# اصلاح و به‌سازی خاک‌های رمبنده

محمدعلی معروف، جعفر بلوری بزاز*؛
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه عمران

## چکیده

**تاریخ: دریافت** ۹۱/۷/۲ **پذیرش** ۹۲/٦/١٦

خاک‌های رمبنده معمولاً ساختار باز دارند و پیوند بین ذرات ضعیف است. این خاک‌ها به‌صورت سست رفتار کرده و در صورت اشباع شدن بدون تغییر در بار وارده و یا قرار گرفتن تحت نیروی ارتعاشی نشست زیادی کرده و ظرفیت باربری آن به‌شدت کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر مقابله با خاک‌های رمبندهٔ محدوده شمال شرق مشهد بررسی شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایش‌گاه و آزمایش‌ها در محل نشان می‌دهد که خاک شدیداً به افزایش رطوبت حساس است و در صورت اشباع شدن، نشست اضافی چشم‌گیری را در مدت زمان کوتاه ایجاد می‌کند. بنا بر این این خاک دارای پتانسیل رمبندگی است. با توجه به احداث سازه‌های ریلی و احداث ساختمان در محل پروژه در اثر ارتعاش ناشی از عبور قطار و یا مرطوب شدن خاک، نشست زیاد خاک می‌تواند برای سازه‌های ریلی و ساختمان‌های موجود مشکل ایجاد کند و بنا بر این باید خاک محل اصلاح و به‌سازی شود. به‌منظورمقابله با خاک‌های رمبنده محل پروژه و به‌سازی آن، روش‌های گوناگون از جمله جلوگیری از مرطوب شدن خاک، تراکم خاک، جای‌گزینی مصالح، استفاده از پی‌های عمیق، تثبیت با مصالح درشت دانه، تثبیت با آهک، تثبیت با سیمان و تثبیت با سیمان و مصالح دانه‌ای ارزیابی شده و بهترین روش با توجه به مشخصات سایت، ویژگی‌های سازه‌های احداثی و ملاحظات اجرایی و اقتصادی انتخاب شده است. با توجه به قرارگیری سازه‌های احداثی در محدودهٔ شهری، خاک ریزدانهٔ محل، ملاحظات اقتصادی، مدت زمان اجرا و امکانات موجود به‌سازی خاک با آهک به‌عنوان بهترین روش پیشنهاد شده است. افزودن آهک به خاک علاوه بر بهبود خواص مقاومتی خاک در کوتاه‌مدت و بلندمدت، سبب کاهش تورم و کاهش نفوذپذیری می‌شود. این خواص عمل‌کردی آهک، آن‌را در کوتاه‌مدت و بلندمدت از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر می‌کند.

**واژه‌های کلیدی**: خاک‌های رمبنده، ساختمان‌ها و سازه‌های ریلی، مقابله با رمبندگی، به‌سازی خاک، تثبیت با آهک.

* **نویسندهٔ مسئول** bolouri@ferdowsi.um.ac.ir

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

## مقدمه

خاک‌های رمبنده معمولاً ساختار باز دارند و پیوند بین ذرات آن ضعیف است. نهشته‌های سیلتی در مناطق با شرایط آب و هوایی خشک مستعد کاهش حجم چشم‌گیر یا رمبندگی در هنگام اشباع شدن هستند. نشست خاک‌های رمبنده در اثر اشباع شدن به کاهش ظرفیت باربری خاک‌های بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک منجر می‌شود. این خاک‌ها در بسیاری از نقاط ایران از جمله شمال‌شرق آن پراکنده شده‌اند [۱].

در صورت افزایش رطوبت این خاک‌ها ساختار آن فروریخته و علاوه بر کاهش ظرفیت باربری متحمل نشست زیادی می‌شوند. نشست زیاد و کاهش ظرفیت باربری می‌تواند علاوه بر سازه‌ها برای پی سدها نیز ایجاد مشکل کند [۲]. برای پیش‌بینی نشست ناشی از رمبندگی باید چندین عامل مانند دست‌خوردگی نمونه، میزان رطوبت اولیه، وسعت و عمق مرطوب شدن، میزان پتانسیل رمبندگی خاک بستر، حساسیت سازه به نشست و نشست‌های نسبی و تغییرات شرایط بارگذاری را مد نظر قرار داد [٤]. کاهش خطرات ناشی از رمبندگی در زمان ساخت همیشه ارزان‌تر از تعمیرات آینده است و باید به مقابله با این پدیده پرداخت. امکان اصلاح خاک برای پروژه‌ای به شرایط سایت، مشخصات سازه، ملاحظات اجرایی، ملاحظات اقتصادی و میزان ریسک‌پذیری وابسته است [۵].

روش‌های مقابله با خاک‌های رمبنده به سه گروه مشخصات سایت و ملاحظات سازه‌ای، دوری گزیدن از خاک‌های رمبنده و اصلاح خاک‌های رمبنده تقسیم می‌شوند. ممکن برای یک پروژه هم‌زمان از ترکیبی از چند روش استفاده شود. خلاصه‌ای از این روش‌ها بدین‌شرح است:

در صورتی‌که پروژه در نزدیکی معادن قرضه قرار گرفته است می‌توان با جای‌گزینی مصالح و یا اختلاط مصالح با خاک محل، خاک را تثبیت کرد با این حال اگر سازه در محدودهٔ مسکونی احداث می‌شود باید از روش‌های مخرب مانند تراکم دینامیکی اجتناب کرد.

بار اعمالی سازه باید با دال‌های سخت، پی‌های گسترده و یا پی نواری با آرماتوربندی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

حجیم تحمل شود تا از نشست‌های نامتقارن جلوگیری کند. در صورتی‌که بار وارده به خاک بستر زیاد باشد می‌توان به‌منظور کاهش سربار از ستون‌های سنگی و یا خاک‌ریزهای عمیق در زیر پی استفاده کرد.

زه‌کشی آب و جلوگیری از مرطوب شدن خاک‌های رمبنده از بهترین روش‌های مقابله با این پدیده است. جلوگیری از نفوذ آب و زه‌کشی نه تنها برای سازه‌های جدید مهم است بلکه برای نگه‌داری سازه‌های موجود که بدون دانشی در مورد خاک‌های رمبنده طراحی شده‌اند نیز مؤثر است. ساده‌ترین روش مقابله با خاک‌های رمبنده دوری گزیدن از خاک‌های رمبنده است. خاک‌برداری جزیی لایهٔ رمبنده و جای‌گزینی آن با مصالح دانه‌ای متراکم و انتقال بار به لایه‌های مقاوم زیرین با استفاده از پایه‌های عمیق و یا شمع، ستون‌های سنگی [٦]، اختلاط عمیق و ستون‌های سنگی همراه با میل مهار از جملهٔ این روش‌ها است.

اصلاح خاک‌های رمبنده شامل تراکم خاک، تثبیت مکانیکی، تثبیت با محلول‌های شیمیایی و تثبیت با مواد پایدار کننده است. با متراکم کردن خاک یا خاک‌برداری و تراکم مجدد آن در چندین لایه می‌توان خاک را اصلاح کرد. تراکم دینامیکی [۷] و تراکم دینامیکی سریع [۸] از روش‌های دیگر متراکم کردن خاک‌های رمبنده هستند.

تثبیت مکانیکی خاک با افزودن و ترکیب ماده دیگری به خاک (که فقط روی خواص فیزیکی خاک تأثیر دارد) حاصل می‌شود. هدف اصلی در این روش، اصلاح دانه‌بندی خاک است. با استفاده از مواد پایدار کننده و افزودن یک یا چند ماده به خاک خواص شیمیایی و فیزیکی آن تغییر می‌یابد. علاوه بر تثبیت با محلول‌های شیمیایی، تثبیت با سیمان، تثبیت با آهک و تثبیت با آهک و خاکستر بادی از جمله مواد استفاده شده در به‌سازی خاکند.

