‌های یخبندان ذوب پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد بیشینه سی بی آر

ساعت از درون قالب خارج شدند و برای حفظ رطوبت درون چند لایه نایلون قرار گرفتند و به مدت ۷ و ۲۸ روز عمل آوری شدند. در مرحله چهارم آزمایش جذب رطوبت مخلوط خاک-سیمان پس از ۲۸ روز براساس استاندارد ۳ انجام شد. مرحله پنجم تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم در دو شرایط عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ نتایج مشخصات نمونه خاک

طبق استاندارد؛ آزمایش دانه بندی، حد روانی، حد خمیری، تعیین طبقه بندی خاک، رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر روی نمونه ها انجام شد (نتایج مرحله اول) [27]. نتایج به دست آمده از نمونه براساس شیت های آزمایشگاهی در جدول (۱) ارائه شده است.

۳-۲ نتایج تراکم مخلوط خاک-سیمان

نتایج حاصل از تراکم مخلوط خاک-سیمان برای دو آزمایش با سیمان پرتلند آهکی نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) در جدول (۶) و شکل (۳) ارائه شده است (نتایج مرحله دوم).

شکل ۳. تأثیر سیمان پرتلند آهکی بر رطوبت بهینه مخلوط خاک-سیمان

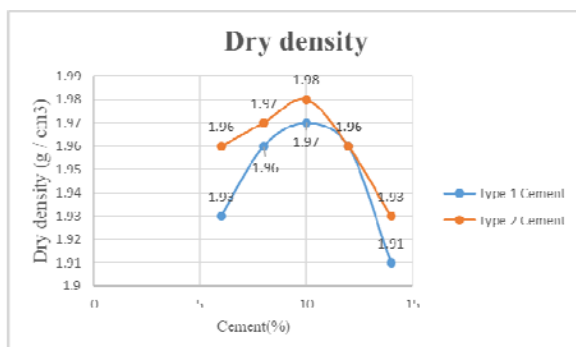


Fig. 3. Influence of Portland lime cement on optimum moisture density

کلینکر ۱۷+ درصد آهک ۳ درصد گچ و PKZ2 (نوع ۲) دارای ۸۵ درصد کلینکر ۱۲+ درصد آهک ۳ درصد گچ استفاده شد که نتایج آزمون های شیمیایی و فیزیکی در جدول (۴ و ۵) ارائه شده است.

شکل ۲. تهیه نمونه سیمان آهکی



Fig. 2. Preparation of lime cement sample

ابتدا آزمایش های دانه بندی، دامنه خمیری، تراکم آزمایشگاهی و رطوبت بهینه روی نمونه خاک رسی مورد نظر انجام شد. در مرحله دوم پس از ساخت نمونه ها آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و میزان رطوبت بهینه مخلوط خاک-سیمان براساس استاندارد تراکم ۱ انجام شد. نمونه ها را با درصد ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد سیمان نوع ۱ (نسبت به خاک خشک) مخلوط و آزمایش تراکم مخلوط خاک-سیمان در رطوبت بهینه انجام شد. این آزمایش با مشخصات مشابه با سیمان آهکی نوع ۲ تکرار شد. آزمایش با چکش ۱۰ پوندی در ۵ لایه و ۵۶ ضربه در هر لایه انجام پذیرفت. مرحله سوم تعیین درصد سیمان آهکی مناسب برای تثبیت خاک است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم خاک-سیمان، نمونه استوانه ای (۳۰×۱۵) مخلوط خاک-سیمان با افزودن ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد سیمان آهکی نوع ۱ و نوع ۲ (با رطوبت بهینه) ساخته شد. نمونه های ۷ و ۲۸ روزه پس از عمل آوری مورد نیاز، تحت آزمایش مقاومت فشاری ۲ قرار گرفتند (با ۳۰۰ کیلوگرم نمونه خاک). به منظور ایجاد شرایط برابر جهت عمل آوری، نمونه ها پس از ۲۴

