# تأثیر سرباره کوره‌های ذوب فلزات و آهک بر واگرایی، مقاومت برشی و خواص خمیری خاک رس استان گلستان

مهدی جلیلی*، حسین سعیدی‌راد؛
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، گروه مهندسی عمران،
محمد جواد شعبانی، دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی

تاریخ: دریافت ۹۵/۱۰/۱۷ پذیرش ۹۶/۰۲/۰۳

## چکیده

خاک‌های واگرا از جمله خاک‌های مشکل آفرین است و در سازه‌های آبی نظیر سدهای خاکی و کانال‌های آبیاری باعث ایجاد صدمات و تخریب‌های موضعی بسیاری می‌شوند. از روش‌های تثبیت خاک‌های واگرا افزودن سرباره کوره‌های ذوب فلزات و آهک است. در این پژوهش، خاک رس با خمیری کم برای بهبود واگرایی، مقاومت برشی و خواص خمیری با ۱ و ۲ درصد آهک و سرباره با مقادیر ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی ترکیب شده است. نمونه‌ها به‌مدت ۱ روز در دما و رطوبت ثابت نگه داشته شده و سپس روی آن آزمایش برش مستقیم، مقاومت تک‌محوری و پین هول انجام شده است. از نتایج حاصل از این آزمایش‌ها مشاهده شد که با وجود واگرایی نمونه اولیه خاک با نشانه *D1* در آزمایش پین هول، نمونه حاوی ۲ درصد وزنی آهک و ۵ درصد وزنی سرباره غیرواگرا با نشانه *ND2* طبقه‌بندی شده است. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که میزان چسبندگی برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۱ آهک از ۰/۲۳۸ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع برای نمونه بدون سرباره، به‌ترتیب به ۰/۲۵۱، ۰/۳۷۳، ۰/۴۱ و ۰/۴۸ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سرباره افزایش یافته است. هم‌چنین میزان مقاومت تک محوری برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۱ آهک از ۱/۰۰۱۴ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع برای نمونه بدون سرباره، به‌ترتیب به ۱/۰۶۱۶، ۱/۰۷۸۲، ۱/۲۱۲۷ و ۱/۲۲۴۶ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد

*نویسنده مسئول m.jalili@semnaniau.ac.ir

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

سرباره افزایش یافت. نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ بیان‌گر آن است که با افزایش سرباره و آهک، حد روانی و نشانه خمیری کاهش می‌یابد و موجب بهبود خصوصیات خمیری خاک می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده شده می‌توان گفت که استفاده از سرباره به‌عنوان محصول فرعی صنایع ذوب آهن به‌صورت جای‌گزین درصدی از آهک مصرفی به‌منظور کاهش پتانسیل واگرایی خاک رسی مؤثر است.

**واژه‌های کلیدی:** واگرایی خاک رس، مقاومت برشی، حدود اتربرگ، آزمایش پین‌هول، سرباره کورهٔ ذوب فلزات.

## مقدمه

برخی خاک‌های ریزدانه از لحاظ ساختاری ناپایدارند، بـه‌گونه‌ای که به‌آسانی پراکنده شده و بسیار فرسایش‌پذیرند [۱]. به‌طورکلی خاک‌هایی که پولک‌های رسی آنها به‌خودی خود از یک‌دیگر جدا شده و به داخل سوسپانسیون در آب ساکن وارد می‌شوند به‌عنوان خاک‌های واگرا[1] معرفی می‌شوند [۲]،[۳]. خاک‌های واگرا از جمله خاک‌های مشکل آفرین است و در سازه‌های آبی نظیر سدهای خاکی و کانال‌های آبیاری باعث ایجاد صدمات و تخریب‌های موضعی بسیاری می‌شوند. در خاک‌های رسی واگرا به‌علت ماهیت شیمیایی خاص آنها از جمله تجمع یون‌های تک ظرفیتی سدیم، ذرات در اثر مجاورت با آب از یک‌دیگر جدا و در اثر جریان آب ناشی از نشت و یا بارندگی به خارج از محیط منتقل می‌شوند و به‌عبارتی دیگر، واگرایی باعث ایجاد فرسایش درونی و بیرونی در خاک و نهایتاً منجر به تخریب سازه‌های مجاور خاک می‌شود. شناسایی و تشخیص صحیح واگرایی یکی از اقدامات اساسی برای جلوگیری از تخریب زود هنگام سازه‌های آبی است. روش‌های متعددی برای شناسایی خاک‌های واگرا ارائه شده‌اند، ولی بی‌دقتی در اجرای این آزمایش‌ها و یا تفسیر نامناسب نتایج به‌دست آمده ممکن است گمراه‌کننده باشد و شرایط نیز به‌صورتی ناصحیح تفسیر شود. آزمایش‌های کرامب (امرسون)، هیدرومتری مضاعف[2]، پین هول[3] و روش آنالیز شیمیایی[4] از

1. Dispersive soil
2. Double hydrometer test
3. Pinhole test
4. Sherard chemical method

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

جمله روش آزمایشگاهی تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها هستند که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارد [٤].

در بررسی‌های محلی نیز می‌توان به‌وجود چنین خاک‌هایی پی برد. این مرحله از شناسایی، در بازدیدهای مقدماتی از محل و در ضمن بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی در سطح منطقه صورت می‌گیرد. در مناطقی که سطح زمین شیب نسبتاً تندی دارد، شناسایی خاک‌های واگرا آسان‌تر است. در این نواحی، بر اثر بارندگی‌ها و فرسایش سریع بریدگی‌های بسیار عمیق و مشخصی در سطح زمین به‌وجود می‌آید که مشخصه اصلی این گونه خاک‌ها است. از سوی دیگر در مناطق مسطح و کم شیب، تشخیص خاک‌های واگرا به سادگی میسر نیست. معمولاً در مناطق دربردارنده خاک‌های واگرا آثار آب شستگی از قبیل کانال‌های تنگ و عمیق طبیعی، خلل و خرج و حفره‌های بزرگ دیده می‌شود. در سال ۲۰۱۵، سلیمی و گودرزی امکان تثبیت خاک رسی واگرا با استفاده از سربارهٔ کوره انفجار و سربارهٔ کوره اکسیژن دانه‌بندی شده بررسی کردند. آنان در بررسی خود به برررسی امکان و کارایی تثبیت خاک واگرا با این دو محصول جنبی صنعتی پرداختند. نتایج حاکی از آن است که واگرایی خاک از طریق افزودن ۱۰ درصد سربارهٔ کوره اکسیژن قابل حذف است و برای کنترل واگرایی خاک درصدهای بالاتر از سربارهٔ دانه‌بندی شده کورهٔ انفجار (٪۲۵–۲۰) مورد نیاز است [۵]. اشانگو[1] و رانجان پاترا[2] (۲۰۱٦)، برای اصلاح خاک انبساطی از فولاد سربارهٔ[3]، خاکستر پوسته برنج[4] و آهک استفاده کردند. آنان ویژگی‌های ژئوتکنیکی، پارامترهای مقاومت برشی و خواص دینامیکی خاک تثبیت شده با مواد مذکور را بررسی کردند و اختلاط بهینه را به‌صورت ٦۵ درصد خاک انبساطی + ۲۰ درصد سربارهٔ فولاد + ۵ درصد آهک + ۱۰ درصد خاکستر پوسته برنج گزارش کردند [٦]. بر اساس تعریف طرح ملی نانوفناوری در آمریکا، این فناوری به دانش کنترل ماده در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر اطلاق می‌شود، به‌طوری‌که اثرات منحصر به‌فرد این ابعاد منجر به ظهور کاربردهای جدیدی از ماده می‌شود [۷]. در سال‌های اخیر به علت پیشرفت‌های زیاد در این زمینه و مشاهده پتانسیل بسیار بالای مواد در سطح

1. Ashango
2. Ranjan Patra
3. Steel slag
4. Rice husk ash

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

نانو، از مرزهای مهندسی مواد و شیمی خارج شده و زمینه برای فعالیت‌های بین رشته‌ای و دست‌کاری مواد به‌منظور اصلاح خواص آنها در دیگر شاخه‌های فناوری نیز فراهم شده است [۸]. شن[1] و همکارانش (۲۰۱۱) از نانوآهک هیدراته با میانگین اندازه ذرات ٦٦۰ نانومتر استفاده کردند که باعث افزایش ۱۵ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی و افزایش ۸ درصدی نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها ( TSR[2]) شد [۹]. راجش[3] و سورش[4] (۲۰۱٦)، در پژوهشی به بررسی تثبیت خاک واگرا با آهک و POFA[5] (خاکستر روغن نخل) که محصول سوختن شلتوک روغن نخل و هسته خرما در آسیاب روغن نخل است، پرداختند. آنان درصد بهینه افزودن آهک و POFA را بر اساس نتایج مقاومت فشاری محدود نشده یافتند. نتایج حاکی از آن است که ترکیب آهک و POFA در مقایسه با آهک و POFA به تنهایی، عملکرد بهتری نشان می‌دهد [۱۰]. حداد و همکاران (۱۳۹٦)، به بررسی خاک‌های اطراف کانال انتقال آب در منطقه سیمین‌دشت گرمسار و ارزیابی میزان واگرایی این خاک‌ها پرداخته و در نهایت روش‌هایی برای اصلاح این خاک‌ها پیشنهاد کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داده است که با افزودن ۵ درصد سیمان یا ۵ درصد آهک و یا ۳ درصد آلومینیوم نیترات به خاک بسیار واگرا و همچنین افزودن ۳ درصد سیمان یا ۵ درصد آهک یا ۳ درصد آلومینیوم نیترات به خاک واگرای این منطقه موجب تثبیت آن می‌شود [۱۱].

## روش تحقیق

در این مقاله، به‌عنوان مطالعهٔ موردی، از ترکیب آهک و سرباره کوره ذوب فلزات برای بهبود خواص خاک واگرا در استان گلستان استفاده شده است. در این بررسی‌ها پس از مشخص شدن واگرایی خاک‌های رسی استان گلستان به بررسی نحوهٔ تثبیت این نوع خاک‌ها با سرباره کوره‌های ذوب فلزات و آهک پرداخته و تأثیر آن بر مقاومت برشی خاک بررسی می‌شود. هم‌چنین تأثیر این افزودنی‌ها بر مقاومت، حدود اتربرگ و واگرایی خاک تثبیت شده،

1. Shen
2. Tensile Strength Ratio
3. Rajesh
4. Suresh
5. Palm Oil Fuel Ash

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

بررسی شده است. برای این هدف از دستگاه برش مستقیم با ابعاد جعبه برشی ۶×۶×۲ سانتی‌متر و دستگاه آزمایش تک‌محوری استفاده شده است. هم‌چنین واگرایی نمونه اولیه و نمونه‌های تثبیت شده با روش پین هول بررسی شده است.

