

بررسی آماری و آزمایشگاهی بهسازی یک خاک رسی با استفاده از افزودنی شیمیایی

امین قاسمی^{۱*}، امین سلطانی^۲، علی رئیسی استبرق^۳، محمدحسین امید^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۴. استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۷/۷)

چکیده

در این تحقیق اثر یک ماده شیمیایی افزودنی با نام تجاری CBRPLUS در بهسازی یک خاک رسی جنگلی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل حدود آتبرگ، تراکم استاندارد، CBR (نسبت باربری کالیفرنیا)، تورم آزاد و فشار تورمی روی نمونه خاک طبیعی و خاک حاوی درصد‌های وزنی مختلف از ماده افزودنی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که افزودن ماده مذکور بیش از ۰/۰۵٪ به خاک موجب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خواص فیزیکی و مکانیکی خاک بهسازی شده شامل کاهش حداقل ۶٪ در حد روانی، ۹٪ در اندکس خمیری، ۲۷٪ در تورم و ۴۵٪ در فشار تورمی می‌شود و نیز موجب افزایش حداقل ۵۳٪ در ظرفیت باربری خاک می‌گردد، بطوریکه این بهبود خواص تابعی از درصد وزنی ماده CBRPLUS می‌باشد. علاوه بر آن نتایج آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و معادلات رگرسیونی چندگانه مناسب جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی منحنی‌های CBR، تورم آزاد و فشار تورمی با دقت مناسب و به صورت تابعی از درصد وزنی ماده CBRPLUS، نشانه خمیری و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم خاک بهسازی شده ارائه و به تحلیل حساسیت متغیرهای مؤثر در مقدار CBR، تورم آزاد نهایی و فشار تورمی پرداخته شد.

واژه‌های کلیدی: بهسازی خاک، ظرفیت باربری، تورم آزاد، فشار تورمی، مدل‌های رگرسیونی

مقدمه

خاک‌های رسی معمولاً دارای مقاومت و ظرفیت باربری کم، تراکم‌پذیری و قدرت تورمی بالا می‌باشند. این امر موجب می‌گردد که استفاده از آن‌ها در پروژه‌های عمرانی از جمله احداث جاده محدود گردد. در جنگل‌های شمال ایران این خاک رسی به وفور یافت می‌شود، لذا احداث جاده‌های جنگلی در آن نواحی با محدودیت زیاد روبرو می‌گردد. از طرفی انتقال خاک مناسب از مکان‌های دیگر به این مناطق ممکن است به علت هزینه زیاد و مسائل اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. بنابراین بهسازی خاک در محل امری ضروری به نظر می‌رسد.

بهسازی خاک‌های رسی معمولاً به روش‌های مکانیکی و شیمیایی صورت می‌پذیرد. روش‌های شیمیایی به دو گروه متعارف و غیرمتعارف تقسیم می‌گردد. گروه متعارف شامل مواد افزودنی مانند سیمان، آهک و خاکستر بادی (Flyash) می‌باشد که با درصد‌های وزنی مختلف به خاک اضافه و با آن مخلوط می‌گردد. این مواد افزودنی با ایجاد یکسری واکنش‌های

شیمیایی در توده خاک موجب بهسازی آن می‌شوند. مهندسی شیمی اخیراً به این نتیجه رسیده‌اند که افزودن مواد شیمیایی دیگری مانند رزین، پلیمرها و نانوپلیمرها نیز موجب بهسازی خواص خاک رسی می‌گردد که تحت عنوان روش‌های شیمیایی غیرمتعارف شناخته می‌شوند. آن‌ها معتقدند که روش غیرمتعارف نسبت به روش اول هم اقتصادی است و هم بازده خوبی در بهسازی خاک دارا می‌باشد. استفاده از روش‌های اصلاح و تثبیت شیمیایی جدید (پلیمرها و نانوپلیمرها) در مهندسی عمران و ساختمان بسیار متداول است (Aydin et al., 2010). Savage (2001) گزارش نمود که مواد پلیمری اثر قابل توجهی در بهسازی خاک‌های رسی جنگلی دارند.

پژوهشگران مختلف از جمله Jones et al. (1991)، Hu et al. (2007)، Aydin et al. (2010)، Estabragh et al. (2010) و Shirsavkar and Koranne (2010) با انجام آزمایش‌های مختلف دریافتند که افزودنی‌های شیمیایی مانند سیمان، آهک، چسب اپوکس، CBRPLUS و اکریلیک رزین به خاک رس موجب افزایش ظرفیت باربری خاک، کاهش پتانسیل تورمی و بهبود خواص مکانیکی آن خصوصاً مقاومت می‌گردد.

* نویسنده مسئول: amin_ghassemi@ut.ac.ir

که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول (۱) آورده شده است. مطابق طبقه‌بندی یونیفاید، خاک از نوع رس با پلاستیسیته بالا (CH) می‌باشد. با توجه به حدود آتربرگ بدست آمده برای خاک مورد استفاده، کانی غالب خاک از طریق جدول ارائه شده توسط White (1949) از نوع ایلیت تعیین شد. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داد که وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه به ترتیب برابر ۱۳/۲۹ کیلو نیوتن بر مترمکعب و ۲۸٪ می‌باشد. همچنین pH و EC خاک نیز اندازه‌گیری شد که مقادیر آنها به ترتیب برابر ۷/۴ و ۰/۴ میلی‌موس بر سانتی‌متر می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۲/۸۵	ASTM-D-854	وزن مخصوص نسبی دانه‌های جامد (G _s)
۶۵	ASTM-D-422	سیلت و رس (F ₂₀₀) (%)
۱/۳۳		درصد ماده آلی (OC) (%)
۷		رطوبت طبیعی (ω _n) (%)
۸۹/۱۶		حد روانی (LL) (%)
۳۵	ASTM-D-4318	حد خمیری (PL) (%)
۵۴/۱۶		نشانه خمیری (PI) (%)
۲۲/۹	ASTM-D-4546	درصد تورم آزاد (S) (%)
CH	ASTM-D-2487	طبقه‌بندی متحد (USCS)
۲۸		درصد رطوبت بهینه (ω _{opt}) (%)
۱۳/۲۹	ASTM-D-698	وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ _{dmax}) (kN/m ³)

آب

آب مورد استفاده از نوع شرب و عاری از آلودگی و مواد آلی مضر انتخاب گردید که مقادیر اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون کلر (Cl⁻) و غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم (Ca²⁺-Mg²⁺) به ترتیب برابر ۷/۷۶، ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر، ۱/۷ و ۹/۴ میلی‌اکی‌والانت بر لیتر اندازه‌گیری گردید.

