

**K. Mirzaei**

Department of Civil  
Engineering, Sirjan University  
of Technology, Sirjan.

**e-mail:**

kouroshking9696@gmail.com

**A. R. Ghanizadeh \***

Associate Professor,  
Department of Civil  
Engineering, Sirjan University  
of Technology, Sirjan.

**e-mail:**

ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

**S. Bakhtiari**

Assistant Professor,  
Department of Civil  
Engineering, Sirjan University  
of Technology, Sirjan.

**e-mail:**

abbas.zolfaghari@modares.ac.ir

## **Strength Characteristics of High Plasticity Clay Sub-grade Soil Stabilized with Ground Granulated Blast Furnas Slag, Fly-Ash and Diatomite**

*High plasticity clay soil is one of the soils that can be found in most regions of Iran. This soil is known as a problematic soil and as subgrade soil for transportation infrastructures, its characteristics must be improved. The purpose of this study is to evaluate the strength characteristics of high plasticity clay soil stabilized with industrial waste, which in addition to soil stabilization, also has environmental benefits. In this research, steel furnace slag, fly ash and diatomite have been used as stabilizer agents. Stabilization was performed using with 10, 20 and 30% of stabilizer agents by dry weight of soil and samples were compacted at optimum moisture content. In the present study, compaction as well as unconfined compressive strength (UCS) were conducted to compare the strength parameters of soil before and after stabilization. The results showed that the steel furnace slag had a much better performance as a stabilizer than fly ash and diatomite. Samples stabilized with 10% of steel furnace slag with a UCS of 2.16 MPa has a better performance in comparison with other stabilized samples and is the optimum sample. This sample shows a 3.92 times increase in UCS compared to the untreated clay soil. Treated samples with 30% of fly ash and 30% of diatomite with UCS of 0.9 and 1.03 MPa, show 49% and 88% increase in UCS compared to untreated samples, respectively.*

**Keywords:** Clay Soil Stabilization, Unconfined Compressive Strength, Tensile Strength, Ground Granulate Blast Furnace Slag, Fly-Ash, Diatomite.

---

\* Corresponding author

Received 04 April 2021, Revised 07 May 2021, Accepted 07 May 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.6858.1241

## مشخصات مقاومتی بستر رسی با خصوصیات خمیری بالای تثبیت شده با سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت

خاک رس با خصوصیات خمیری بالا یکی از انواع خاک‌هایی است که در اکثر نقاط ایران یافت می‌شود. این خاک به‌عنوان یک خاک مسئله‌دار شناخته‌شده و جهت استفاده از این خاک در زیرساخت‌های حمل و نقل نیاز به بهسازی و اصلاح مشخصات آن است. هدف این تحقیق ارزیابی مشخصات مقاومتی خاک رس تثبیت شده با ضایعات صنعتی است که علاوه بر تثبیت خاک، به دلیل استفاده از ضایعات صنعتی دارای مزایای زیست محیطی نیز می‌باشد. در این تحقیق از سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک رس استفاده شده است. تثبیت با استفاده از سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت با درصد‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خشک خاک انجام شد و نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه متراکم شدند. در تحقیق حاضر از آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری محدودنشده (UCS) جهت مقایسه پارامترهای مقاومتی خاک قبل و بعد از تثبیت استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که سرباره به‌عنوان تثبیت‌کننده نسبت به خاکستر بادی و دیاتومیت عملکرد بسیار مناسبتری داشته است. نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سرباره با رسیدن به مقاومت ۲/۱۶ مگاپاسگال نسبت به سایر نمونه‌های تثبیت شده عملکرد بهتری داشت و نمونه بهینه است. این نمونه نسبت به نمونه تثبیت نشده خاک رس ۳/۹۲ برابر افزایش مقاومت داشته است. نمونه‌های تثبیت شده با ۳۰ درصد خاکستر بادی و ۳۰ درصد دیاتومیت نیز با رسیدن به مقاومت‌های ۱/۰۳ و ۰/۹ مگاپاسگالی توانستند به ترتیب نسبت به نمونه تثبیت نشده ۴۹ و ۸۸ درصد افزایش مقاومت از خود نشان دهند.

**واژگان کلیدی:** تثبیت خاک رس، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی، دیاتومیت.

### کوروش میرزایی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد،  
دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی  
سیرجان، کرمان، ایران.  
پست الکترونیک:  
kouroshking9696@gmail.com

### علیرضا غنی زاده\*

دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه  
صنعتی سیرجان، کرمان، ایران.  
پست الکترونیک:  
ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

### سمیه بختیاری

استادیار، دانشکده عمران،  
دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان،  
ایران.  
پست الکترونیک:  
bakhtiari@sirjantech.ac.ir

### ۱- مقدمه

امکان محل دیگری را برای پروژه خود انتخاب نمایند و یا خاک نامناسب را با خاک مناسب‌تر جایگزین نمایند. در دهه‌های اخیر با توسعه صنعت و شهرها، با توجه به محدودیت در مکان و زمان و هزینه، نیاز به احداث زیرساخت‌های حمل و نقل بر روی بسترهای نامرغوب و مسئله‌دار زمین شدیداً احساس می‌شود. خاک رس با خصوصیات خمیری بالا یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار است که نسبت به رطوبت حساسیت بالایی داشته و در صورت مرطوب شدن به شدت متورم می‌شود و با از دست

در بسیاری از پروژه‌های راهسازی خاک محل پروژه جزو خاک‌های مسئله‌دار است. مهندسیین تلاش می‌کنند تا حد امکان از خاک مسئله‌دار اجتناب کرده و در صورت

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۱/۱۵، بازنگری ۱۴۰۰/۰۲/۱۷، پذیرش ۱۴۰۰/۰۲/۱۷.  
DOI: 10.22091/cer.2021.6858.1241 شناسه دیجیتال

دادن رطوبت دچار انقباض و کاهش حجم می‌گردد. این رفتار، خاک را برای استفاده‌های مهندسی نامناسب می‌سازد [۱]. از راهکارهای پیشنهاد شده برای بهبود وضعیت خاک محل پروژه می‌توان به جایگزینی خاک نامرغوب با خاک مناسب، طراحی شالوده‌های عمیق و یا استفاده از شیوه‌های بهسازی خاک اشاره کرد [۲ و ۳]. تثبیت یکی از این شیوه‌های بهسازی خاک است که به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. تثبیت‌کننده‌های معمول خاک شامل سیمان و آهک می‌باشند که با اضافه شدن به خاک، خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک را جهت دستیابی به مقاومت، سختی و توانایی مقابله با انقباض خاک، افزایش می‌دهند [۴]. تثبیت خاک با استفاده از سیمان مستلزم هزینه زیاد است و سبب آلودگی محیط زیست می‌شود، بطوری که تولید یک تن سیمان چیزی در حدود یک تن دی اکسید کربن وارد جو می‌کند [۵]. آهک نیز همانند سیمان در زمان واکنش مقدار زیادی دی اکسید کربن وارد جو می‌کند [۶]. وجود این مشکلات تثبیت‌کننده‌های معمول خاک همچون سیمان و آهک، محققان را نسبت به یافتن جایگزین‌هایی مناسب ترغیب کرده است [۵].

