مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
زمستان ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۴ صفحه ۱۲۷ تا ۱۳۹

بهبود خاصیت رمبندگی خاک دست نخورده با استفاده از مواد پلیمری

سودابه جلالی [۱]، مسعود عامل سخی*[۲]، مهدی مومنی رق آبادی [۳]، سید عظیم حسینی[۴]، رامین خواجویی[۵]

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

چکیده

خاک‌های رمبنده از جمله خاک‌های مسئله‌دار در طبیعت می‌باشند که در اثر مرطوب شدن، زیاد نشست می‌کنند. به‌طوری‌که طبق پژوهش‌های انجام شده مقدار نشست می‌تواند به ۱ الی۲ درصد ضخامت لایهٔ خاک برسد. در صورت شناسایی نکردن این نوع خاک‌ها، اگر سازه‌ای روی آنها احداث شود، در صورت اشباع شدن و تغییرات رطوبت خاک، سازه دچار آسیب و زیان می‌شود. وجود چنین خاک‌هایی در بسیاری از مناطق جهان از جمله کشور ایران، لزوم توجه و بررسی بیشتر رفتار و خصوصیات خاک‌های رمبنده را می‌طلبد. در این مقاله اثر بوتادین رابر بر تثبیت این‌گونه خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. خاک‌های ریزدانهٔ مورد آزمایش از دو سایت مختلف واقع در استان کرمان، شهر کرمان، خیابان شهدای دارلک و میدان کوثر نمونه‌برداری شده و با تزریق درصدهای ۲، ۳، ۴ و۵ درصد بوتادین رابر در مدت زمان‌های ۴، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تثبیت شده‌اند (تعداد آزمایش‌ها ۸۴ عدد است). ارزیابی خاک‌های تثبیت‌شده به روش تحکیم مضاعف (ASTM D5333) بر روی نمونه‌های دست نخورده خاک انجام گرفته است. نفوذ بوتادین رابر و همچنین ستون‌های بوتادین رابر تشکیل شده منجر به کاهش میزان رمبندگی شده و از ۸۸ درصد بیشتر است. با توجه به گسترش سیستم‌های هوشمند در پیش‌بینی رفتار خاک‌های رمبنده تثبیت‌شده، به کمک سیستم استنتاج فازی (ANFIS) مدل پیش‌بینی درجهٔ رمبندگی نمونه‌های تثبیت‌شده با بوتادین رابر ساخته شد و دقت آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلید واژه‌ها: *تثبیت خاک رمبنده، بوتادین رابر، سیستم هوشمند استنتاج فازی.*

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران ژئوتکنیک مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران جنوب
۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم ، قم، amelsakhi@qut.ac.ir
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرمان
۴. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران
۵. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران
* مسئول مکاتبات

۱.مقدمه

خاک‌ها یکی از مهم‌ترین مواد موجود در طبیعت می‌باشند که از دیرباز به‌وسیلهٔ انسان در کارهای مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور کلی اکثر ساخت‌وسازها در درون یا روی خاک اانجام می‌شوند و یا به وسیلهٔ آن انجام می‌شوند، اما همهٔ خاک‌ها شرایط مناسبی جهت ساخت‌وساز ندارند. از جملهٔ این موارد می‌توان به خاک‌های حساس به رطوبت (براساس تعریف ASTM D-5333) اشاره نمود. موضوع مهم مورد توجه در مورد این خاک‌ها، تغییرات ایجاد شده در خواص آنها است؛ چرا که پس از مرطوب شدن، ساختار این خاک‌ها به شرایط ناپایدار میل می‌کند. خاک‌های فروریزشی یا رمبنده در این گروه از خاک‌ها قرار می‌گیرند. این خاک‌ها در حالت طبیعی نهشته‌های سست و دارای ساختار باز بوده که بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌بیابانی یافت می‌شوند. رمبندگی ممکن است تنها در اثر مرطوب شدن یا مرطوب شدن توأم با بارگذاری رخ دهد. منشأ خاک‌های رمبنده می‌تواند خاک‌های انتقالی به‌ویژه خاک‌های بادرفتی، خاک‌های برجا یا خاکریزهایی که به خوبی متراکم نشده‌اند، باشد. مشکلات ناشی از خاک‌های رمبنده به‌طور جدی پس از جنگ جهانی دوم شناخته شد. برای اولین بار جنینگز، وهمکاران(Jennings et al, 1957) علت فروریزش ساختمان‌ها در آفریقای جنوبی را مربوط به تغییر آرایش ذرات خاک زیرین ساختمان‌ها نسبت به هم عنوان نمود. برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های رمبنده، عموماً تثبیت‌کننده‌های سنتی همچون سیمان، آهک، خاکستر بادی و ... مورد استفاده قرار گرفته است. تثبیت خاک‌های رمبنده در دو دستهٔ تزریقی و اختلاطی انجام شده‌اند. از دستهٔ تثبیت‌های اختلاطی می‌توان به کارهای ایوانز و بل (Bell et al, 1993) و لتنگر و صابر (Lutenegger et al, 1993) اشاره نمود که مادهٔ افزودنی پلیمری را به خاک‌ریزدانه افزوده‌اند. در سال ۲۰۱۳ سید گلسفیدی (Gelsefidi et al, 2013) طی مطالعهٔ پایداری خاک رمبنده واقع در شمال ایران، به وسیلهٔ نانو مواد، به نتایج قابل قبولی دست یافته است. فوزیه بینتی احمد و همکاران (Fauziah binti et al, 2013) از یک نوع پایدار کنندهٔ جدید شیمیایی، به نام استرلین بوتادین رابر استفاده نموده‌اند و این پایدار کننده سبب کاهش نشانهٔ خمیری خاک گردیده است.