تثبیت‌کننده یونی CBRPLUS

ماده شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق تحت نام تجاری CBRPLUS/CON-AID شناخته می‌شود. این ماده یک نوع روغن سولفوئیدی گیاهی یا معدنی ترکیب یافته با اسید سولفوریک می‌باشد که محلول در آب نیز می‌باشد. نام شیمیایی آن مشتقات اسید سولفوریک با فرمول شیمیایی R-SO₃H که R نشان‌دهنده هیدروکربن است (CON-AID (Pty) Ltd, 1998). مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن بر اساس اطلاعات تولید کننده در جدول (۲) ارائه شده است. یکی از مزایای این ماده شامل استفاده از حجم کم آن در بهسازی خاک در مقایسه با سایر

ماده شیمیایی CBRPLUS که تحت عنوان ماده تثبیت‌کننده یونی هم نام برده می‌شود، یکی از مواد پلیمری جهت بهسازی خاک رسی می‌باشد، استفاده از این محصول در احداث و ارتقاء جاده، بازسازی جاده‌های خراب و تعمیر و نگهداری جاده‌های بدون پوشش آسفالت توصیه شده است (Abadjieva, 2001). محققینی مانند Al-Bahar (2005)، Inyang et al. (2007)، Liu et al. (2009)، Kavak et al. (2010) و Moayed and Allahyari (2012) از ماده شیمیایی CBRPLUS و مشتقات مربوط به آن در بهسازی خاک جهت اجرای پروژه‌های عمرانی مانند جاده‌سازی و غیره استفاده نمودند، آن‌ها بر اساس نتایج حاصل اعلام نمودند که ماده مذکور قدرت کافی در بهسازی خاک را دارا است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد تحقیق در خصوص اثر ماده CBRPLUS در عملکرد بهسازی خاک محدود می‌باشد و از طرفی تا کنون هیچگونه تجزیه و تحلیل آماری نیز در این خصوص انجام نیافته است. فرضیه این پژوهش بر این اساس است که افزودن ماده CBRPLUS به خاک رسی تنها بر میزان ظرفیت باربری خاک مؤثر نبوده و بر خاصیت تورم‌پذیری، خواص تراکمی و نیز حدود آتربرگ خاک نیز تأثیرگذار می‌باشد، با توجه به اهمیت این خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک باید صحت این ادعا و میزان آن بررسی شود. بنابراین هدف از این کار تحقیقاتی بررسی اثر ماده شیمیایی CBRPLUS در بهسازی یک خاک رسی با پلاستیسیته بالا است. با اختلاط درصدهای مختلف این ماده با خاک و انجام آزمایش‌های گوناگون مانند حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، CBR (نسبت باربری کالیفرنیا)، تورم آزاد و فشار تورمی روی خاک طبیعی و خاک حاوی درصدهای وزنی مختلف ماده CBRPLUS اثر آن در بهسازی خاک رسی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن مدل‌های رگرسیونی مناسب جهت پیش‌بینی و تعیین منحنی CBR، میزان CBR نهایی، منحنی تورم آزاد، میزان تورم آزاد نهایی، منحنی فشار تورمی و فشار تورمی با همبستگی بالا و خطای قابل قبول به صورت تابعی از پارامترهای تأثیرگذار (درصد وزنی ماده تثبیت‌کننده و خصوصیات خمیری و تراکمی خاک تثبیت شده) ارائه گردید و مورد بحث قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خاک استفاده شده

خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر از حاشیه جاده فرعی سه کیلومتری واقع در سری نم‌خانه جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در نوشهر تهیه گردید

مربوطه رسانده شد. این عمل با افزودن درصد معینی آب به خاک و انجام عمل اختلاط و سپس نگهداری در یک کیسه پلاستیکی مسدود شده به مدت ۲۴ ساعت جهت توزیع یکنواخت رطوبت انجام گردید. خاک آماده شده در یک قالب مخصوص که از سه قسمت تشکیل شده بود و ابعاد قسمت میانی آن مشابه قالب دستگاه تحکیم معمولی بود، با روش استاتیکی متراکم گردید. تراکم خاک در سه لایه و بوسیله یک دستگاه بارگذاری با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. فشار وارده به هر لایه طوری محاسبه شده بود که وزن واحد حجم خشک خاک معادل وزن واحد حجم خشک ماکزیمم منحنی تراکمی مربوطه گردد. استاندارد خاصی جهت روش استاتیکی وجود ندارد، لذا روش بکار برده شده توسط *Estabragh et al.* (2012) مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد و میانگین آنها به عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی

شکل (۱) نشان دهنده تغییرات حدود آتربرگ برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته به ازای درصدهای وزنی مختلف ماده تثبیت‌کننده (CBRPLUS) می‌باشد. همانطور که در شکل (۱) نیز مشخص است افزودن ماده تثبیت‌کننده به خاک در درصدهای کمتر از ۰/۰۵٪ از ماده افزودنی تغییر قابل ملاحظه‌ای در حدود آتربرگ ایجاد نمی‌کند اما در درصدهای بیشتر از ۰/۰۵٪ این تغییرات قابل ملاحظه است بطوریکه سبب کاهش حد روانی (LL) و خمیری (PL) و در نتیجه کاهش نمایه خمیری (PI) می‌گردد که با نتایج محققینی از جمله *Abadjieva* (2001)، *Shirsavkar and Koranne* (2010) و *Ali* (2012) همخوانی دارد. به عنوان نمونه حد روانی و حد خمیری در خاک طبیعی به ترتیب برابر با ۸۹/۲٪ و ۳۵٪ می‌باشد که با افزودن ۰/۰۹ درصد وزنی ماده CBRPLUS به ترتیب به مقادیر ۶۹/۵٪ و ۳۲/۵۶٪ کاهش یافته است.

نتایج آزمایش تراکم برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته در جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزودن ماده تثبیت‌کننده به خاک موجب افزایش وزن واحد حجم خشک حداکثر خاک و کاهش درصد رطوبت بهینه گردیده است که با نتایج تحقیقاتی *Abadjieva* (2001)، *Shirsavkar and Koranne* (2010) و *Ali* (2012) مطابقت دارد.