یادو و تریفاتی<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) به تثبیت خاک رس تورم‌پذیر با حد روانی ۴۶ با استفاده از سرباره کوره ذوب آهن پرداختند. آن‌ها چهار درصد متفاوت ۳، ۶، ۹ و ۱۲ را جهت تثبیت خاک انتخاب کردند و در نهایت با استفاده از نتایج آزمایش‌های تورم آزاد، نسبت باربری کالیفرنیا و مقاومت فشاری تک محوری به این نتیجه رسیدند که سرباره خصوصیات مقاومتی را افزایش و میزان تورم را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد [۷]. پراساد و شارما<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) از ماسه و خاکستر بادی برای بهسازی و تثبیت بستر رسی استفاده نمودند. آن‌ها پس از اختلاط خاک رس با ماسه و خاکستر بادی نشان دادند که نسبت باربری

کالیفرنیا افزایش و میزان تورم خاک به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۸]. محققان در سال ۲۰۱۶، به منظور بهسازی خاک‌های تورم‌پذیر از ترکیبی از سرباره و خاکستر بادی استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزودن ترکیب این دو افزودنی حد روانی و شاخص خمیری به صورت مؤثر کاهش و مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد [۹]. هچنین پژوهشگران از خاکستر بادی، آهک و نخاله ساختمانی به منظور بهسازی و تثبیت بستر رسی استفاده نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که تورم آزاد و وزن مخصوص خشک کاهش و مقاومت فشاری تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا با افزودن خاکستر بادی، آهک و نخاله ساختمانی افزایش می‌یابد [۱۰]. ایندیرما و سودهرانی<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) به تثبیت خاک رس تورم‌پذیر با استفاده از خاکستر بادی و گرد سنگ با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد خاکستر بادی و گرد سنگ شاخص خمیری و تورم آزاد کاهش و مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نهایت، آنان به این نتیجه رسیدند که دو افزودنی خاکستر بادی و گرد سنگ می‌توانند به عنوان جایگزینی مناسب برای سایر تثبیت‌کننده‌ها استفاده شوند [۱۱]. مهدی و همکاران (۲۰۱۸) از سیمان و سرباره برای تثبیت و بهسازی خاک رس تورم‌پذیر حاوی سولفات بالا استفاده نمودند. نتایج پیشین نشان داده بود که عملکرد سیمان در بهبود مشخصات تورمی خاک رس با سولفات بالا مناسب نیست و از این‌رو این محققین برای بهسازی این نوع خاک از ترکیب سیمان و سرباره استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که افزودن سرباره مشخصات تورمی خاک رس و شاخص خمیری را کاهش می‌دهد [۱۲]. یو و ایی<sup>۴</sup> (۲۰۱۹) خاک رس با حد روانی بالا را با استفاده از ترکیبی از سرباره کوره آهن‌گدازی<sup>۵</sup> و سرباره کوره

<sup>3</sup>- Indiramma and Sudharani

<sup>4</sup>- Xu and Yi

<sup>5</sup>- ground granulated blast furnace slag

<sup>1</sup>- Yadu and Tripathi

<sup>2</sup>- Prasad and Sharma

است. در این نمونه مشاهده شد که شاخص خمیری کاهش داشته و از ۲۴/۵۹ به ۴/۵۷ کاهش یافته است [۱۶]. پژوهشگران بر روی استفاده مجدد از محصولات فرعی به مطالعه پرداختند و برای این منظور از سرباره به‌عنوان تثبیت‌کننده برای تثبیت خاک رس لای‌دار استفاده کردند. آن‌ها زمان عمل‌آوری را ۰، ۷، ۲۸ و ۵۶ روز و دمای عمل‌آوری را نیز دمای اتاق در نظر گرفتند. سرباره با مقدار ۰، ۱۲ و ۲۴ درصد وزنی خاک خشک به خاک مورد تثبیت اضافه شد. این تحقیق نشان داد که اضافه کردن این نوع افزودنی علاوه بر افزایش ۲۰۰ درصدی مقاومت خاک از دیدگاه استفاده از محصولات جانبی هم از نظر اقتصادی موهم از نظر زیست‌محیطی توجیه‌پذیر است [۱۷]. چتان<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که تثبیت خاک بلک کتان (نوعی خاک رس با خصوصیات خمیری بالا) با استفاده از خاکستر بادی علاوه بر بهبود مقاومت فشاری خاک، دوام در برابر چرخه‌های خشک و تر شدن را بهبود می‌دهد. در این تحقیق درصد بهینه خاکستر بادی برابر با ۳۰ درصد تعیین گردید [۱۸]. هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی مقاومت فشاری، مدول یانگ و کرنش شکست خاک رس تثبیت شده با سه نوع افزودنی شامل سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت و مقایسه عملکرد این سه افزودنی بر روی پارامترهای مقاومتی خاک رس است. در تحقیقات گذشته، تأکید اصلی بر تعیین مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با افزودنی‌های سرباره کوره ذوب آهن و خاکستر بادی بوده است و مطالعات چندانی در خصوص مدول یانگ و کرنش شکست خاک رس تثبیت شده با این دو نوع افزودنی انجام نشده است. علاوه بر این در این تحقیق از افزودنی دیاتومیت نیز برای تثبیت خاک رس با خصوصیات خمیری بالا استفاده شده است که در تحقیقات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

