

## Stabilizing rammed earth walls as a sustainable construction method with eco-friendly material: a case study

Mostafa Zamanian<sup>1\*</sup>, Marzieh Hassanvandian<sup>2</sup>, Ali Norzad<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil, water and environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil, water and environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Rammed earth walls are known as sustainable and eco-friendly construction methods, constructed by the local soil in the temporary framework. Generally, the unstabilized soil does not have suitable compression and tension strength for construction. Ordinary Portland cement and lime are frequently used materials for soil stabilization. Regarding the environmental drawbacks of cement as a frequently used, affordable, and available material, it is essential to use eco-friendly material for soil stabilization. In this study, the mechanical behavior of the soil activated by sodium hydroxide, as an eco-friendly material, has been investigated, and the results compared with cement stabilized soil. Unconfined compressive and Brazilian tests for determining the compressive and tensile strength of the rammed earth were performed on the stabilized specimens. The specimens were prepared at different conditions of curing condition, curing time, and binder content. Results indicated that the slag stabilized specimens resulted in more compressive and tensile strength than cement stabilized soil. The superb improvement performance was observed at hot-dry condition, where is a suitable improvement strategy for the arid climate of Iran as well as water scarcity. The soil stabilizing with slag resulted in outstanding improvement efficiency; however, it increased soil brittleness which is not suitable for seismic behavior and may cause a sudden failure in the soil.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 18 September 2021

**Revise Date:** 12 January 2022

**Accept Date:** 22 February 2022

### Keywords:

Stabilized rammed earth  
Iron furnace slag  
Ordinary Portland cement  
Compressive strength  
Tensile strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304317.2569>

\*Corresponding author: Mostafa zamanian.  
Email address: m\_zamanian@sbu.ac.ir

## تثبیت خاک کوبیده شده بعنوان یک روش ساخت پایدار با مصالح دوستدار محیط

### زیست: مطالعه موردی

مصطفی زمانیان<sup>\*</sup>، مرضیه حسنوندیان<sup>۲</sup>، علی نورزاد<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

دیوارهای خاک کوبیده شده یک روش ساخت و ساز پایدار و دوستدار محیط زیست به شمار می روند که از خاک محل برای ساخت و ساز استفاده می کنند. عموماً مقاومت فشاری و کششی خاک های کوبیده شده کافی نبوده و نیاز به تثبیت دارند. با توجه به مشکلات زیست محیطی بالای سیمان بعنوان یک ماده پرکاربرد و ارزان و در دسترس، استفاده از سایر مواد سازگار با محیط زیست برای تثبیت خاک ها یک ضرورت تلقی می شود. در این تحقیق، رفتار مکانیکی خاک تثبیت شده با سرباره کوره آهن که با محلول هیدروکسید سدیم فعال شده است، بعنوان یک ماده دوستدار محیط زیست، بررسی شده و نتایج با تثبیت با سیمان مقایسه شده است. بر روی نمونه ها آزمایش های تک محوری و کشش برزیلی با اندازه گیری دقیق تنش و کرنش انجام شد. نمونه ها در شرایط مختلفی از نظر نحوه عمل آوری، زمان عمل آوری و درصد ماده تثبیت کننده آماده شدند. نتایج نشان داد که تثبیت با سرباره مقاومت فشاری و کششی بسیار بیشتری نسبت به سیمان ایجاد خواهد کرد. بهترین عملکرد سرباره در شرایط عمل آوری خشک بدست آمد که با توجه به اقلیم خشک ایران و کمبود آب، گزینه مناسبی برای بهسازی خاک ها به شمار می رود. بهسازی با سرباره اگرچه عملکرد بسیار خوبی در مقاومت کششی و فشاری و سختی سکانت نمونه ها داشت، اما منجر به افزایش تردی نمونه ها شد که در رفتار لرزه ای و یا شکست ناگهانی خاک یک عملکرد نامناسب به شمار می رود.

کلمات کلیدی: خاک کوبیده شده، سرباره کوره آهن، سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت کششی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304317.2569">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304317.2569</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.304317.2569	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۰/۱۲/۰۳	۱۴۰۰/۱۲/۰۳	۱۴۰۰/۱۰/۲۲	۱۴۰۰/۰۶/۲۷
				*نویسنده مسئول:		
				مصطفی زمانیان		
				m_zamanian@sbu.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

صنعت ساخت و ساز یکی از پرمصرف‌ترین صنایع در جهان از لحاظ مصرف انرژی به شمار می‌رود، بطوریکه بیش از ۳۵٪ از کل انرژی تولیدی در جهان در این صنعت مصرف می‌شود. به تبع آن، گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی در این صنعت از منابع اصلی انتشار گاز CO<sub>2</sub> است [۱]. با توجه به موضوع نگران کننده گرمایش زمین، استفاده از روش‌های ساخت و ساز دوستدار محیط زیست، بعنوان یک نیاز و ضرورت تلقی می‌شوند. سازه‌های خاکی از زمان‌های قدیم بعنوان یک روش ساخت و ساز دوستدار محیط زیست مورد توجه بوده‌اند. دیوارهای خاک کوبیده شده توسط فشرده سازی لایه‌های خاکی بین قالب‌ها و در محل ساخته می‌شوند [۲-۶]. از قدیم چسبندگی بین دانه‌های خاک برای تامین پایداری این سازه‌ها توسط رس تامین می‌شده است. به دیوارهای خاک کوبیده‌ای که در آن‌ها از رس به عنوان ماده چسبنده استفاده می‌شود، خاک کوبیده<sup>۱</sup> (URE) گفته می‌شود. معمولاً خاک‌های طبیعی دارای مقاومت کافی نیستند و باید به منظور استفاده از آن‌ها در دیوارهای خاک کوبیده شده، خواص مهندسی آنها بهبود یابد. تثبیت شیمیایی یک روش مرسوم برای این منظور است و سیمان پرتلند یکی از متداول‌ترین مواد تثبیت کننده است. سیمان و آهک دو ماده ارزان و در دسترس برای تثبیت خاک به‌شمار می‌روند که اخیراً بطور گسترده‌ای از آنها استفاده می‌شود و به خاک تثبیت شده با آن‌ها، دیوار خاک کوبیده<sup>۲</sup> (SRE) گفته می‌شود [۷]. تحقیقات نشان می‌دهد که فرآیند تولید سیمان پرتلند منجر به انتشار مقدار زیادی گاز دی اکسید گوگرد و نیز انتشار گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> (۰/۷ تا ۱/۱ تن گاز دی اکسید کربن به ازای هر تن سیمان) می‌شود. علاوه بر این تولید گرد و غبار در کارخانه تولید سیمان، مصرف زیاد انرژی (حدود ۵٪ از انرژی صنعتی جهان) و تخریب منابع طبیعی (تولید یک تن سیمان به ۱/۵ تن سنگ آهک و ماسه نیاز دارد) منجر شده است که سیمان بعنوان یکی از آلوده‌ترین صنایع طبقه‌بندی شود [۸]. از این‌رو نیاز به تحقیق برای شناسایی بیشتر مواد سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه که بتوانند عملکردی مشابه با سیمان داشته باشند، اهمیت ویژه‌ای دارد.

