

پیش‌بینی مقاومت خاک-سیمان بهسازی شده با رزین به‌وسیله مدل رگرسیونی

محمود بابالار^{۱*}، علی رئیسی استبرق^۲، ایمان بیت‌الله پور^۳، امین سلطانی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۴. کارشناس ارشد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۶/۲۲)

چکیده

در این تحقیق تأثیر سیمان و سه نوع رزین تجاری با درصدها و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت در بهسازی یک خاک چسبنده مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی خاک-سیمان (۸٪ و ۱۲٪ درصد سیمان) و خاک-سیمان - رزین (سه نوع رزین TB701, R83, R73 هرکدام با درصدهای ۵٪ و ۸٪ و ۱۰٪) بر اساس رطوبت بهینه و در وزن واحد حجم ماکزیمم منحنی تراکم ساخته شدند. آزمایش‌های مقاومت فشاری در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (۳ روزه، ۷ روزه، ۲۸ روزه) روی نمونه‌ها انجام شد. علاوه بر آن یک مدل رگرسیونی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی جهت پیش‌بینی مقاومت نمونه‌ها در شرایط مختلف تدوین گردید. نتایج نشان داد افزودن رزین موجب افزایش مقاومت خاک-سیمان می‌گردد و این افزایش مقاومت تابعی از درصد سیمان، درصد رزین، زمان عمل‌آوری و لزجت رزین می‌باشد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی پیشنهادی نشان داد که همبستگی میان آن‌ها در حد قابل قبولی است.

واژه‌های کلیدی: بهسازی، خاک - سیمان - رزین، مقاومت فشاری، مدل رگرسیونی

مقدمه

بهسازی خاک‌های مسئله‌دار یکی از موضوعات مورد علاقه مهندسان ژئوتکنیک می‌باشد. بهسازی به مجموعه عملیاتی اطلاق می‌شود که موجب می‌گردد خواص مکانیکی خاک در حد مطلوب اصلاح گردد.

بهسازی خاک به روش‌های مختلف مانند مکانیکی و شیمیایی صورت می‌پذیرد. روش شیمیایی شامل افزودن یک ماده شیمیایی خاص به خاک می‌باشد که طی واکنش‌های شیمیایی موجب بهبود خواص آن می‌گردد. این روش شامل روش‌های متعارف و غیرمتعارف است. در روش متعارف موادی مانند آهک، سیمان و یا خاکستر بادی با درصدهای خاصی به خاک افزوده می‌شوند که این امر موجب بهبود خواص مکانیکی خاک می‌گردد. محققینی مانند Bahar et al (2004) و (2005) Al-Rawas et al. و Broms and Boman (1978)، و (1967) Croft. و Khair et al (1991) و Miller and Azad. (2000) و Mitchell. (1976) و Sezer et al. (2006) و Tang et al (2007)

نشان دادند افزودن سیمان به خاک موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و دوام خاک می‌گردد.

روش‌های غیرمتعارف که اخیراً توسط مهندسان شیمی پیشنهاد شده است شامل افزودن مواد شیمیایی مانند رزین‌ها به خاک جهت بهبود خواص آن می‌باشد. محققینی مانند Tingle and Bolander, Ajayi-Mejebi et al. (1999) و (2001) Katz et al, (2002) Raunch et al و Santoni (2003) نتیجه‌گیری کردند افزودن این‌گونه مواد شیمیایی موجب بهسازی خاک می‌گردد.

گرچه هر دو روش مذکور (متعارف و غیرمتعارف) موجب افزایش خواص مکانیکی خاک مانند کاهش نسبت تخلخل، افزایش تراکم و مقاومت خاک می‌گردد، لیکن در بسیاری از مواقع هدف، بهسازی خاک‌های رسی و چسبنده می‌باشد. بهسازی این خاک‌ها معمولاً با درصد بالایی از سیمان امکان‌پذیر است که ممکن است این امر اقتصادی نباشد.

امروزه استفاده از مدل رگرسیونی یک روش مطلوب برای بدست آوردن رابطه میان متغیرهای تأثیرگذار روی یک پدیده در بسیاری از پروژه‌های مهندسی و علمی محسوب می‌شود. در مدل‌سازی رگرسیونی در صورت وجود تنها یک متغیر مستقل

مخصوص $3/15(\text{gr}/\text{cm}^3)$ و نرمی بلاین $4200(\text{cm}^2/\text{gr})$ می‌باشد و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن مطابق استاندارد ASTM اندازه‌گیری شده و در جدول (۳) قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۲/۷	ASTM-D-۸۵۴-۱۴	وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)
۸/۰		ماسه (%)
۵۵/۰		سیلت (%)
۳۷/۰		رس (%)
۴۶/۰		حد روانی (LL) (%)
۲۳/۰	ASTM-D-۴۳۱۸-۱۰e۱	حد خمیری (PL) (%)
۲۳/۰		نشانه خمیری (PI) (%)
CL	ASTM-D-۲۴۸۷-۱۱	طبقه‌بندی متحد (USCS)
۱۷/۵		درصد رطوبت بهینه (W_{opt}) (%)
۱۷/۲	ASTM-D-۶۹۸-۱۲e۲	وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) (kN/m^3)