ملاقه‌ای<sup>۶</sup> تثبیت نمودند. آن‌ها ترکیبات متفاوتی از این دو را با نسبت ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی به خاک خشک اضافه و در زمان‌های ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۱۱۲ روزه عمل‌آوری نمودند. در پایان نیز این نمونه‌ها را با نمونه‌های تثبیت شده با ۲۰ و ۳۰ درصد سیمان مقایسه نمودند. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، نمونه تثبیت شده با نسبت سرباره کوره آهن‌گدازی به کوره ملاقه ای ۱:۹ و ۳۰ درصد وزنی خاک خشک به عنوان ترکیب بهینه انتخاب شد. همچنین این نمونه در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نیز عملکرد مناسب‌تری داشت [۱۳]. محققان در سال ۲۰۱۹، از خاکستر بادی، آهک و ترکیبی از این دو برای تثبیت خاک رس با خمیری بالا (CH) استفاده نمودند. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که حدروانی، حدخمیری، شاخص خمیری و شاخص تورم آزاد کاهش و مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۱۴]. پریتهام<sup>۷</sup> و همکاران، به تثبیت خاک رس با خصوصیات خمیری بالا با استفاده از سرباره کوره ذوب آهن پرداختند. در این تحقیق، سرباره با درصد‌های ۱۰ تا ۵۰ درصد با خاک خشک جایگزین شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن سرباره به خاک باعث کاهش حدروانی و افزایش مقاومت فشاری خاک نسبت به نمونه تثبیت نشده می‌شود [۱۵]. مینا و همکاران (۲۰۱۹) به تثبیت خاک رس با خصوصیات خمیری بالا با هدف به‌کارگیری به عنوان بستر راهسازی پرداختند. آن‌ها خاک را با ترکیبی از سرباره و خاکستر بادی (۲۰ درصد خاکستر بادی به عنوان مبنا و اضافه نمودن سرباره با درصد‌های وزنی ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به خاک) تثبیت نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که نمونه تثبیت شده با ۲۰ درصد خاکستر بادی و سرباره در روز هفتم عمل‌آوری افزایش قابل ملاحظه‌ای در نسبت باربری کالیفرنیا از خود نشان داده است و نمونه بهینه

<sup>۶</sup>- Ladle furnace basic slag

<sup>۷</sup>- Preetham

<sup>۸</sup>- Chethan

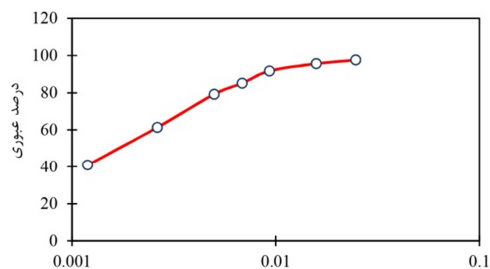
## ۲- مواد و روش‌ها

است. جدول ۲ نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF را برای خاک رس نشان می‌دهد.

## ۲-۱- خاک



شکل ۱- خاک رس در محل



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک رس

در این تحقیق از خاک رس با خصوصیات خمیری بالا که جزو خاک‌های مسئله‌دار است، استفاده شده است. این خاک‌ها هنگامی که در معرض رطوبت قرار می‌گیرند با جذب رطوبت دچار انبساط شده و افزایش حجم می‌دهند. همزمان با این افزایش حجم خاک مقاومت خود را به میزان چشمگیری از دست می‌دهد. همچنین زمانی که خاک خشک شده و رطوبت خود را از دست می‌دهد دچار ترک‌خوردگی می‌شود که این ترک‌خوردگی‌ها باعث کاهش ظرفیت باربری خاک می‌شود. این خاک از بیابان‌های اطراف شهر سیرجان واقع در استان کرمان تهیه گردید. در شکل ۱، تصویر مربوط به خاک و در شکل ۲ نیز نمودار دانه‌بندی خاک نشان داده شده است. در جدول ۱، مشخصات ژئوتکنیکی خاک رس داده شده

جدول ۱- خواص مهندسی خاک رس

| لای | رس  | طبقه‌بندی اشته | طبقه‌بندی متحد | چگالی دانه‌ها | حدود اتربرگ |          |         | رنگ          | نوع خاک |
|-----|-----|----------------|----------------|---------------|-------------|----------|---------|--------------|---------|
|     |     |                |                |               | شاخص خمیری  | حد خمیری | حد مایع |              |         |
| ٪۶۰ | ٪۴۰ | A-7-6          | CH             | ۲/۶           | ۲۳/۷۵       | ۲۸/۲۵    | ۵۲      | قهوه‌ای روشن | رس      |

جدول ۲- ترکیب عنصری خاک و هریک از افزودنی‌ها براساس نتایج آزمایش فلورسانس اشعه ایکس (XRF)

| ترکیبات   | خاک (٪) | سربراره (٪) | خاکسترپادی (٪) | دیاتومیت (٪) |
|---|---------|-------------|----------------|--------------|
| سیلیس (SiO <sub>2</sub> )                         | ۴۶/۲۱   | ۳۸/۴۴       | ۸۷/۲           | ۶۴/۰۸        |
| اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | ۱۴/۶۱   | ۱۰/۳۲       | ۳/۱۹           | ۱۰/۷۴        |
| اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )       | ۶/۲۸    | ۰/۵۷        | ۰/۹۸           | ۱/۳۷         |
| اکسید کلسیم (CaO)                                 | ۸/۳۹    | ۳۰/۷۲       | ۰/۴            | ۲/۳          |
| اکسید سدیم (Na <sub>2</sub> O)                    | ۱/۳۷    | ۱/۱۸        | ۰/۷            | ۱/۸۹         |
| اکسید منیزیم (MgO)                                | ۳/۹۶    | ۶/۱۸        | ۰/۶۳           | ۴/۲۸         |
| اکسید پتاسیم (K <sub>2</sub> O)                   | ۱/۸۳    | ۰/۸۳        | ۰/۳۹           | ۰/۲۵         |
| دی‌اکسید تیتانیوم (TiO <sub>2</sub> )             | ۰/۵۰    | ۱/۳۱        | ۰/۱۲           | ۰/۲۱         |
| اکسید منگنز (MnO)                                 | ۱/۴۱    | ۱/۲۷۵       | -              | -            |
| اکسید فسفر (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )       | ۰/۲     | -           | -              | -            |
| درصد کاهش وزن ناشی از احتراق (LOI)                | ۱۶/۴۸   | صفر         | ۵/۹۹           | ۱۴/۴۹        |

