

## تأثیر درصد رس و درصد آهک بر CBR ماسه‌های رس دار

## تثبیت شده با آهک\*

(یادداشت پژوهشی)

مهیار عربانی<sup>(۱)</sup>مهدی ویس کرمی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** از آن‌جا که تثبیت با آهک برای خاک‌های دارای دانه‌بندی وسیع در اندازه ماسه و کوچک‌تر از آن به کار می‌رود، تأثیر درصد رس بر عدد CBR، که به عنوان معیاری برای طراحی خاک‌ریزها مورد استفاده قرار می‌گیرد، بررسی شده است. آهک با بخش رسی این مصالح ترکیب شده و مخلوط سیمانی از مصالح ریزدانه و درشت‌دانه را همانند یک مخلوط بتنی به وجود می‌آورد و تغییرات درصد رس و آهک می‌تواند به تغییرات درصد مواد سیمانی شده و در نتیجه تغییرات مقاومت مخلوط بیانجامد. با ساخت تعدادی نمونه ماسه رس‌دار تثبیت شده با آهک، پس از ارزیابی مقاومت CBR نمونه‌ها مشخص شده است که در صورت قرارگیری درصد رس در یک بازه مشخص موسوم به "درصد رس بهینه (OCC)" مقاومت نمونه‌ها بیش‌ترین تغییر را دارا خواهد بود. هم‌چنین درصد آهک بهینه برای تثبیت این دسته مصالح در محدوده ۷ تا ۸ درصد است.

**واژه‌های کلیدی** تثبیت با آهک، عدد CBR، درصد رس، درصد آهک.

### The Effect of Clay and Lime Content on CBR Strength of Lime- Stabilized Clayey Sands

M. Arabani

M. Veis Karami

**Abstract** Since lime- stabilization is effective on different soil size ranging from sand and finer, the influence of lime and clay content on CBR strength of these soils is investigated. Lime combines with the clay part of these soils and provides cemented materials, which is similar to concrete. Hence, the variation in clay and lime content will affect the amount of cemented materials and consequently the strength. Providing some lime- stabilized clayey sand samples, the effect of clay and lime content on CBR strength is evaluated. The results show that in a particular range of clay content, the mixes have the maximum strength variations and, the optimum lime content is about 7 to 8 percent.

**Key Words** CBR, Clay Content, Lime Content, Lime- Stabilization

\* تاریخ دریافت نسخه نهایی اصلاح شده ۸۴/۷/۳۰ و تاریخ تصویب مقاله ۸۴/۱۲/۶ .

(۱) عضو هیأت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

(۲) کارشناس ارشد مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان

### مقدمه

تثبیت خاک با آهک به عنوان روش نتیجه بخشی در افزایش توان باربری و کاهش تغییرشکل پذیری و خواص خمیری بسیاری از خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف عمده از تثبیت خاک در زیرسازی‌ها و لایه‌های مختلف راه، این است که زیرسازه یا لایه تثبیت شده با آهک بتواند بدون ایجاد تغییر شکل‌های زیاد، بارهای وارده را تحمل نماید. در حقیقت بسترسازی به معنی آماده‌سازی خاک بستر برای تحمل بارهای وارده است، به نحوی که اقتصاد طرح نیز لحاظ گردد. تثبیت خاک، عموماً با به کارگیری: سیمان، آهک، قیر و مواد شیمیایی مختلف، امکان‌پذیر است [1, 2].

در تثبیت مصالح خاکی، مواد تثبیت‌کننده با ذرات خاک آمیخته می‌شوند و گاه ترکیب شیمیایی جدیدی با خواص متفاوت به وجود می‌آورند. به عنوان مثال، آهک؛ چه به صورت زنده (با ترکیب شیمیایی CaO) و چه به صورت شکفته با فرمول شیمیایی  $Ca(OH)_2$ ، با ذرات رس ترکیب می‌شود و خصوصیات فیزیکی آن را بهبود می‌بخشد. این عمل، یعنی استفاده از آهک به عنوان تثبیت‌کننده ارزان، قابل دسترس، و بسیار نتیجه بخش، سالیان دراز است که در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است [3].

مشخصات مقاومتی لایه‌های تثبیت شده با آهک در راه‌سازی بر اساس عدد CBR لایه تثبیت شده با آهک، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و طراحی این لایه‌ها با داشتن مقاومت CBR لایه انجام می‌شود [4]. بنابراین ارزیابی مقاومت CBR لایه‌های خاکی تثبیت شده با آهک و تأثیرپذیری آن از سایر پارامترهای مصالح خاکی مانند توزیع دانه‌بندی و به ویژه درصد رس و هم‌چنین تغییرات آن با درصد آهک به عنوان ماده تثبیت‌کننده، برای دست‌اندرکاران راه‌سازی مهم و مورد توجه است. از آن‌جا که ترکیب خاک رس و آهک به دلیل

به وجود آمدن پیوند شیمیایی بین ذرات رس و آهک منجر به سیمانی شدن مصنوعی خاک می‌گردد [5]. در این پژوهش، تأثیر مقادیر مختلف درصد خاک رس بر مقاومت CBR خاک‌ریزهای تثبیت شده با آهک، بررسی شده است؛ بدین صورت که مخلوط‌هایی از یک نمونه خاک درشت‌دانه با مقادیر مختلف خاک رس از نوع کائولینیت ترکیب شده و پس از تثبیت با آهک، تحت آزمایش CBR قرار گرفته است.

