



## بررسی تاثیر اندازه ذرات و شیرابه باطله های زغال سنگ در تثبیت ماسه با سیمان

مجتبی امیری، مرتضی جیریایی شراهی\*

گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

### کلمات کلیدی:

تثبیت خاک  
ماسه  
باطله زغال سنگ  
تراکم استاندارد  
مقاومت فشاری

**خلاصه:** انباشت زباله های زغال سنگ حاصل از صنایع، این مواد را به مصالحی در دسترس و اقتصادی تبدیل کرده است که استفاده از آنها در بهسازی خاک ها به محیط زیست کمک می کند. نتایج تحقیقات نشان داده است اضافه شدن سیمان به زغال سنگ باعث کاهش آلودگی های زغال سنگ می شود. بنابراین می توان باطله زغال سنگ با اندازه های مختلف را با سیمان مخلوط کرد و اختلاط حاصل را در جهت تثبیت و بهسازی خاک ماسه ای در راهسازی و یا در ساخت ستونهای سنگی بکار برد. ایده اصلی تحقیق حاضر بررسی تاثیر اندازه ذرات باطله های زغال سنگ و شیرابه زغال سنگ در تثبیت ماسه با سیمان است. بنابراین درصدهای وزنی مختلفی از سیمان و باطله های زغال سنگ با اندازه های مختلف، اختلاط یافته و خصوصیات فیزیکی و باربری مخلوط های حاصل، با آزمایش های متعددی مانند تراکم استاندارد و مقاومت تک محوری مورد بررسی قرار گرفته است. جهت دستیابی به نسبت اختلاط بهینه، تاثیر نسبت های وزنی سیمان به باطله های زغال سنگ (۰/۱۰۰، ۱۰/۹۰، ۲۰/۸۰، ۳۰/۷۰، ۴۰/۶۰، ۵۰/۵۰) و تاثیر اندازه ذرات باطله های زغال سنگ شامل عبوری از الک شماره ۴۰، الک شماره ۲۰۰ و همچنین محلول باطله زغال سنگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشانگر بهبود در مقاومت خاک های مخلوط با ذرات ریزتر باطله های زغال سنگ است. نتایج آزمایش های تک محوری نشان می دهد که با افزایش نسبت مواد افزودنی از ۲/۵٪ تا ۷/۵٪، مقاومت فشاری افزایش یافته و نسبت اختلاط بهینه مواد افزودنی برابر ۹۰٪ سیمان و ۱۰٪ باطله زغال سنگ است.

### ۱- مقدمه

پایین بودن ظرفیت باربری خاک بستر عموماً در پروژه های عمرانی مانند احداث سازه، خاکریز جاده ها و ... به عنوان یکی از چالش های مهندسی ژئوتکنیک مطرح است. این مشکلات سبب بروز نشست های زیاد و یا در برخی از مواقع موجب بروز نشست ناهمگن می گردند که خرابی سازه و یا عدم کارایی مناسب آن را به دنبال دارند. در این زمینه به راه حل های مختلفی از جمله جایگزینی خاک بستر سست با مصالح مناسب، ایجاد تراکم در لایه های تحت تاثیر بار سازه، تعویض مسیر راه در پروژه های راه سازی، افزایش خاک برداری می توان اشاره نمود. این راه حل ها با توجه به شرایط خاص پروژه، نوع و حجم خاک ممکن است غیر عملی یا پر هزینه باشند. برای بهسازی خاک ها می توان از مواد افزودنی، پلیمرها، ضایعات کارخانه ها و معادن مانند باطله های شیشه، باطله های زغال سنگ و دیگر مواد دور ریز استفاده کرد.

زغال سنگ به عنوان یکی از قدیمی ترین منابع تولید انرژی در جهان است و هر سال به میزان فراوانی در جهان تولید می شود که بخشی از آن در چرخه تولید به عنوان ضایعات صنعتی دفن می گردد. انباشت ضایعات مذکور با وجود ایجاد مشکلات محیط زیستی، این مواد را به مصالحی نسبتاً ارزان قیمت و در دسترس در نواحی مختلف تبدیل کرده است. با توجه به این موضوع و همچنین قابلیت واکنش پوزولانی زغال سنگ، اختلاط و تثبیت خاک با مصالح ارزان قیمتی مانند باطله های زغال سنگ میتواند یک راه حل مناسب برای کاهش نشست خاک با در نظر گرفتن مسائلی از قبیل دسترسی محل پروژه، صرفه اقتصادی، نیروی متخصص، تجهیزات در دسترس باشد. در دهه های اخیر تحقیقات مختلفی در زمینه تثبیت خاک با انواع مواد افزودنی های مختلفی از قبیل کف قیر، قیر امولسیون، خاکستر بادی، سیمان و آهک انجام گرفته است که حاکی از بهبود عملکرد مخلوط های بازیافت شده است.

دوپاس و پکر با مطالعه خواص ماسه سیمان به منظور بهسازی ماسه

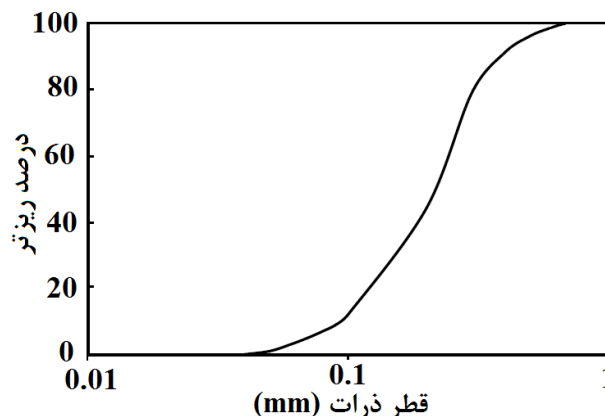
\* نویسنده عهده دار مکاتبات: Jiriay@qut.ac.ir



