



بررسی تأثیر نانوکربنات کلسیم بر مقاومت فشاری ماسه رس دار با درصد های مختلف رس

مصطفی محمدی^۱، مهدی خداپرست^{۱*}، علی محمد رجبی^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
^۲ دانشکده علوم زمین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷

کلمات کلیدی:

ماسه رس دار
نانوکربنات کلسیم
تثبیت خاک
مقاومت تک محوری

خلاصه: امروزه استفاده از نانوذرات در بهسازی خاکها، یکی از روش های مورد توجه محققین در حوزه ژئوتکنیک می باشد. در این مقاله اثر نانوکربنات کلسیم بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه رس دار با درصد های مختلف رس مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور سه نوع خاک ماسه رس دار به ترتیب با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد رس در چهار درصد مختلف نانو شامل ۰/۳، ۰/۷، ۱/۱ و ۱/۵ و در سه زمان مختلف عمل آوری ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفته اند. همچنین در این مطالعه با استفاده از الگوریتم مدیریت داده ها به روش گروهی (GMDH)، به ارائه رابطه ای جهت پیش بینی مقاومت تک محوری خاک پرداخته شده است. در ادامه به منظور بررسی ریزساختاری نمونه های بهسازی شده با نانو $CaCO_3$ ، نمونه ها با استفاده از آزمایش XRD و SEM تحت آنالیز قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهد که افزودن نانوکربنات کلسیم به نمونه های مورد آزمایش، باعث افزایش بیشتر مقاومت فشاری تک محوری و مدول سکانت می گردد که این افزایش با افزایش زمان عمل آوری ادامه می یابد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده در خاک های با ۱۰ و ۲۰ درصد رس، ۰/۷ درصد نانوکربنات کلسیم و در خاک با ۳۰ درصد رس، ۱/۱ درصد نانوکربنات کلسیم به عنوان درصد بهینه شناخته شده اند. بررسی های ریزساختاری انجام شده با انجام آنالیز XRD و SEM نشان دهنده پرشدگی بهتر در بین نمونه ها پس از افزودن نانوکربنات کلسیم بوده و علاوه بر آن تشکیل بافت های کریستالی کلسیم سیلیکات هیدرات در سطح نمونه ها پس از افزودن نانوکربنات کلسیم مشاهده می شود. از سوی دیگر تحلیل انجام شده بر روی نتایج آزمایشگاهی، منجر به ارائه رابطه ای به منظور پیش بینی مقاومت تک محوری خاک ماسه رس دار بهسازی شده با نانوکربنات کلسیم با خطای نسبی کمتر از ۵ درصد گردیده است.

۱- مقدمه

از این ذرات می تواند خصوصیات خاک را بهبود بخشد [۱-۳]. یکی از روش های اصلاح ساختار خاک، استفاده از مواد افزودنی به عنوان عامل تثبیت کننده می باشد. مصالح مورد استفاده در تثبیت خاک عمدتاً شامل مصالح سنتی از جمله آهک و سیمان می باشند. امروزه علاوه بر استفاده از تثبیت کننده های سنتی، استفاده از نانومواد نیز مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. ژانگ (۲۰۰۴) با افزودن ۹٪ ذرات اکسید آهن به خاک سیلتی، نشان داد که این ذرات باعث ایجاد یک شبکه ارتباطی بین ذرات لای و اکسید آهن شده و در نتیجه باعث چسبندگی و سیمانی شدن خاک می شوند [۴]. گالاگر

امروزه جهت تثبیت خاک، علاوه بر افزودنی های سنتی، رویکرد استفاده از افزودنی هایی در ابعاد نانو نیز مورد توجه قرار گرفته است. هنگامی که ذرات ریزتر می شوند، سطح ویژه ذرات افزایش یافته و مقدار بیشتری اتم در سطح ذرات حضور می یابند که خود باعث افزایش قابلیت تبادل یونی و در نتیجه واکنش پذیری ذرات می شود. به دلیل واکنش پذیری بالای نانوذرات و خصوصیات درون ذره ای آنها از جمله تخلخل های درون ذره ای، کاربرد مقادیر بسیار اندکی

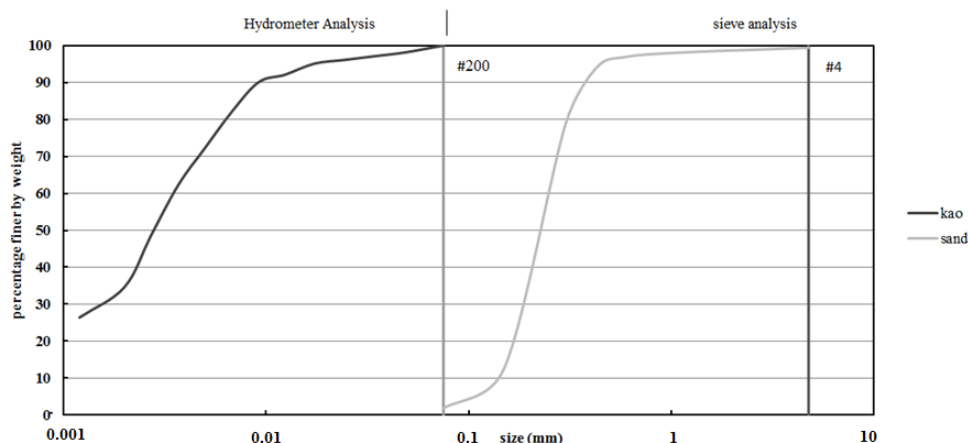
* نویسنده عهده دار مکاتبات: khodaparast@qom.ac.ir



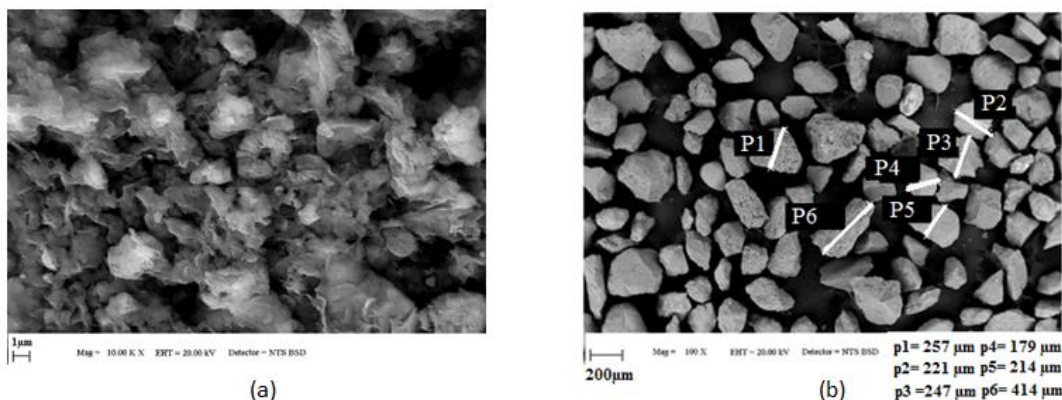
(۲۰۰۴)، بارتون و همکاران (۲۰۰۹)، چنگیزی و حداد (۲۰۱۵) به بررسی نانوذرات سیلیس بر خصوصیات خاکهای رسی پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که استفاده از درصدهای کم نانوسیلیس باعث افزایش چسبندگی خاکهای رسی می‌شود [۷-۵]. طاهها و طاهها (۲۰۱۲) با افزودن نانورس، نانوالومین و نانومس به خاک رسی، تأثیر این نوع نانومواد بر رفتار تورمی و انقباضی خاک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده کاهش کرنش انقباضی و تورمی با افزودن نانومواد می‌باشد [۸]. خالد و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثر نانوذرات کائولین بر روی خاک کائولینیت پرداخته و به این نتیجه رسیدند که استفاده از درصد کمی از نانوذرات کائولینیت باعث بهبود چشمگیر ویژگی‌های پایه‌ای و مهندسی خاک کائولینیت می‌شود [۹]. در بررسی انجام شده توسط آزم (۲۰۱۴) بر روی تأثیر نانوکامپوزیت‌های القایی بر دوام خاک رسی انبساطی، مشخص گردید که پس از زمان عمل‌آوری بلند مدت ۲۸ روز با استفاده از ۱۵٪ پلیمر، درصد انبساط خاک دچار ۹۰٪ کاهش شده؛ اما صلبیت خاک و مقاومت فشاری محصور نشده خاک به ترتیب ۴/۵ و ۲/۲ برابر افزایش یافته است [۱۰]. چنگیزی و حداد (۲۰۱۶) با بررسی نانوذرات رس بر ویژگی‌های مکانیکی خاک رسی به این نتیجه رسیدند که افزودن ذرات نانورس و الیاف شیشه به خاک رسی به ترتیب باعث کاهش و افزایش کرنش گسیختگی خاک می‌شوند [۱۱]. در بررسی انجام شده توسط چوببستی و همکاران (۲۰۱۶) مشخص گردید که افزودن نانوسیلیس به خاک ماسه‌ای سیمانته شده باعث افزایش مقاومت و مدول سکانت خاک می‌گردد [۱۱]. عبدالله و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی اثر نانوذرات رس بر خصوصیات مقاومتی و تورمی خاکهای رسی منبسط شونده پرداختند. نتایج بررسی آنها نشان‌دهنده افزایش اندک مقاومت و کاهش قابل توجه پتانسیل تورم خاکها با افزودن نانورس می‌باشد [۱۲]. اسوارامورسی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر نانوذرات سیلیس و آهک بر روی خاک رسی پرداخته که نتایج نشان‌دهنده تأثیر ۲۰٪ نانوذرات سیلیس بر مقاومت تک‌محوری نمونه‌های بهسازی شده با آهک می‌باشد [۱۳]. یاو و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثر نانوآکسید منیزیم بر روی خاک نرم تثبیت شده با سیمان پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که نانوآکسید منیزیم نقش مهمی در بهبود خصوصیات مقاومتی خاک نرم تثبیت شده با سیمان دارد [۱۴]. کلهر و همکاران (۲۰۱۹) اثر نانوذرات سیلیس بر خصوصیات مقاومتی خاک ریزدانه در شرایط سیکل ذوب و یخبندان را بررسی کردند که نتایج نشان‌دهنده