### سیمانی شدن مصنوعی و مکانیزم ترکیب خاک با آهک

"سیمنتاسیون" به معنای عام، چسبیدن و سیمانی شدن است و در مهندسی ژئوتکنیک به چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و ایجاد یک توده چسبنده و با مقاومت بیشتر گفته می‌شود.

سیمانی شدن مصنوعی، عموماً در ارتباط با ماسه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ زیرا مصالح درشت‌تر مانند شن و ماسه‌های درشت‌دانه، اصولاً نیازمند به بهسازی نیستند و اغلب، خصوصیات ژئوتکنیکی مطلوبی دارند. به همین منظور جهت بهسازی خاک با استفاده از سیمانی شدن مصنوعی آن، محققین بیشترین توجه را به ماسه‌ها و مصالح ریزدانه معطوف داشته‌اند [6, 7, 8].

اصولاً پس از افزودن آهک به خاک، دو دسته واکنش آلی در خاک صورت می‌گیرد. این دو واکنش عبارتند از: واکنش جایگزینی یون‌های مثبت و واکنش تجمع-تراکم. در طی این دو واکنش، ذرات آهک با خاک رس ترکیب شده، به یکدیگر می‌چسبند و یک مخلوط سیمانی با اجزای درشت‌تر را به وجود می‌آورند که دارای خواص خمیری کم‌تر و مقاومت بیش‌تری است. پس از آن در بلند مدت، واکنش‌های دیگری بین اجزای رسی خاک و آهک صورت می‌گیرد. واکنش‌های

## روش‌های طراحی و اجرای بسترها و

### خاک‌ریزهای تثبیت شده با آهک

تعیین درصد آهک مناسب و بهینه در طرح مخلوط‌های خاک- آهک، از اهداف عمده مطالعه مخلوط‌ها است. برای طرح و اجرای لایه‌های خاکی و خاک‌ریزهای تثبیت شده با آهک در آیین‌نامه‌ها و کتاب‌های مختلف، روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. این روش‌ها عبارتند از [12]:

**الف- روش pH:** در این روش، درصد آهک مناسب بر اساس pH مخلوط خاک- آهک تعیین می‌شود. این روش برای تثبیت خاک‌های درشت‌دانه قابل استفاده نمی‌باشد و علاوه بر آن، مشخصات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری خاک در این روش مشهود نیست. **ب- روش نشانه خمیری:** درصد آهک مناسب در این روش نشانه خمیری- درصد آهکی به‌اندازه‌ای است که خصوصیات خمیری مخلوط را به مقدار مشخص و مورد نظر کاهش دهد. در این روش نیز مشخصات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری خاک پس از تثبیت قابل پیش‌بینی نیست.

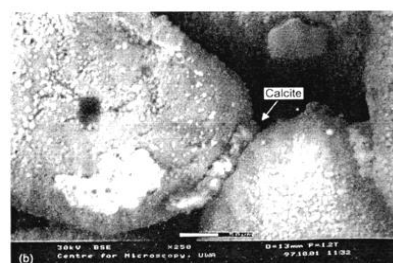
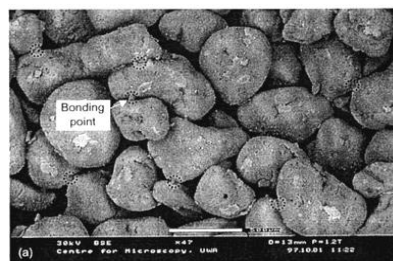
**ج- استفاده از نسبت باربری کالیفرنیا (CBR):** در این روش، درصد آهک مناسب براساس نسبت باربری کالیفرنیا مشخص برای خاک‌ریز موردنظر تعیین می‌شود. در این روش هم تغییرشکل‌پذیری خاک پس از تثبیت قابل پیش‌بینی نیست؛ ولی نشانه‌ای از افزایش مقاومت بر اساس این روش، به‌دست می‌آید. **د- روش مقاومت فشاری تک محوری:** درصد آهک مناسب در روش اخیر بر اساس مقاومت فشاری مخلوط خاک- آهک تعیین می‌گردد.

**ه- روش AASHTO:** این روش براساس نمودارهایی درصد آهک طرح را مشخص می‌کند. در این روش نیز نشانه‌ای از مقاومت و خصوصیات مکانیکی مصالح پس از تثبیت به چشم نمی‌خورد. مصالح تثبیت شده با آهک در بسترهای خاکی راه، خاک‌ریزها و ترانشه‌ها و هم‌چنین پی‌سازی در برخی

پوزولانی که طی آن، مواد سیمانی شده بیش‌تری تولید می‌شود و مقاومت بلندمدت خاک بر آن اساس قرارداد، و واکنش‌های کربناسیون که به تولید مواد غیر محلول در آب می‌انجامد، از جمله این واکنش‌ها هستند [9].