سال ۲۰۰۴ چنگ و همکاران(Zhang et al 2004) مادهٔ بیوپلیمری را جهت بهبود خواص رمبندهٔ خاک به آن افزوده‌اند و به نتایج قابل قبولی رسیدند. مجتبی شجاعی باغینی (Bagheini et al, 2016) به بررسی همزمان سیمان و استرلین بوتادین رابر پرداخته و تأثیر این مادهٔ افزودنی را در راه‌سازی بررسی نموده است. احمد اتممی و جمعی از (Ahmed Atemimi et al, 2013) به بررسی بهبود ویژگی خاک‌ها با استفاده از پلیمر استرلین بوتادین رابر پرداخته و این ماده به‌طور مؤثر باعث بهبود خواص خاک گردیده است. زیمباد و همکاران(Zimbardo et al, 2020) با استفاده از پلیمر خاصی در ماسه رمبنده شاهد کاهش خاصیت رمبندگی خاک ماسه بوده‌اند. ایزابل سیلوریا و همکارانش (Silveria et al, 2020) خاک رمبنده را متراکم نموده‌اند و بعد از انجام آزمایش تحکیم مضاعف شاهد کاهش شاخص رمبندگی خاک بوده‌اند. در روش تثبیت تزریقی می‌توان به تحقیقات گیبس و بارا (Gibbs et al,1967) در زمینهٔ استفاده از دوغاب رس و تزریق آن به تودهٔ لسی اشاره نمود. همچنین در سال ۲۰۱۰ عبیچه (Abbeche et al, 2010)به تحقیق در باب خاک رمبنده‌ای که به آن نمک تزریق شده، و بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک پرداخته و مشاهده نمودکه شاخص رمبندگی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. محمد فتاح و همکاران (Fattah et al, 2013) رفتار رمبندگی خاک را با تزریق گروت (آب، سیمان، ماسه) بررسی نموده‌اند و نتایج حاصل از بررسی‌شان نشان می‌دهد گروت تزریق شده سبب بهبود خواص خاک رمبنده گردیده است. رسول اجل‌لوئیان و همکاران(Ajalloeian et al, 2013) به بررسی تأثیر گروت پلی‌وینیل بر خواص ژئوتکنیکی خاک پرداخته‌اند. آن‌ها مواد پلیمری را که با درصدی مشخص از آب مخلوط شده را به خاک رمبنده تزریق نمودند و این سبب بهبود مقاومت خاک

شد و همچنین مدول الاستیسیته خاک نیز افزایش پیدا کرد.. سال ۲۰۱۷ نیز محمد آیلیدین و همکاران (Ayeldeen et al, 2017)رفتار مکانیکی خاک رمبنده را با استفاده از دو نوع بیوپلیمر متفاوت تزریق شده بررسی نموده‌اند.

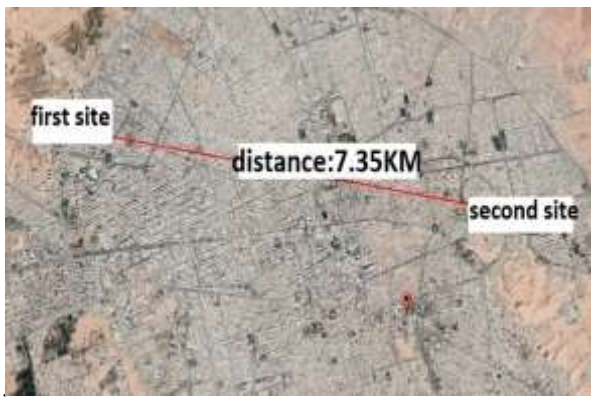
سیستم‌های هوشمند، ابزار قدرتمندی در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشند که قابلیت اعمال عدم قطعیت‌ها با روش‌های فازی در آنها مهیا شده است. مؤمنی و همکاران (Momeni et al, 2012) به بررسی پتانسیل رمبندگی مناطق مختلف مرکزی کشور ایران با استفاده از ارزیابی کیفی و تجزیه‌وتحلیل مجموعهٔ فازی پرداخته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تطبیق خوبی بین آزمایشات و سیستم استنتاج فازی وجود دارد .

به دلیل وجود سطح وسیعی از خاک‌های رمبنده در جهان و نیاز به مواد شیمیایی جدید که سازگار با محیط باشد و سبب بهبود خواص رمبندگی خاک رمبنده شود، تثبیت این نوع خاک‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به اینکه مادهٔ پلیمری استرلین بوتادین رابر سازگار با محیط است و به مقدار قابل توجهی تولید می‌گردد، استفاده از این مادهٔ پلیمری جهت بهبود خواص خاک بیش از پیش مورد توجه قرار می‌گیرد. در مقالهٔ حاضر، مقدار کاهش رمبندگی با افزودن درصدهای متفاوت بوتادین رابر(۲،۳،۴،۵،۶،۷) در مدت زمان‌های متفاوت(۴، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با استفاده از ANFIS شاخص رمبندگی ارزیابی شده و یک مدل کالیبره شده با استفاده از نتایج ۸۴ آزمایش، جمع آوری شده در منطقهٔ مرکزی ایران، شهر کرمان، به‌دست آمده است.

۲.مواد و روش ها

خاک مورد استفاده در این مطالعه از دو سایت متفاوت در شهر کرمان تهیه شده است (جدول ۱). نمونه‌های خاک از عمق ۴ الی ۶ متری برداشته شده‌اند. (باتوجه به مطالعات گذشته و وجود خاک‌های رمبنده در این اعماق، این عمق‌ها انتخاب گردیده‌اند.). این خاک از سطح زمین طبیعی باتوجه به دستورالعمل‌های ASTM D1587 و ASTM D4-7015 به‌صورت دست‌نخورده و کلوخی و از اعماق گودبرداری شده تهیه گردیده است. آزمایشات نیز بر اساس استانداردهای ASTM انجام گردیده است.

شکل ۱. نقشهٔ محل نمونه‌برداری در شهر کرمان



جدول ۱.جزئیات سایت نمونه‌برداری.