## ۲-۲- سربراره کوره ذوب آهن

سربراره مورد استفاده در این تحقیق از نوع سربراره



شکل ۴- خاکستر بادی

## ۲-۴- دیاتومیت

دیاتومیت‌ها، سنگ‌های رسوبی متشکل از ذرات ریز سیلیسی می‌باشند که در اثر مکانیزم تجمع پوسته یا اسکلت‌های فسیل‌شده جلبک‌ها، گیاهان و جانوران میکروسکوپی و تک‌سلولی به نام دیاتومه (دیاتومه‌ها یکسری جلبک‌های تک‌سلولی ریز هستند) به وجود آمده‌اند. دیاتومیت خالص خردشونده بوده و از نظر خصوصیات ظاهری، شبیه به گچ است. تصویر مربوط به دیاتومیت مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۵ نشان داده شده است. در جدول ۲، نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF برای دیاتومیت داده شده است. دیاتومیت نیز ماده‌ای سرشار از سیلیس و تا حدودی آلومین است، اما میزان هیدروکسید کلسیم بسیار پایینی دارد.



شکل ۵- دیاتومیت

## ۲-۵- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم بر روی خاک بدون افزودنی و همچنین تمامی نمونه‌ها با درصد افزودنی‌های متفاوت طبق استاندارد ASTM D1557 و براساس روش پروکتور

کوره ذوب آهن (GGBS) است که در شکل ۳ نشان داده شده است. این محصول به‌عنوان ضایعات صنعتی شناخته شده و اساساً شامل آلومینات ( $Al_2O_3$ )، سیلیکات ( $SiO_2$ ) و آهک (CaO) است [۱۹]. در جدول ۲، نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF برای سرباره کوره ذوب آهن نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، سرباره مصرفی دارای مقادیر بالایی سیلیس و کلسیم است که جزو عناصر اصلی در واکنش پوزولانی هستند.



شکل ۳- سرباره کوره ذوب آهن

## ۲-۳- خاکستر بادی

خاکستر بادی که در شکل ۴ نشان داده شده است، محصول فرعی سوخت زغال‌سنگ است که شامل سیلیس، آلومین و اکسیدهای آهن و کلسیم است و در دو نوع C و F وجود دارد. نوع C دارای درصد CaO بیشتر از ۲۰٪ و نوع F دارای درصد CaO کمتر از ۱۰٪ است [۱۹]. در جدول ۲، نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF برای خاکستر بادی داده شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده خاکستر استفاده شده در این تحقیق، منبعی سرشار از سیلیس است. میزان سایر عناصر در خاکستر بادی بسیار ناچیز است درصد اکسید کلسیم برابر با ۰/۴ درصد است و همین میزان کم اکسید کلسیم خاکستر بادی را در کلاس F که بیانگر خاکستر بادی با درصد پایین هیدروکسید کلسیم است، قرار می‌دهد.

گرفته است. مشخصات قالب، تعداد لایه‌ها، تعداد ضربه‌ها و سایر جزییات مربوط به آزمایش در جدول ۳ قرار داده شده است.

اصلاح شده انجام شد. این آزمایش بر روی تمامی ترکیب‌های خاک و افزودنی به منظور به دست آوردن رطوبت بهینه و همچنین وزن مخصوص خشک انجام

جدول ۳- مشخصات آزمایش تراکم (پرکتور اصلاح شده)

| پارامتر                       | مقدار                      |
|-------------------------------|----------------------------|
| حجم قالب                      | ۹۴۳/۹ سانتیمترمکعب         |
| قطر قالب                      | ۱۰/۱۶ سانتیمتر             |
| ارتفاع قالب                   | ۱۱/۶۳ سانتیمتر             |
| وزن چکش                       | ۴۵۰۰ گرم                   |
| تعداد لایه‌ها                 | ۵                          |
| ارتفاع سقوط                   | ۴۵ سانتیمتر                |
| تعداد ضربات هر لایه           | ۲۵                         |
| انرژی تراکم حاصله در واحد حجم | ۹۰۱/۸۴ گرم بر سانتیمترمکعب |

وزن خشک خاک) باهم به مدت ۵ دقیقه در درون یک ظرف مناسب مخلوط شدند تا ماده افزودنی در تمام حجم خاک به صورت یکنواخت پخش شود و فرایند هیدراتاسیون در کل نمونه به صورت همگن انجام شود. سپس به میزان رطوبت بهینه به مخلوط آب اضافه شد و مخلوط هم زده شد تا رطوبت به طور یکنواخت در مصالح پخش شود. پس از یکنواخت شدن مخلوط و رسیدن رطوبت به تمام نقاط خاک، نمونه‌ها با استفاده از قالب‌های مخصوص هر آزمایش ساخته شدند. ساخت هر نمونه به صورتی انجام شد که وزن مخصوص نمونه برابر با حداکثر وزن مخصوص نمونه‌های حاصل از آزمایش تراکم شود. بعد از ساخت نمونه‌ها و بیرون آوردن از قالب، بلافاصله آن‌ها در چندلایه سلفون پلاستیکی پیچیده و در دو نایلون مناسب قرار داده شدند و تا پایان زمان عمل‌آوری (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) تحت این شرایط نگهداری شدند. در پایان زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها بلافاصله بعد از خارج شدن از داخل سلفون‌ها بدون اینکه رطوبتی از دست دهند مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج مربوط به آن‌ها ثبت شد. به جز تعداد محدودی نمونه با دو تکرار، سایر نمونه‌ها با یک تکرار ساخته شدند و بررسی انجام شده در این تحقیق نشان داد که پراکندگی نتایج آزمایشگاهی در خصوص

## ۲-۶- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده با استفاده از دستگاه مخصوص این آزمایش (شکل ۶) و طبق استاندارد ASTM D2166 به صورت کنترل تغییرشکل با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نمونه‌های ساخته‌شده استوانه‌ای دارای قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بوده و پس از پایان زمان عمل‌آوری، بلافاصله مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۶- دستگاه مقاومت فشاری تک محوری

## ۲-۷- روش ساخت، زمان و نحوه عمل‌آوری

برای ساخت نمونه‌های ابتدا خاک خشک و افزودنی مورد نظر (با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نسبت به