اخیراً، استفاده از مواد زائد صنایع و مواد پوزولانی بدون استفاده موجود در طبیعت همچون خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و سرباره کوره به منظور بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۹، ۵، ۱۲]. ژئوپلیمرها به دو صورت طبیعی (مانند ژئوپلیمر طبیعی پوزولان تفتان) و یا پسماند زائدات صنایع (مانند سرباره کوره آهن) وجود دارند. این مواد منابع غنی‌ای از سیلیس و آلومینیوم هستند که با افزودن فعال کننده قلیایی به آن‌ها، فرآیند ژئوپلیمراسیون در آن‌ها اتفاق می‌افتد. در این فرآیند با حل شدن سیلیس و یا آلومینیوم در فعال کننده، ژل پلیمری با خاصیت همبندی قوی ایجاد می‌شود و در بسیاری موارد می‌تواند بعنوان جایگزین سیمان استفاده شود. فعال سازی قلیایی فرآورده‌های فرعی صنعتی غنی از سیلیس حدود ۸۰-۹۰٪ دی اکسید کربن کمتری نسبت به سیمان تولید می‌کند [۱۳]. تثبیت خاک با استفاده از فعال سازی قلیایی سرباره سازگار با محیط زیست است و همچنین باعث بهبود خصوصیات مکانیکی خاک‌های تثبیت شده می‌شود. بنابراین می‌توان آن را جایگزینی برای سیمان پرتلند دانست [۱۴].

صدیقوآ<sup>۳</sup> و بارتو<sup>۴</sup> از خاکستر آتشفشانی و کلسیم کاربرد برای تثبیت خاک کوبیده شده استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها، تثبیت شیمیایی یک روش بسیار مفید برای افزایش ویژگی‌های خاک کوبیده شده است [۱۵]. شارما<sup>۵</sup> و آناند<sup>۶</sup> در مورد جنبه‌های مقاومت تک محوری و دوام خاک کوبیده شده تثبیت شده با ذرات خاکستر زغال سنگ و استفاده از ضایعات صنعتی برای پایداری ساخت و ساز تحقیق

<sup>1</sup> Unstabilized rammed earth

<sup>2</sup> Stabilized rammed earth

<sup>3</sup> Siddiqua

<sup>4</sup> Barreto

<sup>5</sup> Sharma

<sup>6</sup> Anand

کردند [۱۶]. توفیق و کیانفر در تحقیق خود مقایسه‌ای بین تثبیت‌کننده‌ها از جمله سیمان، پوزولان، میکروسیلیس، فایبرگلاس و صمغ گوار بر عملکرد مخلوط‌های خاک کوبیده شده مورد ارزیابی قرار دادند [۱۷].

سرباره فعال شده قلیایی یکی از انواع تثبیت‌کننده‌های دوستدار محیط زیست است که از طریق واکنش بین سرباره (به عنوان مثال، سرباره کوره انفجار) و فعال‌کننده‌های قلیایی شامل قلیاها، نمک‌های اسیدی ضعیف، سیلیکات‌ها، آلومینات‌ها و آلومینوسیلیکات‌ها تشکیل می‌شود. سینگلی<sup>۷</sup> و همکاران به بررسی خاک و ژئوپلیمر شامل سرباره، خاکستر بادی و مخلوط سرباره و خاکستر پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با افزایش مقدار سرباره به طور پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین هنگامی که خاکستر بادی به عنوان تثبیت‌کننده استفاده می‌شود، مقاومت فشاری در مقایسه با مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر تثبیت شده با سرباره بسیار کمتر است [۱۸]. توماس<sup>۸</sup> و همکاران به بررسی اثر سرباره کوره آهن و آنزیم‌های فعال قلیایی در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی در خاک جمع آوری شده از منطقه تیلدا از چاتیسگار هند پرداخته‌اند و مقادیر مختلفی از تثبیت‌کننده‌ها را برای بررسی تاثیر بر روی رطوبت بهینه، حداکثر تراکم خشک، تغییر شکل‌پذیری، مقاومت فشاری محدود نشده و پارامترهای مقاومت برشی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزودن تثبیت‌کننده‌ها، تخلخل نمونه خاک بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد در حالی که زاویه اصطکاک داخلی تغییر چندانی نداشت [۱۹]. قدیر<sup>۹</sup> و رنجبر<sup>۱۰</sup> در تحقیق خود ژئوپلیمر طبیعی تفتان را برای تثبیت‌کننده خاک رس استفاده کردند و نتایج بدست آمده از تثبیت با سیمان در شرایط خشک (DC) و مرطوب (OC) مقایسه کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در شرایط خشک، عملکرد ژئوپلیمر بهتر می‌شود [۲۰]. یی<sup>۱۱</sup> و همکاران تاثیر فعال‌کننده‌های NaOH-CS، NaOH، Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>، CS، NaOH-GGBS را بر راندمان تثبیت بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که خاک رس تثبیت شده با NaOH-GGBS بالاترین میزان مقاومت فشاری محدود نشده را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز دارد [۲۱].

انتشار SO<sub>2</sub> و NO<sub>x</sub> همراه با CO<sub>2</sub> آزاد شده از صنعت سیمان می‌تواند باعث اثر گلخانه‌ای و باران اسیدی شود. بنابراین اهمیت جایگزینی سیمان پرتلند با محصولات صنعتی مختلف مانند سرباره (GGBS) مشخص می‌شود. نتایج تحقیقات دو<sup>۱۲</sup> و همکاران نشان می‌دهد که قرار گرفتن خاک آلوده به فلزات سنگین در معرض باران اسیدی باعث کاهش مقاومت فشاری خاک می‌شود و چگالی خشک خاک به مقدار جزئی تغییر می‌کند. اما با افزایش محتوای سرباره مقاومت فشاری تک محوری خاک به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۲۲]. ژئوپلیمرهای با اسیدها در دمای اتاق واکنش نشان نمی‌دهند و می‌توانند برای تولید مواد مقاوم به اسید استفاده شوند. مقاومت قلیایی و اسیدی ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی تا حد زیادی توسط ترکیب معدنی آنها برای تشکیل یک شبکه آلومینوسیلیکات (N-A-S-H) تعیین می‌شود و تخریب ماتریس ژئوپلیمر دلیل اصلی از بین رفتن مقاومت خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر در محلول اسید است [۲۳].

