



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۲۹ تا ۴۳۸  
Vol. 48, No. 4, Winter 2016, pp. 429-438



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science and Research  
Civil and Environmental Engineering  
(AJSR-CEE)

## تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی

آرمین روحبخشان<sup>۱\*</sup>، بهزاد کلانتری<sup>۲</sup>

۱- عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی  
۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی (گروه عمران)، دانشگاه هرمزگان

(دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۷)

### چکیده

در این پژوهش، لجن ضایعات سنگی بدست آمده از برش سنگ در کارخانجات سنگبری برای تثبیت خاک رس همراه با آهک مورد استفاده قرار گرفت. پودر ریزدانه لجن سنگ با خاک رس و آهک ترکیب و تأثیرهای استفاده از پودر ضایعات سنگی و آهک در تثبیت خاک ریزدانه رسی (CL) در آزمایشگاه بررسی شد. نمونه‌های خاک در حالت طبیعی و زمانی که با درصد‌های مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی ترکیب شدند، برای آزمون‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش حدود آتربریگ، آزمایش دانه‌بندی، آزمایش تراکم استاندارد، آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج بدست آمده کاهش معناداری در پلاستیسیته و تغییر در رطوبت بهینه و وزن واحد حجم بیشینه خاک رس را با افزایش مقادیر پودر ضایعات سنگی و آهک نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا نشان می‌دهند که در زمان‌های عمل‌آوری مختلف، افزودن پودر ضایعات سنگی و آهک سبب افزایش مقدار مقاومت فشاری تا ۶ درصد پودر ضایعات سنگی و ۷ درصد آهک و افزایش مقدار نسبت باربری کالیفرنیا تا ۶ درصد پودر ضایعات سنگی و ۹ درصد آهک شده است و برای درصد‌های بیشتر، مقادیر مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا کاهش می‌یابد.

### کلمات کلیدی:

پودر ضایعات سنگی، آهک، خاک رس، تثبیت خاک، آلودگی محیط‌زیست

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:  
Roohbakhshan, A. and Kalantari, B., 2016. "Stabilization of Clayey Soil with Lime and Waste Stone Powder". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), pp. 429-438.  
DOI: 10.22060/ceej.2016.679  
URL: [http://ceej.aut.ac.ir/article\\_679.html](http://ceej.aut.ac.ir/article_679.html)

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: E-mail: [arminroohbakhshan@yahoo.com](mailto:arminroohbakhshan@yahoo.com)



تثبیت خاک روشی است که در گذشته‌های دور با هدف بهبود خاک برای پژوهش‌های مهندسی خاص معرفی شده است. همچنین خاک رس یکی از مصالح پیچیده و بی‌ثبات است. اما به دلیل قابلیت و هزینه پایین آن، غالباً در اکثر ساخت‌وسازها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ هرچند که در بخش‌های خاص، ممکن است خاک رس برای هدف مورد نظر مناسب نباشد. در برخی موارد نیز این امکان وجود دارد تا مشخصات خاک رس با مقداری افزودنی به خاک مانند آهک تغییر کند. همچنین رفتار خاک رس تنها به مقدار و نوع مصالح سیمانی افزوده‌شده به خاک بستگی نداشته و به ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خاک نیز وابسته است. یکی از مهمترین موادی که خاک را با استفاده از آن تثبیت می‌کنند، آهک است. استفاده از آهک در تثبیت خاک‌ها به عنوان روشی اقتصادی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. اضافه کردن آهک به خاک رس سبب به وجود آمدن واکنش‌هایی که منجر به بهبود در خواص اولیه خاک می‌شوند، می‌گردد. آهک‌هایی که معمولاً برای پایدار کردن خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از: هیدروکسید کلسیم یا آهک شکفته  $(Ca(OH)_2)$ ، آهک زودگیر و یا آهک زنده  $(CaO)$ ، آهک زنده دولومیتی  $(Ca(OH)_2.MgO)$  که در بین آن‌ها، آهک زنده از پرکاربردترین نوع آهک برای تثبیت در اروپا است [۱]. از طرفی دیگر، آهک زنده اثر بهتری را در مقایسه با آهک هیدراته دارد. اما خطر آن برای محیط‌زیست و انسان‌ها زیاد است. واکنش‌های آهک زنده با آب، با تولید گاز دی‌اکسید کربن  $(CO_2)$  و گرما همراه بوده که برای سلامتی انسان زیان‌آور است. بنابراین، کار کردن با آهک هیدراته ایمن‌تر است.

علاوه بر این، زمانی که آهک زنده به صورت دوغاب به خاک اضافه می‌شود، مقاومت بالاتری را نسبت به زمانی که آهک به صورت پودر اضافه شود، خواهد داشت. از این رو، تثبیت خاک با آهک در بزرگراه‌ها، راه‌آهن و ساخت‌وساز فرودگاه برای بهبود اساس و زیر اساس مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از آهک در ساخت‌وساز سدها، دیوارهای حائل و غیره نیز استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر، مسائل زیست‌محیطی سبب تمایل بیشتر به استفاده از محصولات و ضایعات صنعتی به عنوان ماده جایگزین برای ساخت‌وساز شده است. همچنین تثبیت صنعتی با محصولاتی از قبیل خاکستر بادی، سربراه، خاکستر پوسته برنج، پسماندهای معدنی و پودر ضایعات سنگی به صورت مخلوط با آهک و سیمان برای بهبود خواص ژئوتکنیکی<sup>۲</sup> خاک‌های مشکل‌ساز و خواص مهندسی مواد تثبیت‌کننده پوزولانی<sup>۳</sup> به خوبی بدست آمده است. بیش از سی سال است که محققان مطالعاتی را درباره کاربرد خاکستر پوسته برنج به عنوان یک ماده تثبیت‌کننده در بهبود خاک انجام داده‌اند [۲] که برخی از این تحقیق‌ها، نشان می‌دهند که خاکستر پوسته برنج یک ماده امیدبخش برای تثبیت خاک با آهک یا

## ۲- مروری بر استفاده از پودر ضایعات سنگی در ساخت‌وساز و مصالح ساختمانی

اطلاعات بسیار کمی بر روی خواص مهندسی مواد تثبیت‌کننده پوزولانی با استفاده از پودر ضایعات سنگی<sup>۴</sup> (WSP) به عنوان یک ماده افزودنی منتشر شده است. احمد و یوگای<sup>۵</sup> [۸] تحقیقاتی را بر روی گچ بازیافتی که از ضایعات گچ تخته‌ای بدست می‌آید، انجام دادند. ضایعات گچ تخته‌ای از جمله ضایعاتی است که به تازگی در ژاپن برای بهبود زمین در پژوهش‌های مختلف از جمله سدها و بزرگراه‌ها توسط کامی<sup>۶</sup> [۹]، یوگای [۱۰]، احمد [۱۱،۱۲] و همکارانشان مورد بررسی قرار گرفته است. اما استفاده از آن در بهبود زمین، مشکلاتی جدی را به همراه دارد که مربوط به حلالیت گچ است.