3. ASTM D2216

4. ASTM(American Society for Testing and Materials), AASHTO(American Association of State Highway and Transportation)

1. AASHTO T180A

2. ASTM D 1632 و ASTM D 1633

جدول ۱. مشخصات خاک مورد آزمایش

amount	Standard of testing	properties
100	ASTM D422	Percentage pass by sieve 4
99.9	ASTM D422	Percentage pass by sieve 40
98.6	ASTM D422	Percentage pass by sieve 200
25	ASTM D4318	Liquid limit
6	ASTM D4318	Plastic limit
11.8	AASHTO T180A	Moisture opt percent
1.96	AASHTO T180A	(Maximum dry density (g / cm ³
CL-ML	ASTM D2487	Classification in Uniform system
A-4	AASHTO M145	Classification in Aashto system
Clay-silt		Soil Type Based on Laboratory Sheet

Table. 1. Soil properties tested

جدول ۲. ویژگی‌های سیمان پرتلند آهکی مطابق استاندارد ملی ایران

National Standard Test Method	Acceptable limits accordingly No.4220- ISIRI	Chemical tests
1692	5	Maximum percentage of Mgo
	3.5	Maximum percentage of SO ₃
	12	Maximum percentage of L.O.I
6443	0.1	Maximum percentage of cl
National Standard Test Method	Acceptable limits accordingly No.4220- ISIRI	Physical tests
390	3000	Minimum Specific Surface Area (g / cm ³
391	0.8	Maximum expansion percentage by autoclave test
393	120	3 days
	200	7 days
	330	28 days
392	75	At least the initial Reception
	480	Maximum ultimate Reception
		Needle wicketTime ((min

Table. 2. Characteristics of Portland lime cement according to national Iranian standard

جدول ۳. نتایج شیمیایی سنگ آهک مصرفی (درصد)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
4.15	1.3	0.6	50.73	1.23	0.8	0.17	0.25	41.5

Table. 3. Chemical Results of Consumed Limestone (Percent)

جدول ۴. نتایج شیمیایی سیمان‌های پرتلند آهکی تولیدشده (درصد)

Sample tested	MgO	SO ₃	L.O.I	cl-
PKZ ₁	2.06	2.51	6.89	0.024
PKZ ₂	2.01	2.44	5.25	0.022
requirements PKZ Standard 4220 (Maximum acceptable percentage)	5	3.5	12	0.1

Table. 4. Chemical Results of Portland Cement (Percent)

جدول ۵. نتایج فیزیکی سیمان‌های پرتلند آهکی تولیدشده (درصد)

Sample tested	compressive strength Kg/cm ²			
	2 days	3 days	7 days	28 days
PKZ ₁	165	201	262	351
PKZ ₂	213	272	335	413
requirements PKZ Standard 4220 (Minimum acceptable percentage)	-	120	200	330

Table 5. Physical Results of Portland Limestone Cement(%)

جدول ۶. نتایج دانسیته خشک و درصد رطوبت مخلوط خاک-سیمان

Type 1 Cement (Clinker 85%, Lime 12%, gypsum3%)					Type 1 Cement (Clinker 80%, Lime 17%, gypsum3%)					Type of cement
%14	%13	%10	%8	%6	%14	%13	%10	%8	%6	The weight of cement added to the soil
1.93	1.96	1.98	1.97	1.96	1.91	1.96	1.97	1.96	1.93	Dry density (g / cm3)
13.7	12.6	12.4	12.3	12	13.5	12.9	12.3	12	11.9	Moisture content