اخیراً تحقیقات زیادی بر روی تثبیت خاک‌ها خصوصاً خاک‌های رسی و یا خاک‌های مسئله دار با استفاده از مصالح جدید با هدف جایگزینی سیمان با یک ماده دوستدار طبیعت انجام شده است. اما تحقیقات محدودی بر روی تثبیت خاک‌های دانه ای انجام شده است. در این تحقیق هدف تثبیت و افزایش مقاومت فشاری و کششی یک خاک مخلوط طبیعی که در دیوارهای خاک کوبیده شده بعنوان سازه‌های دوستدار محیط به شمار می‌روند، استفاده شده است. به همین منظور از سرباره کوره آهن بعنوان یک ماده دوستدار طبیعت

<sup>7</sup> Singhi

<sup>8</sup> Thomas

<sup>9</sup> Ghadir

<sup>10</sup> Ranjbar

<sup>11</sup> Yi

<sup>12</sup> Du

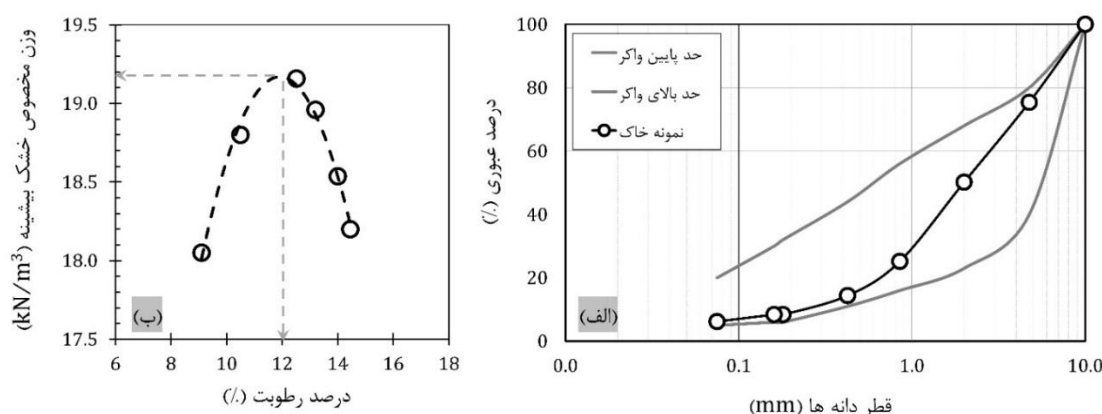
استفاده شد و نتایج تثبیت با خاک مخلوط با سیمان (بعنوان پرکاربردترین ماده تثبیت کننده) مقایسه شد. با توجه به اینکه دیوارهای خاک کوبیده شده عملکرد مناسبی در مناطق گرم و خشک دارند و در مقابل بارندگی و رطوبت عملکرد آنها مختل می شود، نمونه‌ها در دو شرایط عمل آوری مختلف شامل شرایط رطوبت بهینه و شرایط گرم و خشک عمل آوری شدند تا تاثیر شرایط آب و هوایی بر راندمان تثبیت مشخص شود. علاوه بر این تاثیر مقدار ماده تثبیت کننده بر راندمان تثبیت نیز مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مصالح مصرفی

در این تحقیق از خاک بعنوان ماده اصلی، سرباره کوره آهن و سیمان برای تثبیت خاک استفاده شده است. همچنین محلول قلیایی NaOH برای فعال کردن سرباره کوره آهن بکار رفته است. در ادامه ویژگی‌های خاک و تثبیت کننده مورد استفاده در این پژوهش بیان شده است.

### ۲-۱ خاک

خاک ماده اصلی ساخت سازه‌های خاک کوبیده شده است و معمولاً بیش از ۸۰ تا ۹۰ درصد از حجم دیوار را خاک تشکیل می‌دهد. ارجحیت ساخت و ساز به روش دیوار خاک کوبیده شده، استفاده از خاک محلی بعنوان یک ماده ارزان و در دسترس است. به همین منظور در این تحقیق از خاک محل نزدیک به آزمایشگاه دانشگاه واقع در منطقه حکیمیه (تهران - ایران) پس از برداشت خاک هوازده استفاده شد. توزیع اندازه ذرات و خصوصیات سنگدانه‌ها از عوامل تاثیرگذار بر خواص مکانیکی خاک کوبیده شده است. برای آنکه خاک در محدوده مجاز خاک کوبیده شده، طبق معیار واکر ۱۳ و همکاران [۲۴] قرار گیرد ابتدا خاک از الک  $\frac{3}{8}$  اینچ (۱۰ میلی متر) عبور داده شد. سپس آزمایش دانه بندی طبق آیین‌نامه ASTM-D421 انجام شد [۲۵]. خاک مورد استفاده براساس سیستم طبقه بندی متحد خاک به عنوان خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده (SW) طبقه بندی می‌شود. لازم به ذکر است که براساس معیار واکر و همکاران، این خاک در محدوده قابل قبولی برای دیوار خاک کوبیده شده نبود. بنابراین به مقدار ۶٪ وزن خاک خشک، رس کائولینیت به صورت مصنوعی اضافه شد. شکل ۱- الف منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد. چگالی دانه‌های جامد خاک ( $G_s$ ) مطابق آیین‌نامه ASTM D-854 اندازه‌گیری شد که مقدار آن ۲/۶۱ بدست آمد [۲۶]. آزمایش تراکم استاندارد بر روی خاک مورد مطالعه طبق آیین‌نامه ASTM, D-698 انجام شد و نتایج آزمایش نشان داد که درصد رطوبت بهینه ۱۲٪ و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک  $\frac{19.2}{m^3}$  است (شکل ۱-ب) [۲۷].



شکل ۱: الف) منحنی دانه بندی خاک مورد آزمایش، ب) نتایج آزمایش تعیین تراکم حداکثر و رطوبت بهینه

## ۲-۲ سرباره کوره آهن

به ازای هر تن آهن خام، ۱۰۰۰ کیلوگرم سرباره نیز تولید می‌شود که ساختاری شبیه به سیمان معمولی دارد. اما با توجه به ضعف کارخانجات داخلی در فرآوری، عملاً بخش عمده این سرباره‌ها غیر قابل استفاده بوده و در طبیعت دفن می‌شوند. سرباره استفاده شده در این تحقیق از شرکت بنا بنیان زیست فناوری تهیه شده است. نتایج آنالیز شیمیایی سرباره در جدول ۱ ارائه شده است. عمده مواد تشکیل دهنده سرباره‌های کوره آهن موجود در کشور سیلیکات، آلومینوسیلیکات و کلسیم سیلیکات است. برای تثبیت خاک از سرباره در درصد‌های وزنی جایگزین ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد خاک خشک استفاده شده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی پودر سرباره آهن به روش XRF بر اساس درصد وزنی عناصر و ترکیبات تشکیل دهنده آن

