

بررسی آزمایشگاهی همبستگی مدول برجهندگی و مقاومت فشاری تک محوری در تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس بستر راه

سیامک شفقتیان^۱، غلام مرادی^۲

۱- استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خدابنده، خدابنده، ایران، shafaghathian@tabrizu.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، gmoradi@tabrizu.ac.ir

چکیده

با توجه به پرهزینه و زمان بر بودن آزمایش، برای تعیین مدول برجهندگی (M_R) در اهداف طراحی، استفاده از روابط معتبر همبستگی با پارامترهای معمول خاک، مفید و رایج می باشد که اعتبار این روابط در خاکهای تثبیت شده، کمتر بررسی شده است. تثبیت خاک ضعیف بستر راه، یکی از روشهای پرهیز از هزینههای مالی و زمانی روش جایگزینی می باشد. طبق توصیه پیمان زیست محیطی کیوتو، تحقیق بر روی استفاده از مصالح نوین مانند پلیمرها و روشهای نوین مانند تثبیت زیستی با اهداف ژئوتکنیکی مانند راهسازی گسترش یافته است. در این پژوهش تاثیر تثبیت شیمیایی و زیستی بر مقاومت فشاری تک محوری (q_u) و M_R و دقت مدل تامسون در همبستگی این دو پارامتر در خاک رس بستر مورد مطالعه، بررسی شد. در تثبیت شیمیایی از یک پلیمر جامد به نام نیکوفلاک و در تثبیت زیستی از یک بیوپلیمر به نام بتاگلوکان استفاده شد. هر دو مثبت، وزن مخصوص خشک خاک را کاهش و رطوبت بهینه و همچنین q_u آن را افزایش می دهند. برخلاف نتایج نزدیک در آزمایش q_u ، پلیمر جامد، M_R خاک تثبیت شده را بیش از بیوپلیمر افزایش می دهد. براساس نتایج تحلیل پراکندگی داده های آزمایش، مدل تامسون برای تخمین M_R برحسب q_u ، در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب بوده و در خاک تثبیت شده با بتاگلوکان از دقت کافی برخوردار نیست.

کلمات کلیدی

مدول برجهندگی (M_R)، مدل تامسون، تثبیت شیمیایی و زیستی بستر رسی، نیکوفلاک، بتاگلوکان

طبق توصیه آشتو، مدول برجهنگی^۱ (M_R) یکی از پارامترهای اساسی به منظور طراحی و تعیین ضخامت لایه های روسازی آسفالتی می باشد [۱] و [۲]. M_R ، مدول الاستیک خاک بر اساس کرنش های برگشت پذیر، در حالت های مختلف تنش و تحت بارهای دینامیکی می باشد [۳]. بررسی تغییرات M_R یکی از موثرترین روش های ارزیابی نتایج تثبیت خاک لایه های روسازی می باشد. بنابراین در تحقیقات گوناگون جهت بررسی تاثیر تثبیت با مصالح سنتی مانند آهک، سیمان، خاکستر بادی، سرباره ها و... به خصوص در خاک بستر، از آن استفاده شده است [۴] و [۵] و [۶] و [۷]. اخیرا به منظور کاهش فشار بر منابع، استفاده از مصالح نوین به جای مصالح سنتی برای تثبیت خاک مطرح شده و گسترش یافته است [۸]. این مصالح به دسته های کلی پلیمرها، یون ها، آنزیم ها، سولفات ها، رزین و نفت و چند شاخه فرعی دیگر تقسیم می شوند [۹]. پلیمر یک ماکرومولکول آلی است که از ترکیب مولکول های منفرد به نام مونومر تشکیل شده است [۱۰]. در ابتدا بیشتر با اهداف کشاورزی از جمله کاهش نفوذپذیری و افزایش پایداری خاک استفاده شد [۱۱] و [۱۲] ولی به تدریج در مهندسی عمران نیز گسترش یافت و اخیرا تاثیر این مواد در زمینه های متنوعی مانند کاهش فرسایش و افزایش پایداری بستر راه و فرودگاه، مخازن دفن زباله و افزایش مقاومت فشاری تک محوری (q_u) و C.B.R خاک رسی، بررسی و مفید ارزیابی شده است [۱۳] و [۱۴] و [۱۵] و [۱۶] و [۱۷]. اخیرا با جدی شدن مخاطرات زیست محیطی و توصیه های پیمان زیست محیطی کیوتو، روش های نوین تثبیت از جمله تثبیت زیستی مطرح گردیده که استفاده از بیوپلیمرها یکی از شاخه های این روش می باشد [۱۸] و [۱۹]. بیوپلیمرها، پلیمرهای سنتز شده توسط موجودات زنده و در واقع بیومولکول های پلیمری هستند [۲۰] که عمدتا در صنایع پزشکی و مکمل های غذایی استفاده می شوند [۲۱]. در مهندسی عمران ابتدا به عنوان ماده آبرگیر فوق روان کننده و کاهنده آب، در تهیه دوغاب سیمان استفاده شده [۲۲] و اخیرا در مهندسی ژئوتکنیک با توجه به تاثیر مثبت آن در اتصال دانه ها و کاهش فرسایش و نفوذپذیری، برای تثبیت خاک مورد توجه قرار گرفته است [۲۳]. استفاده از این مثبت ها به دلیل عدم نیاز به تجهیزات خاص و زمان کوتاه اختلاط، ساده و مقرون به صرفه بوده و در خاک رس موثرتر است [۲۴] و [۲۵].

آزمایش تعیین M_R ، زمان بر و گران است و بر اساس آیین نامه آشتو می توان آن را از روابط معتبر همبستگی با سایر پارامترهای خاک مانند C.B.R و مقاومت فشاری تک محوری (q_u) تخمین زد. البته اعتبار کاربرد این روابط برای هر موقعیت باید بررسی شود [۲۶]. از سال ۱۹۶۰ روابط مستقیم خطی بین M_R و C.B.R توسط هولکوم و فاستر و هولکوم و کلامپ ارائه گردید که در ادامه توسط گریم و هال با ارائه رابطه نمایی اصلاح شد. مدل نمایی نیز توسط محققین مختلف در چند مرحله اصلاح شد. در سال ۱۹۸۵ اوزان با اضافه کردن یک عدد ثابت به روابط نمایی، مدل جدیدی را پیشنهاد داد که ضرایب آن در NCHRP^۲ تغییر یافت [۲۶] و [۲۷] و [۲۸]. تحقیقات بر روی خاک تثبیت شده در این زمینه محدود می باشد. تامسون در سال ۱۹۶۶ یک مدل همبستگی M_R با q_u را برای خاک تثبیت شده با آهک ارایه کرده که کاربرد آن توسط آشتو توصیه شده است [۱] که در ادامه به دلیل نتایج محافظه کارانه، توسط لیتل و همکاران اصلاح شد. توهی و همکاران در سال ۲۰۱۳ نتایج محافظه کارانه مدل تامسون را در خاک رسی تثبیت شده با آهک و با در نظر گرفتن تاثیر حالت تنش گزارش کردند [۲۹] در حالی که پارک و همکاران در سال ۲۰۱۴ با انجام آزمایش ستون تشدید، ضرایب مدل تامسون را برای خاک نخاله ماسه ای تثبیت شده با سیمان و فوم متخلخل محاسبه و دقت بالای مدل را در خاک مذکور نتیجه گرفتند [۳۰].

در این تحقیق، خاک مورد مطالعه، رس بستر راه بوده و برای تثبیت شیمیایی و زیستی به ترتیب از پلیمر جامد نیکوفلاک و بیوپلیمر بتاگلکان استفاده شده و با انجام آزمایش^۳، تاثیر هر کدام بر q_u و M_R بررسی گردیده و طرح بهینه اجرایی بر اساس هریک از این دو پارامتر پیشنهاد شده است. سپس دقت مدل همبستگی تامسون در خاک تثبیت شده با هر ماده و تاثیر حالت تنش در آن بررسی شده است.