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

مقدار	مشخصه
۸/۰	pH
۱۰/۷۴	EC (ds/m)
۲/۴	K^+ (meq/Lit)
۰/۳۳	Ca^{2+} (meq/Lit)
۲۴/۰	SO_4^{2-} (meq/Lit)
۱۰/۰	Mg^{2+} (meq/Lit)
۶۰/۰	Cl^- (meq/Lit)
۰/۶	CO_3^{2-} (meq/Lit)
۴/۰	HCO_3^- (meq/Lit)

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۲۴/۴	ASTM-C-187	غلظت نرمال (%)
۲۱/۰	ASTM-C-191	زمان گیرش اولیه (min)
۱۴۵/۰	ASTM-C-191	زمان گیرش نهایی (min)
۳۰/۰	ASTM-C-109	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)
۴۳/۰	ASTM-C-109	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
۱/۴	ASTM-C-190	مقاومت کششی ۷ روزه (Mpa)
۲/۵	ASTM-c-190	مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa)

ت - رزین

در این تحقیق از سه نوع رزین (پلیمر) مختلف با نام‌های تجاری TB701، R83 و R730 و با درصد‌های وزنی مختلف (۵، ۸ و ۱۰ درصد) استفاده شده است. TB701 دارای پایه شیمیایی کوپلیمر

در مدل‌سازی، مدل رگرسیونی خطی و در صورت وجود تعداد بیشتری متغیر مستقل در پدیده مورد نظر مدل رگرسیونی چندگانه (غیرخطی) نامیده می‌شود. مطالعه منابع موجود نشان می‌دهد تاکنون مطالعات اندکی در مورد استفاده از مدل رگرسیونی در زمینه مدل‌سازی مقاومت خاک‌های بهسازی شده انجام گرفته است. محققینی مانند Ranjan *et al* (1995) به مطالعه و تحلیل آماری خاک‌های مسلح شده با الیاف پرداختند و یک مدل چند متغیره را ارائه نمودند. Sivakumar (2008) و Babu and Vasudevan تحلیل آماری سرعت نشت آب و نیروی نشت در خاک‌های مسلح شده تصادفی با الیاف مصنوعی را مورد مطالعه قرار دادند و مدل چند متغیره‌ای را جهت این امر ارائه نمودند. همچنین Babalar *et al* (2014) یک مدل رگرسیونی ساده جهت پیش‌بینی مقاومت خاک بهسازی شده با رزین را ارائه دادند. Khatibi *et al* (2015) تحقیقی روی یک خاک متورم شونده بهسازی شده با استفاده از الیاف مصنوعی و افزودنی‌های شیمیایی (سیمان-آهک) انجام دادند.

در این تحقیق مدل‌سازی مقاومت فشاری و کرنش خاک-سیمان-رزین و همچنین تأثیر متغیرهای تأثیرگذار روی مقاومت فشاری خاک و درصد اهمیت آن‌ها با استفاده از یک مدل رگرسیونی غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین نتایج بدست آمده از مدل رگرسیونی با نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه شد و مورد بحث قرار گرفت.

لذا هدف از این تحقیق بررسی اثر رزین بر خواص مکانیکی مخلوط خاک-سیمان و همچنین ارائه یک مدل رگرسیونی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری و کرنش نمونه‌های خاک-سیمان-رزین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

الف - خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق از ۸ درصد ماسه، ۵۵ درصد سیلت و ۳۷ درصد رس تشکیل شده است. خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی این خاک به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. بر اساس آزمایش تراکم استاندارد رطوبت بهینه خاک برابر ۱۷/۵ درصد و حداکثر وزن واحد حجم خشک آن نیز برابر $17/2(\text{kN}/\text{m}^3)$ گردید. مطابق با طبقه‌بندی یونیفاید این خاک، از نوع رسی با پلاستیسیته پایین (CL) طبقه‌بندی می‌گردد.

ب - سیمان

سیمان استفاده شده در این تحقیق از نوع پرتلند نوع ۱ با وزن

شده و تغییر شکل حاصل در نمونه ثبت شد و عمل بارگذاری تا گسیختگی نمونه صورت پذیرفت و سپس با توجه به اطلاعات ثبت شده اقدام به ترسیم منحنی تنش کرنش برای هر نمونه گردید.



شکل ۱ - قالب ویژه (الف) و دستگاه بارگذاری مخصوص (ب) جهت تهیه و متراکم نمودن نمونه‌های آزمایشی

نتایج و بحث

شکل (۲) منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های خاک بهسازی شده با ۱۲٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ثابت ۲۸ روزه را برای درصد‌های مختلف رزین نشان می‌دهد. شکل (۳) نیز نشان‌دهنده منحنی‌های تنش و کرنش نمونه‌های خاک بهسازی شده با ۸٪ سیمان و همچنین ۸٪ و ۱۰٪ از رزین‌های R730 و R83, TB701 در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌باشد.