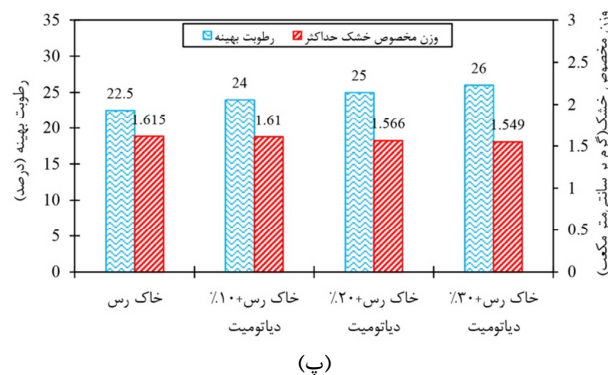
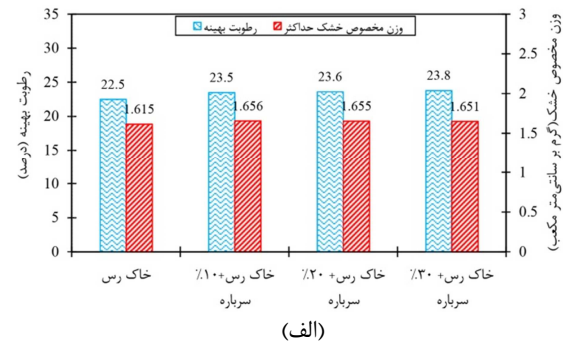
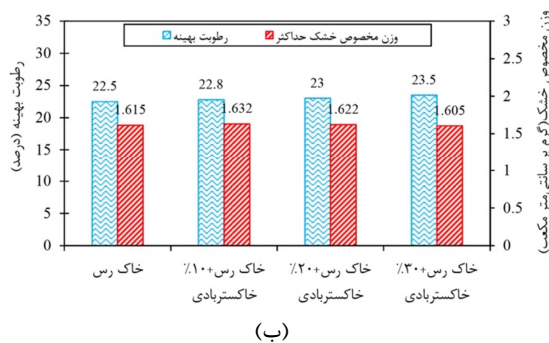
خاکستر بادی (شکل ۷-ب) باعث افزایش رطوبت از ۲۲/۵ درصد به ۲۲/۸ تا ۲۳/۵ درصد به ازای درصدهای مختلف افزودنی شده است که تغییرات زیادی نداشته است. همچنین حداکثر وزن مخصوص خشک خاک نیز در محدوده ۱/۶۰۵ تا ۱/۶۳۲ گرم بر سانتیمترمکعب در نوسان بوده که بازهم تغییرات نسبت به خاک تثبیت نشده چشمگیر نبوده است. محققین دیگری نیز چنین نتیجه‌گیری نموده‌اند که افزایش درصد خاکستر بادی باعث تغییر چندانی در رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک نمی‌شود [۲۱]. افزودن دیاتومیت به خاک (شکل ۷-پ)، رطوبت خاک را از ۲۲/۵ به ۲۴ تا ۲۶ درصد رسانده که مقدار افزایش قابل توجهی است. این موضوع می‌تواند به دلیل قابلیت جذب بالای آب توسط دیاتومیت باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزودن دیاتومیت به خاک، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک از ۱/۶۱۵ به ۱/۵۹۴ گرم بر سانتیمترمکعب کاهش می‌یابد.

مقاومت فشاری تک محوری بسیار کم و قابل صرف‌نظر است. همچنین دمای عمل‌آوری دمای اتاق در نظر گرفته شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تغییرات درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک

نتایج مربوط به آزمایش تراکم برای درصدهای مختلف هر یک از افزودنی‌ها و خاک خشک در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۷-الف ملاحظه می‌شود، با افزودن سرپاره به خاک رطوبت بهینه از ۲۲/۵ درصد به ۲۳/۵ تا ۲۳/۸ درصد افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک نیز از ۱/۶۷۵ گرم بر سانتیمترمکعب به ۱/۶۵۱ تا ۱/۶۵۶ گرم بر سانتیمترمکعب افزایش یافته است که این نتایج با نتایج حاصل از تحقیق شلی و همکاران که بر روی خاک رس با خمیری بالا انجام گرفته بود مطابقت دارد [۲۰]. افزودن



شکل ۷- رطوبت بهینه و تراکم خاک رس تثبیت شده با (الف) سرپاره، (ب) خاکستر بادی و (پ) دیاتومیت



### ۳-۲- مقاومت فشاری تک محوری

باشد که باعث می‌گردد حجم مواد پوزولان و واکنش‌دهنده نسبت به مواد واکنش‌پذیر خاک بیشتر شده و در نتیجه حجم زیادی از این مواد پوزولان بدون واکنش باقی مانده و موجب غیریکنواختی خاک و تشکیل پیوندهای سمنته ضعیف نسبت به حالت بهینه می‌شوند [۷]. نتایج تثبیت خاک با خاکستر بادی در شکل ۸-ب، نشان می‌دهد که نمونه‌های تثبیت‌شده در روز هفتم عمل‌آوری تقریباً هیچ افزایش مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند، اما با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ و ۹۰ روز با افزایش پیوندهای پوزولانی مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز افزایش یافته است به طوری که در روز ۹۰ عمل‌آوری نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد خاکستر بادی به مقاومت ۰/۹ مگاپاسکالی رسیده است که نسبت به نمونه تثبیت نشده حدود ۶۳ درصد افزایش مقاومت داشته است.

با توجه به شکل ۸-پ، نمونه‌های تثبیت شده با دیاتومیت رفتاری مشابه با خاکستر بادی از خود نشان دادند یعنی با افزایش زمان عمل‌آوری به تدریج مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است. نمونه تثبیت‌شده با ۳۰ درصد دیاتومیت در بلندمدت (۹۰ روزه) توانسته است که به مقاومت ۱/۰۳ مگاپاسکال برسد و بهینه‌ترین نمونه باشد که نسبت به نمونه تثبیت نشده حدود ۸۸ درصد افزایش مقاومت از خود نشان داده است.