^۱ Resilient Modulus

^۲ National Cooperative Highway Research Program

^۳ آزمایش های مدول برجهنگی در آزمایشگاه مرکزی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی و سایر آزمایش ها در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده عمران دانشگاه تبریز انجام شده است.

۲- مصالح

۲-۱- خاک

در این تحقیق از خاک بستر آزادراه آمل-ساری در استان مازندران ایران استفاده شد. طبق نتایج آزمایش دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود اتربرگ، این خاک بر اساس سیستم متحد، رس با حد روانی بالا (CH) طبقه بندی گردید. در جدول ۱ نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM آمده است.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک

CH	نوع خاک
۵۳	LL (%)
۲۲	PL (%)
۳۱	PI (%)
۲/۶۱	Gs
۱/۶۱	γ_{dmax} (g/cm ³)
۱۹/۶	ω_{opt} (%)

۲-۲- تثبیت شیمیایی

در تثبیت شیمیایی از پودر نیکوفلاک که یک ترکیب معدنی پلیمری است، به عنوان پلیمر جامد استفاده شد. هر واحد منومر در ساختار این پلیمر یک زنجیره طولانی داشته و از نوع شانه‌ای می‌باشد و معمولاً به همراه سیمان برای تثبیت خاک و تقویت آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵] و [۳۱]. در جدول ۲ اجزای تشکیل دهنده نیکوفلاک بر اساس اطلاعات تولید کننده و پس از کنترل مجدد آن در ایران^۱ آمده است.

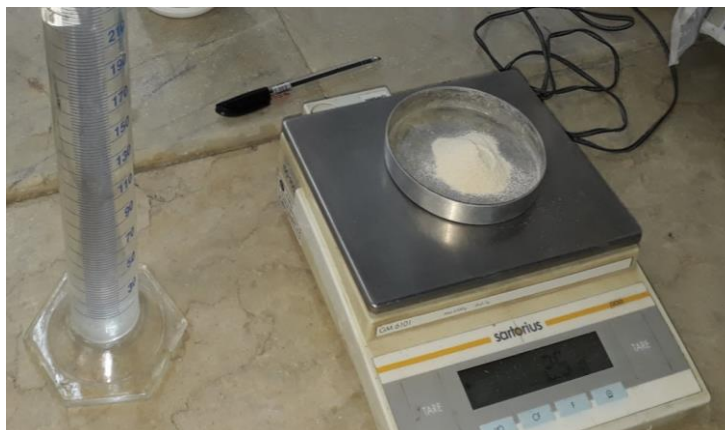
جدول ۲- اجزای نیکوفلاک

SiO ₂	CaO	F	Na ₂ O	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	سایر
۴۵/۱۲	۳۷/۱۳	۴/۰۸	۲/۸۱	۲/۴۶	۱/۱۳	۱/۰۱	۰/۷۳	۵/۵۳

۲-۳- تثبیت زیستی

در تثبیت زیستی از محلول بتاگلوکان در آب مقطر به عنوان بیوپلیمر استفاده شد. بتاگلوکان‌ها، متشکل از منومرهای دی گلوکز و دارای پیوندهای گلیوساید بوده و در طبیعت در اشکال مختلف مثل سلول، سبوس، قارچ و باکتری یافت می‌شوند [۱۹] و با ساختار شاخک‌دار و مارپیچی، پتانسیل بالایی جهت جذب و اتصال با مولکول‌ها از طریق پیوند هیدروژنی نشان می‌دهند [۳۲]. پودر بتاگلوکان در شکل ۱ نشان داده شده است.

^۱ آزمایشگاه مرجع مرکزی دانشگاه علم و صنعت ایران



شکل ۱- پودر بتاگلوکان

۳- روش تثبیت آزمایشگاهی خاک برای نمونه گیری

۳-۱- تثبیت شیمیایی

ابتدا مثبت نیکوفلاک با مقادیر ۰/۳، ۰/۷ و ۱ درصد و سیمان پرتلند نوع دو^۱ با مقدار ثابت ۳ درصد (همگی نسبت به وزن خاک خشک) به ترتیب به خاک خشک اضافه و به خوبی ترکیب شدند تا مخلوط یکنواخت به دست آید و سپس اختلاط با آب مقطر انجام شد (شکل ۲-الف).

۳-۲- تثبیت زیستی

محلول بتاگلوکان پس از تهیه با غلظت‌های ۲، ۴ و ۸ گرم بر لیتر در آب مقطر و اطمینان از یکنواختی آن، به تدریج در چند مرحله به خاک خشک اضافه و عملیات اختلاط انجام شد (شکل ۲-ب).



ب



الف

شکل ۲- نحوه آماده سازی نمونه‌ها (الف) نیکوفلاک و سیمان (ب) بتاگلوکان

^۱ سیمان زنجان- تیپ ۲-۴۲۵

۴- آزمایش‌های انجام شده

۴-۱- آزمایش تراکم (ASTMD698)

برای بررسی اثر تثبیت بر مشخصات تراکمی خاک مورد مطالعه، در تثبیت شیمیایی، پس از ترکیب خاک با سیمان و نیکوفلاک، در هر مرحله از آب مقطر استفاده شد. در تثبیت زیستی، محلول بتاگلوکان در هر مرحله به مقدار حساب شده به خاک خشک اضافه شده و آزمایش، گام به گام انجام شد. آزمایش تراکم برای هر نمونه با روش و دز مشخص، دو بار تکرار و در صورت کم بودن اختلاف نتایج، میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (ASTMD2166)

برای سهولت خروج نمونه با حداقل دست خوردگی، از قالب دو تکه استفاده شد. نمونه‌ها پس از دوره‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بارگذاری گردیدند. برای بررسی تاثیر تثبیت بر خصوصیات شکل‌پذیری خاک، علاوه بر q_u ، مدول الاستیسیته سکانتی معادل ۵۰ درصد مقاومت ($E_{sec} 50\%$) که به طور اختصار در این تحقیق با E نمایش داده می‌شود نیز تعیین شد. برای هر دز و دوره عمل‌آوری، دو نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و در صورت کم بودن اختلاف نتایج، میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

۴-۳- آزمایش تعیین M_R (AASHTOT307)

جهت تامین داده‌های کافی برای بررسی روابط همبستگی، دوره‌های عمل‌آوری برای هر دز از مثبت، ۱۴ و ۲۸ روز در نظر گرفته شد (شکل ۳-الف و ۳-ب). طبق الگوی بارگذاری خاک بستر راه در استاندارد آشتو، نمونه پس از آماده‌سازی با هزار ضربه، تحت سه تنش همه جانبه با روند کاهشی قرار می‌گیرد. در هر کدام از آن‌ها با ۵ تنش سیکلی یا انحرافی با روند کاهشی به صورت جداگانه ۱۰۰ ضربه به نمونه وارد می‌گردد و میانگین مقادیر پنج ضربه آخر جهت محاسبه M_R در هر حالت تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزییات آزمایش در بخش ۵-۳ آمده است (شکل ۳-ج).