Table 6. Results of dry density and moisture content of soil-cement mixture

۳-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط خاک-سیمان

تغییرات مقاومت فشاری مخلوط خاک-سیمان آهکی نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) با ۱۲، ۱۰، ۸ و ۱۴ درصد سیمان نسبت به وزن مخصوص خشک خاک مطالعه شده پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در شکل‌های (۴ و ۵) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای بدست آمده حال از آزمون مقاومت فشاری تک محوری، رابطه تغییر مقدار سیمان آهکی برای هر دو روش عمل‌آوری و برای دو نوع سیمان به صورت تقریباً خطی است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که افزودن سیمان آهکی بر مقاومت فشاری نمونه می‌افزاید و همچنین با افزایش آهک موجود در سیمان به دلیل انجام واکنش‌های یک طرفه هیدراتاسیون بیشتر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها افزایش یافته و تاثیر آهک در افزایش مقامت در نمونه‌های با عمل‌آوری ۲۸ روزه چشم‌گیرتر است. در نمونه‌هایی که ۲۸ روز عمل‌آوری داشتند، شیب افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌های با ۷ روز عمل‌آوری به وضوح بیشتر است و در واقع با افزایش زمان واکنش بین سیمان و خاک و آب کاملتر و قوی‌تر می‌شود.

نتایج حاصل از تراکم مخلوط خاک-سیمان حاکی از آن است که هر دو سیمان پرتلند آهکی نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) در ۱۰ درصد وزنی افزوده شده به خاک دارای بیشینه وزن مخصوص خشک است. همچنین وزن مخصوص خشک بیشینه مخلوط خاک-سیمان نوع ۲ (۱۲٪ آهک) با ۱ درصد افزایش نسبت به خاک آزمایش شده از ۱/۹۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب به ۱/۹۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش یافت. این در حالی است که مخلوط خاک-سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک) افزایش ۰/۵ درصدی را به دنبال داشته و وزن مخصوص خشک بیشینه آن برابر ۱/۹۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب است. دلیل این امر را می‌توان چنین اثبات نمود که با توجه به افزایش ۵ درصدی آهک در سیمان نوع ۱ نسبت به سیمان نوع ۲، زمان کافی برای واکنش بین خاک و آهک موجود در سیمان وجود نداشته و سبب کاهش وزن مخصوص مخلوط خاک-سیمان پرتلند آهکی نوع ۱ نسبت به سیمان پرتلند آهکی نوع ۲ شده است. همچنین میزان رطوبت بهینه مخلوط خاک-سیمان نوع ۲ (۱۲٪ آهک) با ۳/۳ درصد افزایش نسبت به خاک مورد آزمایش عدد ۱۲/۴ را نشان می‌دهد. در صورتیکه سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک) افزایش ۲/۵ درصدی را به دنبال داشته و نشانگر عدد ۱۲/۳ درصد است.

سیمان‌های ضد سولفات مطابق استاندارد^۱، مقدار C3A کمتر از ۵ درصد تعریف شده است. طبق نتایج آنالیز نمونه‌های سیمان پرتلند آهکی ساخته شده میزان C3A سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و سیمان نوع ۲ (۱۲٪ آهک) به ترتیب ۳/۸۹ و ۴/۱۲ درصد تعیین شد. در اثر حمله سولفات‌ها به ملات و بتن تامازیت^۲ تشکیل می‌شود و هیچ اتصالی با تشکیل دهنده‌های بتن و ملات بوجود نمی‌آورد. بنابراین اثر مقاومتی روی ملات و بتن ندارد و ساختمان آن را از داخل تهی می‌سازد.

یکی از روش‌های بهینه نمودن خاصیت ضدسولفات سیمان، افزودن سنگ آهک (به‌عنوان فیلر یا پرکننده) به سیمان معمولی است. ترکیب سیمان‌های معمولی با فیلر سنگ آهک ضمن بهبود خاصیت ضدسولفات سیمان، خواص مکانیکی آن را نیز افزایش می‌دهد و این امر به دلیل تشکیل فاز منوکربوآلومینات است. این فاز پایدار بوده و مقاومت بالایی دارد به شکلی که با پر کردن خلل و فرج داخل مخلوط خاک-سیمان، مقاومت اولیه را بهبود می‌بخشد.