افزایش مواد سیمانی کننده در خاک تا یک سطح مشخص، می‌تواند به افزایش تعداد نقاط برخورد و چسبندگی اجزای درشت‌تر بیانجامد و مقاومت مخلوط را افزایش دهد.

علاوه بر خاک‌های رسی در موارد متعددی از آهک، جهت سیمانی شدن مصنوعی مصالح درشت‌دانه‌تر مانند ماسه‌ها و لس‌ها (Loesses) استفاده می‌شود که از جمله آن می‌توان به کاربرد آهک زنده در تثبیت ماسه‌ها و رس‌ها در آلمان و موارد دیگر در بازسازی ماسه‌های ریزدانه در شمال غربی قاره استرالیا اشاره نمود [10,11]. در این پژوهش‌ها آهک با اجزای درشت خاک، تشکیل یک مخلوط سیمانی شده مصنوعی را می‌دهد. اساس افزایش مقاومت این مخلوط‌ها نیز بر پایه نقاط برخورد (Contact Point) که نقاط اتصال دانه‌های خاکی با آهک هستند، قرار دارد. شکل (۱) مکانیزم چسبندگی اجزای درشت دانه خاک را با مواد سیمانی کننده مصنوعی بین ذرات نشان می‌دهد [11].



شکل ۱ تصویر میکروسکوپی از ذرات سیمانی شده ماسه [11]

داده شده است. این نمونه‌ها از ماسه‌های مناطق شمالی کشور انتخاب شده‌اند که مصالح عمده ماسه‌ای در این نواحی را تشکیل می‌دهند و در بسیاری از موارد با مصالح ریزدانه رسی و یا لای دار، آمیخته شده‌اند. بخش درشت‌دانه مصالح، کاملاً شسته شده است تا عاری از هرگونه مواد ریزدانه کنترل نشده یا مصالح دیگر باشد. برای تأمین بخش ریزدانه مصالح، از خاک رس کائولینیت (با حد روانی در حدود ۴۵ و نشانه خمیری ۲۰) استفاده شده است. علت این امر آن است که خصوصیات بخش ریزدانه خاک، ثابت نگاه داشته شود و تنها پارامتر متغیر در این پژوهش، درصد رس و درصد آهک باشد.

#### ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش CBR. جهت ساخت

نمونه‌ها، ۵ نمونه خاک با درصد‌های مختلف رس، یعنی: ۵، ۱۵، ۲۲، ۳۰ و ۳۶ درصد، ساخته و مخلوط گردیدند. تثبیت نمونه‌ها با استفاده از آهک هیدراته که بعداً توسط آب، شکفته می‌شود انجام پذیرفت. هر نمونه با درصد‌های آهک ۳، ۶ و ۹ درصد ساخته شد. درصد رطوبت مخلوط‌ها بر اساس آزمایش تراکم به روش پروکتور اصلاح شده، تعیین شد و سپس خاک و آهک شکفته به صورت خشک با یکدیگر مخلوط گردیدند و در حین اختلاط، آب مورد نیاز به نمونه‌ها اضافه شد. نمونه‌ها در قالب‌های آزمایش CBR، در ۵ لایه ریخته شد و به روش پروکتور اصلاح شده، کوبیده شدند. پس از ۱ هفته نگهداری (عمل‌آوری) نمونه‌ها در شرایط هوای مرطوب و دمای حدود ۲۵ درجه سانتیگراد، مورد آزمایش قرار گرفتند. برای هر آزمایش، ۳ نمونه ساخته شد که میانگین نتایج حاصل از آن به عنوان جواب نهایی آزمایش، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج برخی آزمایش‌های اولیه نشان می‌دهند که بهتر است ساخت نمونه‌ها در درصد رطوبتی در حدود ۲ درصد بیش از رطوبت بهینه انجام شود [13].

پس از نگهداری و عمل‌آوری مصالح تثبیت شده با آهک، نمونه‌ها به روش خشک، مورد آزمایش CBR

زمین‌های نرم، قابل استفاده هستند. جهت تثبیت خاک از روش‌ها و ماشین‌آلات گوناگونی استفاده می‌شود. اصولاً اختلاط خاک با آهک به دو صورت: اختلاط درجا و اختلاط کارگاهی انجام می‌شود. عموماً مصالح خاکی با درصد رطوبت بهینه خاک با آهک خشک یا دوغاب آهک (Slurry) آمیخته شده، تحت عمل تراکم قرار می‌گیرند. اختلاط درجای خاک و آهک در تثبیت لایه‌های سطحی بیش‌تر، مورد توجه است. در این راستا مصالح خاکی و آهک با ماشین‌آلات مخلوط‌کن و یک یا چند بار عبور ماشین، بسته به نوع پروژه و اهداف مورد نظر، با آهک مخلوط می‌شوند. کنترل تثبیت توسط آزمایش‌های تراکم، فشاری تک‌محوری یا CBR انجام‌پذیر است [4, 5].