## مصالح استفاده شده

خاک استفاده شده به‌همراه آهک و سرباره مصرفی آزمایش‌های مختلف، شناسایی اولیه شده‌اند. در این‌جا به معرفی این مواد برای کاربرد در انجام آزمایش‌ها می‌پردازیم.

### ۱. خاک

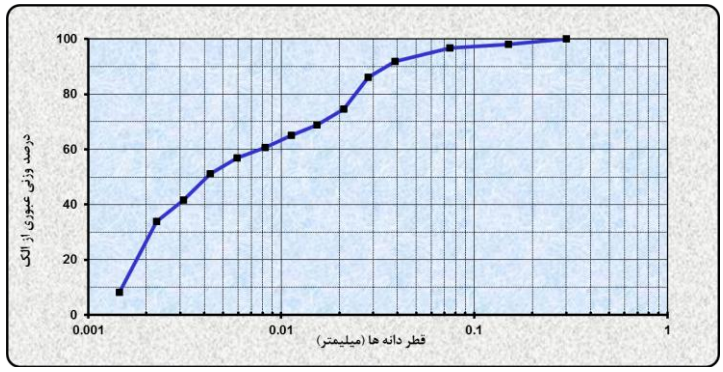
در این پژوهش از خاک واگرای رسی منطقه کلاله روستای تمرقره قوزی استان گلستان استفاده شده است. نمونه‌ها از عمق ۱ تا ۲ متری سطح زمین به‌صورت دست‌خورده برداشت شده‌اند. با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و احتمال وقوع پدیده واگرایی و فرسایش خاک در تراز شالوده سازه‌ها، بهبود خصوصیات مهندسی این خاک مورد نظر بوده است. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. هم‌چنین در جدول ۱ برخی مشخصات ژئوتکنیکی و فیزیکی نمونه خاک واگرای استفاده شده در این بررسی آورده شده است. خاک مورد نظر از نوع رس با پلاستیسیته پایین است و در آزمایش پین هول واگرا با نشانه *D1* تشخیص داده شده‌است. با توجه به نتایج آزمایش برش مستقیم پارامترهای مقاومتی C= ۰/۱۷ $kg/cm^2$ و $\varphi$=۱۴/۱۲° به‌دست آمده است. هم‌چنین مقاومت فشاری محدود نشده معادل ۰/۹۹۲۶ $kg/cm^2$ است. مقادیر چسبندگی کم، امکان وقوع واگرایی را تشدید می‌کند. با توجه به مشخصات مهندسی فوق و ظرفیت باربری کم خاک و پتانسیل قابل توجه واگرایی آن، استفاده از آهک به‌همراه سرباره کوره ذوب فلزات به‌عنوان تثبیت کننده خصوصیات مهندسی خاک انتخاب شده است.

### ۲. آهک

اصلاح خاک به‌وسیله آهک به‌ویژه در خاک‌های CL موجب افزایش درصد رطوبت بهینه، کاهش وزن واحد خشک بیشینه، کاهش پتانسیل تورم، افزایش مقاومت و افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. تاثیر آهک بر خاک را می‌توان به دو گروه تثبیت کوتاه مدت و تثبیت بلند

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

مدت تقسیم‌بندی کرد. افزایش کارپذیری خاک جزء اصلاح کوتاه مدت است و مهم‌ترین عامل در مرحلهٔ ساخت اولیه است. افزایش مقاومت و دوام را می‌توان در نتیجهٔ اثر بلند مدت آهک در نظر گرفت که در دورهٔ عمل‌آوری و بعد از آن رخ می‌دهد [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]، [۱۵]، [۱٦]، [۱۷]، [۱۸]، [۱۹].




**شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده**

**جدول ۱. مشخصات نمونه خاک واگرای استفاده شده**

| طبقه‌بندی خاک | مقاومت فشاری محدود نشده ($kg/cm^2$) | چسبندگی ($kg/cm^2$) | زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه) | *FC* (%) | $\gamma$ | *Gs* | درصد واگرایی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *CL* | ۰/۹۹۲٦ | ۰/۱۷ | ۱٤/۱۲ | ۹٦/٦۷ | ۲/۰۱۰ | ۲/۷ | ۱۰۰ |

اغلب مصالح پلاستیک می‌توانند با آهک اصلاح شوند اگر چه برخی از رس‌ها واکنش مؤثرتری با آهک می‌دهند. خاک‌های حاوی کانی‌های مونت موریلونیت به‌علت سطح مخصوص بزرگ، بیش‌تر واکنش مناسب‌تری با آهک می‌دهند، اگر چه آهک با کائولینیت و ایلیت نیز به‌خوبی واکنش می‌دهد [۱۸]، [۲۰]، [۲۱]،[۲۲]. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که آهک برای اختلاط با خاک‌های رسی به‌ویژه خاک‌های با پلاستیسیته متوسط و زیاد (PI>۱۵) مناسب‌تر است [۱۳]. اگرچه این قاعده، معیاری کلی برای نشان دادن مقدار رس موجود برای واکنش با آهک نیست.

در اثر اختلاط آهک با خاک دو واکنش پایه اما پیچیده بدین‌شرح معلوم می‌شود:

الف) بهبود نسبتاً سریع و یا آنی که ممکن است به تبادل یون‌ها نسبت داده شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

ب) واکنش پوزولانی که در بازه زمانی از چند دقیقه تا چند ماه و یا بیش‌تر رخ می‌دهد.

هنگامی که آهک و خاک رسی، با هم مخلوط شده و در معرض رطوبت قرار می‌گیرند واکنش‌های شیمیایی زیادی رخ می‌دهد که شامل تبادل کاتیون، کلوخه شدن[1]، واکنش پوزولانی و کربناسیون[2] است. تبادل کاتیونی و کلوخه شدن جزء واکنش‌های اولیه هستند که بلافاصله بعد از اختلاط رخ می‌دهند. کاتیون‌های یک ظرفیتی واقع در لایه دوگانه پولک‌های رسی با کاتیون‌های دو ظرفیتی کلسیم جای‌گزین می‌شوند. این واکنش‌ها موجب تغییرات سریع در نشانه خمیری و بهبود مقاومت خاک می‌شود. در جریان این واکنش‌ها، واکنش پوزولانی میان آهک و آلومینا و سیلیکای کانی‌های رسی رخ می‌دهد و باعث تولید مواد سیمانی شامل کلسیم سیلیکات هیدراته و کلسیم آلومینات هیدراته می‌شود.

افزایش ۱ تا ۵ درصد وزنی آهک هیدراته به خاک رس واگرا، موجب جای‌گزینی کاتیون‌های کلسیم به‌جای سدیم خاک شده و علاوه بر کاهش خاصیت خمیرائی، پتانسیل واگرائی آن را نیز کاهش می‌دهد. چنان‌که اشاره شد، افزایش آهک با کاهش خاصیت خمیرائی، از ایجاد درز و ترک ناشی از انقباض در خاک نیز جلوگیری کرده، جریان متمرکز و شدید آب به داخل توده خاک را که می‌تواند موجب فرسایش درونی آن شود، کاهش می‌دهد. به‌علاوه افزایش آهک موجب کاهش وزن واحد حجم خشک و افزایش مقاومت برشی خاک نیز می‌شود.

آهک شکفته شده استفاده شده در این پژوهش بسیار نرم است و از الک شمارهٔ ۷۰ گذرانده شده است. تجزیهٔ شیمیایی آهک مورد نظر با انجام آزمایش XRF[3] در جدول ۲ آورده شده‌است.

**جدول ۲. مشخصات شیمیایی آهک هیدراته استفاده شده برای تثبیت خاک واگرا**

| ترکیب شیمیایی | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $Cao$ | $MgO$ | $K_2O$ | $Na_2O$ | $SO_3$ | $LOI$ | $MnO$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| درصد وزنی (٪) | ۱/۳۰ | ۰/۵۸ | ۰/۱۲ | ٦٥/٤ | ۰/۵۵ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۲٦/۰۱ | ۰/۱ |

1. Flocculation- agglomeration
2. Carbonation
3. X-ray fluorescence

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

### ۳. سربارهٔ کوره ذوب فلزات

تثبیت خاک رس با آهک به‌عنوان یک روش اقتصادی مناسب به‌طور گسترده در ساخت بزرگراه‌ها و لایه‌های فونداسیون‌ها استفاده می‌شود. اما طبق گزارش‌ها در صورت وجود سولفات در خاک، تورم و خرابی‌هایی در خاک تثبیت شده با آهک، به وقوع می‌پیوندد. نقش مؤثر سرباره کوره آهن در افزایش مقاومت در برابر سولفات‌ها و شرایط محیطی خورنده ملات‌هایی که در آنها آهک و سولفات وجود دارد، به‌خوبی شناخته شده است [۲۳].

در فرآیند ذوب آهن و طی فرآیند تشکیل آهن، محصول فرعی غیرفلزی به‌نام سرباره تولید می‌شود که مواد تشکیل‌دهندهٔ آن عبارتند از سیلیکا، آلومینا سیلیکا و کلسیم سیلیکا. با توجه به نوع خنک شدن، انواع مختلفی از سرباره وجود دارد. این محصولات شامل سرباره خنک شده در هوای آزاد، سرباره آهن‌گدازی دمیده یا پف کرده و سرباره دانه‌ای کوره است. اگر سرباره مذاب به‌وسیلهٔ آب به سرعت خنک شود، به‌صورت شیشه‌ای در آمده و قطعاتی ترد به‌اندازهٔ ماسه تشکیل می‌شوند. ساختار فیزیکی و اندازهٔ دانه‌ها به ترکیب شیمیایی سرباره، دمای آن در زمان خنک شدن به‌وسیلهٔ آب و روش خنک کردن آن بستگی دارد. هنگامی که این محصول شکسته و آسیاب شود به ذراتی تبدیل می‌شود که سرباره دانه‌ای کوره نامیده شوند که دارای خاصیت سیمانی هستند و می‌تواند به‌عنوان ماده جای‌گزین بخشی از آهک در تثبیت خاک رس به‌کار برده شود [۲٤].