محققان زیادی در مورد تثبیت خاک‌های رمبنده با آهک، آهک و خاکستر بادی، سیمان، آهک و میکروسیلیس را بررسی کرده‌اند [۹]، [۱۰]، [۱۱]. خاک تثبیت شده با سیمان دارای پلاستیسیتهٔ کم‌تر، تغییرات حجمی کم‌تر و مقاومت بیش‌تر از خاک‌های اصلاح نشده است [۱۲]. هم‌چنین افزودن آهک به خاک، باعث کاهش خواص خمیری و پتانسیل تورم، افزایش مقاومت، بهبود کارایی و بالا بردن دوام می‌شود [۱۳]. افزودن آهک به مصالح دانه‌ای نیز باعث

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

افزایش مقاومت و سختی می‌گردد. از آن‌جا که اثرات سودمند تثبیت خاک، نتیجه واکنش‌های مختلف بین بخش ریزدانه خاک و آهک است، خاک‌های ریزدانه مانند خاک رس و رس لای‌دار، پاسخ بسیار بهتری به این واکنش‌ها می‌دهند. حداقل مقدار خاک رس موجود در مخلوط برای انجام واکنش با آهک ۱۰ درصد است. هم‌چنین افزودن آهک به‌همراه خاکستر بادی می‌تواند خواص ژئوتکنیکی خاک‌های رمبنده را بهبود بخشد [۱٤]. برای ماسه‌ها و خاک‌های بدون چسبندگی افزودن یک ماده پوزولانی برای تولید واکنش سیلیکا- آهک لازم است. خاکستر بادی، خاکستر آتشفشانی و شیل‌های ریزدانه منبسط شونده، نمونه‌هایی از مواد پوزلانی مناسب هستند.

علاوه بر روش‌هایی که شرح داده شد، استفاده از انرژی انفجار، آب اندازی، تسلیح و مقاوم‌سازی خاک با استفاده از ژئوسنستیک‌ها، ورقه‌های فلزی و میل‌گرد، تزریق، افزودنی‌های شیمیایی (نظیر سیلیکات سدیم و کلرید کلسیم) و مقاوم‌سازی شیمیایی خاک‌های آبرفتی با محلول رس سیلیکات از جمله روش‌های دیگر در تثبیت خاک‌های رمبنده هستند.

در پژوهش حاضر ابتدا روش‌های مقابله با خاک‌های رمبنده بیان شده و سپس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های رمبنده محل و روش‌های متفاوت مقابله با این خاک‌ها بحث شده است.

## مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک محل

خاک بررسی شده از نوع خاک‌های ریزدانه سیلتی (ML)، رسی سیلتی (CL-ML) و رس با پلاستیسیتهٔ پایین (CL) است و وزن مخصوص خشک حدود $g/cm^3$ ۱/۵ دارد. حد روانی آن‌ها بین ۲۰ تا ۳۱ درصد و حد خمیری آن بین ۳ تا ۱۰ درصد متغیر است. درصد ذرات رسی خاک بین ۱۰ تا ۳۵ درصد و درصد ذرات کوچک‌تر از mm ۰/۰۷۵ (رد شده از الک نمره ۲۰۰) به‌طور میانگین حدود ۸۵ درصد است. شکل ۱ محدودهٔ بررسی شده و محل گمانه‌ها را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه و هم‌چنین نتایج آزمایش‌های بارگذاری در محل نشان می‌دهد که خاک به افزایش رطوبت حساس است و در صورت اشباع شدن،

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

نشست اضافی چشم‌گیری را در مدت زمان کوتاه ایجاد می‌کند، بنا بر این می‌توان گفت این خاک دارای پتانسیل رمبندگی است. پتانسیل رمبندگی با استفاده از معیار دنسیو[۱]، آیین‌نامهٔ ساختمانی روسیه، هولتز و هیلف و معیار ASTM بررسی شده است [۱]. در معیار ASTM آزمایش تحکیم بر اساس پیشنهاد ASTM D۵۳۳۳ انجام می‌گیرد. در این روش پس از آماده‌سازی نمونهٔ مشابه آزمایش تحکیم، (ASTM D۲٤۳۵)، تنش قائم تا ۲۰۰ کیلو پاسکال به‌صورت پله‌ای به نمونه اعمال می‌شود، سپس نمونه با آب مقطر غرقاب شده و یک روز به‌همان حالت گذاشته می‌شود. سپس آزمایش تا رسیدن به بارگذاری حداکثر ادامه یافته و طی انجام آزمایش تغییر شکل‌ها در هر مرحله ثبت می‌گردد. شاخص فرو ریزشی، $I_e$ با این رابطه تعریف می‌شود:

$$I_e = \frac{\Delta e \times ۱۰۰}{۱ + e_0} \qquad (۱)$$

که در آن $\Delta e$ تغییر در نسبت تخلخل نمونه در اثر اشباع شدن و $e_.$ نسبت تخلخل نمونه قبل از غرقاب کردن است. بر اساس این آیین‌نامه جدول ۱ شاخصی از شدت رمبندگی را ارائه می‌دهد.

پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک و پتانسیل رمبندگی در محل پروژه (از عمق ۰ تا ۱۵ متر) در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۱. شدت رمبندگی بر اساس آیین‌نامهٔ ASTM**

| شدت رمبندگی | شاخص رمبندگی($I_e$) % | شدت رمبندگی | شاخص رمبندگی($I_e$) % |
|---|---|---|---|
| غیر رمبنده | ۰ | ۱۰- ٦/۱ | زیاد |
| اندک | ۲- ۰/۱ | >۱۰ | شدید |
| متوسط | ٦- ۲/۱ | | |

**جدول ۲. پارامترهای ژئوتکنیکی و پتانسیل رمبندگی لایه‌های خاک در محدودهٔ پروژه**

| معیارASTM Ie(%) | آیین نامه روسیه (L) | معیار دنیسو (K) | e. -- | $C_S$ -- | $C_C$ -- | E kg/cm$^۲$ | $\varphi_u$ Deg | $C_u$ kg/cm$^۲$ | w % | $\gamma_d$ kN/m$^۳$ | عمق m | طبقه‌بندی خاک (USCS) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ تا ۸ | ۰/۱۲۵- تا ۰/۰٥٤ | ۱/۳۲ تا ۰/۷۵- | ۰/۸۱ | ۰/۰۱۷ | ۰/۱٤ | ۳۰۰ | ۰ | ۰/۲ | ۱۷ | ۱٥ | ۰-٥ | CL-ML |

۱. Densiov

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]




**شکل ۱. محدودهٔ بررسی شده و محل گمانه‌های حفر شده**

با محاسبه پارامترها و معیارهای رمبندگی مشخص می‌شود که خاک ریزدانه موجود در محل پروژه مستعد رمبندگی است و می‌تواند در صورت افزایش رطوبت واشباع شدن، مشکلاتی را برای خطوط ریلی و سازه‌های احداثی در محل ایجاد کند [۱]. بنا بر این باید به بهسازی و تثبیت خاک به‌عنوان یکی از روش‌های مقابله با این مشکل توجه شود.