بررسی نتایج شکل (۲) نشان می‌دهد که مقاومت نهایی خاک-سیمان در کرنش (٪) ۳/۳ معادل ۳۱۶۰ kPa می‌باشد. مقاومت نهایی خاک-سیمان مذکور به همراه ۱۰٪ رزین R83 در کرنش (٪) ۲/۵ معادل ۵۱۰۰ kPa می‌باشد که میزان افزایش آن برابر با ۶۱٪ است. لیکن کرنش نمونه خاک-سیمان-رزین مربوطه نسبت به خاک-سیمان کاهش یافته است که نشان‌دهنده پیدایش خاصیت شکنندگی در نمونه با افزایش رزین می‌باشد. در نتیجه افزودن (٪) ۱۰ از رزین‌های TB701 و R730 مقاومت به ترتیب به ۴۵۶۰ kPa و ۴۱۰۰ kPa تغییر می‌کند که نشان‌دهنده افزایشی معادل (٪) ۴۴ و (٪) ۲۹ نسبت به خاک-سیمان می‌باشد. این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات (2011) Estabragh *et al.* و (2003) Anagnostopoulos *et al.*, مطابقت دارند. همچنین با توجه به شکل (۲) تأثیر رزین R83 در افزایش مقاومت نهایی خاک به ازای درصد وزنی (٪) ۱۰ رزین و درصد سیمان ثابت (٪) ۱۲ در افزایش مقاومت نمونه‌های خاک-سیمان از دیگر رزین‌ها بیشتر است.

شکل (۳) منحنی‌های تنش-کرنش برای خاک-سیمان (۸ درصد سیمان) و خاک سیمان اختلاط یافته با درصد‌های مختلف رزین را در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که مشاهده می‌گردد مقاومت نهایی خاک-سیمان در کرنش (٪) ۲/۵ معادل ۲۲۹۵ kPa است. لیکن مقاومت نهایی

ونیل استات و اتیلن (CH₂:CHOOCC₃H₇ and CH₂:CH₂) و لزجتی برابر ۴۰۰ پاسکال ثانیه می‌باشد. همچنین رزین‌های R730 و R83 با پایه شیمیایی یکسان اکریلیک اسید (CH₂:CHCOOH) اما با غلظت‌های متفاوت پلیمر و به صورت امولسیون ۵۰ درصد با لزجت‌های به ترتیب ۱۰۰۰۰ و ۳۰۰ پاسکال ثانیه می‌باشند.

ت - آب

آب مورد استفاده دارای اسیدیته (pH) برابر ۷/۷۶ غلظت یون کلر (Cl⁻) برابر ۱/۷ (meq/Lit) و غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم (Ca²⁺-Mg²⁺) برابر ۹/۱ (meq/Lit) می‌باشد. این آب عاری از هرگونه مواد آلی و اسیدی می‌باشد.

تهیه و نگهداری نمونه‌های آزمایشی

به منظور تهیه نمونه‌های آزمایشی ابتدا آزمایش تراکم استاندارد بر روی خاک طبیعی، خاک-سیمان (با درصد‌های سیمان ۸ و ۱۲) و خاک-سیمان-رزین (سه نوع رزین با درصد‌های ۵ و ۸ و ۱۰ درصد) در سه زمان عمل‌آوری ۳ و ۷ و ۲۸ روز انجام گرفته و منحنی استاندارد تراکم برای آنها تعیین گردید. سپس با توجه به رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر بدست آمده از آزمایش تراکم استاندارد، نمونه‌های مورد نظر برای اندازه‌گیری مقاومت خاک به روش تراکم استاتیکی ساخته شدند. به منظور تهیه ی نمونه‌های مورد نظر مخلوط حاصل در یک قالب مخصوص که دارای سه قسمت با ارتفاع میانی ۱۰۰ mm و قطر ۵۰ mm بود (شکل ۱) در سه لایه و با سرعت ۱/۵ mm/min متراکم شد تا اینکه نمونه مورد نظر با وزن واحد حجم ماکزیمم حاصل از منحنی تراکم مربوطه تهیه گردد. طول و قطر هر نمونه به ترتیب برابر ۱۰۰ mm و ۵۰ mm بود. نمونه‌های تهیه شده در یک کابینت با دمای ۲۵ °C و رطوبت نسبی ۹۵٪ مطابق استاندارد ASTM D1632 ننگه داری شدند و در زمان عمل‌آوری مشخص اقدام به انجام آزمایش مورد نظر روی آن‌ها گردید. همان‌طور که بیان شد ابعاد نمونه‌های ساخته شده معادل D=50 mm و h=100 mm می‌باشد به طوری که انتخاب h=2D مطابق دستورالعمل ACI (1990) می‌باشد. محققین دیگری مانند (2014) Estabragh *et al.* و (2007) Kumar *et al.* نیز نمونه‌های خاک سیمان را با ابعاد h=2D تهیه و مورد آزمایش تک محوری قرار دادند.

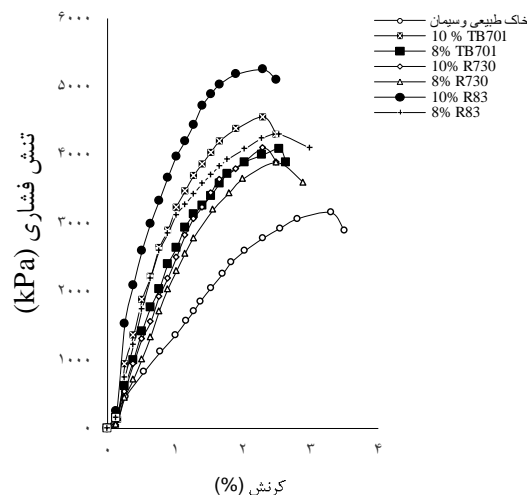
روش انجام آزمایش

آزمایش مقاومت تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D1633 روی نمونه‌های مختلف تهیه شده در زمان‌های عمل‌آوری گوناگون انجام گردید. در طول آزمایش بار اعمال