ترد شدن رفتار نمونه‌ها و کم شدن مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با نانوذرات سیلیس پس از دوره‌های سیکل ذوب و یخبندان می‌باشد [۱۵]. کریمی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری خاک رس تبریز پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده افزایش ۷۰ درصدی مقاومت نمونه‌ها پس از افزودن نانوسیلیس است [۱۶]. آنوج و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت و دوام خاک‌های رسی پرداختند. نتایج ایشان نشان‌دهنده بیشینه مقاومت و دوام خاک در ۷ درصد نانوسیلیس و ۰/۷ الیاف می‌باشد [۱۷]. کولاتیو و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر نانوسیلیس بر مقاومت خاک‌های رسی تثبیت شده با سیمان سفید پرداختند. نتایج حقیق نشان‌دهنده افزایش مقاومت در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان تا ۲ درصد نانوسیلیس می‌باشد که در این درصد نانوسیلیس نفوذپذیری نمونه‌ها ۴۵ درصد کاهش می‌یابد [۱۸].

با مروری بر تاریخچه نانوفناوری و بطور خاص کاربرد آنها در ژئوتکنیک، انگیزه اصلی محققین در پژوهش بر روی موادی با ابعاد و ساختار نانودر دهه‌های اخیر را می‌توان به تغییر خصوصیات و رفتار این‌گونه مواد با خصوصیات موادی در ابعاد بزرگتر نسبت داد. این ویژگی‌ها شامل خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی بوده و به طور کلی می‌توان گفت که مواد با ابعاد نانو، به حالت انفرادی یا مجتمع، از رفتارهای منحصر به فردی از قبیل سطح ویژه بسیار بالا و بارهای سطحی و مورفولوژی خاص آنها برخوردار بوده که باعث تأثیر بیشتر این ذرات در واکنش‌های شیمیایی نسبت به واکنش فیزیکی می‌شود. با مرور بر پیشینه پژوهش می‌توان فهمید که داده‌های تجربی و آزمایشگاهی در ارتباط با نانومواد و اثرات آنها بر رفتار ژئوتکنیکی خاک و توانایی آنها در اصلاح و تثبیت انواع خاک‌ها محدود بوده و این در حالی است که ظرفیت پژوهش و بررسی در این زمینه به مراتب فزاینده‌تر می‌باشد. از سوی دیگر در مطالعات بهسازی با نانومواد، تاکنون مطالعات ناچیزی بر روی نانوکربنات کلسیم از دیدگاه ژئوتکنیکی به عنوان تثبیت‌کننده انجام شده است. به دلیل پراکندگی وسیع کربنات کلسیم از دیدگاه زمین‌شناسی و نیز کاربرد کربنات کلسیم در روش‌های بهسازی خاک مانند تزریق و اختلاط عمیق؛ بررسی دقیق‌تر تأثیر افزودن این ماده (به‌ویژه در ابعاد نانو) بر روی خاک، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. با توجه به بررسی در پیشینه تحقیق می‌توان به این نتیجه رسید که عموم مطالعات در حوزه نانوفناوری، محدود بررسی‌های آزمایشگاهی



شکل ۱. دانه‌بندی خاک ماسه‌ای و رسی مورد استفاده در این تحقیق
Fig. 1. Particle size distribution of sandy and clay soils used



شکل ۲. تصویر SEM: (a) ذرات ماسه، (b) ذرات رس
Fig. 2. SEM micrographs of (a) sand particles, (b) clay

روی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه‌ای رس‌دار انجام شده است. بدین منظور خاک ماسه‌ای از سواحل دریای خزر در شمال ایران و همچنین خاک رسی (کائولینیت) از شرکت خاک چینی ایران تهیه شده است.

۱-۲-۱- خاک مورد استفاده

به منظور شناسایی خاکهای مورد استفاده در این تحقیق آزمایش‌های دانه‌بندی و همچنین تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) انجام شده است (شکل‌های ۱ و ۲). خاک رسی مورد استفاده در این تحقیق، بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد، در رده خاک CL قرار می‌گیرد و با توجه به آنالیز شیمیایی

بوده و بررسی توأمان غیرآزمایشگاهی و ریزساختاری در این حوزه انجام نشده است. لذا در این تحقیق ابتدا به بررسی آزمایشگاهی نانوذرات کربنات کلسیم بر روی خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار پرداخته شده است. در ادامه با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی هوشمند و الگوریتم ژنتیک با متد GMDH نیز رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی مقاومت تک‌محوری خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار تثبیت شده با نانوکربنات کلسیم ارائه خواهد شد. همچنین با بررسی‌های ریزساختاری در این تحقیق دلایل تغییرات در مقاومت نمونه‌ها مشخص خواهد گردید.

۲- روش تحقیق

۱-۲- مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانوکربنات کلسیم بر

1 Scanning Electron Microscopy

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی خاک رس
Table 1. Chemical analysis of clay soil

محصولات	درصد ذرات
SiO ₂	۶۴
Al ₂ O ₃	۲۴
Fe ₂ O ₃	۱
TiO ₂	۰/۰۵
L.O.I	۱۰
سایر محصولات	۱/۵

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در تحقیق بر طبق استاندارد ASTM

Table 2. Physical properties of soils used according to ASTM standard

مشخصات خاک	توضیحات	SC1	SC2	SC3
FC (%)	درصد ریزدانه	۱۰	۲۰	۳۰
G _s (gr/cm ³)	وزن مخصوص	۲/۶۶	۲/۶۴	۲/۶۲
γ _d (gr/cm ³)	چگالی خشک حداکثر	۲/۰۴	۲/۰۱	۱/۹۹
LL (%)	حد روانی	۱۸	۱۹	۲۲
PL (%)	حد خمیری	۱۴	۱۴	۱۶
PI (%)	شاخص خمیری	۴	۵	۶
OWC (%)	درصد رطوبت بهینه	۱۲	۱۴	۱۷

SC₁، SC₂ و SC₃ (جدول ۲) با درصدهای مشخصی از نانوکربنات کلسیم (۳/۰، ۷/۰، ۱/۱ و ۱/۵ درصد) و تهیه مخلوط همگن، خاک در ۵ لایه، درون قالب استوانه‌ای متراکم شده است. میزان انرژی وارده بر هر لایه، تقریباً ثابت و برابر با انرژی کوبیدن چکش استوانه‌ای به وزن ۲/۵ کیلوگرم و تعداد کوبش ۲۵ ضربه از فاصله‌ای حدود ۵ سانتی‌متر از سطح خاک بوده است (ASTM D۲۱۶۶). در نهایت، پس از خارج نمودن نمونه از قالب و توزین آن، ابعاد نمونه توسط کولیس اندازه‌گیری شده است. شایان ذکر است که به منظور بررسی اثر نانوکربنات کلسیم، آماده‌سازی و اختلاط نمونه‌ها می‌بایست در شرایطی انجام می‌شد که بهترین شرایط پخش شدگی نانو در خاک فراهم شود. بدین منظور ابتدا آب و ذرات نانوکربنات کلسیم در درصدهای ۳/۰، ۷/۰، ۱/۱ و ۱/۵ به طور مجزا در یک مخلوط‌کن با سرعت بالا (۱۰۰۰ rpm) به صورت دوغاب در آمده و سپس به توده خاک اضافه شد. انتخاب درصد نانوذرات مورد استفاده به دلیل میزان واکنش پذیری بالای این ذرات بوده که در مطالعات سایر محققین نیز مورد تأکید قرار گرفته است [۱ و ۲]. جهت بررسی تأثیر نانوکربنات

انجام شده روی این خاک، عناصر موجود در این خاک عمدتاً شامل Si، O و Al می‌باشد (جدول ۱).

با توجه به نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای (شکل ۱) و تصویر ریزساختاری این ذرات (شکل ۲a) می‌توان دریافت که اندازه متوسط دانه‌های خاک ماسه‌ای (D_{۵۰}) برابر ۲۱/۰ میکرون در عکس (SEM) می‌باشد. ساختار خاک رسی مورد استفاده در این پژوهش بصورت مجتمع است.

در این مطالعه، به منظور بررسی اثر نانوذرات کربنات کلسیم بر روی خاک ماسه رسدار، ۳ نوع خاک ماسه رس‌دار با درصدهای مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب با نام‌های SC_۱، SC_۲ و SC_۳ مورد بررسی قرار گرفته است که مشخصات فیزیکی این سه نوع خاک به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است. اصولاً با افزایش میزان درصد رس در خاک ماسه‌ای، رفتار خاک از حالت دانه‌ای به حالت ریزدانه تغییر یافته و تأثیر میزان ریزدانه را می‌توان در نتایج مشاهده نمود. همچنین از آنجایی که امکان انجام آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه‌های ماسه خالص وجود نداشت، نمونه‌های خاک ماسه‌ای با حداقل ۱۰٪ رس مخلوط شده‌اند. با توجه به مطالعات پیشین [۱۹] و با در نظر گرفتن اینکه نانوکربنات کلسیم مورد استفاده در این تحقیق احتمالاً با بخش رسی خاک واکنش خواهد داد، درصدهای مختلفی از رس برای بررسی میزان واکنش‌پذیری این خاک با نانوکربنات کلسیم مورد بررسی انتخاب شده‌اند. البته از دیدگاه دیگر می‌توان بخش رسی مورد استفاده در این تحقیق را به عنوان متغیر تأثیرگذار در روند تغییر مقاومت خاک ماسه‌ای در نظر گرفت.