دمیرل<sup>۷</sup> [۱۳] اثرهای استفاده از ضایعات گردوغبار سنگ مرمر<sup>۸</sup> (WMD) را به عنوان ماسه ریزدانه بر روی خواص مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار داد. مشاهده شد که افزودن ضایعات گردوغبار سنگ مرمر به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه، تأثیرهای بسزایی را در مقاومت فشاری آن‌ها دارد. گردوغبار سنگ مرمر از تولید سنگ مرمر حاصل می‌شود و در مقیاس بزرگ، ایجاد آلودگی زیست‌محیطی می‌کند. بنابراین، می‌توان برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست (به خصوص در مناطق با تولید بیش از حد سنگ مرمر و برای مصرف منابع طبیعی کمتر)، از این ضایعات در بتن با مقاومت طبیعی به عنوان یک جایگزین برای دانه‌های بسیار ریز استفاده نمود.

به طور کلی، استفاده از ضایعات و مواد بازیافتی علاوه بر بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی زمین در مقابل بارهای وارده، به عنوان یک روش بهینه در کنترل و جلوگیری از آلودگی‌های محیط زیست محسوب شده و صرفه‌جویی‌های اقتصادی را نیز دربر خواهد داشت.

اصولاً استفاده از ضایعات و مواد بازیافتی در پروژه‌های خاکی، اغلب دارای چالش‌هایی مربوط به جنبه‌های زیست‌محیطی و دوام آن‌ها را دربر می‌گیرد. دوام یک تابع حیاتی برای ارزیابی استفاده از ضایعات و مواد بازیافتی در برنامه‌های بهبود زمین است. به طور کلی می‌توان گفت که دوام خاک تثبیت‌شده با ضایعات بر اثر شرایط زیست‌محیطی در مناطق سرد و دارای بارندگی می‌تواند تأثیرهایی اساسی را در عملکرد خود داشته باشد. به همین دلیل، برای ارزیابی عملکرد خاک تثبیت‌شده با ضایعات، اثر شرایط محیطی باید در نظر گرفته شود.

در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی و حالت‌های خشک و اشباع، یکی از مخرب‌ترین اقداماتی است که می‌تواند به سازه‌های خاکی

<sup>4</sup> Waste Stone Powder

<sup>5</sup> A. Ahmed and K. Ugai

<sup>6</sup> T. Kamei et al.

<sup>7</sup> B. Demirel

<sup>8</sup> Waste Marble Dust

<sup>1</sup> Dolomitic Limestone

<sup>2</sup> Geotechnical Properties

<sup>3</sup> Pozzolanic Stabilizer

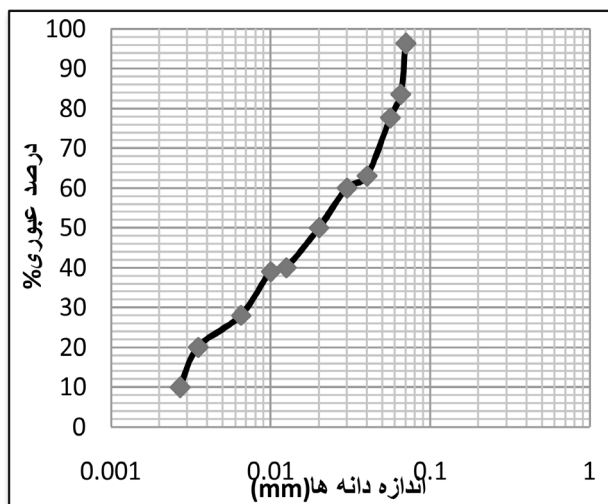
جدول (۱): ترکیبات شیمیایی خاک رس و آهک مصرفی در آزمایش‌های انجام شده

درصد وزنی موجود در آهک	درصد وزنی موجود در خاک	ترکیبات شیمیایی
۲/۲۳	۵۵/۷	SiO <sub>2</sub>
۰/۷۱	۲۶/۶	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۲۶	۰/۵۴	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۸	۰/۷۵	Alkali (K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O)
۷۹/۸	۰/۵	CaO
-	۰/۰۹	TiO <sub>2</sub>
۰/۶۶	-	MgO
۱۶/۲۶	۱۵/۸۲	سایر

(USCS) رس از نوع CL است. منحنی توزیع دانه‌بندی خاک رس نیز با استفاده از استاندارد ASTM D-۴۲۲ در شکل (۱) نشان داده شده است.

#### ۴-۲- آهک و پودر ضایعات سنگی

در این تحقیق، آهک زنده به عنوان عامل تثبیت‌کننده مورد استفاده قرار گرفته بوده و عامل شیمیایی اصلی آهک مورد استفاده اکسید کلسیم (CaO) است. علاوه بر آهک، ماده تثبیت‌کننده دیگری به نام پودر ضایعات سنگی (WSP) نیز بکار رفته و پودر ضایعات سنگی مصرفی در این تحقیق، از کارخانجات سنگبری حاصل از برش سنگ مرمر بدست آمده است. این ضایعات سبب آلودگی زیست‌محیطی زیادی می‌شوند که با بازیافت و استفاده مجدد از آن به عنوان یک ماده افزودنی برای تغییر در مشخصات ژئوتکنیکی خاک، کمک بزرگی به اقتصاد و محیط زیست



شکل (۱): نمودار توزیع دانه‌بندی خاک رس

تثبیت شده مانند پیاده‌رو و یا سازه‌های خاگریزی شده آسیب جدی برساند [۱۴].

بنابراین، تغییرات فصلی آب‌وهوایی به عنوان یک عامل مؤثر در محیط دارای پتانسیل لازم برای تغییر خواص مهندسی خاک تثبیت شده با پودر ضایعات سنگی محسوب می‌شود. با این وجود و با توجه به دانش نویسندگان، مطالعات قبلی در ارتباط با بررسی رفتار خاک تثبیت شده با پودر ضایعات سنگی و آهک تا به حال صورت نگرفته است. بنابراین در این پژوهش، لجن ضایعات سنگی بدست آمده از برش سنگ در کارخانجات سنگبری به منظور آزمون‌های آزمایشگاهی اولیه برای تثبیت خاک رس با آهک به شرح زیر بازیافت شد.

#### ۳- مراحل آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در این تحقیق، شامل مراحل زیر است:  
الف) آزمون‌های آزمایشگاهی اولیه شامل دانه‌بندی، حدود آتربرگ<sup>۱</sup> و آزمایش‌های تراکم استاندارد  
ب) آزمون‌های آزمایش فشاری محدود نشده و نسبت باربری کالیفرنیا<sup>۲</sup> (CBR) در مقادیر مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی

#### ۴- مصالح مصرفی

سه نوع از مصالح گوناگون در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از: خاک رس کائولینیت<sup>۳</sup>، آهک و پودر ضایعات سنگی. همچنین برای آزمایش‌های این پژوهش، هر ترکیب با یک علامت اختصاری به صورت C-L-WSP مشخص شده است. به این ترتیب که C بیانگر خاک رس (Clay) مصرفی، L بیانگر درصد آهک (Lime) موجود در ترکیب و WSP بیانگر درصد پودر ضایعات سنگی موجود در ترکیب است.

