

ارایه‌ی راهکار عملی تثبیت خاک لایروبی خلیج فارس

با سیمان و مواد نوین پلیمری معدنی

مقاله علمی - پژوهشی

مسعود صادق‌پور منفرد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده ساختمان و مسکن، تهران، ایران

ایرج رحمانی*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

عطا آقایی آرابی، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: I.Rahmani@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۱۸-۱

چکیده

یافتن کاربردهای مفید برای خاک لایروبی شده دارای حجم فراوان اهمیت راهبردی دارد. به عنوان کاربرد عملی و فراگیر می‌توان خاک لایروبی شده را برای ساحل‌سازی، ساخت بارانداز، راه دسترسی، ایجاد بوستان و ... به کار برد. این مقاله به بررسی قابلیت استفاده‌ی خاک لایروبی خلیج فارس (به دست آمده از ساخت بندر شهید رجایی ایران) اصلاح شده با سیمان و افزودنی پلیمری معدنی نوین به عنوان لایه‌های اساس یا زیراساس راه می‌پردازد. برای این منظور، آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده (تک محوری) با زمان‌های عمل‌آوری مختلف (۷، ۲۸ و ۵۶ روز) انجام شد و نتایج نشان داد که خاک لایروبی تثبیت‌شده با سیمان و افزودنی پلیمری معدنی نسبت به موارد تثبیت‌شده با سیمان از مقاومت تک محوری بهتری برخوردار هستند. با توجه به ویژگی‌های برتر خاک لایروبی تثبیت‌شده با سیمان و افزودنی پلیمری معدنی نوین، خاک‌های لایروبی می‌توانند به عنوان منبع قرضه برای احداث راه‌های دسترسی در بنادر استفاده شوند. افزون بر آزمایش‌های تک محوری، نتایج آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم نیز عملکرد برتر خاک لایروبی تثبیت‌شده با سیمان و افزودنی پلیمری معدنی را نشان داد. سرانجام، بررسی نتایج ضریب برجهنگی زیراساس و اساس ساخته شده از خاک لایروبی تثبیت‌شده با سیمان و افزودنی پلیمری معدنی و خاک لایروبی تثبیت‌شده با سیمان با یکدیگر؛ و همچنین مقایسه‌ی اقتصادی میان روش‌های سنتی و استفاده از قشر تثبیت‌شده در ساخت روسازی راه؛ نشان داد که تثبیت با سیمان و ماده‌ی نوین پلیمری معدنی گزینه‌ی بهتری برای استفاده در لایه‌های اساس یا زیر اساس است.

واژه‌های کلیدی: تثبیت، خاک لایروبی، سیمان، ماده نوین پلیمری معدنی، مقایسه فنی و اقتصادی

۱- دیباچه

لایروبی اغلب با دو هدف انجام می‌شود: احداث سازه‌های هیدرولیکی و نگهداری آن‌ها؛ که به ترتیب منجر به ایجاد مصالح لایروبی احداثی^۲ و مصالح لایروبی نگهداری^۳ می‌گردد. با توجه به حجم بسیار زیاد مواد لایروبی شده، استفاده‌های مفید از این مواد اهمیت روز افزون یافته است (Pak, et al.,

لایروبی برای نگهداری رودخانه‌ها، بندرها، دریاچه‌ها و حفظ عملکردشان در سطح طبیعی ضروری است (Huang et al., 2014). بنابراین، می‌توان مصالح لایروبی^۱ را موادی دانست که لایروبی شده‌اند یا می‌توانند لایروبی شوند. این مصالح حاصل لایروبی رودخانه‌ها، کانال‌ها و بندرها هستند (Drujif, 2016).

زیادی با خاک ریزدانه معمولی ندارد و می‌تواند به صورت تثبیت شده در کاربردهای گوناگون به‌کار رود (Chan and Shahri, 2016). استفاده از مواد لایروبی تثبیت‌شده در لایه‌های مختلف روسازی انعطاف‌پذیر، یکی از کاربردهای ارزشمند این مواد می‌باشد. با توجه به مناسب بودن ویژگی‌های مکانیکی مخلوط تثبیت‌شده به عنوان لایه‌ی اساس و زیر اساس؛ نتایج حاکی از اثربخشی آهک و سیمان در تثبیت خاک لایروبی است. همچنین با عنایت به اهمیت آثار زیست‌محیطی؛ گزارش شده است که بر اساس آزمایش‌های شیرابه^۵ و با توجه به محدوده‌های موجود برای گسترش استفاده از دفن زباله‌های جامد شهری^۶ در ساخت جاده‌ها، مخلوط‌های تثبیت‌شده توان برآورده نمودن رواداری‌ها را دارند (Dubois et al., 2009).

این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی قابلیت به کار گرفتن خاک لایروبی شده از خلیج فارس^۷ پرداخته است. طی این مطالعه، تثبیت خاک با سیمان (C) و همچنین افزودنی پلیمری معدنی نوین (N) برای استفاده به عنوان لایه‌های اساس یا زیراساس انجام شده است. به عنوان در دسترس‌ترین و ساده‌ترین آزمایش سنجش مقاومت، آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده (تک محوری)^۸ انجام شده؛ و نمونه‌های استوانه‌ای خاک لایروبی تثبیت‌شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پس از آن بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم و سرانجام آزمایش سه‌محوری (برای تعیین ضریب برجهندگی ترکیبات تثبیت شده)، انجام گردید. در پایان؛ به منظور امکان‌سنجی اجرای میدانی تثبیت مطالعه شده، مقایسه‌ی فنی و اقتصادی ارایه شده است.

۲- پیشینه تحقیق

برخی پژوهش‌ها با هدف کاهش مصرف آهک یا سیمان، به استفاده‌ی هم‌زمان از آن‌ها با دیگر افزودنی‌ها پرداخته‌اند (Rahmani, Sadeghpour Monfared and Aghaei, 2023). پژوهش Dubois et al. 2009 به تایید استفاده از رسوب‌های دریایی تثبیت‌شده به عنوان مصالح لایه‌ی اساس روسازی پرداخته است. برای تثبیت خاک SP، پژوهش MolaAbasi et al. 2020 جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با ژئولیت را موفق گزارش نموده است. برای تثبیت خاک؛ Thomas and Rangaswamy 2020 از ترکیب افزودنی‌های نوین (نانوسیلیس و بیوآنزیم)، Liu et al. 2020 از لیگنین

(2011). برای نمونه در ژاپن نگهداری کانال‌های آب و ساخت و ساز دریایی، هر ساله منجر به تولید ۱۰ تا ۱۵ میلیون مترمکعب خاک لایروبی‌شده می‌گردد (Chan, Mizutani, and Kikuchi, 2011).

مواد لایروبی‌شده یا دارای قابلیت لایروبی (خاک لایروبی) (Druif, 2016) مانند ماسه‌ها یا رسوبات لایروبی دریایی می‌توانند با موفقیت در لایه‌های روسازی (Siham et al., 2005)، کارهای ساختمانی، فعالیت‌های کشاورزی و مسائل زیست‌محیطی (Pak et al., 2011) و (Dubois et al., 2009) استفاده شوند. با توجه به ویژگی‌های ژئوتکنیکی ضعیف؛ برای استفاده از مصالح لایروبی در کاربردهای مهندسی، آن‌ها را تثبیت می‌کنند (Rahmani, Sadeghpour Monfared and Aghaei Araei, 2023). تثبیت به معنی اصلاح و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی خاک برای تأمین یک رشته اهداف از پیش تعیین‌شده، می‌باشد (Code No. 268, 2003).

(Dubois et al., 2009) استفاده از رسوبات دریایی تثبیت شده را در لایه‌ی اساس روسازی تایید کرده‌اند. بسیاری از مطالعات (برای نمونه: (Kang, Tsuchida, and Kim, 2017)، (Kang et al., 2017)، (Shinsha and Kumagai, 2018)؛ (Zhang et al., 2020) برای تثبیت از سیمان استفاده کرده‌اند. در یک مطالعه مروری جامع (Sadeghpour- 2021) روش‌های مختلف تثبیت خاک‌های لایروبی و کرناته را بررسی کرده و نشان داده‌اند که در برخی از خاک‌ها، تثبیت‌کننده‌های سنتی نه تنها مؤثر نیستند، بلکه اثرات منفی نیز دارند (Rezaeimalek, Huang, and Bin-Shafique, 2017). در پژوهش (Muhunthan and Sariosseiri, 2008)، نشان داده شده است که برخی از پلیمرها در تثبیت ماسه‌های سیلتی و خاک‌های ماسه‌ای دارای دانه‌بندی یکنواخت^۹ مفید هستند. کاربردهای مصالح لایروبی تثبیت‌شده گسترده است. هرگونه استفاده از فن‌آوری برای به‌کارگیری مصالح لایروبی باید بر اساس به کار بردن آن به عنوان مقدار زیادی پرکننده در دوره‌ی زمانی کوتاه باشد (سرعت مصرف باید متناسب با حجم زیاد مواد لایروبی شده باشد) (Porbaha, Hanzawa and Shima, 1999). به عنوان یک کاربرد مطلوب؛ می‌توان رسوب‌ها و ماسه لایروبی دریایی را به عنوان مصالح تازه برای لایه‌های راه به کار برد (Siham et al. 2013). در واقع، خاک لایروبی‌شده تفاوت