Site number	Geographical coordinate	Deep sample(m)	Number of samples
1	30°17′ 45.7″ 57°01'05.4"E	4	72
2	30°17'49.5"N 57°05'41.8"E	5.5	12

از آزمایشات پایه جهت شناسایی خواص ژئوتکنیکی نمونه‌های خاک سایت ۱ و ۲ جدول زیر نتایج زیر حاصل گردیده است.

.

جدول۲.خصوصیات خاک‌های اولیه(بدون افزودنی) استفاده شده در این تحقیق.

Moisture content(ω)%	CP%	Degree of collapsible based ASTM	Classification	Special Weight (γ kn/m3)	Moisture content(ω)%	CP%	Degree of collapsible based ASTM
1	31,2	15	ML	1.46	21.2	11.1	sever
2	59	23	CH	1.4	23.86	13.1	sever

پلیمرها به وفور در طبیعت یافت می‌شوند. شاخص‌ترین پلیمرهای طبیعی دیان ای(DNA) و آران ای (RNA) دو تعیین‌کنندهٔ زندگی می‌باشند. ساده‌ترین تعریف پلیمر را اینگونه می توان بیان کرد که ماده شیمیایی کارآمدی است متشکل از واحدهایی تکرارشونده.. استرلین بوتادین جزو اولین الاستومرها یا لاستیک‌هایی بود که اختراع شد. ۷۰٪ از پلی‌بوتادین تولیدی، برای ساخت لاستیک و تایر استفاده می‌شود و ۲۵٪ تا ۳۰٪ . آن به عنوان افزودنی به لاستیک‌های دیگر اضافه می‌شود تا استحکام مکانیکی آنها را بهبود بخشد. تولید سالیانهٔ این پلیمر در سال ۱۳۸۰ بیش از ۲,۱ میلیون تن بود که از لحاظ تناژ مصرف در بین لاستیک‌ها در رتبهٔ اول قرار دارد. استرلین بوتادین برای اولین بار در سال ۱۹۱۰ توسط یک دانشمند روسی به نام سرگئی واسیلیویچ لِبِدِو(Sergei Vasilyevich Lebedev)پلیمریزه بسپارش شد. او در سال ۱۹۲۶ فرآیندی را برای تولید بوتادین از اتانول اختراع کرد و در سال ۱۹۲۸ توانست برای توسعهٔ تولید استرلین بوتادین از سدیم به عنوان یک کاتالیزور استفاده کند. با توجه به این کشف، اتحادیهٔ جماهیر شوروی اولین کشوری بود که در اواخر سال ۱۹۳۰ موفق به تولید صنعتی این پلیمر گردید. از جمله کشورهایی که به تحقیق و توسعهٔ تولید پلی بوتادین و استرلین بوتادین کمک بسیاری کردند، آلمان و آمریکا بودند. پس از جنگ جهانی دوم در اواسط دههٔ ۱۹۵۰ پیشرفت‌های عمده‌ای در زمینهٔ کاتالیزور به‌خصوص تولید کاتالیزور زیگلر ناتا صورت گرفت.

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 مادهٔ افزودنی جهت بهسازی خاک‌های رمبنده استفاده گردیده است. به‌طورکلی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، اختلاط این مادهٔ شیمیایی با خاک، باعث افزایش خواص مقاومت برشی و کاهش حد روانی خاک می‌گردد. استفاده از این مواد در کاهش تغییرات حجم خاک حین رطوبت‌شدگی در تاریخچهٔ تحقیق مشاهده نشده است، لذا دانستن این اطلاعات برای درک میزان پایداری و تثبیت خاک به‌وسیلهٔ این مادهٔ سازگار با محیط ضروری می‌باشد.

وجود سطح وسیعی از خاک‌های رمبنده در جهان و همچنین نیاز به مواد شیمیایی جدید سازگار با محیط که بتوانند سبب بهبود خواص رمبندگی خاک رمبنده شوند، موجب گردیده که تثبیت این نوع خاک‌ها با استفاده از پلیمرهای متفاوت موردتوجه قرار گیرد. با توجه به اینکه مادهٔ پلیمری استرلین بوتادین رابر سازگار با محیط می‌باشد و علاوه بر این به مقدار قابل توجهی تولید می‌گردد و از لحاظ اقتصادی مناسب می-باشد. این ماده تولید داخل کشور است و باتوجه به اینکه از مواد نفتی به وجود می‌آید، به میزان زیاد و با هزینهٔ پایین تولید شده و نسبت به سایر مواد از جمله نانو مواد، که بیشتر واردتی می‌باشد، در دسترس‌تر و مناسب‌تر است)، استفاده از این مادهٔ پلیمری جهت بهبود خواص خاک بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیقات گذشته این ماده جهت بهبود خاک‌های درشت‌دانه استفاده گردیده و تأثیر آن بر روی

خاکهای ریزدانهٔ مسئله‌دار بررسی نشده است. در نتیجه مقالهٔ حاضر، مقدار کاهش رمبندگی خاک را با افزودن درصدهای متفاوت بوتادین رابر (۲،۳،۴،۵،۶،۷، درصد مادهٔ افزودنی نسبت به وزن کل نمونه) در مدت زمان‌های متفاوت (۴،۷،۱۴،۲۸ روز، از زمان تزریق تا هنگام شروع آزمایش) مورد ارزیابی قرار داده است. سپس با استفاده از ANFIS شاخص رمبندگی ارزیابی شده و مدل کالیبره شده‌ای با استفاده از نتایج ۸۴ آزمایش، جمع‌آوری‌شده از منطقهٔ مرکزی ایران، شهر کرمان، به‌دست‌آمده است.