## مقابله با پدیدهٔ رمبندگی و تثبیت خاک محل

پروژهٔ بررسی شده مشتمل بر سازه‌های سبک نظیر سوله‌های انبار و ساختمان‌های یک طبقه، ریل و ایستگاه‌های قطار است، بنا بر این با توجه به حجم زیاد پروژه و بار کم وارد بر خاک بستر استفاده از شمع مقرون به‌صرفه نیست. اگر چه منابع قرضه در ۱۰ کیلومتری محل پروژه قراردارند با این حال خاک‌برداری و جای‌گزینی آن با مصالح دانه‌ای با توجه به حجم زیاد خاک‌برداری و خاک‌ریزی پروژه اقتصادی نیست، ولی می‌توان از مصالح دانه‌ای در اساس و زیر اساس ریل راه آهن استفاده کرد.

استفاده از پی‌های نواری با سختی زیاد برای ساختمان‌های موجود پیشنهاد شده اما با توجه به ظرفیت باربری اندک خاک که در حدود $۰/٦\ kg/cm^{۲}$ است، علاوه بر این‌که سطح مقطع پی زیاد می‌شود، خطر نشست ناشی از رمبندگی و تحکیم نیز از بین نمی‌رود بنا بر این باید

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

استفاده از پی‌های نواری، به‌همراه اصلاح خاک زیر پی در دستور کار قرار گیرد. هم‌چنین باید از نفوذ آب به لایه‌های خاک مستعد رمبندگی جلوگیری شود.

برای شناسایی روش مناسب مقابله با رمبندگی و اصلاح خاک محل با توجه به ملاحظات اقتصادی، امکانات موجود و احداث پروژه در محدودهٔ شهری به‌روش‌های اصلاح خاک بیش‌تر توجه شد. به این منظور آزمایش‌های متعددی انجام گرفته است که شرح آن در جدول ۳ آمده است.

**جدول ۳. طرح آزمایش‌های مقابله با رمبندگی و اصلاح خاک محل**

| روش اصلاح خاک | آزمایش | تعداد آزمایش | استاندارد | روش‌اصلاح خاک | آزمایش | تعداد آزمایش | استاندارد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تراکم | تراکم | ۲ | ASTM D۶۹۸ | تثبیت با سیمان و مصالح دانه‌ای | تراکم | ۱ | ASTM D۶۹۸ |
| | نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)# | ۱۱ | ASTM D۱۸۸۳ | | نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)# | ٤ | ASTM D۱۸۸۳ |
| | تحکیم | ۱ | ASTM D۵۳۳۳ | تثبیت با آهک | تک محوری(UCS)# | ۱۱ | ASTM D۵۱۰۲ |
| تثبیت با افزودن مصالح دانه‌ای | دانه‌بندی | ۲ | ASTM C۱۳۶ | | نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)# | ۱۳ | ASTM D۱۸۸۳ |
| | تراکم | ۲ | ASTM D۶۹۸ | | حدود آتربرک | ۳ | AASHTO T۸۹ |
| | نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)# | ۸ | ASTM D۱۸۸۳ | | نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)* | ٤ | ASTM D۱۸۸۳ |
| تثبیت با سیمان | تراکم | ۱ | ASTM D۶۹۸ | | تک‌محوری(UCS)* | ۱۰ | ASTM D۵۱۰۲ |
| | نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)# | ٤ | ASTM D۱۸۸۳ | | سه‌محوری (CU) | ۳ | ASTM D٤۷۶۷ |
| | تحکیم | ۱ | ASTM D۵۳۳۳ | | تحکیم | ۲ | ASTM D۵۳۳۳ |

*) آزمایش‌های انجام شده با رطوبت بهینه. #) آزمایش‌های انجام شده با رطوبت اشباع

در ادامه روش‌های گوناگون اصلاح و به‌سازی خاک محل شامل روش‌های تراکم خاک، جای‌گزینی مصالح، تثبیت با مصالح درشت‌دانه، تثبیت با سیمان، تثبیت با سیمان و مصالح دانه‌ای و تثبیت با آهک ارزیابی شده و روش مناسب اصلاح خاک پیشنهاد می‌شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

**تراکم**

با متراکم کردن خاک یا خاک‌برداری و تراکم مجدد آن در چندین لایه می‌توان خاک را اصلاح کرد. در این روش باید توجه کرد که مشخصات خاک به حد مطلوب برسد. در صورتی که عمق لایهٔ رمبنده کم‌تر از ۲ متر باشد می‌توان با آب‌اندازی این عمق را مرطوب کرده و سپس با غلتک متراکم کرد.

براساس اطلاعات حاصل از این بررسی‌ها، وزن مخصوص خاک ریزدانه در محل پروژه حدود ۱/٤۷ تا ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. حداکثر وزن مخصوص این خاک در آزمایشگاه که با تراکم اصلاح شده به‌دست آمده و معادل با ۱/۹٦ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. آزمایش سی بی آر در محل نشان می‌دهد که عدد سی‌بی‌آر اشباع خاک محل در حدود ۵ درصد است. با توجه به شرایط مذکور،لازم است نسبت به متراکم کردن خاک طبیعی اقدام شود اما نتایج آزمایش تک‌محوری مقدار مقاومت تک‌محوری خاک متراکم شده با تراکم ۹٦ درصد را ۰/۹ $kg/cm^2$ نشان می‌دهد، هم‌چنین آزمایش‌های سی‌بی‌آر انجام شده در حالت اشباع برای خاک‌های مربوط به نقاط مختلف محل پروژه (شکل ۲) نشان می‌دهد که اگر بتوان خاک موجود را تا میزان ۹۵ درصد متراکم کرد مقدار سی‌بی‌آر اشباع چندان افزایش نخواهد یافت و به حدود ۷ درصد خواهد رسید که چندان رضایت بخش و مطلوب نیست (اجرای عملیات تراکم تا ۹۵ درصد کوبیدگی برای خاک ریزدانه بسیار مشکل است و تحقق آن در شرایط کارگاهی مشکل است). با توجه به توضیحات فوق باید به روش‌های دیگر برای افزایش مشخصات فنی خاک توجه شود.

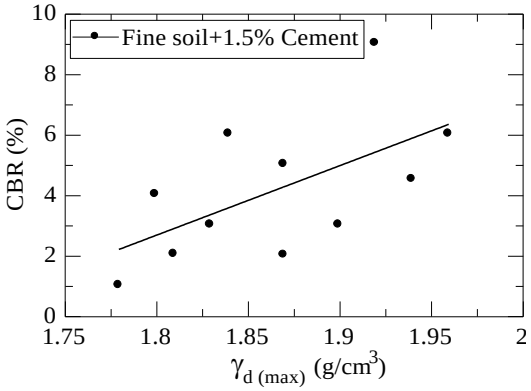
**تثبیت مکانیکی**

در تثبیت مکانیکی خاک با افزودن و ترکیب مادهٔ دیگر(که فقط روی خواص فیزیکی خاک تأثیر دارد)، دانه‌بندی خاک اصلاح می‌شود. با افزایش مقدار رس در خاک مقدار رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. در نتیجه مقدار وزن مخصوص خشک خاک نیز کاهش می‌یابد. به‌بیان دیگر، مصالح شنی و یا ماسه‌ای با وزن مخصوص خشک بیش‌تری متراکم می‌شوند. در دانه‌بندی نیز هرچه دانه‌بندی مصالح یک‌نواخت‌تر باشد، اثر تراکم کم‌تر است. در مصالح با دانه‌بندی خوب،

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

تقریباً همهٔ هوا با تراکم خارج می‌شود در صورتی‌که در مصالح با دانه‌بندی یک‌نواخت و ضعیف، این امر ممکن نیست. بنا بر این با اضافه کردن مواد دیگری (برای پر کردن فضای خالی بین دانه‌ها) می‌توان خاک را تثبیت کرد. هم‌چنین پایداری خاک‌های چسبنده با مقاومت کم را می‌توان با اضافه کردن مصالح درشت‌دانه افزایش داد. برای دانه‌بندی خاک، در حالت ایده‌ال روابط مختلفی ارائه شده است. رابطهٔ فولر از جمله آن روابط است [۵].