نوع کانی	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	SiO <sub>2</sub>	CaO	BaO	TiO <sub>2</sub>
درصد وزنی	۰/۳	۰/۷	۱/۵	۸/۹	۰/۶	۸/۴	۰/۷	۰/۲	۳۵/۹	۳۷/۹	۲/۱	۱/۹

متداول‌ترین محلول قلیایی که برای تولید بتن ژئوپلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد، مخلوطی از محلول سدیم سیلیکات (محلول Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) و محلول سدیم هیدروکسید (محلول NaOH) است [۲۸]. غلظت محلول NaOH پارامتری تاثیرگذار بر روی مقاومت مکانیکی مواد ژئوپلیمر است و بر اساس انجام شده در این زمینه مقدار بهینه آن بین ۸ و ۱۶ مولار بدست آمده است [۲۹]. در این تحقیق از سدیم هیدروکسید تولید شده در شرکت BIOCHEM فرانسه با درصد خلوص ۹۸٪ استفاده شده است.

## ۲-۳ سیمان

برای تثبیت خاک از سیمان پرتلند تیپ ۲ محصول کارخانه سیمان تهران استفاده شد. مشخصات شیمیایی سیمان شامل اکسیدهای تشکیل دهنده آن که از آزمایش XRF بدست آمده است، در جدول ۲ ارائه شده است. این سیمان طبق استاندارد ملی به شماره ۳۸۹ ISIRI تولید می‌شود.

جدول ۲: نتایج آزمایش XRF و اکسیدهای موجود در سیمان

SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	MnO
۱۲/۳	۶۵/۳	۹/۸	۳/۲	۰/۷	۳/۷	۲/۱	۲/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱

ماده فعال کننده سیمان، آب است که در این تحقیق نیز از آب به مقدار درصد رطوبت بهینه مورد نیاز به رسیدن به تراکم حداکثر استفاده شد. مشابه با نمونه‌های ژئوپلیمری، نمونه‌های خاک با نسبت جایگزینی ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد، تثبیت شدند.

## ۳- ساخت نمونه

نمونه‌ها به روش کوبش مرطوب و با تکنیک تراکم کاهش یافته مطابق با روش پیشنهادی لدا [۳۰] ساخته شدند. در این تحقیق از قالب با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی متر برای ساخت نمونه استفاده شده است. نمونه‌های حاوی سرباره و سیمان با درصد‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ در شرایط گرم و خشک و مرطوب عمل‌آوری شدند. برای نمونه‌های تثبیت شده با سیمان از آب بعنوان فعال کننده سیمان استفاده شد و برای نمونه‌های تثبیت شده با سرباره کوره آهن از محلول ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم استفاده شد. در هر دو نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و یا سرباره، مقدار ماده فعال کننده برابر با درصد رطوبت بهینه خاک (۱۲٪) انتخاب شد. شرایط عمل‌آوری خشک برای شبیه‌سازی شرایط آب و هوای خشک و گرم استفاده شد و نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه درون اون (گرمخانه) عمل‌آوری شدند. برای عمل‌آوری در شرایط

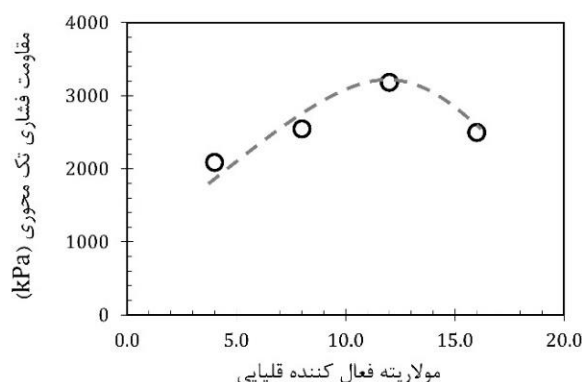
14 Ladd

مرطوب، نمونه‌ها پس از ساخته شدن در شرایط رطوبت بهینه و تراکم حداکثر، برای حفظ رطوبت داخلی، توسط سلفون آب بند شدند و در دمای محیط ( $24^{\circ}\text{C}$ ) قرار گرفتند. به منظور بررسی رفتار خاک تثبیت شده، مقاومت فشاری و کششی خاک کوبیده شده با آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و آزمایش مقاومت کششی برزلی اندازه‌گیری شد [۳۱، ۳۲]. هردو دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشگاه شهید بهشتی، مجهز به سنسورهای اندازه‌گیری نیرو و تغییر شکل بودند و مقادیر نیرو و تغییر شکل را بطور پیوسته در طول آزمایش اندازه‌گیری و ثبت کردند.

#### ۴- نتایج آزمایشگاهی و تحلیل

##### ۴-۱ تعیین مولاریته بهینه فعال کننده قلیایی

در این تحقیق از NaOH به عنوان فعال کننده قلیایی سرباره استفاده شده است. به منظور تعیین مولاریته مطلوب از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ سرباره و محلول NaOH با مولاریته‌های مختلف ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ استفاده شد. تغییرات مقاومت فشاری با مولاریته محلول سدیم هیدروکسید در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، بیشترین مقاومت مربوط به نمونه تثبیت شده با محلول ۱۲ مولار NaOH می‌باشد. با افزایش مولاریته محلول تا ۱۲ مولار، مقدار فعال کننده بیشتری با سرباره کوره آهن واکنش می‌دهد و به این ترتیب مقاومت افزایش می‌یابد. ولی با افزایش بیشتر مولاریته، مقداری از سدیم هیدروکسید اضافی که با سرباره واکنش نداده، به همان صورت در نمونه باقی می‌ماند و باعث کاهش مقاومت خاک می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، کلیه نمونه‌های تثبیت شده با سرباره کوره آهن با محلول فعال کننده قلیایی ۱۲ مولار ساخته شدند.