ب



الف



ج

شکل ۳-الف-ساخت و ب-عمل آوری نمونه های آزمایش تعیین M_R ج-دستگاه آزمایش سه محوری دینامیکی (شرکت Wykham France)

۵- تحلیل نتایج

۵-۱- آزمایش تراکم

نتایج آزمایش تراکم در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش تراکم

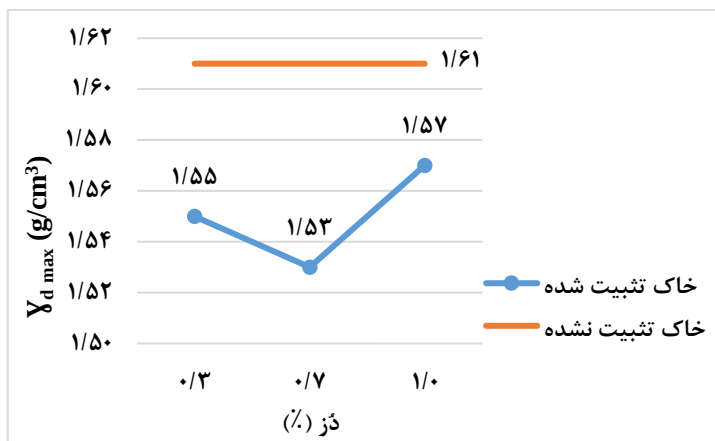
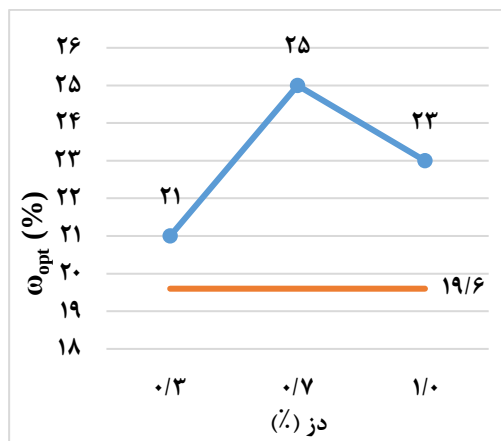
تثبیت زیستی			تثبیت شیمیایی			خاک تثبیت نشده	$\gamma_d \max (g/cm^3)$ $\omega_{opt} (\%)$
۸ g/lit	۴ g/lit	۲ g/lit	۱٪	۰٪/۷	۰٪/۳		
۱/۵۳	۱/۵۲	۱/۵۱	۱/۵۷	۱/۵۳	۱/۵۵	۱/۶۱	
۲۵/۵	۲۵	۲۲	۳۳	۲۵	۲۱	۱۹/۶	

۵-۱-۱- تثبیت شیمیایی

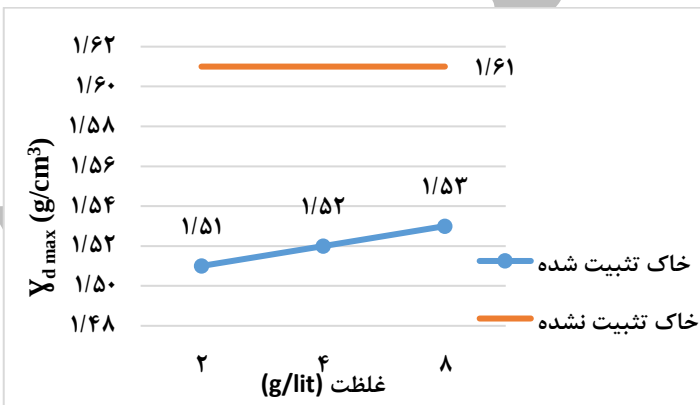
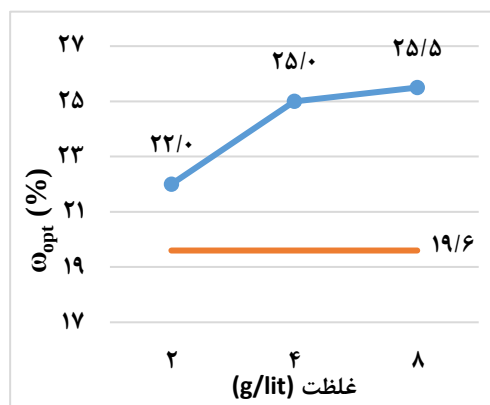
به طور کلی تثبیت خاک رس با مثبت های با پایه کلسیم مثل نیکوفلاک و سیمان به دلایلی از جمله تجمع ذرات در فضاها بزرگتر، وزن مخصوص کم مثبت و واکنش پوزولانی موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می شود [۳۳] ولی با افزایش درصد نیکوفلاک به بالاترین مقدار، این روند متوقف شد و رطوبت بهینه تا حدودی کاهش یافت که این امر می تواند به علت افزایش تاثیر خصوصیات آب گریزی ذرات نیکوفلاک در این حالت باشد [۳۴]. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده به روش شیمیایی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۵-۱-۲- تثبیت زیستی

بتاگلوکان جاذب آب بوده و چگالی آن کمتر از خاک می باشد. بنابراین تجمع فیبرهای بتاگلوکان با دانسیته کم موجب افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص حداکثر خاک شد. رطوبت بهینه با افزایش غلظت بتاگلوکان، مطابق نتایج تحقیقات منبع ۳۲، افزایش یافت. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده به روش زیستی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- نتایج آزمایش تراکم در تثبیت شیمیایی خاک (نیکوفلاک)



شکل ۵- نتایج آزمایش تراکم در تثبیت زیستی خاک (بناکلوکان)

۵-۲- مقاومت فشاری تک محوری (q_u)

q_u و E خاک تثبیت نشده به ترتیب ۰/۵۷ و ۳۶/۲۸ مگاپاسکال حاصل شد. نتایج خاک تثبیت شده به روش شیمیایی و زیستی در جدول ۴ آمده است.

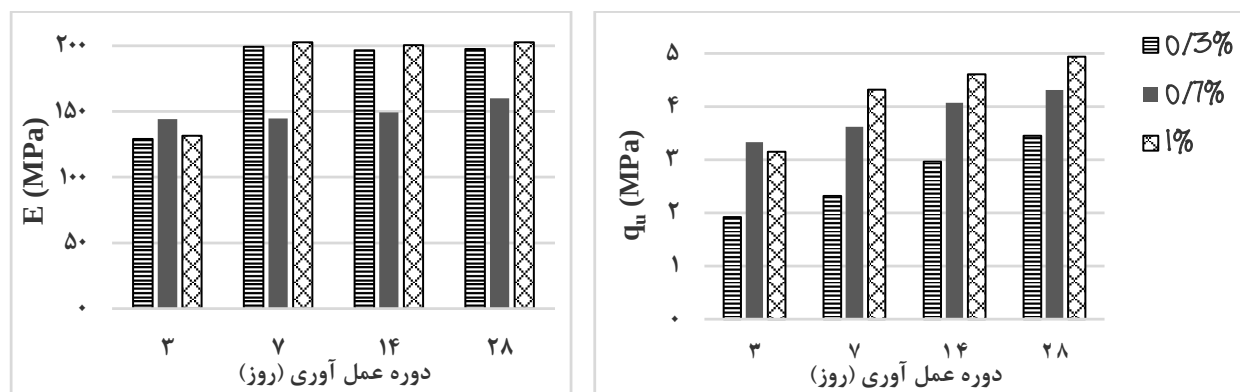
جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (q_u) برای خاک تثبیت شده (MPa)

سه روزه		هفت روزه		چهارده روزه		بیست و هشت روزه			
q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec}		
۱/۹۲	۱۲۹/۱۷	۲/۳۲	۱۹۹/۲۷	۲/۹۶	۱۹۶/۶۷	۳/۴۳	۱۹۷/۶۲	شیمیایی	٪ ۰/۳
۳/۳۳	۱۴۴/۱۴	۳/۶۲	۱۴۴/۸	۴/۰۷	۱۴۹/۲۱	۴/۳۱	۱۶۰/۰۴		٪ ۰/۷
۳/۱۵	۱۳۱/۴۶	۴/۳۲	۲۰۲/۵۸	۴/۶۱	۲۰۰/۵۷	۴/۹۴	۲۰۲/۶		٪ ۱
۲/۷۳	۱۲۱/۸	۴/۵۶	۲۰۵/۶	۵/۰۵	۲۰۷/۵۸	۵/۴۸	۲۰۸/۴۲	زیستی	۲ g/lit
۳/۳۴	۱۸۲/۴۲	۵/۰۲	۲۴۴/۶۵	۵/۴۶	۲۵۴/۵	۵/۶	۲۵۰/۱		۴ g/lit
۳/۵	۱۵۰/۴۱	۴/۳۲	۲۴۱/۰۵	۴/۲۱	۲۵۲/۰۴	۴/۲	۲۴۸/۸		۸ g/lit

۵-۲-۱- تثبیت شیمیایی

q_u نمونه‌ها با افزایش درصد نیکوفلاک افزایش یافت. این امر ناشی از تاثیر مستقیم نیکوفلاک در چسبندگی و همچنین تاثیر آن در بهبود عملکرد سیمان در تثبیت خاک می‌باشد. روند افزایش q_u و E تا ۷ روز سریع بوده و بعد از آن کند شد. بالاترین مقاومت در میزان