نتایج آزمایش CBR برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشخص

ماده شیمیایی افزودنی است. استفاده از CBRPLUS باعث کاهش مصرف شن برای روسازی جاده‌های بدون پوشش آسفالت، کاهش هزینه‌های ساخت و ساز و احداث جاده‌های جدید، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری جاده به دلیل عواملی مانند کاهش اثر آب‌شدن یخ در بهار می‌شود که این خواص موجب می‌گردد که استفاده از این ماده هزینه اقتصادی بهسازی خاک را در مقایسه با سایر مواد کاهش دهد (Abadjieva, 2001). به علاوه ارزیابی زیست‌محیطی این ماده در دانشگاه بریتیش کلمبیا انجام شده است و مطابق با اعلام تولیدکننده، این ماده به دلیل حل شدن در آب و سایر مواد آلی بدون باقی‌ماندن ذرات جامد، بدون بو بودن، غیر سمی بودن، آب‌دوست بودن، عدم خورندگی، عدم اشتعال‌پذیری، عدم آلوده‌کنندگی آب، عدم تأثیرپذیری در مقابل تابش اشعه فرابنفش و عمر مفید نامحدود، فاقد هرگونه خطر برای محیط‌زیست و کاربرد دوست می‌باشد (CON-AID (Pty) Ltd, 1998). درصد وزنی مورد استفاده جهت بهسازی خاک ۰/۰۰۹۶، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۹ می‌باشد.

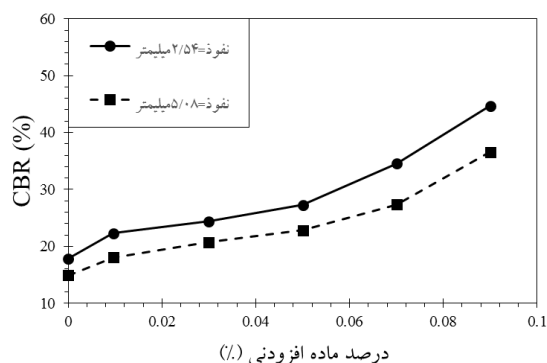
جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده تثبیت‌کننده بونی مورد

مشخصه	مقدار	استفاده
وزن مخصوص نسبی (G_s)	۱/۰۵	
حالت فیزیکی	سیال لزج	
رنگ	قهوه‌ای تیره مایل به سرخ	
فشار بخار (mmHg)	۲۰	
اسیدیته (pH)	۳/۱	
نقطه انجماد ($^{\circ}C$)	< -۱۰	
نقطه جوش ($^{\circ}C$)	۱۰۰	
حلالیت در آب	محلول	

روش آزمایش و تهیه نمونه

آزمایش‌های برنامه‌ریزی شده جهت انجام این مطالعه شامل تعیین حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، CBR، تورم آزاد و فشار تورمی برای خاک معمولی و خاک اختلاط یافته با درصدهای مختلف (۰/۰۰۹۶، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۹ درصد) CBRPLUS می‌باشد. کلیه این آزمایش‌ها مطابق استاندارد ASTM صورت پذیرفت. جهت انجام آزمایش‌های تورم آزاد و فشار تورمی احتیاج به تهیه نمونه مناسب برای خاک معمولی و خاک اختلاط یافته با ماده شیمیایی افزودنی بود. لذا با استفاده از منحنی تراکمی حاصل از آزمایش تراکم برای آنها اقدام به ساخت نمونه گردید. رطوبت اولیه خاک معمولی یا اختلاط یافته با ماده شیمیایی به رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم

نمودار تغییرات آن در برابر درصد وزنی ماده تثبیت‌کننده در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی حالات مقدار CBR محاسبه شده در میزان نفوذ ۲/۵۴ میلی‌متر همواره بیشتر از مقدار CBR محاسبه شده در میزان نفوذ ۵/۰۸ میلی‌متر می‌باشد. در نتیجه مقدار CBR برای درصد‌های مختلف ماده تثبیت‌کننده برابر با نتایج حاصله از مقدار نفوذ ۲/۵۴ میلی‌متر می‌باشد.

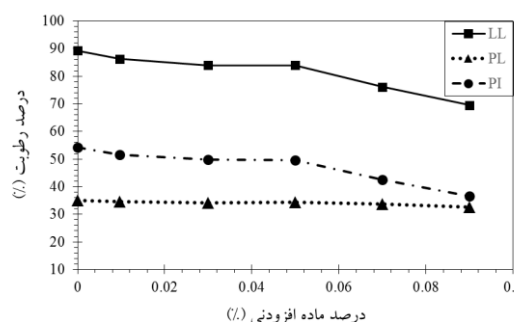


شکل ۳- تغییرات میزان CBR در نفوذهای مورد نظر به ازای درصد‌های وزنی مختلف ماده تثبیت‌کننده

در شکل (۴) نتایج آزمایش تورم آزاد برای خاک طبیعی و خاک با درصد‌های مختلف اختلاط یافته نشان داده شده است. در شکل (۴-الف) منحنی تورم آزاد و در شکل (۴-ب) تغییرات تورم آزاد نهایی به ازای میزان ماده تثبیت‌کننده افزوده شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن ماده تثبیت‌کننده یونی باعث کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌گردد که با نتایج تحقیقاتی Scholen (1995) مطابقت دارد. به عنوان مثال میزان تورم آزاد نهایی در خاک طبیعی برابر با ۱۷/۲۵٪ می‌باشد که با افزودن ۰/۰۹ درصد وزنی از ماده CBRPLUS به مقدار ۶/۸٪ کاهش یافته است.

در شکل (۵) نتایج آزمایش فشار تورمی برای خاک طبیعی و خاک با درصد‌های مختلف اختلاط یافته نشان داده شده است. در شکل (۵-الف) منحنی فشار تورمی و در شکل (۵-ب) تغییرات میزان فشار تورمی به ازای میزان ماده تثبیت‌کننده افزوده شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن ماده تثبیت‌کننده یونی باعث کاهش فشار تورمی خاک می‌گردد که با نتایج تحقیقاتی Scholen (1995) مطابقت دارد. به عنوان نمونه میزان فشار تورمی در خاک طبیعی برابر با ۳۴۵ کیلوپاسکال می‌باشد که پس از افزودن ۰/۰۷ درصد وزنی ماده CBRPLUS به خاک، مقدار آن به ۱۴۴/۵ کیلوپاسکال کاهش یافته است.