ترتیب ۰/۴۴،  $3 \text{ kg/m}^3$ ،  $3.04 \text{ kg/m}^3$ ،  $9.54 \text{ kg/m}^3$ ،  $36/95 \text{ kg/m}^3$  است [۱۰].  
 سلیمی و همکاران تاثیر زغال سنگ بر تثبیت خاک با سیمان را مورد بررسی قرار دادند. آنها نمونه های با ۳٪ و ۶٪ سیمان و جایگزینی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ از زغال سنگ را در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد افزودن ۵٪ زغال سنگ جایگزین سیمان در تثبیت با ۶٪ سیمان عملکرد بهتری دارد و باعث افزایش خواص مکانیکی خاک می شود اما افزودن زغال سنگ جایگزین سیمان در تثبیت با ۳٪ سیمان باعث کاهش خواص مکانیکی شده است [۱۱]. تثبیت خاک رس خمیری با زغال سنگ یا خاکستر زغال سنگ و آهک توسط مدرس و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد مقاومت نمونه های تثبیت شده با زغال سنگ و آهک افزایش می یابد و همچنین غلظت آلودگیهای فلزات سنگین زغال سنگ کاهش می یابد [۱۲].  
 ناواگیر و همکاران نشان دادند که برای تثبیت خاک متورم شونده می توان از پسماند زغال سنگ استفاده نمود. آنها نشان دادند که ۳۰ درصد از این ماده افزودنی باعث بهسازی و تثبیت خاک متورم شونده میشود [۱۳]. لازم به ذکر است یکی از آلودگیهای زغال سنگ فلزات سنگین موجود در آن است. همچنین مدرس و همکاران نشان دادند که اضافه نمودن پودر سنگ آهک به ترکیب زغال سنگ و سیمان جهت ساخت روسازی بتنی باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش میزان آلاینده ها بدلیل محیط قلبایی بیشتر می شود [۱۴]. منصوری و همکاران اضافه نمودن زغال سنگ و آهک به ترکیب سیمان و خاک جنگلی که حاوی ریزدانه به مقدار قابل توجه است را مورد تحقیق آزمایشگاهی قرار دادند و نتیجه گرفتند که اضافه نمودن آهک اثرات بهتری چه به لحاظ مقاومت و چه به لحاظ آلاینده های محیط زیستی دارد [۱۵]. شیرین و همکاران در بنگلادش با بررسی تاثیر اضافه نمودن خاکستر بادی به باطله های زغال سنگ نتیجه گرفتند که اضافه نمودن ۱۵٪ خاکستر بادی مقاومت قابل قبولی به زغال سنگ می دهد تا بتوان از آن در لایه زیر اساس راه استفاده نمود [۱۶]. از جمع بندی پیشینه تحقیق می توان دریافت که اولاً زغال سنگ قابلیت واکنش پوزولانی را دارد بنابراین اگر زغال سنگ حاوی مقداری آهک باشد می تواند بخودی خود خواص یک ماده چسبنده مانند سیمان را در مجاورت آب داشته باشد و در صورتیکه فاقد آهک باشد می توان زغال سنگ را با آهک یا سیمان یا هردوی آنها ترکیب نمود و به این ترتیب یک ماده با قابلیت چسباندن پوزولانی را ایجاد نمود. ثانیاً همانطور که اشاره شد آلودگیهای زیست محیطی زغال سنگ برای آب و خاک شامل فلزات سنگین و اسیدهای سمی است که در ترکیب با سیمان یا آهک غلظت آنها به زیر حد مجاز می رسد. با وجود تحقیقات مذکور در

و اجتناب از خطر روان گرایی، نشان داند که با افزایش مقدار ماده سیمانی کننده بر چسبندگی خاک افزوده می شود و خطر روانگرایی کاهش می یابد [۱]. کلاف و همکاران اثر سیمانی شدن مصنوعی و طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، مقاومت نهایی نمونه ها با سیمانی شدن افزایش یافته و با افزایش درجه سیمانی شدن، افزایش حجم در هنگام برش در محدوده کرنش های کوچک تر، افزایش مقاومت تک محوری و باقی ماندن تاثیر ماده سیمانی بعد از گسیختگی به صورت چسبندگی گزارش شده است [۲]. استفاده از مواد دور ریز صنعت و زباله ها در تثبیت خاکها یکی از محورهای پژوهشی است که در سالهای اخیر بدلیل کمک به محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. بررسی آزمایشگاهی بیکدلی و همکاران نشان داد می توان از مصالح تراشه های آسفالت بعنوان جایگزین مصالح دانه ای و تاپرهای فرسوده به عنوان محصور کننده در ستون های سنگی بجای ژئوتکستایل استفاده کرد [۳]. سلطانی و همکاران در پژوهشی دیگر تاثیر افزودن زئولیت و خرده لاستیک در تثبیت ماسه ها با سیمان را مورد بررسی قرار دادند [۴]. گیاهی و همکاران استفاده از مواد دور ریز صنعت چوب و کاغذ مانند لیگنوسولفونات کلسیم را در تثبیت خاک رسی مورد بررسی قرار دادند [۵].

زغال سنگ یکی از منابع انرژی در دنیاست اما ۱۵ تا ۲۰ درصد آن بصورت زباله زغال سنگ برجا می ماند [۶]. تحقیقات نشان داده است که زباله های زغال سنگ قابلیت واکنش پوزولانی را دارند زیرا سیلیس و اکسید آلومینیوم برای ساخت سلیکا و آلومینا در فرایند تثبیت با سیمان یا آهک در ترکیبات آنها وجود دارد، بعنوان مثال فریاس و همکاران زباله های زغال سنگ را به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ملات سیمانی مورد استفاده قرار دادند. بر اساس نتایج آنها، مقاومت های فشاری به دست آمده با ۱۰٪ جایگزینی زباله زغال سنگ بجای سیمان، مقاومت فشاری ۴/۷٪ تا ۸/۳٪ کاهش یافت. همچنین برای ۲۰٪ جایگزینی ۹/۸٪ تا ۱۴/۹٪ مقاومت فشاری کاهش می یابد [۷]. در پژوهشی دیگر نشان داده شد که می توان ذرات زغال سنگ را بصورت جایگزین ۲۰٪ مصالح ماسه ای در بلوکهای کف سازی بتنی استفاده کرد و مقاومت قابل قبولی هم بدست آورد که با این روش با توجه به محیط قلبایی سیمان آلودگیهای اسیدی زغال سنگ خنثی میشود [۸]. ساخت نمونه های بتنی با جایگزین کردن زغال سنگ بجای سیمان توسط نقی پور و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۹]. امیری و همکاران اختلاط پهنه شن، سیمان وزغال را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که مقادیر پهنه نسبت آب به سیمان، سیمان، شن و زغال سنگ به



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک ماسه ای.

Fig. 1. Particle size distribution curve of sandy soil.

