



بهینه‌سازی مقاومت فشاری تک محوری خاک ماسه‌لای دار تثبیت شده با پلیمر مایع وینیل استات با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

علیرضا حسینی^{۱*}، سید محمد حسین دهناد^۲

^{۱*} دانشجوی دکتری مهندسی عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه قم، قم

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم

(Email: Ar.Hosseini@stu.qom.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۰۳/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰)

چکیده

تثبیت و بهسازی خاک یکی از شاخه‌های علم ژئوتکنیک است که با استفاده از آن ویژگی‌های مهندسی و ژئومکانیکی خاک‌های ضعیف از جمله مقاومت، شکل‌پذیری و ظرفیت باربری را بهبود می‌دهند. در این پژوهش از پلیمر مایع وینیل استات به عنوان ماده افزودنی جهت تثبیت خاک ماسه‌لای دار و بررسی تاثیر آن بر پارامترهای مقاومتی خاک استفاده شده است. به این منظور پس از تثبیت خاک با درصد‌های مختلف افزودنی پلی وینیل استات آزمایش مقاومت فشاری تک محوری طی زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های تثبیت شده انجام شده است. همچنین به منظور بررسی اثر افزودنی در شرایط مختلف، از روش تحلیل آماری روش سطح پاسخ RSM استفاده شده است. طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده و تحلیل آماری صورت پذیرفته، به‌طور کلی افزایش مقدار افزودنی تا درصدی معین در یک زمان عمل‌آوری ثابت، باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری خاک شده است. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری در یک درصد ثابت افزودنی، مقاومت فشاری تک محوری به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

پلی وینیل استات، ماسه‌لای دار، تثبیت خاک، پارامترهای مقاومتی خاک، تحلیل آماری RSM.



Optimization of Uniaxial Compressive Strength of Silty Sand Soil Stabilized with Liquid Vinyl Acetate Polymer using Response Surface Methodology (RSM)

*Alireza Hosseini ^{*1}, Mohammad Hossein Dehnad ^{2*}*

*^{*1} Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department, Qom University, Qom, Iran*

*^{*2} Associate Professor, Civil Engineering Department, Qom University, Qom, Iran*

(Email: Ar.Hosseini@stu.qom.ac.ir)

(Date of received: 11/06/2025, Date of accepted: 11/08/2025)

ABSTRACT

Soil stabilization and improvement is a branch of geotechnical science that improves the engineering and geomechanical properties of weak soils, including strength, ductility, and bearing capacity. In this study, liquid vinyl acetate polymer was used as an additive to stabilize silty sandy soil and to investigate its effect on soil strength parameters. For this purpose, after stabilizing the soil with different percentages of polyvinyl acetate additive, uniaxial compressive strength tests were performed on the stabilized samples during immediate, 1, 7, 14, and 28-day curing times. Also, in order to investigate the effect of the additive under different conditions, the RSM statistical analysis method was used. According to the results of the experiments and statistical analysis, in general, increasing the amount of additive to a certain percentage at a fixed curing time increased the uniaxial compressive strength of the soil. Also, by increasing the curing time at a constant percentage of additive, the uniaxial compressive strength increases significantly.

Keywords:

Polyvinyl acetate, Silty sand soil, Soil stabilization, Soil strength parameters, RSM statistical analysis.



۱- مقدمه

امروزه با توجه به رشد جمعیت و لزوم استفاده بهتر از منابع موجود، تثبیت زمین‌های نامرغوب و ایجاد بسترهای مستحکم بیش از هر زمانی مورد نیاز است. جایگزینی خاک نامرغوب با مصالح و خاک مناسب یکی از راهکارهای پیشنهادی می‌تواند باشد ولی هزینه‌های جایگزینی، تراکم و اجرا بسیار پرهزینه است. یکی از روش‌های بهبود خواص مهندسی خاک‌ها، استفاده از روش تثبیت شیمیایی است. تثبیت و بهسازی خاک به معنای اصلاح خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک برای رسیدن به اهداف پیش‌بینی شده است. در همین راستا روش‌های بهسازی زیادی در دنیا در حال اجرا هستند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. پیدایش شیمی ژئوپلیمر در دهه ۱۹۷۰ میلادی بوده و مهندسین عمران در دهه ۱۹۹۰ میلادی به استفاده از آن در صنایع روی آوردند زیرا مزیت‌هایی همچون کاهش شدید انتشار CO₂ و مصرف انرژی پایین در مقایسه با تولید سیمان و استفاده از مواد طبیعی و ضایعاتی برای تولید آن را همراه داشت [۱]. استفاده از روش‌ها و مواد سنتی در زمینه تثبیت خاک، همراه با مشکلاتی بوده که با معرفی مواد شیمیایی نوین در این زمینه، سرعت و سهولت اجرایی بالا را تداعی می‌نماید. به تازگی و با معرفی انواع مواد شیمیایی نوین (انواع آنزیم‌ها و مخلوط‌های پلیمری)، تحول شگرفی در زمینه تثبیت خاک تحت عنوان تثبیت شیمیایی خاک پدید آمده است. به‌طور کلی استفاده از پلیمرهای آلی به عنوان ماده افزودنی خاک، به علت دارا بودن پتانسیل بالا در افزایش مقاومت آن، در چند دهه اخیر اهمیت زیادی پیدا کرده است [۲].

