

properties of the Soil Stabilized by Prediction of Collapsibility and Plasticity Polymer Additive for Construction

Soodabeh Jalali¹, Mehdi Momeni Roghabadi², Masoud Amel Sakhi³, Seyed Azim Hosseini⁴, Ramin Khajavi⁵

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

5- Assistant Professor, Department of chemical Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Collapsible soils are a category of natural soils that are associated with problems. In other words, under a uniform tension, their volume will be reduced to a great extent due to increasing humidity. This decreased volume will destroy the soil's structure and will finally lead to a significant settlement. The existence of such soils in many parts of the world including central parts of Iran, e.g. Kerman province, requires conducting studies on the behavior and properties of collapsible soils. In this study, the impact of butadiene rubber on the stabilization of these soils has been investigated. The fine-grained soils in this study have been taken from two different sites and they've been stabilized through injecting different percentages of butadiene rubber (number of experiments=84). The stabilized soils have been evaluated through ASTM D5333 double consolidation. Besides, Atterberg's properties have been studied on non-manipulated soil samples. The penetrations of butadiene rubber as well as formed beams of butadiene rubber results in the reduction of studied soil's collapsibility. Furthermore, it resulted in lowering down fluidity property in soils with a high fluidity rate and vice versa, i.e. will result in increased fluidity in low-fluidity soils. Considering the development of smart systems in the prediction of stabilized collapsible soils' behavior, this study predicts the collapsibility potential and Atterberg's limits of soil samples stabilized using butadiene rubber through ANFIS model. The accuracy of this model has been investigated as well and the results are analyzed.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 April 2021

Revise Date: 21 January 2022

Accept Date: 15 February 2022

Keywords:

Stabilization of Collapsible Soils
Atterberg's Limits
Butadiene Rubber
Construction
Adaptive Neuro-Fuzzy Inference
System (ANFIS)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.282092.2431>

*Corresponding author: Mehdi Momeni Roghabadi
Email address: mm.pmi.ced@iauk.ac.ir

پیش‌بینی رمبندگی و خواص خمیری خاک تثبیت شده به وسیله ماده افزودنی پلیمری در ساخت‌وساز

سودابه جلالی^۱، مهدی مومنی رق آبادی^{۲*}، مسعود عامل سخی^۳، سید عظیم حسینی^۴، رامین خواجوی^۵

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۵- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

خاک‌های رمبنده از جمله خاک‌های مسئله‌دار در طبیعت می‌باشند که تحت تنش یکسان با افزایش درصد رطوبت کاهش حجم بسیاری از خود نشان خواهند داد. این کاهش حجم منجر به از بین رفتن ساختار خاک و درنهایت بروز نشست‌هایی در سازه‌ها می‌گردد و یک عامل منفی در ساخت‌وساز می‌باشد. وجود چنین خاک‌هایی در بسیاری از مناطق جهان از جمله کشور ایران و بخش مرکزی آن که شامل استان کرمان می‌شود، لزوم توجه و بررسی بیشتر رفتار و خصوصیات خاک‌های رمبنده جهت بهبود در ساخت‌وساز را می‌طلبد. در این مقاله اثر بوتادین رابر روی تثبیت این‌گونه خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. خاک‌های ریزدانه مورد آزمایش از دو سایت مختلف نمونه‌برداری و با تزریق درصد‌های متفاوت بوتادین رابر تثبیت گشته‌اند (تعداد آزمایش‌ها ۸۴ عدد است). ارزیابی خاک‌های تثبیت شده به روش تحکیم مضاعف ASTM D5333 و بررسی خواص اتربرگ روی نمونه‌های دست نخورده خاک انجام گرفته است. نفوذهای بوتادین رابر و همچنین ستون‌های بوتادین رابر تشکیلی منجر به کاهش میزان رمبندگی خاک مورد مطالعه گردیده و همچنین سبب کاهش خاصیت روانی در خاک‌هایی با روانی بالا و بالعکس افزایش روانی، در خاک‌هایی با روانی پایین می‌گردد. نظر به گسترش سیستم‌های هوشمند در پیش‌بینی رفتار خاک‌های رمبنده تثبیت شده، مدل پیش‌بینی درجه رمبندگی و حدود اتربرگ نمونه‌های تثبیت شده، با بوتادین رابر و به کمک سیستم هوشمند استنتاج فازی (ANFIS) ساخته شد و دقت آن مورد ارزیابی و بحث قرار گرفت.

کلمات کلیدی: تثبیت خاک رمبنده، حدود اتربرگ، بوتادین رابر، ساخت، سیستم هوشمند استنتاج فازی (ANFIS)

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.282092.2431	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.282092.2431	۱۴۰۱/۰۸/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۲۶	۱۴۰۰/۱۱/۲۶	۱۴۰۰/۱۱/۰۱	۱۴۰۰/۰۲/۰۱
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				مهدی مومنی رق آبادی		
				mm.pmi.ced@iauk.ac.ir		

۱- مقدمه

در طبیعت خاک‌هایی یافت می‌شوند که به هنگام ساخت‌وساز می‌توانند مشکل‌آفرین باشند. این دسته از خاک‌ها، خاک‌های مسئله‌دار نامیده می‌شوند. یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار، خاک‌های رمبنده می‌باشند که به شکل‌های مختلفی در طبیعت یافت می‌شوند. این خاک‌ها در حالت غیراشباع مقاومت ظاهری نسبتاً زیادی دارند، اما به هنگام جذب آب و اشباع شدن ناگهان کاهش حجم و نشست زیادی را از خود نشان داده؛ و سبب آسیب به سازه و تاسیسات به کار رفته در آن می‌شوند. علم ژئوتکنیک با تکیه بر تجربیات و ابتکارات اجرایی چند صد ساله و نیز بیش از یک قرن مبانی علمی و آکادمیک، امروزه امکان طراحی و اجرای بسیاری از ابر پروژه‌ها را فراهم ساخته است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای دانش ژئوتکنیک، بهره‌گیری از مبانی آن در راستای ساخت بستری مناسب جهت احداث پروژه‌های واقع در محدوده خاک‌های مساله‌دار است. اکثر سازه‌هایی که به تورم/ انقباض روی خاک‌های متورم‌شونده حساس می‌باشند، سازه‌های با شالوده‌های قرار گرفته در عمق‌های سطحی هستند. خسارت‌های تجربه‌شده با این سازه‌ها شامل ترک‌هایی در شالوده و دیوارها و جمع شدن در و پنجره‌ها می‌باشد. درجه خسارت به این سازه‌ها بسته به ترک‌های مشاهده شده، از ترک‌های مویی، ترک‌های شدید، ترک‌های بسیار شدید؛ تا فروپاشی کلی متغیر است. یکی از روش‌هایی که می‌تواند به منظور بهسازی خاک‌های رمبنده به کار گرفته شود، استفاده از افزودنی‌های مختلف است. برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها، عموماً تثبیت‌کننده‌های سنتی همچون سیمان، آهک، خاکستر بادی و ... استفاده می‌گردد. قابلیت کاربرد بسیاری از این تثبیت‌کننده‌های سنتی تنها به برخی خاک‌ها محدود است. علاوه بر این، تثبیت‌کننده‌های سنتی خاک‌ها در بسیاری از موارد، رفتاری بیش از حد شکننده از خود نشان می‌دهند که اغلب، برای بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی و ساخت‌وساز نامناسب می‌باشد. استفاده از تثبیت‌کننده‌های نوین از جمله پلیمرها نیز به تازگی مورد توجه قرار گرفته است. پلیمرها مواد مصنوعی یا طبیعی هستند که از خواص مکانیکی و فیزیکی نسبتاً مطلوبی برخوردارند. این گروه از مواد، دارای وزن مخصوص پایین و پایداری خوب در مقابل مواد شیمیایی هستند. بیشتر پلیمرهای متداول از پلیمریزاسیون مولکولهای آلی ساده به نام منومر به دست می‌آیند. با ترکیب مناسبی از حرارت، فشار و کاتالیزور، پیوند دوگانه بین اتم‌های کربن، شکسته شده و یک پیوند ساده کووالانسی جایگزین آن می‌شود. سپس دو انتهای آزاد این منومر به رادیکال‌های آزاد تبدیل می‌شود؛ به طوری که هر اتم کربن یک تک الکترون دارد که می‌تواند به رادیکال‌های آزاد دیگر افزوده شود. این مولکول پایه با قابلیت انجام واکنش، زیربنای پلیمرها بوده و همان واحد تکراری پلیمر است که در طول زنجیر مولکول پلیمر به دفعات زیادی تکرار می‌شود. طول متوسط پلیمر به درجه پلیمریزاسیون یا تعداد واحدهای تکراری در زنجیر مولکول پلیمر بستگی دارد؛ بنابراین نسبت جرم مولکولی پلیمر به جرم مولکولی واحد تکراری به عنوان درجه پلیمریزاسیون تعریف شده است. با افزایش طول زنجیر مولکولی در صورتی که فقط نیروهای بین مولکولی سبب اتصال مولکول‌ها به یکدیگر شوند، مقاومت حرارتی و استحکام کششی مواد پلیمری هر دو افزایش می‌یابند.