روش‌های طراحی نمونه خاک-سیمان یا خاک-سیمان-پلیمر در طول چندین دهه تکامل یافته است (AghaeiAraei, Asvar, and Barkhordari, 2024). برای طراحی مخلوط خاک-سیمان بسیاری از آیین‌نامه‌ها از معیار مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) بهره برده‌اند (Mahboubi Ardakani and Aghaei Araei, 2023). اغلب در آیین‌نامه‌ها، به جای استفاده از ASTM D560 و ASTM D559 طراحی براساس مقاومت فشاری ترجیح داده می‌شود. نشریه ۲۶۸ (Code No. 268, 2003) نیز به عنوان دستورالعمل تثبیت لایه‌های روسازی راه به ارایه‌ی توصیه‌هایی برای تثبیت نمودن خاک‌های گوناگون پرداخته است. افزون بر پارامترهای مقاومت تک‌محوری، یکی از مهمترین پارامترهای کمی نشانگر ظرفیت تحمل بار روسازی‌ها ضریب برجهنگی^۹ است؛ که در طراحی روسازی راه نقش کلیدی دارد. M_R به صورت نسبت تنش انحرافی به کرنش برگشت‌پذیر تعریف می‌شود.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

که در آن:

M_R : ضریب برجهنگی،

σ_d : تنش انحرافی؛ که عبارتست از تنش محوری در آزمایش فشاری محدود نشده یا تنش محوری افزون بر فشار همه‌جانبه در دستگاه

فشاری سه‌محوری ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$).

ϵ_r : کرنش برگشت‌پذیر ($\epsilon_r = \epsilon_1 - \epsilon_2$) است (Mohajerani, Nguyen and Glavacevic, 2016).

حاصل از لایه‌های گوناگون روسازی راه می‌تواند بسیار ارزشمند و حیاتی باشد. فرکانس بارگذاری چرخ‌های بوئینگ ۷۴۷ بین ۱/۶ تا ۲ هرتز می‌باشد (AghaeiAraei, Asvar, and Barkhordari, 2024). در کل، فرکانس متداول خودروه‌های سنگین بین ۱ تا ۴ هرتز است (Cantero, Hester, and Brownjohn, 2017)؛ اما افزایش سرعت آنها موجب افزایش گستره‌ی فرکانس بارگذاری روسازی می‌گردد. بر اساس پژوهش An et al. 2018؛ فرکانس‌های ایجاد شده توسط کامیون‌های دارای سرعت کند و متوسط به ترتیب حدود ۲ و ۵ هرتز می‌باشند. همچنین، Aghaei Araei et al., 2023 فرکانس بارگذاری ۱۰ و ۵ هرتز را برای اساس راه و فرکانس ۲ هرتز را برای نمونه اساس باند فرودگاه انتخاب نموده است. این پژوهش نیز در برآورد ضریب برجهنگی از فرکانس‌های ۲ و ۵ هرتز بهره برده است.

بدون گوگرد، Zeng et al. 2021 از فسفوژن و سیمان و Pooni et al. 2021 از سولفوآلومینات کلسیم بهره گرفته‌اند. گزارش پژوهشی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC Report, 2020) برای بهبود کارایی لایه‌ی اساس تثبیت شده با سیمان برای استفاده در راه و باند فرودگاه از افزودنی پلیمر معدنی به سیمان بهره برده است. همچنین، اندک گزارش‌های ارائه شده در مورد پلیمر معدنی نشانگر آن است که اگر افزودنی پلیمر معدنی همراه با مصالح گوناگون (مانند سنگ شکسته و مخلوط آسفالت بازیافتی) به کار رود؛ مقاومت فشاری، کششی و خمشی مخلوط حاصل افزایش می‌یابد (AghaeiAraei, Asvar, and Barkhordari, 2024). نتایج پژوهش AghaeiAraei, Asvar, and Barkhordari, 2024 نشان می‌دهد، افزودن پلیمر همراه با سیمان، سبب افزایش مقاومت فشاری در بازه‌ی زمانی کوتاه‌تر و حذف مشکلات کاهش حجم ناشی از اصلاح با سیمان می‌شود.

قابل اعتمادترین روش تعیین ضریب برجهنگی، آزمایش آزمایشگاهی بار تکراری سه‌محوری می‌باشد. در این آزمایش، یک فشار کلی همه‌جانبه بر روی نمونه اعمال می‌شود تا تنش‌های جانبی ناشی از فشار بیش از حد و بار چرخ اعمال شده را شبیه‌سازی کند. با توجه به اینکه در آزمایش سه‌محوری، تنش‌های همه‌جانبه و قایم از پیش تعیین شده، بر روی نمونه اعمال می‌شود؛ و کرنش‌های محوری، شعاعی و حجمی همگی می‌توانند در آزمایش سه‌محوری اندازه‌گیری شوند؛ بنابراین، آزمایش سه‌محوری تکراری برای تعیین M_R به کار می‌رود (Nguyen and Mohajerani, 2016)، (Hilbrich and Scullion, 2007)، (Zhalehjo et al., 2018).

باید دقت شود که با توجه به ماهیت دینامیکی بارگذاری انجام شده توسط حرکت خودروه‌های گوناگون گذرنده از راه‌های گوناگون (مانند راه و فرودگاه) در نظر گرفتن فرکانس مناسب بارگذاری برای بررسی سنجش ضریب برجهنگی

۳- مواد و مصالح به کار رفته

۳-۱- مصالح لایروبی

نشان می‌دهد (بخش هاشور خورده‌ی سمت راست محل لایروبی و بخش هاشور خورده‌ی سمت چپ محل لای‌ریزی است).

خاک لایروبی به کار رفته در این پژوهش از مصالح لایروبی فاز سوم توسعه‌ی بندر شهید رجایی واقع در ساحل شمالی خلیج فارس برداشت شده است. شکل ۱ موقعیت محل لایروبی و لای‌ریزی که در این تحقیق از خاک آن استفاده شده است را



شکل ۱. محل برداشت خاک لایروبی در بندر شهید رجایی

مصالح، استفاده از آن‌ها در پسرانه‌ی ۲۴ هکتاری زمین واقع در شمال بندر شهید رجایی برای گسترش زمین‌های پشتیبانی است. در شکل ۲ محل انباشت خاک لایروبی شده در بندر شهید رجایی و در شکل ۳ خاک لایروبی بدست آمده، نشان داده شده است.

یکی از بزرگترین عملیات لایروبی که در ایران انجام شده، لایروبی احداثی فاز ۲ و ۳ بندر شهید رجایی است؛ در این عملیات ۱۱ میلیون مترمکعب رسوبات طبیعی ساحل توسط لایروب برداشت شده و در پسرانه‌ی ساحل در مجاورت حوضچه لای‌ریزی می‌شود. یکی از کاربردهای مفید این



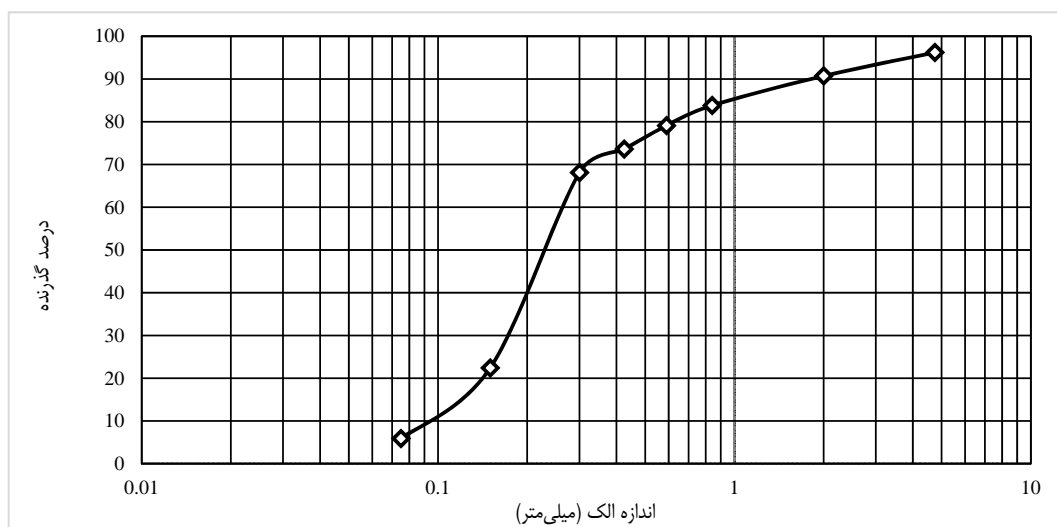
شکل ۲. محل لای‌ریزی که خاک مورد آزمایش از آن تهیه شده است.



شکل ۳. خاک لایروبی بدست آمده

است؛ می‌توان با بهره‌گیری از خاک PGD مشکل را حل کرد. زیرا بر اساس دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM D 6913-04 این خاک فاقد ویژگی خمیری ($PI = 0$) است و از این رو، بر اساس روش متحد^۱ با عنوان SP-SM و با روش آشتو^{۱۱} A-3 طبقه‌بندی می‌شود. بر اساس استاندارد ASTM D4943 (AASHTO 08 T92) و ASTM D4318-10 (AASHTO T89 و T90)، ریزدانه‌های خاک PGD به دست آمده (دانه‌بندی نشان داده شده در شکل ۴) هیچگونه ویژگی خمیری ندارند (nonPI).