#### برنامه آزمایش‌ها

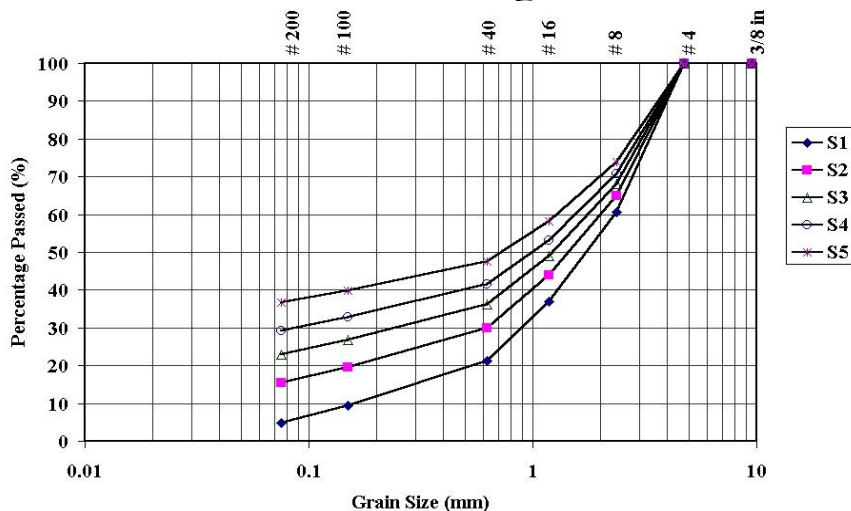
در ادامه، چگونگی انتخاب و ساخت مصالح که از نوع ماسه‌های رس دار هستند، شرح داده شده است. کلیه نمونه‌ها در شرایط یکسان آزمایشگاهی و از مصالح یکسان، ساخته شده و برای آزمایش‌های بعد، نگهداری شده‌اند.

#### مصالح مورد استفاده. به منظور بررسی تأثیر درصد

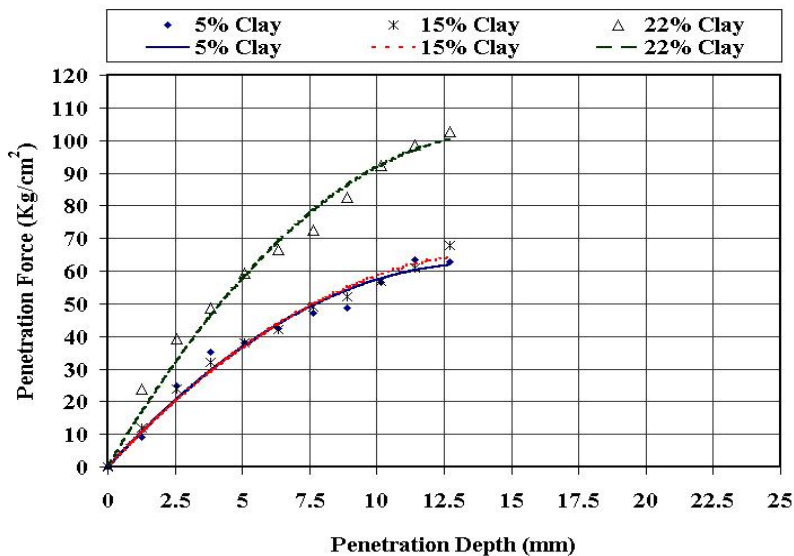
رس بر مقاومت CBR مخلوط‌های تثبیت شده با آهک، ابتدا بر اساس استانداردهای موجود، مجموعه‌ای از منحنی‌های دانه‌بندی معین پیوسته با استفاده از مصالح موجود در محل، انتخاب گردیدند. این دانه‌بندی‌ها دارای بیش‌ترین وزن مخصوص خشک و به نوعی در محدوده خود، دارای دانه‌بندی مناسبی برای لایه‌های خاک‌ریز راه‌ها هستند. از آن‌جا که حداکثر سایز دانه‌بندی برای مصالح قابل تثبیت با آهک بر اساس اغلب آیین‌نامه‌های معتبر، مصالح ماسه‌ای و ریزتر از آن است، مطالعات حاضر نیز بر روی این نوع مصالح، انجام شده است. منحنی‌های دانه‌بندی مورد استفاده با درصد‌های مختلف رس، در شکل (۲) نمایش

منحنی در نظر گرفته می‌شود، اصلاح گردید. برخی منحنی‌های به دست آمده از این مجموعه آزمایش‌ها که به روش اخیر اصلاح گردیده‌اند، در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. جدول (۱)، نتایج نهایی آزمایش CBR را بر نمونه‌های مختلف خاک نشان می‌دهد:

قرار گرفتند. منحنی‌های بار-جابجایی به دست آمده از آزمایش اخیر، به دلیل ناهمواری‌های سطح نمونه‌ها دارای خطایی کوچک در ابتدای بارگذاری است که این خطا با استفاده از روش مناسب پیشنهاد شده برای آزمایش CBR، که در آن امتداد قسمت خطی منحنی CBR و تقاطع آن با محور تغییر مکان به عنوان شروع



شکل ۲ منحنی‌های دانه‌بندی خاک مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های تثبیت شده