برای اولین بار جنینگر، عنوان کرد که علت فروریزش ساختمان‌ها در آفریقای جنوبی در سال ۱۹۵۵ مربوط به تغییر آرایش ذرات خاک زیرین ساختمان‌ها نسبت به هم می‌باشد [۱]. در سال ۱۹۶۵، پدیده رمبندگی در خاک‌های لس آمریکای شمالی توسط کلونجر گزارش شد. برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های رمبنده، عموماً از تثبیت‌کننده‌های سنتی همچون سیمان، آهک، خاکستر بادی و ... استفاده شده است. تثبیت خاک‌های رمبنده در دو دسته تزریقی و اختلاطی صورت گرفته است.

از دسته تثبیت‌های اختلاطی می‌توان به کارهای ایوانز و بل در سال ۱۹۸۱، اوستاتیف در سال ۱۹۸۸ و همچنین طباطبایی در سال ۲۰۰۵، که ماده افزودنی پلیمری به خاک ریزدانه افزوده است، اشاره نمود. در سال ۲۰۱۳ سید گلسفیدی طی مطالعه پایداری خاک رمبنده واقع در شمال ایران به وسیله نانو مواد، به نتایج قابل قبولی دست یافت [۲]. فوزیه بینتی احمد و همکاران در سال ۲۰۱۳، پایدار کننده جدید شیمیایی به نام استرلین بوتادین رابر را استفاده نموده‌اند. این ماده سبب کاهش نشانه خمیری خاک گردیده است [۳]. مجتبی شجاعی باغینی در سال ۲۰۱۶ به بررسی هم‌زمان سیمان و استرلین بوتادین رابر پرداخته؛ و تاثیر این ماده افزودنی را در راهسازی بررسی نموده است [۴]. یحیی اتمیمی و جمعی از همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که استفاده از پلیمر استرلین بوتادین رابر باعث بهبود خواص خاک می‌گردد [۵]. همچنین زیمباردو و همکاران در سال ۲۰۲۰ پس از استفاده از پلیمری خاص در ماسه رمبنده، کاهش خاصیت

رمبندگی خاک ماسه را مشاهده نموده. [۶]. ایزابل آگوستا و همکارانش در سال ۲۰۲۰ خاک رمبند را متراکم نموده و بعد از انجام آزمایش تحکیم مضاعف، شاهد کاهش شاخص رمبندگی خاک بوده‌اند [۷].

برای روش تثبیت تزریقی می‌توان به تحقیقات گیبیس و بارا در سال ۱۹۶۷ در زمینه استفاده از دوغاب رس و تزریق آن به توده لسی اشاره نمود. در سال ۲۰۱۰ نیز عبیچه و همکاران به خاک رمبند نمک تزریق نموده‌اند، بعد از بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک، مشاهده گردیده که شاخص رمبندگی به طور قابل توجهی کاهش یافته است [۸]. سال ۲۰۱۰، شریف سلیمان و همکاران، تثبیت خاک رمبند به وسیله تزریق سلیکا را انجام داده و بعد از بررسی نتایج، شاهد کاهش خاصیت رمبندگی خاک بوده‌اند [۹]. محمد فتاح و همکاران سال ۲۰۱۲ رفتار رمبندگی خاک را با تزریق گروت بررسی نمودند؛ نتایج حاصل از بررسی آنها نشان می‌دهد که گروت تزریق شده سبب بهبود خواص خاک رمبند گردیده است [۱۰]. رسول اجولیان در سال ۲۰۱۲ به بررسی تاثیر گروت پلی وینیل بر خواص ژئوتکنیکی خاک پرداخته و درصد های مشخص مواد پلیمری مخلوط شده با آب را به خاک رمبند تزریق نموده‌اند. این عامل سبب بهبود مقاومت خاک گردیده و همچنین مدول الاستیسیته خاک نیز افزایش پیدا کرده است [۱۱]. در نهایت، در سال ۲۰۱۷، محمد آیلیدین و همکاران، رفتار مکانیکی خاک رمبند با استفاده از دو نوع بیوپلیمر متفاوت تزریق شده را بررسی نموده‌اند [۱۲].

سیستم‌های هوشمند، ابزار قدرتمندی در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشند که قابلیت اعمال عدم قطعیت‌ها با روش‌های فازی در آنها مهیا شده است. مومنی و همکاران در سال ۲۰۱۲، پتانسیل رمبندگی مناطق مختلف مرکزی کشور ایران را بررسی نموده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از ارزیابی کیفی و تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌ها، تطبیق مناسبی بین آزمایشات و سیستم استنتاج فازی وجود دارد [۱۳].

به دلیل وجود سطح وسیعی از خاک‌های رمبند در جهان، همچنین نیاز به مواد شیمیایی جدید سازگار با محیط که بتوانند سبب بهبود خواص رمبندگی خاک رمبند شوند، تثبیت این نوع خاک‌ها با استفاده از پلیمرهای متفاوت مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه ماده پلیمری استرلین بوتادین رابر، سازگار با محیط می‌باشد؛ و علاوه بر این، به مقدار قابل توجهی نیز تولید می‌گردد و از لحاظ اقتصادی هم مناسب است؛ استفاده از این ماده پلیمری جهت بهبود خواص خاک در حال افزایش است. در تحقیقات گذشته، این ماده جهت بهبود خاک‌های درشت‌دانه استفاده گردیده و تاثیر آن روی خاک‌های ریزدانه مساله‌دار، بررسی نشده است. مقاله حاضر، مقدار کاهش رمبندگی خاک را با افزودن درصد های متفاوت بوتادین رابر (۲،۳،۴،۵،۶،۷) در مدت زمان های متفاوت (۴،۷،۱۴،۲۸ روز) مورد ارزیابی قرار داده است. سپس با استفاده از ANFIS، شاخص رمبندگی ارزیابی شده؛ و یک مدل کالیبره شده با استفاده از نتایج ۸۴ آزمایش، جمع‌آوری شده از منطقه مرکزی ایران، شهر کرمان، به دست آمده است.