بر اساس آزمایش دانه‌بندی انجام شده طبق استاندارد ASTM D ۶۹۱۳-۰۴ (آشتو T۸۸) طبقه‌بندی این خاک لایروبی بر اساس روش متحد (یونیفاید) «SP-SM و SP» و بر اساس روش آشتو A-3 می‌باشد. بر اساس استانداردهای ASTM D ۴۹۴۳-۰۸ (آشتو T۹۲) و ASTM D ۴۳۱۸-۱۰ (آشتو T۸۹ و T۹۰) ریزدانه‌ی خاک لایروبی بدست آمده، ویژگی خمیری ندارد (nonPI). نمودار دانه‌بندی خاک PGD در شکل ۴ آمده است. از آنجایی که منطقه ویژه اقتصادی شهید رجایی (شهر بندرعباس، ایران، شکل ۱) به زیرساخت‌ها (جاده، اسکله و غیره) نیاز دارد و منطقه فاقد منابع قرضه‌ی مناسب



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی خاک لایروبی فاز ۳ بندر شهید رجایی

۲-۳ ماده نوین پلیمری معدنی (تثبیت با افزودن ماده‌ی نوین پلیمری معدنی در سیمان)

نفتالین سولفونیک اسید و فرمالدهید می‌باشد. همانگونه که در تصویر مشخص است رنگ این ماده خاکستری است و وزن مخصوص آن ۸ تا ۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب (kN/m^3) است. رطوبت آن بیش از ۲ درصد و دانه‌های بزرگتر از $0/315$ میلی‌متر در آن حداکثر ۱ درصد است. این ماده غیرسمی بوده و سرطان‌زایی و قابلیت اشتعال ندارد. خطرناک نبوده و می‌تواند در مناطق سردسیر به کار رود. همچنین، دارای ترکیب آب‌گریز و سازگار با سیمان پرتلند است؛ و با تشکیل میکروکریستال و ایجاد بافت مقاوم، مقاومت خاک تثبیت شده را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان آن را در دماهای کم حمل نمود و ذخیره کرد. شایان ذکر است این ماده ویژگی‌های خود را در دمای $40-$ تا $50+$ درجه‌ی سانتی‌گراد از دست نمی‌دهد. این پودر در تقویت خاک نقش اساسی دارد و به جز خاک نباتی و $A-7$ طبقه‌بندی آشتو، می‌تواند برای دیگر خاک‌ها به کار رود.

برای انجام این پژوهش، نخست اقدام به تثبیت خاک لایروبی توسط سیمان (C) (پرکاربردترین تثبیت‌کننده‌ی سنتی)، و سپس ماده‌ی نوین پلیمری معدنی (N) گردید. ماده‌ی به کار رفته یک ماده‌ی نوین پلیمری معدنی است که به تازگی در کشور معرفی شده است (شکل ۵). این ماده به عنوان ماده‌ی افزودنی به سیمان جهت تثبیت خاک در راهسازی و موارد دیگر به کار می‌رود. مزایای استفاده از این ماده‌ی نوین شامل کاهش هزینه‌ها، آلودگی محیط زیست و زمان اجرا؛ دوام بالا، مقاومت در برابر سرما و نفوذپذیری بسیار پایین می‌باشد. همانگونه که از نامش مشخص است؛ این ماده دارای ترکیبی پلیمری - معدنی بر اساس پودرهای بازپراکنش و پرکننده معدنی به صورت مخلوط سیلیکای فعال شده، سیمان فعال شده، نمک کلسیم، نمک سدیم و مخلوط‌های بازپخش شده بر مبنای لیگنین و به ویژه لیگنین تغییرشکل یافته، اسیدهای کربن دار،



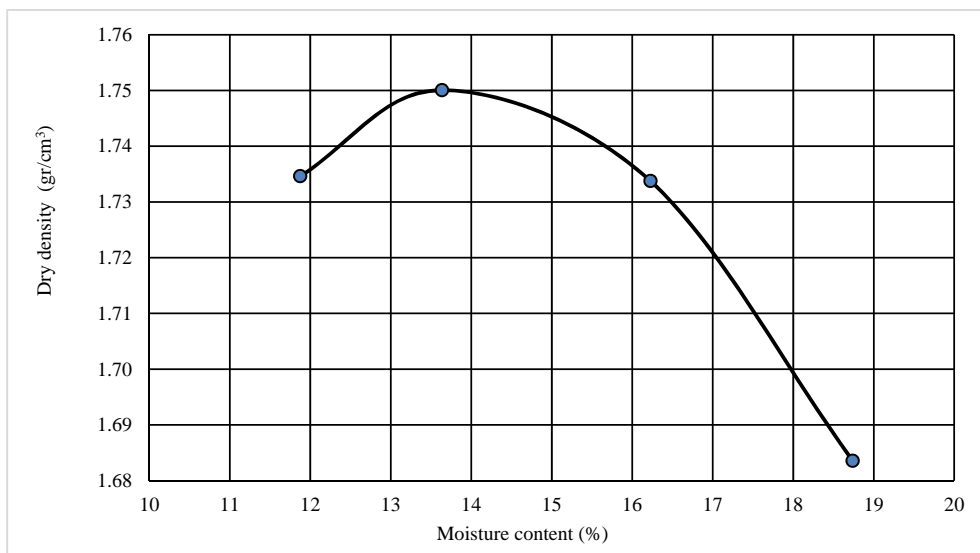
شکل ۵. ماده‌ی نوین پلیمری معدنی به کار رفته در این پژوهش

۴- نتایج آزمایش‌ها آزمایش‌های انجام شده روی خاک لایروبی تثبیت شده

۴-۱- آزمایش تراکم

بیشینه‌ی آن $1/75$ گرم بر سانتی‌متر مکعب ($17/16$ کیلونیوتن بر متر مکعب) است (شکل ۶).

بر اساس آزمایش تراکم اصلاح شده ASTM D 1557-12، رطوبت بهینه خاک PGD: $13/64$ درصد و وزن مخصوص



شکل ۶. نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده‌ی خاک PGD

۴-۲-آزمایش شیمیایی

لایروبی نخست اکسید سیلیسیم و سپس اکسید کلسیم (۲۲/۹۶ درصد) است. مطابق با طبقه‌بندی نشان داده شده در جدول ۲؛ خاک PGD مورد استفاده در واقع یک نوع خاک «سیلیس آهک‌دار»^۲ می‌باشد.

جدول ۱ که نتایج آزمایش شیمیایی خاک لایروبی را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، کاهش وزن ناشی از گرما در خاک PGD به نسبت زیاد است (نزدیک به ۲۰ درصد افت وزنی) و همچنین، آزمایش شیمیایی نشان داد که اجزای اصلی خاک

جدول ۱. نتایج آزمون‌های شیمیایی خاک PGD

عناصر سازنده	نتایج آزمون‌های شیمیایی (درصد)
کاهش وزن بر اثر سرخ شدن	۱۹/۹۵
اکسید سیلیسیم (SiO ₂)	۳۸/۷۶
اکسید آلومینیم (Al ₂ O ₃)	۷/۷۰
اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)	۵/۴۰
اکسید کلسیم (CaO)	۲۲/۹۶
اکسید منیزیم (MgO)	۲/۴۰
سولفات (SO ₃)	۰/۲۶

