# بررسی تاثیر نانو سیلیکا کلوئیدی در روش بهسازی غیر فعال بر پتانسیل روانگرایی و تغییرات فشار آب حفره ای سیلت ماسه‌ای

سینا صفر قلی تبار مرزونی[۱]، میثم فدایی[×۲]، امین بهمن پور[۳]، مهدی درخشندی[۴]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
*sina.marzuni@srbiau.ac.ir*

۲- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (نویسنده مسئول) *fadaee@srbiau.ac.ir*، ۰۹۱۲۳۹۳۷۰۳۴ و ۸- ۰۲۱۴۴۸۶۵۱۵۴

۳- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
*aminbahmanpour@srbiau.ac.ir*

۴- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

*m-derakhshandi@srbiau.ac.ir*

## چکیده

علت بسیاری از خرابی‌های ناشی از زلزله در نهشته‌های سست تا نیم متراکم اشباع روانگرایی است. بهسازی غیرفعال سایت یک مفهوم جدید است که بیانگر کاهش خطر روانگرایی، بدون اختلال، در سایت‌های توسعه‌یافته با سازه‌های بلند و حساس که در معرض خطر روانگرایی در طول زلزله هستند، می‌باشد. مؤثر بودن روش بهسازی غیرفعال سایت به افزودنی مورد استفاده در این روش بستگی دارد. نانو سیلیکا کلوئیدی با ویسکوزیته نزدیک به آب، قابلیت نفوذ در محدوده گسترده‌ای از خاک‌ها، سازگاری بسیار خوب با محیط‌زیست و نسبت هزینه به عملکرد پایین در این پژوهش به‌منظور استفاده در بهسازی غیرفعال سایت مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های پیشین در زمینه بهسازی خاک با استفاده از نانو سیلیکای کلوئیدی بیشتر بر روی ماسه متمرکز بوده و پژوهش‌های محدودی بر روی سیلت ماسه‌ای انجام شده است؛ بنابراین در این پژوهش تصمیم بر بررسی پتانسیل روانگرایی خاک سیلت ماسه‌ای (۴۰ درصد ماسه با ۶۰ درصد لای) بهسازی شده با درصدهای مختلف نانو سیلیکای کلوئیدی (5wt%، 10wt% و 15wt%) تحت CSR های مختلف با استفاده از آزمایش سه محوری سیکلی به منظور بهسازی غیرفعال سایت می‌باشد. نتایج بیانگر آن است که به‌طور کلی بهسازی با گروت نانو سیلیکای کلوئیدی مقاومت روانگرایی سیلت ماسه‌ای را در برابر بار سیکلی به میزان قابل‌توجهی افزایش و تغییر شکل‌ها را کاهش داده است. همچنین بهسازی سیلت ماسه‌ای با ۵ درصد وزنی نانو سیلیکای کلوئیدی پتانسیل و خطر روانگرایی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد و راندمان بهسازی آن، بیشتر از ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی نانو سیلیکای کلوئیدی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** روانگرایی، سه محوری سیکلی، سیلت ماسه‌ای، بهسازی غیرفعال، نانو سیلیکا کلوئیدی

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

## ۱- مقدمه

اثرات مخرب ناشی از روانگرایی در سال ۱۹۶۴ هنگامی‌که زلزله آلاسکا و به دنبال آن زلزله نیگاتا در ژاپن به وقوع پیوست توجه مهندسان ژئوتکنیک را به خود جلب نمود. خطر روانگرایی لرزه‌ای را با توجه به تکنیک‌های فراوان بهسازی زمین، می‌توان به‌طور مؤثر کاهش داد. بسیاری از این تکنیک‌های موجود برای سایت‌های خالی یا بدون سازه ( توسعه‌نیافته) کاربرد دارند. ولی این در حالی است که در سایت‌های توسعه‌یافته اجرای بیشتر تکنیک‌های رایج کاهش روانگرایی کار سخت یا غیرممکن می‌باشد (همچون ارتعاش جایگزینی [۱]، اجرای میکروپایل [۲] و افزودن برخی از مواد افزودنی به خاک [۳]). در چنین مواردی تقویت از زیر پی سازه (شالوده شمع)[۴]، دیوار دیافراگمی در پیرامون سایت موردنظر [۵]، جت گروتینگ با ویسکوزیته بالا [۶] و یا زهکش‌های سوراخ‌دار [۷] تجویز می‌شود. بااین‌حال تکنیک‌های مذکور نمی‌توانند روانگرایی را در کل سایت سازه کاهش دهند زیرا معمولاً در محیط اطراف یا در زیر آن اجرا می‌شوند و همچنین برخی از این تکنیک‌ها مثل جت گروتینگ به علت فشار بالای تزریق باعث بروز مشکلاتی در ساختار خاک شده که مهم‌ترین آن تورم پی و کف سازی [۸] جابجایی جانبی خاک [۹] و حتی سفت شدن فوری گروت در حین تزریق [۸] می‌باشند؛ بنابراین نیاز به تکنیک‌های مؤثری می‌باشد تا بتوان کل سایت را در مقابل روانگرایی بهسازی نمود، به‌گونه‌ای که خللی در عملکرد سازه موجود در سایت رخ ندهد.

پرسینو و همکاران ۲۰۱۲ تزریق نفوذی را روش[1] برای تثبیت و ایجاد خاک غیرقابل نفوذ بیان نمودند و نشان داده شد که این فرآیند به‌طور گسترده در مهندسی عمران به‌خصوص برای افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و جلوگیری از روانگرایی مورداستفاده قرار می‌گیرد[۱۰]. گویر ۲۰۰۹ بیان نمود که جهت[2]استفاده از تزریق نفوذی در خاک‌های ریزدانه فقط گروت های امولسیون و محلول کاربرد دارند؛ بنابراین جهت دستیابی به تزریق نفوذی مؤثر باید از گروت هایی با ویسکوزیته پایین و باقابلیت کنترل زمان ژل شدن مناسب استفاده شود[۱۱]. گلگر ۲۰۰۰ بیان نمود یکی از [3] بهترین روش‌های بهسازی سایت‌های توسعه‌یافته در مقابل خطر روانگرایی، تثبیت منفعل سایت با استفاده از نانو سیلیکا کلوئیدی می‌باشد[۱۲].

برای سایت‌هایی که سازه حساس در آن ساخته‌شده و در حین بهره‌برداری سازه نیاز به بهسازی بستر زیر سازه در مقابل خطر روانگرایی احساس شود، در این صورت درجایی خارج از سایت با ایجاد ترانشه ای در بالادست سایت ماده افزودنی را از طریق جریان آب زیرزمینی و یا توسط چاه‌های تزریق و استخراج به زیر سایت منتقل می‌نمایند تا سایت را بهسازی نمایند. در این فرآیند هیچ خلل و توقفی در عملکرد و بهره‌برداری سازه ایجاد نخواهد شد که به این روش بهسازی غیرفعال یا تثبیت منفعل می‌گویند [۱۳].

نانو سیلیکا کلوئیدی که اندازه ذرات آن معمولاً بین ۷ تا ۲۲ نانومتر است یک محلول کلوئیدی غیر سمی از نانو ذرات سیلیکا در آب است که سازگار با محیط‌زیست می‌باشد و همچنین دارای ویسکوزیته پایین (نزدیک به آب) بوده که

---

۱- Porcino et al.

۲- Guyer

3 - Gallagher

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

بعد از مدت‌زمان قابل‌کنترلی، تبدیل به ژل مقاوم می‌گردد؛ بنابراین پتانسیل ایجاد کرنش‌های بزرگ مربوط به روانگرایی را کاهش می‌دهد [۱۳ و ۱۴ و ۵ و ۱۰].

تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی ماسه‌های بهسازی شده با نانو سیلیکا کلوئیدی انجام‌شده است[۱۳و ۱۵-۲۰]. گلگر و میچل ۲۰۰۲ با استفاده از آزمایش[1] سه محوری سیکلی بر روی نمونه ماسه سست بهسازی شده با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نانو سیلیکای کلوئیدی به بررسی اثر تزریق نانو سیلیکای کلوئیدی بر پتانسیل روانگرایی و رفتار زهکشی نشده سیکلی ماسه‌ی سست، پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نمونه‌هایی که با غلظت بیشتر نانو سیلیکا کلوئیدی تثبیت شدند کرنش‌های کوچک‌تری را در طول بارگذاری سیلکی تجربه کردند[۱۳]. گلگر و همکاران ۲۰۰۷ با استفاده از مدل سانترفیوژ نشان دادند که نانو سیلیکای کلوئیدی سبب افزایش مقاومت روانگرایی و کاهش تغییر شکل‌های ماسه‌های شل روانگرا شونده در حین لرزش‌های سانتریفیوژ می‌شود[۱۵] و همچنین گلگر و همکاران ۲۰۰۷ در پژوهش‌های دیگری به بررسی تزریق نانو سیلیکای کلوئیدی برای کاهش خطر روانگرایی در یک آزمایش میدانی Full scale پرداختند. آن‌ها با استفاده از ۸ حلقه چاه تزریق در اطراف محیطی به قطر ۹ متر و چاه استخراج در مرکز این محیط اقدام به تزریق گروت ۸ درصد وزنی سیلیکا کلوئیدی به دو متر فوقانی از یک لایه با ضخامت ۱۰ متر ماسه روانگرا شونده در این سایت پرداختند و سپس در آن چاه‌ها بارهای انفجاری قرار دادند که نتایج بیانگر نشست تقریباً ۰/۳ متری ماسه بهسازی شده در مقابل نشست ۰/۵ متری ماسه بهسازی نشده است[۱۶]. رودریگز و ایزاراس ۲۰۰۴ با استفاده از آزمایش برش ساده سیکلی اثربخشی تزریق نانو سیلیکای کلوئیدی در کاهش پتانسیل روانگرایی ماسه بندر لازارو مکزیک را نشان دادند[۱۷]. ملامحمود اوغلو و ییلماز ۲۰۱۰ خصوصیات ایجاد ژل نانو سیلیکا کلوئیدی و رابطه آن با زمان و همچنین تأثیرات سیلیکا کلوئیدی در افزایش مقاومت ماسه را مورد بررسی قرار دادند[۱۸]. هوانگ و ون ۲۰۱۵ سه روش نسبتاً جدید بهسازی سایت در برابر روانگرایی شامل بهسازی غیرفعال سایت، ژئوتکنولوژی میکروبی و اشباع جزئی را با استفاده از افزودنی‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که بهسازی غیرفعال سایت با استفاده از نانو سیلیکای کلوئیدی جهت کاهش پتانسیل روانگرایی مفید و مؤثر بوده است[۱۹]. هوانگ و وانگ ۲۰۱۶ در یک مطالعه مروری به بهسازی خاک با استفاده از ۴ نانو مواد، نانو تیوب کربن (گرافن اکسید)، نانو بنتونیت، نانو سیلیکای کلوئیدی و نانو لاپونیت پرداختند و در نتیجه به تأثیرات بسیار مثبت نانو سیلیکای کلوئیدی و نانو لاپونیت بر کاهش پتانسیل روانگرایی دست یافتند[۲۰].