جدول۳. مشخصات مادهٔ افزودنی استرلین بوتادین رابر

Type of polymer	Brand	color	Viscosity	Particle size	PH
Sterile butadiene rubber	X-SBR	milky	<200	nm۱۵۰	10

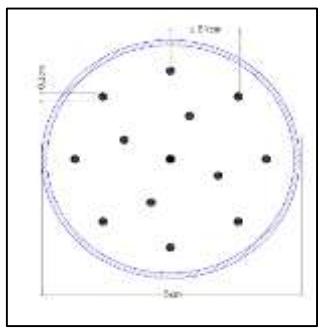
۳.آماده‌سازی و تثبیت با تزریق نمونه

۱-۳ آماده‌سازی نمونه

آماده‌سازی نمونه‌های خاک اخذ شده، در آزمایشگاه با دقت قابل قبول و طبق استاندارد است می‌باشد. ابتدا نمونه‌های خاک درون رینگ دستگاه تحکیم مستقر می‌گردد (شکل۲). سپس به کمک دستگاه دریل حفره‌هایی با قطر یک میلی‌متر (D=1mm) و با نسبت فاصله به قطر (S/D=1.57) درخاک ایجاد شد. فاصلهٔ ذکر شده، در حقیقت، فاصلهٔ حداقلی بین مرکز تا مرکزِ هر سوراخِ ایجاد شده روی نمونهٔ تحکیم می‌باشد. این فواصل باید به گونه‌ای قرار گیرند تا بیشترین هم‌پوشانی را ایجاد نمایند

(االف)

(ب)



(ج)

شکل۲. مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها

۲-۳ تهیه و تزریق دوغاب

مادۀ افزودنی در درصدهای وزنی متفاوت درون یک ظرف ریخته شده و با مقداری مایع ظرفشویی (جهت کاهش اصطکاک و افزایش نفوذپذیری ماده افزودنی) به خاک افزوده می‌شود. سپس در سه مرحله با فاصلۀ زمانی ۳۰ الی ۴۰ دقیقه به وسیلۀ سرنگی که بر روی سوزن آن سوراخ‌هایی جهت تزریق همه جانبه و حداکثر نفوذ در خاک وجود داشته باشد، تزریق انجام می‌شود(در هنگام تزریق سعی شده است نیروی فشار وارده به سرنگ یکسان باشد). به دلیل هدر نرفتن ماده، نمونه از یک سمت ایزوله گردیده است. در نهایت بعد از گذشت زمان‌های مشخص(۲۸،۱۴،۷،۴روز) بر روی ۸۴ نمونه، بر اساس استاندارد، آزمایش رمبندگی را انجام داده و نتایج یاداشت و در نهایت تحلیل شده است.

برای تشخیص مقدار تأثیر این مادۀ افزودنی بر روی خاک ریزدانه می‌توان ضریب کاهش شاخص رمبندگی (Rcp) را با استفاده از فرمول زیر به دست آورد.

$$Rcp=\frac{cp(inatial)-cp(secondary)}{cp(\boldsymbol{inatial})} \quad (۱)$$

$$Rcp\%=Rcp\times 100 \quad (۲)$$

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

تعداد آزمایشات و نتایج رمبندگی که در سایت‌های متفاوت انجام شده است. همچنین درصد مادۀ افزودنی نسبت به وزن نمونۀ حاضر جهت انجام آزمایش اندازه گیری شده است که مطابق جدول زیر می‌باشد.

جدول4. آزمایش رمبندگی خاک نوع ۱(ML).

initial character γ=1,46(kn/m3) ω=21,2 e=0,99 PI=15 LL=38				
Percent of additive	**Time(day)**	**CP%**	**average of CP%**	**RCP%**
2	4	1,01	1,26	88,75
2	4	1,1		
2	7	1,8	1,08	90,35
2	7	1,9		
2	14	1,63	1,265	88,7
2	14	0,9		
2	28	1,25	1,242	88,91
2	28	1,23		
3	4	1,48	1,055	90,58
3	4	0,63		
3	7	0,39	0,31	97,23
3	7	0,26		
3	14	1,1	1,127	89,93
3	14	1,155		
3	28	0,98	1,065	90,49
3	28	1,15		
4	4	0,82	0,592	94,71
4	4	0,36		
4	7	0,77	0,69	93,83
4	7	0,61		
4	14	0,81	0,817	92,7
4	14	0,82		
4	28	0,96	0,932	91,6
4	28	0,9		
5	4	0,15	0,155	98,66
5	4	0,16		
5	7	0,71	0,685	93,88
5	7	0,66		
5	14	0,713	0,715	93,61
5	14	0,7		
5	28	0,94	0,766	93,16
5	28	0,585		

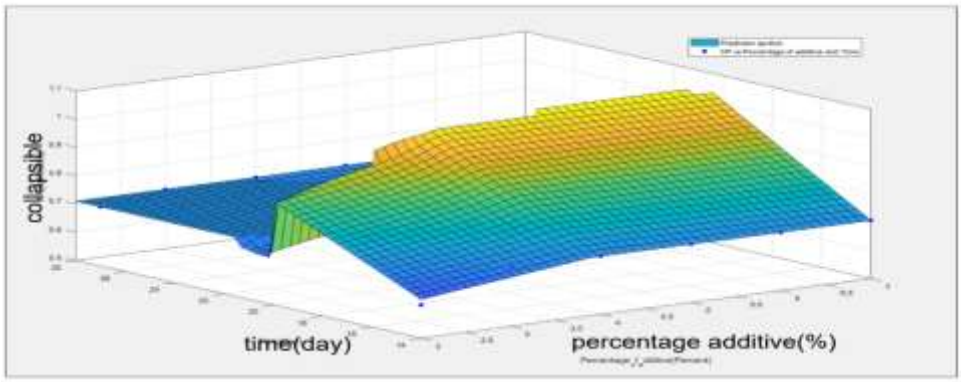
6	4	0,53	0,515	95,4
6	4	0,5		
6	7	0,75	0,755	93,25
6	7	0,76		
6	14	0,94	0,72	93,57
6	14	0,5		
6	28	0,46	0,392	96,5
6	28	0,325		
7	4	0,71	0,86	92,32
7	4	1,01		
7	7	0,61	0,585	94,77
7	7	0,56		
7	14	0,43	0,425	96,2
7	14	0,42		
7	28	0,94	0,92	91,71
7	28	0,92		

جدول 5. آزمایش رمبندگی خاک نوع۲(CH).