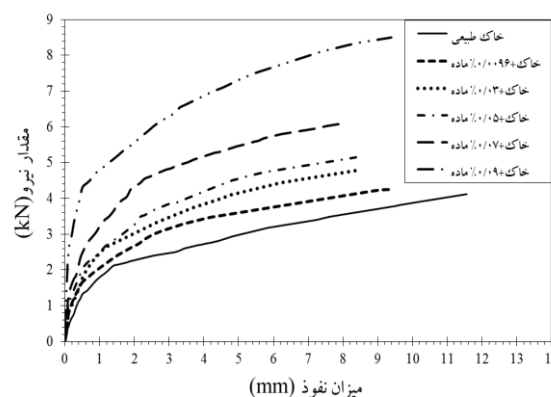
است افزودن ماده تثبیت‌کننده به خاک موجب افزایش قدرت باربری خاک (افزایش CBR) شده است که با نتایج تحقیقاتی Abadjieva (2001)، Aydin et al. (2010) و Shirsavkar and Koranne (2010) مطابقت دارد. به عنوان مثال مقدار نیروی مورد نیاز برای میزان نفوذ ۲/۵۴ میلی‌متر در خاک طبیعی برابر با ۲/۴ کیلو نیوتن می‌باشد که در اثر افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی ماده CBRPLUS به خاک، مقدار نیروی مورد نیاز به مقدار ۳/۶۷ کیلو نیوتن افزایش یافته است.



شکل ۴- تغییرات حدود آتر برگ به ازای درصد‌های وزنی مختلف ماده تثبیت‌کننده

جدول ۳- نتایج مربوط به آزمایش تراکم

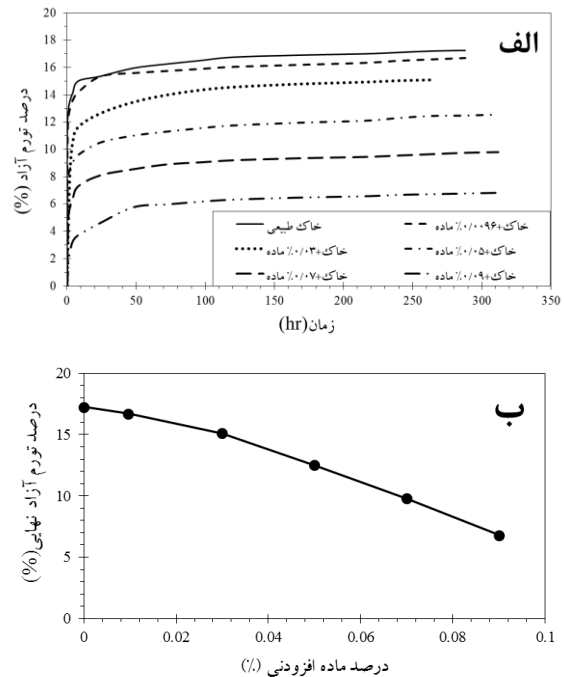
درصد ماده CBRPLUS	γ_{dmax} (kN/m^3)	ω_{opt} (%)
۰	۱۳/۲۹	۲۸
۰/۰۰۹۶	۱۳/۵۰	۲۷
۰/۰۳	۱۳/۶۰	۲۶
۰/۰۵	۱۳/۸۵	۲۵
۰/۰۷	۱۴/۱۵	۲۳
۰/۰۹	۱۴/۶۰	۲۱/۵



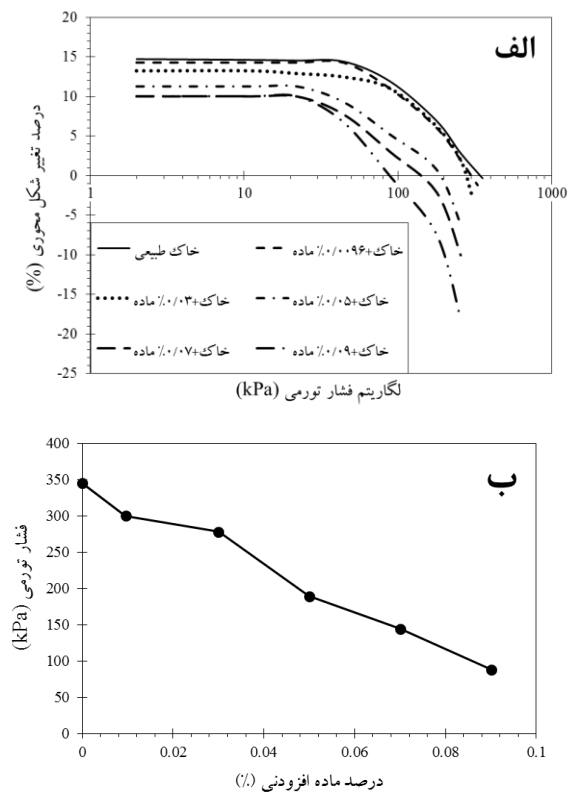
شکل ۵- منحنی CBR به ازای درصد‌های وزنی مختلف ماده تثبیت‌کننده

با توجه به نتایج آزمایشگاهی، مقادیر CBR برای هریک از درصد‌های مختلف ماده تثبیت‌کننده در میزان نفوذهای ۲/۵۴ میلی‌متر (۰/۱ اینچ) و ۵/۰۸ میلی‌متر (۰/۲ اینچ) بدست آمد که

رطوبت بهینه (آزمایش تراکم)، کاهش پتانسیل تورم و فشار تورمی و نیز باعث افزایش CBR می‌گردد که بهسازی خاک را موجب می‌گردد. علت این تغییرات حادث شده بر اثر افزودن ماده شیمیایی مذکور را می‌توان در ارتباط با ساختار خاک رس بررسی نمود. سطوح ذرات رس در حالت خشک یا مرطوب حامل بار منفی است که موجب جذب کاتیون‌ها (یون‌ها با بار مثبت) جهت تعادل‌سازی بار الکتریکی می‌گردد. علاوه بر آن اطراف ذرات رس نیز ممکن است املاح حاوی کاتیون و آنیون باشد. افزودن آب موجب محلول شدن کاتیون‌ها و آنیون‌های مذکور می‌گردد که غلظت کاتیون‌های محلول در اطراف رس زیاد است و با فاصله گرفتن از ذره رس غلظت آن کاهش ولیکن غلظت آنیون افزایش می‌یابد. معمولاً این لایه آب که حاوی کاتیون و آنیون است تحت عنوان لایه مضاعف نامیده می‌شود. افزایش و کاهش ضخامت لایه مضاعف موجب پیدایش ساختمان‌های مختلفی در توده خاک می‌گردد، بطوریکه افزایش آن موجب ساختمان پراکنده و کاهش آن ساختمان بهم پیوسته را ایجاد می‌نماید. عوامل متعددی در تغییر ضخامت لایه مضاعف مؤثر است، از جمله ثابت دی‌الکتریک که کاهش این ضریب موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف می‌گردد و ساختمان خاک بهم پیوسته می‌شود. بنابراین افزودن ماده CBRPLUS موجب می‌گردد که ضریب دی‌الکتریک نسبت به آب معمولی کاهش و این امر موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف می‌گردد و ساختمان خاک به سمت بهم پیوسته شدن تمایل پیدا می‌کند، بطوریکه ذرات بهم متصل می‌گردند و این اتصال موجب تشکیل ذرات بزرگتر می‌شود که باعث کاهش سطح ویژه می‌گردد. کاهش سطح ویژه موجب می‌گردد که پتانسیل جذب آب به وسیله ذرات کاهش یابد که باعث کاهش حدود آتربرگ می‌شود. همچنین این امر موجب کاهش پتانسیل تورمی و در نتیجه فشار تورمی می‌شود. تشکیل ذرات دانه‌ای که از بهم چسبیدن ذرات بسیار ریز حادث می‌گردد باعث افزایش وزن واحد حجم خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه می‌گردد که نتایج آزمایش‌های تراکم انجام شده آن را تأیید می‌کند. از طرف دیگر ایجاد ساختمان بهم پیوسته موجب می‌گردد که اصطکاک بین ذرات افزایش یابد که این امر در افزایش مقاومت و ظرفیت باربری خاک مؤثر است (Fairbrother, 2011)، بطوریکه نتایج CBR در مقایسه با خاک معمولی آن را نشان می‌دهد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش درصد وزنی ماده CBBRPLUS به خاک باعث تغییر بیشتر پارامترهای مورد بررسی می‌گردد که این امر نشان می‌دهد که افزودن بیشتر این ماده باعث کاهش بیشتر ضریب دی‌الکتریک و کاهش بیشتر ضخامت لایه مضاعف