نسبتهای اختلاط است و مقاومت فشاری در آزمایشگاه نقش معیار تعیین این نسبتها را دارد. برای آماده سازی نمونه های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده میزان رطوبت بهینه و وزن مخصوص در حالت متراکم مورد نیاز است. برای تعیین میزان رطوبت بهینه و وزن مخصوص نمونه ها از آزمایش تراکم استاندارد استفاده شده است. بنابراین عملکرد خاک ماسه ای آمیخته با مواد افزودنی با استفاده از آزمایش های تراکم استاندارد و مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه های ساخته شده از ترکیب های مختلفی از سیمان و باطله های زغال سنگ مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- خاک

برای انجام آزمایش های این تحقیق، از خاک سواحل شهر بابلسر استان مازندران استفاده شده است. پس از خشک کردن خاک طبیعی، آزمایش های دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM C136 بر روی نمونه ها انجام شد. منحنی توزیع دانه بندی خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با استاندارد ASTM D2487 خاک مورد استفاده در رده ماسه با دانه بندی ضعیف (SP) طبقه بندی می شود. سایر مشخصه های فیزیکی خاک مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. ضمناً پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D3080 بدست آمده است.

مورد استفاده از باطله های زغال سنگ در بتن و تثبیت خاک با سیمان اما پرسشهای دیگری قابل طرح است. باطله های زغال سنگ بصورت ریز و درشت و حتی شیرابه موجود است و تاثیر اندازه ذرات زغال سنگ یا شیرابه بودن آن بر اختلاط در پژوهشهای پیشین بررسی نشده است. در ارتباط با تثبیت ماسه های ریز و سست با سیمان مقادیر هر یک از زغال سنگ و سیمان در اختلاط، پژوهشهای بسیار کمی صورت گرفته است. بنابراین لازم است تحقیق های بیشتری انجام شود تا درک و بینش بهتری از نسبتهای مناسب اختلاط حاصل شود.

ایده اصلی تحقیق حاضر بررسی تاثیر اندازه ذرات باطله های زغال سنگ و شیرابه زغال سنگ در تثبیت ماسه با سیمان است. انتظار می رود که هر یک تاثیر متفاوتی بر نمونه های تثبیت شده داشته باشند. اندازه های ذرات زغال سنگ که در این تحقیق در نظر گرفته شده است شامل عبوری از الک ۴۰، عبوری از الک ۲۰۰ و شیرابه یا محلول زغال سنگ است. همچنین در تحقیق حاضر تاثیر مقادیر متفاوت سیمان شامل ۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪ از وزن مصالح دانه ای خشک، بر ترکیب مورد استفاده در تثبیت مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند تثبیت برای رسیدن به مقادیر و نسبتهای مناسب هر یک از مواد مخلوط شونده در این تحقیق از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده استفاده شده است. هر نسبتی که مقاومت فشاری بیشتری داشته باشد نشان می دهد که در عملیات تثبیت در مقیاس بزرگ مانند تثبیت لایه های روسازی راه و همچنین ساخت ستون سنگی با اختلاط مورد نظر، کارایی بیشتری دارد و مورد استفاده قرار میگیرد. در واقع هدف تعیین

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده.

Table 1. Physical specifications of the soil used.

مقدار	واحد	پارامتر
۱۷/۰۳	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{max}$
۱۴/۸	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{min}$
۰/۲۴	mm	D <sub>50</sub>
۰/۸۱	-	e <sub>max</sub>
۰/۵۶	-	e <sub>min</sub>
۲/۷۸	-	G <sub>s</sub>
۲۷	Degree	$\phi$
۰/۱۱	kg/cm <sup>2</sup>	C

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان استفاده شده.

Table 2. Chemical specifications of the used cement.

بیشینه	کمینه	کانی
۲	۱	LOI
۰/۶۵	۰/۴۵	Na <sub>2</sub> O
۰/۶۵	۰/۴۵	K <sub>2</sub> O
۲/۵	۱/۵	SO <sub>3</sub>
۲/۲	۱/۵	MgO
۶/۵	۶/۳	CaO
۴/۲	۳/۸	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵/۵	۴/۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۲۲/۵	۲۱	SiO <sub>2</sub>

۲-۲- سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش از نوع پرتلند تیپ II و محصول کارخانه سیمان مازندران می باشد. سیمان پرتلند تیپ II نسبت به تیپ I معمولاً کند گیرتر بوده و در زمان گیرش حرارت کمتری تولید می کند. این نوع سیمان در محیط های آب و خاک که غلظت یون سولفات در حد متوسط است و نیز در مناطقی با آب و هوای سرد و یا نسبتاً گرم مناسب است. هم چنین در محیط های حاوی یون های کلر و سولفات به طور توأم و یا در محیط های حاوی غلظت زیاد سولفات قابل استفاده است. مشخصات شیمیایی سیمان استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۳- باطله های زغال سنگ

باطله های زغال سنگ کارخانه زغال شویی البرز مرکزی (واقع در شهر زیرآب) به عنوان تثبیت کننده در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته اند. مشخصات این تثبیت کننده در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده میشود به مقدار کافی ترکیبات سیلیس (% ۲۷/۶) و آلومینیوم (% ۱۵/۰۶) برای تشکیل سیلیکا و آلومینا در باطله های زغال سنگ وجود دارد.

### جدول ۳. مشخصات باطله زغال سنگ.

Table 3. Specifications of coal waste.

کانی	بیشینه
LOI	۴۸/۵
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۱
K <sub>2</sub> O	۱/۹
SO <sub>3</sub>	۱/۶۰۴
Mg O	۰/۹۲
Ca O	۰/۷۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۰۳۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵/۰۹
SiO <sub>2</sub>	۲۷/۶
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۰۵
TiO <sub>2</sub>	۰/۹۳

### ۳- روش انجام آزمایش ها

آزمایش‌های تراکم استاندارد بر اساس استاندارد ASTM D1557 انجام شده است. هدف از انجام این آزمایش تعیین درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک مخلوط و ارتباط بین این دو پارامتر مصالح است. برای هر نسبت اختلاط این آزمایش جداگانه انجام شده است. سه شیوه برای انجام آزمایش تراکم وجود دارد. در این مطالعه با توجه به نوع دانه بندی خاک از روش A استفاده شده است. استاندارد ASTM D2166 بعنوان روش آزمایش تعیین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه ها با روش کنترل کرنش در نظر گرفته شد.