**شکل ۲. مقادیر CBR اشباع خاک محل در تراکم‌های مختلف**

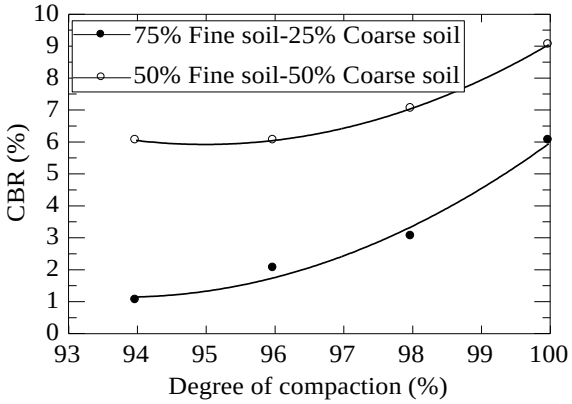
به‌منظور ارزیابی تأثیر افزایش مصالح درشت‌دانه به مصالح محلی دو حالت متفاوت اختلاط (۲۵ و ۵۰ درصد وزنی) در نظر گرفته شده و سی‌بی‌آر خاک تقویت شده با مصالح درشت‌دانه در تراکم‌های متفاوت اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است.

نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در صورت افزودن مصالح درشت‌دانه به‌میزان ۵۰ درصد و متراکم کردن این مصالح تا میزان ۹۸ درصد کوبیدگی تغییر چشم‌گیری در مشخصات فنی خاک ایجاد نخواهد کرد. بنا بر این، روش مذکور نیز توصیه نمی‌شود (افزودن مصالح درشت‌دانه به‌میزان بیش از ۵۰ درصد از نظر اجرایی و اقتصادی قابل توجیه نیست از این رو بررسی نشده است).

## به‌سازی و تثبیت خاک با سیمان

عملیات آزمایشگاهی و کارگاهی نشان می‌دهد که افزودن سیمان با چسباندن دانه‌های خاک به یک‌دیگر به شکل توده‌های کوچک کنگلومرا (جوش سنگ) دانه‌بندی جدید خاک را تشکیل می‌دهد [۱۲]. در خاک‌های رسی یا خاک‌هایی که قسمتی از آن‌ها را ذرات رسی تشکیل

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]




**شکل ۳. مقادیر CBR اشباع در حالات مختلف تثبیت خاک با افزودن مصالح درشت‌دانه**

می‌دهد بهبود خواص با پدیدهٔ تبادل یونی صورت می‌گیرد، بر اساس این نتایج خاک تثبیت شده با سیمان، پلاستیسیتهٔ کم‌تر، تغییرات حجمی کم‌تر و مقاومت بیش‌تر از خاک‌های اصلاح نشده دارند [۱۲]. در صورت وجود رس در خاک ریزدانه ممکن است که استفاده از سیمان برای تثبیت خاک در شرایط کارگاهی، به‌علت عدم اختلاط مناسب سیمان با خاک به‌دلیل کم بودن درصد سیمان، نتایج مطلوب آزمایشگاهی را فراهم نیاورد. شکل ٤ مقادیر CBR اشباع درصد تراکم مختلف را نشان می‌دهد. افزودن سیمان به خاک خواص آن را کمی بهبود بخشیده با این حال ممکن است که استفاده از سیمان برای تثبیت خاک در شرایط کارگاهی مشکل ایجاد کند.

## به‌سازی و تثبیت خاک با افزودن مصالح درشت‌دانه و سیمان

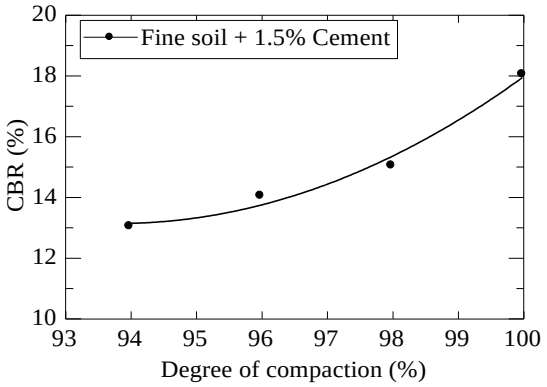
براساس آزمایش‌های مذکور، افزودن مصالح درشت‌دانه و سیمان به‌تنهایی ناکارآمد تشخیص داده شد از این رو، به تأثیر افزایش هم‌زمان مصالح درشت‌دانه و سیمان به مصالح محلی نیز توجه شد، بدین‌منظور حالت اختلاط ۲۵ درصد مصالح درشت‌دانه با مصالح محلی همراه با افزودن ۱ درصد سیمان در نظر گرفته شد و CBR آن در تراکم‌های متفاوت اندازه‌گیری شد، که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.

نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با طرح اختلاط مذکور و متراکم کردن این مصالح، شرایط مطلوبی برای خاک تثبیت شده به‌وجود می‌آید از این رو، به این شیوهٔ کار به‌عنوان یکی

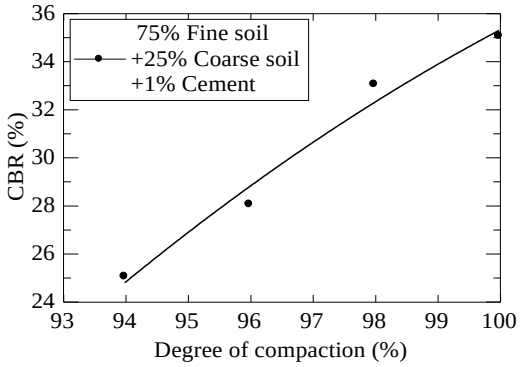
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

از روش‌های به‌سازی خاک توجه می‌شود. به‌علت وجود رس در خاک ریزدانه محل، استفاده از سیمان برای تثبیت خاک در شرایط کارگاهی ممکن است نتایج آزمایشگاهی را فراهم نیاورد و اجرای آن مشکل باشد، بنا بر این تثبیت خاک با آهک نیز بررسی شده است.




**شکل ٤. مقادیر CBR اشباع در درصد تراکم مختلف خاک تثبیت شده با سیمان**




**شکل ٥. مقادیر CBR اشباع در حالات مختلف تثبیت خاک با افزودن مصالح درشت‌دانه و سیمان**

## تثبیت با آهک

افزودن آهک به خاک، باعث کاهش خواص خمیری و پتانسیل تورم، افزایش مقاومت، بهبود کارایی و زیاد کردن دوام می‌شود. افزودن آهک به مصالح دانه‌ای نیز باعث افزایش مقاومت و سختی می‌گردد [١٦].

اثرات تثبیت با آهک بر خواص خاک را می‌توان به دو بخش آنی و دراز مدت تقسیم کرد. در اثر افزایش آهک به خاک و انجام واکنش‌های آنی، خاک سریعاً تغییر حالت داده و نشانه

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

خمیری (PI) آن کاهش و درصد رطوبت بهینه آن افزایش می‌یابد [١٦]. کاهش خصوصیات خمیری خاک موجب می‌شود که کار کردن با خاک اصلاح شده آسان‌تر شده و جابه‌جا کردن آن در کارگاه ساده‌تر انجام شود.