شکل ۴- الف) منحنی تورم آزاد و (ب) مقایسه میزان تورم آزاد نهایی به ازای درصد‌های وزنی مختلف ماده تثبیت‌کننده



شکل ۵- الف) منحنی فشار تورمی و (ب) مقایسه میزان فشار تورمی به ازای درصد‌های وزنی مختلف ماده تثبیت‌کننده

نتایج آزمایش‌های صورت پذیرفته روی نمونه‌ی خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با ماده CBRPLUS نشان داد که افزودن این ماده به خاک رسی مورد آزمایش موجب کاهش حدود آتربرگ، افزایش وزن واحد حجم خشک حداکثر و کاهش

می‌گردد. کاهش بیشتر ضخامت این لایه موجب بهم پیوسته شدن بیشتر ذرات و به عبارتی چسبیدن ذرات بیشتری به یکدیگر و افزایش بیشتر اصطکاک بین ذرات و در نتیجه بهبود بیشتر خواص خاک می‌گردد.

تحلیل آماری

معرفی و توسعه مدل

با توجه به قابلیت‌های کاربردی تحلیل رگرسیونی به عنوان یک ابزار آماری همراه با پشتوانه تحلیلی-ریاضی، این ابزار یکی از متداول‌ترین روش‌های مدل‌سازی داده مینا (Data driven modeling) جهت ایجاد و توصیف ارتباط بین دو یا چند متغیر دخیل در یک پدیده محسوب می‌گردد (Soltani *et al.*, 2014). محققین بسیاری با استفاده از روش‌های رگرسیونی به مدل‌سازی و بررسی رفتار خاک‌های بهسازی شده با الیاف مصنوعی و افزودنی‌های شیمیایی پرداخته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به (Ranjan *et al.*, 1996)، (Abdullah *et al.*, 1999)، (Ahmed و Sivakumar babu and Vasudevan, 2008) و (2012) اشاره نمود، لیکن تحقیقات در این زمینه محدود بوده و بیشتر شامل مدل‌سازی منحنی تورم آزاد و پارامترهای مقاومتی خاک می‌گردد. در پژوهش حاضر با بررسی معادلات مختلف و مقایسه نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی نهایتاً جهت پیش‌بینی و تعیین منحنی‌های CBR، تورم آزاد و فشار تورمی از مدل‌های رگرسیونی چندگانه مناسب استفاده گردید.

جهت بررسی صحت و دقت مدل رگرسیونی پیشنهادی از دو شاخص آماری ضریب تعیین (COD) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال (RMSE_N) استفاده گردید. جهت محاسبه خطای جذر میانگین مربعات نرمال از رابطه (۱) به شرح زیر استفاده گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{io} - X_{im})^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$RMSE_N (\%) = \frac{n}{X_{MAXO} - X_{MINO}} \times 100$$

که در آن RMSE_N خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (٪)، RMSE خطای جذر میانگین مربعات، X_{io} داده مشاهده شده (آزمایشگاهی)، X_{im} داده پیش‌بینی شده (مدل)، n تعداد داده‌ها، X_{MAXO} داده حداکثر مشاهده شده (آزمایشگاهی) و X_{MINO} داده حداقل مشاهده شده (آزمایشگاهی) می‌باشد.

منحنی CBR

در این کار تحقیقاتی جهت پیش‌بینی و تعیین منحنی CBR از یک مدل رگرسیونی چندگانه که از ترکیب یک تابع هموگرافیک

($\frac{aL}{b+L}$) و یک خط راست (CL) به وجود آمده است و شکل عمومی آن به شرح زیر می‌باشد استفاده گردید:

$$F = \frac{cL^2 + (a+bc)L}{b+L} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن F نیرو (kN)، L میزان نفوذ (mm)، a، b و c ضرایب رگرسیون (ضرایب معادله CBR) می‌باشند.

ضرایب رگرسیون یا ضرایب معادله CBR (a، b و c) در رابطه (۲) خود تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و ماده تثبیت کننده در نظر گرفته شدند، به طوری که برای تعیین آن‌ها از مدل‌های رگرسیونی چندگانه مجزا بر اساس درصد وزنی ماده تثبیت کننده و نشانه خمیری استفاده گردید. چندجمله‌ای‌های مورد استفاده جهت تعیین ضریب رگرسیون a دو متغیره و از نوع درجه یک و سایر ضرایب رگرسیون (b و c) یک متغیره و از نوع درجه یک انتخاب گردید که شکل عمومی آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

$$a = 9.1669C_{CBR} - 0.1157PI + 8.8472 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$b = 0.018PI - 0.4309 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$c = -0.0117PI + 0.7802 \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن‌ها a، b و c ضرایب رگرسیون (ضرایب معادله CBR)، PI نشانه خمیری (٪) و C_{CBR} درصد وزنی ماده تثبیت کننده (٪) می‌باشد.