۲- مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این مطالعه از دو سایت متفاوت (شکل ۱) در شهر کرمان تهیه شده است (جدول ۱). نمونه‌های خاک از عمق ۴ الی ۶ متری از سطح زمین طبیعی با توجه به دستورالعمل‌های ASTM D1587 و ASTM D4-7015 به صورت دست‌نخورده و کلوخی تهیه گردیده است. آزمایشات بر اساس استانداردهای ASTM انجام گردیده است.



شکل ۱: نقشه محل نمونه برداری در شهر کرمان

جدول ۱: جزئیات سایت نمونه گیری

Site number	Geographical coordinate	Deep sample(m)	Number of sample
1	30°17'45.7" 57°01'05.4"	۴	۷۲
2	30°17'49.5" 57°05'41.8"	۵/۵	۱۲

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایشات پایه جهت شناسایی خواص ژئوتکنیکی نمونه های خاک سایت ۱ و ۲، جدول ۲ حاصل گردیده است:

جدول ۲: مشخصات خاک های پایه مورد استفاده در این مطالعه

Number of site	Liquid limit (LL)	Plastic Index (PI)	Classification USCS	Special Weight (γ kn/m ³)	Moisture content(ω)%	CP%	Degree of collapsible based ASTM
۱	۳۱/۲	۱۵	ML	۱/۴۶	۲۱/۲	۱۱/۱	sever
۲	۸۹	۶۹	CH	۱/۴	۲۳/۸۶	۱۳/۱	sever

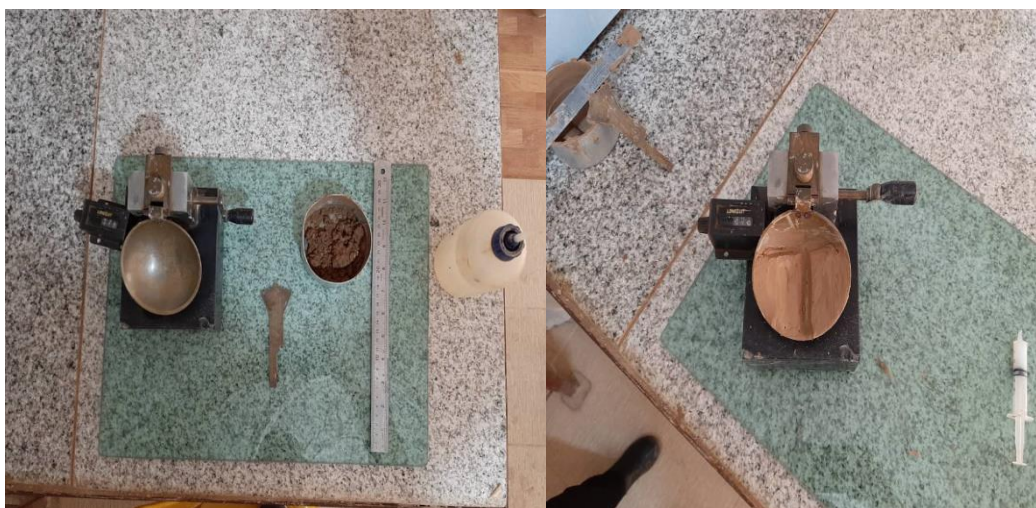
در این مطالعه، از استرلین بوتادین رابر پخش شده در آب با نام تجاری X-SBR ساخت کشور ایران، شرکت پایا رزین اصفهان، به عنوان ماده افزودنی جهت بهسازی خاک های رمنده استفاده گردیده است (جدول ۳). به طور کلی، مطالعات و تحقیقات گذشته نشان می دهد، اختلاط این ماده شیمیایی با خاک، باعث افزایش خواص مقاومت برشی و کاهش حد روانی خاک می گردد. استفاده از این مواد در کاهش تغییرات حجم خاک، حین مرطوب شدگی، در تاریخچه تحقیق مشاهده نشده است لذا، دانستن این اطلاعات برای درک میزان پایداری و تثبیت خاک به وسیله این ماده سازگار با محیط ضروری می باشد.

جدول ۳: مشخصات افزودنی لاستیک استایرن بوتادین

Polymer type	Brand	color	Viscosity	PH
Styrene Butadiene Rubber	X-SBR	milky	<200	10

۳- آماده سازی و تثبیت با تزریق نمونه آزمایش حدود اتربرگ

مطابق استاندارد، پس از آماده سازی نمونه، ماده افزودنی را در درصدهای گفته شده به نمونه افزوده و سپس آزمایش صورت می گیرد (شکل ۲).



ب

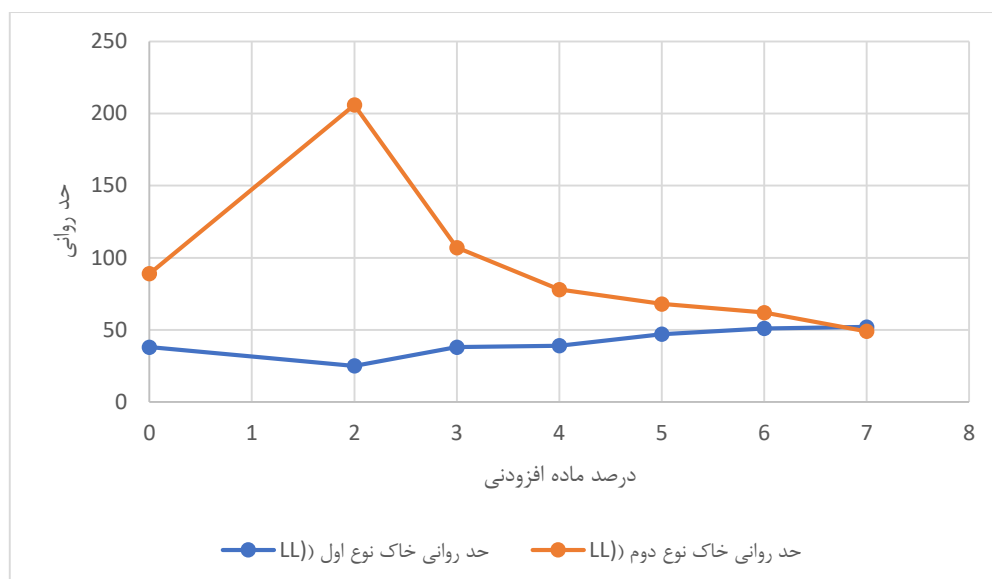
الف

شکل ۲: الف، ب آماده سازی و انجام آزمایش حدود اتربرگ

تعداد و نتایج آزمایشات حدود اتربرگ که در سایتهای متفاوت انجام شده است، مطابق جدول ۴ و شکل ۳ می باشد.