با توجه به آگاهی از اثرات آلودگی‌های زیست محیطی مواد باطله، استفاده از آنها در تثبیت خاک با وجود خاصیت پوزولانی، می‌تواند از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی مفید باشد. در خصوص تثبیت خاک رس به‌ویژه در صورت وجود آهک و سولفات در محیط، کاربرد سرباره کوره ذوب‌آهن که محصول فرعی سرباره کوره ذوب در فرآیند تولید آهن در کارخانجات ذوب‌آهن است، در برخی کشورها مورد توجه قرار گرفته و تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است. در این پژوهش نیز به‌عنوان جای‌گزین بخشی از آهک مصرفی در تثبیت خاک واگرا از سرباره دانه‌ای استفاده شده‌است. ترکیب شیمیایی سرباره استفاده شده با انجام آزمایش XRF در جدول ۳ آمده است. مشاهده می‌شود که ماده افزودنی مورد نظر

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

حاوی مقادیر بالایی کاتیون های چندگانه است که می‌تواند به سادگی با کاتیون‌های سطوح رسی تبادل صورت دهد.

**جدول ۳. ترکیب شیمیایی سرباره استفاده شده در این پژوهش**

| ترکیب شیمیایی | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | $Cao$ | $MgO$ | $Na_2O_3$ | $K_2O$ | $SO_3$ | $MnO$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| درصد وزنی (٪) | ۳۲/۳۵ | ۱۳ | ۳/٤۰ | ۳/٦۲ | ۳۳/۲ | ۸/۱ | ۰/٦۱ | ۱/۱ | ۳/۵ | ۱/۸۲ |

برای انجام آزمایش‌های لازم بر خاک تثبیت شده، ۱ و ۲ درصد وزنی آهک به‌صورت خشک به خاک اضافه و مخلوط شده است. بعد از اختلاط کامل رطوبت به نمونه‌ها اضافه شد. در نمونه‌های دارای سرباره و با رطوبت کم به‌علت مصرف رطوبت برای هیدارتاسیون سرباره، رطوبت کافی برای انجام واکنش پوزولانی وجود ندارد در نتیجه واکنش پوزولانی کامل انجام نمی‌شود. اما اگر نمونه‌ها با رطوبت بیشتر ساخته شوند، با کامل شدن واکنش پوزولانی در کنار هیدراتاسیون سرباره، مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از این‌رو در تهیه نمونه‌ها از رطوبتی بیش از رطوبت حد خمیری استفاده شده‌است. برای انجام واکنش‌ها نمونه‌ها در ظرف‌های پلاستیکی با رطوبت ثابت به‌مدت ۱ روز نگه‌داری شدند.

## نتایج

چنان‌که در بخش‌های قبلی ذکر شد نمونه‌های آزمایشگاهی شامل خاک رس واگرای طبیعی با پلاستیسیته پایین و واگرایی ۱۰۰ درصد و نمونه‌های تثبیت شده با ۱ و ۲ درصد آهک و نیز ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سرباره کوره ذوب فلزات بوده است. آزمایش‌های انجام شده شامل برش مستقیم، مقاومت تک‌محوری است. هم‌چنین روی تمامی نمونه‌های ساخته شده علاوه بر خاک واگرای طبیعی، آزمایش پین هول که از متداول‌ترین آزمایش‌های تشخیص پتانسیل واگرایی است، انجام شد.

### ۱. پین هول

جدول ٤ نتایج حاصل از رده‌بندی نمونه اولیه و نمونه‌های ساخته شده خاک در ترکیب با آهک یا آهک و سرباره را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود نمونهٔ اولیه خاک واگرا

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

با نشانه $D_1$ بوده است. نمونه حاوی ۱ درصد وزنی آهک و بدون سرباره نیز با وجود رده‌بندی با نشانه $D_2$ هنوز واگراست. هم‌چنین افزودن ۰/۵ و ۱ درصد وزنی سرباره به نمونه حاوی ۱ درصد وزنی آهک، خاک را از حالت واگرایی خارج نکرده و برای این دو نمونه نیز رده واگرایی $D_2$ مشاهده شده است.

ملاحظه می‌شود که نمونهٔ حاصل از افزودن ۳ درصد وزنی سرباره و ۱ درصد وزنی آهک دارای واگرایی متوسط با شناسه $ND_4$ است. در این مورد افزایش میزان سرباره به ۵ درصد، واگرایی را کاهش داده و نتیجه آزمایش پین هول شناسه $ND_3$ را نشان می‌دهد. هم‌چنین نمونه‌های حاوی ۲ درصد وزنی آهک و ۰/۵، ۱ و ۳ درصد وزنی سرباره دارای واگرای متوسط با نشانه $ND_3$ طبقه‌بندی شده‌اند. در نهایت نمونه حاوی ۲ درصد وزنی آهک و ۵ درصد وزنی سرباره، غیرواگرا با نشانه $ND_2$ طبقه‌بندی شده است.

**جدول ٤. نتایج آزمایش پین هول روی تمام نمونه‌های آزمایشی**

| نمونه | آهک (٪) | سرباره (٪) | شناسه در آزمایش پین هول | توصیف واگرایی |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۰ | $D_1$ | واگرا |
| ۲ | ۱ | ۰ | $D_2$ | واگرا |
| ۳ | ۱ | ۰/۵ | $D_2$ | واگرا |
| ٤ | ۱ | ۱ | $D_2$ | واگرا |
| ٥ | ۱ | ۳ | $ND_4$ | واگرایی متوسط |
| ٦ | ۱ | ٥ | $ND_3$ | واگرایی متوسط |
| ۷ | ۲ | ۰/۵ | $ND_3$ | واگرایی متوسط |
| ۸ | ۲ | ۱ | $ND_3$ | واگرایی متوسط |
| ۹ | ۲ | ۳ | $ND_3$ | واگرایی متوسط |
| ۱۰ | ۲ | ٥ | $ND_2$ | غیر واگرا |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

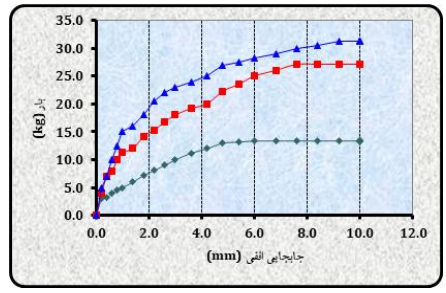
**۲. برش مستقیم**

آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های دهگانه شامل خاک واگرای طبیعی و آهک تا حداکثر ۲ درصد وزنی و سرباره تا حداکثر ۵ درصد وزنی تحت بارهای اعمالی ۲۰ ،۴۰ و ۶۰ کیلوگرم انجام شده است. هر افزایش بار تا زمان رسیدن به تعادل روی نمونه باقی می‌ماند. در این‌جا به بررسی تأثیر افزودن آهک و سرباره بر پارامترهای مقاومت برشی خاک واگرا می‌پردازیم. نمودار بار–جابجایی افقی برای تمام نمونه‌های آزمایشی در شکل‌های ۲ تا ۱۱ آمده است. در ادامه برای مقایسهٔ نتایج، شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به‌ترتیب تغییرات چسبندگی در مقابل مقدار سرباره کوره ذوب فلزات + ۱٪ آهک و ٪۲ آهک را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در هر دو مورد افزایش میزان سرباره مصرفی برای تثبیت خاک واگرا، منجر به افزایش چسبندگی شده است. به‌طوری‌که میزان چسبندگی برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۱ آهک از ۰/۲۳۸ $kg/cm^2$ برای نمونه بدون سرباره، به‌ترتیب به ۰/۲۵۱، ۰/۳۷۳، ۰/۴۱ و ۰/۴۸ $kg/cm^2$ به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سرباره افزایش یافته است. میزان چسبندگی حاصل از آزمایش برش مستقیم نیز برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۲ آهک، به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سرباره به‌ترتیب ۰/۶۱۵، ۰/۶۷۱، ۰/۷۲۴ و ۰/۷۵۷ $kg/cm^2$ بوده است.

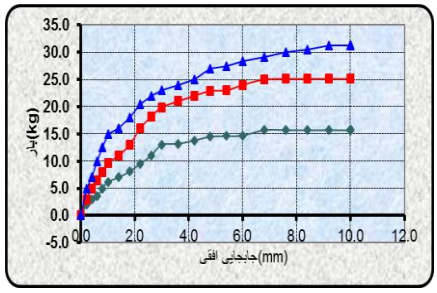
هم‌چنین شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به‌ترتیب تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی در مقابل مقدار سرباره کوره ذوب فلزات + ۱٪ آهک و ٪۲ آهک را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که در هر دو مورد افزایش میزان سرباره مصرفی برای تثبیت خاک واگرا، منجر به افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی شده است. به‌طوری‌که میزان این پارامتر برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۱ آهک از ۱۴/۳ درجه برای نمونه بدون سرباره، به‌ترتیب به ۱۸/۱۱، ۲۱/۳، ۲۱/۸۶ و ۲۱/۹۲ $kg/cm^2$ به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سرباره افزایش یافته است. هم‌چنین برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۲ آهک، میزان زاویهٔ اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش برش مستقیم به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سرباره به‌ترتیب ۲۳/۱۵، ۲۳/۵۳، ۲۳/۷۶ و ۲۴/۱۲ درجه بوده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

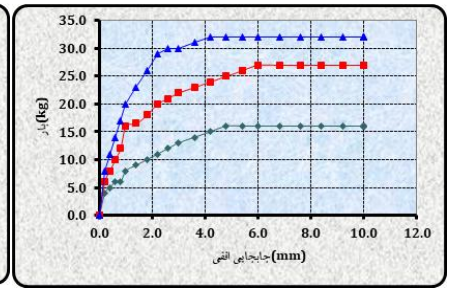
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]



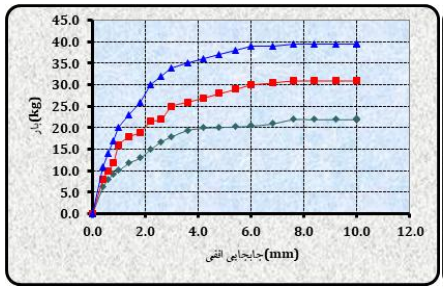

شکل ۲. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک واگرا بدون افزودنی



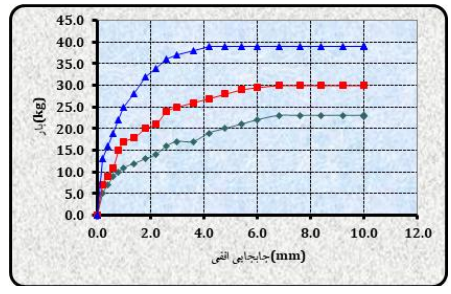

شکل ۳. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۱٪ آهک)