مطالعاتی در خصوص تاثیر افزایش آهک روی خصوصیات تراکم و مقاومت تک محوری مخلوط خاک رس و آهک توسط اوسینوبی و انوانو در سال ۲۰۰۶ انجام شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بالاترین مقاومت تک محوری زمانی حاصل می‌شود که بلافاصله بعد از مخلوط شدن خاک رس با آهک، عمل تراکم صورت پذیرد. همچنین نمونه تهیه شده با نسبت اختلاط ۵٪ آهک و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه بالاترین مقاومت تک محوری فشاری و مدول الاستیسیته را دارد [۳]. ژو و ليو در سال ۲۰۰۸ به اثر یک ماده تثبیت‌کننده جدید (ترکیبی از سیمان، خاکستر بادی و آهک هیدراته) به منظور اصلاح رفتار مکانیکی سیلت پرداختند. نتایج نشان داد این ماده تثبیت‌کننده می‌تواند به مقدار قابل توجهی مقاومت خاک سیلتی را افزایش و کرنش انقباضی آن را کاهش دهد. از نقطه نظر مکانیکی و کاربردی در پروژه‌های راه، افزودن ۴٪ از این ماده تثبیت‌کننده روشی اقتصادی برای تثبیت این نوع خاک‌ها است. سیلت تثبیت‌شده دارای مقاومت اولیه و سختی کل بالا و تغییر شکل انقباضی کم است که این موضوع نیازهای بستر راه در بزرگراه‌ها را تامین می‌کند. ایشان آزمایش‌هایی جهت تثبیت خاک‌های رس سیلتی انجام دادند و تاثیر همزمان آهک و میکروسیلیس را روی خاک با ۲٪ آهک و ۱٪، ۳٪ و ۵٪ میکروسیلیس بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که اختلاط ۲٪ آهک با ۱٪ سیلیس، مقاومت فشاری خاک را به‌طور رضایت بخشی افزایش می‌دهد [۴].

طباطبایی و سلامت در سال ۱۳۹۲ با افزودن آهک و نانو پلیمر به خاک‌های ماسه‌رس‌دار به تغییر در پارامترهای مقاومتی خاک پرداختند؛ به طوری که با افزودن پلیمر به خاک رفتار خاک به سمت جذب آب کمتر و دامنه خمیری بیشتر میل می‌کند. از طرفی افزودن آهک به خاک نسبت به پلیمر، در بلند مدت تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت فشاری دارد [۵].

اثر افزودنی‌های کربنات کلسیم و مواد شیمیایی نوین بر پارامترهای مقاومتی خاک رس با پلاستیسیته پایین (CL) توسط مدرسی و همکاران در سال ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج نشان داد که با این نوع افزودنی‌ها حد خمیری خاک کاهش می‌یابد، درحالی که مقاومت فشاری خاک با افزایش درصد این افزودنی‌ها و بالا رفتن زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد اما از یک زمان معینی به بعد این افزایش محسوس نیست [۶]. کومار و همکاران در سال ۲۰۱۵ به تاثیر افزودن کربنات کلسیم بر پارامترهای مقاومتی خاک رس ماسه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد کربنات کلسیم و افزایش زمان عمل‌آوری، پارامترهای مقاومتی خاک افزایش می‌یابد. بر اساس این بررسی‌ها، در یک زمان ثابت عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک با افزودن ۲٪ و ۴٪ آهک تقریباً برابر است در حالی که در ۶٪ آهک و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه بیشترین افزایش مقاومت حاصل می‌شود [۷].