جدول ۴: نتایج آزمایشات حد روانی

درصد ماده افزودنی	حد روانی خاک نوع ۱ (LL)	حد روانی خاک نوع ۲ (LL)
۰	۳۸	۸۹
۲	۲۵	۲۰۶
۳	۳۸	۱۰۷
۴	۳۹	۷۸
۵	۴۷	۶۸
۶	۵۱	۶۲
۷	۵۲	۴۹

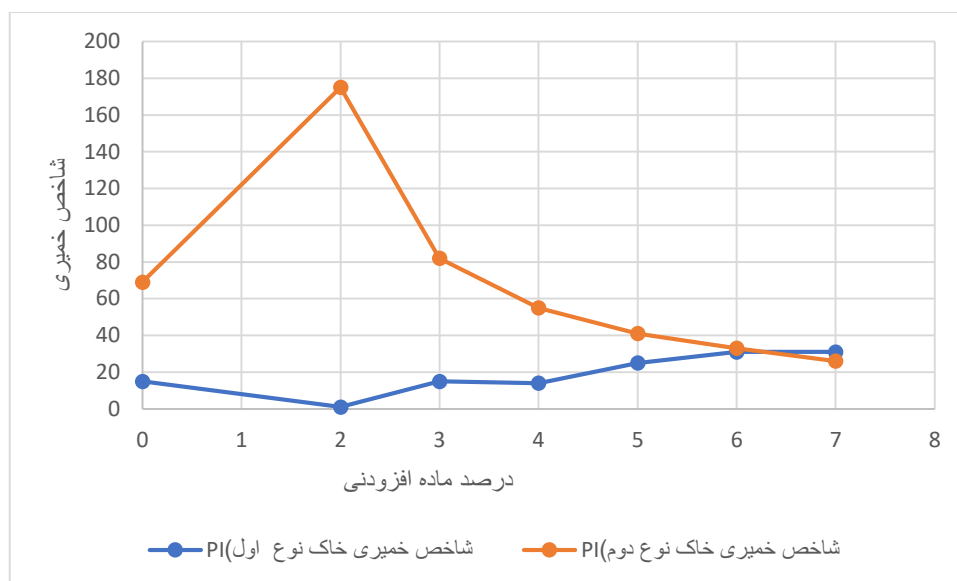


شکل ۳: مقایسه حد روانی خاک نوع ۱ و ۲

شاخص خمیری نیز با افزایش درصد ماده افزودنی به خاک نوع اول؛ که لای با حد روانی پایین می‌باشد در ۲ درصد افزودنی، کاهش و سپس روند افزایشی دارد. که البته در ۴ درصد، مقدار ۶/۶٪ کاهش و سپس به‌طور چشمگیری با افزایش ۱۲۱٪ مواجه شده است. در خاک نوع ۲، در ۲ درصد ماده افزودنی، بیشینه شاخص خمیری مشاهده شده است و پس از آن، با کاهش شاخص خمیری مواجه گردیده، که البته در درصدهای بالاتر این اختلاف شاخص کمتر شده است (جدول ۵ و شکل ۴).

جدول ۵: نتایج آزمایشات شاخص خمیری

Percent of additive material (%)	Plastic Index (soil 1)	Plastic Index (soil 2)
۰	۱۵	۶۹
۲	۱	۱۷۵
۳	۱۵	۸۲
۴	۱۴	۵۵
۵	۲۵	۴۱
۶	۳۱	۳۳
۷	۳۱	۲۶



شکل ۴: مقایسه شاخص پلاستیکی خاک نوع ۱ و ۲

مشاهده می‌شود که در خاک ML با افزایش ماده افزودنی، شاخص خمیری افزایش می‌یابد؛ ولی در خاک CH با افزودن بوتادین رابر، شاخص خمیری کاهش یافته است.

۴- آماده‌سازی و تثبیت با تزریق نمونه آزمایش رهمبندگی

یک آزمایش مناسب برای اندازه‌گیری قابلیت فروریزی خاک؛ آزمایشی است که توسط نایت (۱۹۷۵) پیشنهاد شده؛ که شامل یک آزمایش تحکیم به صورت یک‌ه می‌باشد. طریقه انجام آزمایش به صورت زیر است: یک نمونه خاک با رطوبت طبیعی به گونه‌ای تراشیده و آماده می‌گردد که متناسب باحلقه آزمایش تحکیم در استاندارد ASTM D-5333 می‌باشد. سپس سوراخ‌هایی با فاصله‌هایی که تقریباً بیشترین هم‌پوشانی را داشته باشد (در قسمت بعدی، نحوه آماده‌سازی نمونه به صورت دقیق‌تر توضیح داده شده است) به وسیله دریل در این نمونه خاک، ایجاد نموده و در نهایت، با توجه به وزن نمونه، درصد‌های مختلف وزنی از ماده افزودنی به‌وسیله سوزنی که بر روی آن سوراخ‌هایی وجود دارد با فشار تقریباً ثابتی به خاک درون حلقه تزریق می‌شود. سپس باری قائم به صورت پیش‌رونده اعمال می‌شود تا به فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال برسد. در انتهای این بارگذاری، نمونه با مایع (معمولاً آب مقطر) غرقاب می‌شود و به مدت یک روز به همان صورت نگهداشته می‌شود. در این مدت، تغییر شکل‌های نمونه دنبال می‌شود؛ و سپس، آزمایش تحکیم تا رسیدن به بارگذاری حداکثر ادامه می‌یابد.

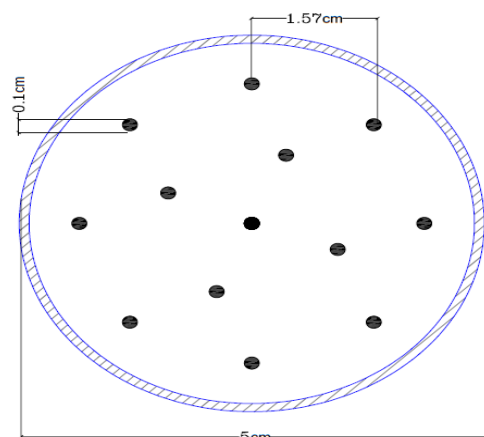
آماده‌سازی نمونه

آماده‌سازی نمونه خاک‌های اخذ شده، در آزمایشگاه با دقت قابل قبول طبق استاندارد می‌باشد. ابتدا نمونه‌های خاک، درون رینگ دستگاه تحکیم مستقر می‌گردد (شکل ۵)؛ سپس به کمک دستگاه دریل، حفراتی با قطر یک میلی‌متر ($D=1\text{mm}$) و با نسبت فاصله به قطر ($S/D=1.57$) (فاصله ذکر شده، در حقیقت، فاصله حداقلی بین مرکز، تا مرکز هر سوراخ ایجاد شده روی نمونه تحکیم می‌باشد، این فواصل، به گونه‌ای باید قرار گیرند تا بیشترین هم‌پوشانی را ایجاد نمایند) در خاک ایجاد می‌شود.



A

b



c

شکل ۵: روش نمونه برداری و حفاری از طریق مراحل a ، b و c

تهیه و تزریق دوغاب:

ماده افزودنی در درصدهای وزنی متفاوت، درون یک ظرف، ریخته و با مقداری مایع ظرف شویی، جهت کاهش اصطکاک و افزایش نفوذپذیری ماده افزودنی درون خاک، به آن افزوده می شود. سپس، در سه مرحله، با فاصله زمانی ۳۰ الی ۴۰ دقیقه، به وسیله سرنگی که بر روی سوزن آن، سوراخ هایی جهت تزریق همه جانبه و حداکثر نفوذ در خاک موجود باشد، تزریق انجام شده است (در هنگام تزریق سعی شده است نیروی فشاری وارده به سرنگ یکسان باشد). برای جلوگیری از هدر رفتن ماده، نمونه از یک سمت ایزوله گردیده است. در نهایت، بعد از گذشت زمان های مشخص (۴،۷،۱۴ و ۲۸ روز)، روی نمونه ها به تعداد ۸۴ عدد، آزمایش رمبندگی، بر اساس استاندارد، انجام، نتایج یادداشت و در نهایت تحلیل شده اند.