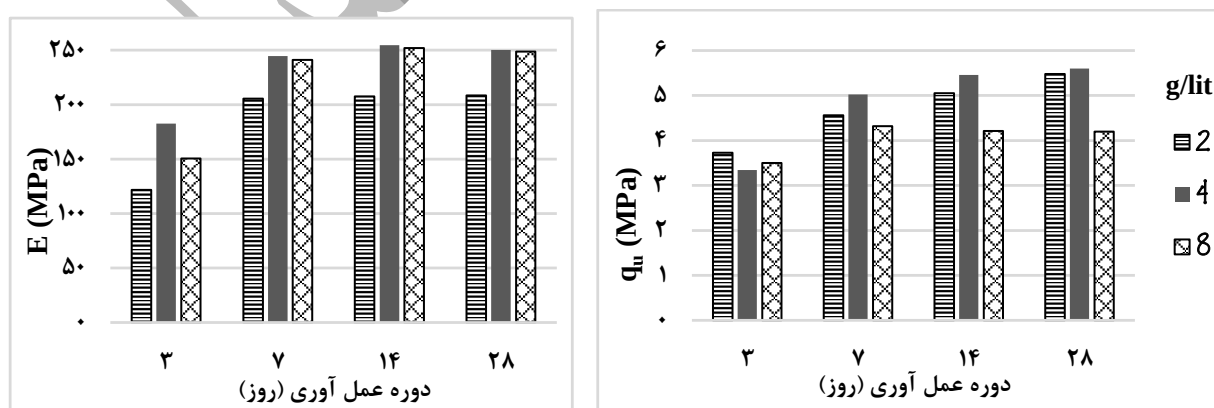
یک درصد و دوره عمل آوری ۲۸ روزه به میزان ۴/۹۴ مگاپاسکال حاصل شد. E در این حالت ۲۰۲/۶ مگاپاسکال است. از آنجا که در این میزان، E و q_u چهارده روزه و بیست و هشت روزه از نظر الزامات طراحی، تفاوت قابل توجهی ندارند برای صرفه جویی در زمان اجرای پروژه، براساس معیار q_u ، میزان یک درصد مثبت و دوره عمل آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شد. در نمودارهای شکل ۶ مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی بر حسب دوره عمل آوری و در درصدهای مختلف پلیمر مقایسه شده‌اند.



شکل ۶- مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی در درصدهای مختلف نیکوفلاک

۵-۲-۲- تثبیت زیستی

q_u تا غلظت ۴ گرم برلیتر افزایش یافته و پس از آن تا غلظت ۸ گرم بر لیتر به خصوص از دوره ۷ روز به بعد کاهش قابل توجهی یافت که با توجه به مشاهده فیبرهای ترکیب نشده دچار فرسایش در ساختار نمونه‌ها پس از آزمایش، می‌تواند ناشی از افزایش کلونی‌های فیبر ترکیب نشده بتاگلوکان با دانه‌های رس در غلظت ۸ گرم بر لیتر در ساختار خاک تثبیت شده، باشد. این روند با شدت کمتر در مورد E نیز دیده شد. بالاترین مقاومت در غلظت ۴ گرم برلیتر و دوره عمل آوری ۲۸ روزه به میزان ۵/۶ مگاپاسکال حاصل شد. E در این حالت ۲۵۰/۱ مگاپاسکال است. با توجه به نزدیکی نتایج و تاثیر دو عامل مقدار مثبت و دوره عمل آوری در اقتصاد پروژه، در صورت انتخاب هریک از این دو عامل، براساس معیار q_u ، غلظت ۲ گرم برلیتر با دوره عمل آوری ۲۸ روزه یا غلظت ۴ گرم برلیتر با دوره عمل آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند. در نمودارهای شکل ۷ مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی بر حسب دوره عمل آوری و در غلظت‌های مختلف بیوپلیمر مقایسه شده‌اند.



شکل ۷- مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت زیستی در غلظت‌های مختلف محلول بتاگلوکان

۳-۵- آزمایش تعیین M_R

الگوی بارگذاری خاک بستر به همراه نتایج M_R خاک تثبیت نشده در جدول ۳ آمده است. حالت واقعی تنش سیکلی و محدود کننده^۱ در بهره‌برداری، بین سکانس ۱ (S_1) و سکانس ۲ (S_2) آزمایش می‌باشد. بنابراین میانگین این دو مقدار به عنوان M_R طراحی در هر حالت در نظر گرفته شد.

جدول ۵- M_R خاک تثبیت نشده تحت الگوی بارگذاری بستر (AASHTO T307)

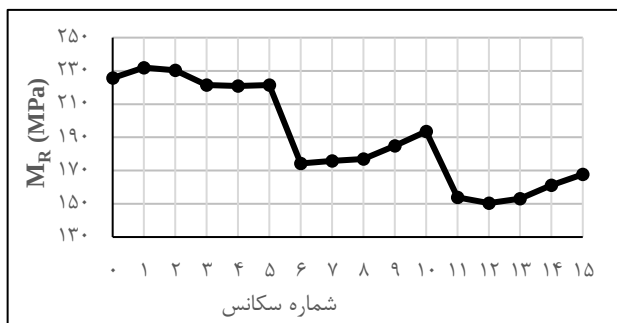
M_R	تنش سیکلی (σ_d)	فشار محدود کننده (σ_c)	سکانس
MPa	kPa	kPa	شماره
-	۲۴/۸	۴۱/۴	۰
۹۴/۳۹	۱۲/۴		۱
۹۱/۲۵	۲۴/۸		۲
۸۶/۹۲	۳۷/۳	۴۱/۴	۳
۸۶/۰۷	۴۹/۷		۴
۸۳/۱۲	۶۲		۵
۸۸/۰۶	۱۲/۴		۶
۸۴/۹۱	۲۴/۸		۷
۸۲/۹۰	۳۷/۳	۲۷/۶	۸
۷۹/۶۳	۴۹/۷		۹
۷۷/۲۰	۶۲		۱۰
۷۹/۸۳	۱۲/۴		۱۱
۷۰/۰۱	۲۴/۸		۱۲
۶۹/۸۸	۳۷/۳	۱۳/۸	۱۳
۷۰/۸۰	۴۹/۷		۱۴
۷۰/۸۴	۶۲		۱۵

نتایج آزمایش تعیین M_R خاک تثبیت شده در نمودارهای شکل‌های ۸ تا ۱۳ نمایش داده شده است.

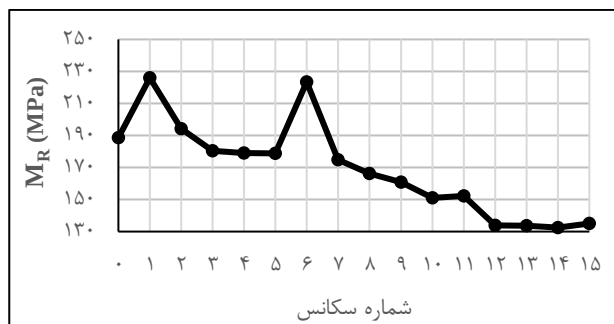
۳-۵-۱- تثبیت شیمیایی

تثبیت شیمیایی با نیکوفلاک، M_R را افزایش داد. روند افزایشی با بالا رفتن درصد نیکوفلاک و تأثیر آن در بهبود عملکرد سیمان و اتصال دانه‌ها ادامه یافت. سرعت افزایش مقدار M_R در ۱۴ روز اول عمل‌آوری بالاتر است. بیشترین مقدار M_R طراحی در میزان افزودنی یک درصد و دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به میزان ۳۵۸ مگاپاسکال حاصل شد. با توجه به نزدیک بودن نتایج و الزامات طراحی و اجرایی، مقدار افزودنی یک درصد با دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شد که مشابه حالت بهینه با معیار q_u می‌باشد.