۳-۵ مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط خاک-سیمان

مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط مصالح با سیمان با اندازه‌گیری مقاومت یک نمونه استوانه‌ای در حالیکه بارگذاری بر سطح جانبی آن انجام شده، اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌های ساخته شده به قطر ۱۵۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM D4123 درون دستگاه قرار گرفته و مقاومت کششی آنها بر حسب زمان عمل آوری سنجیده می‌شود.

در شکل (۶ و ۷) نمودار تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط خاک-سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) نشان داده شده است. با توجه به مقاومت نمونه‌های بدست آمده، شیب تغییرات افزایش میزان

شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری مخلوط خاک-سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک)

آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) برای نمونه‌های با ۷ روز عمل آوری

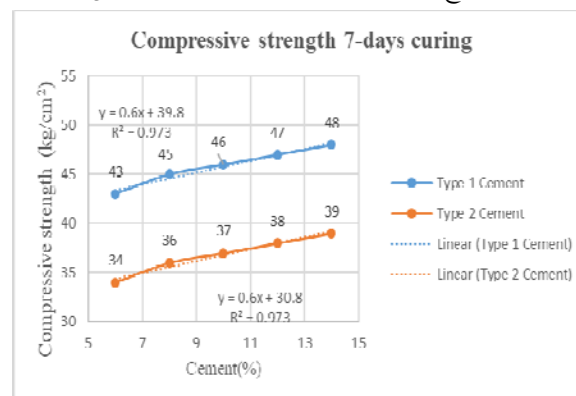


Fig. 4. Compressive strength variations of soil-cement mixture Type 1 and 2 for samples with 7 days curing

شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری مخلوط خاک-سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک)

آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) برای نمونه‌های با ۲۸ روز عمل آوری

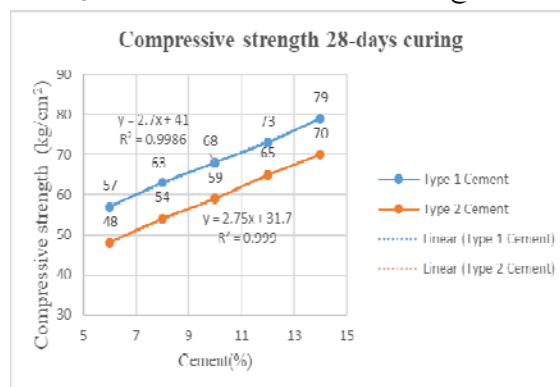


Fig. 5. Compressive strength variations of soil-cement mixture Type 2

۳-۴ جذب رطوبت مخلوط خاک-سیمان

میزان جذب رطوبت نمونه‌های ساخته شده مخلوط خاک سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک) با ۱۲،۱۰،۸ درصد افزودنی تثبیت کننده، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری داخل حوضچه آب به ترتیب برابر ۱/۸، ۸/۳ و ۷/۸ درصد نشان می‌دهد (نتایج مرحله چهارم). این کاهش جذب رطوبت به هنگام تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه در محدوده جداره نمونه استوانه‌ای مخلوط خاک-سیمان، که نشان از عدم نفوذ آب به مرکز نمونه است. این کاهش جذب رطوبت را این گونه می‌توان تفسیر نمود که حمله سولفات‌ها به سیمان از طریق فاز C3A موجود در سیمان صورت می‌پذیرد. به همین دلیل است که در

۱. استاندارد ملی ویژگی‌های سیمان پرتلند به شماره ۳۸۹

شکل ۷. تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط خاک-سیمان نوع ۲ (۱۲٪ آهک) و نوع ۱ (۱۷٪ آهک) برای نمونه‌ها با ۲۸ روز عمل‌آوری