#### ۴-۱- خاک رس

خاک رس دارای طیف گسترده‌ای از ترکیبات کانی‌شناسی بوده که از ابعاد و انواع مختلفی از کانی‌های رسی تشکیل شده که مهمترین آن‌ها شامل کائولینیت، ایلیت<sup>۴</sup> و مونت‌موریلونیت<sup>۵</sup> است.  
در این تحقیق، خاک رس مصرفی از نوع رس کائولینیت بوده و ترکیبات شیمیایی کائولینیت و آهک مصرفی در آزمایش‌های این تحقیق مطابق با جدول (۱) است. همچنین طبقه‌بندی خاک رس مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از نمودار خمیری کاساگرانده<sup>۶</sup> رس غیر آلی با خمیری متوسط شناخته شد و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک<sup>۷</sup>

<sup>۱</sup> Aterberg Limit

<sup>۲</sup> California Bearing Ratio

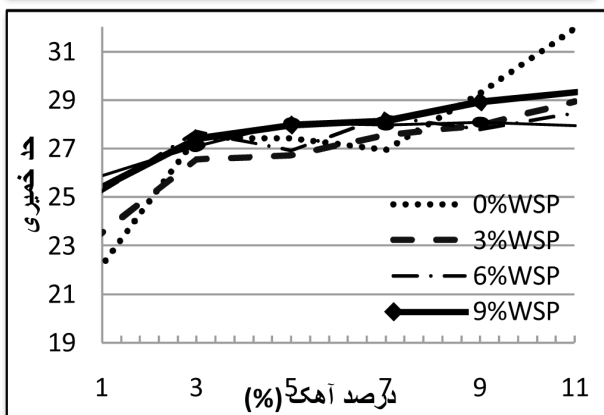
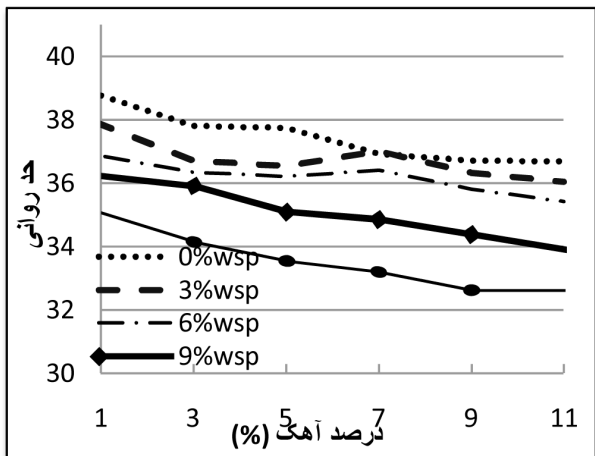
<sup>۳</sup> Kaolinite

<sup>۴</sup> Illite

<sup>۵</sup> Montmorillonite

<sup>۶</sup> Casagrande

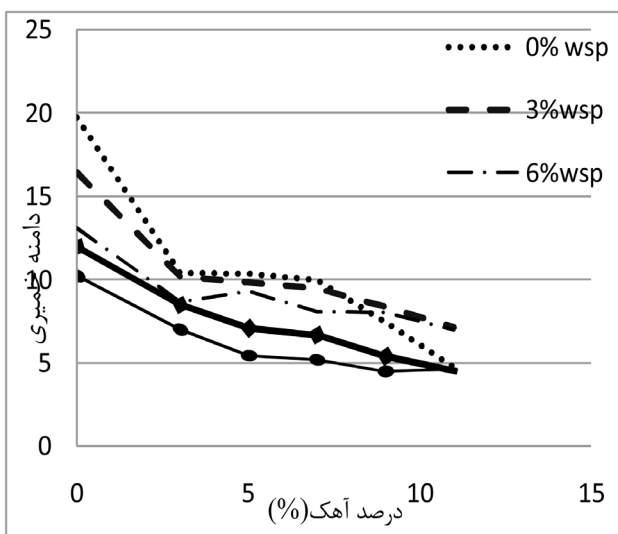
<sup>۷</sup> The Unified Soil Classification System



شکل (۳): تأثیرهای افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی بر حد خمیری و حد روانی خاک رس

### ۵-۱- آزمایش حدود آتربرگ

این آزمایش‌ها بر روی خاک رس و همچنین ترکیب خاک رس با درصد‌های مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی بر طبق استاندارد ASTM D-۴۳۱۸-۹۳ انجام شده است. نتایج آزمایش حدود آتربرگ



شکل (۴): تأثیرهای افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی بر دامنه خمیری خاک رس

می‌شود. همچنین پودر ضایعات سنگی استفاده شده در این تحقیق، از کارخانجات سنگبری واقع در شهرستان بروجرد برداشت شده است. در نهایت، آهک و پودر ضایعات سنگی به صورت پودر با خاک رس مخلوط شدند.

### ۵- آماده‌سازی نمونه‌ها و فرایند آزمایشگاهی

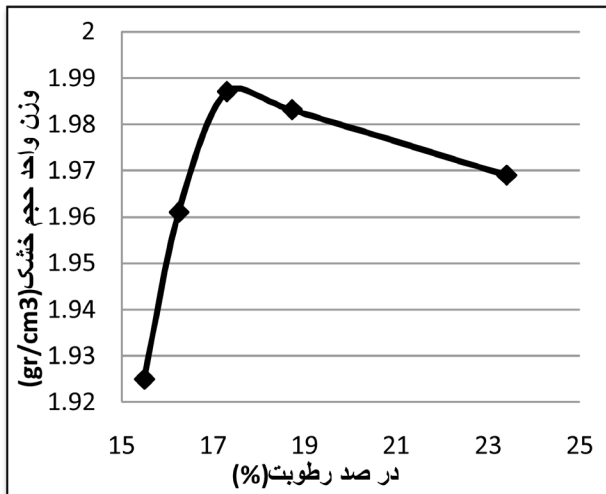
ابتدا خاک رس با مقادیر از پیش تعیین شده آهک و پودر ضایعات سنگی به صورت خشک، به صورت کامل ترکیب شد و دوباره مقدار آب مورد نظر برای هر نمونه به خاک اضافه گردید و برای مدت زمان دو دقیقه، نمونه‌ها با دست ترکیب شدند تا به صورت همگن درآیند. سپس هر نمونه به سرعت در کیسه‌های پلاستیکی مربوط به خود ریخته شد و دوباره در این حالت، کیسه‌های پلاستیکی با عمل لرزش توسط دست برای مدت زمان دو دقیقه تکان داده می‌شوند و در نهایت نیز با خارج کردن هوای درون پلاستیک، کیسه‌های پلاستیکی را مطابق با شکل (۲) گره زده تا رطوبت آن‌ها حفظ شوند. پس از آن، کیسه‌های پلاستیکی برای مدت زمان ۲۴ ساعت در دمای طبیعی اتاق نگهداری شدند. بعد از زمان ۲۴ ساعت، نمونه‌های موجود در کیسه‌های پلاستیکی را قبل از استفاده در آزمایش‌های مورد نظر با عمل لرزش توسط دست تکان داده تا به صورت کامل ترکیب شوند. مقادیر آهک و پودر ضایعات سنگی برای انجام آزمایش‌های حدود آتربرگ و تراکم استاندارد معادل با صفر، ۳، ۶، ۹ و ۱۱ درصد وزنی نسبت به خاک خشک هستند.