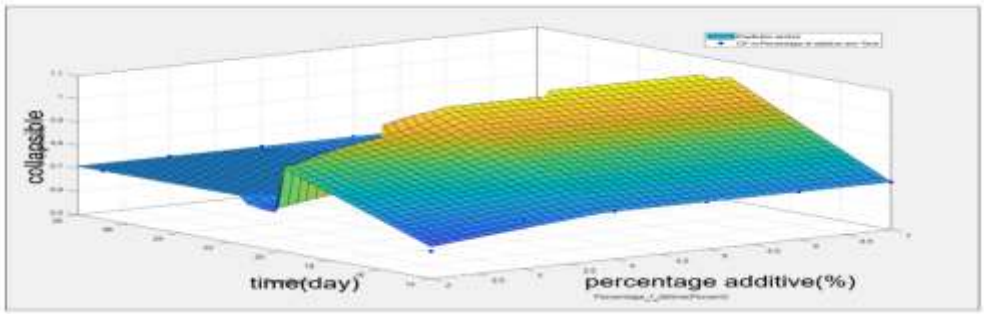
initial character	**γ=1,4(kn/m3)**	**ω=23,86 e=0,642 PI=69 LL=52**
Percent of additive material (%)	**Time(day)**	**CP%**	**RCP%**
2	4	1,14	91,29
2	7	0,6	95,41
3	4	1,09	91,6
3	7	0,6	95,4
4	4	0,86	93,4
4	7	0,4	96,9
5	4	0,985	92,4
5	7	0,44	96,6
6	4	0,73	94,4
6	7	0,89	93,2
7	4	0,75	94,27
7	7	0,86	93,43

باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام شده می‌توان به این موضوع اشاره نمود که در تمامی موارد با افزودن مادۀ پلیمری مورد نظر، مقدار رمبندگی کاهش یافته است. با افزودن حداقل ۲٪ و مدت زمان ۴ روز به حداقل کاهش رمبندگی دست پیدا کرده و با افزودن ۴ درصد مادۀ افزودنی شاهد بیشترین کاهش بوده و بعد از حدود ۱۴ روز این روند کاهشی شدت کمتری داشته و در مواقعی ثابت بوده است. در مدت زمان ۱۴ روز تقریباً به بیشترین حالت ممکن دست پیدا کرده است.

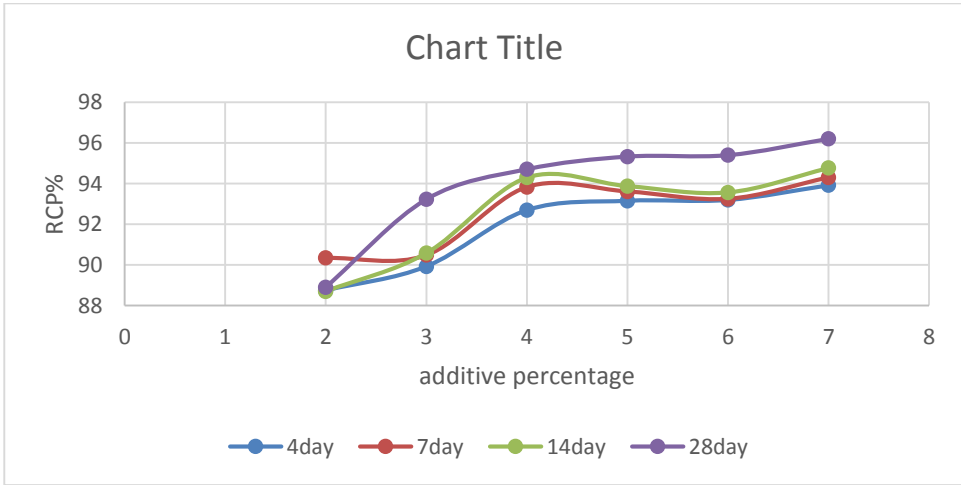
انجام آزمایشات ممکن است در هر شرایطی امکان‌پذیر نباشد، لیکن استفاده از یک مدل می‌تواند نقش بسزایی در این موضوع ایفا کند. در نهایت از نتایج به دست آمده از آزمایش رمبندگی به‌عنوان ورودی برای نرم افزار متلب و از منطق فازی استفاده شده تا بتوان مدلی جهت به دست آورن شاخص رمبندگی خاک به دست آورد.



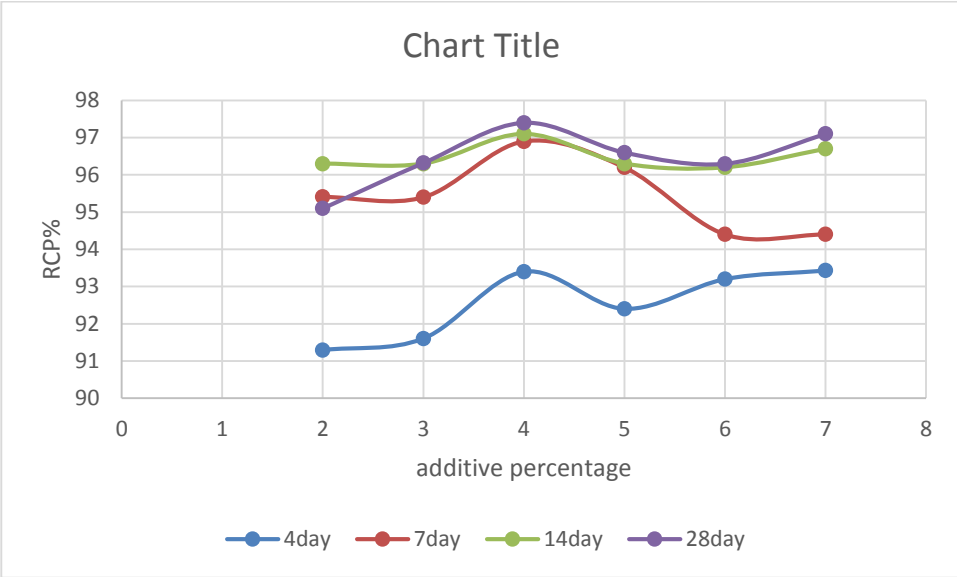
نمودار۱. شاخص رمبندگی با تغییر مدت زمان و درصد مادۀ افزودنی خاک نوع ۱ (سه بعدی).