ونگ و همکاران ۲۰۱۸ با استفاده از آزمایش[7] برش مستقیم بر روی ماسه بهسازی شده با نانو سیلیکا کلوئیدی نشان دادند که زاویه اصطکاک و چسبندگی نمونه‌های بهسازی شده افزایش‌یافته است. از سویی دیگر با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی کائولین بهسازی شده با نانو سیلیکا کلوئیدی به این نتایج دست یافتند که سختی افزایش و تغییر

1 -Gallagher and Mitchell
2 -Gallagher et al
۳- Rodriguez and Izarras
۴- Mollamahmutoglu and Yilmaz
۵ -Huang and wen
6 -Huang and wang
۷- wong et al

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

شکل‌های حجمی کاهش یافته است و همچنین با ایجاد یک ماتریس متراکم هدایت هیدرولیکی کاهش‌یافته، ولی چسبندگی زهکشی شده و اتصال بین ذرات خاک تغییر محسوسی نداشته‌اند[۲۱].

کریشنان و شوکلا ۲۰۲۰ با استفاده از آزمایش[۱] سه محوری استاتیکی نشان دادند که میزان نانو سیلیکای موردنیاز برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه با دانسیته نسبی ۳۰ و ۴۰ و ۶۰ به ترتیب ۱۰ و ۱۱و ۱۲،۵ درصد وزنی(wt%) می‌باشند [۲۲].

ورانا و تیکا ۲۰۲۱ با استفاده از آزمایش[۲] سه محوری سیکلی نشان دادند که مقادیر مختلف نانو سیلیکا کلوئیدی می‌تواند سبب افزایش نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک و تعداد سیکل‌های مورد نیاز روانگرایی تا حد مطلوبی شود[۲۳].

کریشنان و همکاران ۲۰۲۰ با استفاده از آزمایش[۳] سه محوری سیکلی نشان دادند که بهسازی ماسه با نانو سیلیکا کلوئیدی می‌تواند سبب بهبود مقاومت روانگرایی، نرخ میرایی و مدول برشی شوند. همچنین آزمایش دوام نمونه‌های بهسازی شده نتایج مثبتی را نشان دادند. از سویی دیگر نشان دادند درصد بهینه نانو سیلیکا کلوئیدی با افزایش چگالی نسبی کاهش می‌یابد [۲۴].

کریشنان و شوکلا ۲۰۲۱ به بررسی پتانسیل روانگرایی ماسه بهسازی شده با نانو سیلیکا پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که حتی در غلظت کم، مقاومت تغییر شکل ماسه‌های شل که در معرض روانگرایی، طی ارتعاشات زلزله قرار می‌گیرند به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌های SEM نشان داده که سیلیکا کلوئیدی سبب ایجاد پیوند متراکم و سخت در ماسه شده است، این در حالی است که در کائولین پیوندهای مطلوبی ایجاد ننموده است [۲۵].

برخی از پژوهش‌های پیشین توانایی تزریق و خصوصیات رئولوژیکی خاک بهسازی شده با نانو سیلیکای کلوئیدی را مورد بررسی قرار دادند. رئولوژی علم جریان و تغییر شکل جریان‌ها می‌باشد که برهم‌کنش بین نیروها، تغییر شکل و زمان را توصیف می‌کند و همچنین منظور از بررسی خصوصیات رئولوژیکی در این پژوهش بیانگر بررسی چگونگی تغییرات ویسکوزیته با زمان و عوامل مؤثر بر آن می‌باشد [۲۶و ۲۷و ۱]. گلگر و لین ۲۰۰۹ با بهره‌گیری ۱۵ آزمؤن ستون کوتاه ۰،۹ متر با خاک ماسه نوادا، اتاوا، ماسه سیلتی و با استفاده از برخی معادلات هیدرولیکی به اثبات قابلیت انتقال مؤثر نانو سیلیکا کلوئیدی در خاک پرداختند و ویسکوزیته را مهم‌ترین عامل در انتقال مؤثر سیلیکای کلوئیدی بیان نمودند[۲۶]. آگاپولاکی و همکاران ۲۰۱۵ با استفاده از آزمایش[۵] نفوذ یک‌بعدی در ستون خاک به بررسی پتانسیل نفوذ نانو سیلیکا کلوئیدی، جهت تثبیت منفعل خاک روانگرا شونده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نانو سیلیکای کلوئیدی قابلیت نفوذ در ماسه سیلتی را دارد، ولی با رعایت این موضوع که با توجه به مسافت نفوذ موردنیاز، زمان ژل شدن محلول سیلیکا باید تنظیم شود زیرا ویسکوزیته عامل اصلی تأثیرگذار بر میزان نفوذ سیلیکا کلوئیدی است[۲۷]. آگاپولاکی و پایا دیمیتریو ۲۰۱۸ در بررسی خواص رئولوژیکی[۶] نانو سیلیکا کلوئیدی جهت تثبیت منفعل به

---

۱- Krishnan and Shukla

۲- vranna and tika

۳- Krishnan et al

۴- Gallagher and Lin

5 -Agapoulaki et al

6 -Agapoulaki and Papadimitriou

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

منظور مقابله با خطر روانگرایی، بیان نمودند، کاربرد سیلیکا کلوئیدی به‌عنوان یک گروت به کنترل زمان افزایش یافتن ویسکوزیته متکی است و در این پژوهش علاوه بر پارامترهایی همچون نوع سیلیکا، درصد وزنی سیلیکا، ph و نرمال بودن میزان نمک که به‌عنوان عوامل کنترل‌کننده ویسکوزیته سیلیکای کلوئیدی شناخته‌شده بودند، پارامتر دما را به عنوان یک کنترل‌کننده مهم ویسکوزیته اضافه نمودند و همچنین نمودارها و معادلاتی را برای تخمین تقریبی افزایش ویسکوزیته با زمان برای محلول سیلیکای کلوئیدی ارائه دادند[۱].

بنابراین بیشتر پژوهش‌های پیشین در زمینه توانایی تزریق و خصوصیات رئولوژیکی خاک بهسازی شده با نانو سیلیکای کلوئیدی بیانگر این موضوع می‌باشند که نانو سیلیکای کلوئیدی در دانه‌بندی‌های خاک ماسه و ماسه سیلتی قابل تزریق بوده و مهم‌ترین عامل جهت تحقق این امر، کنترل زمان افزایش ویسکوزیته می‌باشد. به عبارتی عوامل مؤثر بر ویسکوزیته باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که تا زمانی که محلول نانو سیلیکای کلوئیدی میزان مسافت موردنظر را در خاک طی نکرده و در محل دقیقی که قرار است بهسازی شود قرار نگرفته، افزایش ویسکوزیته و ژل شدن یا ژلاسیون رخ ندهد.

پژوهش‌های تقریباً گسترده‌ای بر روی خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ماسه‌های بهسازی شده با نانو سیلیکای کلوئیدی انجام پذیرفته ولی پژوهش‌های صورت پذیرفته بر روی ماسه سیلتی بهسازی شده با نانو سیلیکای کلوئیدی بسیار محدود می‌باشد.

رودریگز و همکاران ۲۰۰۸ نتایج آزمایشگاهی یکسری آزمایش‌های برش ساده سیکلی بر روی ماسه ضعیف با ۱۱/۵ درصد سیلت غیر پلاستیک از بندر لازارو مکزیک که توسط گروت نانو سیلیکا کلوئیدی بهسازی شده بوده را ارائه نمودند و نشان دادند که سیلیکا کلوئیدی در نمونه تحت معرض بار سیکلی به میزان قابل‌توجهی مقاومت روانگرایی را افزایش داده و میزان تولید فشار منفذی و کرنش برشی را کاهش می‌دهد [۲۸]. در پژوهش دیگر نوری و نورزاد ۲۰۱۷ با استفاده از آزمایش تک‌محوری و آزمایش سه محوری زهکشی شده استاتیکی به بررسی اثرات نانو سیلیکا کلوئیدی بر روی ماسه سیلتی بابلسر (۴۰ درصد سیلت) پرداختند. در این پژوهش پارامترهای مقاومتی (Ø و C) نمونه تثبیت‌شده با نانو سیلیکا کلوئیدی را تحت بار استاتیکی مورد بررسی قرار دادند و بیان نمودند که نتایج، افزایش در پارامتر چسبندگی زهکشی شده و کاهش در زاویه اصطکاک داخلی را در ماسه سیلتی نشان می‌دهد[۲۹]. زاهو و همکاران ۲۰۱۹ در یک مطالعه مورّدی بیان نمودند که روش‌های اخیراً توسعه‌یافته همچون استفاده از نانو سیلیکا کلوئیدی در مقایسه با روش‌های سنتی، ازنظر مکانیسم کاهش روانگرایی، اثربخشی، مشکلات احتمالی اجرایی و کاربرد آن در محل و هزینه مفیدتر می‌باشد [۳۰].