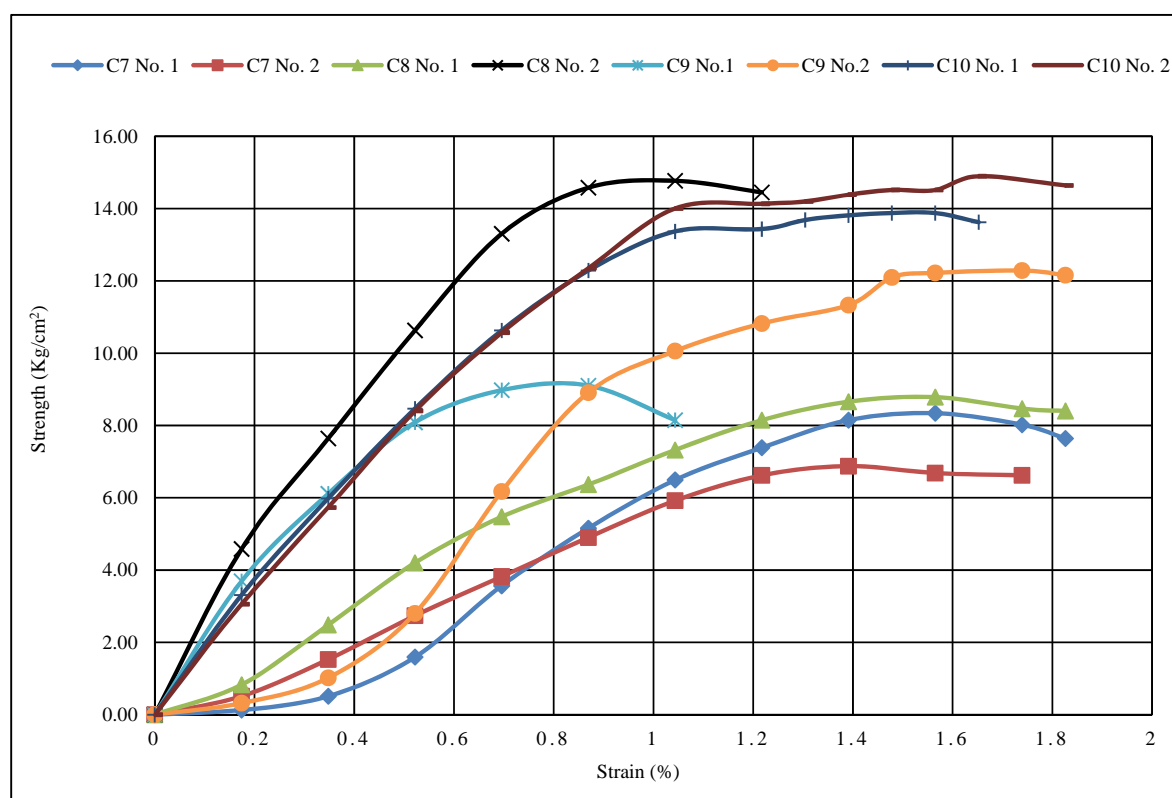
جدول ۲. تغییر پیشوند کربنات برای مقدار کربنات کمتر از ۹۰٪ (Poulos, 1988)

پیشوند	میزان کربنات (درصد)
کربنات سیلیس‌دار	۵۰ تا ۹۰
سیلیس آهک‌دار	۱۰ تا ۵۰
سیلیس	۰ تا ۱۰

۳-۴- آزمایش تک محوری (UCS)

و نوع افزودنی تثبیت شده به ترتیب C7، C8، C9 و C10 می‌باشند. نمونه‌ها به مدت ۷ روز در شرایط مرطوب عمل‌آوری شدند. نتایج آزمایش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. بیشترین مقاومت اوج مربوط به C10 No. 2 (۱۴,۹۰) کیلوگرم بر سانتی متر مربع) و سپس به C8 No. 2 (۱۴,۷۷) کیلوگرم بر سانتی متر مربع) و کمترین مقدار متعلق به C7 No. 2 (۶,۸۸) کیلوگرم بر سانتی متر مربع) است.

برای بررسی چگونگی رفتار این PGD تثبیت شده، نخست نمونه‌های با قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۱۱/۵ سانتی متر تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری^{۱۳} (UCS) (استاندارد ASTM DM2166/D2166M-16) قرار گرفتند تا مقدار تغییر مقاومت فشاری بر اساس میزان سیمان به کار رفته در تثبیت نمونه بررسی شود. بدین منظور از ۷، ۸، ۹ و ۱۰ درصد سیمان برای ساخت ۲ نمونه از هر کدام از درصد‌های سیمان انتخابی استفاده شد. عنوان نمونه‌ها بر اساس درصد سیمان به کار رفته



شکل ۷. نتایج آزمایش UCS نمونه‌های استوانه‌ای ۷ روزه‌ی خاک PGD تثبیت شده با مقادیر گوناگون سیمان دارای قطر ۱۰ سانتی متر

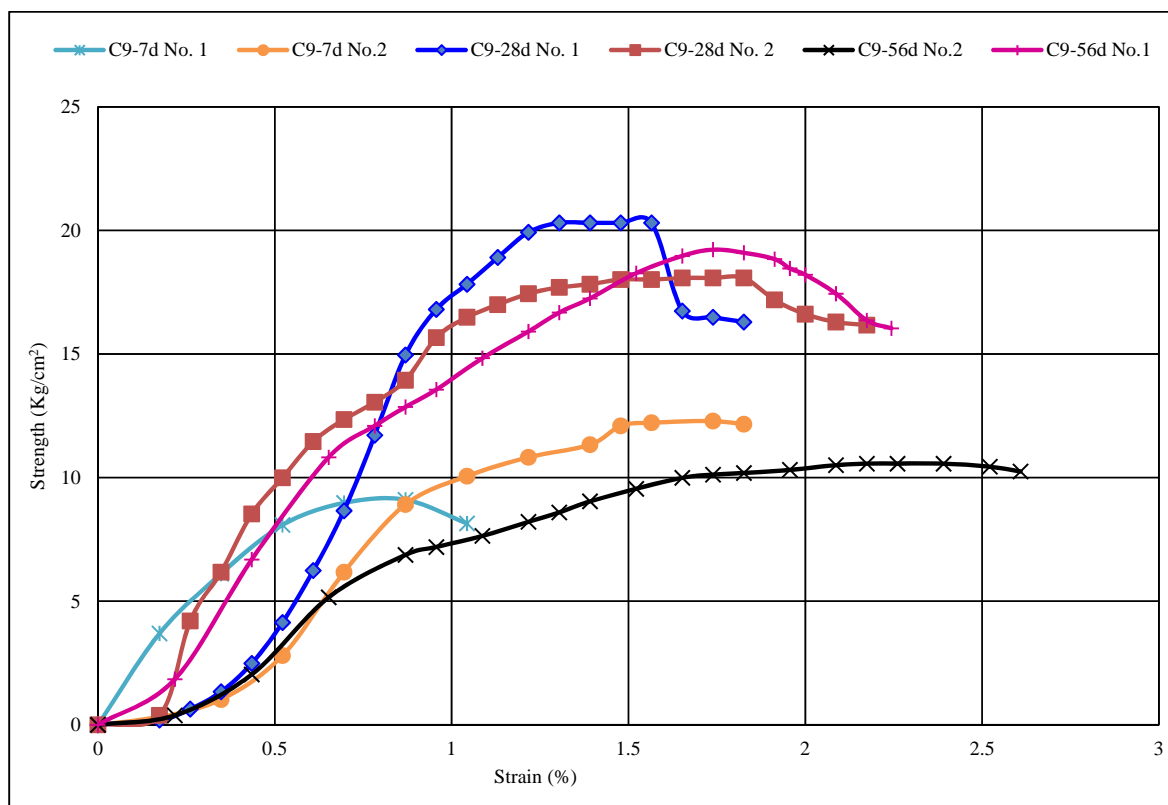
روزه؛ استفاده از ۹ درصد سیمان (C9) مناسب است. از این رو، دو نمونه استوانه‌ای استاندارد ۱۱,۵ در ۱۰ سانتی متر برای هر دوره عمل‌آوری ساخته شد.

با توجه به طبقه‌بندی خاک لایروبی شده (SP) طبق توصیه‌ی نشریه ۲۶۸ (Code No. 268, 2003) (جدول ۳)؛ ۹ درصد سیمان (C9) درصد مناسب برای تثبیت خاک لایروبی می‌باشد. همچنین، نتایج آزمایش UCS برای نمونه‌های ۷ روزه‌ی یاد شده نشان داد که برای ساخت نمونه‌های ۲۸ و ۵۶

شکل ۸ نتایج آزمایش UCS نمونه‌های استوانه‌ای دارای ۹ درصد سیمان (C9) با سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه را نشان می‌دهد. بالاترین مقدار (۲۰،۳۱) کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (مربع) متعلق به C9-28d No. 1 (عمل‌آوری ۲۸ روزه) است. و برخلاف آنچه انتظار می‌رفت، میانگین مقاومت نمونه‌های C9-56d کمتر از نمونه‌های C9-28d بود.

جدول ۳. درصد‌های وزنی مناسب سیمان برای تثبیت انواع خاک‌ها (Code No. 268, 2003)

AASHTO Group	Unified Group	Cement Percent by Weight
A-1-a	GW,GP,GM,SW,SP,SM	5
A-1-b	GP,GM,SP,SM	6
A-2	GM,GC,SM,SC	7
A-3	SP	9
A-4	ML,CL	10
A-5	ML,MH,CH	10
A-6	CL,CH	12
A-7	ML,CH	13