جهت تخمین میزان CBR با توجه به تعریف آن، با قرار دادن میزان نفوذ (L) برابر با ۲/۵۴ و ۵/۰۸ میلی‌متر در رابطه (۲)، مقدار CBR از رابطه (۶) به شرح زیر بدست می‌آید.

$$CBR = \frac{\text{Max} \left\{ \frac{2.54a}{b+2.54} + 2.54c; \frac{5.08a}{b+5.08} + 5.08c \right\}}{F_s} \times 100 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن CBR میزان CBR حاصله (٪) و F_s مقدار نیروی ذکر شده برای مقدار نفوذ مورد نظر در جدول استاندارد CBR برای مصالح استاندارد است.

منحنی تورم آزاد

در این کار تحقیقاتی جهت پیش‌بینی و تعیین منحنی تورم آزاد برای خاک طبیعی و خاک بهسازی شده با ماده تثبیت کننده یونی CBRPLUS از یک مدل رگرسیونی چندگانه غیرخطی با نام معادله چپمن سه پارامتری (از نوع تابع سیگموئیدی) استفاده گردید. شکل عمومی معادله پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد:

مدل‌های رگرسیونی چندگانه مجزا بر اساس درصد وزنی ماده تثبیت کننده و وزن واحد حجم خشک حداکثر استفاده گردید. چندجمله‌ای‌های مورد استفاده جهت تعیین ضریب رگرسیون a دو متغیره و از نوع درجه یک و ضریب رگرسیون b یک متغیره و از نوع درجه یک انتخاب گردید که شکل عمومی آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

$$a = 0.775C_{CBR} - 0.1124\gamma_d + 1.4517 \quad (\text{رابطه } 13)$$

$$b = -4.2046\gamma_d + 71.6955 \quad (\text{رابطه } 14)$$

جهت تخمین میزان فشار تورمی بر اساس رابطه پیشنهادی (۱۲) تنها کافی است پس از محاسبه ضرایب معادله تورم (a و b) میزان تورم (S_p) برابر صفر در نظر گرفته شود. در نتیجه جهت تعیین میزان فشار تورمی می‌توان از رابطه (۱۵) به شرح زیر استفاده کرد:

$$(kPa)P_s = -\frac{b}{a} \quad (\text{رابطه } 15)$$

که در آن P_s میزان فشار تورمی (kPa) می‌باشد.

معادلات ارائه شده جهت مدل‌سازی (۲ الی ۱۵) از دقت و صحت بسیار بالا برخوردار بوده به طوری که نتایج پیش‌بینی شده توسط آن‌ها در برابر نتایج مشاهده شده (آزمایشگاهی) از همبستگی بسیار بالایی برخوردار می‌باشند. در جدول (۴) نتایج حاصل از بررسی صحت و دقت مدل‌های رگرسیونی ارائه شده درج شده است.

جدول ۴- نتایج مربوط به صحت سنجی مدل‌های ارائه شده

مدل	COD (%)	RMSE _N (%)
منحنی CBR	۹۸/۹۸	۲/۳۳
منحنی تورم آزاد	۹۲/۷۲	۸/۷۲
منحنی فشار تورمی	۹۴/۵۹	۵/۸۴
CBR	۹۹/۳۶	۲/۷۸
تورم آزاد نهایی	۹۹/۱۹	۸/۱۵
فشار تورمی	۹۴/۱۰	۸/۷۹

به عنوان نمونه در شکل (۶) مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده دسته منحنی‌های CBR برای خاک طبیعی و خاک تثبیت شده در مقابل یکدیگر نشان داده شده است. بعلاوه ضریب تعیین و خطای جذر میانگین مربعات نرمال بر روی شکل مشخص گردیده است.

همچنین شکل (۷) نشان دهنده تغییرات میزان CBR (نیروی پیستون به ازای ۲/۵۴ میلی‌متر نفوذ) پیش‌بینی شده در مقابل میزان CBR اندازه‌گیری شده به ازای درصد‌های وزنی مختلف ماده تثبیت کننده می‌باشد.

$$(\%)S = a \times (1 - e^{-bt})^c \quad (\text{رابطه } 7)$$

که در آن S میزان تورم آزاد (%/)، t زمان تورم (hr) و a ، b و c ضرایب رگرسیون (ضرایب معادله تورم) می‌باشند.

لازم به ذکر است که ضرایب رگرسیون (a ، b و c) خود تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و ماده تثبیت کننده در نظر گرفته شد، به طوری که برای تعیین آن‌ها از مدل‌های رگرسیونی چندگانه مجزا بر اساس درصد وزنی ماده تثبیت کننده و وزن واحد حجم خشک حداکثر حاصل از منحنی تراکم استفاده گردید. چندجمله‌ای‌های مورد استفاده جهت تعیین ضریب رگرسیون a دو متغیره و از نوع درجه یک و سایر ضرایب رگرسیون (b و c) یک متغیره و از نوع درجه یک انتخاب گردید که شکل عمومی آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

$$a = -68.1297C_{CBR} - 3.1257\gamma_d + 58.344 \quad (\text{رابطه } 8)$$

$$b = -0.4228\gamma_d + 6.195 \quad (\text{رابطه } 9)$$

$$c = -0.5825\gamma_d + 0.0711 \quad (\text{رابطه } 10)$$

که در آن‌ها γ_d وزن واحد حجم خشک حداکثر خاک (kN/m^3) می‌باشد.

جهت تخمین میزان تورم آزاد نهایی بر اساس رابطه پیشنهادی (۷) تنها کافی است پس از محاسبه ضرایب معادله تورم (a ، b و c) مقدار زمان تورم نهایی در رابطه (۷) قرار گیرد. در این کار تحقیقاتی زمان تورم نهایی برای کلیه نمونه‌های آزمایشی معادل ۲۵۰ ساعت اندازه‌گیری گردید. در نتیجه جهت تعیین میزان تورم آزاد نهایی می‌توان از رابطه (۱۱) به شرح زیر استفاده کرد:

$$(\%)S_F = a \times (1 - e^{-b \times 250})^c \quad (\text{رابطه } 11)$$

که در آن S_F میزان تورم آزاد نهایی (%/.) می‌باشد.

فشار تورمی

جهت پیش‌بینی و تعیین منحنی فشار تورمی برای خاک طبیعی و خاک بهسازی شده با ماده تثبیت کننده یونی CBRPLUS از یک مدل رگرسیونی چند متغیره خطی استفاده گردید. شکل عمومی معادله پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد:

$$(\%)S_p = aP + b \quad (\text{رابطه } 12)$$

که در آن S_p میزان تورم (%/.)، P فشار (kPa) و a و b ضرایب رگرسیون (ضرایب معادله فشار تورمی) می‌باشند.