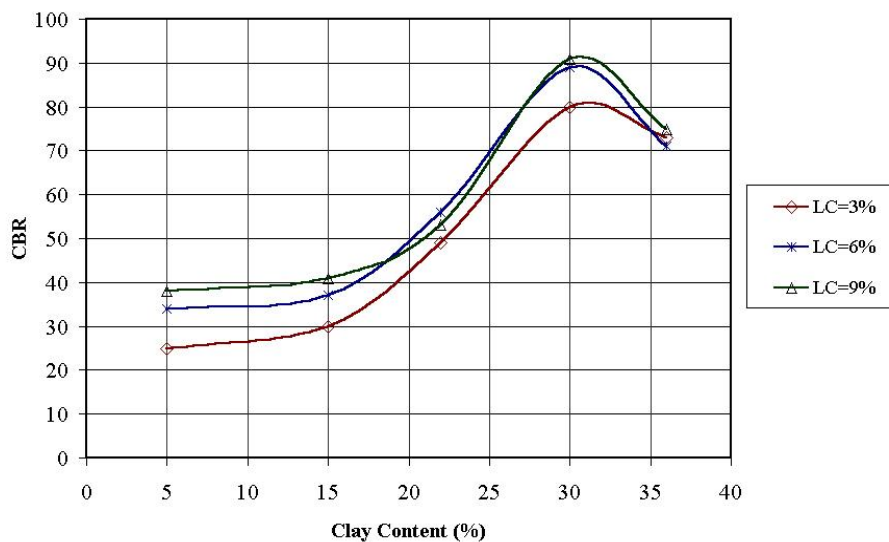


شکل ۳ منحنی‌های CBR اصلاح شده نمونه‌های تثبیت شده با ۶٪ آهک در درصد رس‌های مختلف

تأثیر درصد آهک بر CBR ماسه های رس دار ...

جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایش CBR بر نمونه های مختلف تثبیت شده با آهک

ردیف	شماره نمونه و سری	درصد رس (%)	درصد آهک (%)	CBR
۱	S1-C5-L3	5	3	25
۲	S1-C5-L6	5	6	34
۳	S1-C5-L9	5	9	38
۴	S2-C15-L3	15	3	30
۵	S2-C15-L6	15	6	37
۶	S2-C15-L9	15	9	41
۷	S3-C22-L3	22	3	49
۸	S3-C22-L6	22	6	56
۹	S3-C22-L9	22	9	53
۱۰	S4-C30-L3	30	3	80
۱۱	S4-C30-L6	30	6	89
۱۲	S4-C30-L9	30	9	91
۱۳	S5-C36-L3	36	3	73
۱۴	S5-C36-L6	36	6	71
۱۵	S5-C36-L9	36	9	75



شکل ۴ نمودار تغییرات CBR نمونه های تثبیت شده با ۳، ۶ و ۹ درصد آهک در مقابل تغییرات درصد رس

مشاهده نمی‌شود و حتی در درصدهای بالاتر روند تغییرات مقاومت سیری نزولی را طی می‌کند. علت این افزایش و کاهش را می‌توان با تئوری‌های ارائه شده در این زمینه توجیه نمود. اصولاً مقاومت محیط‌های متخلخل بر اساس دو پارامتر: چسبندگی و اصطکاک داخلی ذرات است [2]. بدین ترتیب، در صورت افزایش مواد سیمانی شده در مصالح تثبیت شده با آهک، که از ترکیب خاک رس و آهک به وجود می‌آیند، افزایش چسبندگی و در نتیجه افزایش مقاومت وجود خواهد داشت. در این حالت، بیش‌تر شدن درصد رس نمونه به افزایش مواد سیمانی و افزایش یکی از دو پارامتر مقاومتی مصالح یعنی چسبندگی می‌انجامد؛ در حالی که پارامتر دیگر ثابت است.