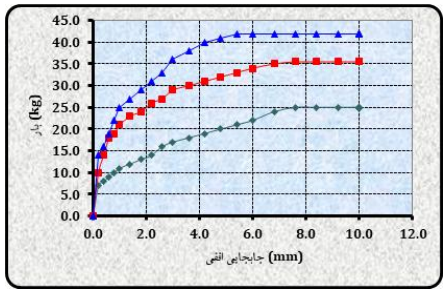

شکل ٤. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۰/۵٪ سرباره)




شکل ۵. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۱٪ سرباره)



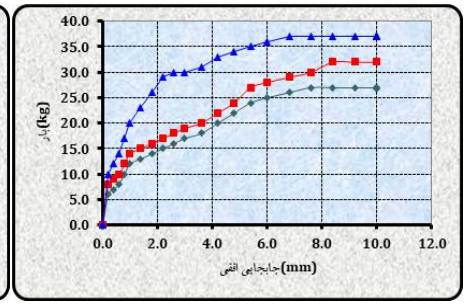

شکل ٦. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۳٪ سرباره)



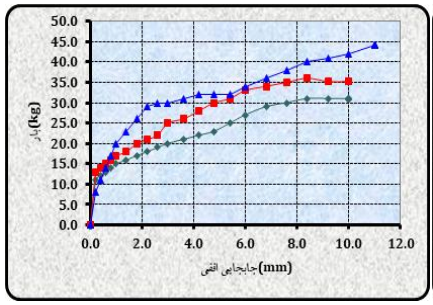

شکل ۷. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۵٪ سرباره)

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

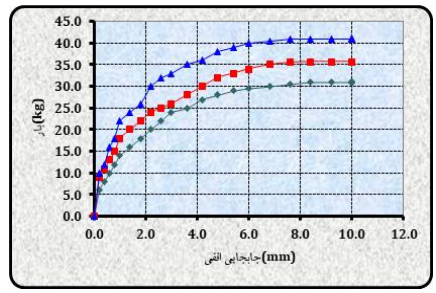
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]



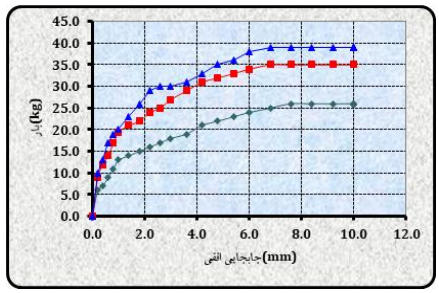

شکل ۸. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۲٪ آهک و ۰/۵٪ سرباره)



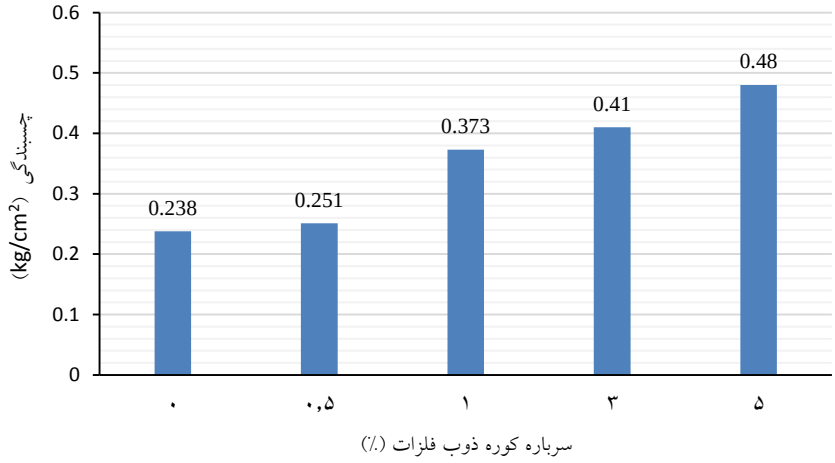

شکل ۹. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۲٪ آهک و ۱٪ سرباره)




شکل ۱۰. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۲٪ آهک و ۳٪ سرباره)

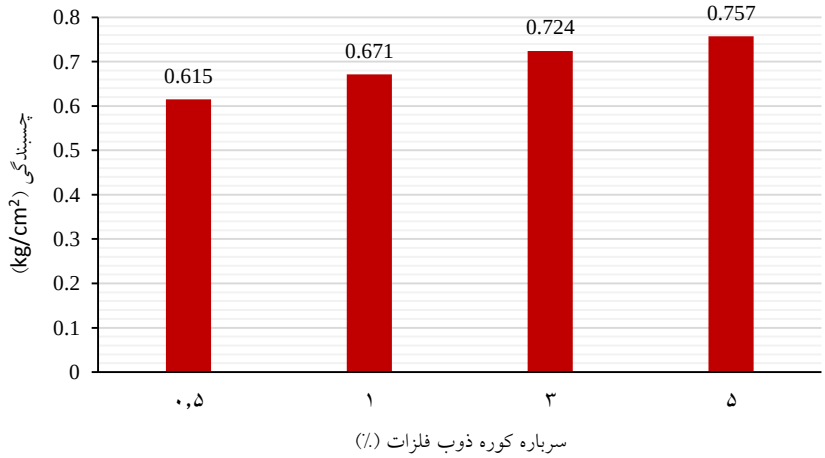



شکل ۱۱. نمودار بار–جابجایی افقی (خاک تثبیت شده با ۲٪ آهک و ۵٪ سرباره)

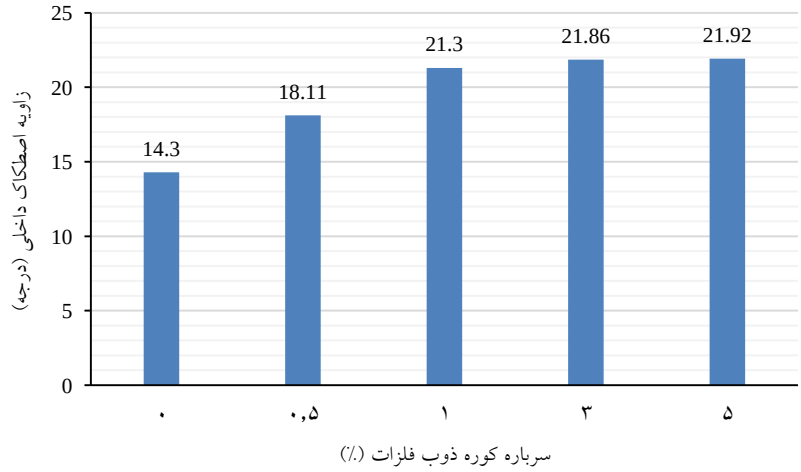



شکل ۱۲. تغییرات چسبندگی در مقابل مقدار سرباره کوره ذوب فلزات + ۱٪ آهک

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]




**شکل ۱۳. تغییرات چسبندگی در مقابل مقدار سرباره کوره ذوب فلزات + ۲٪ آهک**

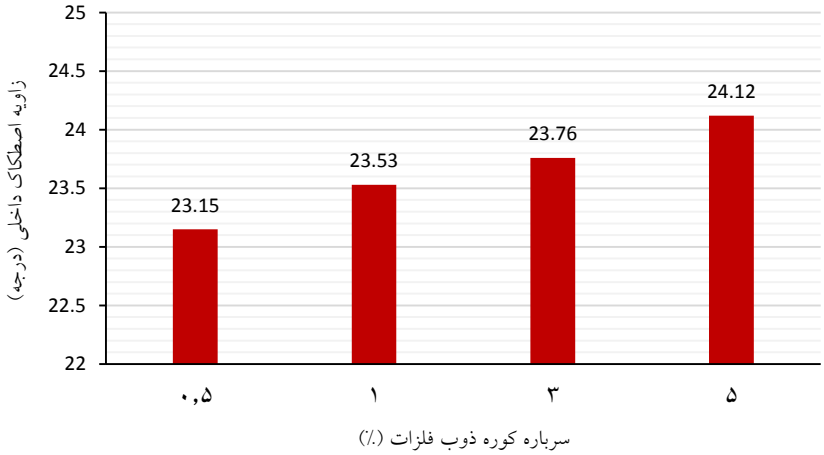



**شکل ١٤. تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی در مقابل مقدار سرباره کوره ذوب فلزات + ۱٪ آهک**

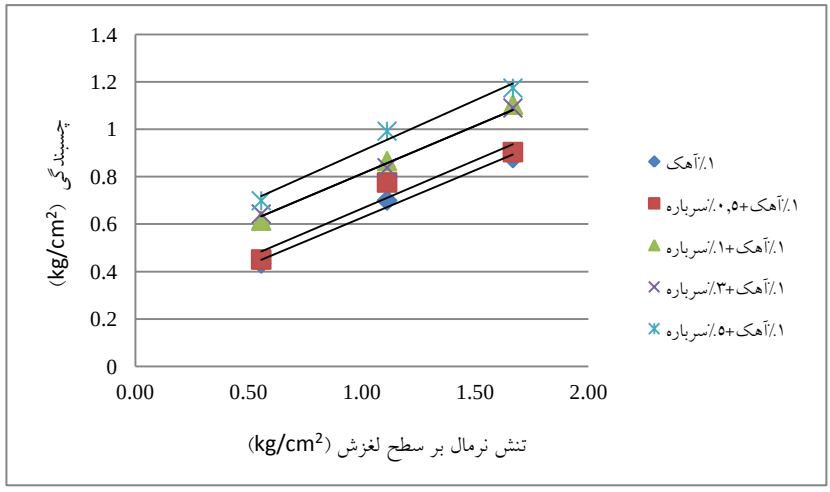
در بررسی نتایج آزمایش‌های برش مستقیم مشاهده شد که افزودن آهک و سرباره به خاک واگرا منجر به افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی شد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که افزودن آهک و سرباره به خاک باعث کم شدن تغییر شکل‌پذیری نمونه شده و نمونه تردتر می‌شود. در شکل ١٦ نمودارهای پوش گسیختگی حاصل از آزمون برش مستقیم

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

ارائه شده است. ملاحظه می‌شود برای زاویهٔ اصطکاک داخلی، میزان افزایش این پارامتر برای نمونه‌های با ۱٪ آهک به‌علاوه ۳ تا ۵ درصد سرباره تفاوت زیادی نداشته است و می‌توان درصد بهینه این ترکیب را ۱٪ آهک و ۳٪ سرباره تعریف کرد، زیرا با افزایش درصد آهک به ۲٪، تغییر زاویهٔ اصطکاک داخلی ناچیز (کم‌تر از ٤ درصد) بوده است.