برای تشخیص مقدار تاثیر این ماده افزودنی بر روی خاک ریزدانه، می توان ضریب کاهش شاخص رمبندگی (Rcp) را که با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است، به دست آورد.

$$R_{cp} = \frac{cp(initial) - cp(secondary)}{cp(initial)} \quad (1)$$

$$R_{cp}\% = R_{cp} \times 100 \quad (2)$$

Rcp عبارت است از ضریب کاهش رمبندگی، CP(initial)، مقدار رمبندگی خاک در حالت اولیه و CP(secondary) مقدار رمبندگی خاک است در حالتی که ماده افزودنی به آن اضافه شده است.

تعداد و نتایج آزمایشات رمبندگی که در سایت های متفاوت انجام شده اند مطابق جدول ۶ و ۷ می باشد:

جدول ۶: آزمایش رهمندگی خاک نوع ۱

Initial character $\gamma=1.46(\text{kn/m}^3)$ $\omega=21.2$ $e=0.99$ $PI=15$ $LL=38$				
Percent of additive	Time(day)	CP%	average of CP%	RCP%
۲	۴	۱/۰۱	۱/۲۶	۸۸/۷۵
۲	۴	۱/۱		
۲	۷	۱/۸	۱/۰۸	۹۰/۳۵
۲	۷	۱/۹		
۲	۱۴	۱/۶۲	۱/۲۶۵	۸۸/۷
۲	۱۴	۰/۹		
۲	۱۴	۱/۲۵	۱/۲۴۲	۸۸/۹۱
۲	۲۸	۱/۲۳		
۳	۴	۱/۴۸	۱/۰۵۵	۹۰/۵۸
۳	۴	۰/۶۲		
۳	۷	۰/۳۹	۰/۳۱	۹۷/۲۳
۳	۷	۰/۲۶		
۳	۱۴	۱/۱	۱/۱۲۷	۸۹/۹۳
۳	۱۴	۱/۱۵۵		
۳	۲۸	۰/۹۸	۱/۰۶۵	۹۰/۴۹
۳	۲۸	۱/۱۵		
۴	۴	۰/۸۲	۰/۵۹۲	۹۴/۷۱
۴	۴	۰/۳۶		
۴	۷	۰/۷۷	۰/۶۹	۹۳/۸۳
۴	۷	۰/۶۱		
۴	۱۴	۰/۸۱	۰/۸۱۷	92.7
۴	۱۴	۰/۸۲		
۴	۲۸	۰/۹۶	۰/۹۳۲	۹۱/۶
۴	۲۸	۰/۹۶		
۵	۴	۰/۱۵	۰/۱۵۲	۹۸/۶۶
۵	۴	۰/۱۶		
۵	۷	۰/۷۱	۰/۶۸۵	۹۳/۸۸
۵	۷	۰/۶۶		
۵	۱۴	۰/۷۱۳	۰/۷۱۵	۹۳/۶۱
۵	۱۴	۰/۷		
۵	۲۸	۰/۹۴	۰/۷۶۶	93/16
۵	۲۸	۰/۵۸۵		
۶	۴	۰/۵۳	۰/۵۱۵	95/4
۶	۴	۰/۵		
۶	۷	۰/۷۵	۰/۷۵۵	93/25
۶	۷	۰/۷۶		
۶	۱۴	۰/۹۴	۰/۷۲	93/57
۶	۱۴	۰/۵		
۶	۲۸	۰/۴۶	۰/۳۹۲	96/5
۶	۲۸	۰/۳۲۵		
۷	۴	۰/۷۱	۰/۸۶	۹۲/۳۲
۷	۴	۱/۰۱		

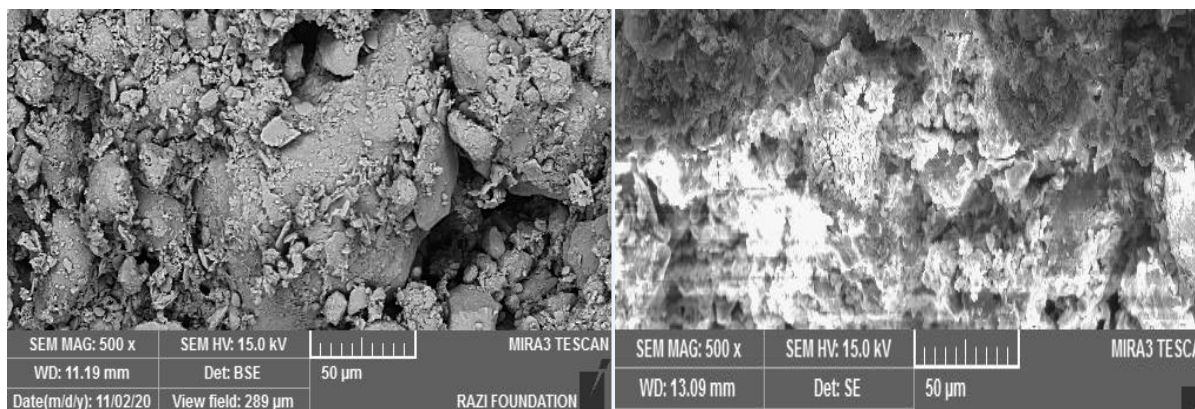
۷	۷	۰/۶۱	۰/۵۸۵	۹۴/۷۷
۷	۷	۰/۵۶		
۷	۱۴	۰/۴۳	۰/۴۲۵	۹۶/۲
۷	۱۴	۰/۴۲		
۷	۲۸	۰/۹۴	۰/۹۲	۹۱/۷۱
۷	۲۸	۰/۹۲		

جدول ۷: آزمایش رمبندگی خاک نوع ۲

Initial character $\gamma=1.4(\text{kn/m}^3)$ $\omega=23.86$ $e=0.642$ $PI=69$ $LL=89$			
Percent of additive	Time(day)	CP%	RCP%
۲	۴	۱/۱۴	۹۱/۲۹
۲	۷	۰/۶	۹۵/۴۱
۳	۴	۱/۰۹	۹۱/۶
۳	۷	۰/۶	۹۵/۴
۴	۴	۰/۸۶	۹۳/۴
۴	۷	۰/۴	۹۶/۹
۵	۴	۰/۹۸۵	۹۲/۴
۵	۷	۰/۴۴	۹۶/۶
۶	۴	۰/۷۳	۹۴/۴
۶	۷	۰/۸۹	۹۳/۲
۷	۴	۰/۷۵	۹۴/۲۷
۷	۷	۰/۸۶	۹۳/۴۳

۵- بررسی‌های ریزساختاری

به منظور شناخت تغییرات ساختاری در نمونه‌های خاکی، از نمونه‌های خاک، عکس SEM تهیه شد. بدین منظور، یک نمونه خاک بدون افزودنی و نمونه دیگر همراه با افزودنی ساخته شد. در شکل ۶، فرآیند تاثیرگذاری استرلین بوتادین رابر بر پیوندهای جدید بین ذرات کاملاً مشهود است. همچنین، ملاحظه می‌شود که ساختار خاک از حالت ناپیوسته به شکل تقریباً پیوسته‌تری تغییر یافته است. این پیوستگی و کاهش خلل و فرج موجود در خاک، سبب بهبود خاصیت رمبندگی خاک شده است، مقدار بهبود آن و کاهش این فضاهای خالی در درصدهای متفاوت از بوتادین رابر و مدت زمان‌های عمل‌آوری، متفاوت بوده است.