میرزآبایی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به مطالعه تاثیر دو ماده افزودنی شیمیایی پلی وینیل الکل و اسید کربومسیلیک تترا بوتان بر روی مقاومت فشاری محدود نشده یک نمونه خاک رس منبسط شونده در دو حالت وزن مخصوص پرداختند و نتایج نشان داد مقاومت فشاری هر دو خاک رس متراکم و نرم به طور قابل توجهی بهبود یافته است [۸]. سعیدی کیا و مدنی در سال ۲۰۱۸ به بررسی تاثیر جایگزینی ۱۵.۵ و ۲۵ درصد اتیلن وینیل استات و وینیل استات بر خواص مخلوط‌های پایه سیمان آلومینات کلسیم پرداختند. خواص مکانیکی مورد بررسی مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بوده است. نتایج نشان می‌دهد اتیلن وینیل استات با نسبت پلیمر به سیمان ۵ و ۲۵ درصد، عملکرد مطلوبی نسبت به وینیل استات داشته و در ۱۵ درصد جایگزینی، این دو پلیمر عملکرد یکسانی از خود نشان داده‌اند [۹].



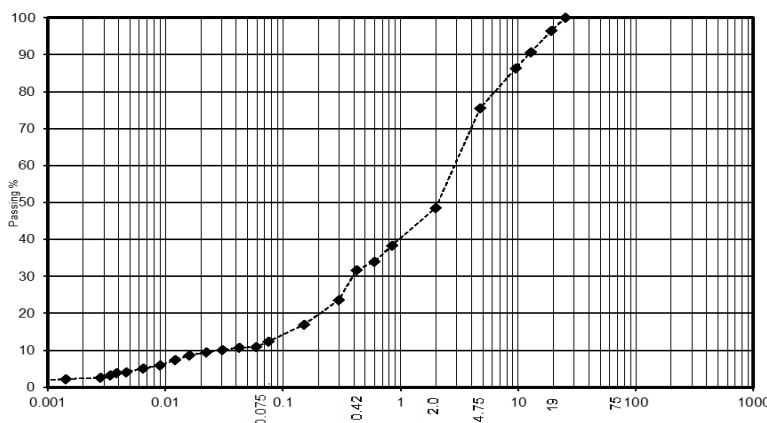
ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ نیز به بررسی اثر کوپلیمر اتیلن-وینیل استات به عنوان عامل سخت کننده خاک تثبیت شده با سیمان پرداختند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشان داد این ماده می تواند استحکام خاک را در زمان های مختلف عمل آوری بهبود بخشد و خواص خاک لس تثبیت شده با سیمان را تقویت نماید. همچنین آزمایش چرخه ذوب-انجماد نشان داد که زمانی که مقدار این ماده افزودنی از ۰ به ۴۵۰ میلیمتر مکعب افزایش یافت، توانایی خاک تثبیت شده در برابر یخبندان به طور قابل توجهی افزایش یافت [۱۰].

از آنجا که درخصوص اثر افزودنی های مختلف روی مدول الاستیسیته خاک مطالعات کمتری انجام شده است، در این تحقیق تاثیر ماده پلی وینیل استات با درصدهای مختلف طی زمان های عمل آوری آبی، ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بر روی پارامتر مقاومت فشاری تک محوری خاک ماسه لای دار مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد افزودنی و خاک مورد استفاده

در این تحقیق، خاک مورد مطالعه از منطقه ای در کرج واقع در استان البرز در ۲۵ کیلومتری تهران و از عمق ۲ متری زمین پس از لایه خاک های دستی تهیه شده و آزمایش های شناسایی اولیه خاک طبق استانداردهای موجود انجام شد. نتایج بیانگر آن است که خاک مصرفی بر اساس طبقه بندی یونیفاید در طبقه SM قرار می گیرد. سپس آزمایش پروکتور استاندارد بر روی خاک مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM D698 صورت گرفت. طبق نتایج این آزمایش حداکثر وزن مخصوص خشک برابر ۱.۸۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و رطوبت بهینه ۱۲.۵ درصد بدست آمد. منحنی دانه بندی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده در پژوهش

در این پژوهش جهت تثبیت پلیمری از ماده پلیمری پلی وینیل استات استفاده شده است. پلی وینیل استات اولین بار توسط کالاته در آلمان در سال ۱۹۱۲ ساخته شد. این ماده چسبناک با از دست دادن رطوبت سفت می شود. این ماده غیر سمی، سازگار با محیط زیست و مقاوم در برابر هوا می باشد و برای کاربرد در مناطق حساس از نظر زیست محیطی و نفوذ پذیری مناسب است. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی پلی وینیل استات و تصاویری از این ماده در جدول ۱ و شکل ۲ نشان شده است.