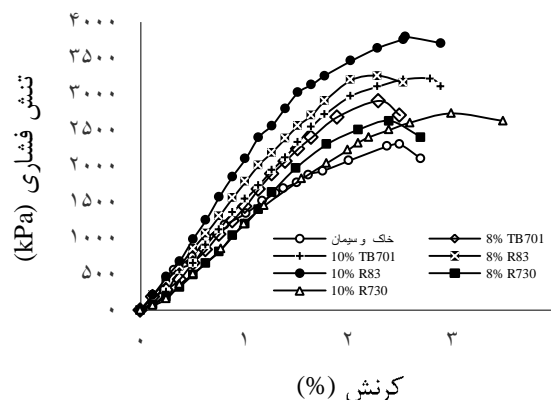
به طوری که به ازای درصدهای ثابت سیمان و رزین با افزایش زمان عمل‌آوری در هر نمونه از ۳ روز به ۷ روز و ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ رزین R83 میزان مقاومت از ۲۱۰۰ kPa به ۳۱۰۰ kPa و ۳۷۹۱ kPa و در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ رزین TB701 میزان مقاومت از ۱۹۰۰ kPa به ۲۶۵۰ kPa و سپس به ۳۲۰۸ kPa و همچنین در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ رزین R730 میزان مقاومت از ۱۷۷۰ kPa به ۲۳۵۰ kPa و سپس به ۲۷۲۶ افزایش یافته است. در مخلوط‌های خاک-سیمان متراکم شده، سیمانی شدن به علت به وجود آمدن پیوندهای شیمیایی بین سطوح ذرات سیمان مجاور و همچنین بین ذرات سیمان و سطح بین ذرات خاک حاصل می‌شود. این خواص در مجموع موجب تشکیل محفظه مستحکمی می‌شود که ذرات خاک را در برمی‌گیرد. خمیر سیمان هیدراته شده، ذرات رس و سیلت را به یکدیگر متصل می‌کند (Estabragh *et al* 2011). به دلیل اینکه پیوند میان ذرات خاک-سیمان در طول زمان انجام می‌گیرد برای افزایش مقاومت خاک باید واکنش نهایی میان ذرات خاک و سیمان انجام گیرد. این واکنش باعث افزایش مقاومت خاک و کاهش پلاستیسیته و جذب آب در خاک می‌گردد. (Al-Rawas *et al*, 2005).

همچنین نتایج حاصل از شکل (۴) نشان می‌دهد زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت نهایی نمونه‌های خاک-سیمان-رزین تأثیر بیشتری نسبت به افزایش درصد رزین دارد به طوری که برای رزین R83 که به مخلوط ۸٪ سیمان به اندازه ۵٪ اضافه شده در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه مقاومت نهایی ۲۷۵ kPa می‌باشد در صورتی که به همان درصد خاک-سیمان ۸٪ همان رزین به مقدار ۱۰٪ افزوده شد و در زمان عمل‌آوری ۳ روزه مقاومت آن معادل ۲۱۰۰ kPa شد که نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه درصد رزین در حالت اول ۵٪ کمتر بود لیکن مقاومت در درصد ثابت سیمان افزایش یافته که ناشی از تأثیر زمان عمل‌آوری است. افزایش در میزان مقاومت فشاری نهایی مخلوط خاک-سیمان در اثر افزودن رزین را می‌توان مطابق با نتایج تحقیقات (2000) Gao *et al* چنین تفسیر کرد که پس از افزودن رزین به مخلوط خاک-سیمان، مولکول‌های اکسیژن رزین با هیدروژن سیمان و COOH رزین با OH سیمان پیوند می‌دهند که سبب تشکیل ژل CSH و یا کریستال‌های Ca(OH)₂ می‌گردد که تأثیر مستقیم در افزایش مقاومت دارد.

خاک-سیمان اختلاط یافته با ۱۰٪ رزین R83 در کرنش ۲/۵۶٪ معادل ۳۷۹۱ kPa می‌باشد که افزایش مقاومتی معادل ۶۵٪ را در اثر افزودن رزین نشان می‌دهد.