الف

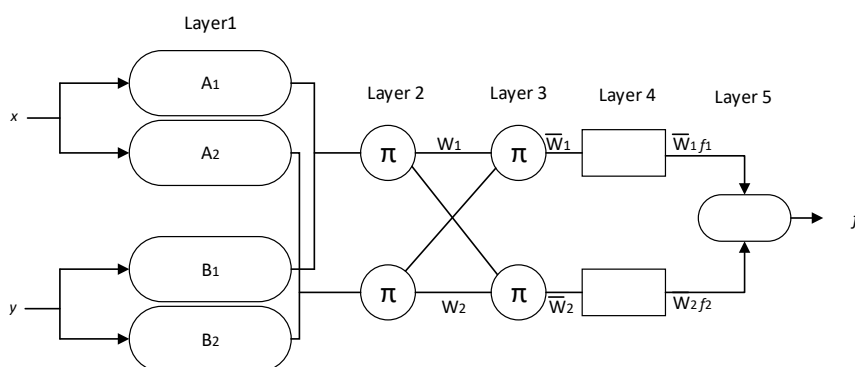
ب

شکل ۶: تصاویر SEM از نمونه‌های خاک بدون افزودنی (الف) و همراه افزودنی (ب)

۶- سیستم منطق عصبی فازی ANFIS

در سال ۱۹۹۳، جانگ برای نخستین بار با کنار هم قرار دادن توانایی‌های تئوری فازی و شبکه عصبی، مدل سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی را ارائه داد. این مدل، دربرگیرنده دو مدل فازی و عصبی در یک ساختار می‌باشد. بخش فازی، رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی به وسیله شبکه عصبی تعیین می‌گردد. بنابراین، ویژگی‌های هر دو مدل فازی و عصبی در شبکه عصبی- فازی تطبیقی نهفته می‌باشد. منطق فازی، بر مبنای تئوری مجموعه‌های فازی قرار دارد که بین طبقات مختلفی از موضوعات ارتباط برقرار می‌کند؛ به طوری که عضویت از جنس درجه باشد و با پارامتر درجه بتوان میزان عضویت را نشان داد [۲].

مدل استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، شبکه‌ای چندلایه متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال‌دهنده گره‌ها می‌باشد. مدل فازی مرتبه اول، سوگنو با دو ورودی، یک خروجی و دو تابع عضویت برای هر یک از ورودی‌ها یک مدل شبکه‌های عصبی فازی، به شکل ۷ می‌باشد:



شکل ۷: شمایی از یک شبکه عصبی فازی

۷- داده‌های مورد استفاده برای مدل سازی

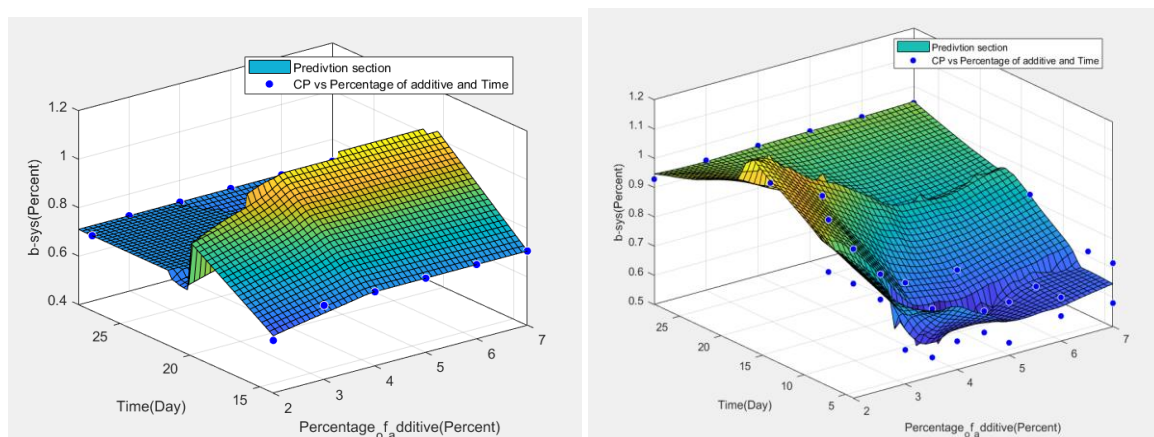
برای ساخت مدل، در ابتدا داده‌های ورودی و پیش‌بینی را باید مشخص نمود. همچنین نوع تابع عضویت مورد استفاده، تابع عضویت گاوسی است. توابع عضویت گاوسی با دو پارامتر $\{\sigma, c\}$ به صورت معادله ۳ تعریف می‌شوند:

$$\text{Gaussian}(x;\bar{b},c)=e^{-1/2((x-c)/\bar{b})^2} \quad (3)$$

که c معین مرکز تابع عضویت و σ عرض آن را نشان می‌دهد.

این مدل، دارای ۳۶ داده ورودی برای آموزش و ۱۲ ورودی برای پیش‌بینی از دو سایت متفاوت می‌باشد. سپس داده‌های جدول (رمبندگی ۱ و ۲)، درصد رطوبت (W%)، حد روانی خاک پایه (LL)، شاخص پلاستیکی خاک پایه (PI)، نسبت تخلخل (e)، وزن مخصوص خاک (Y)، مدت زمان (t) و درصد ماده افزودنی به‌عنوان ورودی و در حالت اول شاخص خمیری و حالت دوم شاخص رمبندگی (CP%) به‌عنوان خروجی در هنگام مدل‌سازی، در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه انجام آزمایشات، ممکن است در هر شرایطی امکان‌پذیر نباشد، لیکن استفاده از یک مدل سه بعدی می‌تواند در این زمینه راه‌گشا باشد (شکل ۸). در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش حد روانی و شاخص خمیری را به همراه رمبندگی به‌عنوان ورودی برای نرم‌افزار متلب و بهره‌گیری از منطق فازی استفاده کرده تا بتوان مدلی جهت تعیین شاخص رمبندگی و شاخص خمیری خاک، به دست آورد.



شکل ۸: مدل سه بعدی متغیر CP، زمان و درصد مواد افزودنی

در مدل تولیدی، پارامترهایی که برای آموزش ANFIS استفاده شده است با توجه به جدول ۸ و ۹ می‌باشد.

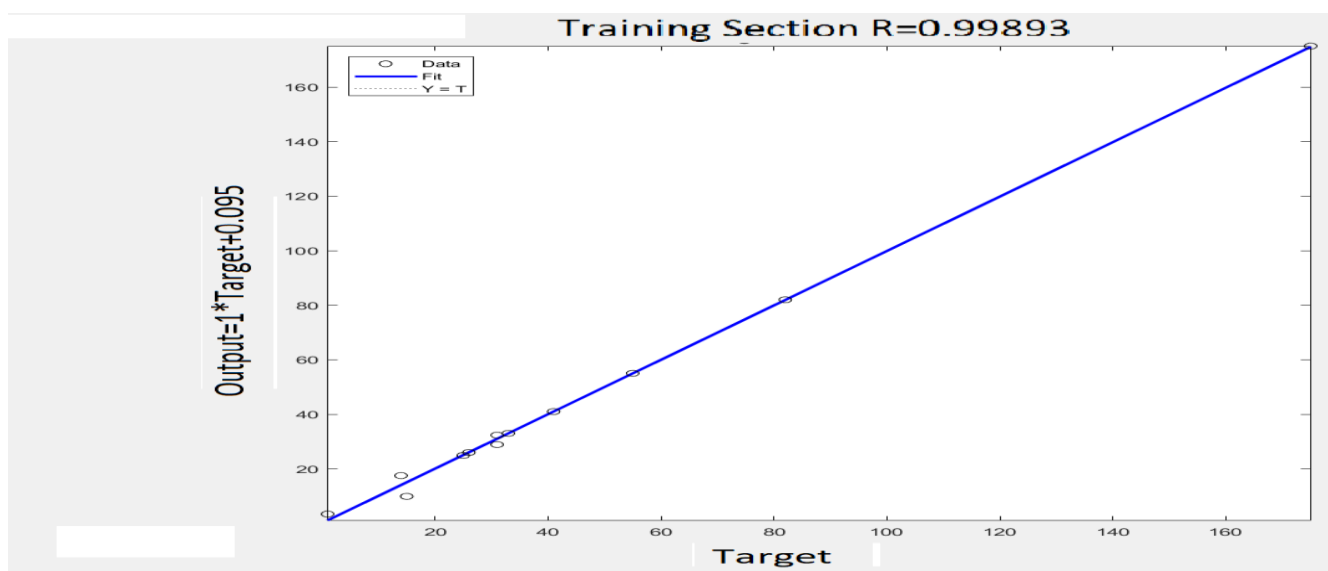
جدول ۸: پارامترهای مورد استفاده در ANFIS برای شاخص خمیری