لازم به ذکر است که ضرایب رگرسیون (a و b) خود تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و ماده تثبیت کننده در نظر گرفته شد، به طوری که برای تعیین آن‌ها از

$$S_{X_i} (\%) = \frac{\left| \frac{\partial W}{\partial X_i} \right| \sigma_{X_i}}{\sum_{i=1}^N \left(\left| \frac{\partial W}{\partial X_i} \right| \sigma_{X_i} \right)} \times 100 ; i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

که در رابطه فوق:

S_{X_i} : میزان حساسیت متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل X_i (%)

W: متغیر وابسته و یا معادله رگرسیونی مورد بررسی

میانگین قدر مطلق مشتق جزئی متغیر وابسته: $\left| \frac{\partial W}{\partial X_i} \right|$

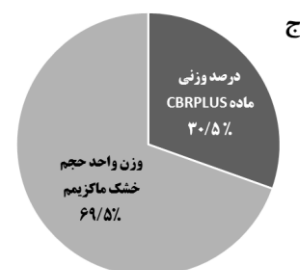
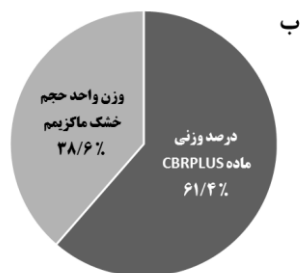
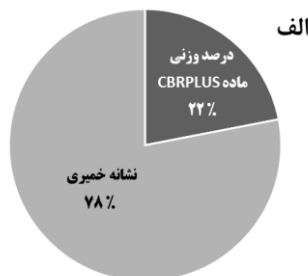
نسبت به متغیر مستقل X_i به ازای تمامی داده‌های شرکت داده شده در مدل‌سازی

نسبت انحراف معیار متغیر مستقل X_i به انحراف معیار متغیر وابسته

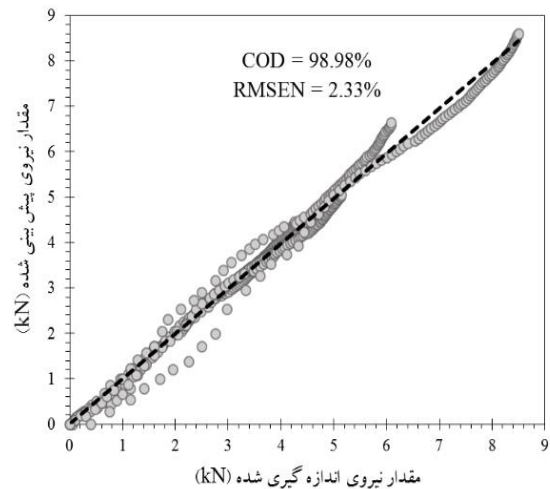
معیار متغیر وابسته

N: تعداد متغیرهای مستقل برای مدل‌سازی

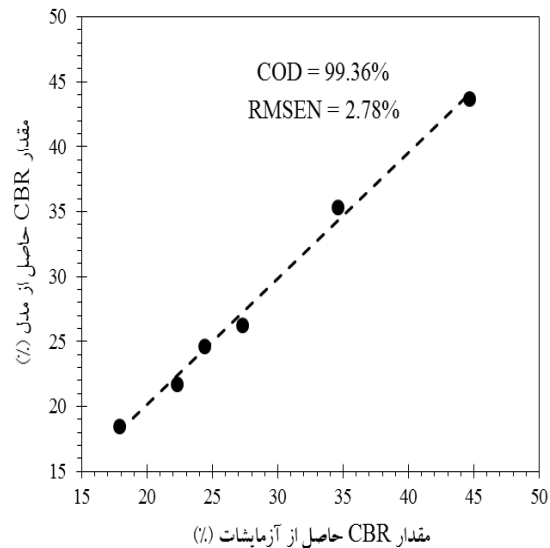
میزان حساسیت متغیرهای مستقل برای هر یک از مدل‌های رگرسیونی ارائه شده مطابق با رابطه (۱۶) در نمودارهای دایره‌ای شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- میزان حساسیت متغیرهای مستقل در تعیین (الف) عدد CBR، (ب) تورم آزاد نهایی و (ج) فشار تورمی



شکل ۶- نیروی بیستون پیش بینی شده در مقابل اندازه‌گیری شده مربوط به آزمایش CBR



شکل ۷- تغییرات میزان CBR پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده به ازای درصد‌های مختلف ماده تثبیت کننده

تحلیل حساسیت

منظور از اجرای تحلیل حساسیت یک مدل رگرسیونی بررسی تأثیر متغیرهای مستقل و تغییرات آن‌ها بر میزان متغیر وابسته است. محققین مختلفی از جمله *Ranjan et al.* (1996)، *Khatibi et al.* (2008)، *Sivakumar babu and Vasudevan* (2014) و *Soltani et al.* (2014) با ارائه روش‌های مختلف بر پایه آزمون‌های آماری و یا روش‌های تحلیلی به اجرای تحلیل حساسیت مدل‌های رگرسیونی خود در خاک‌های مسلح شده تصادفی پرداختند. در این تحقیق جهت اجرای تحلیل حساسیت بر روی مدل‌های رگرسیونی ارائه شده از رابطه (۱۶) به شرح زیر استفاده گردید:

این تغییرات تابعی از درصد ماده افزودنی بطوریکه در درصد بیشتر، بهبود خواص خاک بیشتر می‌گردد.

۲- مدل رگرسیونی چندگانه جهت تعیین و پیش‌بینی منحنی CBR و میزان CBR به صورت تابعی از درصد وزنی ماده تثبیت کننده و نشانه خمیری خاک تثبیت شده با همبستگی بالا بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده و نیز با خطای کم استخراج گردید. همچنین تحلیل معادلات رگرسیونی منجر به استخراج درصد اهمیت متغیرهای مؤثر در تعیین میزان CBR گردید.

۳- مدل‌های رگرسیونی چندگانه مناسب جهت تعیین و پیش‌بینی منحنی تورم آزاد، میزان تورم آزاد نهایی، منحنی فشار تورمی و فشار تورمی به صورت تابعی از درصد وزنی ماده تثبیت کننده و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم استخراج گردید؛ که همگی از همبستگی بالا و دقت کافی برخوردار بودند. همچنین تحلیل معادلات رگرسیونی منجر به استخراج درصد اهمیت متغیرهای مؤثر در پدیده تورم گردید.