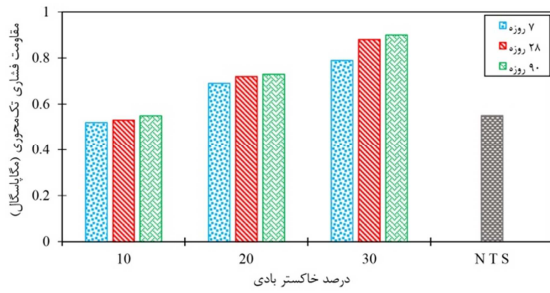
### ۳-۳- مدول یانگ

در نمودارهای شکل ۹، نتایج مربوط به کرنش معادل ۵۰ درصد به ترتیب برای نمونه‌های تثبیت شده با سرباره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت نشان داده شده است. همانگونه که در نتایج دیده می‌شود تغییرات مدول یانگ روندی مشابه با تغییرات مقاومت فشاری دارد. رابطه مستقیم بین مقاومت فشاری و مدول یانگ در مورد خاک‌های تثبیت شده توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۲۴ و ۲۵]. در حقیقت، با افزایش درصد سرباره از ۵ به ۱۰ درصد، مدول یانگ افزایش یافته است و با افزایش درصد سرباره از ۱۰ به ۲۰ و ۳۰ درصد مدول

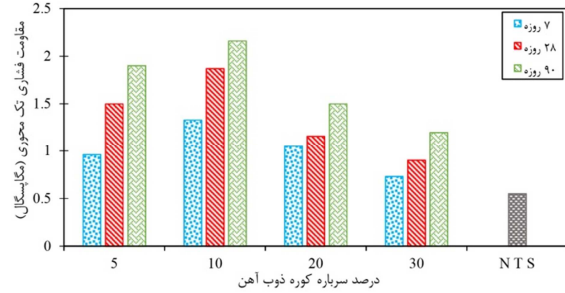
نمودارهای شکل ۸، به ترتیب مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف سرباره، خاکستر بادی و دیاتومیت را نشان می‌دهند. شکل ۸-الف نشان می‌دهد که در هر سه زمان عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده با ۱۰ درصد سرباره نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت بیشتری کسب کرده‌اند. نتایج سایر محققین نیز نشان می‌دهد که ۱۰ درصد بهینه سرباره برای تثبیت خاک‌های رسی برابر با ۱۰ درصد است [۷، ۲۲ و ۲۳]. نمونه ساخته شده با ۱۰ درصد سرباره در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه به مقاومتی برابر با ۲/۱۶ مگاپاسکال رسیده است که در مقایسه با نمونه تثبیت نشده (NTS) حدود ۳۹۲ درصد افزایش مقاومت داشته است. در زمان عمل‌آوری کوتاه‌مدت ۷ روزه، نیز نمونه حاوی ۱۰ درصد سرباره به مقاومت ۱/۳۳ مگاپاسکال رسیده است که نسبت به نمونه تثبیت نشده (NTS) حدود ۱۴۲ درصد افزایش مقاومت داشته است. دلیل این امر، خصوصیات مناسب پوزولانی سرباره به دلیل داشتن مقادیر بالای سیلیکات سدیم و هیدروکسید کلسیم است. تمامی نمونه‌های تثبیت‌شده در مقایسه با نمونه تثبیت نشده (NTS)، افزایش مقاومت داشته‌اند که این مسئله بیانگر این موضوع می‌باشد که تثبیت خاک رس با استفاده از سرباره جهت بهبود مقاومت خاک رس بسیار مفید بوده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مقدار ۱۰ درصد سرباره نسبت به درصد‌های بیشتر سرباره مقاومت بیشتری داشت، نمونه‌هایی با ۵ درصد سرباره نیز ساخته شد و ملاحظه گردید که با کاهش درصد سرباره به میزان کمتر از ۱۰ درصد، مقاومت فشاری خاک دچار کاهش می‌شود. افزایش مقاومت نمونه با افزایش درصد سرباره تا ۱۰ درصد به دلیل افزایش ترکیبات سمنته بین CaOH موجود در خاک و مواد پوزولانی موجود در سرباره (مواد آلومینوسیلیکاتی) می‌باشد. دلیل کاهش مقاومت با افزودن بیش از ۱۰٪ سرباره به خاک می‌تواند افزایش مواد پوزولان در خاک

مدول یانگ پیوسته در حال افزایش می‌باشد.

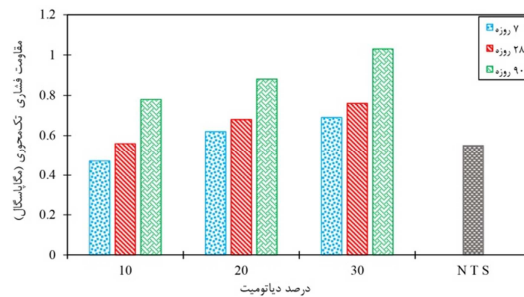
یانگ کاهش یافته است. در تثبیت به وسیله خاکستر بادی و دیاتومیت نیز با افزایش درصد افزودنی مقاومت فشاری و



(ب)

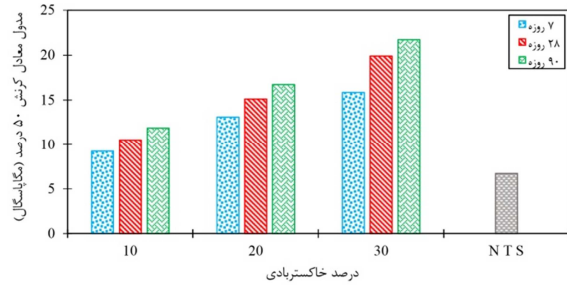


(الف)

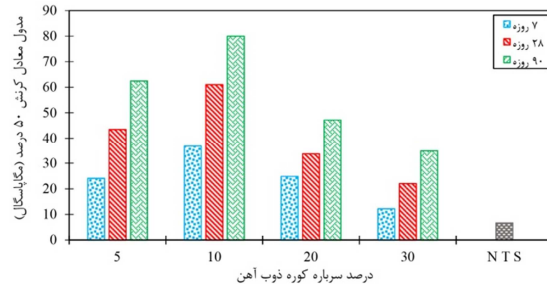


(پ)