جدول ۱. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی پلی وینیل استات استفاده شده

pH	جرم حجمی	ویسکوزیته	حلالیت در آب	رنگ	شکل ظاهری	مشخصه
9.4	1.04 gr/cm ³	1300 Pa.s	محلول	شیری	مایع	مقدار



شکل ۲: تصویری از ماده پلی وینیل استات مورد استفاده در این مطالعه

۲-۲- روش انجام

به منظور بررسی تاثیر افزودنی پلی وینیل استات بر پارامترهای مقاومتی خاک ماسه لای دار، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مطابق استاندارد ASTM D2166-85 روی نمونه های تثبیت شده با درصدهای ۱، ۱.۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ در زمان های عمل آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شده است. در این آزمایش جهت ساخت نمونه ها، از قالبی با قطر و ارتفاع به ترتیب ۴.۹۷ و ۱۰.۰۵ سانتیمتر استفاده شده است. مطالعات پیشین انجام شده توسط بارزی و همکاران نشان داده است نمونه هایی که در هر سه لایه با ۳۰ ضربه متراکم شد احتمال تراکم ضعیف تر در این لایه را نشان می دهد. ادامه بررسی ها نشان داده است ترتیب تعداد ضربات ۳۰، ۴۰ و ۵۰ به ترتیب برای لایه های اول، دوم و سوم مطلوبترین شکست را حین آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به دست می دهد که ریمولد کردن نمونه ها و انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر این اساس انجام شده است. روش رایج بررسی متغیرهای مختلف با نمونه سازی و انجام آزمایش به دلیل تکرر متغیرها و تعداد حالت ها بسیار زیاد، پرهزینه و طولانی است. همچنین تاثیر متقابل بین متغیرها نادیده گرفته شده که این امر موجب بروز خطا در نتیجه گیری و تفسیر خواهد شد. لذا در این تحقیق از روش رویه سطح پاسخ RSM به عنوان یک روش آماری بر مبنای طراحی آزمایشات با کمترین تعداد ممکن با بهره گیری از نرم افزار Minitab استفاده شده است. این روش از تکنیک های آماری و ریاضی برای توسعه مدل های تجربی استفاده می نماید. همچنین تعداد آزمایش های مورد نیاز برای ارزیابی پارامترهای مقاومتی خاک را کاهش و پیش بینی نتایج و بهینه سازی فرایند را امکان پذیر می سازد و آن را کارآمدتر و مقرون به صرفه تر می نماید. روش آماری RSM معمولاً از دو طرح آزمایشی استفاده می کند، طرح مرکب مرکزی (CCD) و طرح باکس بنکن (BBD) که از میان این دو، طرح CCD عملکرد بهتری در مدلسازی غیرخطی، تولید ضرایب مدل مرتبه بالاتر و پردازش موثرتر داده های تجربی دارد. در نهایت نتایج خروجی، شامل گزارش های گرافیکی و نمودارهای سطح پاسخ تولید گردیده و بهینه سازی برای تعیین شرایط بهینه برای دستیابی به بهترین مقادیر پاسخ بدست آمده است. این فرایند با ورودی داده ها، شامل متغیرهای مستقل (فاکتورها) و متغیرهای وابسته (پاسخ ها) آغاز و در ادامه، تحلیل اولیه شامل ارزیابی آماری، محاسبات شاخص های کلیدی و شناسایی الگوی داده ها انجام شده است. بر اساس این رویکرد، داده های مورد نیاز وارد نرم افزار شد و سپس پارامترهای ورودی، شامل متغیرهای مستقل مانند درصد افزودنی و زمان عمل آوری تعریف شدند. در مرحله بعد، متغیرهای وابسته، شامل مقاومت فشاری تک محوری (UCS) تعیین شدند.



شکل ۳: شکست نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

۳- نتایج و بحث

در جدول ۲ نتایج ارزیابی ANOVA خروجی نرم‌افزار حاصل از تحلیل داده‌ها برای نتایج دوره‌های عمل‌آوری و درصد‌های افزودنی متفاوت ارائه شده است. پارامترهای مربوط به متغیرهای زمان عمل‌آوری و درصد نسبت افزودنی و برهم کنش آن‌ها نیز گزارش شده است.