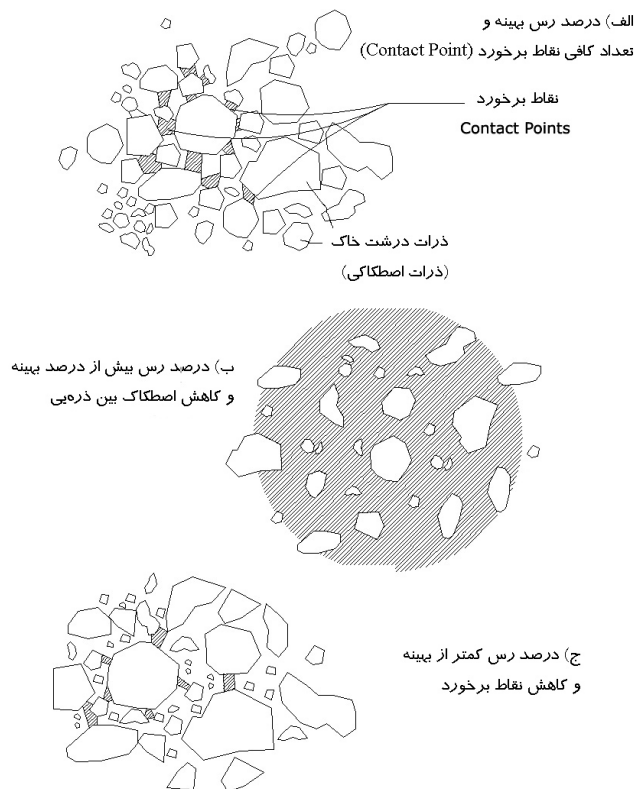
افزایش درصد رس به افزایش نقاط برخورد، یعنی نقاطی که عامل چسبندگی بین دانه‌های درشت‌تر خاک هستند، می‌گردد. این افزایش تا آن‌جا ادامه می‌یابد که تقریباً تمام فضای خالی اطراف دانه‌های درشت از مواد سیمانی شده پر می‌شود و این دانه‌ها علاوه بر آن‌که با یکدیگر در تماس مستقیم هستند و درهم قفل و بست (Interlock) شده‌اند، کاملاً به یکدیگر می‌چسبند. در نتیجه، مقاومت چسبندگی به طور کامل بسیج می‌شود. این امر در درصدهای پایین رس به دلیل کمبود مواد سیمانی کننده اتفاق نمی‌افتد. در درصدهای بیش‌تر رس، مواد ریزدانه سیمانی شده آن‌چنان زیاد می‌شوند که دانه‌های درشت‌تر خاک را از یکدیگر دور می‌سازند و قفل و بست داخلی و در نتیجه عامل دوم مقاومت را کاهش می‌دهند. این پدیده، سبب کاهش مقاومت این مخلوط‌ها می‌شود که در آزمایش‌های CBR کاملاً مشهود است. شکل (۵) حالات مختلف درصد آهک در یک نمونه مخلوط تثبیت شده با آهک را نشان می‌دهد.

**منابع خطای آزمایش‌ها.** از آن‌جا که نمونه‌ها با دقت بالا و در شرایط کاملاً یکسان و کنترل شده‌ای ساخته و نگهداری شده‌اند و دمای هوای محیط آزمایشگاه نیز در طی دوره ساخت نمونه‌ها (فصل بهار) در حدود ۲۳ تا ۲۸ درجه سانتیگراد ثابت بوده است؛ لذا خطای بسیار کمی از نظر خطاهای محیطی و انسانی انتظار می‌رود. اما برخی خطاهای ناشی از ناهمواری سطح نمونه‌ها و هم‌چنین دقت در تنظیم دقیق سرعت بارگذاری نمونه‌ها در آزمایش CBR، باعث می‌شود تا خطایی جزئی در نتایج وارد شود که البته با توجه به این‌که مصالح خاکی حتی در شرایط یکسان دارای رفتار متفاوتی با یکدیگر هستند، می‌توان از این خطاها در جهت به دست آوردن یک نتیجه کلی از آزمایش‌ها چشم‌پوشی کرده و با دقت قابل قبولی از اعداد و نتایج آزمایش‌ها بهره گرفت.

**تأثیر درصد رس و درصد آهک بر مقاومت CBR** نمودارهای تغییرات مقاومت CBR نمونه‌ها بر اساس تغییرات درصد رس در شکل (۴) برای سه درصد آهک مختلف: ۳٪، ۶٪ و ۹٪ ترسیم شده است. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است، تغییرات CBR مخلوط‌های تثبیت شده با آهک، روند مشخصی را دنبال می‌کند و آن این‌که در مجموع، افزایش درصد رس به افزایش CBR نمونه‌ها می‌انجامد؛ اما این افزایش پس از رسیدن درصد رس به مقدار مشخصی، ثابت شده یا سیر نزولی را دنبال می‌کند. در واقع افزایش مقاومت CBR ماسه‌های تثبیت شده با آهک با افزایش درصد رس، در بازه مشخصی از درصد رس اتفاق می‌افتد. این بازه در محدوده ۱۵ تا ۳۰٪ رس است. مخلوط‌های دارای درصد رس بیش‌تر یا کم‌تر از این محدوده، افزایش مقاومت بسیار ناچیزی با افزایش درصد رس از خود نشان می‌دهند؛ یا اصولاً روند افزایش مقاومت در آن‌ها

است که تغییرات درصد آهک بیش از حدود ۶ درصد، تأثیر ناچیزی بر مقاومت CBR این مصالح دارد؛ بنابراین می توان چنین نتیجه گرفت که افزایش درصد آهک تا حدود ۶ تا ۷ درصد به افزایش مقاومت CBR مخلوط های تثبیت شده با آهک می انجامد؛ اما پس از آن روند افزایش مقاومت ثابت می شود و در نتیجه درصد آهک بهینه ای نیز برای این دسته مصالح قابل تعیین است که این درصد بهینه در محدوده ۶ تا ۷ درصد خواهد بود. یافته های مطالعه حاضر، تطابق خوبی با مقادیر پیشنهادی آیین نامه ها و نتایج سایر مطالعات انجام شده در این زمینه دارد.