همان‌طور که بیان شد بهسازی به‌منظور کاهش خطر روانگرایی سایت‌های در حال بهره‌برداری که در آن سازه‌های مهم و حساس قرار دارند نیاز به تکنیک‌های مؤثری دارند که علاوه بر بهسازی مطلوب، خللی در بهره‌برداری سازه‌های موجود در سایت ایجاد نکنند. یکی از کارآمدترین این روش‌ها بهسازی غیرفعال سایت است که در آن بهسازی در درون سایت صورت نمی‌پذیرد و در نقاطی خارج از سایت اقدام به این امر می‌شود. به‌این‌ترتیب که افزودنی‌های موردنظر جهت بهسازی خاک از طریق ترانشه ای در بالادست سایت آهسته تزریق شده و با استفاده از جریان طبیعی

1 -Rodriguez et al
2 -Nouri and Noorzad
3 -Zhao et al

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

آب زیرزمینی و یا جریان آب زیرزمینی ایجادشده توسط چاه‌های تزریق و استخراج به محل موردنظر در سایت منتقل می‌شود. لذا یکی از کارآمدترین روش‌ها، جهت بهسازی سایت‌های در حال بهره‌برداری در معرض خطر روانگرایی می‌باشد، اما کارآمدی این روش ارتباط مستقیم با توانایی انتقال مناسب افزودنی به محل موردنظر در سایت دارد، بنابراین باید از افزودنی استفاده نمود که همچون آب زیرزمینی قابلیت نفوذ و انتقال در بین ذرات خاک را داشته باشد. همان‌طور که از پژوهش‌های پیشین مشخص است برخلاف تصورات گذشته که تصور بر این بود روانگرایی فقط در ماسه‌ها رخ می‌دهد مشخص است که ماسه سیلتی، سیلت ماسه‌ای و سیلت از پتانسیل روانگرایی بالایی برخوردارند [۳۱ و ۳۲]. افزودنی‌های رایجی همچون سیمان قابلیت تزریق در خاک ماسه لای دار، لای ماسه دار و لای را نداشته و از طرفی دیگر افزودنی‌هایی مثل آکریل ها و آکریل آمیدها که قابلیت نفوذ در خاک لای را دارند، مشکلات زیست‌محیطی فراوانی را ایجاد می‌کنند [۳۳]، بنابراین استفاده از افزودنی‌هایی که دارای ویژگی‌هایی همچون قابلیت تزریق، عملکرد مناسب و عدم ایجاد مشکلات زیست‌محیطی باشند ضروری است.

از یک‌سو در پژوهش‌های پیشین تأثیر مثبت نانو سیلیکا کلوئیدی بر چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک و سایر خصوصیات ژئوتکنیکی اثبات شده است و از سویی دیگر به دلیل خصوصیاتی همچون ویسکوزیته پایین و نزدیک به آب، این امکان را فراهم می‌کند تا به‌راحتی در بین حفرات خاک حرکت کرده و به محل موردنظر منتقل شود و درنهایت تبدیل به ژل سخت گردد؛ بنابراین موارد مذکور سبب شده تا نانو سیلیکا کلوئیدی به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین افزودنی‌ها جهت استفاده در بهسازی غیرفعال سایت مورد توجه قرار گیرد. همچنین لازم به ذکر است استفاده از نانو سیلیکا کلوئیدی که یک ماده سازگار با محیط‌زیست می‌باشد سبب کاهش مصرف افزودنی‌های سنتی همچون سیمان که منشأ اصلی تولید $CO_2$ می‌باشد، می‌گردد.

هوانگ و وانگ ۲۰۱۶ به مقایسه نانو سیلیکا کلوئیدی با افزودنی‌های رایجی همچون سیمان، سیلیکات سدیم، آکریل ها، اپوکسی و افزودنی‌های نانو موادی همچون نانو بنتونیت و نانو لاپونیت، از لحاظ ایجاد اختلال، نسبت قیمت به عملکرد و مشکلات زیست‌محیطی پرداختند و برتری نانو سیلیکا کلوئیدی را از لحاظ جنبه‌های مورد بررسی نشان دادند[۲۰].

با توجه به پژوهش‌های پیشین که در قسمت فوق به آن اشاره شد، نمایان است که تاکنون به بررسی پتانسیل روانگرایی ماسه و ماسه با درصد اندک ریزدانه پلاستیک و غیر پلاستیک بهسازی شده با نانو سیلیکا کلوئیدی پرداخته شده است؛ بنابراین مطالعات در زمینه بهسازی غیرفعال سایت با نانو سیلیکای کلوئیدی در خاک سیلت ماسه‌ای بسیار محدود بوده و همچنین پتانسیل روانگرایی سیلت ماسه‌ای بهسازی شده با نانو سیلیکای کلوئیدی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش علاوه بر آنکه پتانسیل روانگرایی سیلت ماسه‌ای روان گرا شونده که توسط نانو سیلیکای کلوئیدی بهسازی شده با استفاده از آزمایش سه محوری سیکلی مورد بررسی قرارگرفته، به تعیین میزان بهینه نانو سیلیکا جهت کاهش ریسک روانگرایی تا میزان مورد قبول و تعیین شرایط شیمیایی بهینه نانو سیلیکا کلوئیدی در راستای اثربخشی بیشتر آن در فرآیند بهسازی خاک پرداخته شده است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

## ۲- روش انجام آزمایش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح مورداستفاده در این پژوهش

در این پژوهش از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و لای غیر پلاستیک استفاده شده است که مشخصات آن به ترتیب در جدول ۱، ۲، ۳ و شکل ۱ بیان شده است و همچنین ترکیب خاک مورد آزمایش در این پژوهش سیلت ماسه‌ای با ترکیب ۶۰ درصد سیلت و ۴۰ درصد ماسه می‌باشد.

**جدول ۱. برخی از مشخصات ژئوتکنیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه**

| شماره | مشخصات | نماد | مقدار |
|---|---|---|---|
| ۱ | نوع خاک | SP | - |
| ۲ | چگالی دانه‌ها | Gs | ۲/۶۱ |
| ۳ | وزن مخصوص خشک ماکزیمم | $\gamma_{max}$ | ۱۶٫۵ kN/m3 |
| ۴ | وزن مخصوص خشک مینیمم | $\gamma_{min}$ | ۱۳٫۷kN/m$^3$ |

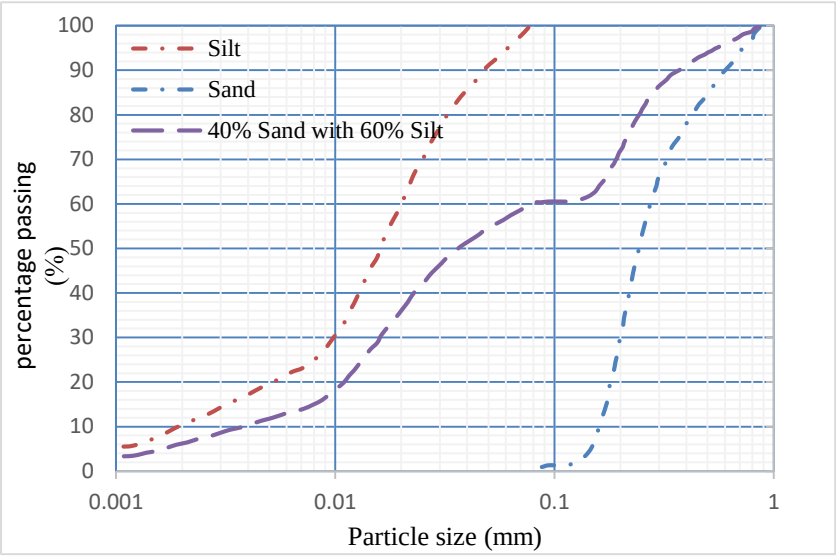
**جدول ۲. برخی از مشخصات ژئوتکنیکی لای**

| شماره | مشخصات | نماد | مقدار |
|---|---|---|---|
| ۱ | نوع خاک | M | لای غیر پلاستیک |
| ۲ | چگالی دانه‌ها | Gs | ۲/۵۱ |
| ۳ | وزن مخصوص خشک ماکزیمم | $\gamma_{max}$ | ۱۴/۸ kN/m$^3$ |
| ۴ | وزن مخصوص خشک مینیمم | $\gamma_{min}$ | ۱۱/۵۸ kN/m$^3$ |

**جدول ۳. مشخصات آنالیز شیمیایی ماسه ۱۶۱ و لای فیروزکوه**

| % $SiO_2$ | % $Al_2O_3$ | % $Fe_2O3$ | % CaO | %$Na_2O$ | %$K_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۹۵-۹۸ | ۰٫۵-۱ | ۰٫۵-۱ | ۰٫۵-۱ | ۰٫۰۲-۰٫۵ | ۰٫۵-۰٫۷ |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]




**شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک‌ها**

## ۲-۲- مشخصات نانو سیلیکا کلوئیدی و فرآیند گیرش

سیلیکای کلوئیدی یک پراکنش مایع ذرات سیلیکا بوده که از محلول‌های اشباع اسید سیلیسی یا سیلیسیک‌اسید حاصل می‌شوند. این ذرات عموماً ابعادی بین ۷ الی ۲۲ نانومتر دارند[۲۹].

سیلیکای کلوئیدی از اندرکنش مولکول‌های محلول اشباع اسید سیلیسیک $H4Sio_2$ و تشکیل باندهای سیلوکسن (Si-o-Si) حاصل می‌شود. سطح ذرات، از سیلانول های (SiOH) گروهی ترکیب نشده، تشکیل یافته و هنگام اندرکنش اجزاء با یکدیگر، باندهای سیلوکسن (Si-o-Si) در بین ذرات تشکیل می‌شود. ادامه این فرایند موجب بزرگ شدن و رشد اندازه ذرات می‌شود [۱۳]. نانو سیلیکای کلوئیدی ماده‌ای غیر سمی، با مشخصات دوام بسیار بالا و سازگاربامحیط‌زیست می‌باشد و همچنین دارای ویسکوزیته پایین (نزدیک به آب) بوده که بعد از مدت‌زمان قابل‌کنترلی، تبدیل به ژل محکم می‌گردد؛ بنابراین پتانسیل ایجاد کرنش‌های بزرگ مربوط به روانگرایی را کاهش می‌دهد [۱۳، ۱۴، ۵، ۱۰]. زمان موردنیاز بین مخلوط کردن تا تشکیل یک ژل سخت وابسته به نرخ برهم‌کنش ذرات است که این خودش وابسته به متغییر های متعددی شامل: درصد سیلیکا در محلول، اندازه ذرات سیلیکا، مقاومت یونی ph و دمای محلول می‌باشد [۳۵ و ۳۶].