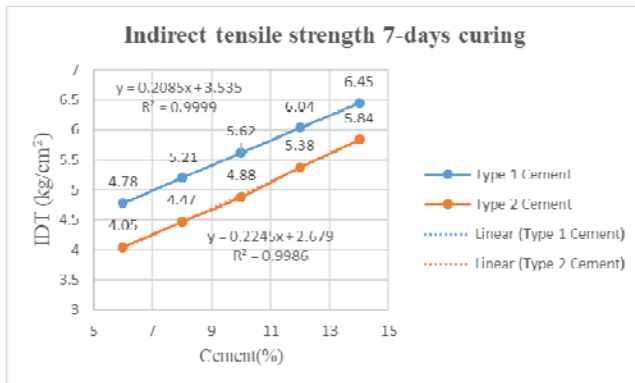


Fig. 7. Indirect tensile strength variations of soil-cement mixture type 1 (12% lime) type 2 (12% lime) for samples with 28 days curing

همچنین درصد آهک بیشتر در سیمان نوع ۱ موجب انسجام و چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک بستر شده و به همین دلیل سیمان نوع ۱ تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نسبت به سیمان نوع ۲ دارد. در این آزمون مدت زمان عمل‌آوری به سزایی بر نتایج داشت. به عنوان نمونه مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های با ۲۸ روز عمل‌آوری نسبت به ۷ روز عمل‌آوری در سیمان نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب ۵۰ درصد و ۶۰ درصد افزایش داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به پژوهش صورت پذیرفته می‌توان اعلام نمود نمونه‌های استوانه‌ای خاک-سیمان ساخته شده با افزودن ۸ درصد سیمان پرتلند آهکی نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) مقاومت فشاری به ترتیب برابر ۴۵ و ۳۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را کسب نموده‌اند که نشان از افزایش مقاومت و دوام نمونه‌های ساخته شده با سیمان آهکی است. پائین بودن میزان رطوبت جذب شده توسط مخلوط خاک-سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نشان از نفوذ کمترین آب و حذف عامل موثر در ایجاد لایه‌های یخ در مخلوط ساخته شده است. که خود دلیلی بر استناد به نتایج مقاومت فشاری در قبول دوام خاک‌های تثبیت شده با سیمان آهکی در برابر سیکل یخبندان است.

سیمان نسبت به مقدار آهک خطی بوده و در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، شیب نمودار بیش از نمونه‌های ۷ روزه است. در نمونه‌های ۲۸ روزه اختلاف مقاومت سیمان نوع ۲ و ۱ بسیار کمتر از اختلاف مقاومت سیمان ۲ و ۱ در نمونه ۷ روزه است و در واقع در عمل‌آوری ۲۸ روزه تاثیر سیمان ۲ و ۱ روی مقاومت کششی غیرمستقیم کمتر شده و منحنی مقاومت کششی غیرمستقیم-مقدار سیمان برای هر نوع سیمان به هم نزدیک شده است ولی در نمونه‌های ۷ روزه منحنی‌های مقاومت از یکدیگر فاصله معناداری دارند. مقایسه شکل‌های (۶ و ۷) نشان می‌دهد که مقاومت کششی غیرمستقیم ۲۸ روزه مخلوط خاک-سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) با ۱۲ درصد افزودنی سیمان به ترتیب حداکثر ۱۶ و ۲۰ درصد افزایش یافته است این بالا رفتن مقاومت سبب می‌شود تعداد سیکل‌های طی شده برای رسیدن به شکست ناشی از خستگی افزایش یابد. می‌توان اینگونه بیان نمود که افزودن سیمان پرتلند آهکی سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط خاک-سیمان شده که نتیجه آن کاهش حساسیت رطوبتی، بالا رفتن عمر خستگی و به تأخیر افتادن ترک‌های ناشی از تکرار بارگذاری است.