نمودار۲.شاخص رمبندگی با تغییر مدت زمان و درصد مادۀ افزودنی خاک نوع 2(سه بعدی).



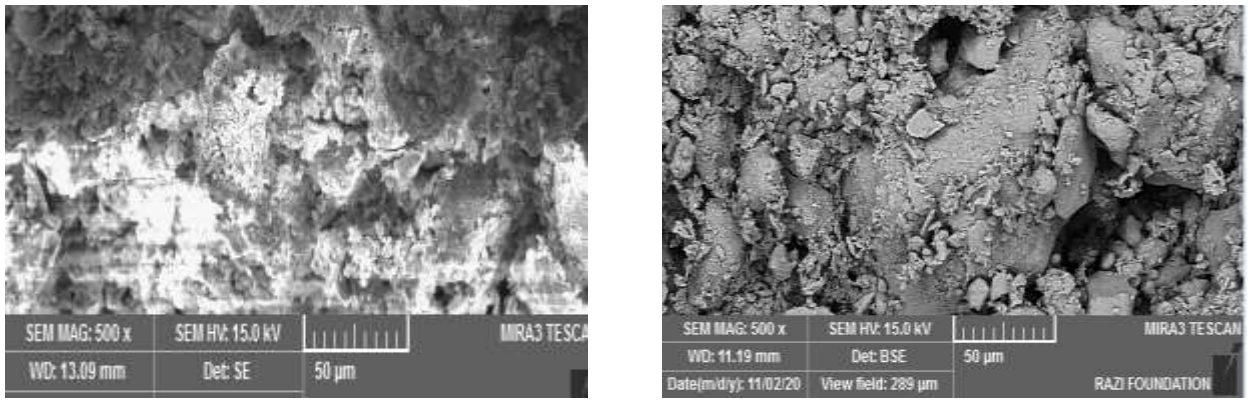
نمودار۳. شاخص رمبندگی با تغییر مدت زمان و درصد مادۀ افزودنی خاک نوع ۱(دو بعدی).



نمودار۴. کاهش شاخص رمبندگی با تغییر مدت زمان و درصد مادهٔ افزودنی خاک نوع 2 (دوبعدی).

۴. بررسی‌های ریزساختاری

به منظور شناخت تغییرات ساختاری در نمونه‌های خاکی، از نمونه‌های خاک، عکس SEM تهیه شد. بدین منظور، یک نمونهٔ خاک بدون افزودنی، و نمونهٔ دیگر همراه با افزودنی ساخته شد. در شکل ۶ فرآیند تاثیرگذاریِ استرلین بوتادین رابر بر پیوندهای جدیدِ 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.



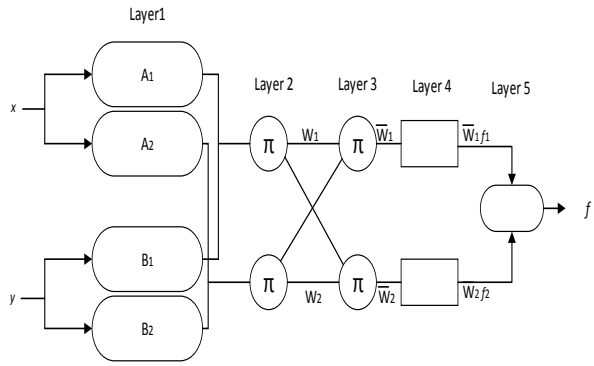
(ب) (الف)

شکل۳. تصاویر SEM از نمونه‌های خاک بدون افزودنی(الف)و همراه افزودنی(ب).

۵.سیستم منطق عصبی فازی ANFIS

در سال ۱۹۹۳، جانگ برای نخستین بار با کنار هم قرار دادن توانایی‌های تئوری فازی و شبکهٔ عصبی، مدل سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی را ارائه داد. این مدل دربرگیرندهٔ 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 وسیلهٔ شبکهٔ عصبی تعیین می‌گردد. بنابراین ویژگی‌های هر دو مدل فازی و عصبی در شبکهٔ عصبی- فازی تطبیقی نهفته می‌باشد. منطق فازی بر مبنای تئوری مجموعه‌های فازی قرار دارد که بین طبقات مختلفی از موضوعات ارتباط برقرار می‌کند، به‌طوری‌که عضویت از جنس درجه باشد و با پارامتر درجه بتوان میزان عضویت را نشان داد.

مدل استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، شبکه‌ای چندلایه متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال دهندهٔ گره‌ها می‌باشد. مدل فازی مرتبهٔ اول سوگنو با دو ورودی، یک خروجی و دو تابع عضویت برای هر یک از ورودی‌های یک مدل شبکه‌های عصبی فازی، مشابه نمودار ۵ می‌باشد.