ANFIS parameter type for PI	ANFIS
MF type	Gaussian
Number of linear parameters	۷
Number of nonlinear parameters	۳
Number of training data pairs	۱۲
Number of checking data pairs	۳
Number of fuzzy rules	۶

جدول ۹: پارامترهای مورداستفاده در ANFIS برای شاخص رمبندگی

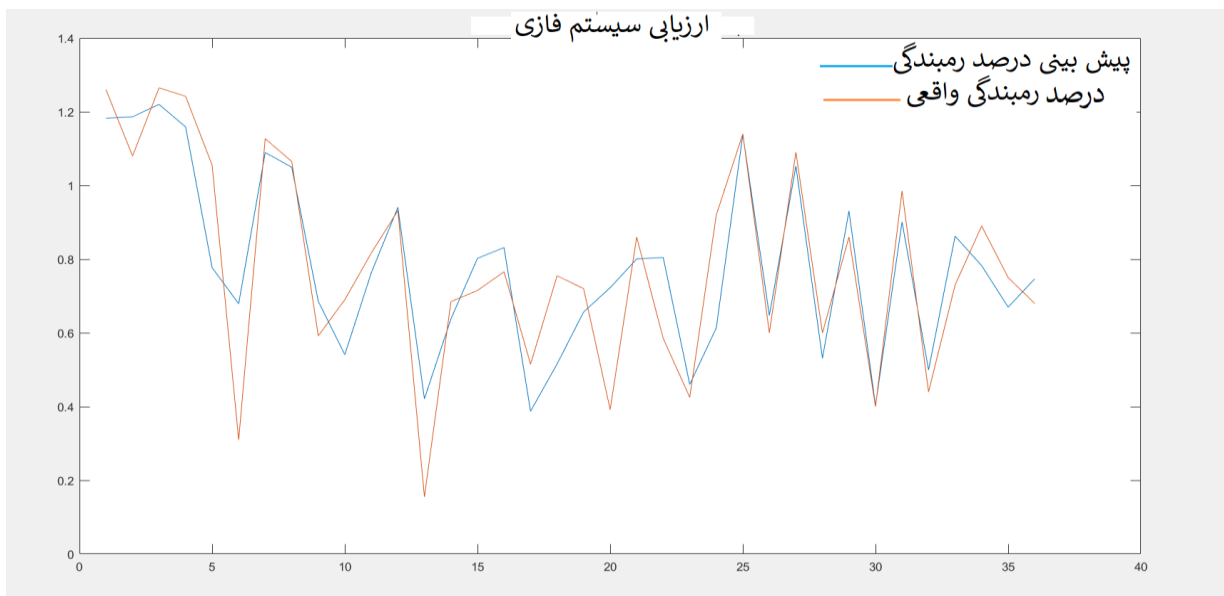
ANFIS parameter type for CP	ANFIS
MF type	Gaussian
Number of linear parameters	۷
Number of nonlinear parameters	۳
Number of training data pairs	۳۶
Number of checking data pairs	۱۲
Number of fuzzy rules	۸

در شکل ۹، مقایسه‌ای بین مقادیر مدل پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی شاخص پلاستیک، نشان داده شده است. می‌توان از این شکل نتیجه گرفت که مدل ANFIS بیشترین هم‌پوشانی را با حالت واقعی دارد.

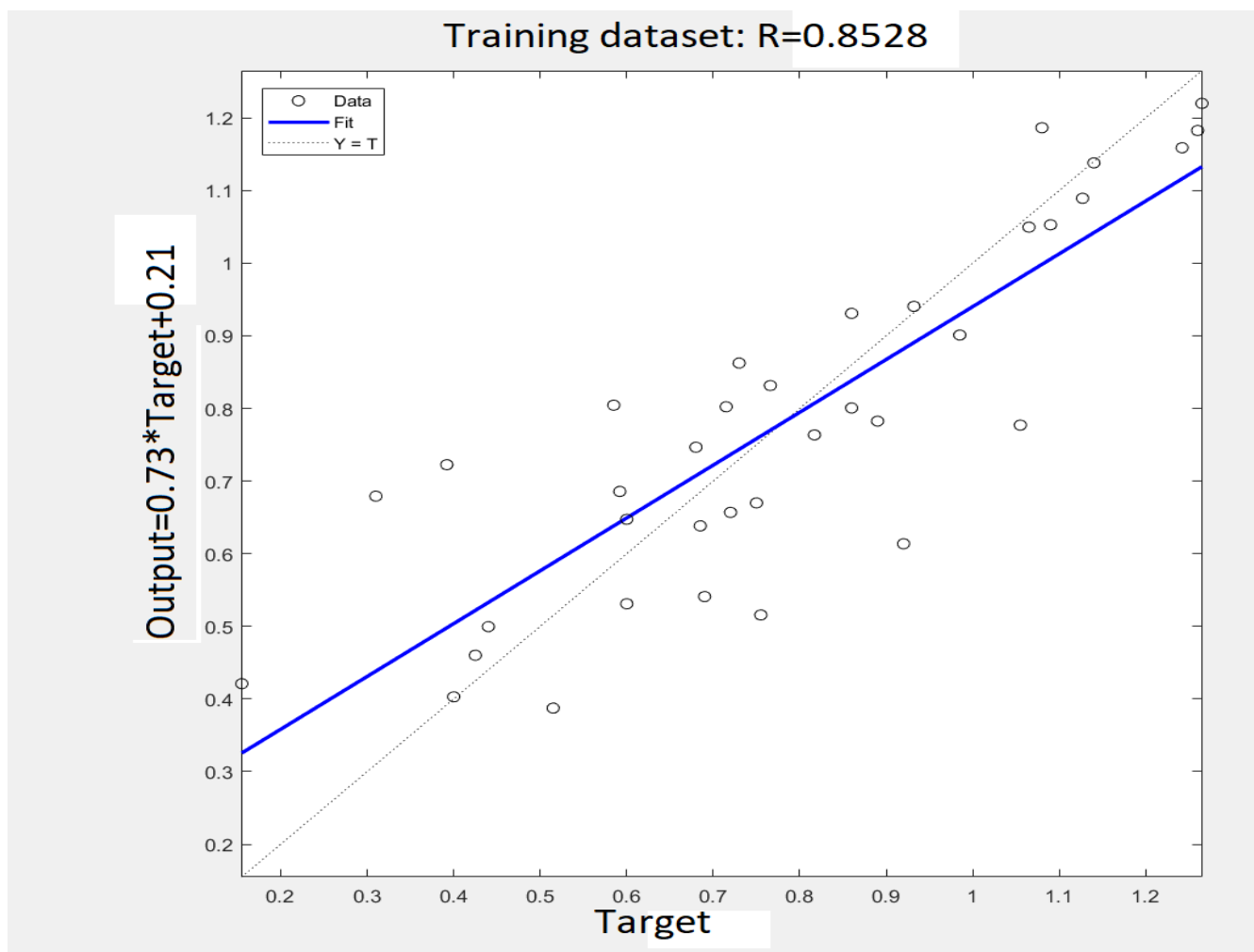


شکل ۹: نتایج حاصل از شبکه عصبی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی مربوط به داده‌های آزمایشی

شکل ۱۰، مقایسه‌ای بین مقادیر آموزش داده‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده شاخص رمبندگی را نشان می‌دهد. می‌توان از شکل نتیجه گرفت که مدل ANFIS بیشترین هم‌پوشانی را با حالت واقعی دارد (شکل ۱۱).