در نتیجه برای آن که بیش ترین مقدار مقاومت مصالح تثبیت شده با آهک به دست آید، باید مقدار ریزدانه این مصالح در محدوده مشخصی قرار گیرد که از این پس آن را درصد رس بهینه (Optimum Clay Content) (OCC) می نامیم. برای این مصالح، در صورت وجود یک دانه بندی پیوسته و متراکم، OCC باید در محدوده ۲۵ تا ۳۰ درصد باشد تا مقاومت مخلوط بیش ترین مقدار ممکن را به دست دهد. هم چنین در بازه بین ۱۵٪ تا ۳۰٪ رس، مقدار مقاومت نمونه های تثبیت شده با آهک دارای روند افزایش خواهند بود حال آن که در درصدهای کم تر این روند ملاحظه نمی شود. نکته دیگر قابل مشاهده از نمودارهای فوق، این



شکل ۵ مقادیر مختلف درصد رس - آهک در یک نمونه سیمانی شده الف) حالت بهینه درصد رس که در آن نقاط برخورد به تعداد کافی وجود دارند ب) افزایش بیش از حد درصد رس و کاهش اصطکاک بین ذرات ج) کمبود مواد سیمانی شده در خاک و کاهش نقاط برخورد بین دانه های درشت خاک {۱۳}

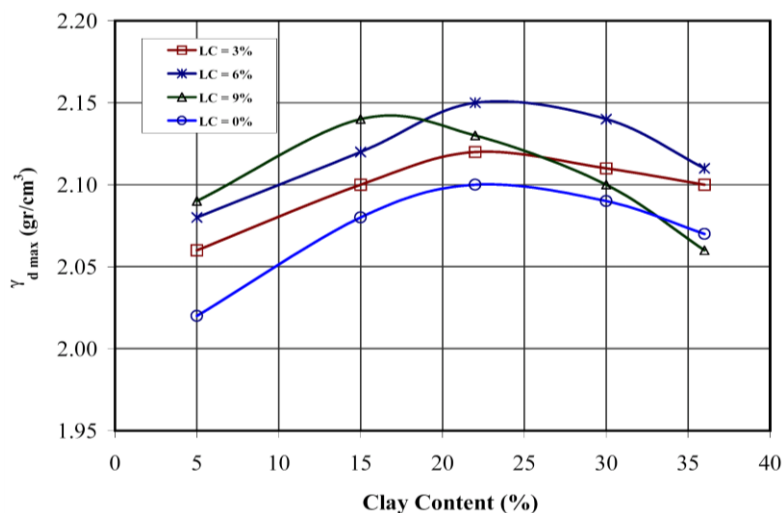


شده با درصد رس بهینه‌ای که از طریق آزمایش CBR (۲۵ تا ۳۰٪) به دست آمده، تطابق خوبی را نشان می‌دهد. بنابراین درصد رس حدود ۲۵ تا ۳۰٪ به عنوان مقدار مناسب و بهینه برای تثبیت ماسه‌ها با آهک نتیجه می‌شود.

بررسی تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک بیشینه  $\gamma_{d_{max}}$  با درصد‌های مختلف آهک، نشان می‌دهد که با افزایش آهک به نمونه‌ها، آهک وارد فضای خالی بین دانه‌ای شده و سبب افزایش مقدار  $\gamma_{d_{max}}$  می‌شود. مشابه آنچه در مورد افزودن مقدار رس ذکر گردید، افزایش بیش‌تر مقدار آهک نیز با نرخ کند شونده پیش رفته و مشاهده می‌شود که درصد‌های آهک بالاتر، با وجود افزایش مقدار  $\gamma_{d_{max}}$ ، تأثیر کم‌تری در روند افزایشی آن ایجاد می‌گردد؛ از طرف دیگر با مشاهده نمودار مربوط به درصد آهک ۹٪ در شکل (۶)، ملاحظه می‌شود که میزان وزن مخصوص خشک بیشینه در درصد رس‌های بالا، کم‌تر از نمونه‌هایی است که درصد آهک پایین‌تری دارند؛ ضمن آن‌که منحنی مربوط به درصد آهک ۶٪ نیز در درصد رس بالا، تقریباً به اندازه آهک ۳٪ در افزایش  $\gamma_{d_{max}}$  اثر گذار است.

### تأثیر درصد رس بر میزان تراکم‌پذیری

میزان تراکم و وزن مخصوص خاک، یکی از شاخص‌های مقاومتی خاک است. معمولاً لایه‌های چگال‌تر به دلیل درگیری بهتر سنگ‌دانه‌ها و قفل و بست بهتر از سختی بالاتری برخوردارند و در نتیجه تحت بارهای وارده، تغییر شکل کم‌تری در آن‌ها ایجاد می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود لایه‌هایی که وزن مخصوص بالاتری دارند، مقاوم‌تر بوده و CBR بیشتری نیز داشته باشند. به منظور بررسی تأثیر تغییرات رس در میزان تراکم‌پذیری لایه‌های تثبیت شده با آهک و همچنین کنترل میزان درصد رس بهینه بر روی نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف رس، آزمایش تراکم مطابق دستورالعمل ASTM D-1557 انجام شده است. نتایج آزمایش تراکم و نحوه تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه بر حسب تغییرات درصد رس در نمونه‌های تثبیت شده در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار  $\gamma_{d_{max}}$  با افزایش مقدار درصد رس ابتدا افزایش یافته و در درصد رس حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. با افزایش بیش‌تر رس، این مقدار به تدریج کاهش می‌یابد. درصد رس تعیین