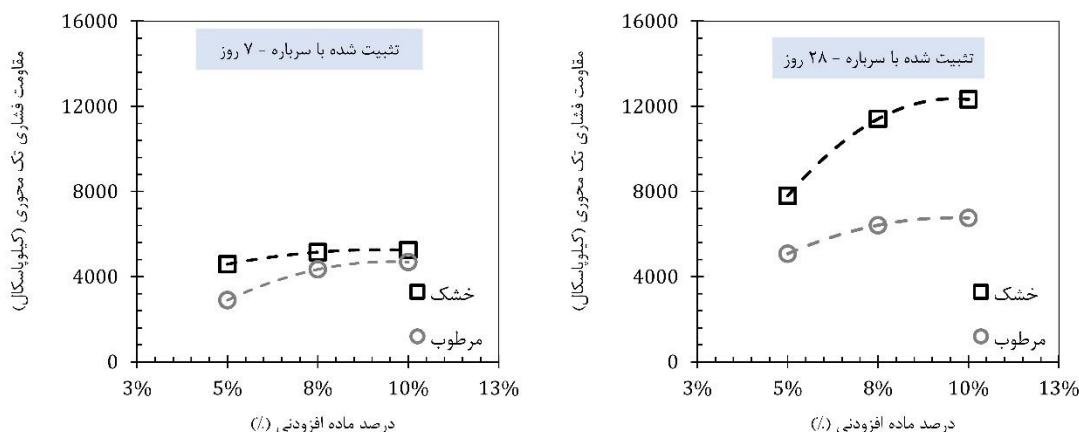


شکل ۲: تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در مقابل مولاریته‌های مختلف NaOH

##### ۴-۲ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

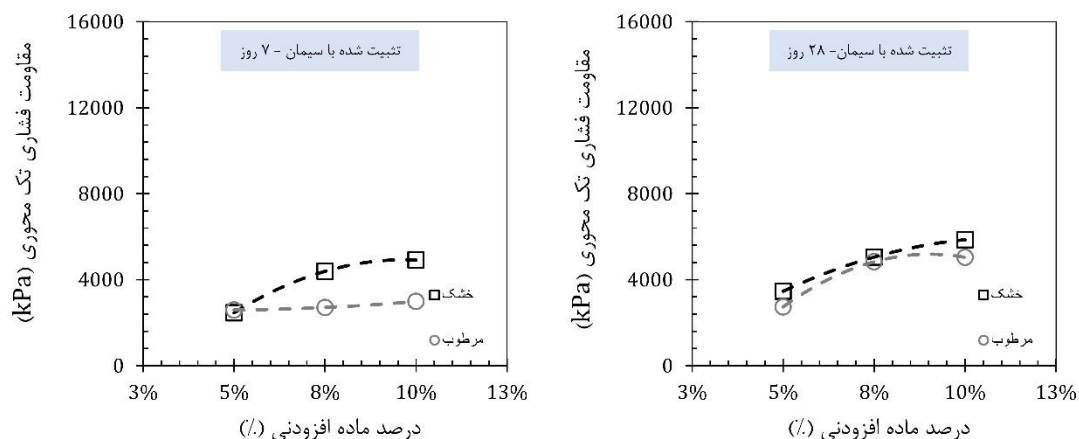
مقاومت فشاری خاک با استفاده از دستگاه تست مقاومت فشاری تک محوره اندازه‌گیری شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری با اعمال تنش محوری به نمونه استوانه‌ای خاک بدون آنکه تحت فشار جانبی باشد، انجام می‌شود. مقدار تنشی که بر اثر آن نمونه خاک گسیخته می‌شود را مقاومت فشاری می‌نامند. در شکل ۳ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری انجام شده بر روی نمونه‌های تثبیت شده با ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد سیمان و سرباره کوره آهن ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، در شرایط عمل‌آوری خشک و در دمای محیط با گذشت زمان تا ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. برخلاف شرایط عمل‌آوری خشک، در شرایط مرطوب، مقاومت نمونه‌ها افزایش چشمگیری نداشتند. در ۷ روز ابتدایی تثبیت، تاثیر افزایش مقدار ماده تثبیت کننده بر مقاومت فشاری نمونه‌ها چندان محسوس نیست. اما پس از گذشت ۲۸ روز، با افزایش درصد سرباره از ۵ تا ۱۰ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده در شرایط گرم و خشک نسبت به شرایط مرطوب افزایش چشمگیری یافت. در واقع در شرایط گرم و خشک، با افزایش میزان سرباره، ژل ژئوپلیمری بیشتری تولید

شده و اتصالات بیشتری بین ذرات خاک ایجاد می‌شود. دلیل این موضوع افزایش انحلال پذیری سرباره در محلول سدیم هیدروکسید با افزایش دما است که منجر به تسریع فرآیند ژئوپلیمراسیون شده است. علاوه بر این در شرایط گرم و خشک، با از بین رفتن رطوبت نمونه، PH محلول فعال کننده افزایش یافته که این پدیده نیز منجر به افزایش فرآیند ژئوپلیمراسیون شده است.



شکل ۳: مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف سرباره و شرایط مختلف عمل آوری پس از: الف- ۷ روز، ب- ۲۸ روز

در شکل ۴ نتایج آزمون فشار تک محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان ارائه شده است. مشابه با نمونه‌های تثبیت شده با سرباره، مقدار ماده افزودنی پس از ۷ روز از تثبیت نمونه‌ها، تاثیر چندانی بر راندمان تثبیت ندارد. بر خلاف تثبیت با سرباره، زمان عمل آوری تاثیر چندانی بر راندمان بهسازی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و ژئوپلیمر ندارد. در شرایط عمل آوری رطوبت بهینه آب کافی برای انجام فرآیندهای هیدراتاسیون وجود ندارد و لذا مقاومت نمونه‌ها افزایش چندانی نیافته است. افزایش محدود مقاومت در شرایط عمل آوری خشک به دلیل کاهش رطوبت خاک و افزایش تنش کششی ناشی از مکش ماتریسی است.



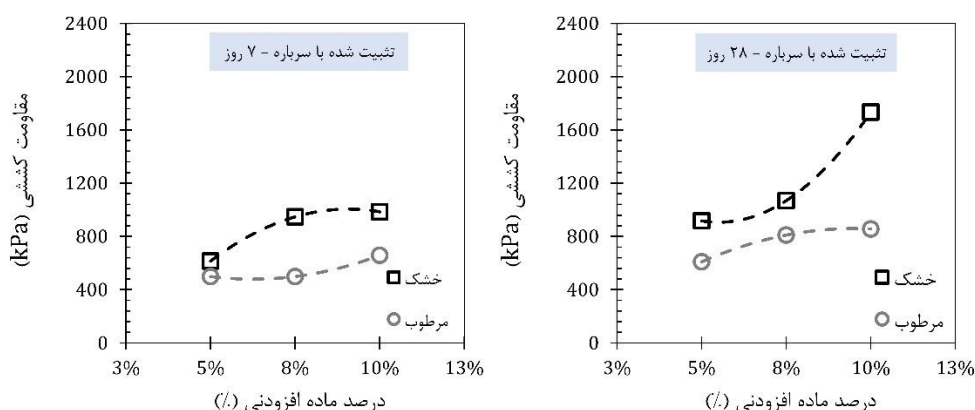
شکل ۴: مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان و شرایط مختلف عمل آوری پس از: الف- ۷ روز، ب- ۲۸ روز

### ۳-۴ نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی

این آزمایش با نام مقاومت کششی به روش دو نیم کردن استوانه یا تست برزیلی در استاندارد ASTM C 496 تشریح شده است. در این روش یک نیروی فشاری قطری با سرعت مشخص در امتداد طول آزمون استوانه‌ای اعمال می‌شود تا نمونه به گسیختگی برسد. این