شکل (۲): نمونه‌های خاک ترکیب شده در کیسه‌های پلاستیکی

جدول (۲): حدود آتربرگ خاک رس مصرفی

LL	PL	PI
۳۹/۲۶۵	۱۹/۵۲۵	۱۹/۷۴



شکل (۵): منحنی آزمایش تراکم برای خاک طبیعی

بهینه خاک رس و نمونه‌های ترکیب‌شده با درصد‌های مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی بر طبق استاندارد شماره ASTM D-۶۹۸-۷۸ انجام شد. منحنی آزمایش تراکم خاک در شکل (۵) نشان می‌دهد که درصد رطوبت بهینه برابر با ۱۷/۳ درصد و چگالی خشک بیشینه برابر با ۱/۹۸۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب است.

نتایج آزمایش تراکم برای نمونه‌های ترکیب‌شده با درصد‌های مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی به صورت گراف‌های شکل (۶) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های ترکیب‌شده با آهک و پودر ضایعات سنگی منجر به تغییراتی در رطوبت بهینه و مقدار چگالی خشک بیشینه می‌شود و با افزودن مقدار آهک و پودر ضایعات سنگی، رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. همچنین چگالی خشک بیشینه با افزودن آهک و نیز افزودن مقدار پودر ضایعات سنگی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.

هنگامی که آهک به خاک افزوده می‌شود، واکنش آنی تبادل کاتیونی رخ می‌دهد و ذرات خاک رس با یکدیگر لخته می‌شوند. این فرایند منجر به تشکیل حفره‌های هوا در میان ذرات شده و سبب ایجاد یک محیط متخلخل با کمترین وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌شود. علاوه بر این، آب بیشتری نیز برای پر کردن حفرات لازم است؛ به صورتی که رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. اثرهای ذکر شده برای خاک ترکیب‌شده با آهک و پودر ضایعات سنگی در شکل (۷) نشان داده شده است.

### ۵-۳- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

در این تحقیق، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی خاک رس، ترکیب خاک رس همراه با آهک و نیز ترکیب خاک رس همراه با آهک و پودر ضایعات سنگی انجام شده است.

تمامی نمونه‌ها توسط قالب پلاستیکی با رطوبت بهینه بدست آمده از آزمایش تراکم تهیه شدند. این آزمایش تحت کرنش ثابت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد ASTM D-۲۱۶۶ انجام شد. برای آزمایش

بر روی نمونه‌های خاک در حالت طبیعی به صورت جدول (۲) و در زمانی که با درصد‌های مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی ترکیب شوند، در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

از نتایج این آزمایش می‌توان به کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری در اثر افزایش مقادیر آهک و پودر ضایعات سنگی اشاره نمود. همچنین دامنه خمیری تمایل به کاهش را از خود نشان داده است. علت کاهش مشخصات پلاستیسیته خاک در اثر افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی، ترد و شکننده شدن خاک است که به موجب آن، قابلیت اجرایی آن بهبود می‌یابد.

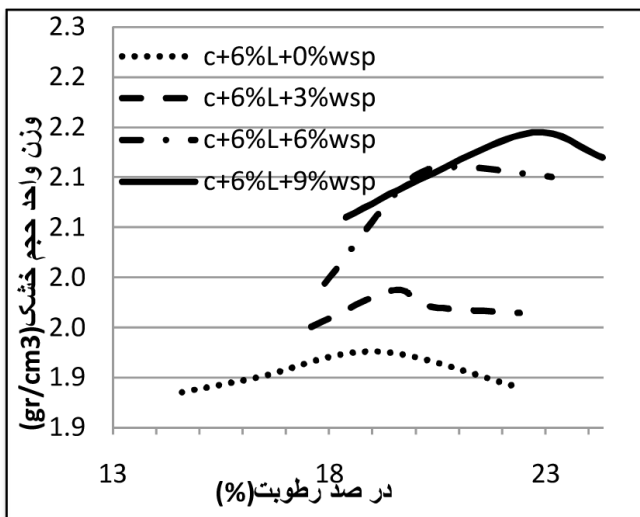
نتایج بدست آمده از شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش آهک به خاک رس استفاده‌شده در این آزمایش، منجر به کاهش حد روانی خاک شده است. همچنین با افزودن پودر ضایعات سنگی، مقدار حد روانی باز هم کاهش می‌یابد؛ به صورتی که مقدار حد روانی در بیشترین مقدار برای خاک رس به تنهایی برابر با ۳۹/۳ بوده و کمترین مقدار حد روانی برای نمونه C+۱۱٪L+۱۱٪WSP است که مقدار آن هم برابر با ۳۲/۶ بوده که در واقع یک کاهش ۶/۶ درصدی رطوبت حد روانی را به همراه داشته است. همان‌طور که از شکل (۳) نیز برمی‌آید، مقدار حد خمیری خاک با افزودن مقادیر آهک افزایش می‌یابد که این روند افزایش، به صورت نسبی با افزودن پودر ضایعات سنگی نیز دیده می‌شود و در برخی از ترکیب‌ها، با کاهش حد خمیری همراه است و با توجه به خاک در نظر گرفته‌شده و تمایل حد روانی به کاهش در برابر افزایش درصد آهک، منجر به کاهش دامنه خمیری شده است.

ممکن است که حد روانی خاک رس با افزایش درصد آهک، کاهش یابد. برنلد در سال ۱۹۸۱ دریافت که حد روانی خاک تحت ترکیب با آهک با توجه به بالاترین مقدار رس کلئیدی موجود در خاک منجر به کاهش مقدار مشخصی می‌گردد [۱۵]. این در حالی است که حد روانی اکثر خاک‌های رسی با افزودن آهک تمایل به افزایش دارد. همچنین مقادیر مربوط به LL و PL بلافاصله بعد از اختلاط فیزیکی دارای اهمیت بوده و پس از آن، مقاومت افزایش می‌یابد و بافت خاک کاملاً متفاوت می‌شود و مقاومت خاک پس از گذشت زمان‌های عمل‌آوری نیز مهم خواهد بود.