با کاهش مقدار مواد جامد سیلیکا و افزایش اندازه ذرات سیلیکا، زمان ژل شدن افزایش می‌یابد. به‌طورکلی سریع‌ترین زمان ژل شدن بین ph، ۵ تا ۶ رخ می‌دهد ( البته این مقدار بسته به ویژگی‌های نانو سیلیکای کلوئیدی کمی تغییر می‌کند) و اگر ph بالاتر یا پایین‌تر از این حد باشد، زمان ژلاسیون به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر می‌شود. با کاهش غلظت نمک در محلول نانو سیلیکا کلوئیدی زمان ژل شدن افزایش می‌یابد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

در این پژوهش از نانو سیلیکای کلوئیدی با نام تجاری LUDOX SM colloidal silica استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۴ بیان شده است.

**جدول ۴. مشخصات نانو سیلیکای کلوئیدی**

Properties of LUDOX® SM colloidal silica (420794)

| | |
|---|---|
| **وضعیت** | کلوئیدی |
| **غلظت** | ۳۰ درصد وزنی سوسپانسیون در H2O |
| **سطح ویژه** | ۳۲۰-۴۰۰ m2/g |
| **PH** | ۱۰٫۳ – ۹٫۷ |
| **دانسیته** | ۱٫۲۲g/mL at 25 °C |

البته مشخصات فوق‌الذکر برای غلظت ۳۰ درصد می‌باشد که بعد از رقیق شدن دچار تغییر می‌شود، به‌عنوان‌مثال دانسیته یا ویسکوزیته بسته به غلظت و میزان رقیق شدن دچار تغییر می‌شود.

## ۲-۳- دستگاه آزمایش

در این پژوهش جهت بررسی‌های آزمایشگاهی از دستگاه سه محوری سیکلی موجود در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران استفاده شده است. در شکل ۲ شمای کلی دستگاه آزمایش سه محوری سیکلی و یک نمونه مورد آزمایش قرارگرفته نشان داده شده است.

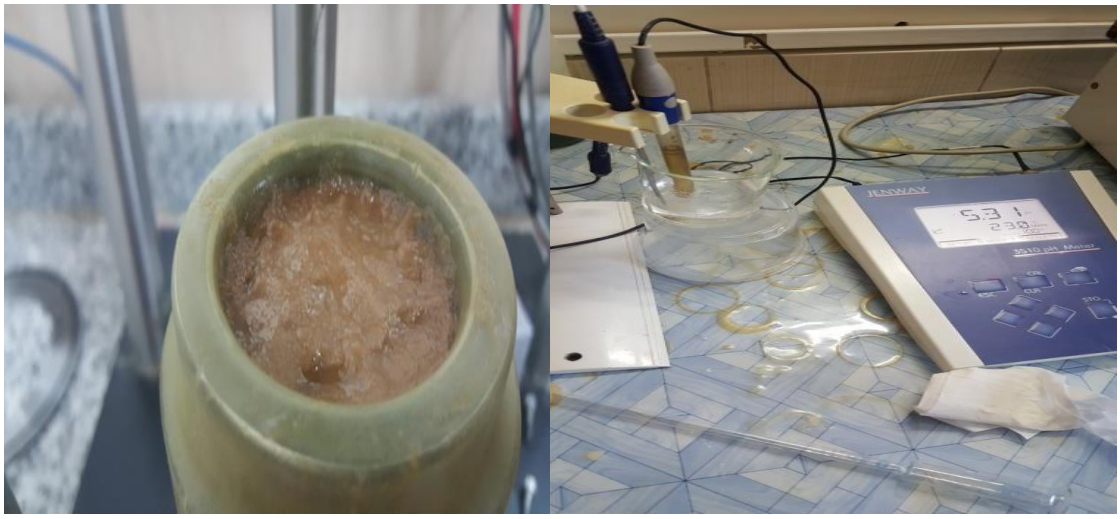
**شکل ۲. شمای کلی دستگاه آزمایش سه محوری سیکلی و نمونه آزمایش**

## ۲-۴- مراحل تهیه و آزمایش نمونه

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

در این پژوهش آزمایش سه محوری سیکلی بر اساس ASTM D5311 انجام پذیرفته است[۳۷]. همچنین از روش تراکم مرطوب (Wet Tamping) در پنج لایه جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. خاک مورداستفاده در این پژوهش با درصد وزنی ۴۰ درصد ماسه به‌علاوه ۶۰ درصد لای می‌باشد که در ادامه با نام اختصاری M6S4 بیان خواهد شد و همچنین درصد غلظت محلول نانو سیلیکای کلوئیدی با SC% بیان خواهد شد.

در این پژوهش پس از ساخت نمونه‌ها با خاک مذکور با استفاده از روش تراکم مرطوب با دانسیته ۳۰ درصد (Dr=30) و به قطر ۵ سانتیمتر و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر در قالب مخصوص دستگاه سه محوری، در مرحله بعد محلول اصلی نانو سیلیکا کلوئیدی که طبق مشخصات شرکت سازنده (جدول ۳-۵) دارای غلظت ۳۰ درصد وزنی ( 30 wt%) است، با استفاده از آب دیونیزه به سه محلول با غلظت سیلیکای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی (wt%) رقیق‌سازی می‌شود. لازم به ذکر است که منظور از غلظت (درصد وزنی wt%) در این محلول‌ها، نسبت وزن نانو سیلیکای موجود در محلول، به وزن کل محلول می‌باشد. در ادامه برای تنظیم زمان‌گیرش، مقدار ۰/۱ نرمالیته از کلرید سدیم در محلول‌ها در نظر گرفته شده است. علت استفاده از سدیم کلرید به‌جای نمک‌های دیگر آن می‌باشد که در طبیعت و بخصوص در سفره‌های زیرزمینی در مکان‌های نزدیک دریا که در آن پتانسیل استفاده از تثبیت منفعل وجود دارد این نمک یافت می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از اسیدکلریدریک، ph محلول در محدوده ۵ الی ۶ تنظیم می‌گردد. زمان شروع به گیرش و ژلاسیون محلول بسته به درصد وزنی نانو سیلیکا کلوئیدی (غلظت) متفاوت است. در گام بعد این محلول بر روی نمونه خاک از قبل آماده‌شده به‌آرامی ریخته می‌شود و سپس شیر پایین نمونه باز می‌شود تا با خروج هوا از زیر، به فرآیند نفوذ محلول از بالا کمک شود و پس‌ازآنکه محلول به انتهای نمونه رسید، شیر بسته می‌شود و سپس اجازه داده می‌شود تا محلول تمامی خلل و فرج نمونه را به‌طور کامل پر کند، سپس با حفظ شرایط محیطی و در دمایی برابر با طبیعت، ۷ روز به عمل‌آوری نمونه پرداخته شده و سپس اقدام به انجام آزمایش سه محوری سیکلی بر روی نمونه عمل‌آوری شده می‌شود. در پژوهش حاضر مقدار فشار همه‌جانبه (پس فشار) تمامی نمونه‌ها ۱۰۰ کیلو پاسکال بوده و همچنین فرکانس بارگذاری ۰/۱ می‌باشد.



الف ب

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

**شکل ۳. الف. تصویری از مراحل اندازه‌گیری ph محلول ب. تصویری از نمونه بهسازی شده بعد از عمل‌آوری و قبل از انجام آزمایش**

آزمایش‌ها به دو دسته بهسازی شده و بهسازی نشده تقسیم خواهند شد که در هر دو دسته بعد از آماده شدن نمونه برای انجام آزمایش، اقدام به بستن، آماده‌سازی سلول و پر نمودن اطراف نمونه با آب خواهد شد. در مرحله بعد فشار همه‌جانبه حدود ۱۰ کیلو پاسکال به نمونه اعمال شده و در گام بعدی با عبور گاز دی‌اکسید کربن از نمونه قابلیت اشباع‌پذیری نمونه را افزایش داده و همچنین در ادامه آب مقطر وکیوم شده از نمونه عبور داده می‌شود. در مرحله بعد جهت اشباع سازی کامل نمونه و دستیابی به درصد اشباع بالای ۹۵ درصد ($B_{value} = 0.95$)، جهت روانگرایی نمونه، اقدام به افزایش فشار سلول (فشار همه‌جانبه) و همچنین فشار داخل نمونه (پس فشار) می‌شود. این روند در گام‌های مختلف تکرار شده تا نمونه به اشباع ۹۵ درصد برسد. در گام بعد با توجه به فشار همه‌جانبه موردنظر که ۱۰۰کیلو پ کیلول است، اقدام به تحکیم نمونه شده و جهت یکنواخت بودن فشار تحکیم در تمامی قسمت‌های نمونه، تحکیم ایزوتروپیک انجام می‌شود. گام بعدی مرحله بارگذاری می‌باشد. در این مرحله جهت اجرای آزمایش سه محوری سیکلی CU و روانگرا شدن نمونه، شیر زهکشی نمونه باید در حالت بسته باشد تا هنگام بارگذاری، آب از نمونه خارج نشده و فشار آب حفره‌ای مستهلک نشود. لازم به ذکر است بارگذاری از نوع کنترل تنش[۱] و به صورت سیکلی و تحت سه CSR ۰،۲، ۰،۱۵ و ۰،۱ می‌باشد.[۲]در این مطالعه برنامه آزمایش‌ها بر اساس جدول ۵ تنظیم شده است.

**جدول ۵: برنامه آزمایش**

| نوع خاک | غلظت محلول نانو سیلیکا کلوئیدی(٪) | فشار همه‌جانبه (فشار تحکیمی) | CSR | | | دانسیته (Dr%) | سن نمونه (روز) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M6S4 :۴۰٪ ماسه با ۶۰٪ لای | ۰ | ۱۰۰ | ۰/۲ | ۰/۱۵ | ۰/۱ | ۳۰ | ۷ |
| | ۵ | | | | | | |
| | ۱۰ | | | | | | |
| | ۱۵ | | | | | | |

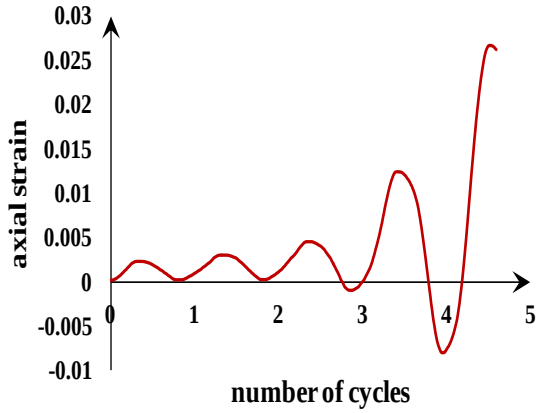
## ۳- تفسیر نتایج

در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نتایج حاصل از انجام آزمایش سه محوری سیکلی CU بر روی نمونه ماسه با ۶۰ درصد لای (M6S4) بهسازی نشده و بهسازی شده با ۱۰ درصد وزنی محلول نانو سیلیکا، در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال و دانسیته ۳۰ درصد و CSR=0.2 ارائه شده است.