شکل ۶. تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط خاک-سیمان نوع ۱ (۱۷٪ آهک) و نوع ۲ (۱۲٪ آهک) برای نمونه‌ها با ۷ روز عمل‌آوری

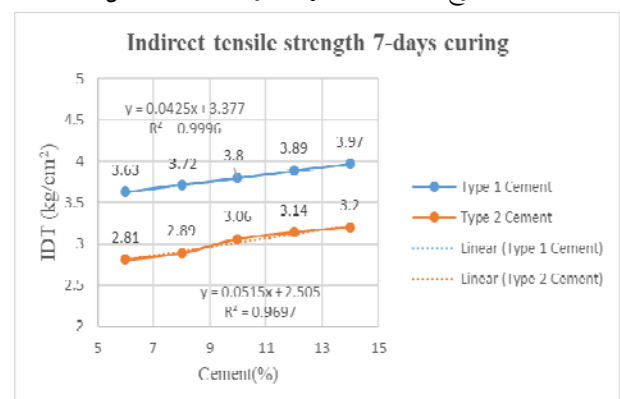


Fig. 6. Indirect tensile strength variations of soil-cement mixture type 1 (17% lime) and type 2 (12% lime) for samples with 7 days curing

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع در تحقیق ندارند.

منابع مالی: این مطالعه از سوی هیچ سازمانی مورد حمایت مالی قرار نگرفته است.

منابع

- [1] Jiankun L., Tianliang W., Yahu T. 2016 Experimental study of the dynamic properties of cement- and lime-modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 61(1), 24-38.
- [2] Hotineanu A., Bouasker M., Aldaood A., Al-Mukhtar M. 2016 Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays, *Cold Regions Science and Technology*, 119, 151-157.
- [3] Zhao Y., Wang SH., Feng Q. 2016 Volume change behaviour and microstructure of stabilized loess under cyclic freeze-thaw conditions, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(10), 865-874.
- [4] Roustaei M., Eslami A., Ghazavi M. 2016 Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters, *Cold Regions Science and Technology*, 120, 127-137.
- [5] Jahanshahi R., Ghasemi M., Tofigh V. 2017 Evaluation of the effect of unsaturated conditions on the mechanical properties of hydrated limestone soils, *Transport infrastructure engineering*, 3(9), 23-38.
- [6] Firoozia A.A., Tahaa M.R., Firoozia A.A., Khana, T.A. 2015 The influence of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of clay soils treated with lime, *Jurnal Teknologi Sciences & Engineering*, 76(1), 107-113.
- [7] Mahboubi Motlagh, N., Mahbubi Ardakani A.R. 2018 The Effect of Lime Adding on Shear Resistance Parameters of Clay-Geosynthetic Soil, *Earth Sciences*, 24(108), 281-295.
- [8] SEZER A., TANRINIANN., ADAMCILY.e., (2018), mechanical behavior of fly ash or cement amended sand-bentonite mixtures exposed to freeze-thaw action, *Applied Sciences and Engineering*, 18 (5), 1008-1017.
- [9] Institute of Standards and Industrial Research of Iran, National Standard of Iran 4220,

اگر استفاده از سیمان پرتلند آهکی فقط برای تثبیت بستر به عنوان یک لایه از لایه‌های روسازی مطرح باشد و کمینه درصد وزنی مناسب سیمان پرتلند تیپ II برای تثبیت خاک مطالعه شده ۸ درصد اختیار شود، مقایسه هزینه‌های پروژه راه روستایی راز-پسیندره نشان از کاهش ۱۳ درصدی هزینه تأمین سیمان پرتلند آهکی نسبت به سیمان پرتلند تیپ II داشته است. علت این امر کاهش هزینه‌های ۱۵ درصدی انرژی (گاز و برق مصرفی) در تهیه سیمان پرتلند آهکی نسبت به سیمان پرتلند تیپ II است.