### ۴- برنامه انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش بعد از انجام آزمایش‌های شناسایی اولیه، به منظور دستیابی به نسبت بهینه مواد افزودنی به خاک، خاک مورد مطالعه به ۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪ درصد مواد افزودنی (شامل سیمان و پودر زغال سنگ) اختلاط یافت. در ادامه به منظور بررسی تأثیر باطله های زغال سنگ بر رفتار خاک با حفظ نسبت‌های مواد افزودنی (۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪)، سیمان با نسبت‌های وزنی ۱۰۰ به صفر، ۹۰ به ۱۰، ۸۰ به ۲۰، ۷۰ به ۳۰، ۶۰ به ۴۰ و ۵۰ به ۵۰ با باطله های زغال سنگ مخلوط شد و سپس نمونه ها جداگانه مورد آزمایش‌های تراکم استاندارد قرار گرفتند. پس از تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک هر نسبت اختلاط نمونه های لازم برای آزمایش

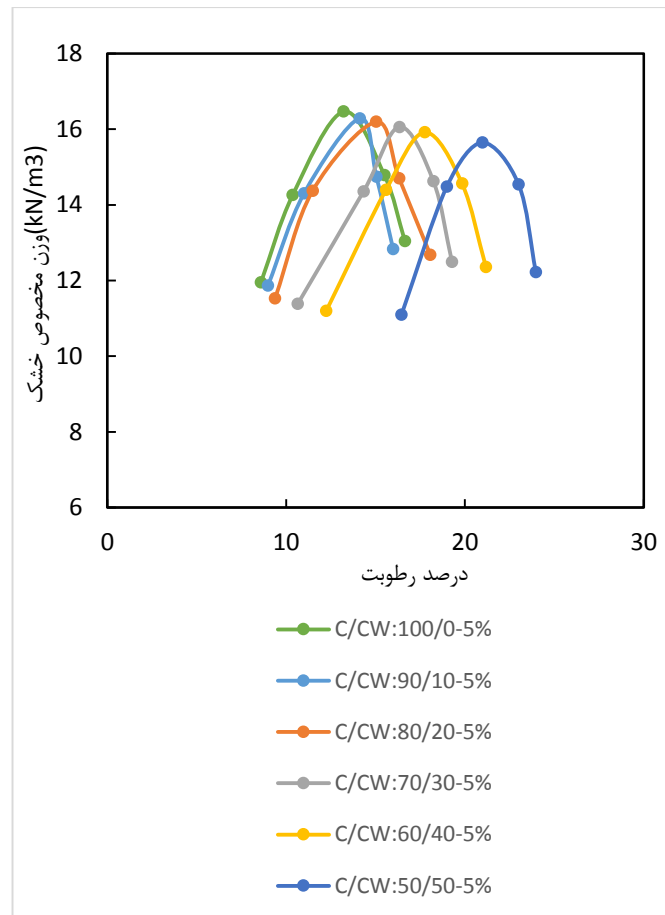
مقاومت فشاری محصور نشده ساخته شد و پس از عمل آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی تأثیر اندازه ذرات باطله زغال سنگ بر عملکرد خاک، آزمایش‌های مذکور در تمامی نسبت‌های سیمان به باطله زغال سنگ، با باطله زغال سنگ عبوری از الک ۴۰، باطله زغال سنگ عبوری از الک ۲۰۰ و شیرابه های باطله زغال سنگ (به صورت محلول) تکرار گردید. نام آزمون‌ها شامل چهار قسمت می باشد؛ قسمت اول شامل نوع و درصد وزنی مواد افزودنی به خاک، قسمت دوم نسبت وزنی کل مواد افزودنی به وزن خاک، قسمت سوم الک عبوری باطله های زغال سنگ و قسمت چهارم سن عمل آوری آزمون بر حسب روز را نشان می دهد. بعنوان مثال:

$$C/CW: ۸۰/۲۰-۵\%-#۴۰-۲۸D$$

نشان می دهد ۵ درصد وزن ماسه مواد افزودنی که ۲۰٪ آن، باطله زغال سنگ (۱٪ وزن ماسه) و ۸۰٪ آن ماده افزودنی، سیمان (۴٪ وزن ماسه) است در نظر گرفته شده است؛ زغال سنگ بصورت مواد دانه ای عبوری از الک ۴۰ استفاده شده است؛ و در نهایت دوره عمل آوری ۲۸ روزه است.

### ۵- نتایج و بحث

به منظور بررسی عملکرد خاک مخلوط با مواد افزودنی و بررسی تأثیر اندازه ذرات باطله های زغال سنگ، آزمایش تراکم استاندارد و مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های ساخته شده از ترکیب های مختلفی از سیمان و باطله های زغال سنگ با اندازه های متفاوت انجام گرفت. باطله های زغال سنگ در سه حالت مختلف شامل عبوری از الک شماره ۴۰،



شکل ۲. نمودار تراکم برای ۵ درصد سیمان و نسبت‌های متفاوت سیمان به باطله زغال سنگ.

Fig. 2. Compaction curve for 5% cement and different ratios of cement to coal waste.

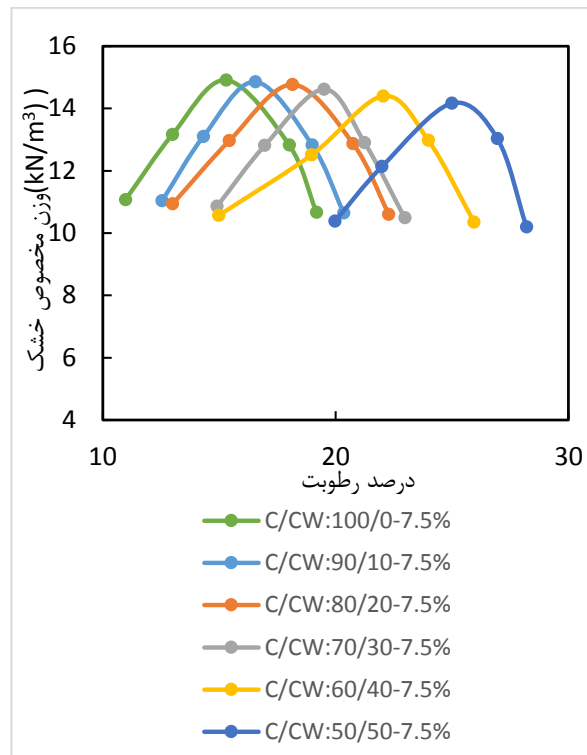
عبوری از الک ۲۰۰ و نیز در حالت شیرابه (محلول) و در هر یک از حالات مذکور با نسبت‌های وزنی مختلف نسبت به سیمان مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که با هدف اطمینان از نتایج حاصل شده و نیز تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر یک از این آزمایش‌ها چند مرتبه تکرار شده و در پایان میانگین آن‌ها آورده شده است.