نمودار۵.شمایی از یک شبکهٔ عصبی فازی

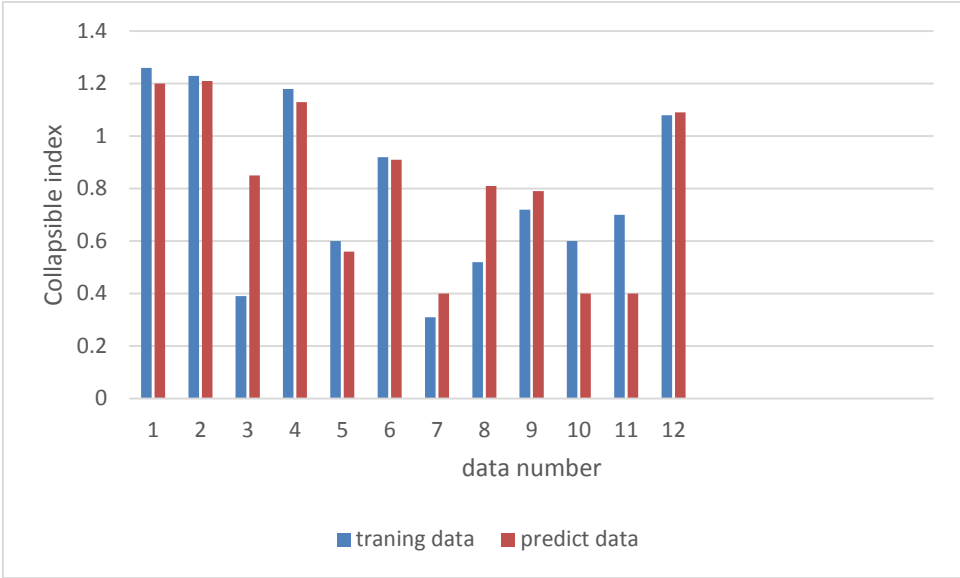
۵-۱ داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی

برای ساخت مدل در ابتدا باید داده‌های ورودی و پیش‌بینی را مشخص نمود. این مدل دارای ۳۶ دادهٔ ورودی برای آموزش و۱۲ ورودی برای پیش‌بینی از دو سایت متفاوت می‌باشد. سپس داده‌های جدول (رمبندگی ۱ و۲) درصد رطوبت (W%)، حد روانی خاک پایه(LL) و نشانهٔ خمیری خاک پایه (PI)، نسبت تخلخل(e)، وزن مخصوص خاک **(γ)** مدت زمان (t) و درصد مادهٔ افزودنی به‌عنوان ورودی و شاخص رمبندگی (cp%) به‌عنوان خروجی در هنگام مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در مدل تولیدی، پارامترهایی که برای آموزش ANFIS استفاده شده است با توجه به جدول زیر می‌باشد.

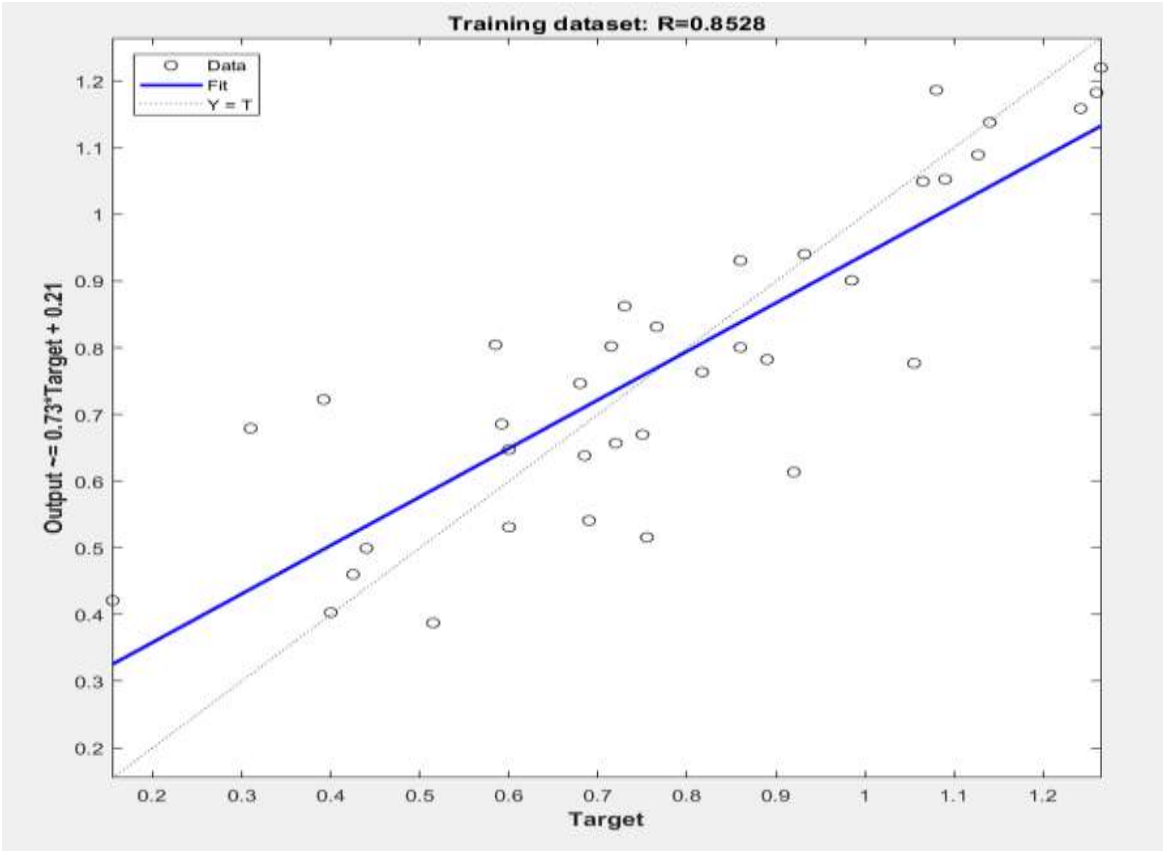
جدول ۹.پارامترهای مورد استفاده در ANFIS برای شاخص رمبندگی.