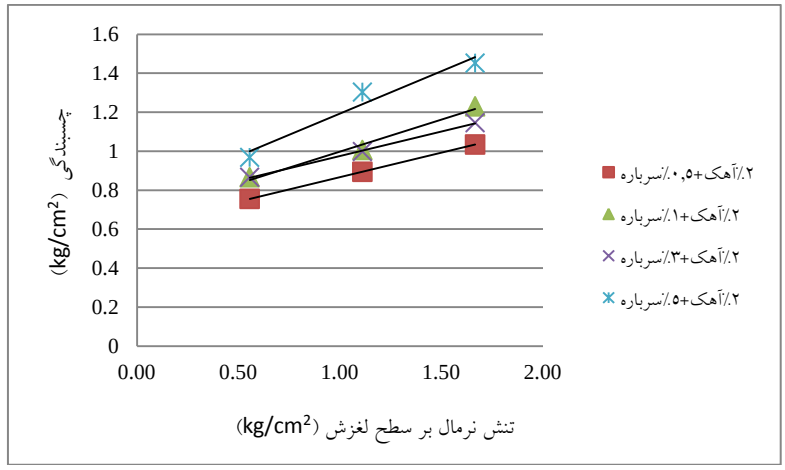

**شکل ۱۵. تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی در مقابل مقدار سرباره کوره ذوب فلزات + ۲٪ آهک**




**الف**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]




ب

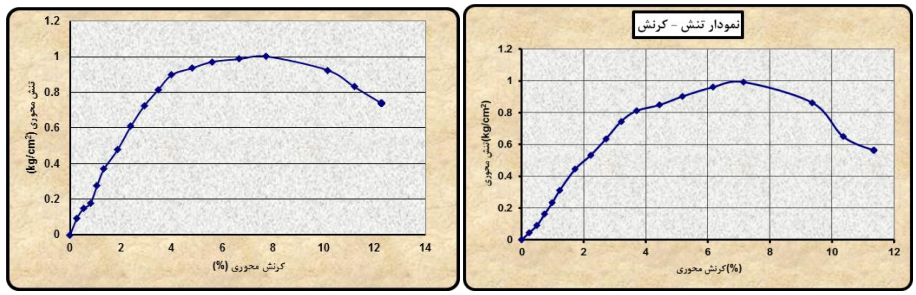
**شکل ۱۶. تغییرات پوش گسیختگی برای الف) مقادیر مختلف سرباره کوره ذوب فلزات + ۱٪ آهک و ب) مقادیر مختلف سرباره کوره ذوب فلزات + ۲٪ آهک**

### ۳. مقاومت تک‌محوری

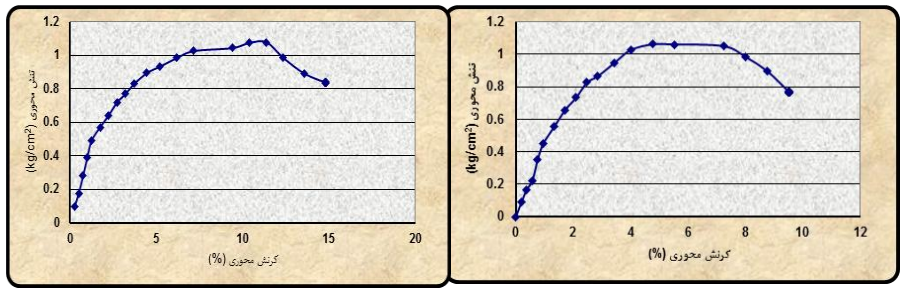
آزمایش تعیین مقاومت تک‌محوری برای نمونه‌های دهگانه با حداکثر ۲ درصد آهک و ۵ درصد سرباره انجام شد. نمودارهای تنش-کرنش حاصل از این آزمون ها در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در بالا، افزایش مقاومت نمونه‌ها را می‌توان به انجام واکنش‌های پوزولانی و هیدراسیون ارتباط داد. واکنش هیدراسیون در کوتاه مدت باعث افزایش مقاومت می‌شود. در حالی که واکنش پوزولانی سبب افزایش مقاومت و دوام و قابلیت باربری خاک در طولانی مدت می‌شود. با بررسی در نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که با افزودن آهک و افزایش میزان سرباره مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها نسبت به نمونه قبل از تثبیت افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فشاری می‌تواند به‌علت مقاومت اصطکاکی آهک و سرباره باشد [۶].

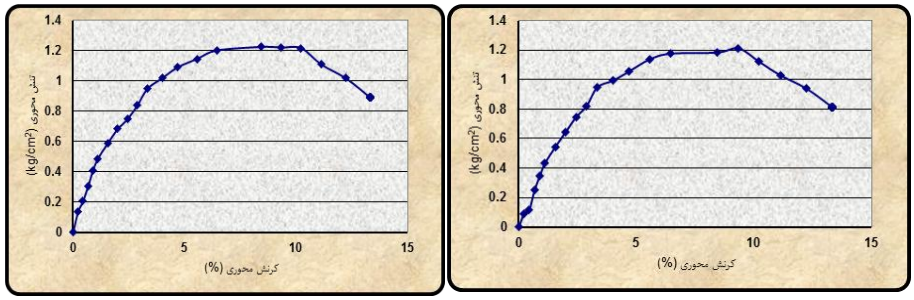
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]




الف ب




ج د

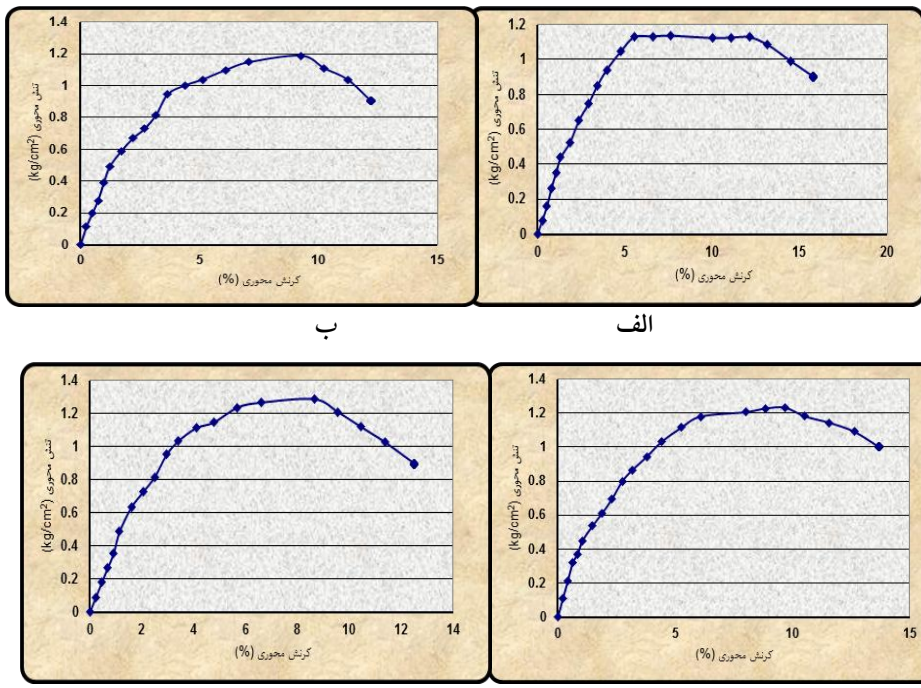



چ ح

**شکل ۱۷. نمودار تغییرات تنش در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های خاک الف) بکر، ب) تثبیت شده با ۱٪ آهک، ج) تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۰/۵٪ سرباره، د) تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۱٪ سرباره، ه) تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۳٪ سرباره و و. تثبیت شده با ۱٪ آهک و ۵٪ سرباره**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]




ب الف

د ج

**شکل ۱۸. نمودار تغییرات تنش در مقابل کرنش محوری برای نمونه های خاک الف) تثبیت شده با ۲٪ آهک و ۰/۵٪ سرباره ، ب) تثبیت شده با ۲٪ آهک و ۱٪ سرباره، ج) یت شده با ۲٪ آهک و ۳٪ سرباره، د) تثبیت شده با ۲٪ آهک و ۵٪ سرباره**

اصلاح خاک با آهک موجب افزایش مقاومت خاک می‌شود. افزایش مقاومت در کوتاه مدت توأم با وقوع واکنش‌های کوتاه مدت کلوخه شدن و بهبود کارپذیری خاک صورت می‌گیرد. چنان‌که در شکل ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود با افزایش میزان آهک و سرباره، مقاومت یک روزه نمونه‌ها افزایش یافته است. علت این افزایش مقاومت را می‌توان به تبادل کاتیونی و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی نسبت داد. به بیان دیگر واکنش میان آهک و کانی‌های رسی موجب حل‌شدگی کانی‌های رسی و تشکیل ترکیباتی همچون ژل آلومینات کلسیم هیدراته[1] و سیلیکات کلسیم هیدراته[2] می‌شود. این ترکیبات مشابه ترکیبات موجود در سیمان پرتلند

1. CAH
2. CSH

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

هیدراته است. متبلور و سخت‌شدن این ژل‌ها باعث افزایش مقاومت می‌شود. به‌گونه‌ای‌که در مورد نمونه‌های بدون سربار، مقاومت تک‌محوری برای نمونه حاوی ۱ درصد آهک ۱/۰۰۱٤ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و برای نمونه‌های با ۲ درصد آهک این مقدار افزایش یافته است.