بهبود و وزن مخصوص خشک بیشینه است که از آزمایش تراکم استاندارد بدست می‌آید. بنابراین در این تحقیق، ابتدا آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های مخلوط خاک با ۵٪، ۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪ سیمان، برای به دست آوردن میزان درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر استفاده از باطله‌های زغال‌سنگ در بهبود عملکرد خاک، نسبت‌های وزنی مختلفی از سیمان با باطله‌های زغال‌سنگ جایگزین و با خاک مخلوط گردید که نتایج آزمایش تراکم استاندارد برای نمونه‌های ساخته شده در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. شکل ۲ برای نمونه‌های حاوی سیمان به میزان ۵٪ از وزن خشک مصالح دانه ای ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده میشود با افزایش درصد باطله‌های زغال‌سنگ نسبت به سیمان از ۰٪ تا ۹۰٪ در مخلوط خاک، به دلیل کمتر بودن وزن مخصوص ویژه ذرات باطله‌های زغال‌سنگ نسبت به سیمان،

درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه از پارامترهای تراکم‌پذیری خاک می‌باشند که بیشتر در مواردی مانند پروژه‌های راه‌سازی و محوطه‌سازی و به‌طور کلی در مواردی که نیاز به بهبود باربری خاک با افزایش میزان تراکم است، مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده نیاز به تعیین درصد رطوبت

#### ۵-۱- آزمایش‌های تراکم

درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه از پارامترهای تراکم‌پذیری خاک می‌باشند که بیشتر در مواردی مانند پروژه‌های راه‌سازی و محوطه‌سازی و به‌طور کلی در مواردی که نیاز به بهبود باربری خاک با افزایش میزان تراکم است، مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده نیاز به تعیین درصد رطوبت



شکل ۳. نمودار تراکم برای ۷/۵ درصد سیمان و نسبت‌های متفاوت سیمان به باطله زغال سنگ.

Fig. 3. Compaction curve for 7.5% cement and different ratios of cement to coal waste.

باطله های زغال سنگ است که می توان از آن بعنوان جایگزین سیمان استفاده نمود.

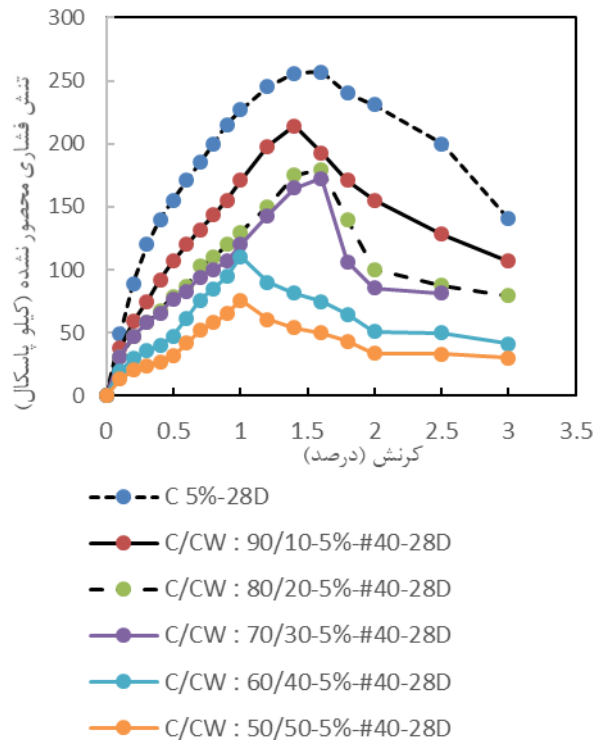
#### ۵-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

پس از انجام آزمایش تراکم استاندارد، با تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده تک محوری بر روی نمونه‌های دارای ۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪ وزنی مواد افزودنی (شامل ترکیب‌های مختلفی از سیمان و باطله های زغال سنگ) انجام گرفت. نمودار تنش- کرنش آزمایش فشاری محصور نشده خاک مخلوط با ۵٪ و ۷/۵٪ درصد افزودنی شامل سیمان و باطله زغال سنگ عبوری از الک شماره ۴۰ در ترکیب با سیمان در سن عمل آوری ۲۸ روز، در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در شکل ۴ نمودار تنش- کرنش نمونه های ۲۸ روزه با ۵٪ سیمان و نسبت‌های متفاوت زغال سنگ عبوری از الک ۴۰ ترسیم شده است. بر اساس شکل ۴، جایگزین کردن بخشی از سیمان با باطله‌های زغال سنگ

میزان وزن مخصوص خشک بهینه از ۱۶/۸ تا ۱۵/۶ کیلونیوتن بر مترمکعب به میزان ۷٪ کاهش پیدا کرده است. و نیز به دلیل انجام فرآیند هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی زغال سنگ، درصد رطوبت بهینه از ۱۳٪ به ۲۱٪ افزایش پیدا کرده است. میزان تغییرات رطوبت بهینه نسبت به درصد زغال سنگ بسیار حساس است که لازم است در انجام آزمایش های مربوط به تثبیت با افزودن زغال سنگ این نکته را لحاظ کرد. حساسیت به رطوبت ممکن است بدلیل میزان ناخالصی آهک موجود در زغال سنگ باشد.

شکل ۳ که برای نمونه های حاوی سیمان به میزان ۷/۵٪ ترسیم شده است نشان می دهد با افزایش درصد باطله های زغال سنگ نسبت به سیمان از ۰٪ تا ۹۰٪ در مخلوط خاک، به دلیل وزن مخصوص کمتر ذرات باطله‌های زغال سنگ نسبت به سیمان، میزان وزن مخصوص خشک بهینه از ۱۵ تا ۱۴/۱ کیلونیوتن بر متر مکعب به میزان ۶٪ کاهش پیدا کرده است. و نیز به دلیل واکنش‌های پوزولانی زغال سنگ، درصد رطوبت بهینه از ۱۵٪ به ۲۵٪ افزایش پیدا کرده است. همین واکنش پوزولانی زغال سنگ مزیت





شکل ۴. منحنی تنش- کرنش نمونه های با ۵٪ سیمان و مواد افزودنی زغال سنگ عبوری از الک ۴۰.