با مقایسه نتایج مقاومت فشاری مخلوط خاک-سیمان پرتلند آهکی نوع ۱ و سیمان نوع ۲ می‌توان به این نتیجه رسید که اثر سیمان پرتلند آهکی نوع ۱ در کسب مقاومت فشاری بهتر از سیمان پرتلند آهکی نوع ۲ است که دلیل آن افزایش درصد آهک در ترکیب سیمان ساخته شده است. این افزایش مقاومت ناشی از واکنش تبادل یونی و واکنش تجمع تراکم بین آهک و خاک بوده و به مجرد تماس آهک با بیشتر خاک‌ها ریزدانه حاصل می‌شود. بدین ترتیب که یون‌های کلسیم موجود در آهک جایگزین یون‌های مثبت با ظرفیت کمتر موجود در خاک می‌شوند. این عمل باعث تجمع یون‌های کلسیم در اطراف ذرات رس خاک می‌شود. تجمع یون مثبت در اطراف ذرات رس باعث تغییر در تراکم الکترونیهای اطراف ذرات رس می‌شود به شکلی که مقدار بار الکتریکی نیز در اطراف ذرات رس نوسان پیدا می‌کند. این امر باعث افزایش جاذبه بین ذرات رس و در نتیجه تغییر بافت خاک دانه‌دانه شدن توده آن می‌شود. به‌طور کلی کانی‌های رسی در اثر فعل انفعالات شیمیایی بین آهک و رس گلوله شده و شبیه دانه‌های ماسه عمل می‌کنند که این امر نشانگر بهبود خواص خمیری خاک است. با توجه به نتایج کمینه بودن جذب رطوبت خاک تثبیت شده با سیمان آهکی پیشنهاد می‌شود پروژه‌های راهسازی که به نوعی جسم راه با آب در تماس بوده، مانند مناطق ساحلی، استانهای شمالی و مناطق سردسیر، گزینه استفاده از سیمان آهکی مد نظر قرار گیرد.

تعارض منافع

- polypropylene fibers and geotextile layers, Master's thesis for soil mechanics, Khaje Nasir-Al-Din Toosi University of Technology, (in Persian).
- [17] Golchin Far N., Abbasi N. 2013 Effect of melting and repeated freezing on mechanical properties of clay soils stabilized with lime and reinforced with polypropylene fibers, *Amir kabir*, 45(2), 1-12 (in Persian).
- [18] Ola Pour M., Mostar M., Hussein A. 2010 Investigation of the effect of freezing cycles on clay stabilized with cement and microsilica, *Seventh National Congress of Civil Engineering*, Zahedan University, (in Persian).
- [19] Taherkhani H. 2016 Investigation and comparison of compressive strength of clay soils stabilized with cement, lime and nano-polymer CBR PLUS, *Omran Modares*, 16(4), 161-173 (in Persian).
- [20] Kaman Bedast A., Aghamjidi R. 2018 Investigating the Effective Indicators on Increasing the Loadability of Soil Soils for Implementing Hydraulic Structures Using Soil-Cement Mixture, *Water Engineering*, 23-35 (in Persian).
- [21] Shush Pasha A., Abbasi M., Najaf Nia H., 2018 Study of the Effect of Cement and Nano Silica on the Shear Strength of Babolsar Soil, *Amran Kabir*, 50(1), 179-188 (in Persian).
- [22] Hazirbaba, K. Gullu, H. 2010 California Bearing Ratio improvement and freeze-thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid, *Journal of Cold Regions Science and Technology*, 63, 50-60.
- Portland cement-limestone-properties. (2005).
- [10] Lotfi. M. 2008 Investigation of experimental results of adding limestone and pozzolan to Portland cement type 425-1, cement, 122, 26-29.
- [11] Shojaei Baghini M., Ismail A. 2015 Freeze-Thaw Performance and Moisture-Induced Damage Resistance of Base Course Stabilized with Slow Setting Bitumen Emulsion-Portland Cement Additives, *Advances in Materials Science and Engineering*, 10-23.
- [12] Younes Fard M., Roshanzamir M., Zomorodian M. 2010 Investigation on the Effect of Lime on Marne Soil Resistance to Precipitation-Melting Cycles, *First National Conference on Structural-Earthquake-Geotechnical*, Babolsar (in Persian).
- [13] Jafari M. 2010 Mechanical behavior and the effect of freezing and melting in lime and fiber-modified clay, Master's degree dissertation on soil and soil mechanics, Bu-Ali Sina University, (in Persian).
- [14] Jamebozorg M. 2011 The Effect of Nano Clay on the Rhode Soil Engineering Behavior in Cold and Melting Cycles, Master's Degree in Soil Mechanics and Pavement Engineering, Bu-Ali Sina University, (in Persian).
- [15] MalekAvar Zamani H. 2012 Effect of Ice and Melting Cycle on Shear Strength of Cement Stabilized Sand Soils, Master's Thesis for Soil Mechanics and Pathology, Imam Khomeini International University, (in Persian).
- [16] Rustae Hossein Abadi M. 2010 The effect of freezing and melting cycles on the resistance of fine-grained soil with