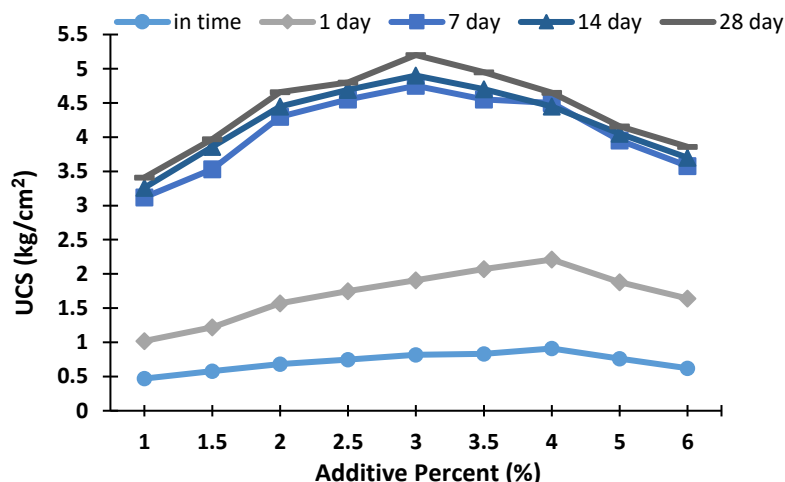
جدول ۲. آنالیز واریانس داده‌های آزمایش به روش ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	30.4034	6.0807	16.31	0.001
Linear	2	18.2064	9.1032	24.42	0.001
Additive	1	0.1867	0.1867	0.50	0.502
Curing Time	1	18.0197	18.0197	48.33	0.000
Square	2	12.1744	6.0872	16.33	0.002
Additive*Additive	1	4.8242	4.8242	12.94	0.009
Curing Time*Curing Time	1	8.8474	8.8474	23.73	0.002
2-Way Interaction	1	0.0225	0.0225	0.06	0.813
Additive*Curing Time	1	0.0225	0.0225	0.06	0.813
Error	7	2.6098	0.3728		
Lack-of-Fit	3	2.4137	0.8046	16.41	0.010
Pure Error	4	0.1961	0.0490		
Total	12	33.0132			

در شکل ۴ تاثیر افزایش درصد افزودنی پلی‌وینیل استات بر مقاومت تراکم تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده نشان داده شده است. آزمایش تراکم تک‌محوری بر روی نمونه‌های ساخته شده با نسبت‌های وزنی مختلف پلیمر به خاک در زمان‌های عمل‌آوری (آنی، ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) انجام شده و نتایج آن‌ها ثبت گردیده است. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده توسط پلی‌وینیل استات با افزایش درصد پلیمر تا درصد بهینه، افزایش یافته است. درصد بهینه مقدار افزودنی، همانطور که از شکل مشخص است، به ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف، متفاوت است، بطوری‌که برای زمان آنی و ۱ روزه ۴٪ و برای ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نیز ۳٪ می‌باشد. مقدار مقاومت تراکم تک‌محوری در زمان‌های آنی و ۱ روزه با