^۱ Confining Pressure

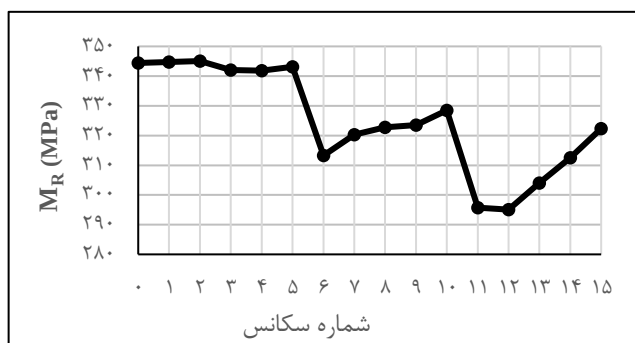


ب

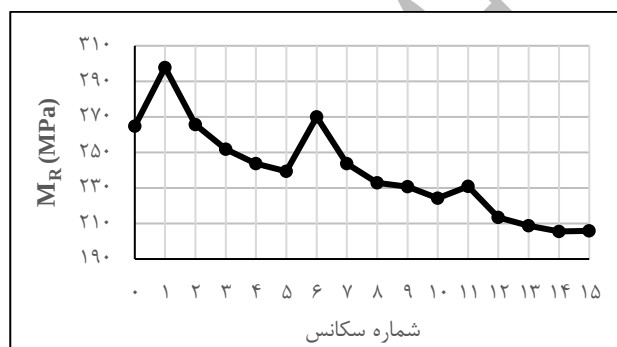


الف

شکل ۸- مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۳٪ درصد نیکوفلاک در دوره‌های عمل‌آوری الف) ۱۴ روزه ب) ۲۸ روزه

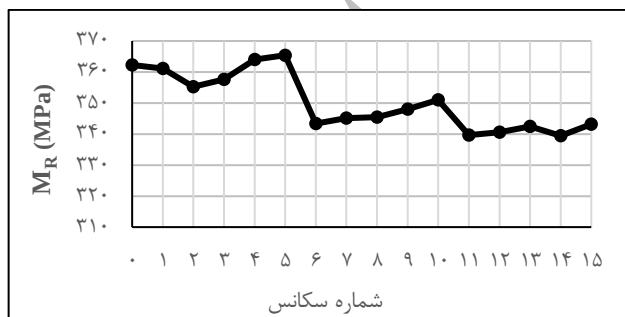


ب

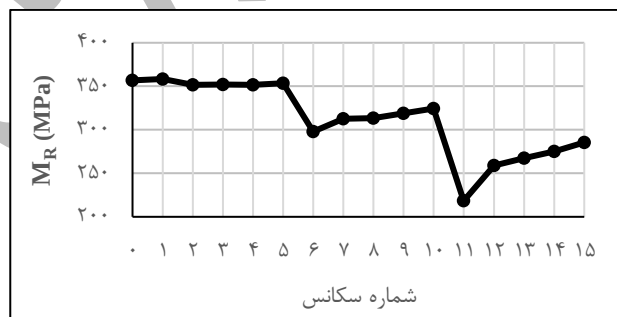


الف

شکل ۹- مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۷٪ درصد نیکوفلاک در دوره‌های عمل‌آوری الف) ۱۴ روزه ب) ۲۸ روزه



ب

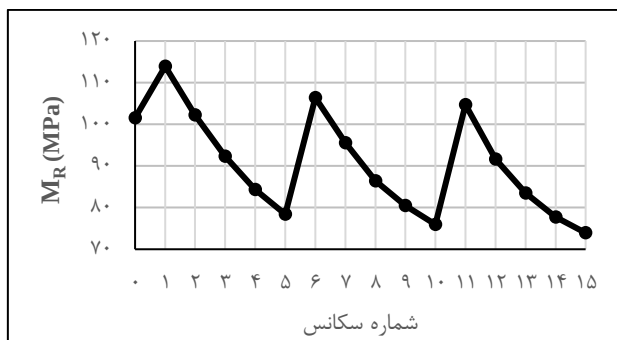


الف

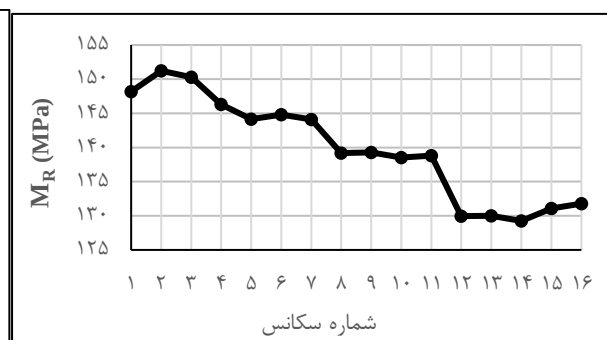
شکل ۱۰- مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۱ درصد نیکوفلاک در دوره‌های عمل‌آوری الف) ۱۴ روزه ب) ۲۸ روزه

۲-۳-۵- تثبیت زیستی

مشابه روند آزمایش M_R, q_u تا غلظت ۴ گرم بر لیتر افزایش یافته و پس از آن تا غلظت ۸ گرم بر لیتر تغییر چندانی نداشته و حتی از ۱۴ روز به بعد کاهش یافت. به دلایلی که در بخش ۲-۲-۵ بیان شد در غلظت ۸ گرم بر لیتر بر روی بدنه نمونه‌ها، قارچ و فرسایش ملاحظه شد (شکل ۱۴). بیشترین مقدار M_R طراحی در غلظت ۴ گرم بر لیتر و دوره ۲۸ روزه به میزان ۱۵۴/۵ مگاپاسکال حاصل شد ولی با توجه به نزدیک بودن نتایج، الزامات طراحی و اجرایی و هزینه تهیه مثبت بیوپلیمر، غلظت ۲ گرم بر لیتر با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب می‌شوند.

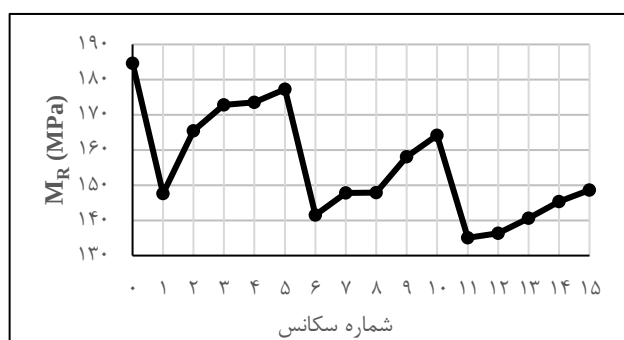


ب

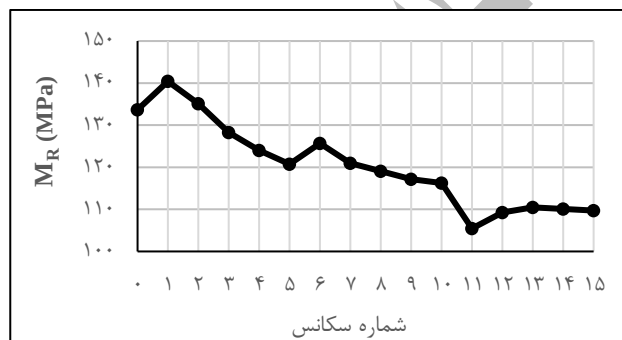


الف

شکل ۱۱- مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۲ گرم برلیتر بنتاگلکان در دوره‌های عمل‌آوری الف) ۱۴ روزه ب) ۲۸ روزه