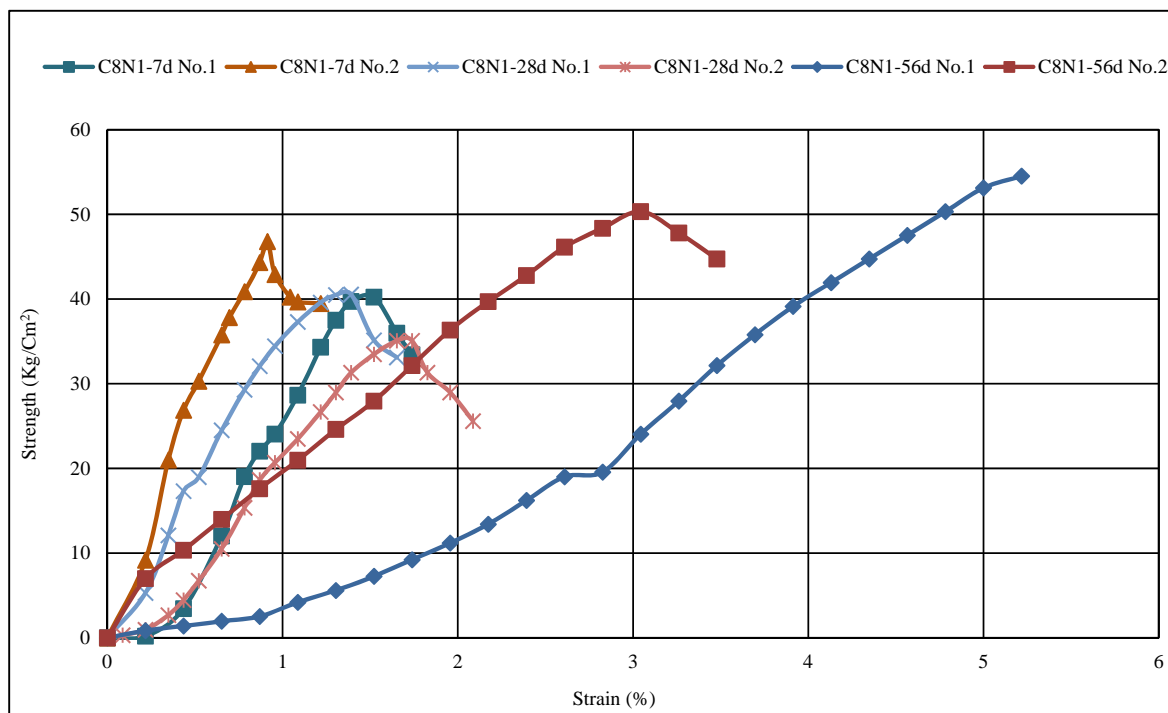
شکل ۸ نتایج آزمایش UCS نمونه‌های استوانه‌ای ۷، ۲۸ و ۵۶ روزهی C9 دارای قطر ۱۰ سانتی‌متر

استفاده از ماده‌ی نوین پلیمری معدنی (N)، با توجه به اینکه مقدار مصرف این ماده‌ی نوین، بر اساس پیشنهاد سازنده ۱۰ درصد وزن سیمان است؛ بنابراین براساس ۹ درصد سیمان توصیه شده، باید حدود ۱ درصد از مقدار سیمان مورد استفاده برای تثبیت خاک PGD توسط ماده‌ی نوین پلیمری معدنی (N) جایگزین شود. بدین ترتیب مقدار سیمان مصرفی برای تثبیت به

با توجه به نتایج آزمایش UCS مربوط به نمونه‌های C9؛ افت مقاومت نمونه در سن ۵۶ روز دیده شد. بنابراین، به خاطر آزمودن تاثیر ماده‌ی نوین پلیمری معدنی (N) بر اصلاح مقاومت و تثبیت خاک PGD و کاهش مقدار سیمان مصرفی؛ اقدام به استفاده از ماده‌ی نوین (N) گردید. با عنایت به دستورالعمل

UCS نمونه‌های خاک اصلاح شده با سیمان و N در شکل ۹ ارائه شده است. بیشینه مقاومت تک‌محوری (UCS) نمونه‌های دارای دوره‌های عمل‌آوری مختلف (۷، ۲۸ و ۵۶ روزه) از دو ترکیب یاد شده در جدول ۴ مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج می‌توان گفت تثبیت با افزودن سیمان (با C + N) ذرات خاک PGD را به یکدیگر می‌چسباند، ساختاری همگن ایجاد می‌کند و استحکام ترکیب تثبیت شده را افزایش می‌دهد.

۸ درصد رسیده و ۱ درصد نیز از ماده‌ی نوین پلیمری معدنی (N) استفاده می‌گردد. بدین ترتیب برای سنجش وضعیت تثبیت خاک PGD؛ ترکیب «خاک PGD + ۸٪ سیمان + ۱٪ ماده‌ی نوین پلیمری معدنی» با عنوان C8N1 مورد بررسی قرار گرفت؛ تا نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌های جدید با نمونه‌های تثبیت شده با ۹ درصد سیمان قابل مقایسه باشند. مقدار رطوبت به کار رفته در ساخت این نمونه نیز ۸ درصد است. نتایج آزمایش



شکل ۹. نتایج آزمایش UCS نمونه‌های استوانه‌ای C8N1 دارای دوره‌ی عمل‌آوری متفاوت

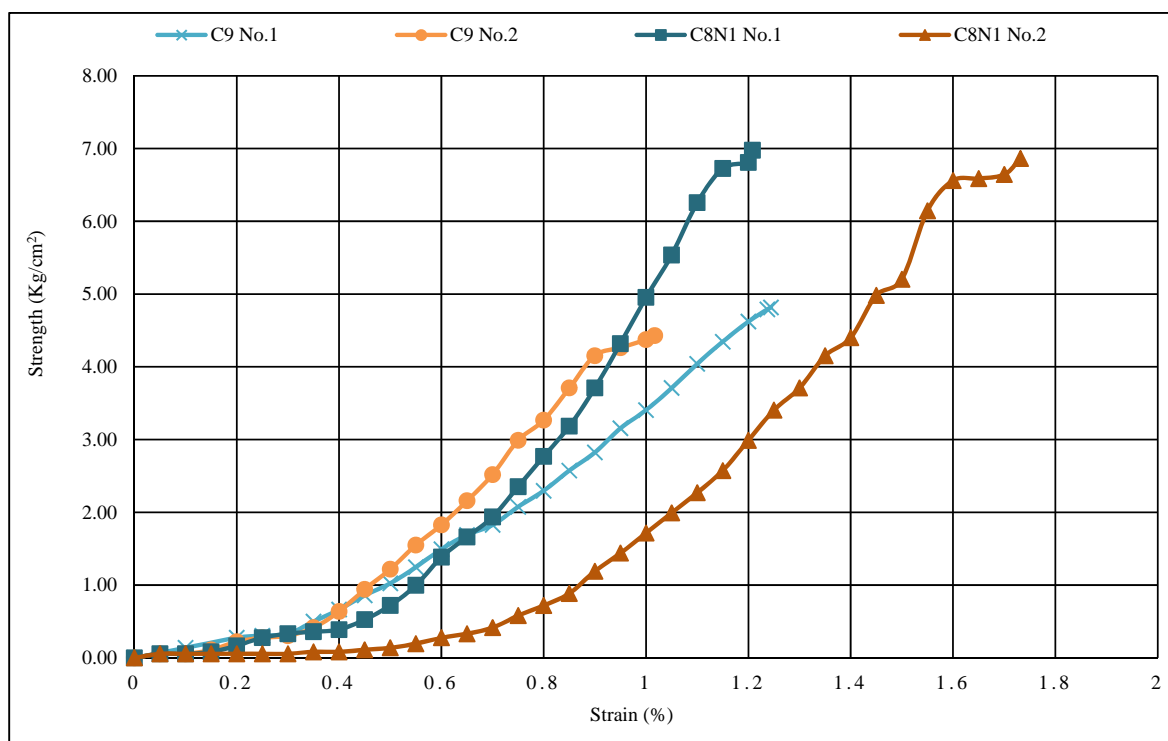
جدول ۴. بیشینه مقاومت تک‌محوری (UCS) نمونه‌های استوانه‌ای خاک لایروبی تثبیت شده (بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

Curing Period	C9	C8N1
7Days	10.70	43.51
28Days	19.20	37.82
56Days	14.90	52.43

۴-۴-۴- آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش غیر مستقیم (برزیلی)

(تعیین مقاومت کششی به روش غیر مستقیم^۴) روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱/۵ سانتی‌متر اقدام شد. نمونه‌ها با رطوبت بهینه ساخته شدند و دوره‌ی عمل‌آوری آن‌ها ۲۸ روز در اتاق رطوبت بود. نتایج آزمایش ITS در شکل ۱۰ و جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به اهمیت وضعیت کشش در لایه‌های روسازی راه؛ برای سنجش وضعیت و توان باربری کششی ترکیب‌های تثبیت شده‌ی خاک PGD؛ و همچنین درک بهتر رفتار غیر فشاری نمونه‌های C9 و C8N1، بر اساس استاندارد ASTM M496C/496C ۱۱ نسبت به انجام آزمایش برزیلی



شکل ۱۰. نتایج آزمایش ITS نمونه‌های C9 و C8N1

جدول ۵. پیشینه مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه‌ی خاک لایروبی تثبیت‌شده (بر حسب Kg/cm²)

Curing Period	C9	C8N1
28Days	4.63	6.92

۴-۵- مقایسه‌ی پیشینه نتایج آزمایش‌های UCS و برزیلی (ITS)

در جدول ۷ مقاومت کششی و فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های تثبیت‌شده با یکدیگر مقایسه شده است. برای محاسبه، نمونه‌ی خاک لایروبی تثبیت‌شده با ۹ درصد سیمان (C9) مینا قرار گرفته است. مقاومت کششی نمونه‌ی تثبیت‌شده با ۸ درصد سیمان و ۱ درصد ماده‌ی نوین پلیمری معدنی (C8N1) در حدود ۵۰ درصد بیشتر از نمونه‌ی خاک - سیمان (۱/۴۹ برابر) است. مقاومت فشاری نمونه‌ی دارای ۸ درصد سیمان و ۱ درصد ماده‌ی نوین پلیمری معدنی (C8N1) بیش از نمونه‌ی خاک لایروبی تثبیت‌شده با سیمان و حدود ۲ برابر (۱/۹۷ برابر) مقاومت فشاری نمونه‌ی خاک - سیمان (C9) است.