بر اساس ارزیابی تأثیر درصدهای مختلف آهک در مشخصات فنی مورد نظر خاک تثبیت شده با آهک، مقدار درصد مناسب آهک تعیین می‌شود. روش‌های کلی تعیین درصد آهک مناسب به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل روش‌هایی است که هدف از تثبیت خاک کاهش رطوبت خاک، کاهش خواص خمیری، کاهش تورم و یا افزایش مقاومت آنی است. روش‌های pH، دامنهٔ خمیری (PI) و روش آشتو از جملهٔ این روش‌ها هستند [۳].

گروه دوم شامل روش‌هایی است که هدف اصلی تثبیت خاک افزایش مقاومت و دوام مصالح است، روش مقاومت فشاری و روش نسبت باربری کالیفرنیا از جملهٔ این روش‌ها هستند. در این روش‌ها برای تعیین درصد آهک مناسب برای افزایش مقاومت، از نتایج آزمایش فشاری تک‌محوری و یا نسبت باربری کالیفرنیا بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک، استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها با درصدهای مختلف آهک تکرار شده و سپس منحنی تغییرات مقاومت فشاری یا CBR بر حسب درصد آهک رسم می‌شود. درصد آهک مناسب، درصد آهکی است که مقدار مقاومت فشاری یا CBR مصالح تثبیت شده را به حد مورد نظر افزایش داده و یا با افزودن بیش‌تر آهک مقاومت خاک افزایش نیابد. مقادیر حداقل مقاومت دل‌خواه به شرایط مختلفی از جمله خاک تثبیت شده، ضخامت آن، شرایط اشباع و تعداد سیکل‌های یخ زدن و آب شدن در اولین فصل یخ‌بندان بستگی دارد [١٦].

چنان‌که قبلاً آورده شد، خاک موجود در محل پروژه به‌طور کلی از نوع ریزدانه است و عموماً در گروه‌های CL و ML طبقه‌بندی می‌شود. افزودن آهک به این نوع خاک‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین شیوه‌های تثبیت خاک است و تثبیت با آهک با دقت بیش‌تری بررسی شده است. ارزیابی تأثیر آهک بر مشخصات خاک طی ۳ مرحله متفاوت انجام شده است. در این سه مرحله تأثیر آهک با عمل‌آوری سریع و انجام آزمایش در رطوبت بهینه، عمل‌آوری در شرایط طبیعی و آزمایش در رطوبت اشباع و تأثیر زمان بر واکنش خاک با آهک ارزیابی شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

در اولین مرحلهٔ ارزیابی، معیار مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) به‌عنوان شاخص ارزیابی انتخاب شد. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با آهک از شاخص‌های اصلی برای نشان‌دادن مشخصات فنی این مصالح است، جدول ٤ حداقل مقادیر مقاومت تک‌محوری را بر اساس توصیه انجمن ملی آهک برای کاربردهای متفاوت و سیکل‌های یخ زدن و آب شدن در اولین سال بهره‌برداری ارائه می‌دهد [١٦].

هم‌چنین می‌توان با استفاده از نمودار تنش- کرنش مربوط به این آزمایش، مدول الاستیسیته خاک را نیز برآورد کرد. برای انجام این آزمایش نمونه استوانه‌ای از خاک با درصدهای وزنی آهک متفاوت ۰ و ۲ و ٤ و ٦ درصد با رطوبت بهینه و تراکم ۹۵ درصد تولید و نمونه‌های به‌دست آمده به‌مدت ٤٨ ساعت در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد در فضای محبوس (عایق رطوبت و هوا) عمل‌آوری شد.

**جدول ٤. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری(UCS) مطلوب برای شرایط متفاوت اساس و زیر اساس**

| کاربرد | | مقاومت فشاری پس از سیکل‌های یخ زدن و آب شدن ($kg/cm^2$) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ۳ سیکل | ۷ سیکل | ۱۰ سیکل |
| الف- زیر اساس | روسازی‌های صلب و بستر شالودهٔ ساختمان‌ها | ۳/۵ | ٦/۳ | ۸/٤ |
| | روسازی‌های انعطاف‌پذیر(>۲۵ cm)* | ٤/۲ | ۷ | ۹/۱ |
| | روسازی‌های انعطاف پذیر(۲۰-۲۵cm)* | ٤/۹ | ۷ | ۹/۸ |
| | روسازی‌های انعطاف پذیر (۱۲/۵*-۲۰cm)* | ٦/۳ | ۹/۱ | ۱۱/۲ |
| ب- اساس | | ۹/۱ | ۱۲ | ۱٤/۱ |

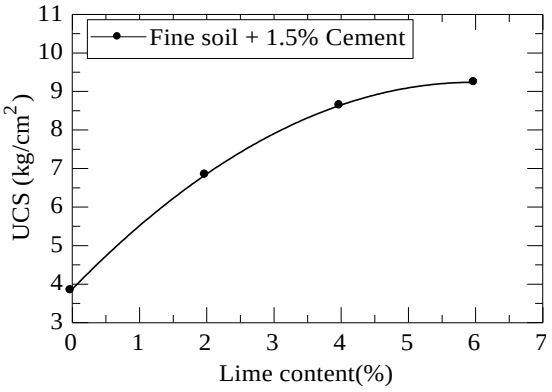
*** مجموع ضخامت روسازی روی لایهٔ زیر اساس**

برای ساخت قالب‌ها، لولهٔ پلیکا به قطر ٤ اینچ و طول ۸ اینچ انتخاب شده و جدارهٔ آن با اره برش داده شده است. سپس داخل لوله‌ها روغن کاری شده و دور لوله‌ها با نخ محکم بسته شده و نمونه درون آن متراکم شد. پس از عمل‌آوری و باز کردن نخ‌ها نمونه‌ها از درون لوله بیرون آورده شده است. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTMD۵۱۰۲ انجام گرفته است. نحوهٔ انجام آزمایش به این ترتیب است که ابتدا خاک، آهک و آب به‌خوبی با یک‌دیگر مخلوط شده و نمونه‌های استوانه‌ای شکل ساخته می‌شود. پس از نگه‌داری نمونه‌ها در فضای محبوس

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

(عایق رطوبت و هوا) به‌مدت مشخص، نمونه تحت بار محوری قرار می‌گیرد.

نتایج مقاومت فشاری که براساس نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده در شکل ٦ نشان داده شده است و عمل‌کرد بسیار مطلوب و مؤثر آهک در تثبیت خاک را تأیید می‌کند. بر اساس جدول ۳ و با فرض تعداد سیکل‌های یخ زدن و آب شدن در اولین فصل یخ‌بندان به‌میزان ۵ بار افزودن حدود ۳ درصد آهک خاک را برای استفاده در خاک بستر شالودهٔ سازه‌ها و زیر اساس مساعد خواهد کرد.



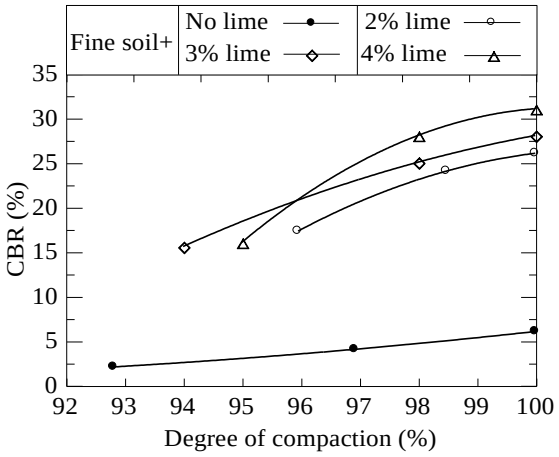

**شکل ٦. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری (UCS) در برابر درصد آهک برای نمونه‌های با عمل‌آوری سریع**

در مرحلهٔ دوم از آزمایش‌های، نمونه‌ها در شرایط طبیعی عمل‌آوری شده و در رطوبت اشباع آزمایش شده‌اند. همهٔ نمونه‌ها که با رطوبت بهینه تولید شده بودند با حفظ رطوبت در دمای طبیعی (حدود ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد) و به‌مدت ۱ روز نگه داشته شده و سپس دو شبانه روز در آب قرارداده شدند تا کاملاً اشباع گشته و مجدداً آزمایش شدند. نتایج سی‌بی‌آر اشباع و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها که در شکل ۷ ارائه شده، نشان می‌دهد با افزایش مقدار ۲، ۳ و ٤ درصد آهک می‌توان CBR خاک در حالت اشباع را به‌خوبی افزایش داد.