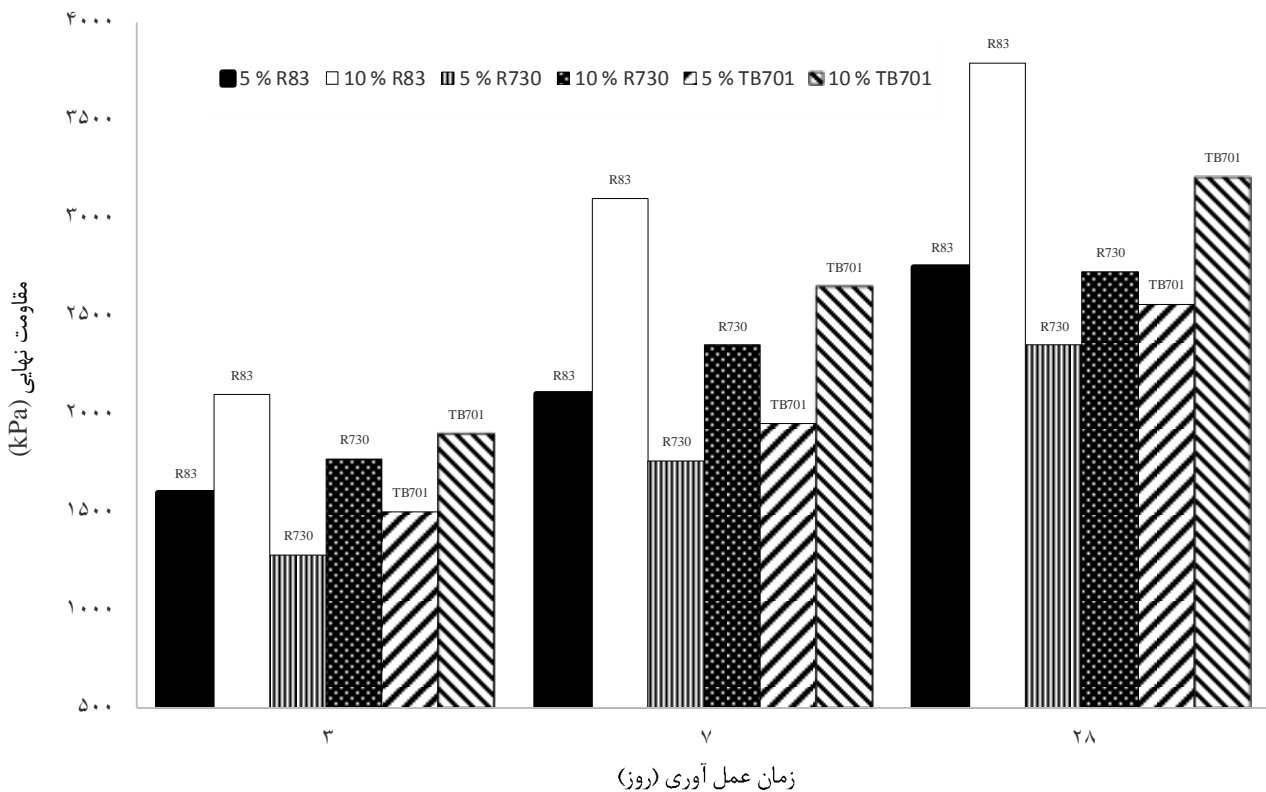


شکل ۲- منحنی تنش - کرنش نمونه‌های خاک - سیمان - رزین بهسازی شده با ۱۲٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه برای درصدهای مختلف از سه نوع رزین TB701, R83, R730



شکل ۳- منحنی تنش - کرنش نمونه‌های خاک - سیمان - رزین بهسازی شده با ۸٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه برای درصدهای مختلف از سه نوع رزین TB701, R730, R83

مقایسه شکل‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهد که مقاومت نهایی خاک-سیمان (۱۲ درصد سیمان) ۳۱۶۰ kPa و مقاومت نهایی خاک-سیمان (۸ درصد سیمان) ۲۲۹۵ kPa می‌باشد و افزایشی برابر ۳۷٪ را نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد در زمان عمل‌آوری یکسان افزایش درصد سیمان موجب افزایش مقاومت می‌گردد. شکل (۴) نشان‌دهنده تأثیر زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت نهایی نمونه‌های خاک - سیمان - رزین است



شکل ۴- نمونه‌های خاک - سیمان - رزین با ۸ درصد (٪) سیمان و ۵ و ۱۰ درصد (٪) از رزین‌های R83, R730, TB701 در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۷.۳ روز

تحلیل آماری

مدل‌سازی تنش و کرنش

در این تحقیق به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها و عوامل مرتبط و تأثیرگذار روی مقاومت نمونه‌های خاک - سیمان - رزین از تحلیل رگرسیونی غیرخطی به‌عنوان یک مدل داده مینا استفاده شده است. با توجه به شکل منحنی تنش کرنش، معادلات مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و سپس معادله پیشنهادی زیر به منظور تدوین یک مدل که شامل مقاومت نهایی و کرنش متناظر مقاومت نهایی می‌باشد ارائه گردید:

$$\sigma_{ult} = c\varepsilon^3 + b\varepsilon^2 + a\varepsilon \quad (1)$$

در این رابطه σ_{ult} متغیر وابسته (میزان مقاومت نهایی) و ε متغیر مستقل (کرنش متناظر با مقاومت نهایی) و همچنین a و b و c ضرایب رگرسیون می‌باشند. این ضرایب به صورت تابعی از شرایط آزمایشگاهی (زمان عمل‌آوری خاک - سیمان - رزین) و همچنین شرایط فیزیکی (درصد سیمان، درصد رزین، لزجت رزین) در نظر گرفته شدند. در رابطه (۱) برای تعیین ضرایب معادله مطابق رابطه (۲) از یک معادله چند جمله‌ای درجه ۲ با چهار متغیر استفاده گردید.