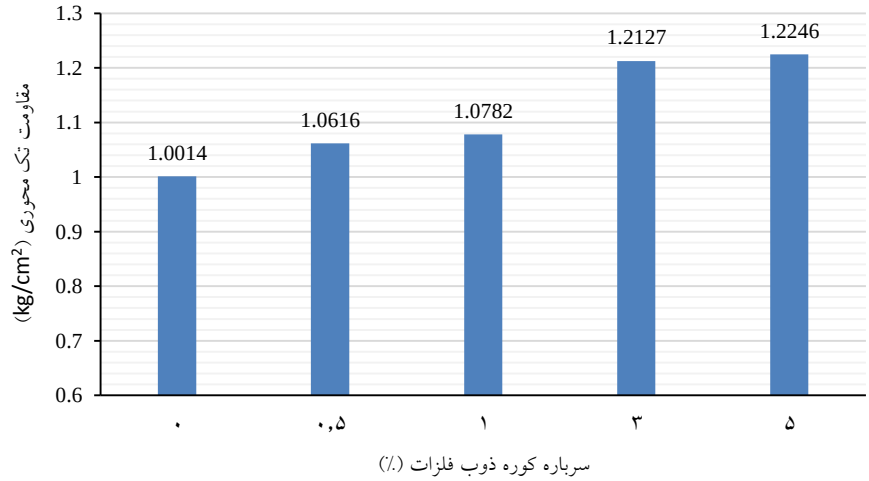
شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به‌ترتیب تغییرات مقاومت تک‌محوری در مقابل مقدار سربارهٔ کوره ذوب فلزات + ۱٪ آهک و ٪۲ آهک را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در هر دو مورد افزایش میزان سربارهٔ مصرفی جهت تثبیت خاک واگرا، منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری شده‌است. به‌طوری‌که میزان مقاومت تک‌محوری برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۱ آهک از ۱/۰۰۱٤ $kg/cm^2$ برای نمونه بدون سربارهٔ، به‌ترتیب به ۱/۰٦۱٦، ۱/۰۷۸۲، ۱/۲۱۲۷ و ۱/۲۲٤٦ $kg/cm^2$ به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سربارهٔ افزایش یافته است. میزان مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده با ٪۲ آهک، به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سربارهٔ به‌ترتیب ۱/۱۳٦۷، ۱/۱۸۸۵، ۱/۲۳۲۲ و ۱/۲۸۷۲ $kg/cm^2$ بوده است.

هم‌چنین تغییرات کرنش محوری در مقابل مقدار سربارهٔ کوره ذوب فلزات + ۱٪ آهک و ٪۲ آهک به‌ترتیب در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو مورد افزایش میزان سربارهٔ مصرفی برای تثبیت خاک واگرا، منجر به کاهش کرنش محوری شده‌است. به‌طوری‌که میزان کرنش محوری برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۱ آهک از ۹/٦۸٤۲ درصد برای نمونه بدون سربارهٔ، به‌ترتیب به ۹/۳۳۳۳، ۹/۲٦۸۳، ۹/٦۳٦٤ و ۸/٤٤٤٤ درصد به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سربارهٔ کاهش یافته است. هم‌چنین میزان کرنش محوری برای نمونه‌های تثبیت شده با ٪۲ آهک، به‌ازای افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد سربارهٔ به‌ترتیب ۷/۷۳۳۳، ۷/٦۳۱٦، ۷/۱۵۱۷ و ٤/۷٦۱۹ $kg/cm^2$ بوده است.

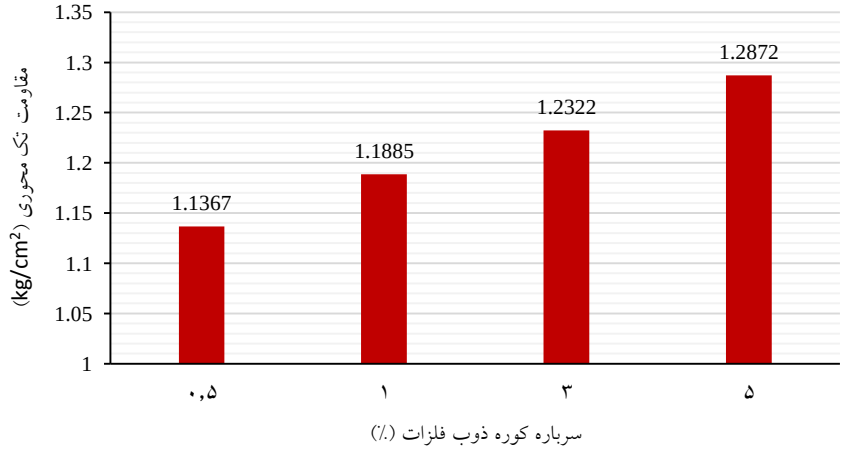
نتایج تعیین و مقایسه میزان تغییرشکل نمونه‌ها در لحظه گسیختگی نشان داد که با افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، کرنش مربوط به مقاومت بیشینه کاهش یافته و در واقع خاک اصلاح شده با آهک و سربارهٔ رفتار شکننده از خود نشان می‌دهد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]



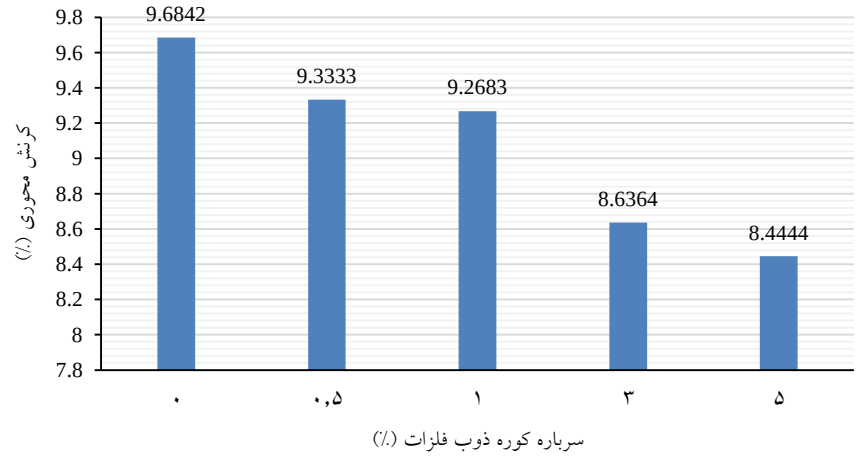

**شکل ۱۹. مقاومت تک محوری نمونه‌های به‌سازی شده با ۱ درصد آهک و مقادیر مختلف سرباره**



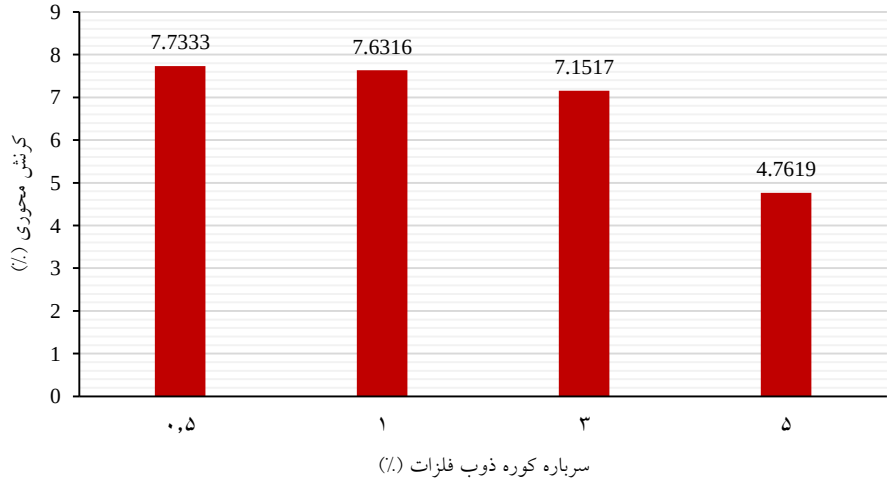

**شکل ۲۰. مقاومت تک محوری نمونه‌های به‌سازی شده با ۲ درصد آهک و مقادیر مختلف سرباره**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]




**شکل ۲۱. کرنش محوری نمونه‌های به‌سازی شده با ۱ درصد آهک و مقادیر مختلف سرباره**




**شکل ۲۲. کرنش محوری نمونه‌های به‌سازی شده با ۲ درصد آهک و مقادیر مختلف سرباره**

## ٤. حدود اتربرگ

برای بررسی خصوصیات خمیری نمونه شاهد (خاک واگرای بدون افزودنی) و نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف آهک و سرباره کوره ذوب فلزات، آزمایش حدود اتربرگ

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

روی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۲٤ ساعت انجام پذیرفت. خلاصه تمام نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین حد خمیری و حد روانی به‌همراه نشانه خمیری و فعالیت (A) برای هر نمونه در کنار طرح اختلاط مربوطه در جدول ۵ و شکل‌های زیر آمده است. بیشینهٔ مقدار حد خمیری برابر با ۲٤/۲٦ مربوط به خاک با ۲ درصد آهک و ۵ درصد سرباره و کمینه مقدار این پارامتر مربوط به ۱۳/٤۲ درصد مربوط به خاک واگرای بدون افزودنی است. هم‌چنین بیشینهٔ مقدار حد روانی برابر ۳۲/٤۳ درصد برای خاک واگرای بدون افزودنی و کمینهٔ مقدار آن برابر ۲۷/۰۳ درصد برای خاک با ۲ درصد آهک و ۵ درصد سرباره حاصل شده‌است. به این ترتیب بیشینه مقدار شاخص خمیری برابر ۱۹/۰۱ درصد برای نمونهٔ شمارهٔ ۱ بدون افزودنی و کمینهٔ مقدار آن برابر ۲/۷۷ درصد برای نمونهٔ شمارهٔ ۱۰ شامل ۲ درصد آهک و ۵ درصد سرباره بوده است. به‌عبارتی افزودن ۲ درصد آهک و ۵ درصد سرباره به خاک واگرا منجر به ۸۰/۸ درصد افزایش در میزان حد خمیری، ۱٦/٦ درصد کاهش در میزان حد روانی و کاهش بیش از ۱٦ واحدی در نشانه خمیری شده است. هم‌چنین قابل مشاهده است که میزان فعالیت خاک واگرای اولیه ۰/۳۲ بوده است که با افزایش هر یک از افزودنی‌ها این مقدار کاهش یافته و در نهایت برای نمونه با ۲ درصد آهک و ۵ درصد سرباره، مقدار فعالیت به کم‌ترین میزان خود یعنی ۰/۰۵ رسیده است.