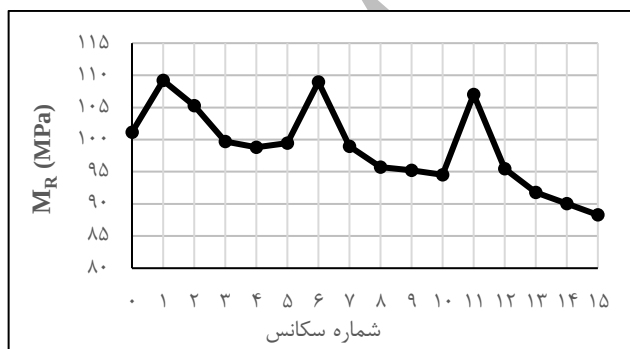


ب

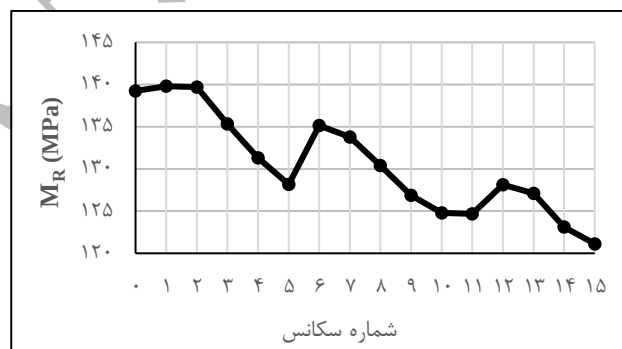


الف

شکل ۱۲- مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۴ گرم برلیتر بنتاگلکان در دوره‌های عمل‌آوری الف) ۱۴ روزه ب) ۲۸ روزه



ب



الف

شکل ۱۳- مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۸ گرم برلیتر بنتاگلکان در دوره‌های عمل‌آوری الف) ۱۴ روزه ب) ۲۸ روزه



شکل ۱۴- نمونه تثبیت شده به روش زیستی با غلظت ۸ گرم بر لیتر محلول بتاگلوکان

۴-۵- ارزیابی دقت مدل تامسون در تخمین M_R خاک مورد مطالعه

رابطه ۱ مدل تامسون را بیان می‌کند:

$$M_R = a \cdot q_u + b$$

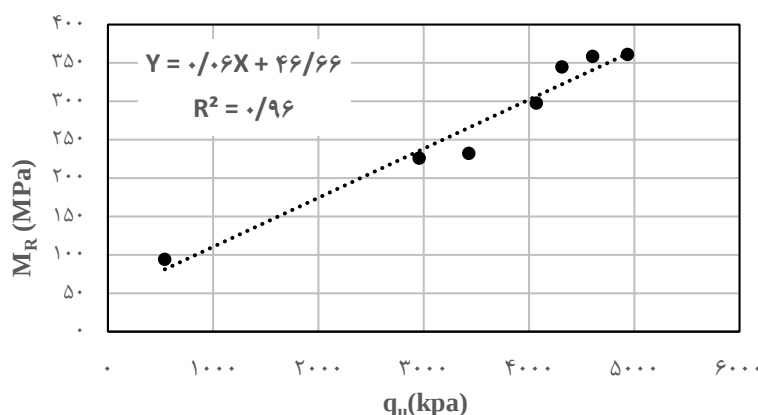
رابطه ۱

که در آن a و b اعداد ثابت هستند.

در این مدل، M_R با یک رابطه خطی با q_u همبستگی دارد. برای ارزیابی این رابطه در حالت‌های مختلف تنش (سکانس‌های مختلف آزمایش M_R)، داده‌های دو دوره عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روزه در دزهای سه گانه مثبت نیوفلاک و بتاگلوکان که در بخش ۲-۵ و ۳-۵ آمده، در نظر گرفته شد. بنابراین برای تحلیل پراکندگی مدل تامسون در خاک تثبیت شده با هریک از مثبت‌ها، برای هر حالت تنش در سکانس‌های ۱۵ گانه، ۷ داده موجود می‌باشد. به عنوان مثال نتیجه تحلیل داده‌های نیوفلاک در S_1 ، براساس اطلاعات جدول ۶ در شکل ۱۵ آمده است. ردیف اول مربوط به نتایج خاک تثبیت نشده می‌باشد.

جدول ۶- مشخصات خاک تثبیت شده به روش شیمیایی جهت ارزیابی مدل تامسون در S_1

M_R	q_u	دوره عمل‌آوری	دز
MPa	kPa	روز	%
۹۴/۳	۵۴۰	-	-
۲۲۶	۲۹۵۷	۱۴	۰/۳
۳۳۱/۹۶	۳۴۳۰	۲۸	
۲۹۷/۷۸	۴۰۶۹	۱۴	۰/۷
۳۴۴/۷۱	۴۳۱۲	۲۸	
۳۵۸/۳۷	۴۶۰۶	۱۴	۱
۳۶۱/۱	۴۹۳۶	۲۸	

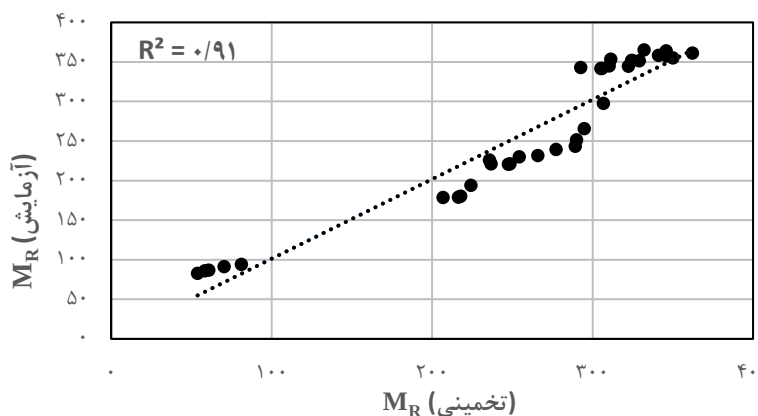


شکل ۱۵- ارزیابی دقت مدل تامسون در تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی در S1

سایر نتایج به همراه دقت همبستگی برای نتایج M_R طراحی حاصل از آزمایش نیز که در بخش ۵-۳ تعریف شد، در جدول ۷ آمده است. داده‌های تحلیل نشان می‌دهد که به غیر از S11 در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، دقیق‌ترین برآزش در هر تنش همه جانبه، در کمترین تنش انحرافی ملاحظه می‌شود. بنابراین با افزایش تنش انحرافی از دقت مدل در تخمین M_R طراحی بر اساس q_{11} کاسته می‌شود. برخلاف خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، مدل تامسون برای خاک تثبیت شده با بتا گلوکان از دقت کافی برخوردار نیست. دقت مدل در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک حساسیت بیشتری نسبت به تغییر تنش همه جانبه نشان می‌دهد و در محدوده S1 تا S5 که عمده‌ترین حالات واقعی تنش در راه‌های اصلی و بزرگراه‌ها را شامل می‌شود بالاترین دقت را دارد. در شکل ۱۶ نتایج M_R حاصل از آزمایش و مدل تامسون خاک تثبیت شده به روش شیمیایی، در این محدوده مقایسه شده‌اند.

جدول ۷- دقت مدل تامسون (R^2) در تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی و زیستی

S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	شیمیایی
۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۶	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	
۰/۹۵	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۸۵	۰/۸۶	
S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	زیستی
۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۳	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۶۱	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	
۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۶	۰/۳۵	۰/۳۷	



شکل ۱۶- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و تخمینی M_R (مدل تامسون) خاک تثبیت شده به روش شیمیایی (نیکوفلاک) در محدوده S1 تا S5

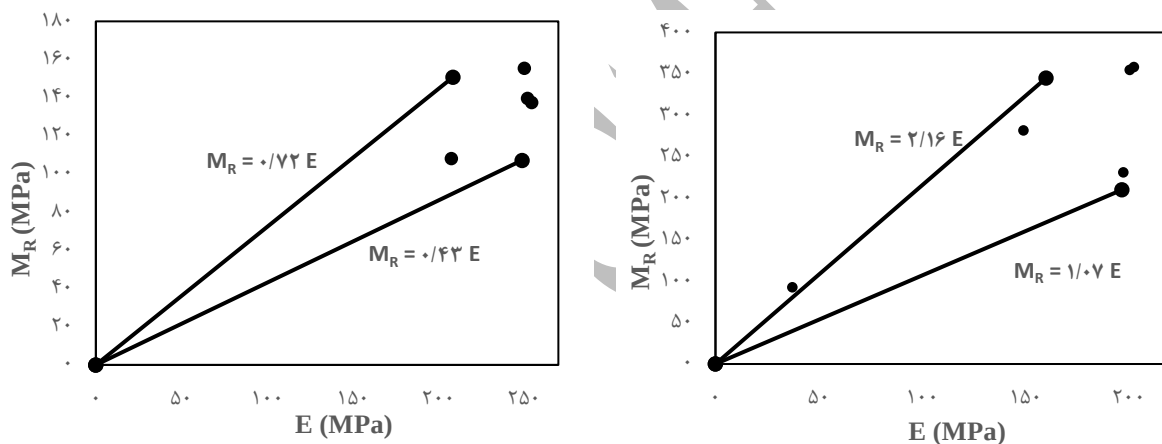
۵-۵- ارزیابی دقت همبستگی بین M_R و E در خاک مورد مطالعه