شکل ۱۰: نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی مربوط به داده‌های پیش‌بینی



شکل ۱۱: نتایج حاصل از شبکه عصبی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی مربوط به داده‌های آزمایشی

۸- بحث و نتیجه گیری

از گذشته تا به امروز، افزودنی‌های متفاوتی برای بهبود خواص رمبندگی خاک جهت عملکرد مناسب آن در ساخت و ساز، استفاده و تاثیر آن‌ها بر روی خاک بررسی شده است. در این پژوهش، تاثیر استرلین بوتادین رابر، به عنوان یک ماده پلیمری نوین، در بهبود خصوصیات خاک ریزدانه رمبند منطقه مرکزی ایران، کرمان، بررسی گردیده است. خصوصیات ابتدایی خاک پایه شامل: دانه بندی، درصد رطوبت، وزن مخصوص و همچنین حدود اتربرگ، در درصد‌های متفاوت این ماده افزودنی در هر دو نوع خاک ریزدانه، بررسی شده است. برای اندازه گیری خصوصیات خاک ریزدانه، ماده افزودنی با درصد‌های ۲،۳،۴،۵،۶،۷ درصد وزنی خاک ترکیب نموده و بعد از گذشت مدت زمان‌های متفاوت (۴،۷،۱۴ و ۲۸ روز)، ۸۴ آزمایش رمبندگی، روی آن‌ها انجام گردیده و نتایج با هم مقایسه شده است. از تئوری مجموعه‌های فازی برای مدل سازی پیشنهادی استفاده گردیده است. مدل ایجاد شده جهت پیش بینی پتانسیل رمبندگی در هنگامی که درصد ماده افزودنی و پتانسیل اولیه خاک، در دسترس باشد؛ اما شرایط لازم جهت تزریق انجام آزمایشات مورد نظر در اختیار نیست، به کار می‌رود. ۸۰ درصد داده‌ها جهت آموزش و ۲۰ درصد آن‌ها جهت آزمایش مدل استفاده گردیده است. با توجه به آزمایشات انجام شده روی دو نمونه خاک متفاوت، این خاک‌ها از لحاظ طبقه بندی، ML و CH بوده‌اند و به ترتیب دارای درصد رطوبت ۲۱/۲ و ۲۳/۸۶ و همچنین وزن مخصوص خشک ۱۴/۶ و ۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشند.

در نهایت نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

۱- نتایج آزمایش حدود اتربرگ بر روی خاک ML نشان داد که با افزایش ماده افزودنی، مقدار حد روانی حدود ۳۶ درصد افزایش و شاخص خمیری به طور تقریبی حدوداً ۱۰۰ درصد افزایش یافته است.

۲- نتایج آزمایش در خاک نوع دوم که خاک CL می‌باشد، نشان داد که این ماده افزودنی به طور کلی سبب کاهش در حدود اتربرگ و باعث کاهش ۳۷ درصدی در شاخص خمیری و ۵۵ درصدی در حد روانی می‌گردد.

۳- مطابق نمودار ۶، مقادیر R^2 برابر ۰/۹۹ و RMSE برابر ۲۰/۵ درصد، به ترتیب برای داده‌های آموزش در مدل سازی ANFIS به دست آمده است که نتایج، نشان از دقت مناسب مدل دارد.

۴- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات، می‌توان نتیجه گرفت که بوتادین رابر باعث کاهش رمبندگی گردیده و درصد کاهش این رمبندگی در تمامی موارد از ۹۰ درصد بالاتر بوده است.

۵- با افزودن استرلین بوتادین رابر به خاک ریزدانه رمبند در مدت زمان‌ها و درصد‌های متفاوت، می‌توان به طور تقریبی نتیجه گرفت که در مدت زمان ۷ روز، تقریباً به کمترین مقدار رمبندگی خاک در طول مدت زمان آزمایش رسیده‌ایم و بهترین درصد ماده افزودنی تقریباً از ۴ درصد به بالا می‌باشد.

۶- مدل ANFIS تولید شده با استفاده از ۳۶ داده ورودی برای آموزش و ۱۲ داده پیش بینی مدل سازی گردیده که خروجی آن شاخص رمبندگی می‌باشد. مقادیر R^2 برابر ۰/۹۹ و RMSE برابر ۲۰/۵ درصد به ترتیب برای داده‌های آموزش در ANFIS به دست آمده است که نتایج نشان از دقت مناسب هر مدل دارد.

مراجع

- [1] Jennings, J. E. (1957). The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting. In *Proc. 4th Int. Conf. on SMFE* (Vol. 1, pp. 316-319).
- [2] Gelsefidi, S., Mirkazemi, S. M., & Hasan, B. M. (2013). Application of nanomaterial to stabilize a weak soil. In *Proceedings of 7th international conference on case histories in geotechnical engineering, paper* (No. 6.10, pp. 1-8).
- [3] Ahmed, F. B., Atemimi, Y. K., & Ismail, M. A. M. (2013). Evaluation the effects of styrene butadiene rubber addition as a new soil stabilizer on geotechnical properties. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18.

- [4] Baghini, M. S., Ismail, A., Naserlavi, S. S., & Firoozi, A. A. (2016). Performance evaluation of road base stabilized with styrene-butadiene copolymer latex and Portland cement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 321-336.
- [5] Snodi, L. N., Atemimi, Y., & binti Ahmad, F. (2018). Effect of stabilizers on the shear strength of residual soil. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 01019). EDP Sciences.
- [6] Zimbaro, M., Ercoli, L., Mistretta, M. C., Scaffaro, R., & Megna, B. (2020). Collapsible intact soil stabilisation using non-aqueous polymeric vehicle. *Engineering Geology*, 264, 105334.
- [7] Agusta, H., Handoyo, G. C., & Sudaryanto, M. T. (2020). Cover Crops and Frond Piles for Improving Soil Water Infiltration in Oil Palm Plantations. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 460, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- [8] Abbeche, K., Bahloul, O., Ayadat, T., & Bahloul, A. (2010). Treatment of collapsible soils by salts using the double consolidation method. In *Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils* (pp. 69-78).
- [9] Soliman, S., & Hanna, A. (2010). Performance of reinforced collapsible soil. In *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design* (pp. 347-356).
- [10] Fattah, M. Y., Al-Ani, M. M., & Al-Lamy, M. T. A. (2013). Treatment of collapse of gypseous soils by grouting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 166(1), 32-43.
- [11] Ajalloeian, R., Matinmanesh, H., Abtahi, S. M., & Rowshanzamir, M. (2013). Effect of polyvinyl acetate grout injection on geotechnical properties of fine sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 8(2), 86-96.
- [12] Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2), 329-339.
- [13] Momeni, M., Shafiee, A., Heidari, M., Jafari, M. K., & Mahdaviifar, M. R. (2012). Evaluation of soil collapse potential in regional scale. *Natural hazards*, 64(1), 459-479.