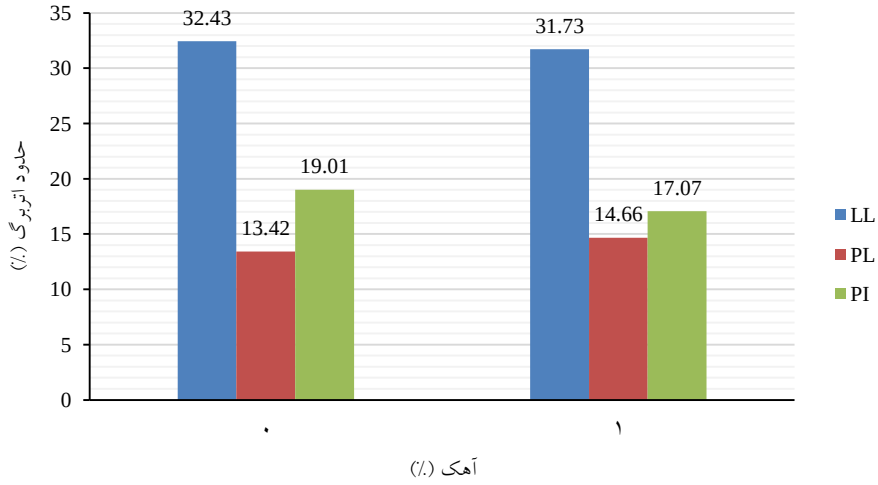
**جدول ۵. طرح اختلاط نمونه‌ها و حد خمیری، حد روانی، نشانه خمیری و فعالیت خاک**

| نمونه | آهک (٪) | سرباره (٪) | PL (٪) | LL (٪) | PI (٪) | A |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۰ | ۱۳/٤۲ | ۳۲/٤۳ | ۱۹/۰۱ | ۰/۳۲ |
| ۲ | ۱ | ۰ | ۱٤/٦٦ | ۳۱/۷۳ | ۱۷/۰۷ | ۰/۲۹ |
| ۳ | ۱ | ۰/۵ | ۱٦/٦۷ | ۳۱/۵۵ | ۱٤/۸۸ | ۰/۲۵ |
| ٤ | ۱ | ۱ | ۱۸/۷۲ | ۳۰/۹٦ | ۱۲/۲٤ | ۰/۲۱ |
| ۵ | ۱ | ۳ | ۱۹/۳۸ | ۲۹/۷٦ | ۱۰/۳۸ | ۰/۱۸۵ |
| ٦ | ۱ | ۵ | ۱۹/۵۷ | ۲۹/٤۲ | ۹/۸۵ | ۰/۱۸۲ |
| ۷ | ۲ | ۰/۵ | ۲۱/٤۸ | ۲۸/۲٦ | ۷/۰۸ | ۰/۱۲ |
| ۸ | ۲ | ۱ | ۲۲/۵ | ۲۸/۰٤ | ۵/۵٤ | ۰/۱۰ |
| ۹ | ۲ | ۳ | ۲۳/۷۱ | ۲۷/۸۱ | ٤/۱ | ۰/۰۷ |
| ۱۰ | ۲ | ۵ | ۲٤/۲٦ | ۲۷/۰۳ | ۲/۷۷ | ۰/۰۵ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

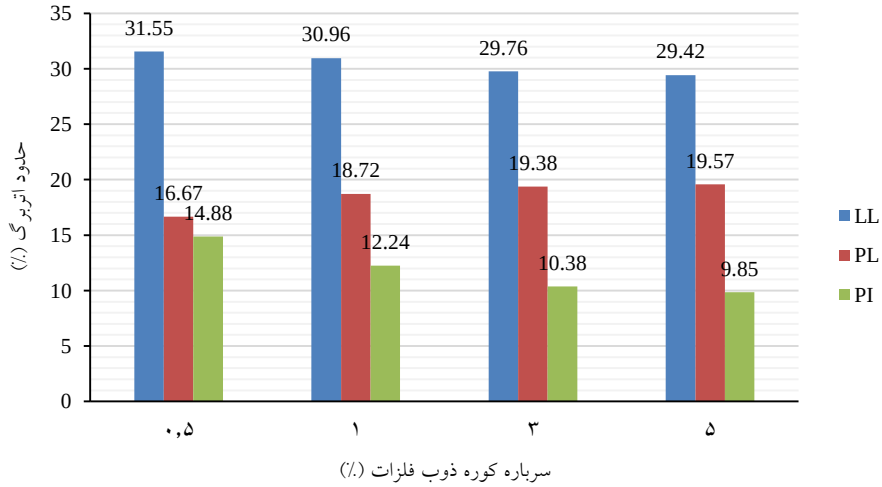
در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود که با افزودن ٪۱ آهک به خاک رس واگرا، حد روانی از ۳۲/۴۳ درصد به ۳۱/۷۳ درصد کاهش یافت. به‌عبارتی تأثیر ٪۱ آهک بر حد روانی خاک رس واگرا اندک است. از طرفی حد خمیری از ۱۳/۴۲ درصد به ۱۴/۶۶ افزایش یافته است. از این‌رو با افزودن آهک میزان نشانه خمیری خاک رس واگرا کاهش یافته و از ۱۹/۰۱ به ۱۷/۰۷ درصد رسیده است.




**شکل ۲۳. مقایسه حدود اتربرگ و نشانه خمیری خاک واگرا بدون آهک و با آهک ۱٪**

مقایسهٔ حدود اتربرگ و نشانه خمیری نمونه‌های با آهک ۱ درصد و سرباره ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد در شکل ۲۴ آمده است. مشاهده می‌شود که با افزودن میزان سرباره با ثابت بودن میزان آهک، حد روانی کاهش پیدا می‌کند به‌طوری‌که از ۳۱/۵۵ درصد برای نمونه با ۰/۵ درصد سرباره، به ۲۹/۴۲ درصد برای نمونه با ۵ درصد سرباره رسیده است. هم‌چنین حد خمیری نمونه‌ها با افزایش میزان سرباره مصرفی افزایش یافته است. میزان حد خمیری نمونه با ۰/۵ درصد سرباره معادل ۱۶/۶۷ درصد بوده است که برای نمونه با ۵ درصد سرباره به ۱۹/۵۷ درصد افزایش یافته است. با کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری، نشانه خمیری نمونه‌ها با افزایش میزان آهک مصرفی کاهش یافته است؛ به‌گونه‌ای‌که از مقدار ۱۴/۸۸ درصد برای نمونه با ۰/۵ درصد سرباره به ۹/۸۵ درصد برای نمونه با ۵ درصد سرباره رسیده است.

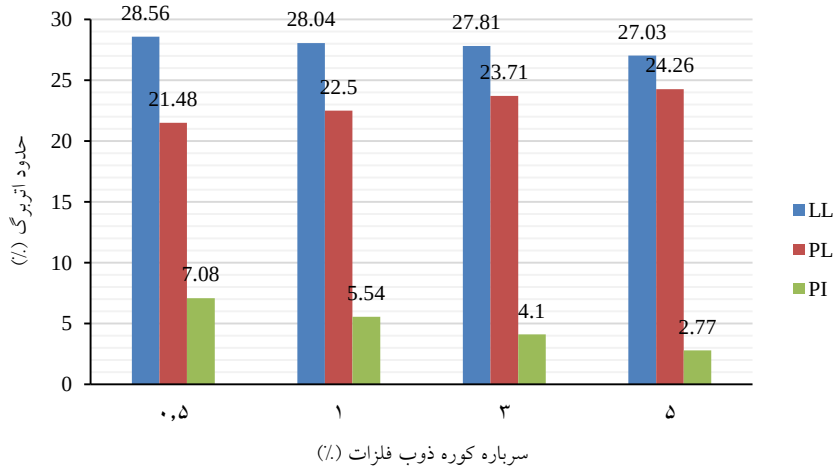
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]




**شکل ۲٤. مقایسهٔ حدود اتربرگ و نشانه خمیری نمونه‌های با آهک ۱٪ و مقادیر مختلف سرباره**

در بررسی حدود اتربرگ و نشانه خمیری نمونه‌های با آهک ۲ درصد و سرباره ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد که در شکل ۲۵ نشان داده شده است نیز روندی مشابه نتایج بالا مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که با افزودن میزان سرباره با ثابت بودن میزان آهک، حد روانی کاهش پیدا می‌کند به‌طوری‌که از ۲۸/۵٦ درصد برای نمونه با ۰/۵ درصد سرباره، به ۲۷/۰۳ درصد برای نمونه با ۵ درصد سرباره رسیده است. هم‌چنین حد خمیری نمونه‌ها با افزایش میزان سرباره مصرفی افزایش یافته است. میزان حد خمیری نمونه با ۰/۵ درصد سرباره معادل ۲۱/٤۸ درصد بوده است که برای نمونه با ۵ درصد سرباره به ۲٤/۲٦ درصد افزایش یافته است. با کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری، نشانه خمیری نمونه‌ها با افزایش میزان آهک مصرفی کاهش یافته است؛ به‌گونه‌ای‌که از مقدار ۷/۰۸ درصد برای نمونه با ۰/۵ درصد سرباره به ۲/۷۷ درصد برای نمونه با ۵ درصد سرباره رسیده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]




**شکل ۲۵. مقایسهٔ حدود اتربرگ و نشانه خمیری نمونه‌های با آهک ۲٪ و مقادیر مختلف سرباره**

در بخش‌های پیشین نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ خاک واگرا و نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف آهک و سرباره آورده شد. نتایج بیان‌گر این است که با افزایش سرباره و آهک، حد روانی و نشانه خمیری کاهش می‌یابد و موجب بهبود خصوصیات خمیری خاک می‌شود. علت کاهش پلاستیسیته خاک پس از اختلاط با آهک و سرباره، تبادل کاتیون‌ها و درشت دانه شدن بافت آن است. هم‌چنین لازم به ذکر است که افزودن آهک و سرباره به خاک باعث کم شدن تغییر شکل‌پذیری نمونه شده و نمونه تردتر می‌شود.