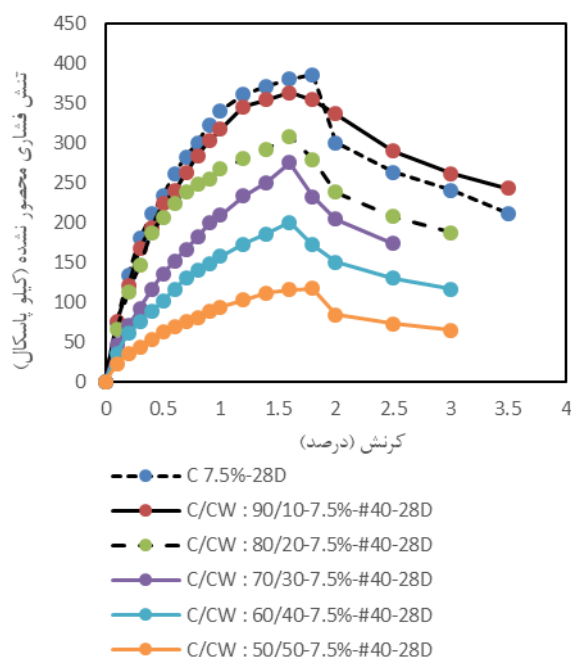
Fig. 4. Stress-strain curve of samples with 5% cement and coal additives passing through sieve #40.

اگر زغال ریزتر شود بازدهی بیشتر می شود.

در شکل ۵ نمودار تنش-کرنش نمونه های ۲۸ روزه با ۷/۵٪ سیمان و نسبتهای متفاوت زغال سنگ عبوری از الک شماره ۴۰ نشان داده شده است. جایگزین کردن بخشی از سیمان با باطله های زغال سنگ عبوری از الک شماره ۴۰ موجب کاهش مقاومت فشاری محصور نشده بیشینه شده است. دلیل این موضوع همانطور که قبلاً اشاره شد ابعاد نسبتاً بزرگ ذرات باطله زغال سنگ می باشد که در واکنش های شیمیایی با سیمان مشارکت نکرده و موجب کاهش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به حالت استفاده از سیمان شده اند. نمودار مربوط به ۰٪ درصد زغال سنگ دارای مقاومت فشاری محصور نشده و همچنین سختی بیشتر نسبت به بقیه نمونه های با افزودن زغال سنگ است. لازم به ذکر است پس از نقطه بیشینه مقاومت، نمودار تنش-کرنش مربوط به ۰٪ زغال سنگ با شیبی برابر با نمودارهای سایر نمونه های با زغال سنگ به مقاومت نهایی بحرانی می رسد. از بین نسبتهای مختلف زغال سنگ نمودار مربوط به ۱۰٪ زغال سنگ مقاومتی برابر ۹۴٪ مقاومت نمونه های با ۰٪ زغال سنگ است. با مقایسه با شکل ۴ می توان نتیجه گرفت هر قدر سیمان بیشتر مورد استفاده قرار گیرد ظرفیت

عبوری از الک شماره ۴۰ موجب کاهش مقاومت فشاری محصور نشده بیشینه شده است. دلیل این موضوع ابعاد نسبتاً بزرگ ذرات باطله زغال سنگ می باشد که بر خلاف باطله های با اندازه ی ریزتر، در واکنش های شیمیایی با سیمان مشارکت نکرده و موجب کاهش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به حالت استفاده از سیمان می گردند. نمودار مربوط به ۰٪ درصد زغال سنگ دارای مقاومت فشاری محصور نشده و همچنین سختی بیشتر نسبت به بقیه درصد های زغال سنگ است. لازم به ذکر است پس از نقطه بیشینه مقاومت، نمودار تنش-کرنش مربوط به ۰٪ زغال سنگ با شیب ملایم به مقاومت نهایی بحرانی میرسد. از بین نسبتهای مختلف زغال سنگ نمودار مربوط به ۱۰٪ زغال سنگ مقاومت بیشتر و رفتار بهتری نسبت به سایر درصد های زغال سنگ دارد. اما همین نمونه های با ۱۰٪ زغال سنگ با شیب تندتری از مقاومت بیشینه به مقاومت نهایی بحرانی میرسند. مقاومت فشاری محصور نشده بیشینه مربوط به ۱۰٪ زغال سنگ ۸۰٪ مقاومت فشاری محصور نشده بیشینه مربوط به ۰٪ زغال سنگ است که در این حالت هم استفاده از زغال سنگ غیر منطقی نیست بدلیل اینکه اولاً آلودگیهای زغال سنگ مهار شده است ثانیاً مصرف سیمان را کاهش داده است اما مطابق با بخشهای بعدی





شکل ۵. منحنی تنش- کرنش نمونه های با ۷/۵٪ سیمان و مواد افزودنی زغال سنگ عبوری از الک ۴۰.

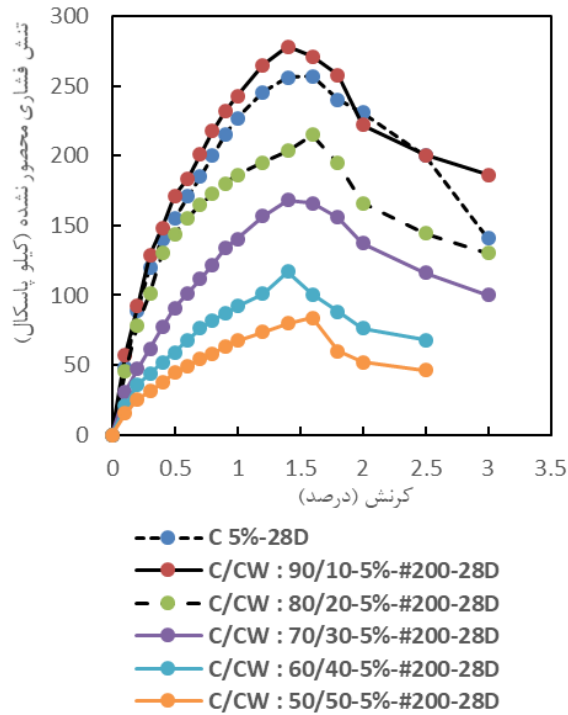
Fig. 5. Stress-strain curve of samples with 7.5% cement and coal additives passing through sieve #40.