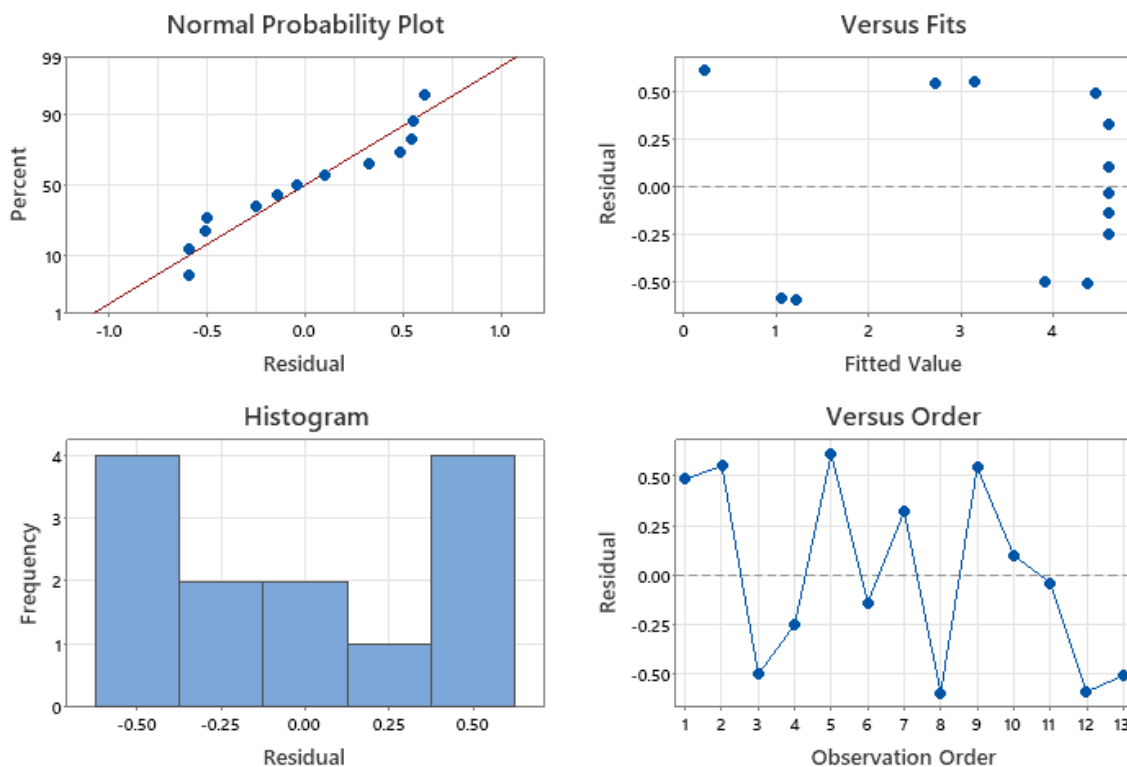


افزایش مقادیر پلیمر تا ۴٪ افزایش یافته و پس از آن با افزایش پلیمر، نسبت به حالت اولیه افزایش مقاومت، ولی نسبت به درصد بهینه کاهش مقاومت حاصل شده است. همچنین مقدار مقاومت تراکم تک محوری در زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه با افزایش مقادیر پلیمر تا ۳٪ افزایش یافته و پس از آن با افزایش درصد پلیمر، مقاومت فشاری تک محوری نسبت به مقدار مقاومت تک محوری در درصد بهینه، کاهش می‌یابد.



شکل ۴: تاثیر افزایش مقدار پلی‌وینیل استات بر مقاومت تراکم تک محوری نمونه‌های تثبیت شده

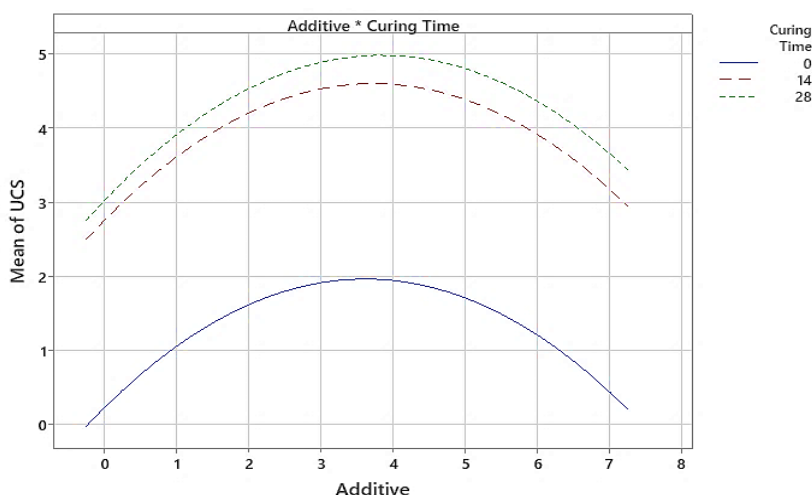
همچنین شکل ۵ نمودارهای احتمال نرمال باقیمانده برای مقاومت فشاری تک محوری را نشان می‌دهد و با توجه به پراکندگی داده‌ها در خط برازش، تحلیل آماری به دست آمده از اعتبار قابل قبولی برخوردار می‌باشد.