۲-۱-۲- نانوکربنات کلسیم

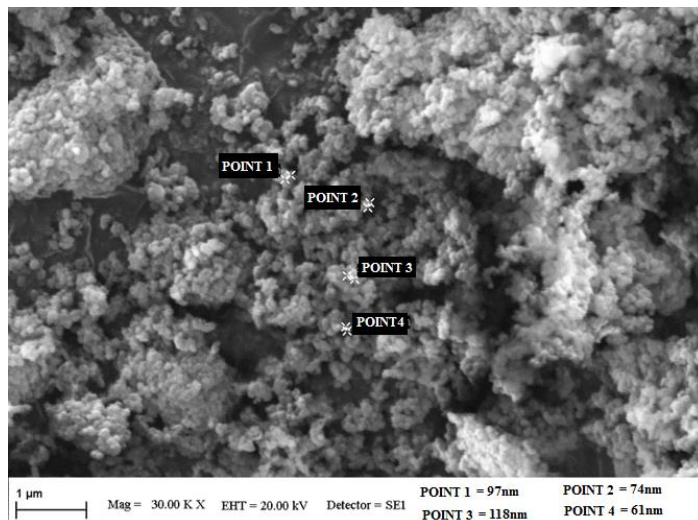
همان‌طور که پیشتر ذکر شد، نانوماده مورد استفاده در این تحقیق، نانوکربنات کلسیم (CaCO_۳) می‌باشد. مشخصات نانوکربنات کلسیم مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) از نانوکربنات کلسیم در شکل ۳ ارائه شده است که در این شکل ساختار کروی این ذرات به وضوح قابل مشاهده است.

۲-۱-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

جهت تهیه نمونه‌ها پس از مخلوط نمودن خاک‌ها (یعنی نمونه‌های

جدول ۳. مشخصات نانوکربنات کلسیم مورد استفاده در این مطالعه
Table 3. Specifications of nano-CaCO₃ used in this study

درجه خلوص (%)	اندازه ذرات (nm)	سطح ویژه (m ² /gr)	رنگ	شکل ذرات	چگالی حجمی (gr/cm ³)
۹۹٪	۸۰-۱۰	۸۰-۶۰	سفید	کروی	۱/۳۰



شکل ۳. تصویر SEM از نانوذرات کربنات کلسیم
Fig. 3. SEM micrographs of nano-CaCO₃ particles



شکل ۴. (a) نمونه ساخته شده به روش تراکم مرطوب؛ (b) نمونه خاک رس مورد استفاده در تحقیق
Fig. 4. a) Sample made by wet compaction method, b) clay samples used in research

برای آزمایش تک‌محوری به ترتیب ۴ و ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. شکل ۴ نمونه آماده شده جهت آزمایش تک‌محوری را نشان می‌دهد که به روش تراکم مرطوب تهیه شده است. با توجه با اینکه نمونه‌ها در شرایط اشباع نمی‌باشند، پدیده کشش آب (Water Suction) می‌تواند باعث افزایش تنش مؤثر و در نهایت مقاومت نمونه‌ها شود. اما با توجه به سرعت انجام آزمایش (۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه) و عدم وقوع تبخیر

کلسیم بر روی مشخصات مقاومتی خاک‌ها، در مجموع ۷۲ نمونه تهیه شده و به منظور اعمال زمان عمل‌آوری و در عین حال حفظ رطوبت نمونه‌ها، در محفظه نایلونی نگهداری شده‌اند. سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مطابق با استاندارد ASTM C۶۱۷ بر روی این نمونه‌ها و نمونه‌های بدون افزودنی انجام شده است. قطر و ارتفاع نمونه‌های ساخته شده

تحلیل کل سیستم نیاز می‌باشد، در روش شبکه عصبی اجزاء سیستم ناشناخته بوده و فقط ورودیها و خروجیها شناسایی میشوند. نتیجه‌ی این شناسایی با ایجاد یک تابع ریاضی تقریبی بین داده‌های ورودی و خروجی سیستم همراه است که همان مدل سیستم می‌باشد. به طور کلی برای مدل کردن سیستم های پیچیده‌های که شامل مجموعه‌ای از داده‌ها با چندین ورودی و یک خروجی می‌باشند می‌توان از چند جمله‌ای 'VKG' استفاده نمود (رابطه (۱)).

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \dots \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

که در آن $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردارهای ورودی، y خروجی مدل و a_i ضرایب چند جمله‌ای می‌باشند. این چند جمله‌ای بر اساس ترکیب دوتایی از داده‌های ورودی شبکه ساخته می‌شوند. شبکه عصبی GMDH یک ساختار خودسازمانده، یک‌سویه و چندلایه بوده که هر لایه در این شبکه از یک یا چند واحد پردازشگر ساخته می‌شود و هر یک از آنها ساختار مشابه داشته و از دو ورودی و یک خروجی ساخته می‌شوند. این واحدها نقش اجزای سازنده مدل را به عهده داشته و به شکل یک چند جمله‌ای درجه دوم فرض می‌شوند (رابطه (۲)).

$$\hat{y} = G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_j^2 + a_5 x_i x_j \quad (2)$$

پارامتر مجهول در الگوریتم GMDH ضرایب چند جمله‌ای می‌باشند که در رابطه (۲) ذکر شده است. جهت محاسبه مقدار خروجی y_i برای هر بردار ورودی $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ بر اساس رابطه (۲) باید میانگین مربعات خطا مطابق با رابطه (۳) به حداقل برسد.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - G_i())^2}{M} \rightarrow \min \quad (3)$$

با استفاده از مشتق جزئی رابطه (۳) و جایگذاری رابطه (۲) در این مشتق، معادله ماتریسی مطابق با رابطه (۴) بدست می‌آید.

در حین انجام آزمایش میتوان از این اثر صرف‌نظر نمود. از سوی دیگر در این مطالعه درصد رس متغیر رس بوده و در درصد رس بالای ۲۰ درصد با توجه افزایش چسبندگی، رفتار نمونه‌های آماده شده به رفتار خاک چسبنده نزدیک شده و در نمونه‌های با ۳۰ درصد رس تقریباً رفتار خاک چسبنده را پیدا کرده است، به طوری که حتی شکست نمونه‌ها در کرنش‌های بسیار بالا رخ داده است. از آنجایی که یقیناً بخش نانوذرات با بخش رسی واکنش داده و منجر به افزایش چسبندگی می‌گردد، آزمایش تک‌محوری معیار مناسبی برای بررسی این تغییرات می‌باشد و لذا از این آزمایش استفاده گردیده است.

۲-۲- بررسی‌های غیرآزمایشگاهی

در ادامه‌ی تحقیق، با استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف خاک ماسه‌ای رس‌دار و بر اساس الگوریتم GMDH-GA رابطه‌ای تجربی به منظور پیش بینی مقاومت تک محوری این خاکها ارائه می‌شود. در این خصوص لازم به ذکر است که یکی از انواع شبکه عصبی مصنوعی که کارایی آنها در مدل سازی و پیش بینی اثبات شده است، شبکه‌های خودسازمانده هستند. یک از انواع این شبکه‌های خودسازمانده شبکه‌ای، چندجمله‌ای بوده که نتیجه ترکیب روشهای رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی است. این الگوریتمها به چند دسته تقسیم می‌شوند که یکی از آنها الگوریتم GMDH می‌باشد. هدف اصلی این روش، ساختن تابعی براساس تابع انتقال درجه دوم است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل چهار پارامتر درصد نانو (N)، درصد ماسه (S)، درصد رس (C) و زمان عملآوری (t) می‌باشد که از این پارامترها به عنوان داده‌های ورودی مدل شبکه عصبی استفاده شده و پارامتر هدف مدل شبکه عصبی، مقاومت فشاری تک محوری خاک است. لذا با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مورد بررسی و با در نظر گرفتن متغیرهای تحقیق به ارائه رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری برای خاکهای ماسه‌ای رس‌دار تثبیت شده با نانوکربنات کلسیم پرداخته خواهد شد.

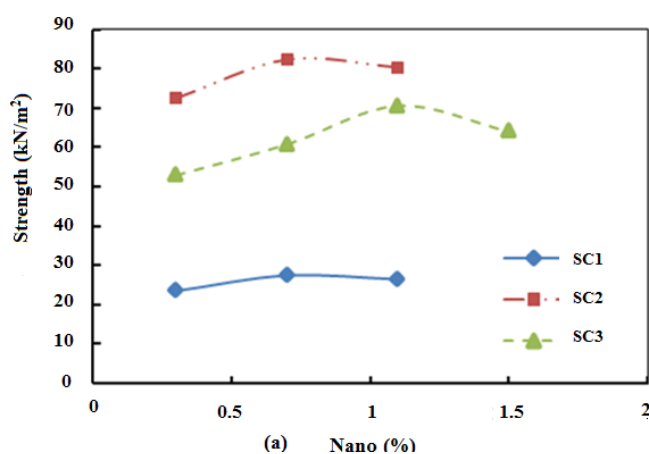
۲-۲-۱- شبکه عصبی GMDH

برخلاف مدل‌سازی تحلیلی و نظری که در آنها تمام اجزاء سیستم شناخته شده بوده و فقط به برقراری ارتباط میان اجزا و

جدول ۴. محدوده داده‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی مقاومت تک‌محوری خاک

Table 4. Data range used for uniaxial compression strength prediction

پارامترها	داده‌های آزمایشگاهی
نانو (%)	۱/۱-۰/۷-۰/۳
زمان عمل‌آوری (day)	۲۸-۱۴-۷-۰
ماسه (%)	۹۰-۸۰-۷۰
رس (%)	۳۰-۲۰-۱۰



شکل ۵. تغییرات مقاومت حداکثر خاک‌های تثبیت شده به ازای درصد‌های مختلف نانو در زمان عمل‌آوری ۷ روزه

Fig. 5. Ultimate strength of stabilized soils with different nanoparticle contents at curing times of 7 days

آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری) در این بخش ارائه شده است. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری حداکثر برای درصد‌های مختلف نمونه‌های بهسازی شده با نانوکربنات کلسیم برای خاک‌های مختلف SC^۱، SC^۲ و SC^۳ در زمان‌های مختلف عمل-آوری به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که پیشتر ذکر شده است، آماده‌سازی نمونه‌ها در درصد تراکم حداکثر و بر اساس وزن مخصوص خشک حداکثر بوده است.