با وجود ماهیت مشابه، همبستگی بین M_R و E در منابع و تحقیقات معتبر بررسی نشده ولی با توجه به وجود روابط معتبر همبستگی بین q_u و E برای خاک تثبیت شده لایه‌های روسازی [۱] و با در نظر گرفتن مدل خطی رابطه ۱، همبستگی بین این دو پارامتر با توجه به نتایج آزمایش‌ها به روشی مشابه بخش ۴-۵ تحلیل گردید که نتایج آن در جدول ۸ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که تخمین M_R با E در خاک مورد مطالعه از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد.

جدول ۸- دقت رابطه خطی همبستگی M_R و E در حالت‌های مختلف تنش

S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	شیمیایی
۰/۳۹	۰/۴	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۵	۰/۵۴	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	زیستی
۰/۵۲	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۴	۰/۴	
S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	زیستی
۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۳	۰/۳۶	۰/۴۵	
M_R طراحی	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	زیستی
۰/۴۱	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۲۸	۰/۳	

با تحلیل پراکندگی داده‌ها طبق شکل ۱۷، در کارهای با اهمیت کم می‌توان بازه‌ای برای تخمین M_R خاک تثبیت شده با نیکوفلاک و بتاگلکان با تعیین E خاک در نظر گرفت که دامنه بازه در بتاگلکان کمتر از نیکوفلاک می‌باشد.



شکل ۱۷- بازه تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی (نیکوفلاک) و زیستی (بتاگلکان) با E در کارهای با اهمیت کم

۶- نتیجه گیری

تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس ضعیف بستر، جهت اجتناب از جابجایی و جایگزینی با استفاده از پلیمر نیکوفلاک و بیوپلیمر بتاگلکان قابل انجام است. از تحقیقات انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

۱. تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس باعث کاهش وزن مخصوص و افزایش رطوبت بهینه می‌شود که این امر در تثبیت شیمیایی بیشتر به دلیل واکنش‌های پوزولانی و در تثبیت زیستی به دلیل تجمع فیبرهای سبک در ساختار خاک می‌باشد. در تثبیت شیمیایی با افزایش وزن نیکوفلاک به ۱ درصد، رطوبت بهینه به دلیل تاثیر خصوصیات آب‌گریزی پلیمر، مجدداً کاهش پیدا کرده و وزن مخصوص حداکثر افزایش می‌یابد.
۲. نیکوفلاک، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را افزایش می‌دهد که روند آن در ۷ روز اول سریع بوده بعد از آن کند می‌شود. در تثبیت زیستی با بتاگلکان، بهترین نتایج در غلظت ۴ گرم بر لیتر به دست آمده و در غلظت ۸ گرم بر لیتر، شاخص‌های

- مقاومتی و سختی خاک به خصوص از دوره ۷ روز به بعد به دلیل افزایش کلونی‌های فیبر ترکیب نشده با دانه‌های رس که بعضاً به صورت قارچ و فرسایش در بدنه این نمونه‌ها قابل مشاهده هست، کاهش می‌یابد.
۳. برخلاف نتایج نزدیک در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، نیکوفلاک M_R خاک را بیش از بتاگلوکان افزایش می‌دهد که سرعت افزایش آن در هر دو مثبت در دوره ابتدایی عمل‌آوری (۱۴ روزه) بیشتر است و بعد از آن کند می‌شود. در غلظت ۸ گرم بر لیتر بتاگلوکان، به خصوص از دوره ۱۴ روز به بعد، M_R خاک کاهش می‌یابد.
۴. مدل تامسون برای تخمین M_R خاک تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب بوده و برای بتاگلوکان از دقت کافی برخوردار نیست. در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، بالاترین دقت مدل در محدوده S_1 تا S_5 که محدوده حالت تنش بهره‌برداری اغلب راه‌های اصلی و بزرگراه‌ها است، به دست آمد. بنابراین استفاده از این مدل برای تخمین M_R خاک رس تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب می‌باشد.
۵. تخمین M_R خاک تثبیت شده با استفاده از مدل خطی رابطه همبستگی با E ، نتایج دقیقی ندارد ولی در کارهای با اهمیت کم می‌توان یک بازه بر اساس این مدل به کار برد که استفاده از آن در خاک تثبیت شده با بتاگلوکان مناسب‌تر است.
۶. با توجه به نتایج به دست آمده، در صورت اولویت مزیت‌های اجرایی (زمان و هزینه)، تثبیت شیمیایی با نیکوفلاک و در صورت اولویت مزیت‌های زیست محیطی، تثبیت زیستی با بیوپلیمر مناسب می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از همکاری مدیران و متخصصان محترم آزمایشگاه مرکزی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی، به ویژه آقایان مهندس علی محمد اسمعیلی و مهندس حبیب جولانی و سرکار خانم مهندس شهربانو مقدسی، نهایت قدردانی به عمل می‌آید.

۷- فهرست علائم

q_u	مقاومت فشاری تک محوری، kg/cm^2
E	مدول الاستیسیته سکانتی ۵۰٪، kg/cm^2
CH	رس با حد روانی بالا
LL, PL و PI	حدود اتربرگ، %
G_s	چگالی جامد دانه‌های خاک
ω_{opt}	رطوبت بهینه، %
$\gamma_{d\ max}$	وزن مخصوص حداکثر، g/cm^3
S_n	سکانس n ام
R^2	دقت تحلیل پراکندگی (رگرسیون)

۸- منابع و مراجع

- [1] [American Association of State Highway and Transportation Officials \(AASHTO\), Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice, 2008.](#)
- [2] [A.Yousefi, W.M. Hasan, A. Saghai, P. Ayar, M. Ameri, "Evaluation of mechanical properties of asphalt mixtures containing anti-stripping additives of GRIPPER® L, TeraGrip and WETMUL-95", Ferdowsi Civil Engineering, vol. 34, no. 4, pp. 31-34, \(2021\). \(In Persian\). <https://doi.org/10.22067/jfcej.2022.72939.1070>](#)