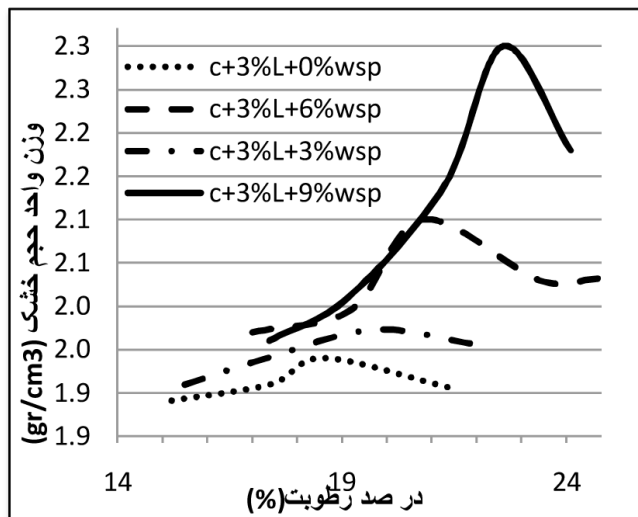
نتایج حاصل از شکل (۴) نشان می‌دهد که افزودن آهک به خاک رس منجر به کاهش دامنه خمیری خاک شده و همچنین مقدار دامنه خمیری با افزودن پودر ضایعات سنگی دوباره کاهش می‌یابد؛ به طوری که مقدار دامنه خمیری در بیشترین مقدار برای نمونه C+۰٪L+۳٪WSP برابر با ۱۶/۴۵ بوده و کمترین مقدار دامنه خمیری نیز برای نمونه C+۹٪L+۱۱٪WSP است که مقدار آن برابر با ۴/۵ بوده که کاهش ۱۱/۹ درصدی رطوبت دامنه خمیری را به همراه داشته است.

### ۵-۲- آزمایش تراکم استاندارد

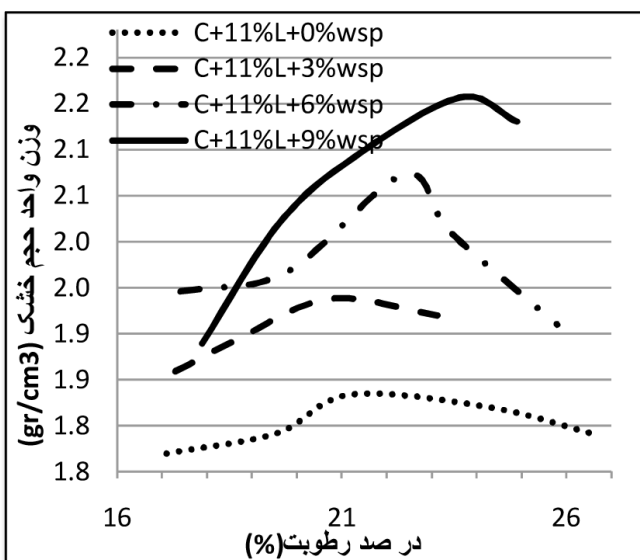
این آزمایش برای تعیین وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت



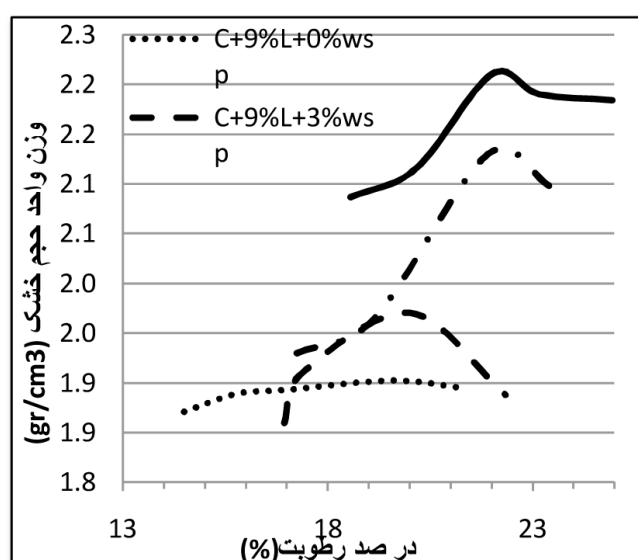
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۶): منحنی آزمایش تراکم برای خاک ترکیب شده با درصد‌های مختلف پودر ضایعات سنگی و آهک (الف) و ۳ درصد آهک، (ب) ۶ درصد آهک، (ج) ۹ درصد آهک و (د) ۱۱ درصد آهک

خاک رس و نمونه‌های تهیه شده با مقادیر مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی برای مدت زمان ۷ و ۲۸ روزه و هر کدام در دو حالت خشک و اشباع عمل آوری شدند. در حالت اشباع و پس از تراکم، تمامی نمونه‌ها در سلفون پیچیده شدند و با توجه به زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه، مطابق با شکل (۸) درون آب نگهداری شدند.

در شکل‌های (۹) تا (۱۲)، مقایسه بین مقاومت فشاری محدود نشده برای نمونه‌های دارای آهک و پودر ضایعات سنگی در دو زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه و در دو حالت خشک و مرطوب صورت پذیرفته است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، تفاوت در زمان عمل آوری به همراه افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی منجر به افزایش مقاومت

مقاومت فشاری محدود نشده، تمامی نمونه‌ها به دو صورت خشک و اشباع انجام شده است. برای این آزمایش، از هر ترکیب از مواد چهار نمونه ساخته شد که دو مورد از نمونه‌ها برای زمان عمل آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه خشک و دو مورد مشابه دیگر از نمونه‌ها نیز برای زمان عمل آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه مرطوب ساخته شد. با توجه به این توضیحات، نهایتاً صد نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره<sup>۱</sup> (UCS) ساخته شده است.

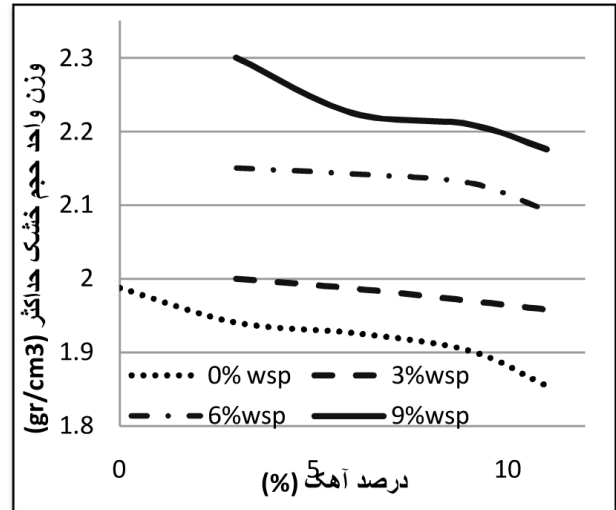
خواص و ویژگی‌های خاک رس بهبود یافته با آهک و پودر ضایعات سنگی به طور قابل توجهی به نوع خاک، مقدار افزودنی، انواع افزودنی و شرایط عمل آوری (از جمله زمان و رطوبت) بستگی دارد. در این مطالعه،