جدول ۶ به مقایسه‌ی مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نمونه‌های ۲۸ روزه C8N1 و C9 پرداخته است. بر اساس پیشینه مقاومت (مقاومت نهایی) بدست آمده برای هر ترکیب، دو نمونه آزمایش شده است. بنابراین جهت بدست آوردن نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری؛ میانگین نتایج مقاومت دو نمونه ملاک عمل قرار گرفته است. این نسبت‌ها خیلی بیش از نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در بتن دارای ۱۰ درصد سیمان پرتلند (حدود ۱۰ درصد)، می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که C8N1 نسبت به C9 ویژگی‌های بهتری دارد.

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج پیشینه مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم گزینه‌های برتر

Stabilization Method	Indirect Tensile Strength (Kg/cm ²)	Unconfined Compressive Strength (Kg/cm ²)	ITS to UCS Ratio (%)
C9	4.63	19.20	24.11
C8N1	6.92	37.82	18.30

جدول ۷. مقایسه‌ی نسبت مقاومت‌های کششی و فشاری نمونه‌های برتر با یکدیگر

Stabilization Method	ITS Ratio to C9	UCS Ratio to C9
C9	1	1
C8N1	1.49	1.97

۴-۶- آزمایش سه‌محوری سیکلی

آمده است. نشریه ۲۳۴ (آیین روسازی آسفالتی راه‌های ایران) (Code No. 234, 2011) بیان می‌کند که طراحی روسازی راه بر اساس تعیین M_R مصالح روسازی (لایه‌های آسفالتی و سنگدانه‌ای) است و تاکید مینماید که اگر آزمایش AASHTO T-307 برای یافتن M_R لایه بستر خاکی و مصالح لایه‌های اساس و زیراساس و آزمایش ASTM D4123 برای تعیین M_R آسفالت انجام شود؛ استفاده مستقیم از نتایج آنها برای طراحی روسازی امکان‌پذیر است. طبق همین آیین‌نامه، کمینه CBR قابل قبول برای لایه زیراساس ۳۰ است که M_R آن برابر با ۱۰۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (۱۰۲/۹۷ مگاپاسکال) و بیشینه مقدار آن نزدیک به ۱۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (۱۳۷/۲۹ مگاپاسکال) است. برای لایه اساس، کمینه مقدار CBR ۸۰ است که M_R آن برابر با ۱۹۶۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (۱۹۲،۲۱ مگاپاسکال) و بیشینه مقدار آن نزدیک به ۲۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (۲۷۴،۵۹ مگاپاسکال) می‌شود. این مقادیر برای لایه‌های زیراساس و اساس در جدول ۸ خلاصه شده است.

با توجه به ویژگی‌های برتر C8N1 نسبت به C9، برای تکمیل شناخت از ترکیب خاک لایروبی تثبیت‌شده با ماده نوین و بررسی قابلیت کاربرد ترکیبات تثبیت‌شده در لایه‌های روسازی راه‌ها بر اساس استاندارد آشتو ۹۹-۳۰۷T (۲۰۰۷) آزمایش سه‌محوری چرخه‌ای (سیکلی^۵) بر روی نمونه‌های بزرگ مقیاس استوانه‌ای با قطر ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۴۰ سانتی‌متر انجام شده و مقادیر ضریب برجهنگی (M_R) نمونه‌ی تثبیت شده C8N1 بدست آمد. بدین منظور، ۲ نمونه C8N1 بزرگ مقیاس با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت و فرکانس‌های بارگذاری ۲ و ۵ هرتز (به ترتیب نشانگر گذر خودروها با سرعت کم و متوسط) ساخته شده (در مجموع ۴ نمونه) و مورد آزمایش قرار گرفتند. مقادیر ضریب برجهنگی (M_R) از ۲۰/۲۱ تا ۳۸/۴۳۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج آزمایش سه‌محوری در گزارش پروژه‌ی «تثبیت مصالح لایروبی شده توسط سیمان و سرباره فولاد جهت استفاده در خاکریزهای مهندسی» با شماره ابلاغ ۱۸۸۴۵-۳۹-۹۷ انجام شده در بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

جدول ۸. مقادیر M_R به کار رفته برای طراحی لایه‌های اساس و زیراساس روسازی آسفالتی (نشریه ۲۳۴ (Code No. 234, 2011))

Layer	Resilient Modulus (M_R) (Kg/cm ²)		Resilient Modulus (M_R) (MPa)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Subbase	1050 ^۵	1400	102.97	137.29
Base	1960	2800	192.21	274.59

*: اعداد درشت‌نویس شده حدود غیرقابل چشم‌پوشی آیین‌نامه هستند. دیگر اعداد ذکر شده حدود متداول را یادآور می‌گردند که بایستی نسبت به دیگر لایه‌ها سنجیده شوند.

C8N1 (گستره‌ی ۲۰/۲۱ تا ۳۸/۴۳۰۰ مگاپاسکال) با حدود رواداری مد نظر نشریه‌ی ۷۳۱ (آیین‌نامه‌ی طراحی، اجرا و نگهداری روسازی‌های بتنی (از کمینه: ۳۴۴۵ مگاپاسکال تا بیشینه: ۶۸۹۰ مگاپاسکال) (Code No. 731, 2017))؛ C8N1 می‌تواند به عنوان لایه‌ی اساس زیر اساس روسازی بتنی نیز به کار رود.

بر اساس نتایج ارزیابی شده (M_R : ۲۰/۲۱ تا ۳۸/۴۳۰۰ مگاپاسکال) و مقایسه با حد کمینه‌ی مورد قبول نشریه ۲۳۴ (Code No. 234, 2011) (جدول ۸)؛ مقدار ضریب برجهنگی (M_R) نمونه‌های بررسی شده برای استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی آسفالتی راه مناسب هستند. همچنین، با مقایسه‌ی مقادیر ضریب برجهنگی M_R بدست آمده برای

۵- بحث (مقایسه فنی و اقتصادی روش‌های سنتی با تثبیت خاک لایروبی برای به‌کارگیری به عنوان اساس یا زیراساس)

مقایسه‌ی هزینه‌های روش سیمان پلیمری و روش سنتی به عوامل گوناگون بستگی دارد. این عوامل شامل فواصل حمل، وجود منابع قرضه، دانه‌بندی مصالح اساس و زیراساس و قیمت سیمان و ماده‌ی نوین پلیمری معدنی و ... است. در برآوردهای گوناگون با شرایط یکسان، اقتصادی‌تر بودن به کارگیری ماده‌ی نوین پلیمری معدنی گزارش شده است. صرفه‌ی اقتصادی استفاده از این ماده تا ۲۷ درصد گزارش شده است. افزون بر آن، مزیت دیگر استفاده از این ماده کاهش زمان اجرا و آلودگی محیط‌زیست می‌باشد. در روش سنتی، شمار کامیون‌های لازم برای حمل مصالح معدنی خیلی بیشتر است. افزون بر آن بایستی مصالح زیراساس و اساس به نحوی برداشت یا خریداری و تامین گردد. اما در استفاده از ماده‌ی نوین پلیمری معدنی، نیازی به تامین مصالح نیست. بنابراین مشکل ناشی از بازیافت مصالح قدیمی فرودگاه‌ها و رویه‌ی راه‌ها حل خواهد شد. افزون بر کاهش زمان اجرا؛ در روش سنتی، به ازای ساخت هر کیلومتر مربع، ۲۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰۰ گرم بر ساعت آلایندگی هوا تولید می‌گردد؛ اما با استفاده از ماده‌ی نوین پلیمری معدنی این عدد به ۹۰۰۰ تا ۱۴۴۰۰ گرم بر ساعت کاهش می‌یابد. انرژی مصرفی در روش سنتی نیز از ۱۵۰ تا ۲۰۰ هزار گیگاژول (GJ) برای هر کیلومتر مربع است؛ در حالی که این رقم با استفاده از ماده‌ی نوین به ۵ تا ۱۰ هزار گیگاژول برای هر کیلومتر مربع می‌رسد. همچنین، در روش سنتی ضخامت لایه‌ی آسفالتی ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر و در روش نوین ۵ تا ۱۲ سانتی‌متر است. عمر راه‌های کنونی نزدیک به ۱۰ سال است، در صورت استفاده از ماده‌ی نوین؛ عمر جاده به ۲۵ تا ۳۰ سال می‌رسد. بر پایه‌ی تحقیق از قیمت‌های مصالح راهسازی در منطقه‌ی جنوب ایران (بندرعباس، بوشهر و ...) بهای مصالح مصرفی راهسازی در اردیبهشت ۱۴۰۳ به صورت زیر است. شایان ذکر است در این برآورد از هزینه‌های ورود مصالح اساس و زیراساس به منطقه ویژه اقتصادی شهید رجایی چشم‌پوشی شده است.