۱-۳-۱- تغییرات مقاومت حداکثر نمونه‌های مورد بررسی

تغییرات مقاومت حداکثر نمونه‌های خاک SC^۱، SC^۲ و SC^۳ برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است. تفاوت بین مقاومت حداکثر در نمونه‌های تثبیت شده، نشان می‌دهد که تأثیر افزودنی نانوکربنات کلسیم بر روی نمونه خاک با ۲۰٪ ریزدانه

$$Aa = Y \quad (۴)$$

در معادله (۴)، $Y = \{y_1, \dots, y_m\}^T$ و $a = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$

بوده و ماتریس A از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ 1 & x_{Mp} & x_{Mq} & x_{Mp}x_{Mq} & x_{Mp}^2 & x_{Mq}^2 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

برای حل معادله ماتریسی ذکر شده در رابطه (۴) از تکنیک کمترین مجذور از تحلیل رگرسیون چندگانه استفاده می‌شود که در آن مجهول a از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (۶)$$

که در آن A^T ترانپوز ماتریس A می‌باشد.

در طراحی شبکه عصبی GMDH، هدف جلوگیری از رشد واگرایی شبکه و نیز مرتبط کردن شکل و ساختار شبکه به یک یا چند پارامتر عددی است؛ به گونه‌ای که با تغییر این پارامتر ساختار شبکه نیز تغییر کند. روش‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد خود در پیدا کردن مقادیر بهینه و امکان جستجو در فضاهای غیرقابل پیش‌بینی، کاربرد وسیعی در مراحل مختلف طراحی شبکه‌های عصبی دارند. در این مقاله برای طراحی شکل شبکه عصبی و تعیین ضرایب آن، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

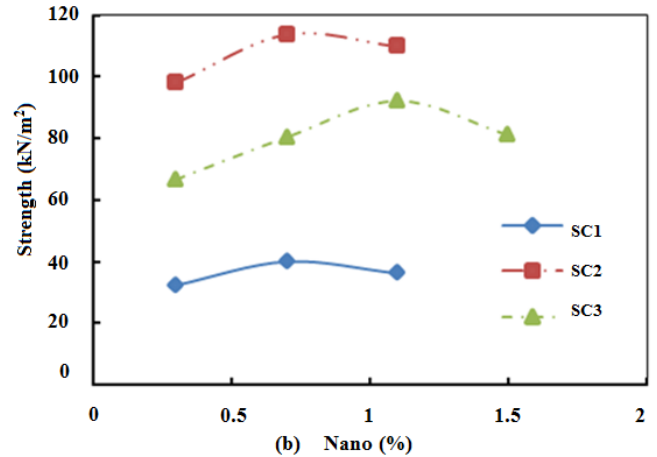
در تحقیق حاضر با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و با در نظر گرفتن متغیرهای تحقیق، رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه‌ای رس‌دار ارائه می‌شود. بدین منظور چهار متغیر درصد نانو (N)، درصد ماسه (S)، درصد رس (C) و زمان عمل‌آوری (t) به عنوان داده‌های ورودی به الگوریتم GMDH اعمال و تابع پیش‌بینی مقاومت فشاری خاک (q_u) استخراج خواهد شد. محدوده داده‌های ورودی به شبکه عصبی در جدول ۴ نشان داده شده است.

۲- نتایج و بحث

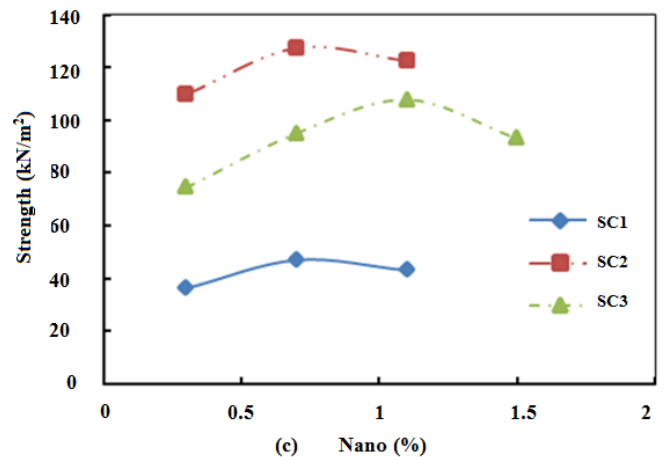
۱-۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

به منظور نشان دادن تأثیر افزودنی نانوکربنات کلسیم بر روی رفتار مقاومتی خاک‌های ماسه‌ای دارای ریزدانه چسبیده، نتایج

نانوکربنات کلسیم به خاک ریزدانه، مقاومت خاک در هفته‌های اولیه عمل‌آوری تقریباً بیشترین نرخ افزایش را داشته و پس از آن نرخ افزایش مقاومت کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیشتر نیز بیان گردید مقدار درصد بهینه افزودنی برای خاک‌های SC^۱ و SC^۲ برابر ۰/۷ درصد و برای خاک SC^۳ برابر ۱/۱ درصد است. دلیل این تفاوت را می‌توان به مقدار خاک رس موجود در نمونه‌ها نسبت داد. هرچه مقدار خاک رس افزایش یابد، با توجه به افزایش میزان ذرات واکنش‌پذیر، درصد بیشتر افزودنی برای تأثیرگذاری بر روی ساختار خاک مورد نیاز بوده و این مسأله برای نمونه خاک SC^۳ با ۳۰ درصد رس مشهود می‌باشد. همچنین، این نمودارها نشان می‌دهند که خاک SC^۲ (با ۸۰ درصد ماسه و ۲۰ درصد رس) بیشترین مقاومت را در بین نمونه‌های حاکی از خود نشان داده است. این موضوع را احتمالاً می‌توان به درصد رس و پرشدگی حداکثری فضای خالی بین دانه‌های ماسه‌ای در این نمونه‌ها نسبت داد. به عبارت دیگر، خاک رس بیشترین مشارکت را در پر نمودن فضای خالی موجود بین دانه‌های ماسه داشته و موجب فاصله گرفتن دانه‌ها از یکدیگر نشده و کمترین تأثیر منفی را بر روی اصطکاک بین دانه‌های خاک داشته است. تفاوت بین مقاومت حداکثر نمونه تثبیت نشده (بدون افزودنی) و نمونه‌های تثبیت شده نشان می‌دهد که تأثیر افزودنی نانوکربنات کلسیم بر روی نمونه خاک با ۲۰ درصد رس (یعنی SC^۲)، از سایر نمونه‌ها بیشتر است و سیمان‌تاسیون ناشی از این افزودنی، تأثیر بیشتری بر روی پارامترهای خاک دارد. نحوه تشکیل مواد سیمانته که باعث افزایش چسبندگی و در نتیجه افزایش مقاومت خاک می‌گردد، در بخش ریزساختاری ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش میزان رس در نمونه‌های مورد بررسی، کرنش گسیختگی افزایش یافته که به دلیل افزایش خاصیت پلاستیک ذرات خاک با افزودن خاک رسی می‌باشد. همچنین با افزودن نانوکربنات کلسیم، کرنش گسیختگی خاک در تمامی نمونه‌ها کاهش یافته که میزان روند کاهشی در کرنش گسیختگی برای خاک SC^۱ از سایر حالات بیشتر می‌باشد و این روند تغییر می‌تواند به دلیل درصد ماسه بالا در این نمونه‌ها باشد. همچنین به طور کلی می‌توان بیان نمود که با افزودن نانوکربنات کلسیم به خاک و واکنش با ذرات آن و در نتیجه افزایش سیمان‌تاسیون خاک، این نمونه‌ها رفتار نسبتاً تردتری در مقایسه با خاک طبیعی نشان می‌دهند و شکل‌پذیری خاک به میزان کمی کاهش می‌یابد. همچنین