<sup>۱</sup> Unconfined Compressive Strength

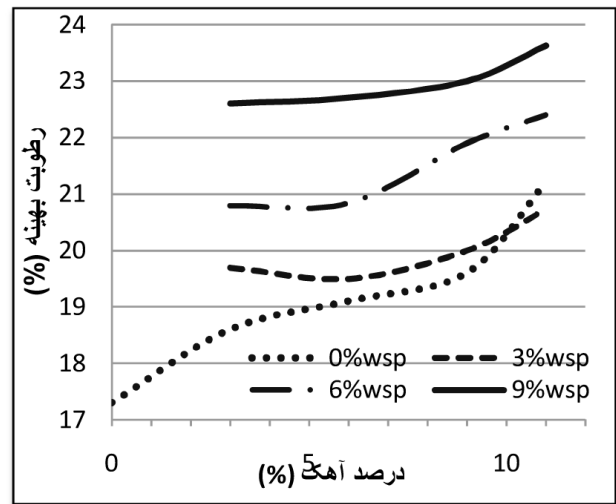


شکل (۸): پوشاندن نمونه‌ها با سلفون و قرارگیری آن‌ها دورن آب

به دو صورت خشک و اشباع انجام گرفت. برای آزمایش‌های CBR، از هر ترکیب از مواد سه نمونه ساخته شد که دو مورد از نمونه‌ها برای زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه خشک و یک مورد از نمونه‌ها نیز برای زمان عمل‌آوری ۹۶ ساعته اشباع ساخته شد. در نهایت ۵۴ نمونه برای آزمایش CBR مطابق با استاندارد ASTM D-۱۵۵۷ ساخته شد.

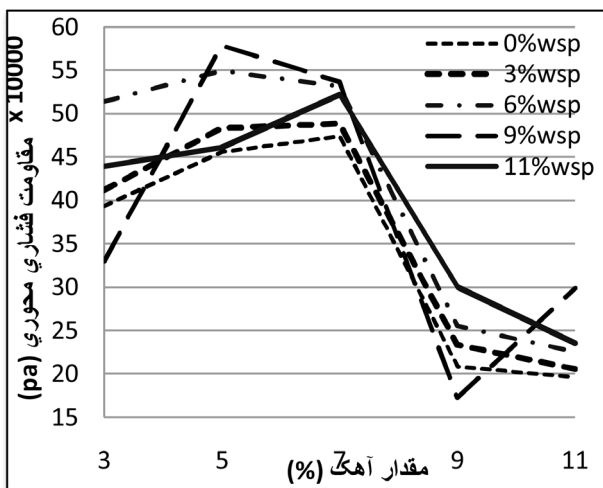


(الف)



(ب)

شکل (۷): تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه و (ب) تغییرات رطوبت بهینه با تغییر درصد آهک و پودر ضایعات سنگی

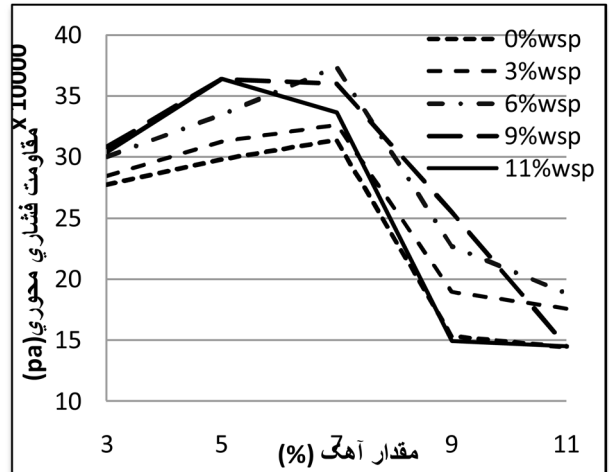
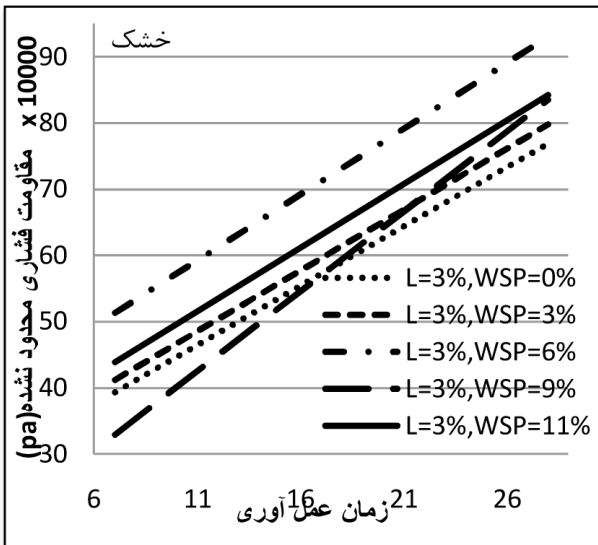


شکل (۹): مقایسه نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در حالت ۷ روزه خشک

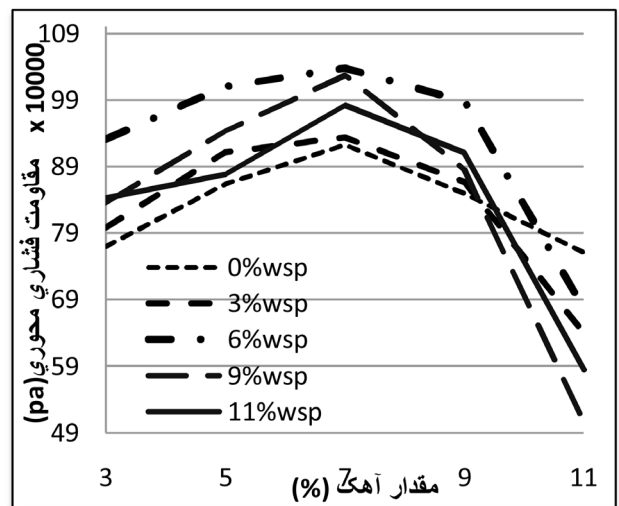
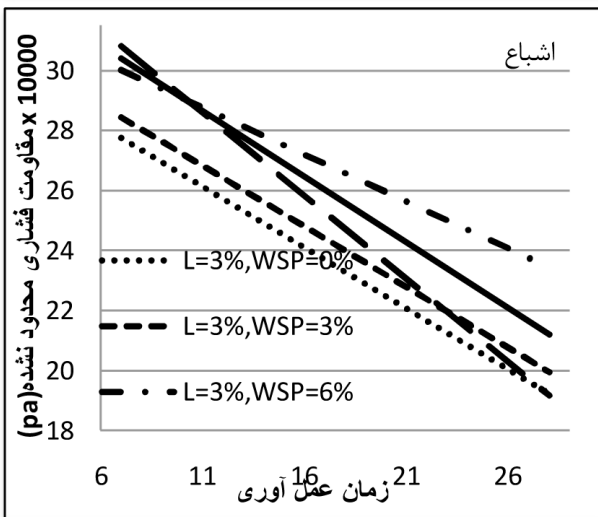
تک‌محوری تا ۶ درصد پودر ضایعات سنگی و ۷ درصد آهک شده است و پس از این مقادیر نیز با کاهش مقاومت تک‌محوری همراه خواهد شد. با توجه به نتایج بدست آمده، عمل‌آوری یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر تثبیت خاک با آهک و پودر ضایعات سنگی است که این اثرها، تابعی از زمان و شرایط عمل‌آوری مانند رطوبت هستند. همان‌طور که در شکل (۱۳) نیز دیده می‌شود، با افزایش زمان عمل‌آوری در حالت خشک، مقاومت تک‌محوری افزایش می‌یابد و در حالت اشباع، مقاومت تک‌محوری کاهش می‌یابد.