قیمت سیمان فله: هر تن ۲۰ میلیون ریال

قیمت ماده‌ی نوین پلیمری معدنی : ۱۰ برابر سیمان: ۲۰۰ میلیون ریال

قیمت اساس: هر تن ۲,۳۰۰,۰۰۰ ریال

قیمت زیراساس: هر تن ۲,۰۰۰,۰۰۰ ریال

با فرض ضخامت ۱۵ سانتی‌متری برای اساس و ۲۰ سانتی‌متری برای زیراساس در روسازی عادی و متداول و همچنین ضخامت ۲۵ سانتی‌متری برای اساس تثبیت‌شده (ترکیب خاک لایروبی با سیمان و ماده‌ی نوین پلیمری معدنی) می‌توان بهای واحد تامین مصالح برای ساخت هر مترمکعب روسازی (صرفاً برای لایه‌های زیراساس اساس) را بدست آورد. اگر وزن مخصوص مصالح اساس و زیراساس در حالت متراکم را برابر ۲/۲ تن در مترمکعب در نظر بگیریم؛ حجم هر تن از مصالح اساس یا زیر اساس برابر ۰/۴۵۵ مترمکعب خواهد بود. وزن مخصوص ترکیب برتر نیز برابر ۱/۹۷ تن در مترمکعب است. بنابراین، حجم هر یک تن خاک لایروبی تثبیت شده با سیمان و ماده نوین پلیمری معدنی ۰/۵۰۸ مترمکعب خواهد بود. با توجه به قیمت و ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس، با گرفتن میانگین وزن‌دار؛ قیمت هر تن مخلوط اساس و زیراساس برابر ۲,۱۲۸,۵۷۱ ریال (یعنی هر ۰/۴۵۵ مترمکعب از مخلوط اساس و زیراساس) خواهد بود. بدین ترتیب بهای یک مترمکعب مخلوط اساس و زیراساس برابر ۴,۶۷۸,۱۷۹ ریال بدست می‌آید. برای ساختن اساس/زیراساس از ترکیب برتر، بایستی ۹۱ درصد خاک لایروبی با ۸ درصد سیمان و ۱ درصد ماده‌ی نوین پلیمری معدنی مخلوط شود. بنابراین، بهای ساخت هر تن ترکیب سیمان و ماده‌ی نوین برای آمیختن با خاک لایروبی موجود در محل ۳,۶۰۰,۰۰۰ ریال (یعنی هر ۰/۵۰۸ مترمکعب از ترکیب برتر) خواهد بود. بدین ترتیب بهای یک مترمکعب مخلوط ترکیب برتر برابر ۷,۰۸۶,۶۱۵ ریال بدست می‌آید. شایان ذکر است، به همین ترتیب هزینه‌ی ساخت هر مترمکعب مخلوط خاک لایروبی و ۹ درصد سیمان برابر ۳,۵۴۳,۳۰۷ ریال خواهد بود. اگر پهنای خط را ۳/۶۵ متر در نظر بگیریم، با یک متر مکعب از ترکیب اساس و زیراساس می‌توان ۷۸ سانتی‌متر از مسیر راه و با یک مترمکعب از ترکیب برتر می‌توان ۱۱۰ سانتی‌متر از مسیر راه را ساخت. همچنین اگر برای مقایسه، ترکیب خاک لایروبی و ۹ درصد سیمان را ۳۰ سانتی‌متر در نظر بگیریم؛ با یک مترمکعب از ترکیب خاک و ۹ درصد سیمان می‌توان ۹۲ سانتی‌متر از مسیر راه را ساخت. بنابراین، هزینه‌ی ساخت یک کیلومتر از راه با این سه روش مطابق جدول ۹ است.

جدول ۹. مقایسه اقتصادی روش‌های گوناگون ساخت لایه‌های زیراساس/اساس یک کیلومتر از مسیر راه (قیمت‌های اردیبهشت ۱۴۰۳)

	Cost of 1m ³ Road Construction (IR Rial)	Road Length (cm)	Cost of 1km Road Construction (IR Rial)
Conventional Base/Subbase for Pavement	4,678,179	78	5,997,665,385
C8N1 as Base/Subbase for Pavement	7,086,615	110	6,442,377,373
C9 as Base/Subbase for Pavement	3,543,307	92	3,851,420,652

لایه‌های روسازی راه‌های دسترسی و مانند آنها در محوطه‌ی بندر و منطقه آزاد اقتصادی می‌باشد. برای تثبیت خاک PGD از سیمان به عنوان در دسترس‌ترین و متداول‌ترین تثبیت‌کننده و یک ماده‌ی نوین پلیمری معدنی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی غیرمستقیم و همچنین آزمایش سه‌محوری سیکلی نشانگر برتری نمونه‌های تثبیت شده با ماده‌ی نوین پلیمری معدنی است. به گونه‌ای که مقادیر ضریب برجهندگی بدست آمده برای نمونه‌های C8N1 در سن ۲۸ و ۵۶ روزه به طور مناسبی حدود رواداری‌های لایه‌های زیراساس و اساس مندرج در آیین‌نامه‌های ۲۳۴ و ۷۳۱ ایران (به ترتیب مربوط به روسازی‌های آسفالتی (Code No. 234, 2011) و بتنی (Code No. 731, 2017)) را برآورده می‌نماید. مقایسه‌ی فنی و اقتصادی انجام شده در انتهای مقاله نیز از هزینه‌ی منطقی استفاده از ترکیب C8N1 به جای C9 (نمونه‌ی خاک PGD تثبیت شده با سیمان تنها) و مزیت فنی آن را به صورت آشکار تایید نموده است. بنابراین؛ این پژوهش یک راهکار فنی و دارای توجیه اقتصادی را برای بهره‌گیری از خاک لایروبی پر حجم، جاگیر و بدون کاربری مشخص ارائه نموده است. بدیهی است با توجه به انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی؛ برای سنجش کارایی این ترکیب تثبیت شده در محل، ترکیب برتر C8N1 باید به صورت میدانی اجرا شده، بارگذاری گردد و مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

بر اساس مقادیر بهای بدست آمده از جدول ۹؛ ارزان‌ترین روش ساخت لایه‌ی اساس/زیراساس، استفاده از ترکیب خاک لایروبی و ۹ درصد سیمان (C9) است. با توجه به مقاومت نامناسب این ترکیب برای لایه‌های اساس و زیراساس امکان استفاده از آن وجود ندارد. بنابراین، این ترکیب مزیت اقتصادی دارد اما دارای مزیت فنی نمی‌باشد. علیرغم در نظر نگرفتن هزینه‌های مرتبط با ورود و خروج مصالح سنگدانه‌ای به محل بندر شهید رجایی؛ بهای تمام شده برای دو روش سنتی و ترکیب برتر (C8N1) تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. آشکار است مزیت عمده‌ی ساخت لایه‌ی اساس/زیراساس با C8N1 عبارتند از: ۱) سادگی ساخت ترکیب (اختلاط آسان) در محل و ۲) در دسترس بودن خاک PGD. بنابراین حجم کم مصالح ورودی (سیمان و ماده‌ی نوین پلیمری معدنی) در مقایسه با روش سنتی و متداول راهسازی کار را آسان می‌کند. افزون بر موارد یاد شده؛ می‌توان از سرعت اجرا، استفاده از خاک لایروبی دپو شده و کاهش آلاینده‌ی زیست‌محیطی ناشی از مصرف کمتر سوخت؛ به عنوان دیگر سودمندی‌های روش تازه نام برد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت کاربرد خاک لایروبی شده از بندر شهید رجایی در خلیج فارس که هیچگونه ویژگی خمیری نداشت؛ مورد بررسی قرار گرفت. پیشنهاد این کار پژوهشی، تثبیت خاک لایروبی ریزدانه (A-3) و استفاده از آن به عنوان

۷- سپاسگزاری

در آزمایشگاه بخش «ژئوتکنیک و زیرساخت» مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی؛ با همکاری تکنسین‌های محترم آزمایشگاه، جناب آقای حسنی و جناب آقای نیای انجام شده است. بدین بوسیله از همکاری ایشان قدردانی می‌شود.