ANFIS parameter type for CP	ANFIS
MF type	Gaussian
Number of linear parameters	7
Number of nonlinear parameters	3
Number of training data pairs	36
Number of checking data pairs	12
Number of fuzzy rules	8

شکل زیر مقایسه‌ای بین مدل آموزش داده شده و مدل پیش‌بینی‌شدهٔ شاخص رمبندگی را نشان می‌دهد. می‌توان از گراف نتیجه گرفت در حالت واقعی و پیش‌بینی شده تابع ANFIS بیشترین هم‌پوشانی را داشته است.



نمودار۶. نتایج حاصل از استنتاج فازی عصبی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی مربوط به داده‌های پیش‌بینی.



نمودار۷. نتایج حاصل از استنتاج فازی عصبی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی مربوط به داده‌های آزمایشی.

۶-.نتیجه‌گیری

از گذشته تا به امروز افزودنی‌های متفاوتی برای بهبود خواص رمبندگی خاک وجود داشته و تأثیر آنها بر روی خاک بررسی شده است .

در این پژوهش تأثیر مادۀ پلیمری نوینی، به نام استرلین بوتادین را بر ، بهبود خصوصیات خاک ریزدانۀ رمبندۀ منطقۀ مرکزی ایران یعنی کرمان بررسی کردیم. پس از مشخص کردن خصوصیات ابتدایی خاک پایه شامل دانه‌بندی، درصد رطوبت، وزن مخصوص و همچنین حدود اتربرگ، در درصدهای متفاوت این مادۀ افزودنی و همچنین زمان‌های متفاوت مقدار رمبندگی دو نوع خاک ریزدانه (ML,CH) بررسی شده است. برای اندازگیری خصوصیات خاک ریزدانه، مادۀ افزودنی با درصدهای ۷،۶،۵،۴،۳،۲ درصد وزنی نمونۀ خاک ترکیب نموده، بعد از گذشت مدت زمان‌های متفاوت (۱۴،۷،۴ و ۲۸ روز) بر روی آنها آزمایش رمبندگی انجام گردیده که تعداد ۸۴ آزمایش انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

از تئوری مجموعه‌های فازی برای مدل‌سازی پیشنهادی استفاده گردیده است. مدل ایجاد شده جهت پیش‌بینی پتانسیل رمبندگی هنگامی که درصد مادۀ افزودنی و پتانسیل اولیۀ خاک را در دسترس داشته و شرایط لازم جهت تزریق و انجام آزماشات مورد نظر در اختیار نداریم، به‌کار می‌رود. در این مدل ۸۰ درصد داده‌ها جهت ورود و ۲۰ درصد آنها جهت آموزش استفاده گردیده است. باتوجه به آزمایشات انجام شده بر روی دو نمونه خاک متفاوت یعنی خاک‌های ML و CH معلوم شد که به ترتیب دارای رطوبت ۲۱/۲ و ۲۳/۸۶ درصد و همچنین وزن مخصوص خشک ۱۷/۱و۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشند.

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

۱. باتوجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایشات، می‌توان نتیجه گرفت بوتادین رابر باعث کاهش رمبندگی گردیده که درصد کاهش این رمبندگی در اکثر موارد از ۹۰ درصد بالاتر بوده است.
۲. با افزودن استرلین بوتادین رابر به خاک ریزدانۀ رمبنده در مدت زمان‌ها و درصدهای متفاوت می‌توان به طور تقریبی نتیجه گرفت در مدت زمان ۷ روز تقریباً به کمترین مقدار رمبندگی خاک در طول مدت زمان آزمایش رسیده است و بهترین درصد مادۀ افزودنی تقریباً از ۴ درصد به بالا می‌باشد.
۳. مدل ANFIS تولید شده با استفاده از ۳۶ دادۀ ورودی برای آموزش و ۱۲ دادۀ پیش‌بینی، مدل-سازی گردیده و یک خروجی که همان شاخص رمبندگی می‌باشد گرفته شده است. مقادیر R2 برابر ۰,۹۹ و RMSE برابر ۲۰/۵ درصد به‌ترتیب برای داده‌های آموزش در ANFIS به‌دست آمده است که نتایج نشان از دقت مناسب هر مدل دارد.

منابع

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) .

Bell, F. G. ,1993, “Engineering Treatment of Soils,” Spon, London, pp. 317.

Lutenegger, A. J. and Saber, R. T, 1988, “Determination of Collapse Potential of Soils,” Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 11, No. 3, pp. 173-178.

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)

Fauziah binti Ahmed a, Yahya K. Atemimi a, b, and Mohd,2013,Evaluation the Effects of Styrene,vol 18.

Zhang, G. Germaine, J. T. Whittle, A. J. Ladd, C. C. 2004, Index properties of a highly weathered old alluvium ",Geotechnique 54, No. 7, pp. 441-451.

Baghini, M. S., Ismail, A., Naseralavi, 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.

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.

Zimbardo, M., Ercoli, L., Mistretta, M. C., Scaffaro, R., & Megna, B. , 2020, Collapsible intact soil stabilisation using non-aqueous polymeric vehicle. Engineering Geology, 264, 105334 .

Silveira, I. A., & Rodrigues, R. A.. Collapsible Behavior of Lateritic Soil Due to Compacting Conditions. INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING.

Gibbs, H. J. and Bara J. P, 1967, "Stability problems of collapsing soils," Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 93, pp. 572-594.

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).

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.

Ajalloeian, R., Matinmanesh, H., Abtahi, S. M., & Rowshanzamir, M. Effect of polyvinyl acetate grout injection on geotechnical properties of fine sand. Geomechanics and Geoengineering, 8(2), 86-96 (2013).

Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(2), 329-339 (2017)..

Momeni, M., Shafiee, A., Heidari, M., Jafari, M. K., & Mahdavifar, M. R, 2012, Evaluation of soil collapse potential in regional scale. Natural hazards, 64(1), 459-479.