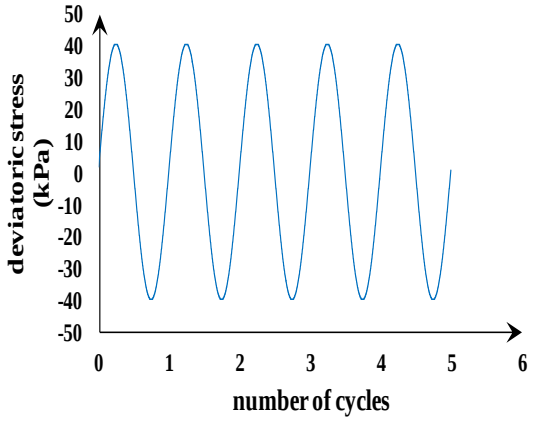
۱- Force control

۲- cyclic stress ratio

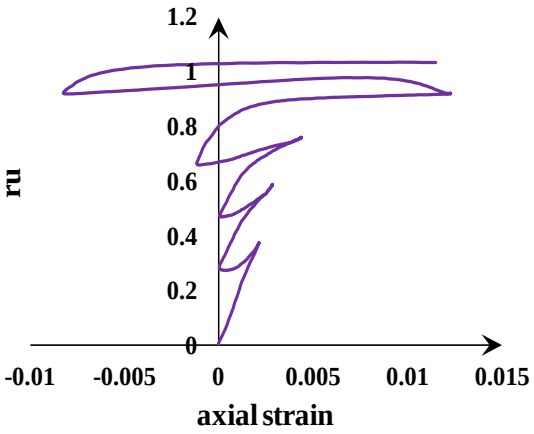
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]



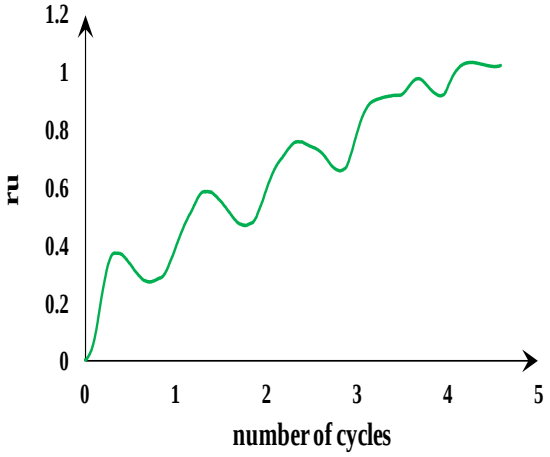

ب




الف



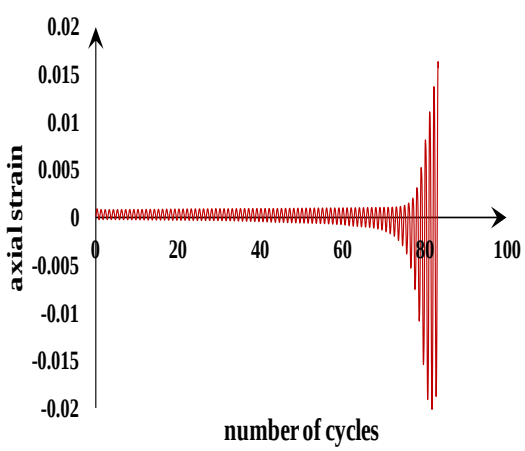

ت



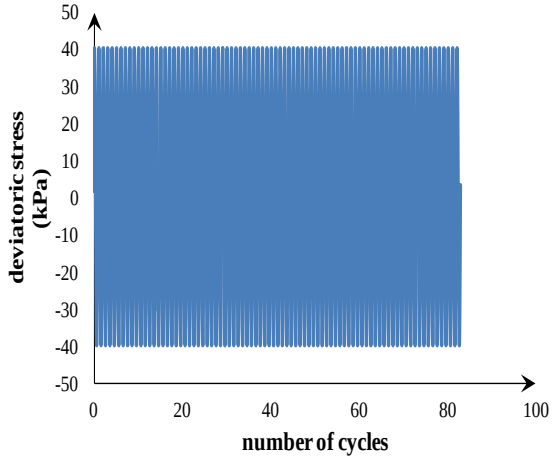

پ

شکل ۴: آزمایش سه محوری تناوبی در **M6S4** تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، **Dr=30%** و **CSR=0.2**: (الف) نمودار تنش انحرافی برحسب تعداد سیکل، (ب) نمودار کرنش محوری برحسب تعداد سیکل، (پ) نمودار $r_u$ برحسب تعداد سیکل (ت) نمودار $r_u$ برحسب کرنش محوری

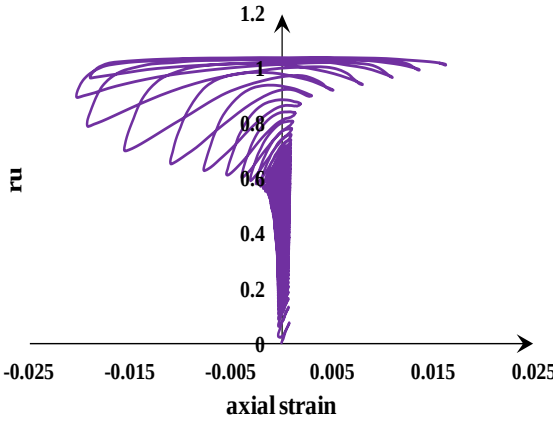
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]



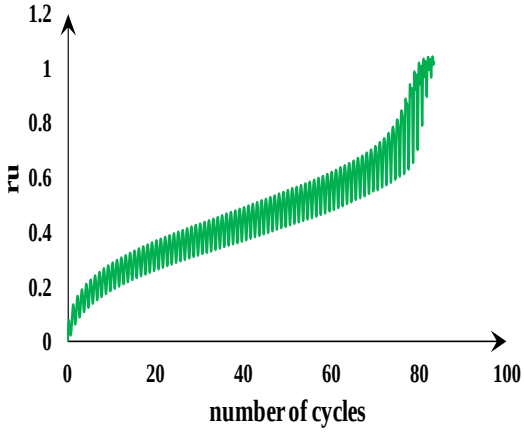

ب




الف

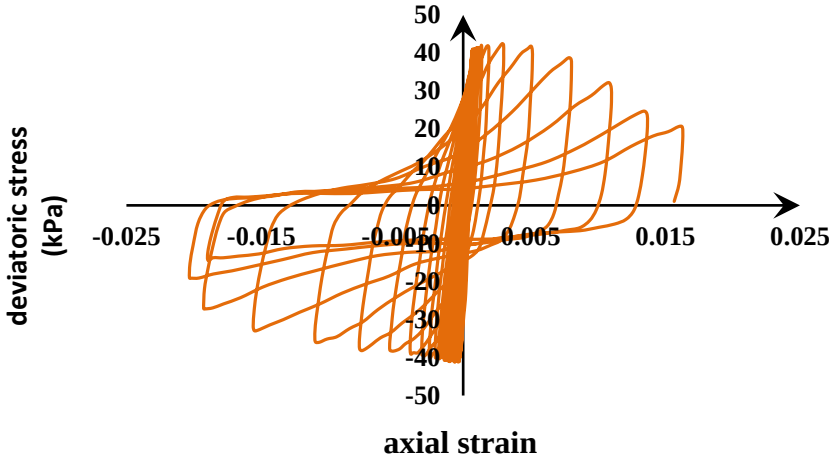



ت




پ

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]




ث

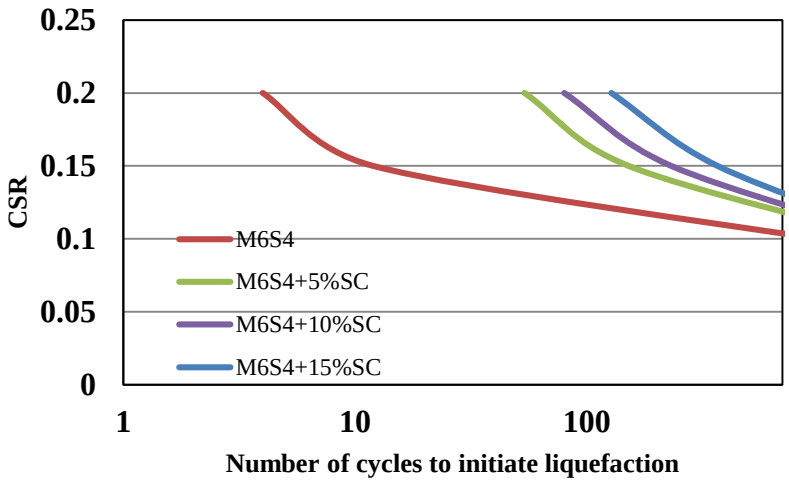
**شکل ۵: آزمایش سه محوری تناوبی در M6S4 بهسازی شده با ۱۰ درصد وزنی محلول نانو سیلیکا تحت‌فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، Dr=30% و CSR=0.2: (الف) نمودار تنش انحرافی برحسب تعداد سیکل، (ب) نمودار کرنش محوری برحسب تعداد سیکل، (پ) نمودار $r_u$ برحسب تعداد سیکل (ت) نمودار $r_u$ برحسب کرنش محوری (ث) نمودار تنش انحرافی برحسب کرنش محوری**