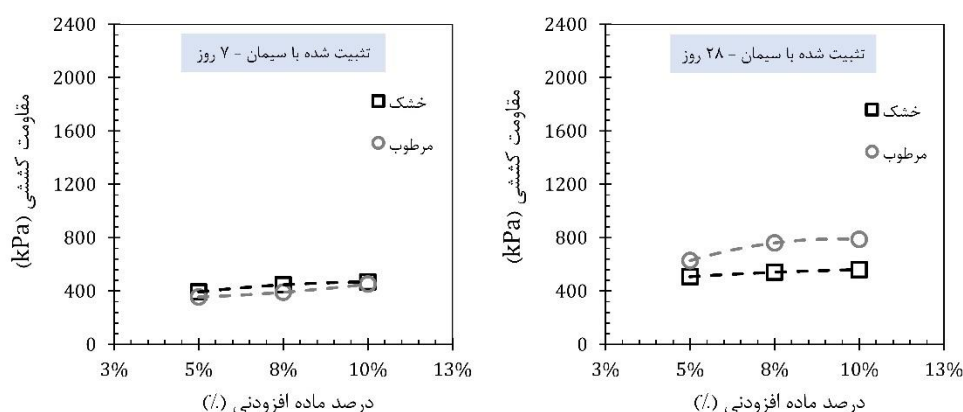


بارگذاری باعث بوجود آمدن تنش های کششی در سطحی که تحت بار و تنش های فشاری نسبتا بالا قرار گرفته است، می شود. نتایج آزمایش های کشش برزیلی بر روی نمونه های تثبیت شده با سرباره و سیمان در شکل های ۵ و ۶ ارائه شده است. مشابه با نتایج آزمایش های تک محوری، در شرایط عمل آوری رطوبت بهینه، مقاومت کششی با درصد افزودنی و یا زمان عمل آوری، بهبود چندانی نیافته است. در شرایط خشک، پس از گذشت ۲۸ روز و تکمیل فرآیند ژئوپلیمراسیون، مقاومت فشاری نمونه ها بطور قابل توجهی افزایش یافته است. بهترین راندمان تثبیت، مربوط به نمونه های عمل آوری شده در شرایط خشک و درصد افزودنی ۱۰٪ پس از ۲۸ روز می باشد. در شرایط عمل آوری خشک، انحلال پذیری سرباره در محلول سدیم هیدروکسید با افزایش دما یافته است. با افزایش میزان سرباره نیز ژئوپلیمری بیشتری تولید شده و اتصالات بیشتری بین ذرات خاک ایجاد شده است.



شکل ۵: مقاومت کششی نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف سرباره و شرایط مختلف عمل آوری پس از: الف- ۷ روز، ب- ۲۸ روز

همانطور که از شکل ۶ مشخص است، درصد ماده افزودنی، شرایط عمل آوری و نیز زمان عمل آوری تاثیر محدودی بر مقاومت کششی نمونه های تثبیت شده با سیمان دارند. پس از گذشت ۲۸ روز، با افزایش درصد افزودنی به ۷/۵ درصد، مقاومت کششی تغییر چندانی نداشته است و بعبارت دیگر، با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی، بهسازی با ۷/۵٪ سیمان را می توان بعنوان درصد افزودنی بهینه انتخاب کرد.



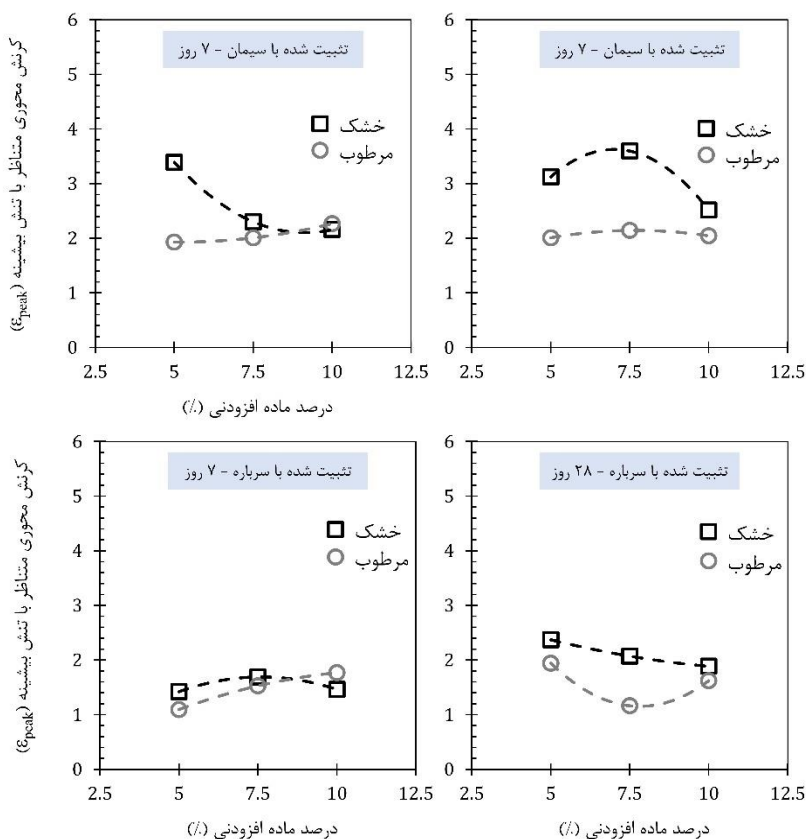
شکل ۶: مقاومت کششی نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف سیمان و شرایط مختلف عمل آوری پس از: الف- ۷ روز، ب- ۲۸ روز