این پژوهش با کمک مالی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، در قالب پروژه‌ی «تثبیت مصالح لایروبی شده توسط سیمان و سرباره فولاد جهت استفاده در خاکریزهای مهندسی» با شماره ابلاغ ۱۸۸۴۵-۳۹-۹۷ انجام شد، که بدینوسیله از آن مرکز سپاسگزاری می‌نمایم. همچنین آزمایش‌های این پژوهش

۸- مراجع

- development. *Office of deputy for strategic supervision, bureau of technical execution system and asphalt Institute of Iran*, Pub. 3, 2nd ed., (in Persian).
- Code No. 268, (2003). Instruction Manual for Stabilization and Construction of Embankment Subgrade and Pavement Layers with Stabilized Mixture. *Ministry of Roads and Transportation Deputy of Training, Research and Information Technology Research and Training Center*. Management and Planning Organization Office of the Deputy for Technical Affairs Bureau of Technical Criteria and Specification; Pub. 1, (in Persian).
- Code No. 731, (2017). Design, Construction and Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements. The Ministry of Road & Urban Development Construction and Development of Transportation Infrastructures Company Road, Housing & Urban Development Research Center, Deputy of Technical, *Infrastructure and Production Affairs Department of Technical and Execution Affairs*, Pub. 1, (in Persian).
- Druijf, B. (2016). The use of additives to stabilise dredged material. M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, *the Wroclaw University of Science and Technology*, and the University of Miskolc.
- Dubois V, Abriak NE, Zentar R, Ballivy G. (2009). The use of marine sediments as a pavement base material". *Waste Management (New York, N.Y.)*. Feb; 29(2):774-782. **doi: 10.1016/j.wasman.2008.05.004. PMID: 18640020.**
- Hilbrich, S.L., and Scullion, T., (2007). Rapid Alternative for Laboratory Determination of Resilient Modulus Input Values on Stabilized Materials for AASHTO Mechanistic-Empirical Design Guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2026, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 63-69.
- Kang, G., Tsuchida, T. and Kim, Y. (2017). Strength and stiffness of cement-treated marine
- Aghaei Araei, A., Ghazavi, M., Lashani Zand, F., & rahmani, I. (2023). Modulus of resilience under road and runway stresses for base soil modified with cement and lime. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(10), 2065-2090.
doi: 10.22060/ceej.2023.21624.7802
- AghaeiAraei, A., Asvar, F., & Barkhordari, K. (2024). Evaluation of Durability and Dynamic Properties of Treated Silty-sand Soil as the Road and Runways Base Material. *Road*, 32(118), 1-26.
doi: 10.22034/road.2023.425627.2222
- An, L., Zhang, F., Geng, Y. and Lin B. (2018). Field Measurement of Dynamic Compressive Stress Response of Pavement-Subgrade Induced by Moving Heavy-Duty Trucks. *Shock and Vibration*, 1-12.
- BHRC Report. (2020). Assessment Effect of Polymer-Mineral Nicoflok Additive on Soil Stabilized by Cement as a Material in Roads and Airport Runways Application (Persian). *In Road, Housing and Urban Development Research Center*.
- Cantero, D., Hester, D. and Brownjohn, J. (2017). Evolution of bridge frequencies and modes of vibration during truck passage. *Engineering Structures*, Vol. 152, Dec. 2017, pp. 452-464.
doi: 10.1016/j.engstruct.2017.09.039
- Chan, C., Mizutani, T. and Kikuchi, Y., (2011). "Reusing dredged marine clay by solidification with steel slag: A study of Compressive strength. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol.2, No 1, 270-279.
- Chan, C.M. and Shahri, Z. (2016). Geo-characterisation of dredged marine soils for potential reuse assessment in civil engineering. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, No. 11, June, 7193- 7197.
- Code No. 234, (2011). Iran Highway asphalt paving. the ministry of roads and urban

Geotechnics, Vol. 7, 59-70. ISSN 2214-3912.
doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.05.001

-Pak, A.; Rahmani, I.; Moghaddam, M. and Derakhshan Nik, P. (2011). Dredging - Volume II: Guide to Environmental Impact Assessment. *Transportation Research Institute*, Department of Transportation and Marine Technology, Tehran.

-Pooni J, Robert D, Giustozzi F, Setunge S, Xie YM, Xia J, (2021). Performance evaluation of calcium sulfoaluminate as an alternative stabilizer for treatment of weaker subgrades. *Transportation Geotechnics*, 27, 100462.

-Porbaha, A., Hanzawa, H. and Shima, M. (1999). Technology of air-transported stabilized dredged fill. Part 1: pilot study. *Ground Improvement* 3, 49-58.

-Poulos, H., G., (1988). *Marine Geotechnics*. 1st ed., London, *Unwin Hyman*.

-Rahmani, I., Sadeghpour-Monfared, M., & Aghaei Araei, A. (2023). Behavior Comparison of marl and dredged soil stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) and Basic Oxygen Furnace (BOF) steel slags. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 53.1(110), 55-66.
doi: 10.22034/jcee.2021.45077.2019

-Rezaeimalek, S., Huang, J. and Bin-Shafique, S. (2017). Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization. *Construction and Building Materials*, Vol. 146, Aug. 2017, 210–220.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.093

-Sadeghpour Monfared, M., Rahmani, I., & Aghaei Araei, A. (2021). Various methods of stabilizing dredged and carbonated soils. *Road*, 29(106), 11-42.

doi: 10.22034/road.2021.123064

-Shinsha, H. and Kumagai, T. (2018). Material properties of solidified soil grains produced from dredged marine clay. *Soils and Foundations*, Vol. 58 (3), June, 678-688.

doi: 10.1016/j.sandf.2018.03.003

-Siham K, Fabrice B, Vincent D, Nor Edine A, (2013). Beneficial use of marine dredged sand and sediments in road construction. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-8.

dredged clay at various curing stages. *Construction and Building Materials*, Vol. 132, Feb. 71–84.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.124

-Kang, G., Tsuchida, T., Tang, T.X. and Kalim, T.P. (2017). Consistency measurement of cement-treated marine clay using fall cone test and Casagrande liquid limit test. *Soils and Foundations*, Vol. 57 (5), Oct. 802-814.

doi: 10.1016/j.sandf.2017.08.010

-Liu Y, Chang M, Wang Q, Wang Y, Liu J, Cao C, Zheng W, Bao Y, Rocchi I. (2020). Use of sulfur-free lignin as a novel soil additive: a multi-scale experimental investigation. *Engineering Geology*, 269, 105551, 1-10.

-Mansoorzadeh, S. M., Mahboubi Ardakani, A. R., & Aghaei Araei, A. (2023). Evaluation of compressive strength and stress-strain behavior of materials for base layer containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Transportation Research*, 20(2), 129-146.

doi: 10.22034/tri.2023.391322.3140

-Mohajerani A, Nguyen B.T. and Glavacevic L., (2016), "Estimation of resilient modulus of unbound granular materials using Clegg impact value and field stress levels. *Transportation Geotechnics* 7, 115–129, 2214-3912/_ 2016 Elsevier Ltd.

-MolaAbasi H, Naderi Semsani S, Saberian M, Khajeh A, Li J and Harandi M, (2020). Evaluation of the long-term performance of stabilized sandy soil using binary mixtures: A micro- and macro-level approach. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122209, 1-18.

-Muhunthan, B. and Sariosseiri, F. (2008). Interpretation of Geotechnical Properties of Cement Treated Soils. The Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, July 2008, *Research Report, FHWA Contract DTFH61-05-C-00008*, Compaction Control of Marginal Soils in Fills.

-Nguyen B.T, and Mohajerani A, (2016). Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design. *Transportation*

-Zhalehjoon N., Tolooiyan A., Mackay R., and Bodin D., (2018). The effect of instrumentation on the determination of the resilient modulus of unbound granular materials using advanced repeated load triaxial testing. *Transportation Geotechnics*, Vol. 14, 190-201. ISSN 2214-3912.

doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.01.003

-Zhang, W.L., Zhao, L.Y., McCabe, B.A., Chen, Y.H. and Morrison, L. (2020). Dredged marine sediments stabilized/solidified with cement and GGBS: Factors affecting mechanical behaviour and leachability. *Science of The Total Environment*, Vol. 733, Sep. 138551, 1-16.

doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138551

-Siham, K., Fabrice, B., Vincent, D. and Nor Edine, A. (2005). Beneficial use of marine dredged sand and sediments in road construction. *Conference of Waste Engineering*, Albi, France, May.

-Thomas G, and Rangaswamy K. (2020). Dynamic soil properties of nanoparticles and bioenzyme treated soft clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 137, 106324, 1-10.

-Zeng LL, Bian X, Zhao L, Wang YJ, Hong ZS, (2021). Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 25, 100195, 1-11.

A Practical Solution for Using Persian Gulf Dredged Soils Stabilized with Cement and a New Mineral Polymer

Masoud Sadeghpour-Monfared, M.Sc., Grad., Building & Housing Research Center, Tehran, Iran.

Iraj Rahmani, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Ata Aghaei-Araei, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: I.Rahmani@bhrc.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Finding beneficial applications for abundant dredged soil has strategic importance. Dredged soil can be used for a variety of purposes, including shoreline protection, Apron construction, access roads, park development, and more. This paper investigates the feasibility of using dredged soil from the Persian Gulf (obtained from the construction of Shahid Rajaei Port in Iran) modified with cement and a mineral polymer additive (N) as road subbase or base layers. For this purpose, unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted with different curing times (7, 28, and 56 days). The results showed that dredged soil stabilized with cement and a mineral polymer additive has better UCS than those stabilized with cement only. Due to the superior properties of dredged soil stabilized with cement and a mineral polymer additive, dredged soil can be used as a borrow source for the construction of access roads in ports. In addition to UCS tests, the results of indirect tensile strength (ITS) tests also showed the superior performance of dredged soil stabilized with cement and a mineral polymer additive. Finally, examination of the results of the resilient modulus of subbases and bases made of dredged soil stabilized with cement and a mineral polymer additive and dredged soil stabilized with cement only, and an economic comparison between traditional methods and the use of stabilized layers in road construction, showed that stabilization with cement and a mineral polymer additive is a better option for use in subgrade or base layers.

Keywords: Cement, Dredged Soil, Mineral Polymer Material, Stabilization, Technical and Economical Comparison