Evaluation of the effect of Portland Limestone Cement on mechanical and functional properties of stabilized clay subgrade

S.F. Faezi^{*1}, M. Mirshekarian Babaki², S.R. Sharifi³

1- assistance Prof, Department of civil engineering, payame noor university (PNU), P.O.BOX.19395-3697. Tehran, Iran

2- Ph.D in Highway and transportation, payame noor university (PNU), P.O.BOX.19395-3697. Tehran, Iran

3- MSc. in Highway and transportation, payame noor university (PNU), P.O.BOX.19395-3697. Tehran, Iran
*F.faezi@pnu.ac.ir

Abstract

Clay soils often cause problems in construction projects. In cold regions, freezing and thawing of clay soils can cause significant changes in the geotechnical characteristics of the soil. Frozen and thawed soils have shown changes in volume, strength, compressibility, frozen moisture content, bearing capacity and microstructural changes. In road construction projects in cold regions, freezing and melting is one of the factors affecting the instability of soil engineering behavior, including the durability and performance of pavement and pavement layers. Therefore, the purpose of this research is to evaluate the effect of freezing and melting cycles on the parameters of the durability of calcareous stabilized clay bed based on compressive strength test results. 400 kg of soil samples were collected from the subgrade of the RAZ-PASIN rural road. In the first stage, granulation experiments, Atterberg and ... on 20 soil samples were performed. The second stage was the dry maximum dry matter and optimum moisture content of the soil-cement mixture. The third step was to determine the percentage of suitable cement for mixing, soil-cement mixed density with different percentages (6%, 8%, 10%, 12% and 14%) with limestone cement type 1 and type 2. In the fourth stage, 24 cylindrical specimens were added to the soil sample by adding (8%, 10%, 12%) of type 1 and type 2 calcareous cement and tested for compressive strength. In the fifth step, the indirect tensile strength and the stress-strain modulus of the mixed soil-cement were determined. The results indicated that the maximum dry matter density of the soil-cement mixture was obtained by adding 10% of type 1 and type 2 calcareous cement. The results also showed an increase in the compressive strength of the composite made with type 1 lime Portland cement compared to Type 2 lime Portland cement, and all specimens containing 8% calcareous cement additive exhibit more than 35 kg / cm² after 7 days of resistance treatment. This means that samples made with Portland cement have a sufficient durability against atmospheric agents. If the use of calcareous Portland cement is used only for bed consolidation as a layer of pavement layers and the appropriate weight percentage of Portland Type II cement is selected to be 8% for the consolidation of the studied soil, the cost of the Rural Road Project will be compared. The Late Valley showed a 13% reduction in the cost of supplying calcareous Portland cement compared to Type II Portland cement (Table 10). This is due to a 15% reduction in energy costs (gas and electricity consumed) in the manufacture of calcareous Portland cement compared to Type II Portland cement. By comparing the results of compressive strength of soil-mixture of type 1 calcareous Portland cement and type 2 cement, it can be concluded that the effect of type 1 calcareous Portland cement in obtaining compressive strength is better than type 2 calcareous Portland cement due to increasing Lime is made of cement composition. This increased resistance is due to the ion exchange reaction and the agglomeration-compaction reaction between lime and soil and is achieved by lime contact with most fine-grained soils. Thus, the calcium ions in the lime are replaced by the lower-capacity positive ions in the soil. This results in the accumulation of calcium ions around the clay particles.

KEYWORDS : MECHANICAL PROPERTIES, STABILIZATION, LIME CEMENT