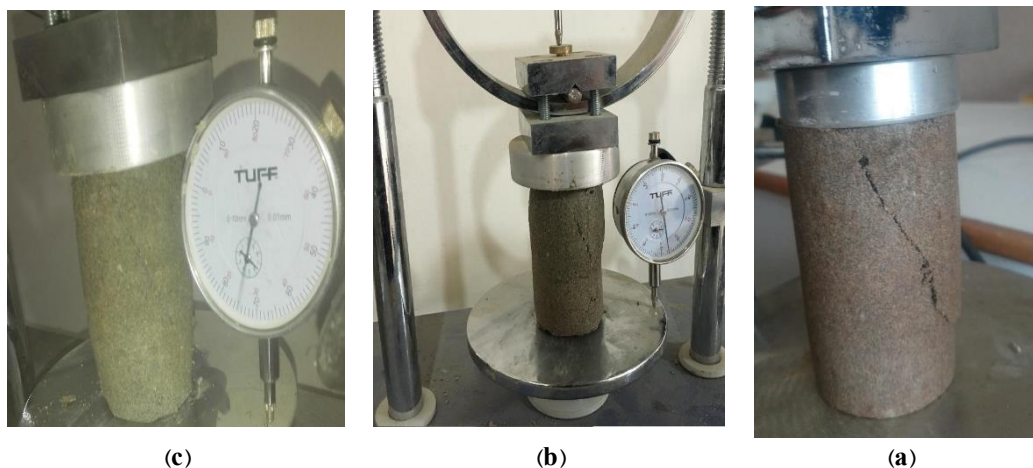
شکل ۶. تغییرات مقاومت حداکثر خاک‌های تثبیت شده به ازای درصد‌های مختلف نانو در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه
 Fig. 6. Ultimate strength of stabilized soils with different nanoparticle contents at curing times of 14 days



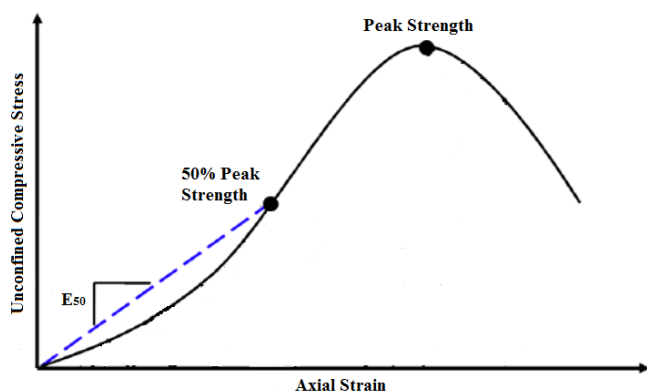
شکل ۷. تغییرات مقاومت حداکثر خاک‌های تثبیت شده به ازای درصد‌های مختلف نانو در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه
 Fig. 7. Ultimate strength of stabilized soils with different nanoparticle contents at curing times of 28 days

(یعنی SC^۲)، بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده و سیمان‌تاسیون ناشی از این افزودنی، تأثیر بیشتری بر روی پارامترهای این خاک دارد. همچنین، به ازای افزایش زمان عمل‌آوری، درصد افزایش مقاومت حداکثر خاک تثبیت شده بیشتر می‌گردد که نشان‌دهنده تأثیر عمل‌آوری و گسترش بهسازی با افزایش زمان است.

با توجه به شکل‌های ۵ تا ۷، با افزایش زمان عمل‌آوری از ۱۴ به ۲۸ روز همچنان افزایش مقاومت در نمونه‌های خاک مشاهده می‌گردد اما این روند سرعت چندانی نداشته و بیشترین نرخ افزایش در ۱۴ روز اولیه بدست می‌آید. این موضوع نشان می‌دهد که با افزودن



شکل ۸. مکانیزم شکست در نمونه‌های با درصد مختلف رس؛ (a) ۱۰ درصد رس، (b) ۲۰ درصد رس، (c) ۳۰ درصد رس
Fig. 8. Fracture mechanism in samples with different percentages of clay a) 10% clay, b) 20% clay, and c) 30%



شکل ۹. مدول الاستیسیته سکانت در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری
Fig. 9. Secant modulus in UCS test

در این نمونه‌ها شده است. اضافه نمودن ۰/۷ درصد از نانوکربنات کلسیم به خاک باعث بیشترین تغییر در مدول الاستیسیته در این نمونه‌ها شده و بعد از آن افزودن بیشتر باعث کاهش مدول سکانت خواهد شد. تغییر در افزایش مدول سکانت خاک پس از افزودن نانوکربنات کلسیم را می‌توان به دلیل ترد شدن ذرات و افزایش مقاومت آنها به دلیل تشکیل فازهای کریستالی کلسیم سیلیکات هیدرات نسبت داد که توأمان باعث افزایش مقاومت و تردشدگی می‌گردند و در نهایت منجر به افزایش مدول سکانت می‌گردد. البته رفتار نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه نسبتاً متفاوت بوده و تفاوت سختی خاک‌های تشبیت شده کاملاً مشهود می‌باشد.

در زمان عمل‌آوری ۷ روزه، بیشترین مقدار مدول الاستیسیته برای خاک SC₂ بدست آمده و با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸

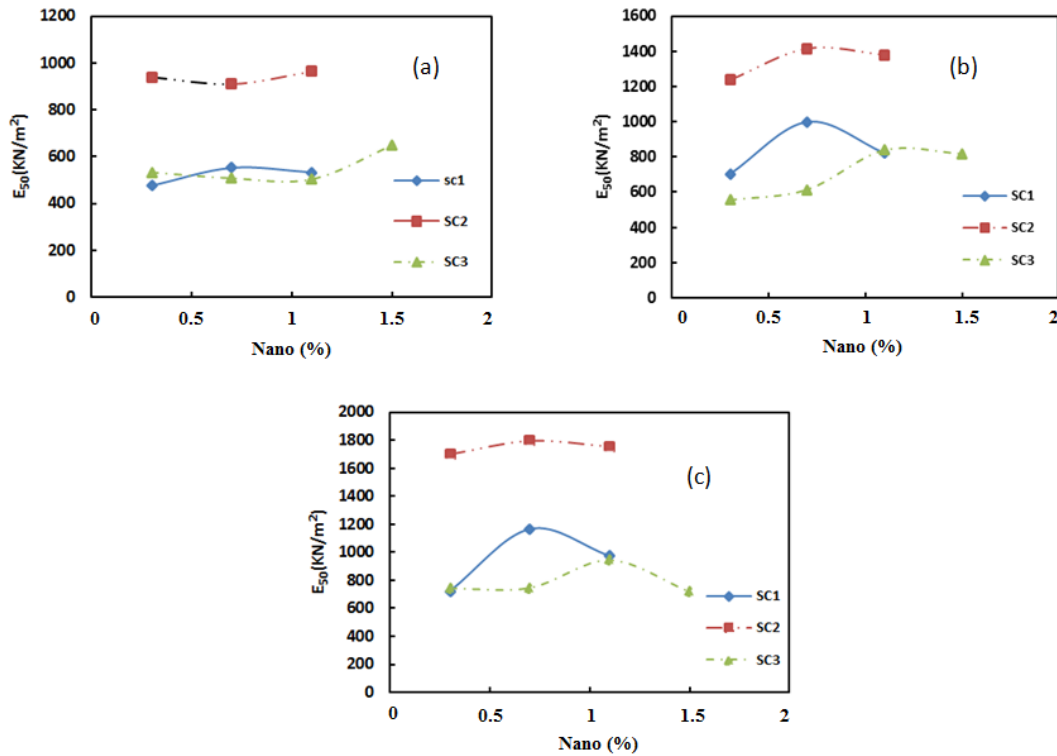
شکل ۸ مکانیزم شکست خاک در درصدهای مختلف رس را نشان میدهد. با توجه به این شکل و رفتار دانه‌های خاک در نمونه حاوی ۱۰ درصد رس، شکست نمونه‌ها با زاویه بیشتر در سطح جداشدگی نمونه اتفاق افتاده که نشان‌دهنده چسبندگی کمتر در این نمونه‌ها است. با توجه میزان ماسه و رس متفاوت در نمونه‌ها، با افزایش میزان رس زاویه شکست نمونه‌ها ملایم‌تر شده و با افزایش درصد رس رفتار نمونه‌ها تغییر کرده و گسیختگی نمونه‌ها به صورت شکست از بالا و پایین نمونه همراه با تورم شده است.

۳-۱-۲ بررسی تغییرات مدول سکانت خاک (E_{50})

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در این مطالعه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر طبق استاندارد ASTM D۲۱۶۶ انجام شده و سرعت بارگذاری بر نمونه‌ها ۱/۱ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. همچنین مدول الاستیسیته سکانت (E_{50}) برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه شده است. با توجه به شکل ۹، با داشتن نمودار تنش- کرنش و بدست آوردن تنشی معادل ۵۰ درصد تنش حداکثر می‌توان مدول سکانت خاک را بدست آورد (خط آبی در شکل ۹).

شکل ۱۰ تغییرات مدول سکانت برای درصدهای مختلف نانو در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت برای خاک‌های SC₁، SC₂ و SC₃ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از این نمودار مشخص است اضافه نمودن درصد کمی از نانوکربنات کلسیم به این خاک‌ها باعث افزایش مدول سکانت



شکل ۱۰. تغییرات مدول سکانت به ازای درصدهای مختلف نانو برای نمونه‌های حاوی کائولینیت در زمان‌های عمل‌آوری (a) ۷ روزه، (b) ۱۴ روزه، (c) ۲۸ روزه
 Fig. 10. Secant modulus specimens containing kaolinite and different nano- CaCO₃ contents at curing times of- (a) 7 days, (b) 14 days, and (c) 28 days

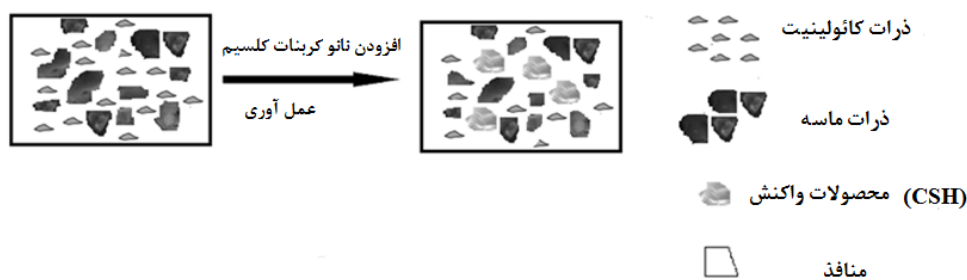
جدول ۵. مقایسه نتایج مقاومت تک‌محوری تحقیق حاضر با نتایج سایر محققین