در مرحلهٔ سوم با توجه به نتایج قبلی انجام آزمایش‌های تکمیلی بر روی نمونه‌های با ۲ و ۳ درصد آهک انجام شده است. هدف از انجام این مرحله از آزمایش‌های، تعیین مشخصات فنی خاک تثبیت شده با آهک در عمرهای متفاوت است و مشخصه‌های فنی مورد نظر عبارتند

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

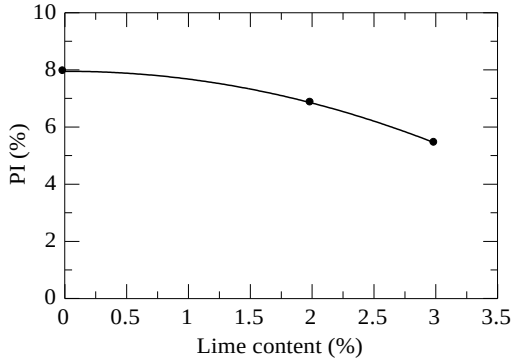



**شکل ۷. مقادیر CBR اشباع در حالات مختلف تثبیت خاک با آهک**

از حدود آتربرگ، چسبندگی (C)، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ($\phi$)، مقاومت فشاری تک‌محوری ($q_u$)، مدول تغییر شکل (Es) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR). نمونه‌ها با رطوبت بهینه تولید شدند و با حفظ رطوبت در دمای طبیعی (حدود ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد) به مدت ۷ و ۲٤ روز نگه‌داری شدند و سپس چهار شبانه روز در آب قرار داده شدند تا کاملاً اشباع و سپس آزمایش شدند. (عمر نمونه‌ها در زمان آزمایش ۱۱ و ۲۸ روز بوده است) بر این اساس، ابتدا خاک مورد نظر در ۳ حالت مختلف شامل خاک طبیعی ریزدانه (بدون افزودن آهک) و دو حالت خاک تثبیت شده با آهک (۲ و ۳ درصد) به‌میزان لازم تهیه و پس از ۲٤ ساعت برای دانه‌بندی و حدود آتربرگ، آزمایش شدند. سپس با استفاده از خاک‌های تثبیت شده با آهک، نمونه‌هایی برای انجام آزمایش‌های مورد نظر تهیه شد.

به‌منظور تعیین ظرفیت باربری خاک تثبیت شده با آهک، آزمایش CBR انجام شده است. بر اساس نتایج آزمایش تراکم (ASTM D٦٩٨) درصد رطوبت بهینه خاک تثبیت شده با آهک افزایش می‌یابد. در این آزمایش‌های رطوبت بهینه در حدود ۱٤/۵٪ و حداکثر وزن مخصوص خشک آن ۱/۹۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب به‌دست آمده است. شکل ۸ تغییرات دامنهٔ خمیری خاک با افزایش درصد آهک را نشان می‌دهد. با افزایش درصد آهک خاک PI آن کاهش می‌یابد، این امر سبب می‌شود که هنگام مرطوب کردن خاک و متراکم کردن کارآیی خاک به مراتب افزایش یابد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]




**شکل ۸. تغییرات پلاستیسیتهٔ خاک با افزایش درصد اهک**

با توجه به شرایط کارگاهی فرض شد که خاک تثبیت شده با آهک در کارگاه، حداقل با ۹٦ درصد کوبیدگی متراکم خواهد شد از این رو، تعداد ۸ نمونه به قطر ٦ اینچ برای این آزمایش در آزمایشگاه ساخته شد.

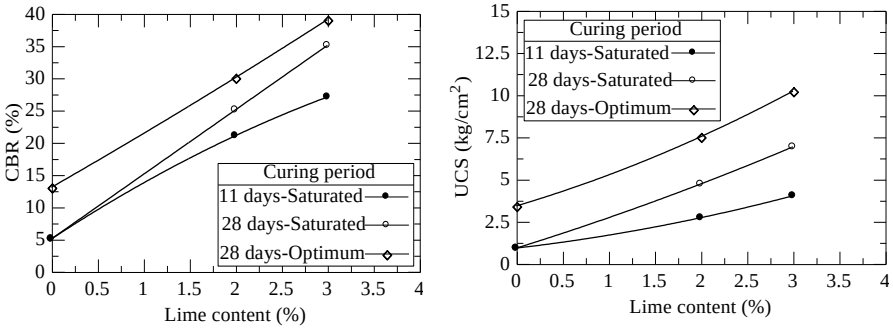
مشابه با نمونه‌های CBR، تعداد ۱۷ نمونه تک‌محوری با ۲ و ۳ درصد آهک ساخته شده و به‌مدت ۱۱ و ۲۸ روز در فضای محبوس (عایق رطوبت و هوا) نگه‌داری شدند، تعدادی از نمونه‌ها در شرایط اشباع و تعدادی در شرایط رطوبت بهینه آزمایش شدند. میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR مربوط به این نمونه‌ها در شکل ۹ ارائه شده است.

## آزمایش سه‌محوری تحکیم یافتهٔ زه‌کشی نشده (CU)

مقادیر چسبندگی (C) و زاویهٔ اصطکاک داخلی ($\phi$) از جمله پارامترهای مهم مکانیکی خاک هستند که با آزمایش سه‌محوری و یا آزمایش برش مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند. برای تعیین این پارامترها آزمایش سه‌محوریCU بر روی نمونه‌های تثبیت شده با آهک با عمل‌آوری در شرایط طبیعی انجام گرفته و فشار آب منفذی در حین اعمال بار به نمونه اندازه‌گیری شده است. برای هر یک از درصدهای متفاوت افزایش آهک و در دو عمر متفاوت (٤ هفته و ٦ هفته)، نمونه‌های آزمایش سه‌محوری با قطر حدود ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر در لوله‌های پلیکا که سطح داخلی آن روغن کاری شده بود با رطوبت بهینه و تراکم ۹٦ درصد بازسازی شده بودند تا پس از عمل‌آوری بتوان نمونه‌ها را به‌سهولت از درون آن

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

خارج کرد. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری به‌مدت ۲٤ و ۳۸، روز درون سلول سه‌محوری قرار داده شد. سپس تنش همه جانبه اعمال شده و برای تسریع در اشباع شدن نمونه‌ها با اعمال فشار برگشتی[۱] به‌مدت ٤ روز، نمونه‌ها اشباع شدند. پس از اشباع شدن و تحکیم نمونه‌ها، تنش انحرافی به نمونه اعمال شد.