#### ۵-۴- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

در این تحقیق، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا بر روی خاک رس، ترکیب خاک رس همراه با آهک و همچنین ترکیب خاک رس همراه با آهک و پودر ضایعات سنگی انجام شده است. تمامی آزمایش‌های CBR

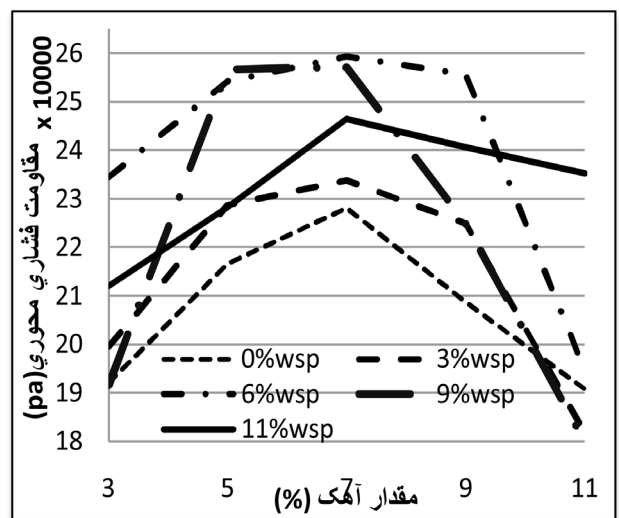
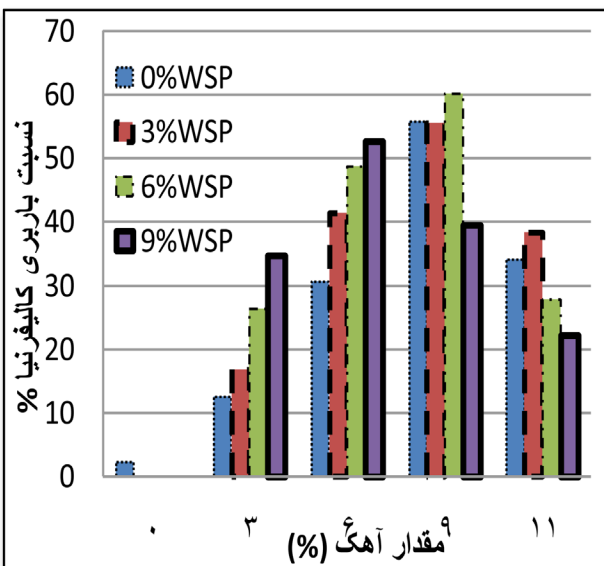


شکل (۱۰): مقایسه نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در حالت ۷ روزه اشباع



شکل (۱۳): مقایسه زمان عمل آوری در مقاومت فشاری محصور نشده نمونه با درصد‌های مختلف پودر ضایعات سنگی و ۳ درصد آهک در حالت خشک و اشباع

شکل (۱۱): مقایسه نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در حالت ۲۸ روزه خشک



شکل (۱۲): مقایسه نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در حالت ۲۸ روزه اشباع

شکل (۱۴): منحنی مقاومت CBR برای نمونه‌های ۹۶ ساعته اشباع



نمونه مشاهده می‌شود و پس از آن، با افزودن این ماده کاهش مقاومت رخ خواهد داد. در واقع می‌توان نقطه عطف و مقدار بهینه پودر ضایعات سنگی را ۶ درصد بیان نمود.

بنابراین، علت کاهش مقاومت برای خاک رس تثبیت‌شده با آهک و پودر ضایعات سنگی بیشتر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که وجود آهک و پودر ضایعات سنگی اضافه، به صورت آزاد در واکنش پوزولانی شرکت ندارد و سبب کاهش مقاومت می‌شود. بنابراین در درصدهای بالاتر، روند تغییرات مقاومت سیری نزولی را طی می‌کند.

مقدار CBR با افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی افزایش می‌یابد و این افزایش مقاومت تا نقطه تثبیت ادامه می‌یابد. نقطه تثبیت در این تحقیق، برای آهک برابر با ۹ درصد و برای پودر ضایعات سنگی برابر با ۶ درصد بدست آمده است.

### ۶- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های تجربی در این تحقیق، تأثیرهای مفیدی را با افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی به خاک رس نشان داد. با توجه به این مسئله، مشخصات ژئوتکنیکی خاک رس ترکیب‌شده با آهک و پودر ضایعات سنگی منجر به نتایج زیر شده است:

- افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی به خاک منجر به افزایش حد خمیری، کاهش حد روانی و کاهش دامنه خمیری می‌شود.
- ترکیب خاک با آهک و پودر ضایعات سنگی سبب تغییر در مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه نمونه‌ها می‌شود.
- مقدار رطوبت بهینه با افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی به خاک افزایش می‌یابد.

- مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه، با افزودن آهک کاهش و با افزودن پودر ضایعات سنگی افزایش می‌یابد.

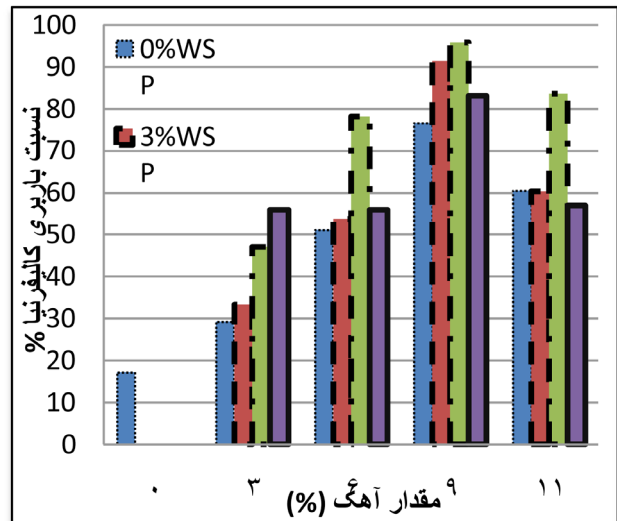
- مقاومت فشاری خاک رس مخلوط‌شده با درصدهای مختلف آهک، روندی افزایشی را داشته است.