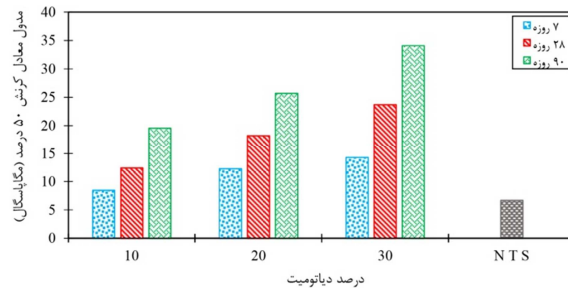
شکل ۸- مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با (الف) سرباره، (ب) خاکستر بادی و (پ) دیاتومیت



(ب)



(الف)



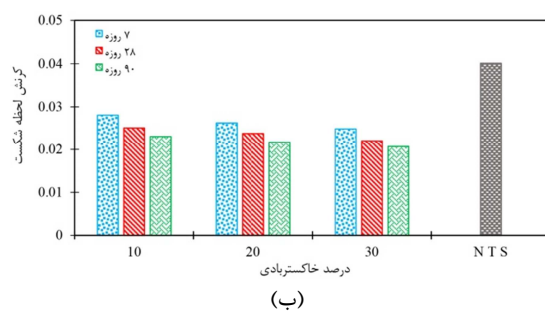
(پ)

شکل ۹- مدول یانگ (E50) خاک تثبیت شده با (الف) سرباره کوره ذوب آهن، (ب) خاکستر بادی و (پ) دیاتومیت

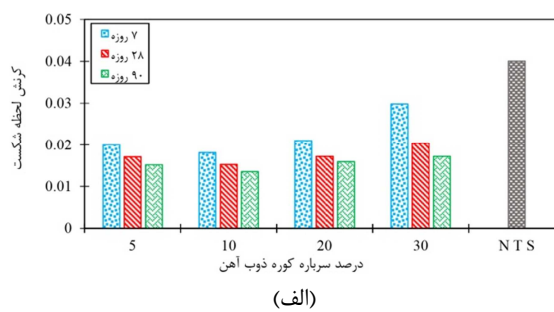
دیاتومیت)، سرباره، بیشترین افزایش مدول را نسبت به سایر تثبیت‌کننده‌ها داشته است. نمونه تثبیت شده با ۱۰

در بین تثبیت‌کننده‌های استفاده شده در این تحقیق (سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و

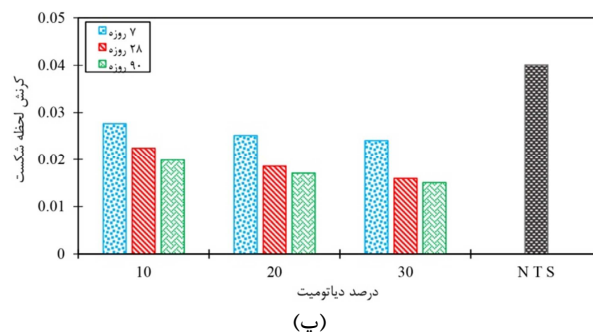
بیان‌گر سخت‌شدگی بیشتر سرباره نسبت به تثبیت کننده‌های دیگر و کاهش انعطاف‌پذیری خاک تثبیت شده است. نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سرباره پایین‌ترین میزان کرنش و بیشترین سخت‌شدگی را نسبت به سایر نمونه‌های تثبیت شده دارد. همچنین تمامی نمونه‌های تثبیت شده نسبت به نمونه تثبیت نشده کرنش لحظه شکست کمتری دارند. نتایج مربوط به کرنش شکست با نتایج مربوط به مقاومت فشاری و مدول یانگ رابطه عکس دارند، به گونه‌ای که با افزایش مقاومت فشاری و مدول یانگ انتظار می‌رود، نمونه‌ها سخت‌تر شده و کرنش لحظه شکست نمونه‌ها کاهش یابد. نتایج به دست آمده در این بخش همین امر را تصدیق کرده و نشان می‌دهند تمامی نمونه‌های تثبیت شده نسبت به نمونه تثبیت نشده به میزان قابل توجهی کاهش در کرنش لحظه شکست را تجربه کرده‌اند. در نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سرباره کرنش لحظه شکست به میزان ۲/۹۷ کاهش داشته است.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۱۰- کرنش لحظه شکست نمونه‌های تثبیت شده با (الف) سرباره کوره ذوب آهن، (ب) خاکستر بادی و (پ) دیاتومیت

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- آزمایش XRF نشان داد که سرباره مصرفی دارای مقادیر بالایی اکسید کلسیم، اکسید سیلیس و اکسید آلومینیم است که باعث می‌شود سرباره به

بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده جمع‌بندی و تحلیل

نتایج به شرح زیر می‌باشد:

مقاومت فشاری برابر با  $0/9$  و  $1/03$  مگاپاسگال رسیدند که هرکدام به ترتیب نسبت به نمونه تثبیت نشده  $63$  و  $88$  درصد افزایش مقاومت نشان دادند.

۴- مدول یانگ نسبت مستقیم با مقاومت فشاری تک‌محوری دارد و همان‌طور که مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش درصد افزودنی و زمان عمل‌آوری افزایش یافته است، مدول یانگ نیز با افزایش درصد افزودنی افزایش یافته است. نمونه‌های تثبیت شده با  $10$  درصد سرباره  $30$  درصد خاکستر بادی و  $30$  درصد دیاتومیت نیز به عنوان نمونه‌های بهینه بالاترین مدول‌های یانگ را به خود اختصاص دادند و نسبت به نمونه تثبیت نشده به ترتیب  $11/88$ ،  $3/22$  و  $5/01$  برابر افزایش مدول را تجربه کردند.

۵- ملاحظه شد که با اضافه شدن سرباره خاکستر بادی و دیاتومیت همزمان با افزایش مقاومت کرنش لحظه شکست نیز کاهش چشمگیری داشته است و این به معنای سخت‌تر شدن و تثبیت شدن نمونه‌ها است. نمونه تثبیت شده با سرباره بهینه‌ترین نمونه است که نسبت به نمونه تثبیت نشده  $2/97$  برابر کاهش مقاومت داده است. نمونه تثبیت شده با  $30$  درصد دیاتومیت با  $2/67$  و نمونه تثبیت شده با  $30$  خاکستر بادی نیز با  $1/93$  برابر کاهش کرنش در لحظه شکست در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

یک بستر مناسب برای انجام واکنش‌های پوزولانی تبدیل شود این آزمایش برای خاکستر بادی و دیاتومیت نشان داد که این دو ماده دارای درصد بالایی اکسید سیلیس هستند، اما اکسید کلسیم و آلومینیم کمتری دارند.