شکل‌های ۴ الف و ۵ الف تنش انحرافی برحسب تعداد سیکل را نشان می‌دهند که معادل تنش انحرافی برابر با CSR= 0.2 می‌باشند. شکل‌های ۴ ب و ۵ ب کرنش محوری برحسب سیکل می‌باشند و همان‌طور که از شکل ۴ ب نمایان است، در سیکل ۴ ام مقدار $r_u$ به یک رسیده و تغییر شکل‌ها شروع به افزایش پیدا کرده است که به عبارتی زمان آغاز روانگرایی می‌باشد (معیار روانگرایی $r_u = 1$ می‌باشد)، این در حالی است که در همین خاک و تحت همان CSR پس از بهسازی خاک با محلول نانو سیلیکای کلوئیدی با غلظت ۱۰ درصد (شکل ۵ ب) سیکل ۸۰ نقطه آغاز روانگرایی می‌باشد بنابراین نمایان است که بهسازی خاک توسط محلول ناو سیلیکا کلوئیدی با غلظت ۱۰ درصد تعداد سیکل‌های آغاز روانگرایی را ۷۶ سیکل به تأخیر انداخته است. به همین ترتیب شکل‌های ۴ پ و ۵ پ نشان‌دهنده تغییرات $r_u$ برحسب سیکل می‌باشند، از مقایسه این دو شکل تأثیر بهسازی خاک با نانو سیلیکای کلوئیدی به‌طور کامل مشخص است. در نمونه M6S4 (شکل ۴ پ) در سیکل ۴ ام $r_u$ به مقدار یک رسیده است که نشانگر آغاز روانگرایی خاک موردنظر می‌باشد، این در حالی است که در نمونه M6S4 بهسازی شده (شکل ۵ پ) در سیکل ۸۰ ام $r_u = 1$ حاصل شده است. از سویی دیگر در نمونه بهسازی نشده روند افزایش فشار آب حفره‌ای تا رسیدن به $r_u = 1$ تقریباً یکنواخت می‌باشد این در حالی است که در نمونه بهسازی شده روند افزایش فشار آب حفره‌ای تا $r_u = 0.7$ تقریباً یکنواخت بوده و بعد از آن به‌طور ناگهانی در چند سیکل افزایش می‌یابد و به $r_u = 1$ می‌رسد. تغییرات $r_u$ برحسب کرنش محوری نیز در شکل‌های ۴ ت و ۵ ت نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در نمونه بهسازی شده رسیدن $r_u$ به یک (۱) در تعداد سیکل‌های بیشتری نسبت به نمونه بهسازی نشده رخ می‌دهد

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

که آن بیانگر کاهش پتانسیل روانگرایی در نمونه بهسازی شده می‌باشد و همچنین بعد از رسیدن $r_u$ به یک (۱)، کرنش محوری در نمونه M6S4 در تعداد سیکل‌های کم به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد این در حالی است که این افزایش کرنش در نمونه M6S4 بهسازی شده، با سرعت کمتر و در تعداد سیکل‌های بسیار بالاتری حاصل می‌شود. شکل ۵ ث نشان‌دهنده نمودار تنش انحرافی برحسب کرنش محوری می‌باشد که بیانگر همان لوپ هیسترزیس تنش کرنش بوده که با آغاز روانگرایی، کرنش‌ها افزایش‌یافته و لوپ خوابیده‌تر شده است و در نتیجه می‌توان گفت که مقدار سختی خاک کاهش یافته است.

در ادامه در شکل ۶ نمودار CSR برحسب سیکل‌های موردنیاز روانگرایی بر اساس معیار $r_u = 1$، برای خاک بهسازی نشده و همچنین خاک‌های بهسازی شده با درصدهای مختلف نانو سیلیکای کلوئیدی ارائه شده است.

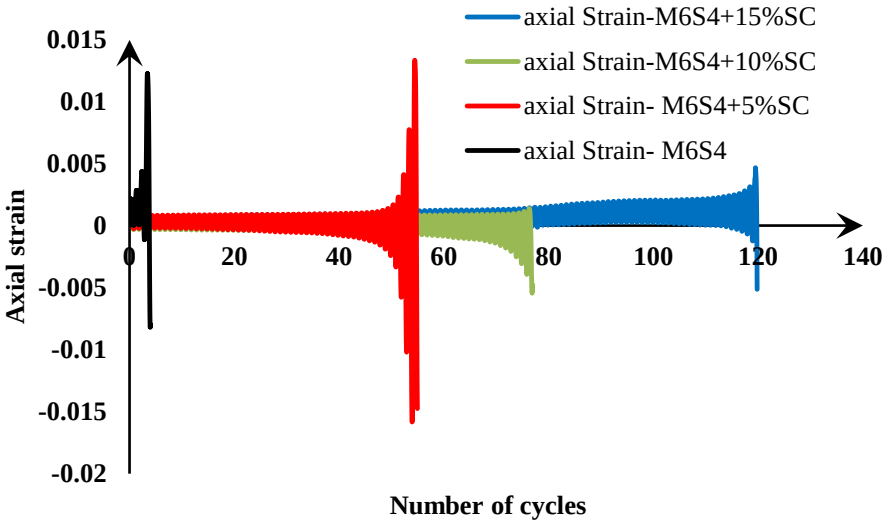



**شکل ۶. تغییرات CSR برحسب تعداد سیکل‌های موردنیاز روانگرایی برای M6S4 و درصدهای مختلف بهسازی با نانو سیلیکای کلوئیدی**

شکل ۶ نشان‌دهنده نمودار CSR برحسب تعداد سیکل‌های موردنیاز روانگرایی برای M6S4 بهسازی نشده و M6S4 بهسازی شده با درصدهای مختلف غلظت نانو سیلیکای کلوئیدی می‌باشد. همان‌طور که از نمودار مشخص است در CSR=0.2، M6S4 بعد از ۴ سیکل روان گرا شده است که این مقدار برای نمونه‌های بهسازی شده با، ۵ درصد محلول نانو سیلیکا (M6S4SC5%) ۵۴ سیکل، ۱۰ درصد محلول نانو سیلیکا (M6S4SC10%) ۸۰ سیکل و ۱۵ درصد محلول نانو سیلیکا (M6S4SC15%) ۱۲۸ سیکل می‌باشد؛ بنابراین تأثیر بسیار مثبت نانو سیلیکای کلوئیدی درافزایش مقاومت روانگرایی (کاهش پتانسیل روانگرایی ) M6S4 مشهود است. با افزودن ۵ درصد نانو سیلیکا به خاک مقاومت روانگرایی به میزان قابل‌توجهی افزایش‌یافته و بعد از آن با رسیدن غلظت محلول به ۱۰ و ۱۵ درصد میزان افزایش مقاومت روانگرایی، مقدار کمتری نسبت به ۵ درصد ابتدایی می‌باشد؛ بنابراین به نظر می‌رسد ۵ درصد نانو سیلیکا کلوئیدی مقدار بهینه جهت بهسازی M6S4 می‌باشد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

در شکل ۷ نمودار کرنش محوری برحسب سیکل برای M6S4 با درصدهای مختلف افزودنی نانو سیلیکا کلوئیدی ارائه شده است.

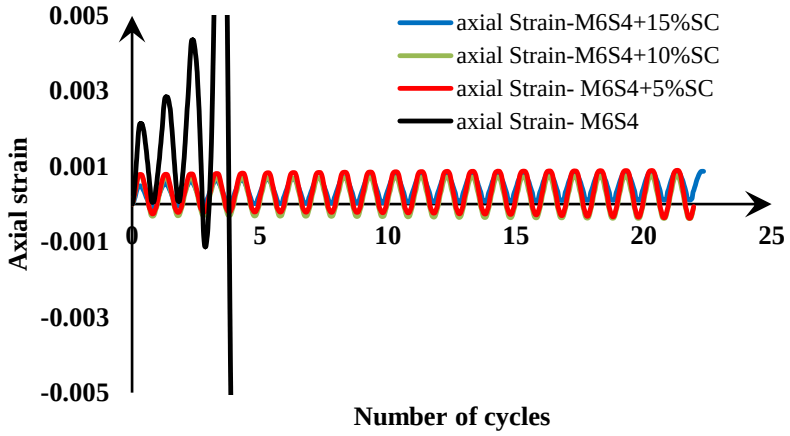



**شکل ۷. نمودار تغییرات کرنش محوری برحسب تعداد سیکل، برای M6S4 بهسازی نشده و بهسازی شده با درصدهای مختلف نانو سیلیکای کلوئیدی (CSR=0.2)**

در شکل ۷ نمودار کرنش محوری برحسب تعداد سیکل برای M6S4 در CSR=0.2 نشان داده شده است و همان‌طور که از شکل مشخص است نمونه M6S4 بهسازی نشده در چند سیکل اول بارگذاری کرنش‌های آن افزایش می‌یابد. در M6S4 بهسازی شده با غلظت های مختلف نانو سیلیکای کلوئیدی تأثیر درصدهای مختلف نانو سیلیکا بر افزایش مقاومت روانگرایی به‌وضوح نمایان می‌باشد و با افزایش غلظت نانو سلیکای کلوئیدی نقطه آغازین افزایش کرنش‌ها در تعداد سیکل‌های بارگذاری بالاتری حاصل می‌شود به عبارتی نمونه‌ای که با درصد بالاتری از غلظت نانو سیلیکای کلوئیدی بهسازی شده است در برابر بارگذاری سیکلی مقاوم‌تر شده و اعمال تعداد سیکل‌های بیشتری نیاز است تا نمونه شروع به تغییر شکل نماید.

در شکل ۸ نمودار کرنش محوری برحسب سیکل، برای M6S4 با درصدهای مختلف افزودنی نانو سیلیکا کلوئیدی به صورت محدود شده تا سیکل ۲۰ ام ارائه شده است.