## نتیجه‌گیری

واکنش‌های بین خاک رس و آهک، به مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد بستگی دارد. واکنش پوزولانی که در کسب مقاومت نهایی خاک نقش مهمی دارد، زمان‌بر است و به عواملی از جمله شرایط محیطی، شرایط نگه‌داری و شرایط شیمیایی مواد بستگی دارد. در ترکیب رس و آهک، عامل کسب مقاومت تشکیل ژل کلسیم سیلیکا هیدراته است. این ژل از حل شدن یون‌های سیلیکا و آلومینای خاک رس در شرایط قلیایی ناشی از وجود آهک تشکیل می‌شود. اضافه کردن سرباره به رس و آهک باعث تأثیر در واکنش‌های ذکر شده

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

می‌شود. اضافه شدن سرباره و هیدراتاسیون آن باعث افزایش سیلیکا و آلومینای محیط شده و به تشکیل ژل‌های اشاره شده و کسب مقاومت کمک می‌کند. هم‌چنین هیدراتاسیون سرباره سبب مصرف آهک می‌شود؛ در نتیجه واکنش‌هایی بین آهک و سولفات که باعث تشکیل کانی‌های تورم‌زا می‌شود، کاهش می‌یابد [۲۵]. در پژوهش حاضر تأثیر آهک و سرباره کوره ذوب فلزات بر خاک واگرای رسی با استفاده از آزمایش‌های پین هول، مقاومت تک‌محوری، برش مستقیم و حدود اتربرگ بررسی شده است. اهم نتایج حاصل از این بررسی عبارتند از:

- افزودن آهک و سرباره باعث کاهش واگرایی خاک رس منطقه کلاله در استان گلستان شده است. به‌طوری‌که در نهایت نمونه حاوی ۲ درصد وزنی آهک و ۵ درصد وزنی سرباره غیرواگرا با نشانه $ND_2$ طبقه‌بندی شده است.
- با افزودن ٪۱ آهک به خاک رس واگرا، حد روانی از ۳۲/۴۳ درصد به ۳۱/۷۳ درصد کاهش و حد خمیری از ۱۳/۴۲ درصد به ۱٤/٦٦ افزایش خواهد یافت.
- با کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری، نشانه خمیری نمونه‌ها با افزایش میزان سرباره مصرفی با ثابت بودن میزان آهک (٪۱ وزنی) کاهش یافته‌است. به‌گونه‌ای‌که از مقدار ۱٤/۸۸ درصد برای نمونه با ۰/۵ درصد سرباره به ۹/۸۵ درصد برای نمونه با ۵ درصد سرباره رسیده‌است.
- در بررسی حدود اتربرگ و نشانه خمیری نمونه‌های با آهک ۲ درصد و سرباره ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد نیز روندی مشابه نتایج بالا مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که با افزودن میزان سرباره با ثابت بودن میزان آهک، حد روانی کاهش پیدا می‌کند به‌طوری‌که از ۲۸/۵٦ درصد برای نمونه با ۰/۵ درصد سرباره، به ۲۷/۰۳ درصد برای نمونه با ۵ درصد سرباره رسیده است.
- فعالیت خاک واگرای اولیه ۰/۳۲ بوده است که با افزایش هر یک از افزودنی‌ها این مقدار کاهش یافته و در نهایت برای نمونه با ۲ درصد آهک و ۵ درصد سرباره، مقدار فعالیت به کم‌ترین میزان خود یعنی ۰/۰۵ رسیده است.
- نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد آهک، افزایش میزان سرباره مصرفی برای تثبیت خاک واگرا، منجر به افزایش چسبندگی می‌شود. به‌طوری‌که میزان چسبندگی برای نمونه تثبیت شده با ٪۱ آهک و ۵ درصد سرباره نسبت به حالت بدون سرباره در حدود ۱۰۰ درصد افزایش یافته است. به طور مشابه میزان چسبندگی برای نمونه تثبیت شده با ٪۲ آهک

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

و ۵ درصد سربارهٔ نسبت به حالت ٪۱ درصد آهک و بدون سربارهٔ در حدود ۲۱۸ درصد افزایش یافت.

- در مورد نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد آهک، افزایش میزان سربارهٔ مصرفی برای تثبیت خاک واگرا، منجر به افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی شده است. به‌طوری‌که زاویهٔ اصطکاک داخلی برای نمونهٔ تثبیت شده با ٪۱ آهک و ۵ درصد سربارهٔ نسبت به حالت بدون سربارهٔ ۵۳/۲ درصد افزایش یافته است. به‌طور مشابه برای نمونهٔ تثبیت شده با ٪۲ آهک و ۵ درصد سربارهٔ نسبت به حالت ٪۱ درصد آهک و بدون سربارهٔ ۶۸/۷ درصد افزایش یافت.
- در بررسی نتایج مشاهده شد که در مورد نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد آهک، افزایش میزان سربارهٔ مصرفی برای تثبیت خاک واگرا، منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری شده‌است. به‌طوری‌که میزان مقاومت تک‌محوری برای نمونهٔ تثبیت شده با ٪۱ آهک و ۵ درصد سربارهٔ نسبت به حالت بدون سربارهٔ ۲۲/۳ درصد افزایش یافته است. به‌طور مشابه برای نمونهٔ تثبیت شده با ٪۲ آهک و ۵ درصد سربارهٔ نسبت به حالت ٪۱ آهک و بدون سربارهٔ، مقاومت تک‌محوری ۲۸/۵ درصد افزایش یافته است.
- هم‌چنین ملاحظه شد که در مورد نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد آهک، افزایش میزان سربارهٔ مصرفی برای تثبیت خاک واگرا، منجر به کاهش کرنش محوری شده است. به‌طوری که میزان کرنش محوری برای نمونهٔ با سربارهٔ ۵ درصد نسبت به نمونهٔ بدون سربارهٔ و برای ۱ درصد آهک ۱۲/۸ درصد کاهش یافت. به‌طور مشابه میزان کرنش محوری برای نمونهٔ با آهک ٪۲ و سربارهٔ ۵ درصد نسبت به نمونهٔ بدون سربارهٔ و ٪۱ آهک ۵۰/۸ درصد کاهش یافته است.
- تأثیر اضافه کردن سربارهٔ بر مقاومت نمونه‌های ۱ روزه نشان می‌دهد که افزودن سربارهٔ در تمامی نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌های فاقد سربارهٔ شده است. از آن‌جا که هیدراتاسیون سربارهٔ واکنشی سریع تر از واکنش پوزولانی خاک و آهک است، در زمان ۱ روز واکنش پوزولانی به‌دلیل نبود زمان کافی، کامل نشده و تأثیر آهک در کسب مقاومت نمونه‌های فاقد سربارهٔ کم است. در مقابل در نمونه‌های حاوی سربارهٔ و آهک از آن‌جا که آهک هیدراتاسیون سربارهٔ را تسریع می‌بخشد، مقاومت بیش‌تری مشاهده می‌شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

- بنابر نتایج ارائه شده می‌توان گفت افزودن سرباره ذوب آهن به خاک رس تثبیت شده با آهک، می‌تواند باعث کاهش اثرات نامطلوب سولفات موجود شده و مقاومت نمونه را افزایش دهد. هیدراتاسیون سرباره و واکنش پوزولانی خاک و آهک، امری لازم و ضروری است؛ زیرا در غیر این‌صورت و فعال نشدن سرباره، وجود سرباره می‌تواند نتیجه عکس داشته باشد و سبب کاهش مقاومت شود. هم‌چنین در صورت استفاده از سرباره و وجود رطوبت کافی برای تکمیل این واکنش‌ها، وجود سولفات نه تنها مضر نیست؛ بلکه به کسب مقاومت کمک می‌کند. از این‌رو توجه به رطوبت در هنگام تراکم مواد امری ضروری است.

## منابع


1. Ouhadi V. R., Goodarzi R. V., "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum", Engineering Geology, Vol. 85 (2005) 91-101.
2. Mitchell J. K., Soga K., "Fundamentals of soil behaviour", John Wiley & Sons, New Jersey (2005).
3. Yong R. N., Sethi A. J., Ludwig H. P., Jorgensen M. A., "Physical chemistry of dispersive clay particle interaction", American Society of Civil Engineers, Chicago (1978) 1-21.
4. Knodel P. C., "Characteristica and problems of dispersive clay soils", U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver Office, (1991) R-91-09.
5. Goodarzi A. R., Salimi M., "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag", Applied Clay Science, 108 (2015) 61-69.
6. Ashango A. A., Ranjan Patra N., "Behavior of Expansive Soil Treated with Steel Slag, Rice Husk Ash, and Lime", Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 28 Issue 7-July (2016).
7. Koo J., "Polymer nanocomposites", United States, McGraw Hill (2006).


[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

8. Steyn W., "Research and application of nanotechnology in transportation", 27th annual Southern Africa Transport Conference, South Africa, (2008).

9. Shen J., Huang B., Shu X.S., Tang B., "Size effect of sub nano- scaled hydrated lime on selected properties of HMA", International Journal of Pavement Research and Technology, 4 (2011) 252-257.

10. Rajesh T., Suresh K., "Unconfined Compressive Strength of Dispersive Soil Treated With Lime and POFA", CMR Journal of Engineering and Technology Vol.1 Issue.1 (2016).

۱۱. حداد ع.، جاودانیان ح.، ابراهیم‌پور ف.، "شناسایی و تثبیت خاک‌های واگرا: مطالعه موردی کانال انتقال آب سیمین دشت- گرمسار"، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، جلد یازدهم، شماره ۱، بهار (۱۳۹۶).

12. Thompson M. R., "Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures", Highway Research Record, Washington, D.C., 139 (1995) 1-14.

13. Yıldız M., Vitae A. S., "Effect of freezing and thawing on strength and permeability of limestabilized clays". Scientia Iranica, 19, 4 (2012) 1013-1017.

14. Obuzor G. N., Kinuthia J. M., Robinson R. B., "Soil stabilization with lime-activated-GGBS, A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains", Engineering Geology, 151 (2012) 112-119.

15. Nalbantoglu Z., Tuncer E. R., "Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay", Canadian Geotechnical Journal 38 (2001) 154-160.

16. Khattab S. A. A., "Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux", Ph.D thesis, University of Orléans, France (2002).

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]

17. Mallela J., Quintus H. V., Smith K., "Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design", The National Lime Association (2004).

18. Al-Rawas A. A., Hago A. W., Al-Sarmi H., "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", Building and Environment, 40 (5) (2005) 681-687.

۱۹. طاهرخانی ح.، جوانمرد م.، "مقایسهٔ تأثیر سیمان، آهک و نانوپلیمر CBR PLUS در کاهش تورم خاک‌های رسی بستر روسازی‌ها" نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، جلد نهم، شمارهٔ ٤، زمستان (۱۳۹٤).

20. Alper S., Gozde I., Recep Y. H., Kambiz R., "Utilisation of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay", Building and Environment, 42 (2) (2006) 150-155.

21. Al-Mukhtar M, Lasledj A., Alcover J., "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C", Applied Clay Science, 50 (2010) 191-198.

22. Little D. N., "Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime", Kendall/Haunting publishing company (1995).

23. William A., Wild S., Richard J. D.,"Mechanisms by which Ground Granulated Blast Furnace Slag Prevents Sulphate Attack of Lime-Stabilised Kaolinite", Cement and Concrete Research, 29 (55) (1999) 975-982.

24. Yazici V., "Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) GBFS-lime combinations and GBFS cement", Middle East Technical University (2004).

25. Wild S., Kinuthia J. M., Jones G. I., Higgins D. D., "Effects of Partial Substitution of Lime with Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Strength Properties of LimeStabilised Sulphate-Bearing Clay Soils", Engineering Geology, 51 (55) (1998) 37-53.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.2.2 ]