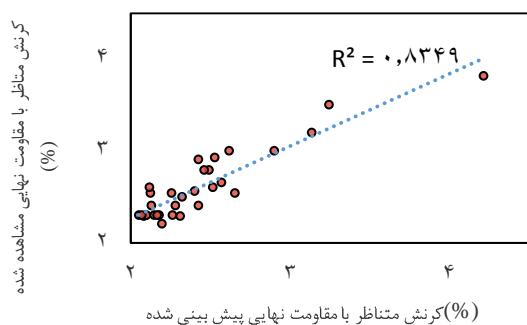
$$f = y_0 + aC_c^2 + bC_t^2 + y_3R_c^2 + y_4\mu_R^2 + y_5C_c + y_6C_t + y_7R_c + y_8\mu_R + y_9C_cC_t + y_{10}C_c\mu_R + y_{11}C_cR_c + y_{12}C_tR_c + y_{13}C_t\mu_R + y_{14}R_c\mu_R \quad (2)$$

در این رابطه f ضریب معادله رگرسیون و C_c , R_c , C_t , μ_R به ترتیب از راست به چپ نشان‌دهنده لزجت رزین (Pa.s)، درصد سیمان (٪)، زمان عمل‌آوری نمونه‌ها (روز)، درصد رزین (٪) و همچنین y_3 ... y_{14} نشان‌دهنده ضرایب ثابت این معادله می‌باشند.

به منظور مدل‌سازی منحنی مقاومتی نمونه‌های خاک - سیمان - رزین ابتدا ضرایب (a,b,c) در رابطه (۱) بر اساس تنش و کرنش نمونه‌های خاک سیمان-رزین ثبت شده در آزمایشگاه استخراج گردید. سپس به منظور مدل‌سازی ضرایب رگرسیونی (a,b,c) بر اساس متغیرهای زمان عمل‌آوری، درصد سیمان، درصد رزین و لزجت رزین از روابط (۳) و (۴) و (۵) استفاده گردید.

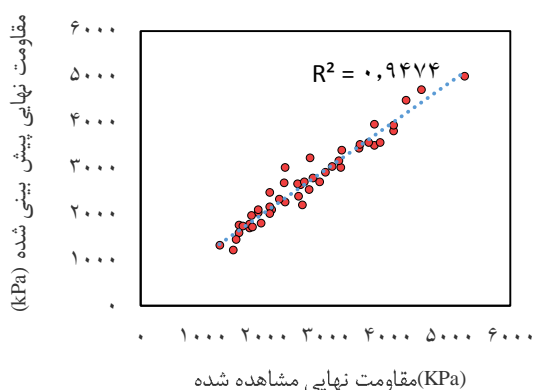
$$a = 756612 + 51.23C_c^2 + 2.48C_t^2 - 3.52R_c^2 + 0.0006\mu_R^2 - 140064C_c - 21.53C_t - 5.85\mu_R - 40255R_c + 2.78C_cC_t + 107.58C_cR_c - 0.0155C_c\mu_R - 7.17C_tR_c - 0.0034C_t\mu_R - 0.029R_c\mu_R \quad (3)$$

جزر میانگین مربعات نرمال برای کرنش‌های پیش‌بینی شده طبق رابطه (۷) محاسبه شده و برابر ۱۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵ - کرنش متناظر با مقاومت نهایی مشاهده شده در مقابل کرنش متناظر با مقاومت نهایی پیش‌بینی شده برای نمونه‌های خاک-سیمان-رزین

مقاومت نمونه‌های خاک سیمان بر اساس کرنش‌ها و ضرایب (a,b,c) مدل‌سازی شده، از طریق رابطه (۱) پیش‌بینی شدند. این مقادیر در شکل (۶) قابل مشاهده هستند.



شکل ۶ - مقاومت نهایی مشاهده شده در مقابل مقاومت نهایی پیش‌بینی شده برای نمونه‌های خاک-سیمان-رزین

نتایج بدست آمده از مقاومت‌های نهایی پیش‌بینی شده نشان می‌دهد ضریب همبستگی (R^2) بین مقاومت نهایی پیش‌بینی شده و مقاومت نهایی برداشت شده (آزمایشگاهی) برابر با ۰/۹۴۷ می‌باشد که این امر نشان‌دهنده همبستگی بالای مقادیر پیش‌بینی شده و مدل‌سازی شده است. همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات نرمال $(RMSE_N)$ برای مقادیر پیش‌بینی شده برابر ۰/۰۴۹ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده خطای بسیار پایین و دقت بالای مدل ارائه شده برای مقاومت خاک است. مقادیر ضرایب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات نرمال بدست آمده بر اساس رابطه (۷) در جدول (۴) قابل مشاهده است.

$$b = -404445 - 24.54C_c^2 - 4.16C_t^2 - 29.37R_c^2 - 0.0003\mu_R^2 + 68.537C_c + 28.14C_t + 3.17\mu_R + 632.53R_c - 0.01C_cC_t - 63.26C_cR_c + 0.0116C_c\mu_R + 12.6C_tR_c + 0.032C_t\mu_R + 0.0237R_c\mu_R \quad (\text{رابطه } ۴)$$

$$c = 70.58 - 1.76C_c^2 + 0.974C_t^2 + 13.35R_c^2 + 6.69\mu_R^2 - 33.09C_c + 1.94C_t - 0.61\mu_R - 185.73R_c - 0.193C_cC_t + 7.65C_cR_c - 0.0026C_c\mu_R - 3.83C_tR_c - 0.0007C_t\mu_R - 0.0054R_c\mu_R \quad (\text{رابطه } ۵)$$