- [3] [M.J. Qazizadeh, A. Kavussi, A.A. Sadeghi, H. Farhad, "Development of Fatigue Predictive Models for Asphalt Concrete Mixes Containing Electric Arc Furnace Steel Slag Based on Fracture Energy Concept", *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 17-34, \(2019\). \(In Persian\). \[https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_32273.html?lang=en\]\(https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_32273.html?lang=en\)](#)
- [4] M. Arm, "Variation in deformation properties of processed MSWI bottom ash: results from triaxial tests", *Waste Management*, vol. 24, no. 10, pp. 1035-1042, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.07.013>
- [5] E.O. Tastan, T.B. Edil, C.H. Benson, A.H. Aydilek, "Stabilization of organic soils with fly ash", *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 137, no. 9, pp. 819-833, (2011). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000502](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502)
- [6] A. Ardah, Q. Chen, M. Abu-Farsakh, "Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements", *Transportation Geotechnics*, vol. 11, pp. 107-119, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.05.002>
- [7] S. Bhuvaneshwari, R. Robinson, S. Gandhi, "Resilient modulus of lime treated expansive soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, vol.37, no. 1, pp. 305-315, (2019). <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0610-z>
- [8] [N. Pishvaei, M.J. Sharahi, M. Amelsakhi, "Laboratory Investigating into the Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under Wetting and Drying Cycles", *Ferdowsi Civil Engineering*, vol 14, no. 1, pp. 85-96, \(2023\). \(In Persian\). <https://doi.org/10.22067/jfpei.2023.74674.1112>](#)
- [9] P. Kolay, A. Pant, V. Puri, S. Kumar, "Effect of Liquid Polymer Stabilizer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soil", In Indian Geotechnical Conference, (2016). Available: <https://www.researchgate.net>
- [10] [G.H. Hamdi, "Evaluation the Effect of Polyvinyl Chloride on Moisture Sensitivity of HMA", *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 1-16, \(2019\). \(In Persian\). <https://doi.org/10.22067/civil.v32i2.65335>](#)
- [11] W. Miller, R. Willis, G. Levy, "Aggregate stabilization in kaolinitic soils by low rates of anionic polyacrylamide", *Soil use and management*, vol. 14, no. 2, pp. 101-105, (1998). <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1998.tb00623.x>
- [12] T. Zhang, Y. Deng, H. Lan, F. Zhang, H. Zhang, C. Wang, Y. Tan, R. Yu, "Experimental Investigation of the Compactability and Cracking Behavior of Polyacrylamide-Treated Saline Soil in Gansu Province", *China Polymers*, vol. 11, no. 1, code: 90, (2019). <https://doi.org/10.3390/polym11010090>
- [13] W.J. Orts, A. Roa-Espinosa, R.E. Sojka, G.M. Glenn, S.H. Imam, K. Erlacher, J.S. Pedersen, "Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agricultural, construction, and military applications", *Journal of materials in civil engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 58-66, (2007). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(58))
- [14] D. Yongfeng, L. Songyu, H. Jian'an, L. Kan, D. Yanjun, J. Fei, "Strength and permeability of cemented soil with PAM", *Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing*, 2012. <https://doi.org/10.1061/9780784412350.0155>

- [15] [A.M. Gridchin, S. Zlotykh, "PMC Nicoflok research effect as mechanochemical activator on the cement characteristic used", *Bulletin of Belgorod State Technological University Named. After V. G. Shukhov*, vol. 5, no. 8, \(2018\), \(In Russian\).](#)
- [16] I. Gavrilina, A. Bondar, "Analysis of using nicoflok polymer-mineral additive for replacing stone materials as road bases", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 451, pp. 26-28, (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012086>
- [17] P. Kolay, B. Dhakal, "Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, pp. 2479-2491, (2020). doi.org/10.1007/s10706-019-01163-x
- [18] K. Chiet, K. Kassim, K. Chen, U. Martula, C. Yah, A. Arefnia, Effect of Reagents Concentration on Biocementation of Tropical Residual Soil", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 136, pp. 27-29, (2015). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/136/1/012030>
- [19] I. Chang, J. Im, G.-C. Cho, "Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering", *Sustainability*, vol. 8, n0. 3, p. 251, (2016). <https://doi.org/10.3390/su8030251>
- [20] R.S. Dassanayake, S. Acharya, N. Abidi, "Biopolymer-based materials from polysaccharides: Properties, processing, characterization and sorption applications", *Advanced Sorption Process Applications*, ch. 1, (2018). [E-book] Available: [IntechOpen](#)
- [21] K. Van de Velde, P. Kiekens, "Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications, *Polymer testing*", vol. 21, no. 4, pp. 433-442, (2002). [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00107-6)
- [22] K. Khayat, A. Yahia, "Effect of welan gum-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout", *ACI Materials Journal*, vol. 94, no. 5, PP: 365-372, (1997). Available: <https://www.academia.edu>
- [23] D.M. Cole, D.B. Ringelberg, C.M. Reynolds, "Small-scale mechanical properties of biopolymers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, vol: 138, no: 9, pp: 1063-1074, (2012). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000680](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000680)
- [24] W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, "Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review", *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 118-136, (2010). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- [25] [Z.B. Ebrahimialavijeh Bahareh, Mokhtari Maryam, "Investigation of the effect of Polypropylene Fibers on compression strength and tensile strength of organic soil stabilized with lime and Xanthan-Gum biopolymer", *AUT Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 1853-1870, \(2021\). \(In Persian\). https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17185.6490](#)
- [26] A. Dione, M. Fall, Y. Berthaud, F. Benboudjama, A. Michou, "Implementation of Resilient Modulus-CBR relationship in Mechanistic Pavement Design", *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, vol. 1, no. 2, pp. 65-71, (2014). [Online serial]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu>
- [27] [V.E. UZ, M. Saltan, İ. GÖKALP, "Comparison of DCP, CBR, and RLT test results for granular pavement materials and subgrade with structural perspective", *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, \(2015\).](#)

- [28] B.R. Christopher, C.W. Schwartz, R. Boudreaux, R.R. Berg, *Geotechnical aspects of pavements Reference Manual*, United States. Federal Highway Administration, (2006).
- [29] N. Toohey, M. Mooney, R. Bearce, "Relationship between resilient modulus and unconfined compressive strength for lime-stabilized soils", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 139, no. 11, pp. 1982-1985, (2013). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000925](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000925)
- [30] D.-W. Park, H.V. Vo, Y. Lim, "Recycling of Dredged Soil Waste Using Air-foam Stabilization Method as Highway Construction Material", *Geo-Hubei 2014 International Conference on Sustainable Civil Infrastructure*, (2014). <https://doi.org/10.1061/9780784478455.006>
- [31] A.V. Khruleva, G.I. Sobko, Application of Innovative Technologies in the Construction of Highways by the Stabilized Soils (Experience of the Nizhny Novgorod Region), *Main Direction of Highway-Nizhny Novagorod Region-Russian*, (2012). (In Russian). [Online], Available: <http://www.guad.nnov.ru/?id=2936>
- [32] I. Chang, G.-C. Cho, "Geotechnical behavior of a beta-1, 3/1, 6-glucan biopolymer-treated residual soil", *Geomechanics and Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 633-647, (2014). <https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.6.633>
- [33] J.R. Prusinski, S. Bhattacharja, "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils", *Transportation research record*, vol. 1652, no. 1, pp. 215-227, (1999). 215-227. <https://doi.org/10.3141/1652-28>
- [34] [F. Rezaie Moghaddam, B. Jafari Nader, T. Rezaie Moghaddam, "Laboratory Investigation of the Effect of "NICOFLOK" Polymer on the Compressive and Tensile Strength of Desert and Coastal Sand at the pavement Layers", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 2, pp: 733-748, \(2021\). https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16612.6288](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16612.6288)

Experimental Study of the Correlation between Resilient modulus and Uniaxial Compressive Strength in Chemical and Biological Stabilization of Clay Subgrade Soil

Siamak Shafaghatian^{1*}, Gholam Moradi²

¹ Assistant Professor, Department of Civil engineering, Khodabandeh Branch, Islamic Azad University, Khodabandeh, Iran

² Associate Professor, Department of Civil engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Due to the high cost and time-consuming nature of testing, it is useful and common to use valid correlation relationships with common soil parameters to determine the resilient modulus (M_R) for design purposes. However, the validity of these relationships for stabilized soils has been less investigated. Stabilization of weak subgrade soil is a method of avoiding weak soil replacement costly and time-consuming problems. According to the Kyoto Protocol, a lot of research has been done on novel materials such as polymers and new methods like biological stabilization. This study aimed to investigate the effect of chemical and biological stabilization of clay subgrade soil on the resilient modulus and uniaxial compressive strength (q_u) and accuracy of the Thompson model for correlation between these two parameters. For chemical stabilization, a solid polymer called Nicoflok and for biological stabilization, a biopolymer solution called Beta-glucan were employed. In both methods, the dry unit weight of the soil decreased and its optimum water content and q_u increased. Despite similar results in the uniaxial test, the solid polymer increased the M_R of the stabilized soil more than the biopolymer. Based on the regression analysis of tests data, the Thompson model had more accurate results in the Nicoflock stabilized soil than the biopolymer ones.

Key Words

Resilient modulus (M_R), The Thompson model, Chemical and biological stabilization of clay subgrade soil, Nicoflock, Betaglucon

* Corresponding Author: Email: shafaghatian@tabrizu.ac.ir