**شکل ۹. نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR نمونه‌های تثبیت شده با آهک**

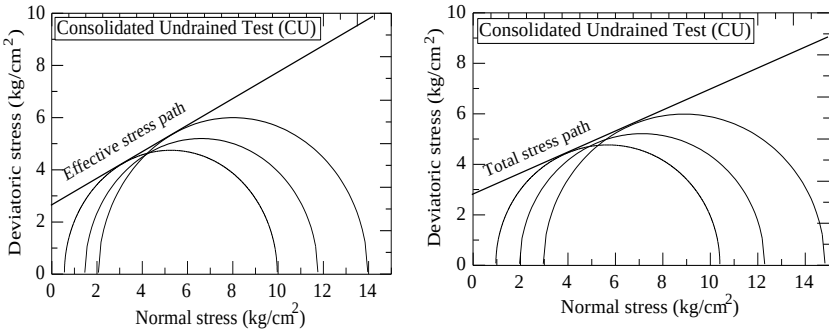
نمونه‌های متراکم شده بدون آهک رفتار نرم شونده داشته و به‌صورت خمره‌ای در آمدند. نمونه‌های با ۳ درصد آهک و عمر ٤۲ روزه رفتار سخت شونده داشته به‌گونه‌ای که در کرنش ٤ درصد گسیخته شدند. نمونه‌های با ۲ و ۳ درصد آهک و عمر ۲۸ روزه در کرنش ٦ درصد گسیخته شده و رفتاری بین دوگروه قبل داشتند. به‌نظر می‌رسد با افزایش درصد آهک و افزایش زمان عمل‌آوری، رفتار نمونه از نرم شونده به‌سمت سخت شونده تغییر می‌کند.

در حین اعمال تنش برشی به نمونه فشار آب منفذی نیز اندازه‌گیری شد. نتایج این داده‌ها نشان می‌دهد با افزایش درصد آهک و نیز افزایش عمر نمونه فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. پوش گسیختگی در دو حالت تنش کل و مؤثر و تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش افقی برای نمونه با ۳ درصد آهک و عمر ۲۸ روزه به‌ترتیب در شکل‌های ۱۰، ۱۱ نشان داده شده است. خلاصه نتایج حاصل از این آزمایش‌های در جدول ۵ آورده شده است.

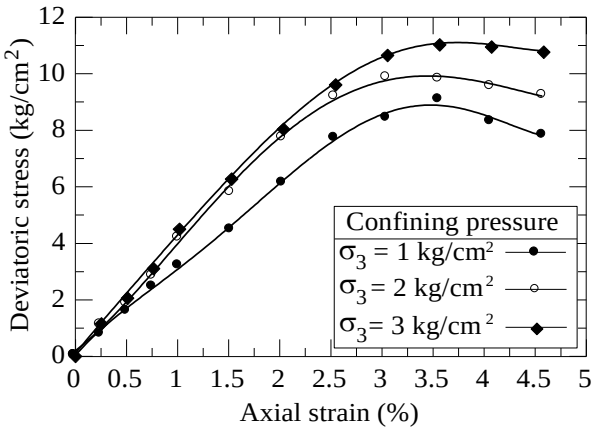
نتایج این آزمایش‌های نشان می‌دهد در اثر افزودن آهک و متراکم کردن خاک چسبندگی آن به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

۱. Back Pressure

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]




شکل ۱۰. پوش گسیختگی در حالت تنش کل و مؤثر افقی برای نمونه با ۳ درصد آهک و عمر ۲۸ روزه




**شکل ۱۱. تغییرات تنش انحرافی برای نمونه با ۳ درصد آهک و عمر ۲۸ روزه**

**جدول ۵. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی خاک تثبیت شده با آهک**

| آزمایش | درصد آهک | عمر نمونه | نتایج آزمایش | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | C (kg/cm۲) | ϕ (deg) | C' (kg/cm2) | ϕ' (deg) |
| سه محوری(CU) | ۰ | – | ۰/۲ | ۱۹ | ۰/۰۵ | ۱۷ |
| | ۲ | ۲۸ | ۲/۵۲ | ۲۲/۲ | ۲/۳۷ | ۲۵/۸ |
| | ۳ | ۲۸ | ۲/۷۵ | ۲٤/۲ | ۲/٦ | ۲۸/۳ |
| | | ٤۲ | ۳/۵ | ۲٤/٤ | ۳/۱۵ | ۲۸/۵ |

## رمبندگی خاک اصلاح شده

در صورت اصلاح خاک با تراکم، باید در مورد عدم رمبندگی خاک متراکم شده اطمینان

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

حاصل کرد [۵]. محققان مختلفی رمبندگی لایه‌های متراکم شده را ارزیابی کرده‌اند، بر اساس بررسی‌ها سانتاگاتا[۱] (۲۰۱۱) با کاهش تراکم نسبی و درصد رطوبت تراکم رمبندگی افزایش یافته و تراکم در رطوبت بیش از رطوبت بهینه باعث کاهش رمبندگی در هنگام اشباع شدن خواهد شد [۱۷]. نتایج آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی بر روی خاک‌ریزهای متراکم شده نشان می‌دهد که شاخص رمبندگی به درصد رطوبت تراکم، وزن مخصوص خشک خاک، شاخص خمیری و درصد ذرات رسی وابسته است [۱۸]. در این بررسی میزان رمبندگی خاک متراکم شده و اصلاح شده با آهک و سیمان در تراکم ۹۶ درصد با انجام آزمایش تحکیم اندازه‌گیری شده است (ASTM D۵۳۳۳). جدول ٦ نتایج این آزمایش‌های را نشان می‌دهد.

بر اساس این نتایج با متراکم کردن خاک و افزودن مواد پایدار کننده خاک در گروه خاک‌های غیررمبنده قرار خواهد گرفت.

## پیشنهاداتی در مورد شیوه به‌سازی خاک برای جلوگیری از وقوع پدیدهٔ رمبندگی

با توجه به نتایج مذکور به‌منظور جلوگیری از وقوع پدیدهٔ رمبندگی خاک این اقدامات می‌تواند انجام شود:

- از نفوذ آب به لایه‌های خاک مستعد رمبندگی باید جلوگیری شود. موضوع جمع‌آوری و هدایت آب‌های نفوذی و جلوگیری از توقف آن بر روی لایهٔ تثبیت شده به‌طور جدی باید به آن توجه شود از این رو، طراحی و اجرای سیستم زه‌کشی مناسب بر روی لایهٔ تثبیت شده (در بخش‌هایی از پروژه که امکان نفوذ آب از بالا وجود دارد) بسیار ضروری است.
- در صورتی‌که خاک ریزدانه با استفاده از آهک (و یا سیمان) تثبیت شود، علاوه بر بهبود مشخصات مکانیکی خاک، این لایه مانعی برای نفوذ آب از بالا به لایه‌های زیرین خواهد بود. تثبیت خاک به‌روش مذکور می‌تواند به‌صورت جدی خطر رمبندگی را کاهش دهد.

۱. Santagata

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

- استفاده از خاک‌های حاصل از عملیات خاک‌برداری بدون به‌سازی شیمیایی آن‌ها برای اجرای خاک‌ریز جدید توصیه نمی‌شود زیرا حتی متراکم کردن خاک‌ریز (بدون تثبیت شیمیایی) نیز مقاومت آن را به حد مطلوب نخواهد رساند.
- با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، سی‌بی‌آر اشباع و مقاومت تک‌محوری قابل دست‌یابی در روش‌های مختلف تثبیت، به شرح جدول ۷ پیشنهاد می‌گردد.