در این معادلات a, b, c ضرایب معادله رگرسیون هستند. برای مدل‌سازی کرنش نمونه‌های خاک-سیمان-رزین در نقاط متناظر با مقاومت نهایی، از معادله شماره (۱) مشتق گرفته شد. از آنجایی که ریشه‌های مشتق رابطه (۱) نشان‌دهنده نقاط اکسترمم منحنی‌های تنش کرنش می‌باشند، ریشه‌های مثبت مشتق معادله به‌عنوان کرنش نهایی پیش‌بینی شده در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی دقت معادله‌های رگرسیونی از ضریب تعیین (R^2) و همچنین خطای جذر میانگین مربعات بر اساس رابطه زیر استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{io} - X_{im})^2}{n}} \quad (\text{رابطه } ۶)$$

در این رابطه RMSE نشان‌دهنده خطای جذر میانگین مربعات، X_{io} نشان‌دهنده داده‌های آزمایشگاهی و X_{im} نشان‌دهنده داده‌های پیش‌بینی شده (مدل) و n نشان‌دهنده تعداد داده‌ها می‌باشد. به منظور محاسبه دقت مدل پیشنهادی مطابق رابطه (۷) از خطای جذر میانگین مربعات نرمال که یک عدد بی بعد است استفاده شد.

$$RMSE_n = \frac{RMSE}{X_{MAXO} - X_{Mino}} \times 100 \quad (\text{رابطه } ۷)$$

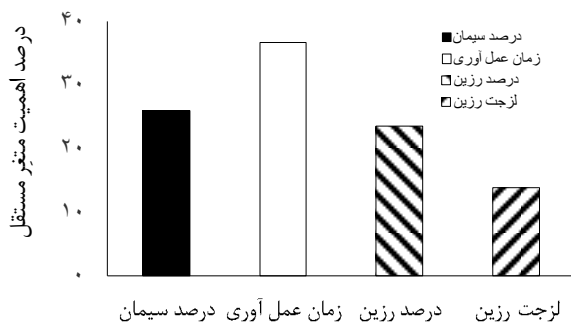
در این رابطه $RMSE_N$ خطای جذر میانگین مربعات نرمال، $RMSE$ خطای جذر میانگین مربعات، مقدار X_{MAXO} مربوط به داده حداکثر و X_{Mino} مقدار مربوط به داده حداقل می‌باشد. شکل شماره (۵) کرنش‌های متناظر با مقاومت نهایی مشاهده شده (آزمایشگاهی) و پیش‌بینی شده را برای نمونه‌های خاک به‌سازی شده با درصد‌های مختلف سیمان - رزین در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود ضریب همبستگی R^2 برای کرنش‌های پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی برابر ۰/۸۳ می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی بالا بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده است. همچنین خطای

پیشنهادی Khatibi et al (2014) می توان درصد اهمیت هریک از متغیرهای مستقل در تعیین متغیر وابسته را تعیین کرد.

$$\text{IMP}_X (\%) = \frac{|\rho_{zx}|}{|\rho_{zx}| + |\rho_{zy}|} \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن IMP_X درصد اهمیت متغیر مستقل X در تخمین متغیر وابسته Z (مقاومت فشاری نهایی)، ρ_{zx} همبستگی Z نسبت به X و ρ_{zy} همبستگی Z نسبت به متغیر مستقل Y می باشد. درصد اهمیت هریک از متغیرهای مستقل در میزان مقاومت نمونه های خاک سیمان-رزین در شکل شماره (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- درصد اهمیت متغیرهای مؤثر در تعیین مقاومت فشاری خاک سیمان

جدول ۴- مقادیر خطای جذر میانگین مربعات نرمال و ضرایب همبستگی محاسبه شده برای تنش و کرنش پیش بینی شده

مقادیر پیش بینی شده	RMSE _N (%)	R ²
ε	۱۵	۰/۸۳
σ	۰/۰۴۹	۰/۹۴۷

ماتریس همبستگی

به منظور مطالعه میزان اهمیت تأثیر هریک از متغیرهای مستقل (درصد وزنی سیمان - زمان عمل آوری-درصد وزنی رزین- لزجت رزین) بر متغیر وابسته (مقاومت نهایی) از ماتریس همبستگی استفاده شده است که در جدول (۵) نشان داده شده است. مطابق جدول شماره (۵) همبستگی مقاومت فشاری پیش بینی شده (Predicted Compressive Strength) که با عنوان PCS نشان داده شده است با درصد وزنی سیمان (C_c) درصد وزنی رزین (R_c) و زمان عمل آوری (C_t) مثبت است که این موضوع نشان می دهد افزایش در هریک از متغیرهای نام برده موجب افزایش مقاومت سیمان می شود. همچنین با توجه به جدول شماره (۵) میزان همبستگی متغیر زمان عمل آوری با مقاومت سیمان مقدار بالاتری دارد، این بدان معنی است که افزایش زمان عمل آوری تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت نمونه های خاک -سیمان -رزین دارد. با استفاده از رابطه

جدول ۵- ماتریس همبستگی متغیرهای مؤثر در پیش بینی مقاومت نهایی خاک - سیمان

متغیر	C_c (%)	C_t (days)	R_c (%)	μ_R (Pa.s)	Predicted PCS (kPa)
C_c (%)	۱	-	-	-	-
C_t (days)	۰/۰۵۷۱۲۳	۱	-	-	-
R_c (%)	-۰/۰۸۵۱۴۲	۰/۰۸۸۳۲	۱	-	-
μ_R (Pa.s)	۰/۰۵۱۱۸۹	-۰/۱۲۱۵۲۹	۰/۰۵۹۸۵۹	۱	-
PCS (kPa)	۰/۴۸۴۱۲	۰/۶۸۶۶۳۶۶	۰/۴۳۳۹۴۹۵	-۰/۲۵۸۶۹۵	۱

به خاک-سیمان موجب افزایش مقاومت نمونه های خاک-سیمان می گردد. افزایش مقاومت خاک تابعی از درصد سیمان، درصد رزین و زمان عمل آوری نمونه ها و لزجت رزین می باشد. نتایج حاصل از مدل رگرسیونی نشان داد که همبستگی قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی شده وجود دارد، همچنین ماتریس همبستگی نشان داد میان پارامترهای مستقل تأثیرگذار روی مقاومت خاک-سیمان-رزین زمان عمل آوری تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت فشاری داشت.