شکل ۵: نمودارهای احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای مقاومت فشاری تک محوری

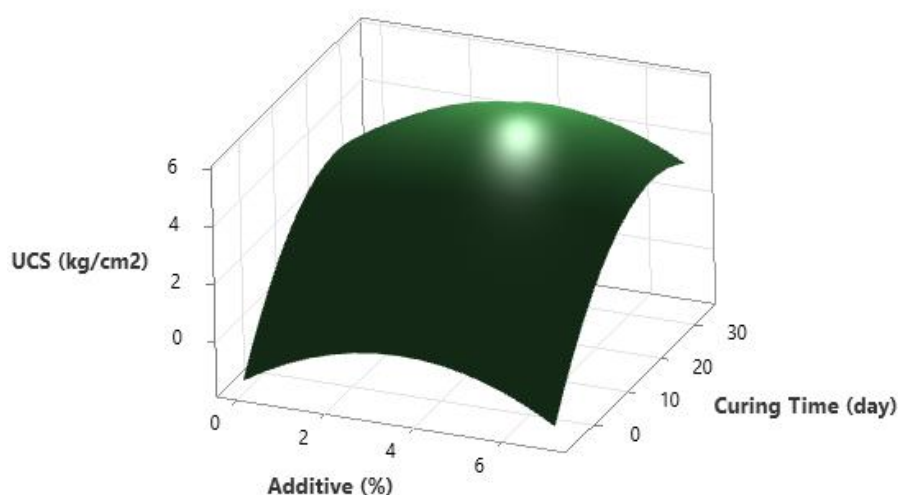


در شکل ۶ اثر متقابل نسبت افزودنی و زمان عمل آوری بر پارمتر مقاومتی خاک تثبیت شده نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود در تمامی درصدها با افزایش زمان عمل آوری، مقادیر مقاومت فشاری تک محوری افزایش می یابد. با توجه به شکل به خوبی می توان تشخیص داد که فرایند افزایش مقاومت در ۱۴ روز اول از نرخ بیشتری برخوردار بوده و سپس با افزایش زمان عمل آوری، نرخ کمتری پیدا کرده و در برخی درصدها به مقدار تقریباً ثابتی می رسد که نشان می دهد افزایش زمان عمل آوری پس از ۱۴ روز به دلیل عدم وقوع واکنش پوزولانی در پلیمرها تاثیر چندانی بر مقدار مقاومت فشاری تک محوری ندارد.

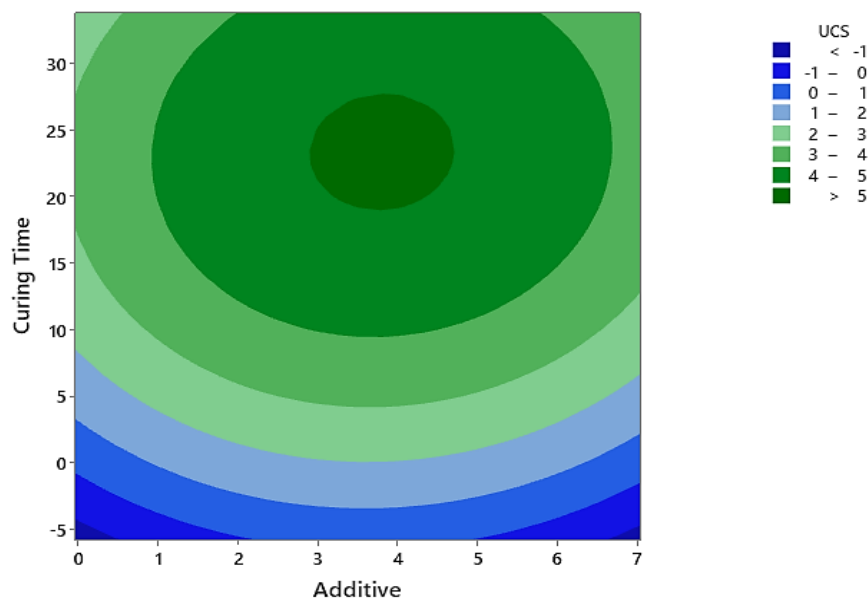


شکل ۶: اثر نسبت افزودنی به زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری

نتایج برهم کنش مقدار افزودنی تثبیت کننده و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است. طبق نمودار نتایج نشان می دهد به طور کلی مقاومت فشاری تک محوری با نسبت افزودنی تا نقطه خاصی افزایش می یابد و افزایش زمان عمل آوری به ویژه در مراحل اولیه تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری دارد. با مشاهده نتایج می توان دریافت که اگر فقط یکی از عوامل افزایش داده شود، نمی توان به تنهایی به مقاومت بالا دست یافت. لذا جهت دستیابی به مقاومت بالاتر باید هر دو عامل متناسب با یکدیگر افزایش داده شود.