باطله های زغال سنگ عبوری از الک شماره ۲۰۰ موجب بهبود قابل توجه مقاومت فشاری محصور نشده (به میزان ۱۰٪) و همچنین سختی نمونه ها قبل از نقطه بیشنه شده است. حتی رفتار پس از نقطه بیشینه و مقاومت نهایی بهبود قابل توجهی یافته است. دلیل این امر سهیم شدن زغال سنگ در واکنش پوزولانی است. مقایسه شکل های ۶ و ۷ با شکل های ۴ و ۵ نشان می دهد که هر قدر زغال سنگ ریزتر باشد بیشتر در واکنشها پوزولانی شرکت می کند و تثبیت بهتر انجام میشود. بدیهی است که در این نمودارها به دلیل خاصیت تثبیت کنندگی سیمان و انجام واکنش های شیمیایی با ذرات خاک، هر چقدر مقدار سیمان افزایش پیدا کند، میزان واکنش های شیمیایی در نمونه ها با توجه به سن عمل آوری (۲۸ روزه) افزایش می یابد که موجب افزایش مقاومت فشاری بیشینه در نمونه های حاوی مقادیر بیشتر سیمان می گردد.

نمودار تنش-کرنش مربوط به آزمایش محصور نشده خاک مخلوط با ۵ و ۷/۵ درصد سیمان و مقادیر متفاوت باطله زغال سنگ بصورت شیاره یا محلول، در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در شکل ۸ نمودار تنش-کرنش نمونه های ۲۸ روزه با ۵٪ سیمان و نسبت های متفاوت زغال سنگ بصورت محلول ترسیم شده است. جایگزین کردن ۱۰ درصد از سیمان

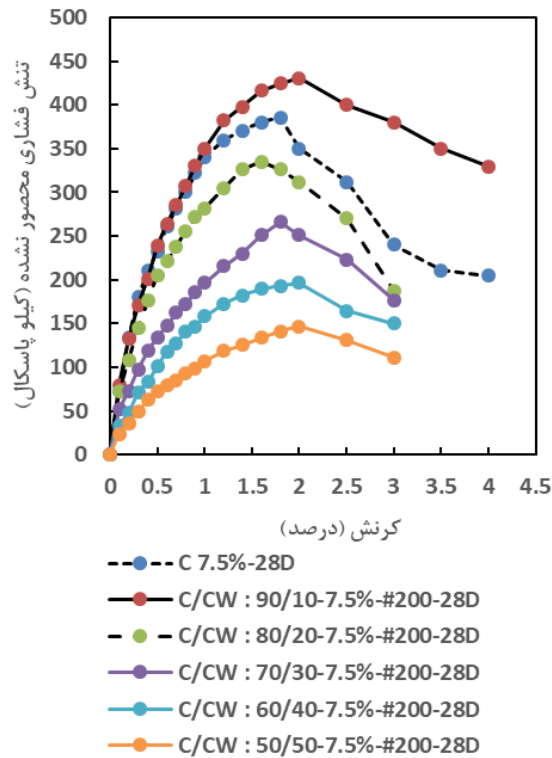
واکنش پوزولانی زغال سنگ بیشتر می شود چرا که نمودار مربوط به ۱۰٪ زغال سنگ بسیار نزدیک به نمودار تنش-کرنش مربوط به ۷٪ زغال سنگ شده است. سختی نمونه ها با اضافه شدن زغال سنگ کاهش یافته و نمودارها پس از نقطه بیشینه مقاومت نهایی کمتری نسبت به نمونه های با ۷٪ زغال سنگ دارند.

نمودار تنش-کرنش مربوط به آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده خاک مخلوط با باطله زغال سنگ عبوری از الک شماره ۲۰۰ در حالت های مختلف ترکیب با سیمان ۵٪ و ۷/۵٪، در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. در شکل ۶ نمودار تنش-کرنش نمونه های ۲۸ روزه با ۵٪ سیمان و نسبت های متفاوت زغال سنگ عبوری از الک ۲۰۰ ترسیم شده است. بر اساس شکل ۶ جایگزین کردن ۱۰٪ از سیمان با باطله های زغال سنگ، موجب افزایش مقاومت فشاری محصور نشده (۱۰٪ افزایش) و سختی نمونه های قبل از نقطه بیشینه می گردد. شیب نمودار بعد از نقطه بیشینه و همچنین مقاومت نهایی بحرانی نمونه با ۱۰٪ زغال سنگ کمی بیشتر از نمونه های با ۷٪ زغال سنگ است. در شکل ۷ نمودار تنش-کرنش نمونه های ۲۸ روزه با ۷/۵٪ سیمان و نسبت های متفاوت زغال سنگ عبوری از الک شماره ۲۰۰ نشان داده شده است. جایگزین کردن ۱۰٪ از سیمان با



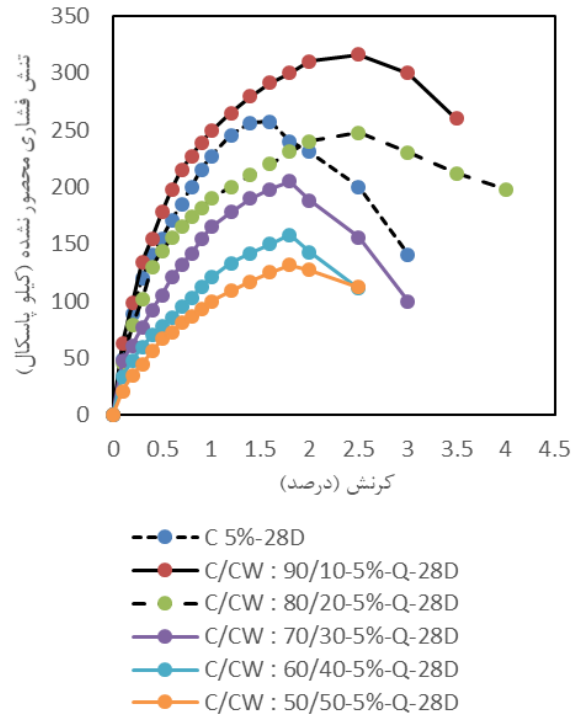
شکل ۶. منحنی تنش- کرنش نمونه های با ۵٪ سیمان و مواد افزودنی زغال سنگ عبوری از الک ۲۰۰.

Fig. 6. Stress-strain curve of samples with 5% cement and coal additives passing through sieve #200.