۲- اضافه کردن خاکستر بادی به خاک نتوانست تأثیر زیادی بر روی رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک داشته باشد، در حالی که افزودن سرباره کوره ذوب آهن به خاک با وجود تغییرات کم رطوبت بهینه وزن مخصوص خشک خاک را به میزان قابل توجهی افزایش داد و از  $1/615$  به حدود  $1/655$  رساند. اضافه کردن دیاتومیت به خاک در درصدهای متفاوت  $10$ ،  $20$  و  $30$  پیوسته با افزایش درصد افزودنی رطوبت بهینه از  $22/5$  به  $26$  درصد و وزن مخصوص خشک نیز از  $1/615$  به  $1/549$  کاهش یافت.

۳- نمونه‌های تثبیت‌شده با سرباره توانستند افزایش مقاومت مناسبی داشته باشند. نمونه تثبیت‌شده با  $10$  درصد سرباره در سه زمان عمل‌آوری  $7$ ،  $28$  و  $90$  روزه توانست بالاترین مقاومت‌ها را کسب کند و به‌عنوان نمونه بهینه با مقاومت  $2/16$  مگاپاسگال انتخاب شود. این نمونه نسبت به نمونه تثبیت نشده  $392$  درصد افزایش مقاومت داشت. نمونه‌های تثبیت شده با  $30$  درصد خاکستر بادی و  $30$  درصد دیاتومیت نیز به عنوان نمونه‌های بهینه این دو افزودنی به ترتیب به

## مراجع

- [1] Indiramma, P., Sudharani, C., & Needhidasan, S. (2020). "Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—An experimental study", *Materials Today: Proceedings*, 22, 694-700.
- [2] Kamali, B. (2007). *Effect of palm fiber filaments on soil resistance parameters (C and  $\Phi$ ) in sloping surfaces*. Ms Thesis, Shahid Bahonar University.
- [3] Abedi, M. (2013). *The effect of geogrids on soils modified with lime*. Ms Thesis, University of Industrial and Advanced Technology Kerman.
- [4] Adhikari, S. (2017). *Mechanical properties of soil-RAP-geopolymer for the stabilization of road base/subbase*. University of Louisiana at Lafayette, ProQuest Dissertations Publishing.

- [5] Kumar Sharma, A., & Sivapullaiah, P. V. (2012). "Improvement of strength of expansive soil with waste granulated blast furnace slag", In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 3920-3928.
- [6] Rajasekaran, G. (2005). "Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays", *ocean engineering*, 32(8-9), 1133-1159.
- [7] Yadu, L., & Tripathi, R. K. (2013). "Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil", *Procedia Engineering*, 51, 125-131.
- [8] Prasad, C. R. V., & Sharma, R. K. (2014). "Influence of sand and fly ash on clayey soil stabilization", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 334, 36-40.
- [9] Sharma, A. K., & Sivapullaiah, P. V. (2016). "Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer", *Soils and Foundations*, 56(2), 205-212.
- [10] Sharma, R. K., & Hymavathi, J. (2016). "Effect of fly ash, construction demolition waste and lime on geotechnical characteristics of a clayey soil: a comparative study", *Environmental Earth Sciences*, 75(5), 377.
- [11] Indiramma, P., & Sudharani, C. H. (2017). "Scanning electron microscope analysis of fly ash, quarry dust stabilized soil", In *International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology*, Springer, Cham, 284-296.
- [12] Mahedi, M., Cetin, B., & White, D. J. (2018). "Performance evaluation of cement and slag stabilized expansive soils", *Transportation Research Record*, 2672(52), 164-173.
- [13] Xu, B., & Yi, Y. (2019). "Soft clay stabilization using ladle slag-ground granulated blastfurnace slag blend", *Applied Clay Science*, 178, 1-6.
- [14] Veena, R. S., Pujeri, R. V., & Indiramma, M. (2019). "A cost-effective 2-tier security paradigm to safeguard cloud data with faster authentication", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(5), 33-38.
- [15] Preetham, H. K., Nayak, S., & Surya, E. V. (2019). "Experimental investigation on the stabilization of soft clay using granulated blast furnace slag", *Materials Science and Engineering*, 561, 1-7.
- [16] Mina, E., Kusuma, R. I., & Ulfah, N. (2019). "Utilization of steel slag and fly ash in soil stabilization and their effect to california bearing ratio (CBR) value", *Materials Science and Engineering*, 673(1), 1-8.
- [17] Mozejko, C. A., & Francisca, F. M. (2020). "Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag", *Construction and Building Materials*, 239, 1-10.
- [18] Chethan, B. A., & Shankar, A. R. (2021). "Strength and Durability Characteristics of Cement and Class F Fly Ash-Treated Black Cotton Soil", *Indian Geotechnical Journal*, 110, 1-13.
- [19] Abdila, S. R., Abdullah, M. M. A. B., Tahir, M. F. M., Ahmad, R., & Isradi, M. (2020). "Characterization of Fly ash and Ground Granulated Blast Slag for Soil Stabilization Application Using Geopolymerization Method", *Materials Science and Engineering*, 389, 1-9.
- [20] Shalabi, F. I., Asi, I. M., & Qasrawi, H. Y. (2017). "Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 29, 394-399.
- [21] Saride, S., & Dutta, T. T. (2016). "Effect of fly-ash stabilization on stiffness modulus degradation of expansive clays", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 1-12.
- [22] Neeraja, D., & Rao Narsimha, A. V. (2010). "Use of certain admixtures in the construction of pavement on expansive clayey subgrade", *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 6108-6114.
- [23] Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B., & Humphreys, I. (1996). "Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates", *Clay Minerals*, 31, 423-433.
- [24] Ghanizadeh, A. R., Yarmahmoudi, A., & Abbaslou, H. (2020). "Mechanical Properties of Low Plasticity Clay Soil Stabilized with Iron Ore Mine Tailing and Portland Cement", *Journal of Mining and Environment*, 11, 837-853.
- [25] Biswal, D. R., Sahoo, U. C., & Dash, S. R. (2017). "Strength and stiffness studies of cement stabilized granular lateritic soil. In International Congress and Exhibition", *Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology*, Springer, Cham, 320-336.