Table 5. Comparison of the results of uniaxial compressive strength of the present study with the results of other researchers

درصد افزودنی	مقاومت ماسه رس‌دار تثبیت شده با نانورس [۲۱] kPa	مقاومت رس کائولینیت تثبیت شده با نانورس [۲۲] kPa	تحقیق حاضر خاک SC2
بدون نانو	۲۸	۲۰۰	۵۶
۰/۳	-	۲۶۰	۱۲۶
۰/۷	-	-	۱۳۰
۱/۱	-	-	۱۲۵
۱/۵	۳۳	۳۰۵	-
۲/۵	۵۸	-	-

خاک کاهش می‌یابد. نرخ تغییر مدول سکانت در زمان ۱۴ روز بیشترین سرعت را داشته و پس از آن سرعت تغییر کاهش یافته است. جدول ۴ تحقیقات سایر محققین با بررسی‌های این تحقیق را مورد مقایسه قرار می‌دهد. تحقیقات انجام شده بر روی مقاومت تک‌محوری خاکهای تثبیت شده با نانومواد مختلف بوده که با توجه به تحقیقات انجام شده که در جدول ۵ ارائه شده است، می‌توان فهمید با وجود درصدهای کمتر نانوکربنات کلسیم، درصد افزایش بیشتری در مقاومت نسبت به نانورس

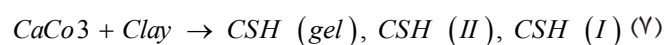
روز، تشکیل فازهای کریستالی و سیمان‌تاسیون برای تمامی نمونه‌ها افزایش یافته و در نتیجه مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. با توجه به نمودارهای ارائه شده، با افزودن نانوکربنات کلسیم به خاک بیشترین تغییرات در سختی خاک در حالات مختلف در نمونه‌های خاک SC2 رخ داده که می‌تواند به دلیل تأثیر بیشتر نانوذرات در سیمان‌تاسیون در این خاک‌ها و در نتیجه، افزایش چسبندگی در این خاک‌ها باشد. همچنین با افزایش درصد رس و زمان عمل‌آوری، روند افزایش مدول سکانت در



شکل ۱۱. شماتیک فرآیند اختلاط نانو کربنات کلسیم و خاک ماسه رس دار
 Fig. 11. Schematic representation of mixing of nano-CaCO₃ and sc soil

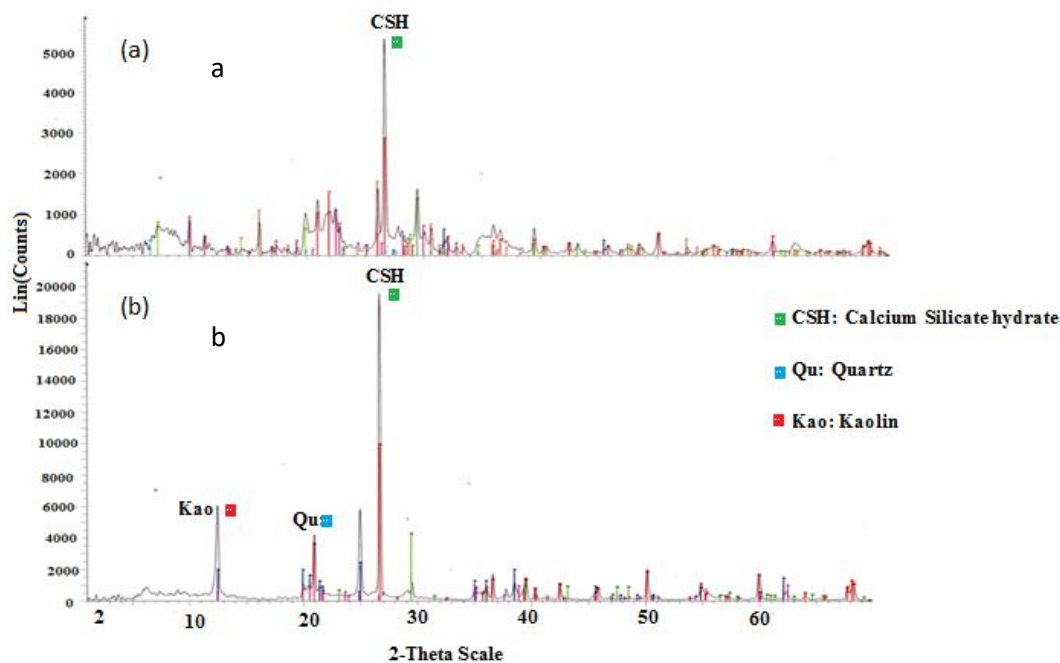
مشاهده شده است. نمونه شکل ۱۲ نتایج حاصل از آنالیز فازی نمونه SC^۲ در درصد بهینه نانو کربنات کلسیم (۰/۷ درصد) و نمونه بدون نانو کربنات کلسیم را نشان میدهد. نقاط نشان داده شده در نمودار مربوط به محصولات حاصل از واکنش هیدرات کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) و ترکیبات جانبی کوارتز و کائولن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. دو نقطه اوج اصلی در زاویه های ۲۵/۳° و ۲۶/۹° مربوط به صفحات کریستالی (۲۰۵) و (۰۲۳) از فاز کریستالی CSH است. سایر نقاط اوج تفرقی موجود در زوایای ۲۱°، ۳۹°، ۵۰° و ۶۰° درجه مربوط به فاز کریستالی کوارتز بوده و نقاط اوج تفرقی موجود در زوایای ۲۰°، ۲۵° و ۳۵° مربوط به فاز کریستالی کائولن می باشد. الگوی پراش اشعه ایکس در نمونه بهسازی شده با نانو کربنات کلسیم، حضور فاز CSH را در این زوایا تأیید می کند. شدت نقاط اوج موجود در نمونه، حاکی از درصد بالای کریستاله شدن در نمونه های حاوی نانوذرات می باشد. تفاوت شدت نقاط ایجاد شده در دو حالت، حاکی از افزایش روند کریستالیزه شدن ذرات با افزودن نانو شده که منجر به افزایش مقاومت در این حالت خواهد شد. تفاوت در میزان تشکیل CSH در حالت پس از افزودن نانو کربنات کلسیم به حالت بدون نانو نشان دهنده افزایش ۴ برابری محصولات واکنش پس از افزودن نانو است که باعث افزایش چسبندگی ذرات می گردد. شکل ۱۳ تصویر SEM از خاک رس و خاک رس بهسازی شده با نانو کربنات کلسیم را نشان می دهد. همان طور که مشخص است، در حالت بدون استفاده از نانوذرات (شکل a۱۳)، ذرات از پیوستگی و اتصال کمی برخوردار بوده و خلل و فرج در سطح نمونه ها مشهود است. با افزودن نانوذرات کربنات کلسیم به خاک، همان طور که از شکل b۱۳ مشخص است، اضافه کردن این ذرات به خاک باعث پرشدگی بهتر خلل و فرج در نمونه ها شده و چسبندگی و اصطکاک بین ذرات را افزایش می دهد.

۲-۳- نتایج ریزساختاری
 در نتیجه افزودن نانو کربنات کلسیم به خاک در حضور خاک رس، واکنش های مختلفی به وقوع می پیوندد. در این خصوص یون کلسیم موجود در این ذرات به وسیله یون هایی مانند سدیم، هیدروژن و پتاسیم جایگزین می شوند. این واکنش به سرعت باعث کاهش خصوصیات پلاستیسیته، بهبود مقاومت و تغییر در خصوصیات نفوذ پذیری خاک می شود. هنگامی که اندازه ذرات کربنات کلسیم ریزتر شده و در محدوده نانو قرار می گیرند، واکنش پذیری این ذرات افزایش یافته و مقدار مصرف این نوع افزودنی جهت دست یابی به هدف مورد نظر (به عنوان مثال؛ در این مطالعه، بهبود مقاومت فشاری و ویژگی های وابسته به آن) کاهش مییابد. همان طور که پیشتر ذکر شد، با اضافه کردن کربنات کلسیم به خاک محتوی رس، واکنش های مختلفی از جمله واکنش کربنات کلسیم - رس مطابق رابطه (۷) به وقوع می پیوندد.