۴- با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق که نشان دهنده عملکرد مناسب این ماده در بهسازی خاک می‌باشد، لذا می‌توان از این ماده افزودنی در بهسازی خاک‌های رسی جهت کاربردهای عمرانی مانند جاده‌سازی در مناطق مختلف با در نظر گرفتن شرایط محیطی استفاده نمود. علاوه بر آن از معادلات رگرسیونی حاصل شده که برای اولین بار در این زمینه ارائه شده است، می‌توان در برآورد عملکرد ماده افزودنی CBRPLUS در بهسازی خاک رسی استفاده نمود. البته لازم به ذکر است که این معادلات در دامنه تحقیقاتی حاضر دارای عملکرد مناسب بوده و لازم است با تکرار آزمایش‌ها برای سایر انواع خاک‌های رسی، معادلات ارائه شده صحت‌سنجی شوند.

REFERENCE

- Abadjieva, T. (2001). Chemical stabilisation for low cost roads in Botswana. In *First Africa T2 conference* (pp. 409-414).
- Abdullah, W. S., Alshibli, K. A., & Al-Zou'bi, M. S. (1999). Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays. *Applied Clay Science*, 15(5), 447-462.
- Ahmed, A. (2012). Simplified regression model to predict the strength of reinforced sand with waste polystyrene plastic type. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(4), 963-973.
- Al-Bahar, S. (2005). Moisture effect on selected polymer-based membranes used for waterproofing building basements. *Polymer composites*, 26(3), 276-286.
- Ali, F. (2012). Stabilization of residual soils using

در رابطه (۱۶) عامل $\frac{\partial W}{\partial X_i}$ بیانگر آهنگ متوسط تغییرات

متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل است، لذا منفی بودن این عامل برای یک متغیر مستقل به معنای وجود روند نزولی بین متغیر وابسته و متغیر مستقل مورد بررسی است، به طوری که کاهش متغیر مستقل سبب افزایش متغیر وابسته می‌گردد. در تحقیق حاضر عامل $\frac{\partial W}{\partial X_i}$ در تعیین عدد CBR برای متغیر مستقل درصد وزنی ماده CBRPLUS مثبت و برای نشانه خمیری منفی بدست آمد. همچنین این عامل هم در تعیین تورم آزاد نهایی و هم در تعیین فشار تورمی برای هر دو متغیر مستقل درصد وزنی ماده CBRPLUS و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم منفی بدست آمد. جدا از مثبت یا منفی بودن این عامل، آهنگ این تغییرات برای هر متغیر مستقل بسته به میزان حساسیت متغیر وابسته با یکدیگر متفاوت است.

نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی تأثیر افزودن یک تثبیت کننده یونی (CBRPLUS) بر ظرفیت باربری و پتانسیل تورمی یک خاک جنگلی با درصد رس بالا مورد بررسی قرار گرفت. بعلاوه معادلات رگرسیونی مناسب بر اساس نتایج آزمایشگاهی جهت پیش‌بینی و مدل‌سازی منحنی CBR، منحنی تورم آزاد و منحنی فشار تورمی خاک طبیعی و خاک تثبیت شده ارائه گردید. با توجه به نتایج آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱- افزودن ماده تثبیت کننده شیمیایی موجب ایجاد پیوستگی بین ذرات خاک رسی می‌گردد که منجر به کاهش حدود آتربرگ، تورم، فشار تورم و افزایش وزن واحد حجم خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه و افزایش CBR خاک می‌گردد.

liquid chemical. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17.

Aydin, K., Gamze, B., & Utkan, M. (2010). In-situ modification of a road material using a special polymer. *Scientific Research and Essays*, 5(17), 2547-2555.

Con-Aid (Pty) Ltd, (1998). Consumer guidelines for the Con-Aid Super, CBR Plus and CBR classic for the construction of roads, Florida, RSA.

Estabragh, A. R., Beytollahpour, I., & Javadi, A. A. (2010). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 969-976.

Estabragh, A. R., Naseh, M., Beytollahpour, I., & Javadi, A. A. (2012). Strength of a clay soil and

- soil-cement mixture with resin. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 166(2), 108-114.
- Fairbrother, S. (2011). Estimating forest road aggregate strength by measuring fundamental aggregate properties. *34th Council on Forest Engineering, Quebec, Canada*.
- Hu, W. J., Shang, Q. S., Liu, S. T., Zhao, Z. Z., Fan, Z. J., Gao, X. C., ... & Ou, Q. C. (2007). The Application Technology of Roadpacker Solidified Limestone Soil. In *International Conference on Transportation Engineering 2007* (pp. 692-697). ASCE.
- Inyang, H. I., Bae, S., Mbamalu, G., & Park, S. W. (2007). Aqueous polymer effects on volumetric swelling of Na-montmorillonite. *Journal of materials in civil engineering*, 19(1), 84-90.
- Jones, E. E., Ajayi-Majebi, A., Grissom, W. A., Smith, L. S., & Jones, E. E. (1991). Epoxy-resin-based chemical stabilization of a fine, poorly graded soil system. *Transportation Research Record*, (1295).
- Kavak, A., Bilgen, G., & Mutman, U. (2010). In-situ modification of a road material using a special polymer. *Scientific Research and Essays*, 5(7), 2547-2555.
- Khatibi, M., Estabragh, A. R., Soltani, A. & Rafatjoo, H. (2014). Assessment of swelling behavior of randomly reinforced expansive soils using regression analysis. In *Proceeding of 8th National conference on Civil Engineering, Babol, Iran*. (In Farsi)
- Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Bae, S., & Huang, H. (2009). Improvement of water-stability of clay aggregates admixed with aqueous polymer soil stabilizers. *Catena*, 77(3), 175-179.
- Moayed, R. Z., & Allahyari, F. (2012). Determination of Required Ion Exchange Solution for Stabilizing Clayey Soils with Various PI. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology (No. 61)*. World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Ranjan, G., Vasan, R. M., & Charan, H. D. (1996). "Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil". *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(6), 419-426.
- Savage, P. F. (2001). Rural road betterment: consideration when using CBR plus and/or con-aid materials. In *First Road Transportation Technology Transfer Conference in Africa. Tanzania* (pp. 378-390).
- Scholen, D. E. (1995). Stabilizer mechanisms in nonstandard stabilizers. In *Transportation research board conference proceedings* (No. 6).
- Shirsavkar, S. S., & Koranne, S. S. (2010). Innovation in Road Construction Using Natural Polymer. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15.
- Sivakumar Babu, G. L., & Vasudevan, A. K. (2008). "Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils". *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(4), 485-492.
- Soltani, A., Estabragh, A. R. & Khatibi, M. (2014). Regression-aided analysis of improving piping resistance using randomly distributed fibers. In *Proceeding of 8th National conference on Civil Engineering, Babol, Iran*. (In Farsi)
- White, W. A. (1949). Atterberg plastic limits of clay minerals. *Report of investigations no. 144*.