شکل ۶ نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه نمونه‌های تثبیت شده آهک در مقابل تغییرات درصد رس

دانه بندی های پیوسته و متراکم، بین ۲۵ تا ۳۰ درصد پیشنهاد می شود. بررسی وزن مخصوص بیشینه برای نمونه های تثبیت شده نشان می دهد به ازای همین میزان رس می توان به بهترین وزن مخصوص برای خاک تثبیت شده رسید. مقادیر بیش تر درصد رس به دلیل اشغال فضای بین دانه های درشت خاک و کاهش اصطکاک بین ذرات، به کاهش مقاومت نمونه ها، و درصد رس کم تر از مقدار OCC به کمبود مواد سیمانی، و در نتیجه به عدم افزایش چشم گیر مقاومت CBR نمونه ها می انجامد.

۳- درصد آهک نیز بر مقاومت نمونه های تثبیت شده با آهک تأثیر گذار است. برای ماسه هایی با توزیع مناسب دانه بندی و حاوی مقدار کافی از مصالح ریزدانه رسی، بیش ترین مقاومت در درصدهای آهک (حدود ۶ تا ۷٪) حاصل می شود. افزایش درصد آهک، تقریباً اثری بر مقاومت این مخلوطها ندارد. همچنین بررسی تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه نشان می دهد که افزایش آهک به نمونه ها، بخصوص در درصد رس های پایین، افزایش  $\gamma_{d_{max}}$  را به دنبال دارد.

دلیل آن می تواند بدین علت باشد که افزایش رس و آهک به مخلوط، پس از حد مشخصی جایگزین سنگدانه ها در نمونه های آزمایشگاهی شده و با این عمل، وزن مخصوص نمونه ها کاهش می یابد.

### جمع بندی و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، چندین نمونه خاک ماسه ای رس دار با توزیع دانه بندی مشخص، در آزمایشگاه تهیه و پس از تثبیت با آهک، تحت آزمایش های CBR قرار گرفتند. بخش ریزدانه مصالح از نوع کائولینیت انتخاب گردید تا همه مصالح، دارای خصوصیات ثابتی در قسمت ریزدانه باشند. نتایج حاصل از این تحقیق به صورت خلاصه به این شرح است:

- ۱- به وجود آمدن مواد سیمانی کننده که عامل چسبندگی بین ذرات درشت دانه خاک است، عامل افزایش مقاومت و عدد CBR مصالح تثبیت شده با آهک است. این مقاومت با افزایش درصد مواد سیمانی شده افزوده می شود.
- ۲- مقاومت CBR مصالح رس دار تثبیت شده با آهک در بازه ای موسوم به درصد رس بهینه به بیش ترین مقدار خود می رسد. مقدار رس مذکور برای

### مراجع

1. Hicks, R. G., "Alaska Soil Stabilization Design Guide", Department of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer, Fairbanks, AK, 64 p, (2002).
2. Cernica, J. N., "Geotechnical Engineering: Soil Mechanics", John Wiley and Sons, 453 p., (1995).
3. Boardman, D. I., Glendinning, S. and Rogers, C.D.F., "Development of Stabilization and Solidification in Lime-Clay Mixes", *Géotechnique*, Vol. LI, No. 6, August 2001, pp. 533-544, (2001).
4. Dallas, N. L., "Assessment of In Situ Structural Properties of Lime-Stabilized Clay Subgrades", Transportation Research Record, TRB, 1546, pp. 13-24, (1994).

5. Ingles, O. G. and Metcalf, J. B., "Soil Stabilization, Principles and Practice", John Wiley & Sons, 369 p. (1972).
6. Airey, D. W., "Triaxial Testing of Naturally Cemented Carbonate Soil", *J. of Geotech. Engrg Division*, ASCE, 107 (11), pp. 1379-1398, (1993).
7. Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R.C. and Rad, N. S., "Cemented Sands under Static Loading", *J. of Geotech. Engrg Division*, ASCE, 107 (6), pp. 799-817, (1981).
8. Dupas, J. and Pecker, A., "Static and Dynamic Properties of Sand Cement", *J. of Geotech. Engrg Division*, ASCE, vol. 105 (3), pp. 419-436, (1979) .
9. Mallela, J., Von Quintus, H. and Smith, K. L., "Consideration of Lime- Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design", *The National Lime Association*, Arlington, June 2004, Virginia 22203, 36 p., (2004).
10. Brand, W., "Die Bodenstabilisierung mit Kalk", *Strasse U. Autobahn*, 11(9), pp. 426-432, (1958).
11. Ismail, M. A., Joer, H. A., Randolph, M. F. and Meritt, A., "Cementation of Porous Materials Using Calcite", *Géotechnique*, LL(7), pp. 313-324, (2002).
12. Thompson, M. R., "Suggested Methods of Mixture Design Procedure for Lime- Treated Soils", American Society for Testing and Materials, ASTM, Special Technical Publication, 479, Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes, (1970).

۱۳. ویس کرمی، مهدی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "تأثیر توزیع دانه‌بندی مصالح خاکی بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌ریزهای تثبیت شده با آهک"، گروه مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان، (۱۳۸۳).