- مقدار آهک بهینه در آزمایش CBR معادل با ۹ درصد وزنی بوده و مقدار پودر ضایعات سنگی بهینه تقریباً معادل با ۶ درصد وزنی است.

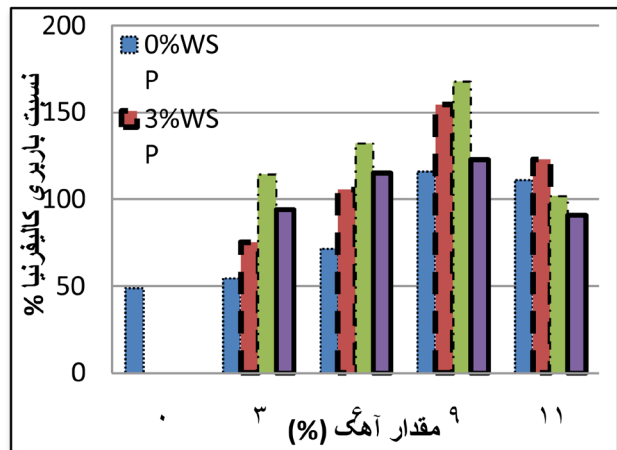
- مقدار آهک بهینه در آزمایش UCS معادل با ۷ درصد وزنی بوده و مقدار پودر ضایعات سنگی بهینه مشابه با آزمایش CBR و تقریباً معادل با ۶ درصد وزنی است.

- استفاده از پودر ضایعات سنگی در خاک رس بر روی مؤلفه‌های مقاومتی مانند مقادیر CBR و UCS تأثیرگذار است. برای مثال، مقدار CBR رس تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک و ۶ درصد پودر ضایعات سنگی، معادل با رس تثبیت‌شده با ۹ درصد آهک است که از رس تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک به تنهایی، ۵۲ درصد مقاومت بیشتر را نشان می‌دهد.

- پودر ضایعات سنگی سبب ایجاد مقدار زیادی آلودگی زیست محیطی می‌شود که با بازیافت و استفاده مجدد از آن به عنوان یک ماده افزودنی برای تغییر در مشخصات ژئوتکنیکی خاک، کمک بزرگی به



شکل (۱۵): منحنی مقاومت CBR برای نمونه‌های ۷ روزه خشک



شکل (۱۶): منحنی مقاومت CBR برای نمونه‌های ۲۸ روزه خشک

اشباع نمونه‌های خاک درون آب قبل از انجام آزمایش CBR، در واقع شبیه‌سازی یکی از بدترین شرایطی است که در آن، خاک تثبیت‌شده ممکن است در معرض بارندگی قرار بگیرد.

در این آزمایش پس از سپری شدن زمان عمل‌آوری، بلافاصله نمونه تحت آزمایش CBR قرار گرفت و نتایج بدست آمده در ادامه بیان شده است. در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶)، نمودار مقاومت CBR برای نمونه‌های ترکیب‌شده با درصدهای مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی برای نمونه‌های ۷ روزه خشک، ۲۸ روزه خشک و ۹۶ ساعته اشباع رسم شده است.

با توجه به نمودارهای مقاومت CBR، مشاهده می‌شود که افزودن مقدار درصد آهک تا ۹ درصد وزنی در تمامی نمونه‌ها افزایش مقاومت را به همراه داشته و پس از آن و با افزودن مقدار بیشتری آهک، کاهش مقاومت رخ خواهد داد. بنابراین، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مقدار آهک بهینه در این نوع خاک رس مصرفی ۹ درصد است و با افزودن مقدار پودر ضایعات سنگی از صفر تا ۶ درصد وزنی، افزایش مقاومت

- [9] Kamei, T.; Kato, T. and Shuku, T.; "Effective Use for Bassanite as Soil Improvement Materials-recycling of Waste Plasterboard," *Geotechnical Society Electronic Journals*, Vol. 2, No. 3, pp. 245–252, 2007.
- [10] Ugai, K. and Ahmed, A.; "Evaluation of Using Gypsum Waste Plasterboard in Ground Improvement," *Proceeding of the Workshop on Recycling Waste Plasterboard*, Memorial Hall, Chuo University, Tokyo, Japan, p. 9, 2009.
- [11] Ahmed, A.; Ugai, K. and Kamei, T.; "Application of Gypsum Waste Plasterboard and Waste Plastic Trays to Enhance the Performance of Sandy Soil," *Proceedings of Geo-Shanghai 2010 International Conference*, Shanghai, China, No. 207, pp. 165–173, 2010.
- [12] Ahmed, A.; Ugai, K. and Kamei, T.; "Investigation of Recycled Gypsum in Conjunction with Waste Plastic Trays for Ground Improvement," *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 1, pp. 208–217, 2011.
- [13] Demirel, B.; "The Effect of the Using Waste Marble Dust as Fine Sand on the Mechanical Properties of the Concrete," *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 5, No. 9, pp. 1372–1380, 2010.
- [14] Khoury, N. N. and Zaman, M. M.; "Environmental Effects of Aggregate Stabilized with Cementation Materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 41–48, 2007.
- [15] Brandl, H.; "Alteration of Soil Parameters by Stabilization with Lime," *10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 3, pp. 587–594, 1981.
- اقتصاد و محیط‌زیست می‌کند. با توجه به نتایج ارائه‌شده، دستاوردهای استفاده از پودر ضایعات سنگی بسیار مفید و حائز اهمیت خواهد بود.
- ۷- مراجع
- [1] Bell, F. G.; "Stabilization and Treatment of Clay Soils with Lime-some Applications," *Ground Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 22–30, 1988.
- [2] Lazaro, R. C. and Moh, Z. C.; "Stabilization of Deltaic Clays with Lime-rice Husk Ash Admixtures," *2<sup>nd</sup> Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore*, pp. 215–223, 1970.
- [3] Rahman, M. A.; "Effect of Cement-rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lateritic Soils," *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 2, pp. 61–65, 1987.
- [4] Ali, F. H.; Adnan, A. and Choy, C. K.; "Use of Rice Husk Ash to Enhance Lime Treatment of Soil," *Canadian Geotech Journal*, Vol. 29, No. 5, pp. 843–852, 1992.
- [5] Muntohar, A. S.; "Influence of Plastic Waste Fibers on the Strength of Lime-rice Husk Ash Stabilized Clay Soil," *Civil Engineering Dimension*, Vol. 11, No. 1, pp. 32–40, 2009.
- [6] Bilgin, N.; Yeprem, H. A.; Arslan, S.; Bilgin, A.; Gunay, E. and Marsoglu, M.; "Use of Waste Marble Powder in Brick Industry," *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp. 449–457, 2012.
- [7] Karakus, A.; "Investigating on Possible Use of Diyarbakir Basalt Waste in Stone Mastic Asphalt," *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 3502–3507, 2011.
- [8] Ahmed, A. and Ugai, K.; "Environmental Effects on Durability of Soil Stabilized with Recycled Gypsum," *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 66, No. 2, pp. 84–92, 2011.