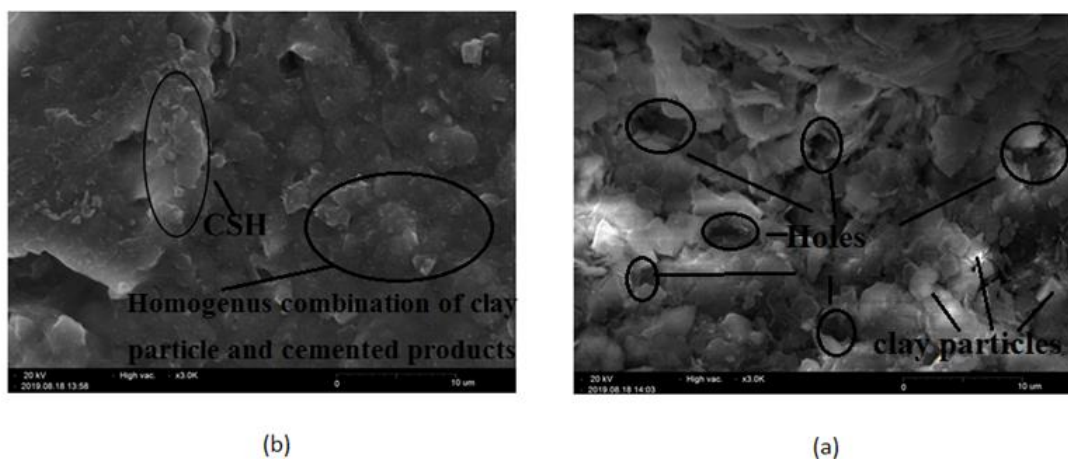


که در آن، CSH (gel) کلسیم سیلیکات هیدرات، CSH (I) کلسیم سیلیکات هیدرات هیدروگارت و CSH (II) تترا-کلسیم آلومینات هیدرات (C_۴AlH_{۱۲}) می باشند. از طرفی با توجه به تأثیر زمان عملآوری بر ویژگی های خاک، ممکن است تغییراتی در محصولات واکنش ایجاد شود و با ادامه روند واکنش پذیری، مقاومت بیشتری حاصل می شود. شماتیک فرایند اختلاط نانو کربنات کلسیم با خاک مورد آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

در این مطالعه، به منظور تعیین ساختار فازی و میزان کریستاله شدن نمونه ها، آنالیز XRD روی نمونه ها انجام شده است. به عنوان



شکل ۱۲. مقایسه نتایج آنالیز XRD: (a) نمونه خاک بدون نانو، (b) نمونه بهسازی شده با نانوکربنات کلسیم
 Fig. 12. Comparison of xrd patterns- (a) additive-free specimen, (b) soil specimen improved with nano- CaCO_3

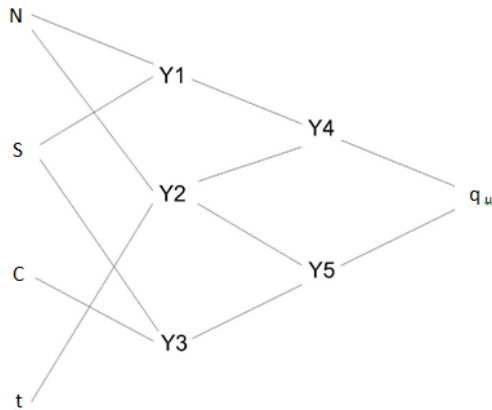


شکل ۱۳. تصویر SEM از خاک رس - نانوکربنات کلسیم؛ (a) خاک کائولینیت، (b) خاک کائولینیت بهسازی شده با نانوکربنات کلسیم
 Fig. 13. SEM micrographs of clay with nano- CaCO_3 - (a) kaolinite, (b) kaolinite and nano- CaCO_3

تک محوری خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی GMDH، ۳۳ داده موجود که از بررسی‌های آزمایشگاهی بدست آمده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. داده‌های ورودی به دو گروه داده‌های آموزشی و داده‌های تست تقسیم شده‌اند. از تعداد ۳۳ داده آزمایشگاهی بدست آمده در مرحله قبل، ۲۶ نمونه جهت طراحی ساختار GMDH و ۷ نمونه جهت بررسی عملکرد شبکه در پیش‌بینی بکار رفته است. به منظور بدست آوردن چند جمله‌ای مناسب جهت پیش‌بینی مقاومت

همچنین پس از افزودن نانوکربنات کلسیم، تشکیل یک بافت بزرگتر به دلیل افزایش چسبندگی در نمونه‌ها با گذر زمان رخ داده که در لبه‌ی اتصال این اجسام خطوطی از ماده تشکیل سیمانته به عنوان عامل اتصال و همگن شدن بیشتر مشاهده می‌گردد.

۳-۳- پیش بینی مقاومت فشاری با روش GMDH همان‌طور که پیشتر ذکر شد، جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری



شکل ۱۴. معماری شبکه GMDH به منظور پیش‌بینی مقاومت تک‌محوری
Fig. 14. Architecture of gmdh neural network used for predicting uniaxial strength

تابع هدف مطابق شکل ۱۵ استخراج می‌گردد. با توجه به افزایش مقاومت در نمونه‌های تثبیت شده با نانوکربنات کلسیم به مرور زمان، در تحقیق حاضر سعی بر آن شده است که در زمان ۲۸ روز به بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری با در نظر گرفتن تغییرات دو داده ورودی که شامل درصد نانو و ماسه می‌باشد، به طور همزمان پرداخت. با توجه به شکل ۱۶ که شکل سه‌بعدی تابع پیش‌بینی بر اساس متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد، بهترین ترکیب برای بیشینه مقاومت در حالتی که مقدار ماسه ۷۶ درصد و میزان رس ۲۴ درصد و ۱/۱ درصد نانو می‌باشد، اتفاق می‌افتد. قابل ذکر است که دقت بالای این الگوریتم در پیش‌بینی تابع هدف، به دلیل شباهت رفتارهای خاک در سه نوع خاک مورد بررسی می‌باشد. همچنین رابطه ارائه شده در محدوده مشخصات خاک مورد مطالعه و بانک اطلاعاتی مورد استفاده این تحقیق معتبر و قابل استفاده است.

۴- نتیجه‌گیری

کاربرد مواد در مقیاس نانو در علم ژئوتکنیک به دلایل مختلف از جمله پیچیدگی‌های آن و نگاه ماکروسکوپی محققین ژئوتکنیک، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به محدودیت‌های تحقیق، در این مقاله اثر نانوکربنات کلسیم بر روی خواص مقاومتی سه نوع خاک با درصدهای مختلف ماسه و رس با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مورد ارزیابی قرار گرفته است و با انجام مطالعات آزمایشگاهی و بررسی‌های ریزساختاری سعی در گسترش تحقیقات در این حوزه شده است. با توجه به نتایج تحقیق مشخص

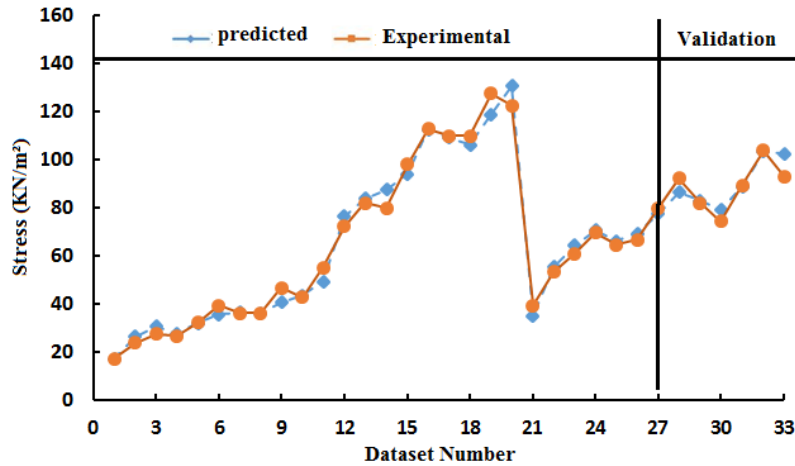
فشاری تک‌محوری خاک، ساختار مدل شبکه عصبی GMDH با دو لایه پنهان در نظر گرفته شده است که در آن N, S, C و t به ترتیب بیانگر درصد نانو، درصد ماسه، درصد رس و زمان عمل‌آوری هستند (شکل ۱۴).

جهت ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده، از شاخص آماری درصد خطای نسبی استفاده شده است. با توجه به اینکه میزان خطای نسبی بدست آمده از الگوریتم GMDH، ۴/۵ درصد می‌باشد، نتایج حاکی از کارایی و دقت بالای این روش در تحقیق مورد استفاده است. همچنین، نمودار مقایسه‌ای به منظور بررسی همپوشانی تابع تخمین و نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۵ نشان داده شده است که بیانگر همپوشانی بسیار بالا بین نتایج پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

با توجه به ساختار شبکه عصبی مصنوعی GMDH و دقت بالای این روش، تابع هدف که مقاومت فشاری تک‌محوری بوده با استفاده از چند جمله‌ای‌های بدست آمده در رابطه (۸)، پیش‌بینی شده است.

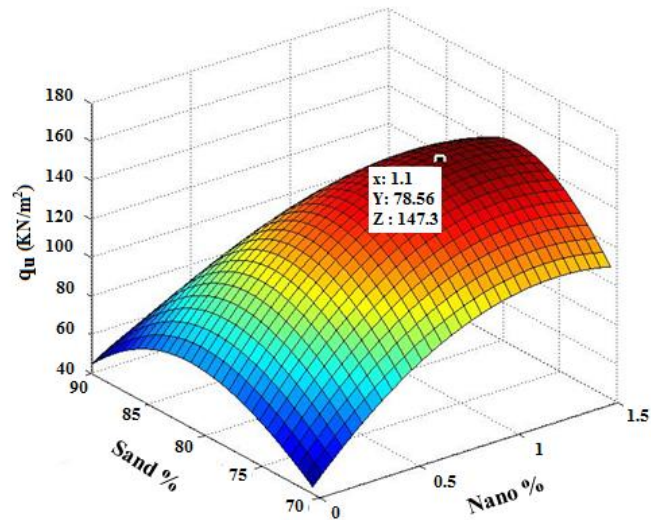
$$\begin{aligned}
 y_1 &= -27.078 + (1.930 \times N) + (0.706 \times S) + \\
 &\quad (-0.454 \times (N^2)) + (-0.004 \times (S^2)) + (-0.0137 \times (N \times S)) \\
 y_2 &= 0.346 + (0.107 \times N) + (0.0283 \times t) + \\
 &\quad (-0.0468 \times (N^2)) + (-0.0005 \times (t^2)) + (0.0061 \times (C \times t)) \\
 y_3 &= 0.0000000079 + (0.000016 \times S) + (-0.000008 \times C) + \\
 &\quad (-0.00012 \times (t^2)) + (-0.0025 \times (C^2)) + (0.0017 \times (S_2 \times C)) \quad (8) \\
 y_4 &= 0.3138 + (0.187 \times y_1) + (-0.714 \times y_2) + \\
 &\quad (-0.142 \times (y_1^2)) + (0.3197 \times (y_2^2)) + (1.33 \times (y_1 \times y_2)) \\
 y_5 &= 0.050 + (0.0803 \times y_2) + (-0.306 \times y_3) + \\
 &\quad (-0.0007 \times (y_2^2)) + (0.3175 \times (y_3^2)) + (1.282 \times (y_2 \times y_3)) \\
 q_u &= |(0.036 + (-0.113 \times y_4) + (0.940 \times y_5) + \\
 &\quad (3.113 \times (y_4^2)) + (2.695 \times (y_5^2)) + (-5.687 \times (y_4 \times y_5)))|
 \end{aligned}$$