#### ۴-۴ رفتار تغییر شکل پذیری نمونه‌های تثبیت شده

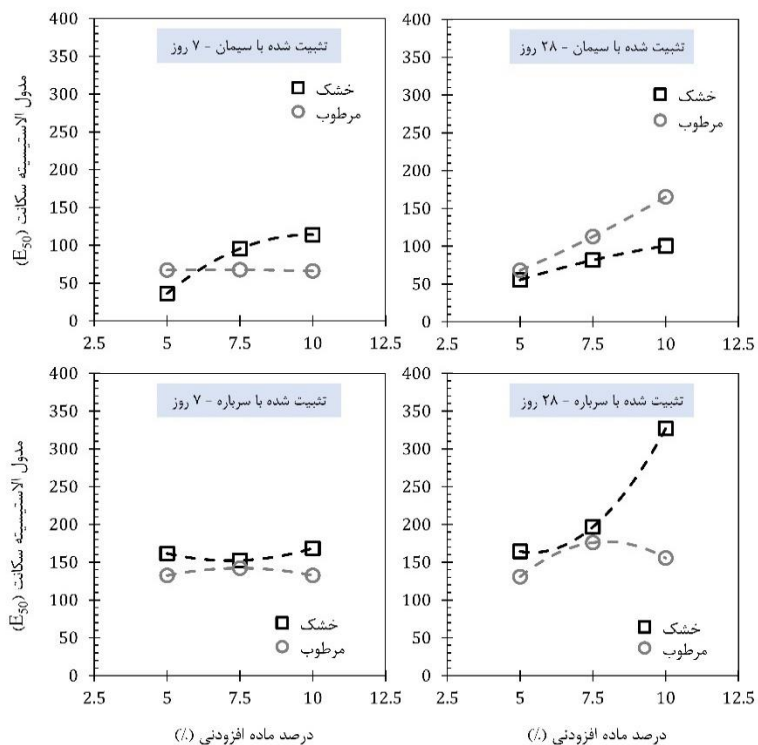
در شکل ۷ مقدار تردی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و ژئوپلیمر با مقایسه مقدار کرنش متناظر با مقاومت فشاری حداکثر (کرنش پیک) مقایسه شده است. نمونه‌های دارای کرنش پیک بیشتر، نمونه‌های انعطاف پذیرتری به شمار می‌روند و قبل از تسلیم (مقاومت بیشینه)، کرنش‌های بیشتری تحمل می‌کنند. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، تردی نمونه‌های بهسازی شده با سیمان در شرایط مرطوب بیشتر از شرایط خشک است و تقریباً مستقل از درصد ماده افزودنی است. دلیل این موضوع، افزایش پیوندهای سیمانی بین دانه‌های خاک به دلیل وجود آب و انجام فرآیند هیدراتاسیون سیمان است. مشابه با تثبیت با سیمان، تثبیت با سرباره نیز منجر به افزایش تردی خاک خصوصاً در مقادیر بالاتر ماده افزودنی شده است. بطور کلی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان رفتار انعطاف پذیرتری از خود نشان داده‌اند در مقابل تثبیت با سرباره منجر به شکننده‌تر شدن خاک شده است.

یکی دیگر از پارامترهای مورد استفاده برای مقایسه رفتار تغییر شکل‌پذیر نمونه‌ها، سختی سکانت ( $E_{50}$ ) است. سختی سکانت، از شیب خط متصل‌کننده مبدا به نصف تنش حداکثر در نمودار تنش تغییر شکل در آزمایش تک محوری محاسبه شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، با افزایش درصد ماده افزودنی، سختی سکانت افزایش یافته است که نشان دهنده تشکیل پیوندهای سیمانی بین دانه‌های خاک است. بیشترین نرخ افزایش سختی سکانت در نمونه‌های بهسازی شده با سرباره در شرایط عمل آوری خشک اتفاق افتاده است که شرایط مطلوب برای فرآیند ژئوپلیمراسیون و تشکیل باندهای ژئوپلیمری در خاک است.

بطور کلی، تثبیت با سرباره منجر به افزایش چشمگیر سختی سکانت خاک و همچنین افزایش قابل توجه پتانسیل شکست ترد خاک شده است. در عین حال، تثبیت با سیمان اگرچه سختی خاک را بطور قابل توجهی افزایش نداده است، اما نمونه‌های تثبیت شده، رفتار انعطاف‌پذیرتری از خود نشان دادند.



شکل ۷: کرنش محوری متناظر با تنش حداکثر ( $\epsilon_{peak}$ ) در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و سرپاره



شکل ۸: سختی سکانت ( $E_{50}$ ) در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و سرپاره

## ۴-۵ ارزیابی اقتصادی

با توجه به اینکه تحقیق حاضر یک تحقیق آزمایشگاهی بوده و نیازمند استفاده از مواد و مصالح استاندارد به منظور بسط نتایج با سایر کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه می باشد لذا در این تحقیق از سدیم هیدروکسید تولید شده در شرکت BIOCHEM فرانسه با درصد خلوص ۹۸٪ استفاده شده است. با توجه به وزن مخصوص خاک و مولاریته محلول سدیم هیدروکسید، بهای هر مترمکعب از خاک تثبیت شده با ۱۰٪ سرباره ۲۲۷۲۵۰۰۰ ریال خواهد بود. البته در صورت استفاده از سدیم هیدروکسید فله موجود در بازار بهای هر مترمکعب آن ۶۰۶۰۰۰۰۰ ریال خواهد بود. اگر خاک با سیمان تثبیت شود بهای هر مترمکعب آن حدوداً ۱۴۷۰۰۰۰ ریال خواهد بود.

جدول ۳: جزئیات هزینه های مورد نیاز برای تثبیت یک تن خاک با سیمان و یا سرباره کوره آهن

روش بهسازی	مصالح مورد استفاده برای بهسازی	مقدار مورد نیاز به ازای هر تن خاک (کیلوگرم)	قیمت واحد (ریال) در تاریخ ۱۴۰۰/۱۰/۱۰	قیمت کل (ریال) در تاریخ ۱۴۰۰/۱۰/۱۰
تثبیت با سیمان	سیمان	۱۹۲	۷۰۰۰	۱۳۴۴۰۰۰
	آب	۱۲۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰۰۰
جمع				
تثبیت با ژئوپلیمر	سرباره کوره آهن	۱۹۲	۷۵۰۰۰	۱۴۴۰۰۰۰۰
	سدیم هیدروکسید	۵۷/۶	۸۰۰۰۰۰	۴۶۰۸۰۰۰۰
	آب	۱۲۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰۰۰
جمع				
۶۰۶۰۰۰۰۰				

## ۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار مکانیکی خاک کوبیده شده بعنوان یک روش ساخت و ساز پایدار پس از تثبیت با سیمان و سرباره کوره آهن (سرباره) بررسی شده است. سرباره جزء زائدات صنعتی کارخانه های ذوب آهن است و ضمن سازگاری با محیط زیست، استفاده مجدد از آن از مشکلات دفع زائدات صنعتی کم خواهد کرد. برای ارزیابی رفتار خاک کوبیده شده از خاک محل استفاده شد و نمونه ها در شرایط مختلف عمل آوری، زمان های عمل آوری و نیز درصد های ماده افزودنی، آماده و آزمایش شدند. به منظور بررسی شرایط محیطی که دیوار خاک کوبیده شده در آن قرار می گیرد، نمونه ها در شرایط گرم و خشک (دمای  $+40^{\circ}C$ ) و دمای محیط ( $+24^{\circ}C$ ) عمل آوری شدند. بر روی نمونه ها آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری و نیز کشش برزیلی با اندازه گیری دقیق رفتار تنش تغییر شکلی در طول آزمایش انجام شد. با توجه به نتایج آزمایشات انجام شده موارد زیر بعنوان نتایج اصلی تحقیق ارائه می شوند:

- باتوجه به مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با سرباره و مولاریته های مختلف محلول فعال کننده قلیایی، می توان محلول ۱۲ مولار سدیم هیدروکسید را بعنوان مولاریته بهینه برای بهسازی این خاک در نظر گرفت.
- مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با سیمان پس از گذشت ۲۸ روز، افزایش قابل ملاحظه ای بویژه در شرایط خشک نداشتند. علاوه بر این درصد ماده افزودنی نیز تاثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری نمونه ها ایجاد نکرد. دلیل این موضوع فقدان آب کافی برای تکمیل فرآیندهای هیدراتاسیون سیمان و اختلال در فرآیند گیرش سیمان می باشد.