**جدول ٦. میزان رمبندگی خاک اصلاح شده طبق استاندارد ASTM**

| نوع مصالح | خاک محل | خاک محل + ۲ درصد آهک | خاک محل + ۳ درصد آهک | خاک محل + ۱/۵ درصد سیمان |
|---|---|---|---|---|
| شاخص رمبندگی٪ ($I_e$) | ۰/۲۹ | ۰/۱٤ | ۰/۱۱ | ۰/۱٤ |

**جدول ۷. نتایج آزمایش‌های سی‌بی‌آر اشباع و مقاومت تک‌محوری قابل دست‌یابی در روش‌های مختلف تثبیت**

| روش تثبیت خاک | درصد تراکم | CBR اشباع (٪) | مقاومت تک‌محوری در حالت اشباع ($kg/cm^2$) |
|---|---|---|---|
| تراکم خاک محل | ٪۹٦ | ٥ | ۰/۹ |
| تثبیت خاک با افزودن ۲۵٪ مصالح درشت‌دانه | ٪۹٦ | ۳ | - |
| تثبیت خاک با افزودن ۵۰٪ مصالح درشت‌دانه | ٪ ۹٦ | ٦ | - |
| تثبیت خاک با افزودن ۱,۵ ٪ سیمان | ٪ ۹٦ | ۱٥ | - |
| تثبیت خاک با افزودن ۲٪ آهک | ٪ ۹٦ | ۲۱ | ٤/۹ |
| تثبیت خاک با افزودن ۳٪ آهک | ٪ ۹٦ | ۲۷ | ۷/۱ |
| تثبیت خاک با افزودن ۲۵٪ مصالح درشت دانه + ۱ ٪ سیمان | ٪ ۹٦ | ۲۸ | - |

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اصلاح خاک روش‌های گوناگون مانند خاک‌برداری و جای‌گزینی مصالح، تراکم، تثبیت مکانیکی با افزودن مصالح درشت‌دانه، تثبیت با سیمان، روش ترکیبی شامل افزودن مصالح درشت‌دانه و سیمان و تثبیت با آهک ارزیابی شده است. خلاصهٔ نتایج این تحقیق عبارتند از:

- آزمایش‌های سی‌بی‌آر انجام شده در حالت اشباع برای خاک‌های ریزدانه از نقاط مختلف

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

محل پروژه نشان می‌دهد که اگر بتوان خاک موجود را تا میزان ۹۵ درصد متراکم کرد مقدار سی‌بی‌آر اشباع خاک ممکن است به حدود ۵ درصد افزایش یابد که چندان مطلوب نیست. با افزودن مصالح درشت‌دانه به‌میزان ۲۵ و ۵۰ درصد و متراکم کردن مخلوط با ۹۸ درصد تراکم (که از نظر اجرایی مشکل خواهد بود) تغییر چشم‌گیری در مشخصات فنی خاک ایجاد نکرده و مناسب نیست.

– مناسب‌ترین شیوه برای به‌سازی خاک محل، به‌سازی آن با افزودن ۲ تا ۳ درصد آهک و متراکم کردن آن است. در این صورت مقادیر سی‌بی‌آر اشباع و مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده به‌نحو چشم‌گیری افزایش یافته و عمل‌کرد بسیار مطلوب و مؤثر آهک در تثبیت خاک را تأیید می‌کند. تثبیت با آهک علاوه بر تسهیل در اجرا، دست‌یابی به CBR مطلوب برای زیر اساس راه آهن، افزایش ظرفیت باربری خاک و کاهش نفوذ پذیری، کاهش زمان اجرا و کاهش هزینه را دربر دارد.

– روش دیگری که می‌تواند برای به‌سازی خاک در محل بهره‌برداری شود، افزودن مصالح درشت‌دانه به خاک محلی به‌میزان حداقل ۲۵٪ و تثبیت آن با حداقل ۱ درصد سیمان است.

– آزمایش‌های تحکیم انجام شده برای تعیین میزان رمبندگی (ASTM D۵۳۳۳) روی نمونه‌های متراکم شده و اصلاح شده با آهک و سیمان در تراکم ۹۶ درصد نشان می‌دهد که با متراکم کردن خاک و افزودن مواد پایدارکننده، خاک در گروه خاک‌های غیر رمبنده قرار می‌گیرد.

## منابع

۱. بلوری بزاز ج.، معروف م. ع.، *شناسایی و ارزیابی خصوصیات مکانیکی خاک‌های رمبنده (مطالعهٔ موردی منطقهٔ شمال‌شرق ایران)*، نشریه زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد پنجم، شماره ۱ و ۲ (۱۳۹۱).

۲. کمیتهٔ ملی سدهای بزرگ ایران، *طراحی ژئوتکنیکی خاک‌های فروریزشی و اهمیت آن از نظر پی سدها*، کمیتهٔ فتی پی سدها، نشریهٔ شمارهٔ ۲٤.

۳. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، نشریه شماره ۲٦۸، *دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و*

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

روسازی راه (۱۳۸۲).

4. Pawlak S. L., "Evaluation, design and mitigation, collapsible soil sites in Western Colorado", Colorado Geological Survey, Geologic Hazards and Engineering Practices in Western Colorado, Glenwood Springs, Colorado (1998).
5. Houston S. L., Houston W., Zapata C. E., Lawrence, CH., "Geotechnical Engineering Practice for collapsible soils", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 19 (2001) 333-355.
6. Serridge C. J., "Some applications of ground improvement techniques in the urban environment", The Geological Society of London (IAEG), Paper Number 296 (2006).
7. Rollins K. M., Jihyoung Kim P. E. M., "Dynamic compaction of collapsible soils based on U.S. case histories", Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering (ASCE), Vol. 136, No. 9 (2010).
8. Serridge C. J., Synac O., "Application of the Rapid Impact Compaction (RIC) technique for risk mitigation in problematic soils", The Geological Society of London (IAEG), Paper Number 294 (2006).
9. Okonta F. N., Govender E., "Effect of desiccation on the geotechnical properties of lime-fly ash stabilized collapsible residual sand", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 6, No. 6 (2011).
10. Hoan Ho M., Chan Ch., "Some mechanical properties of cement stabilized Malaysian soft clay", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 74 (2011) 24-31.
11. Ziaie Moayed R., Izadi E., Heidari S., "Improvement of saline silty sand

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]

soil behavior using lime and micro silica", 5th Civil Engineering Conference in the Asian Region and Australasian, Structural Engineering Conference (2010).

12. Portland Cement Association (PCA), "Properties and uses of cement modified soil" (2003).
13. Galvao T. B., Elsharief A., Simoes G. F., "Effects of lime on permeability and compressibility of two Tropical Residual Soils", Journal of Environmental Engineering (ASCE), Vol. 130, No. 8, (2004).
14. Okonta F. N., Manciya T. M., "Compaction and strength of lime fly ash stabilized collapsible residual sand", Journal of Geotechnical Engineering, (EJGE), Vol. 15, Bund. R. (2010).
15. Ingles O. G., Metcalf J. B., "Soil stabilization, principles and practice", Sydney Butterworths (Pub.) (1972).
16. National Lime Association, "Mixture design and testing procedures for lime stabilized soil" (2006).
17. Santagata M. C., "Identification and behavior of collapsible soils" Joint Transportation Research Program, Technical Report Series, Indiana Department of Transportation, Report No.765.463.1521, SPR-3109 (2011).
18. Lim Y. Y., Miller G. A., "Wetting-Induced compression of compacted Oklahoma soils", Journal of Geotechnical an d Geo-environmental Engineering (ASCE), Vol. 130, No. 10 (2004) 1014-1023.
19. Ibragimov M. N., "Experience with stabilization of loess soils slump-type settlement in Volgodonsk", Soil Mechanics and Foundation

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOR: 20.1001.1.2228837.1393.8.4.7.9 ]

Engineering, Vol. 42, No. 6 (2005).

20. National Lime Association, "Lime terminology, standards and properties" (2007).

21. Soliman S., "Performance of reinforced collapsible soils", PhD thesis, Civil Eng. Dept., Concordia University Montreal, Quebec, Canada (2010).

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.7.9 ]