در روابط فوق N درصد نانوکربنات کلسیم، S درصد ماسه، C درصد رس و t زمان عمل‌آوری نمونه بوده و q_u مقاومت فشاری تک‌محوری خاک می‌باشد. پس از ارائه معادله تجربی به صورت معادلات ارائه شده در رابطه (۸) در زبان برنامه نویسی متلب، مشخصات متغیرهای تصمیم و تابع هدف به صورت کامل مشخص می‌شود. حال با توجه به محدوده تغییرات داده‌های ورودی در جدول ۲، مقدار بیشینه



شکل ۱۵. نمودار همپوشانی تابع تخمین و نتایج آزمایشگاهی
Fig. 15. Overlap of estimation function and experimental results

یافته است. با اضافه نمودن نانوکربنات کلسیم روند تغییرات کرنش گسیختگی برای خاک SC₂ نسبت به خاک‌های دیگر بیشتر شده است. در نمونه‌های خاک SC₂ به دلیل اینکه خاک رسی بیشترین مشارکت را در پر نمودن فضای خالی موجود بین دانه‌های ماسه داشته و موجب فاصله گرفتن دانه‌ها از یکدیگر نشده است، کمترین تأثیر منفی را بر روی اصطکاک بین دانه‌های خاک گذاشته و بیشترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد. همچنین در بررسی‌های ریز ساختاری انجام شده بر روی نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم و بدون نانو با استفاده از آنالیز XRD، دلیل افزایش مقاومت در این نمونه‌ها کریستالیزه شدن بالا در این ترکیب‌ها است که ناشی از تشکیل فاز کریستالی CSH در زاویه‌های ۲۵/۳° و ۲۶/۹° می‌باشد. در بررسی‌های انجام شده بر روی عکس‌های SEM در نمونه‌های بهسازی شده با نانوکربنات کلسیم، تشکیل یک بافت بزرگتر به دلیل افزایش چسبندگی در نمونه‌ها با گذر زمان رخ داده و پر شدن حفره‌ها در نمونه‌ها پس از افزودن ذرات نانوکربنات کلسیم مشاهده می‌شود که منجر به افزایش چسبندگی و اتصال بین ذرات می‌گردد. همچنین بررسی انجام شده با استفاده از الگوریتم GMDH منجر به ارائه رابطه پیشبینی مقاومت تک محوری با درصد خطای نسبی حدود ۵ درصد شده و بر طبق این الگوریتم بهترین ترکیب در رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر در ترکیب مقدار ماسه ۷۶ درصد و میزان رس ۲۴ درصد و ۱/۱ درصد نانو اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که رابطه ارائه شده در محدوده مشخصات خاک مورد مطالعه و بانک اطلاعاتی مورد استفاده این تحقیق معتبر و قابل استفاده است.



شکل ۱۶. نمودار سه‌بعدی پیشبینی مقاومت فشاری در زمان ۲۸ روز
Fig. 16. 3D diagram for predicting the compressive strength of specimens after 28 days of curing

گردید که با اضافه نمودن نانوکربنات کلسیم به همه نمونه‌ها، مقاومت حداکثر نمونه‌ها افزایش یافته است؛ بطوری که برای نمونه‌های SC₁ و SC₂ بیشینه مقاومت در ۰/۷ درصد و برای نمونه SC₃ در ۱/۱ درصد نانوکربنات کلسیم بدست می‌آید که دلیل افزایش درصد بهینه برای خاک SC₃ مقدار بیشتر خاک رس جهت واکنش‌پذیری با ذرات نانو می‌باشد. همچنین، در تمامی نمونه‌ها، با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت حداکثر افزایش می‌یابد. نمونه خاک SC₁ با توجه به ماهیت دانه‌ای، کمترین مقدار کرنش گسیختگی (رفتار ترد) را داشته و با افزایش میزان رس موجود در نمونه‌ها، کرنش گسیختگی افزایش

- Mixed with Kaolin." Electronic Journal of Geotechnical Engineering; 4255-19:4247.
- [10] Azzam, W. R. 2014. "Durability of Expansive Soil Using Advanced Nano composite Stabilization." Int. J. of Geomate; Vol. 937-7:927.
- [11] Choobbasti, A. J, and Kutanaei S. S. 2015. "Effects of Nanosilica Particles and Randomly Distributed Fibers on the Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Cemented Sand." Open Eng.; 116–111.
- [12] Abdulla, A. S. H., Ahmed S. A. 2016." Enhancement of the Strength and Swelling Characteristics of Expansive Clayey Soil Using Nano-Clay Material." Geo-Chicago GSP; 269: 457-451
- [13] Eswaramoorthi. P., Senthil Kumar. V., Sachin Prabhu. P., Prabu. T and Lavanya. S. 2017. "Influence of nanosized silica and lime particles on the behavior of soil." International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) pp. 360–353
- [14] Yao, K, Wang, W, Li N, Zhang C, Wang, L. 2019. " Investigation on strength and Microstructure characteristics of Nano-Mgo admixed with cemented soft soil." Construction and Building Materials; 168–160.
- [15] Kalhor, A, Ghazavi, M, Roustaei M, Mirhosseini, S. M0. 2019. "Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles." Cold Regions Science and Technology, coldregions;03.011
- [16] Karimi Azar, J, Heshmati, AA, Isazadefar, N. 2018. "Investigation on the strength of Tabriz clay stabilized with nan- osilica". Nationl conference of Civil, Architecture and Urban Development Conference of Muslim World Countries, Tabriz, Iran.
- [17] Tomar, A, Sharma, T, Singh, S. 2020. "Strength properties and durability of clay soil treated with mixture of nano silica and Polypropylene fiber". Materials Today: Proceedings, Volume 26, Part 3.
- [18] Kulanthaivel, P, Soundara, B, Velmurugan, Naveenraj, S. 2020. "Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement." Materials Today: Proceedings

فهرست علائم

مدول سکانت، kN/m ²	<i>E₅₀</i>
وزن مخصوص، gr/cm ³	<i>G_s</i>
حد روانی	<i>LL</i>
حد خمیری	<i>PL</i>
شاخص خمیری	<i>PI</i>
درصد آب بهینه	<i>OWC</i>
خطا	<i>E</i>
چگالی خشک حداکثر، gr/cm ³	<i>γ_d</i>

مراجع

- [1] Changizi. F., Haddad. A. 2016. "Effect of Nano composite on the Strength Parameters of Soil." KSCE Journal of Civil Engineering; 11-1.
- [2] Consoli, N. C, Vendruscolo, M. A, Fonini, A, and Rosa. F. D. 2009. "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range." Geotextiles and Geomembranes, 3(27), 203–196
- [3] Handy, R. L.1960. "Chemical treatments for Surface Hardening of Soil-Cement and Soil –Lime-Fly Ash." Highway Research Board Bulletin; 66-49.
- [4] Zhang, G, Germaine J. T, Whittle A. J., and Ladd, C. 2004. "Index properties of a highly weathered old alluvium." Geotechnique;451-7:441
- [5] Gallagher, P. M., Finstere, S.2004. "Physical and numerical model of colloidal silica injection for passive site stabilization." Vadose Zone Journal; 925-917.
- [6] Butron, C, Axelsson. M and Gustafson G. 2009. "Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength fracture behavior and hydraulic conductivity." Tunneling and underground space technology; 607-603.
- [7] Changizi. F., Haddad. A. 2015. "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber." Journal of rock mechanics and geotechnical engineering; 378-367.
- [8] Taha, M. R., and Taha O. M. E. 2012. "Influence of nano material on the expansive and shrinkage soil behavior." J. Nano part Res; 14:1190
- [9] Khalid, N, Arshad M. F, Mukri, M, Mohamad, K, and Kamarudin, F. 2014. "The Properties of Nano-Kaolin

- Mohamamdi, M. 2014. "investigation of unconfined compression strength on self-healing properties of clay soil". Fifteenth conference of civil Students of country, Urmia University.
- [22] Khosravani, A, Ghorbani, A. 2012. "Investigation of nano clay on mechanical properties of cohesive soil." Sixth national symposium of civil engineering, Semnan University.
- [19] Ghorbani, A., and Mohammadi. M. 2013. "Investigation of consolidation properties of silty-clay soil with lime as an additive." Master thesis in geotechnical engineering, (in Persian).
- [20] Iranpor, B., Hadad A. 2016. "The influence of nano materials on collapsible soil treatment." Journal of Engineering Geology 2016; .53-25:40
- [21] Mohammadi, A, Jan alizade, A, Farokhzad, F and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mohamamdi, M. Khodaparast, A.M. Rajabi, Evaluation of the Effect of Nano CaCO₃ on the Compressive Strength of Sandy Clay Soil with Different Percentage of Clay, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(8) (2021) 3437-3452.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17959.6723](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17959.6723)