- برخلاف سیمان، زمان عمل آوری و نیز درصد افزودنی تاثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با سرپاره بویژه در شرایط خشک داشت. در شرایط عمل آوری خشک فرآیند ژئوپلیمراسیون با افزایش دما تسریع شد و کاهش رطوبت ناشی از تبخیر آب منجر به افزایش PH محلول فعال کننده و سرعت بیشتر تولید ژل پلیمری شد.
- مقاومت کششی نمونه‌ها روند کاملاً مشابهی با مقاومت فشار داشت و بیشترین راندمان تثبیت در نمونه‌های بهسازی شده با سرپاره در شرایط عمل آوری خشک پس از ۲۸ روز و در بیشترین درصد ماده افزودنی اتفاق افتاد.
- مقایسه رفتار تغییر شکل‌پذیری نمونه‌ها نشان داد که تثبیت با ژئوپلیمر موجب افزایش قابل توجه سختی سکانت خاک می‌شود. در مقابل تردی و شکنندگی نمونه‌های تثبیت شده با سرپاره بسیار بیشتر از سیمان است که یک فاکتور مهم در خرابی ترد و ناگهانی خاک پس از مقاومت بیشینه به شمار می‌رود.

## مراجع

- [1] IEA. (2019), 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.
- [2] Zare, P., Narani, S. S., Abbaspour, M., Fahimifar, A., Hosseini, S. M. M. M., & Zare, P. (2020). Experimental investigation of non-stabilized and cement-stabilized rammed earth reinforcement by Waste Tire Textile Fibers (WTTFs). *Construction and Building Materials*, 260, 120432.
- [3] Raavi, S. S. D., & Tripura, D. D. (2020). Predicting and evaluating the engineering properties of unstabilized and cement stabilized fibre reinforced rammed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 262, 120845.
- [4] Koutous, A., & Hilali, E. (2021). Reinforcing rammed earth with plant fibers: A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00514.
- [5] Muguda, S., Lucas, G., Hughes, P. N., Augarde, C. E., Perlot, C., Bruno, A. W., & Gallipoli, D. (2020). Durability and hygroscopic behaviour of biopolymer stabilised earthen construction materials. *Construction and Building Materials*, 259, 119725.
- [6] Hany, E., Fouad, N., Abdel-Wahab, M., & Sadek, E. (2021). Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 281, 122535.
- [7] Toufigh, V., & Kianfar, E. (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 200, 616-629.
- [8] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26(1), 303-329.
- [9] Chen, C., Wu, L., Perdjon, M., Huang, X., & Peng, Y. (2019). The drying effect on xanthan gum biopolymer treated sandy soil shear strength. *Construction and Building Materials*, 197, 271-279.
- [10] Eliche-Quesada, D., Calero-Rodriguez, A., Bonet-Martínez, E., Pérez-Villarejo, L., & Sánchez-Soto, P. J. (2021). Geopolymers made from metakaolin sources, partially replaced by Spanish clays and biomass bottom ash. *Journal of Building Engineering*, 102761.
- [11] Losini, A. E., Grillet, A. C., Bellotto, M., Woloszyn, M., & Dotelli, G. (2021). Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization—a review. *Construction and Building Materials*, 304, 124507.
- [12] Ni, J., Li, S. S., Ma, L., & Geng, X. Y. (2020). Performance of soils enhanced with eco-friendly biopolymers in unconfined compression strength tests and fatigue loading tests. *Construction and Building Materials*, 263, 120039.
- [13] Yi, Y., Li, C., Liu, S., & Al-Tabbaa, A. (2014). Resistance of MgO-GGBS and CS-GGBS stabilised marine soft clays to sodium sulfate attack. *Geotechnique*, 64(8), 673-679.

- [14] Jin, F., Gu, K., & Al-Tabbaa, A. (2015). Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste. *Cement and Concrete Composites*, 57, 8-16.
- [15] Siddiqua, S., & Barreto, P. N. (2018). Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash. *Construction and Building Materials*, 169, 364-371.
- [16] Sharma, A. K., & Anand, K. B. (2018). Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth. *Journal of Building Engineering*, 18, 51-57.
- [17] Toufigh, V., & Kianfar, E. (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 200, 616-629.
- [18] Singhi, B., Laskar, A. I., & Ahmed, M. A. (2016). Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending. *Arabian Journal for science and engineering*, 41(2), 393-400.
- [19] Thomas, A., Tripathi, R. K., & Yadu, L. K. (2018). A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*, 43(10).
- [20] Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361-371.
- [21] Yi, Y., Li, C., & Liu, S. (2015). Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay. *Journal of materials in civil engineering*, 27(4), 04014146.
- [22] Du, Y. J., Wu, J., Bo, Y. L., & Jiang, N. J. (2020). Effects of acid rain on physical, mechanical and chemical properties of GGBS-MgO-solidified/stabilized Pb-contaminated clayey soil. *Acta Geotechnica*, 15(4), 923-932.
- [23] Lingyu, T., Dongpo, H., Jianing, Z., & Hongguang, W. (2021). Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 1-14.
- [24] Walker, P., Keable, R., Martin, J., & Maniatidis, V. (2005). Rammed earth: design and construction guidelines.
- [25] Astm D6913-04R2009. (2004), *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution ( Gradation ) of Soils Using Sieve Analysis*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 04:1-35.
- [26] ASTM. (2000), *D854 - Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Astm D854 2458000:1-7.
- [27] ASTM International. (2012), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*.
- [28] Abdullah, M. A. B., Jamaludin, L., Kamarudin, H., Binhussain, M., Ghazali, C. R., & Izzat, A. M. (2013). Study on fly ash based geopolymer for coating applications. *Adv. Mater. Res*, 686, 227-233.
- [29] Hardjito D, Rangan BV. (2005), Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete.
- [30] Ladd, R. S. (1978). Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical testing journal*, 1(1), 16-23.
- [31] ASTM. (2013), *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil 1*. ASTM International, vol. 04, p. 1-7.
- [32] Akin, I. D., & Likos, W. J. (2017). Brazilian tensile strength testing of compacted clay. *Geotechnical Testing Journal*, 40(4), 608-617.