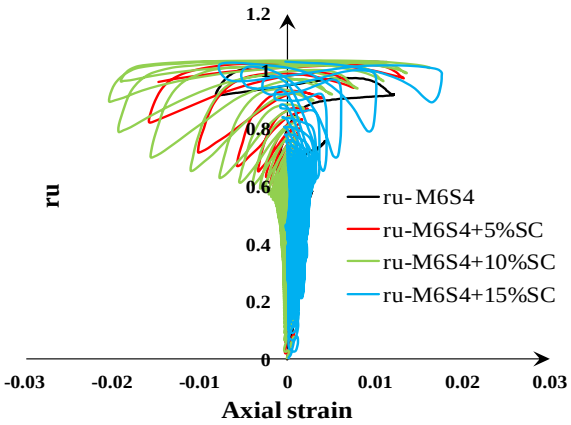
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]




**شکل ۸ نمودار تغییرات کرنش محوری برحسب تعداد سیکل، برای M6S4 بهسازی نشده و بهسازی شده با درصدهای مختلف نانو سیلیکای کلوئیدی به‌صورت محدود شده تا سیکل ۲۰ ام (CSR=0.2)**

در شکل ۸ به مقایسه نمونه بهسازی شده با سه درصد مختلف نانو سیلیکا کلوئیدی در تعداد سیکل‌های ۲۰ پرداخته شده است و نشان داده شده که نمونه‌های بهسازی شده با ۵ و ۱۰ درصد نانو سیلیکا، دامنه کرنشی که در سیکل ۲۰ ام تجربه می‌کنند تقریباً برابر است، ولی نمونه بهسازی شده با ۱۵ درصد نانو سیلیکا دامنه تغییرات کرنش آن کمتر از نمونه‌های بهسازی شده با ۵ و ۱۰ درصد نانو سیلیکا می‌باشد. همچنین به‌طورکلی دامنه تغییرات کرنشی نمونه‌های بهسازی شده بسیار کمتر از نمونه بهسازی نشده می‌باشد که در چند سیکل ابتدایی کرنش‌های بسیار زیادی را تجربه کرده است.

در شکل ۹ نمودار تغییرات $r_u$ برحسب کرنش محوری ارائه شده است.




**شکل ۹. نمودار تغییرات $r_u$ برحسب کرنش محوری، برای M6S4 بهسازی نشده و بهسازی شده با درصدهای مختلف نانو سیلیکای کلوئیدی (CSR=0.2)**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

در شکل ۹ در خاک مذکور هر چه درصد نانو سیلیکا نمونه‌های بهسازی بیشتر باشد تعداد سیکل‌های بیشتری نیاز است تا نمونه به $r_u$ برابر با یک برسد و همچنین نمونه‌ها با درصد نانو سیلیکا بالاتر در سیکل‌های ابتدایی کرنش کمتری را تجربه کرده‌اند.

## ۴- بحث و بررسی

در پژوهش‌های پیشین نوری و نورزاد (۲۰۱۷) نشان دادند که نانو سیلیکای کلوئیدی سبب بهبود خصوصیات استاتیکی ماسه سیلتی شده و همچنین رودریگز و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که نانو سیلیکای کلوئیدی در ماسه سیلتی سبب کاهش نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای و کرنش برشی حین بار سیکلی می‌شوند که با نتایج حاصله از این پژوهش مطابقت دارند.

همچنین در نتایج ارائه شده توسط نوری و نورزاد ۲۰۱۷ نمایان است که با افزایش درصد سیلت در ماسه سیلتی اثرات مثبت نانو سیلیکا کلوئیدی بر افزایش چسبندگی و بهبود سایر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها افزایش‌یافته است؛ بنابراین تأثیرات بسیار مثبت نانو سیلیکا کلوئیدی بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های حاوی مقادیر بالای سیلت مشهود بوده که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر مطابقت دارد.

از سویی دیگر گلگر و همکاران (۲۰۰۲) در پژوهش خود بر روی رفتار روانگرایی ماسه بهسازی شده با نانو سیلیکای کلوئیدی به این نتیجه دست یافتند که نمونه‌های بهسازی شده با ۵ درصد وزنی نانو سیلیکا در بهسازی غیرفعال سایت می‌تواند به‌طور کافی خطر روانگرایی ماسه سست را تحت ارتعاشات زلزله کاهش دهد و زمانی از غلظت ۱۰ درصد و فراتر از آن استفاده می‌شود که تصمیم بر آن باشد تا کرنش‌ها در یک سطح خاصی محدود شوند که البته استفاده از آن غیراقتصادی است. نتایج حاصله از این پژوهش بر روی سیلت ماسه‌ای با نتایج حاصله از پژوهش گلگر و همکاران ۲۰۰۲ مطابقت داشته و بهسازی سیلت ماسه‌ای با ۵ درصد وزنی نانو سیلیکا به‌طور کافی پتانسیل و خطر روانگرایی را کاهش داده است.

در این پژوهش جهت بهسازی غیرفعال سایت در برابر خطر روانگرایی برای سیلت ماسه‌ای از نانو سیلیکا کلوئیدی استفاده شده است زیرا از جنبه اقتصادی، عملکردی و زیست‌محیطی نسبت به سایر افزودنی‌ها برتری مشهودی دارد و همچنین برای خاک مورد بررسی در این پژوهش استفاده از محلول نانو سیلیکا کلوئیدی با غلظت ۵ درصد وزنی میزان بهینه جهت کاهش خطر روانگرایی بوده است بنابراین میزان بهینه نانو سیلیکا کلوئیدی در این پژوهش ۵ درصد وزنی از آب بین منافذ خاک می‌باشد. با توجه به دانسیته نسبی مدنظر در این پژوهش که ۳۰ درصد بوده و همچنین نتایج پس از اجرای آزمایش، مشخص شد که در هر نمونه در حدود ۶۰ میلی‌لیتر محلول نانو سیلیکا کلوئیدی نفوذ نموده است پس به عبارتی در یک نمونه بهسازی شده با محلول نانو سیلیکا کلوئیدی با غلظت ۵ درصد در این پژوهش حدود ۳ گرم از ذرات نانو سیلیکا کلوئیدی مصرف‌شده و از سویی دیگر با توجه به دانسیته موردنظر، وزن نمونه‌ها برای خاک مصرفی حدوداً ۳۰۰ گرم بوده است در نتیجه بهسازی یک نمونه با محلول نانو سیلیکا با غلظت ۵

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

درصد وزنی معادل افزودن ۳ گرم از ذرات نانو سیلیکا به نمونه خاک ۳۰۰ گرمی می‌باشد که معادل یک درصد از خاک می‌باشد.

از سویی دیگر در بهسازی‌های خاک‌هایی که در جریان آب زیرزمینی آن‌ها سدیم کلرید یا سایر نمک‌ها وجود دارد همانند سایت‌های ساحلی، در صورت استفاده از افزودنی‌هایی همچون سیمان مشکلاتی برای سیمان ایجاد خواهد شد که نیاز است از سیمان‌های خاصی استفاده نماییم یا تمهیداتی دیگر اندیشیده شود که ممکن است پروژه را غیراقتصادی نماید ولی در بهسازی خاک با نانو سیلیکا کلوئیدی نه‌تنها وجود سیدیم کلرید و سایر ترکیبات، تأثیر منفی نخواهند داشت بلکه با یک شناسایی ابتدایی از ترکیبات موجود در آب زیرزمینی می‌توان سایر پارامترهای تأثیرگذار بر ژلاسیون نانو سیلیکا کلوئیدی را به‌گونه‌ای تنظیم نمود تا از وجود نمک‌های موجود در سفره آب زیرزمینی بهترین استفاده را نمود.

به‌طورکلی استفاده از نانو سیلیکا کلوئیدی از دیدگاه زیست‌محیطی نسبت به سایر افزودنی‌ها برتری‌های چشمگیری دارد و ازجمله مهم‌ترین فواید جایگزین نمودن نانو سیلیکا کلوئیدی به‌جای سیمان، کاهش $CO_2$ در جو زمین می‌باشد زیرا یکی از منابع اصلی تولید $CO_2$ فرآیند تولید سیمان می‌باشد.

با توجه به مطالب بیان‌شده می‌توان نتیجه گرفت که نانو سیلیکا کلوئیدی یک افزودنی بسیار مناسب جهت بهسازی غیرفعال سایت در خاک‌های سیلت ماسه‌ای می‌باشد.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی پتانسیل روانگرایی خاک، لای با ۴۰ درصد ماسه (M6S4) بهسازی شده با سه درصد وزنی نانو سیلیکای کلوئیدی (5wt%، 10wt% و 15wt%) تحت CSR های مختلف پرداخته‌شده است. به‌طورکلی بهسازی با گروت نانو سیلیکای کلوئیدی مقاومت روانگرایی سیلت ماسه‌ای را در برابر بار سیکلی به میزان قابل‌توجهی افزایش و تغییر شکل‌ها را کاهش داده است و همچنین نتایج زیر حاصل شده است.

- در خاک بهسازی نشده تحت CSR بالا (CSR=0.2) در چند سیکل ابتدایی تغییر شکل‌ها افزایش‌یافته و روانگرایی در نمونه حاصل می‌گردد اما در نمونه‌های بهسازی شده حتی در درصد وزنی نانو سیلیکای کلوئیدی کم (۵ درصد وزنی نانو سیلیکای کلوئیدی) مقاومت روانگرایی به‌طور چشمگیری افزایش‌یافته است.
- با افزایش درصد وزنی نانو سیلیکای کلوئیدی در نمونه‌ها مقاومت روانگرایی و مقاومت در برابر تغییر شکل‌ها تحت بار سیکلی افزایش‌یافته است. با افزوده شدن ۵ درصد وزنی نانو سیلیکای کلوئیدی به نمونه مقاومت روانگرایی به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیدا کرده است، این در حالی است که با افزوده شدن ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی افزایش مقاومت کمتری نسبت به ۵ درصد ابتدایی حاصل می‌شود، بنابراین استفاده از نانو سیلیکای کلوئیدی با غلظت ۵ درصد در خاک ۴۰ درصد ماسه با ۶۰ درصد لای، پتانسیل و خطر روانگرایی را به‌طور کامل کاهش می‌دهد و استفاده از غلظت‌های بالاتر برای این منظور غیراقتصادی می‌باشد؛ بنابراین میزان ۵ درصد نانو سیلیکا کلوئیدی در محدوده درصدهای مورد بررسی در این پژوهش میزان بهینه می‌باشد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

- همچنین در انتها نیاز است بیان شود که نتایج حاصل از این پژوهش با توجه به شرایط‌های در نظر گرفته در این تحقیق حاصل شده است که نسبت به شرایط جامع واقع در طبیعت دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها، خاک مورد بررسی که ۶۰ درصد سیلت و ۴۰ درصد ماسه بوده، دانسیته نسبی ۳۰ درصد، اعمال تحکیم همسان در آزمایشگاه که ممکن است در شرایط واقعی به‌طور کامل حاصل نگردد و تفاوت‌های بین بارگذاری زلزله واقعی با شرایط اعمالی دستگاه سه محوری سیکلی می‌باشد.