نتیجه گیری کلی

در این مطالعه تحقیقاتی بهسازی یک خاک رسی از روش شیمیایی غیرمتعارف (استفاده از رزین و سیمان) مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. جهت آنالیز داده های آزمایشگاهی و پیش بینی مقاومت مواد مذکور و عوامل تأثیرگذار روی آنها اقدام به ارائه یک مدل رگرسیونی گردید. طبق نتایج حاصل از این تحقیق افزودن سیمان به خاک موجب افزایش مقاومت خاک می گردد. همچنین افزودن رزین

REFERENCES

Ajayi-Mejabi, A., Grissom, W.A., Smith, L.S. and Jones, E.E. (1991). Epoxy resin-based chemical

stabilization of a fine poorly graded soil system. Transportation Research Record 1295:95-108.

- American Concrete Institute (ACI) Committee 230 (1990). "state of the art report on soil-cement" ACI Material. Journal 87(4), 395-417.
- Anagnostopoulos, C.A., Stavridakis, I., and Grammatikopoulos, N. (2003). Engineering Behavior of cement acrylic resin treated soft clay. In: Proceedings of international congress on Problematic soils. Trent University, Nottingham, UK. PP. 183-188.
- Al-Rawas, A.A., Hagoa, A., and Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. Building and Environment. 40 (5): 681-687.
- Babalar, M., Estabragh, A.R., and Soltani, A. (2014). Using a regression model for prediction of soil-cement-resin strength. In: Proceedings of first national congress on soil mechanics and foundation engineering, 2-3 December., Shahid Rajayi University, Tehran, Iran.
- Bahar, R., Benazzoug, M., Kenaib, S., (2004). Performance of compacted cement-stabilized soil cement and concrete composites 24(7): 811-820.
- Bolander, P. (1999) Laboratory testing of non-traditional additives for stabilization of roads and trial surfaces. Transportation Research Record 1652:24-31.
- Broms, B.B., and Boman, P., (1978) Stabilization of Soil with Lime Columns, Design Handbook, (2nd ed.). Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Croft, J.B., (1967) The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. Geotechnique 17:119 -135.
- Estabragh, A.R., Beytollahpour, I., and Javadi, A.A. (2011). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. Journal of Materials in Civil Engineering. 23(7)-969-976.
- Estabragh, A.R., Rafatjo, H. and Javadi, A.A. (2014). Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. Geo synthetics International, Vol. 21(3), 233-243.
- Gao, J.M., Qian, C.X., Wang, B., and Morino, K., (2002). Experimental study on properties of polymer-modified cement mortars with silica fume. Cement and Concrete Research 32(1):41-45.
- Katz, L.E., Raunch, A.F., Lijstrand H.M., Shaw, K.S., and Viera, A.R. (2001). Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer. Transportation Research Record. 1757:50-57.
- Khair, A., Nalluli, C., and Kilkenney, W.M., (1991). Soil-cement tiles for lining irrigation canals. Irrigation and Drainage system 5(2):151-163.
- Khatibi, M., Estabragh, A.R., Soltani, A. (2014). Analysis of a fiber-reinforced swelling soil characteristics using a regression model. In: Proceedings of 8 national conference on civil engineering, 7-8 May., Babol University, Babol, Iran.
- Khatibi, M., Soltani, A., Estabragh, A.R. (2015). Experimental and Statistical Analysis of a fiber reinforced Swelling soil characteristics using chemical additives. Modarec civil Journal. 15(2), 137-147.
- Kumar, A., Singh Walia, B., and Bajaj, A. (2007). Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. Journal of Material in Civil Engineering, ASCE, 19(3):242-248.
- Miller, G., and Azad, S., (2000). Influence of soil type on stabilization with cement Klin dust. Construction and Building Materials, 14 (2), 89-97.
- Mitchel, J.K., (1976). Fundamentals of soil Behavior. Wiley, New York, NY, USA.
- Ranjan, G., Vasan, R.M., Charan, H.D. (1995). Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. J Geotech. Eng. 122 (6), 419-428.
- Rauch, A.F., Harmon, J.S., Katz, L.E., and Liljstrand, H.M. (2002). Liquid soil stabilizations: measured effects on engineering property of clay. Transportation Research Record 1757: 33-41.
- Sezer, A., Inan, G., Yimaz, H.R., and Ramyar, K. (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmin clay.
- Sivakumar Babu, G.L., Vasudevan, A.K., (2008). Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 134(4) PP.485-492.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., and Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clay soil. Geotextiles and Geomembranes, 25(3), 194-202.
- Tingle, J.C., and Santoni, R., (2003). Stabilization of clay soils with non-traditional additives Transportation Research Record 189:72-84.