شکل ۷: نمودار سطح رویه پاسخ مقاومت فشاری تک محوری ناشی از اثر نسبت افزودنی و زمان عمل آوری



شکل ۸: نمودار تاثیر برهم کنش نسبت افزودنی و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک محوری

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر افزودنی‌های پلی‌وینیل استات بر روی مقاومت فشاری تک محوری خاک ماسه لای‌دار تثبیت‌شده به روش تحلیل آماری RSM در درصدهای ۱، ۱.۵، ۲، ۲.۵، ۳، ۳.۵، ۴، ۵ و ۶ در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد در تثبیت خاک با استفاده از افزودنی پلی‌وینیل استات، با افزایش مقدار درصد وزنی افزودنی نسبت به وزن خاک، تا درصد بهینه (۴ درصد)، مقاومت تراکم تک محوری افزایش یافته و سپس با افزایش مقدار وزنی بیش از ۴ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد. در نمونه‌های تثبیت شده با پلی‌وینیل استات با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش یافته تا آنکه پس از رسیدن به مقدار بیشینه، روند رشد آن تقریباً ثابت شده و پس از ۲۸ روز، افزایشی مشاهده نشده است. روند افزایشی مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌های تثبیت‌شده با پودرمیکرونیزه به دلیل انجام واکنش پوزولانی که تابع زمان است، در ۱۴ روز اول از نرخ بیشتری برخوردار بوده و به تدریج ثابت شده، بطوریکه بیش از ۸۵٪ مقاومت نهایی نمونه در ۱۴ روز اول حاصل شده است. به طور کلی استفاده از مایع پلی‌وینیل استات در کارهای عملی نیز جهت تثبیت خاک لای بستر راه‌ها و سازه‌های عمرانی توصیه می‌گردد.

۵- پیشنهادات

با توجه به محدودیت‌های موجود در این تحقیق و عدم پرداختن به همه مباحث مربوط به پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه، موارد زیر جهت ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود:

- بررسی تاثیر وجود ذرات نمکی در خاک ماسه‌لای‌دار بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت‌شده با مواد پلیمری
- بررسی اثر سیکل ذوب و یخبندان بر مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده
- بررسی تغییرات CBR خاک‌های ماسه لای‌دار تثبیتی با مواد پلیمری
- بررسی اثر شرایط اسیدی و بازی بر مقاومت فشاری خاک ماسه‌لای‌دار تثبیت‌شده با پلی وینیل استات



۶- مراجع

- ۱-دانشگر، س.، غفارپور جهرمی، س. و ارزانی، ح. ۱۴۰۲، "بررسی رفتار خاک ماسه اهواز تثبیت شده با متاکاتولین"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۲، صفحات ۳۳۷-۳۵۸.
- 2-Mc Nally, G.H. (1990). "Soil and Rock Construction materials", E and FN Spon Publishing Company.
- 3-Osinubi, K.J., Charles M.O., 2006. Compaction Delay Effects of properties of Lime-Treated Soil. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(2): 250-258.
- 4-Zhu, Z.D., Liu, S.Y., 2008. Utilization of a new Soil Stabilization for Silt Subgrade, Engineering Geology, 97: 192-198.
- ۵-طباطبائی، س. و سلامت، ا. ۱۳۹۲، "مطالعه خاک‌های مسئله‌دار در ایران و ارائه راهکارهای بهسازی"، طرح پژوهشی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- 6-Modarresi, A., Nosoudy, Y., 2015. Clay stabilization using coal waste and lime-Technical and environmental impacts. Applied clay science 116: 281-288.
- 7-Kumar, Jha.A., Sivapullaiah, P.V., 2015. Mechanism of improvement in the strength and Volume change behavior of lime stabilized soil, Engineering Geology, 198: 53-64.
- 8-M. Mirzababaei, A. Arulrajah, M. Ouston, Polymers for stabilization of soft clay soils, Procedia engineering, 189 (2017) 25-32.
- 9-A. Saeedi Kia, H. Madani, Performance of ethylene vinyl acetate and vinyl acetate on mechanical properties, shrinkage and durability of calcium aluminate cement base mixtures, Journal of Civil Engineering, 18th volume (2018) No. 4, in Persian.
- 10-B. Zhang, W. Jiang, Q. Xu, D. Yuan, J. Shan, R. Lu, Experimental feasibility study of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) as cement stabilized soil curing agent, Road Materials and Pavement Design, 23(3) (2022) 617 638.
- 11-ASTM International., 2008, ASTM Standard D2166. Standard Test Method of Compressive Strength.