## ٦- منابع:


1- Agapoulaki G. I., Papadimitriou A.G. “Rheological properties of colloidal silica grout for passive stabilization against liquefaction”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, (2018), 30(10).

2- Eliyas E. T. “Impact of Micropiles Installation on Liquefaction Potential of Saturated Silty Sand Using Numerical Method”, JEG. (2020); 13 (5) :147-176 URL: http://jeg.khu.ac.ir/article-1-2616-fa.html

3- Bahadori H., farzalizadeh R. “Effect of tire Powders on Dynamic Behavior and Liquefaction Resistance of Saturated Sands”, JEG. (2019); 12 (3) :409-428 URL: http://jeg.khu.ac.ir/article-1-2538-fa.html

4- Japanese Geotechnical Society. Remedial measures against soil liquefaction. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema,(1998).

5- Towhata I. “Geotechnical earthquake engineering”, Geomechanics and geoengineering, edited by W. Wu and R. I. Borja, 697. Berlin: Springer, (2008).

6- Olgun C. G., Martin J. R. “Effectiveness of jet-grout columns for mitigation of liquefaction during earthquakes”, Geotechnical engineering for disaster mitigation and rehabilitation, Springer,(2008).

7- Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G., Niarchos D. N., Tsiapas Y. Z. “Sand fabric evolution effects on drain design for liquefaction mitigation”, Soil Dyn. Earthquake Eng. 31 (10): 1426–1439, (2011).

8- Shen S. L., Wang Z. F., Horpibulsuk S., Kim, Y. H. “Jet grouting with a newly developed technology: The twin-jet method”, Eng. Geol. 152 (1): 87–95, (2013).

9- Shen S. L., Wang Z. F., Cheng W. C. “Estimation of lateral displacement induced by jet grouting in clayey soils”, Geotechnique 67 (7): 621–630, (2017).


[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

10- Porcino D., Marciano V., Granata R. “Static and Dynamic Properties of a Lightly Cemented Silicate-grouted Sand”, Canadian Geotechnical Journal 49 (10): 1117–1133, (2012).

11- Guyer J. P. “An Introduction to Soil Grouting”, Course No.C02-017. Continuing Education and Development, (2009).

12- Gallagher P. M. “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Univ. (2000).

13- Gallagher P. M., Mitchell J. K. “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22,1017–1026, (2002).

14- Kodaka T., Oka F., Ohno Y., Takyu T., Yamasaki N. “Modelling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand”, In Proc., 1st Japan–US Workshop on Testing, Modelling, and Simulation (GSP 143). 205–216. (2005), Reston, VA: ASCE.

15- Gallagher P. M., Pamuk A., Abdun T. “Stabilization of Liquefiable Soils using Colloidal Silica”, Journal of Materials in Civil Engineering, 19(1):33–40, (2007).

16- Gallagher P. M., Conlee C. T., Kyle M. “Full Scale Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk”, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133 (2), 186-196, (2007).

17- Rodriguez J. A., Izarras V. M. “Mitigation of Liquefaction Risk Using Colloidal Silica Stabilizer”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, 1-6 August, pp 509-519, (2004).

18- Mollamahmutoglu M., Yilmaz Y. “Pre- and post-cyclic loading strength of silica-grouted sand”, Proc ICE Geotechn Eng,163:343–348, (2010).

19- Huang Y., Wen Z. “Recent Developments of Soil Improvement Methods for Seismic Liquefaction Mitigation”, Nat Hazards, (2015), DOI 10.1007/s11069-014-1558-9.

20- Huang Y., Wang L. “Experimental studies on nano materials for soil improvement”, a review Environ Earth Sci., (2016), 75:497 DOI 10.1007/s12665-015-5118-8.

21- Wong, C., Pedrotti, M., El Mountassir, G., Lunn, R. J. “A study on the mechanical interaction between soil and colloidal silica gel for ground improvement”, Engineering geology, 243, 84-100. (2018).

22- Krishnan, J., Shukla, S. “Mechanical behaviour of sand treated with colloidal silica”, In Geotechnical Characterization and Modelling (pp. 467-479). (2020). Springer, Singapore.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

23- Vranna, A., Tika, T. “Laboratory improvement of liquefiable sand by colloidal silica and weak cementation”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 174(4), 240-251. (2021).

24- Krishnan, J., Sharma, P., Shukla, S., Pancholi, V., Dwivedi, V. K. “Cyclic behaviour and durability analysis of sand grouted with optimum colloidal silica content”, Arabian Journal for Science and Engineering, 45(10), 8129-8144. (2020).

25- Krishnan, J., Shukla, S. “The utilisation of colloidal silica grout in soil stabilisation and liquefaction mitigation: a state of the art review”, Geotechnical and Geological Engineering, 39(4), 2681-2706. (2021).

26- Gallagher P.M., Lin Y. “Colloidal Silica Transport through Liquefiable Porous Media”, J. Geotech.Geoenviron. Eng. ASCE. 135: 1702-1712, (2009).

27- Agapoulaki G.I., Papadimitriou A.G., Kandris K., Pantazidou M. “Permeation potential of colloidal silica for passive stabilization of liquefiable soils”, Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, pp. 2201-2206. (2015).

28- Rodriguez J. A., Antonio-Izarras V. M., Bandini P., Lopez-Molina J. A. “Cyclic Strength of Natural Liquefiable Sand Stabilized with Colloidal Silica Grout”, Canadian Geotechnical Journal, 45(10):1345–1355, (2008).

29- Nouri Delavar I., Noorzad R. “Drained shear strength parameters of silty sand grouted by colloidal silica”, International Journal of Geotechnical Engineering. (2017).

30- Zhao M., Liu G., Zhang Ch., Guo W., Luo Q. “State-of-the-Art of Colloidal Silica-Based Soil Liquefaction Mitigation: An Emerging Technique for Ground Improvement”, Applied sciences, 10,15. (2019).

31- Polito C.P. “the effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soil”, PhD Thesis, University Libraries, Virginia Polytechnic Institute and State University. (1999).

32- Ghahremani M., Ghalandarzadeh A., Moradi M. “Effect of Plastic Fines on Cyclic Resistance of Saturated Sands”, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Vol.8, N.2, pp 71-80, (2006). In Persian.

33- Mitchell J.K. "Soil Improvement - State of the Art Report", Proc. X ICSMFE, Stockholm, Vol. 4,pp. 509-565, (1981).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

34- Chang S. Y., Liu L., Asher S. A. “Preparation and properties of tailored morphology, monodisperse colloidal silica cadmiumsulfide nanocomposites”, J Am Chem Soc, 1994, 116(15):6739–6744, (1994).

35- Lin Y. “Colloidal silica transport mechanisms for passive site stabilization of liquefiable soils”, Ph.D. thesis, Drexel Univ. (2006).

36- Martin J. E., Wilcoxon J. P., Schaefer D., Odinek J. “Fast aggregation of colloidal silica”, Phys Rev, A 41(8):4379, (1990).

37- ASTM D5311. Standard Test Method for Load Controolled Cyclic Triaxial Strength of Soil. (2013).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

# Investigating the effect of colloidal nanosilica in the passive improvement method on the liquefaction potential and changes in the pore water pressure of sandy silt

**Sina Safargholi Tabar Marzooni[1], Meysam Fadaei[2], Amin Bahmanpoor[3], Mehdi Derakhshandi[4]**

**1-Civil Engineering group, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran**

*sina.marzuni@srbiau.ac.ir*

**2-Civil Engineering group, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (correspond author)**

*fadaee@srbiau.ac.ir*

**3-Civil Engineering group, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran**

*aminbahmanpour@srbiau.ac.ir*

**4-Civil Engineering group, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran**

*m-derakhshandi@srbiau.ac.ir*

## Abstract

The reason for many failures due to earthquake is presence of loose up to semi compacted, and saturated deposits is liquefaction. Passive improvement of a site is a novel concept which indicates reducing the risk of liquefaction without interfering with developed sites or high rise and sensitive structures which are susceptible to liquefaction during an earthquake. The effectiveness of the passive improvement method depends on the used additive in the method. Colloidal nanosilica with a viscosity close to that of water is capable of penetrating a wide range of soils. It has very good compatibility with the environment, and a very low

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

cost -performance ratio. Thus, it has been used for passive improvement of site in this research. The Previous research works have investigated the liquefaction potential of sand and colloidal nanosilica-improved sand with small amounts of plastic and non-plastic fine-grained particles. Therefore, studies on passive improvement of site with colloidal nanosilica in sandy silt soil have been very limited, with the liquefaction potential of colloidal nanosilica-improved sandy silt soil yet to be adequately investigated. The present research considers the liquefaction potential of sandy silt soil (composed of sand (40%) and silt (60%)) upon improvement with colloidal nanosilica at different dosages (i.e., 5, 10, and 15 wt.%) using cyclic triaxial loading tests under different cyclic stress ratios (CSR) with the final purpose of passive improvement of the site. Optimization of the nanosilica dosage for lowering the risk of liquefaction down to an acceptable level and determination of optimal chemical composition of the colloidal nanosilica for enhancing its effectiveness in the soil improvement process were further performed. In this study, the acceptance criterion for liquefaction potential was an ru value of 1. The results indicated that, before the passive improvement, higher CSRs (CSR = 0.2) led to soil deformation in early cycles, making the sample liquefied. However, adding the colloidal nanosilica at even a low dosage (5 wt.%) improved the resistance to liquefaction significantly. On the other hand, with increasing the dosage of the colloidal nanosilica in the samples, improvements were observed in the resistance to liquefaction and deformation under cyclic loading. Introduction of colloidal nanosilica to the sample at 5 wt.% increased the resistance to liquefaction significantly. Nevertheless, further increase in the resistance to liquefaction upon adding the colloidal nanosilica at 10 and 15 wt.% was not as high as the initial increase achieved with 5 wt.%. In conclusion, one may stipulate that incorporation of colloidal nanosilica into a 40% snad-60% silt soil can attenuate the risk of liquefaction abruptly, while the use of this additive at higher dosages is economically inefficient. That is, considering the range studied in this work, the optimum dosage of the colloidal nanosilica is 5 wt.%. Finally, liquefaction curves were presented for non-modified soil as well as improved soils with colloidal nanosilica at different dosages.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

**Keywords**: Liquefaction, cyclic triaxial, sandy silt, passive improvement, colloidal nanosilica

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]