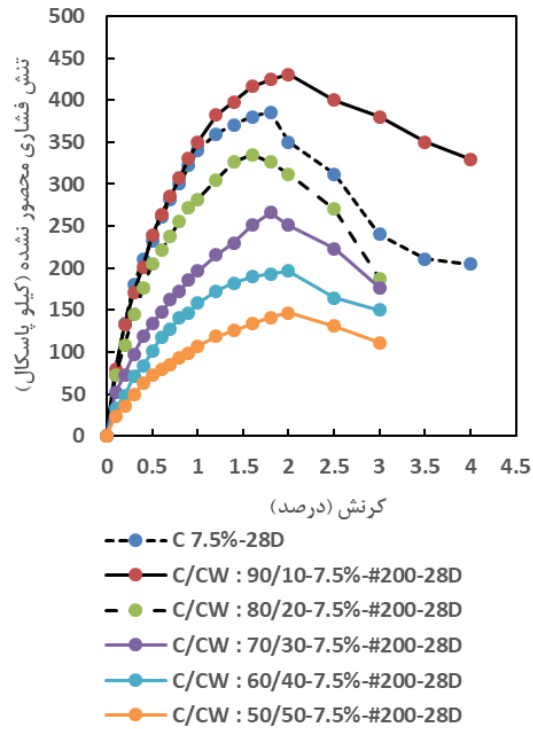
شکل ۷. منحنی تنش- کرنش نمونه های با ۷/۵٪ سیمان و مواد افزودنی زغال سنگ عبوری از الک ۲۰۰.

Fig. 7. Stress-strain curve of samples with 7.5% cement and coal additives passing through sieve #200.



شکل ۸. منحنی تنش- کرنش نمونه های با ۵٪ سیمان و مواد افزودنی باطله زغال سنگ در حالت محلول.

Fig. 8. The stress-strain curve of samples with 5% cement and coal waste additives in solution form.



شکل ۹. منحنی تنش- کرنش نمونه های با ۷/۵٪ سیمان و مواد افزودنی باطله زغال سنگ در حالت محلول.

Fig. 9. The stress-strain curve of samples with 7.5% cement and coal waste additives in solution form.

با باطله های زغال سنگ، موجب افزایش مقاومت بیشینه تک محوری (به میزان ۲۴٪) و سختی نمونه ها قبل از نقطه بیشینه می گردد. شیب نمودار بعد از نقطه بیشینه و همچنین مقاومت نهایی بحرانی نمونه با ۱۰٪ زغال سنگ بیشتر از نمونه های با ۰٪ زغال سنگ است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده میشود محلول باطله ذغال سنگ بدلیل سطح واکنش پوزولانی بالاتر، عملکرد بهتری نسبت به باطله ذغال سنگ عبوری از الکهای به شماره ۲۰۰ و شماره ۴۰ دارد. در شکل ۹ نمودار تنش- کرنش نمونه های ۲۸ روزه با ۷/۵٪ سیمان و نسبتهای متفاوت محلول زغال سنگ نشان داده شده است. جایگزین کردن ۱۰٪ از سیمان با محلول باطله های زغال سنگ باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بیشینه (به میزان ۲۷٪) و همچنین سختی نمونه ها قبل از نقطه بیشینه شده است. ولی در سایر نسبت های اختلاط (۲۰ به ۸۰، ۷۰ به ۳۰ و ... و ۵۰ به ۵۰) به دلیل عدم وجود مقادیر کافی سیمان این واکنش ها به میزانی که سبب افزایش مقاومت بیشینه گردد، رخ نداده اند. رفتار پس از نقطه بیشینه دارای دو شیب است که یکی از آنها نزول شدیدتری دارد و دیگری هم شیب نسبت به حالت بدون زغال سنگ است. بطور کلی زغال سنگ بصورت محلول قابلیت واکنش پوزولانی بیشتری دارد. همچنانکه مقایسه شکل های ۸ و ۹ با شکل های ۶ و ۷ و شکل های ۴ و ۵ نشان می دهد که زغال سنگ محلول قابلیت واکنش پوزولانی بیشتری دارد و تثبیت بهتر انجام میشود.

## ۶- جمع بندی نتایج

در این پژوهش بعد از انجام آزمایش های شناسایی اولیه، به منظور دستیابی به نسبت بهینه مواد افزودنی به خاک، خاک مورد مطالعه به ۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪ درصد مواد افزودنی شامل سیمان و پودر زغال سنگ اختلاط یافت. در ادامه به منظور بررسی تأثیر باطله های زغال سنگ بر رفتار خاک با حفظ نسبت های مواد افزودنی ۲/۵٪، ۵٪ و ۷/۵٪، سیمان با نسبت های وزنی ۱۰۰ به صفر، ۹۰ به ۱۰، ۸۰ به ۲۰، ۷۰ به ۳۰، ۶۰ به ۴۰ و ۵۰ به ۵۰ با باطله های زغال سنگ مخلوط شد و سپس نمونه ها جداگانه مورد آزمایش های تراکم استاندارد قرار گرفتند. پس از تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک هر نسبت اختلاط نمونه های لازم برای آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده ساخته شد و پس از عمل آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی تأثیر اندازه ذرات باطله زغال سنگ بر عملکرد خاک، آزمایش های مذکور در تمامی نسبت های سیمان به باطله زغال سنگ، با باطله زغال سنگ عبوری از الک ۴۰، باطله زغال سنگ عبوری

از الک ۲۰۰ و شیرآبه های باطله زغال سنگ به صورت محلول تکرار گردید. نتایج نشان داد که در حالت استفاده از سیمان به عنوان افزودنی در خاک، افزایش درصد سیمان موجب کاهش وزن مخصوص بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه می گردد. به طوری که بیشترین وزن مخصوص بیشینه در حالت اختلاط خاک با ۲/۵٪ سیمان حاصل شده است. با افزایش باطله های زغال سنگ نسبت به سیمان به دلیل کمتر بودن وزن مخصوص ویژه ذرات باطله های زغال سنگ نسبت به سیمان وزن مخصوص بیشینه کاهش می یابد و نیز به دلیل انجام واکنش های پوزولانی درصد رطوبت بهینه افزایش می یابد. با افزایش درصد سیمان اضافه شده از ۲/۵٪ به ۵٪ درصد و سپس ۷/۵٪، مقاومت فشاری محصور نشده بیشینه نمونه ها افزایش می یابد. جایگزین کردن بخشی از سیمان با باطله های زغال سنگ عبوری از الک شماره ۴۰، به دلیل عدم مشارکت در واکنش های شیمیایی با سیمان، موجب کاهش مقاومت فشاری تک محوری بیشینه نسبت به حالت استفاده از سیمان شده و رفتار نمونه را ترد تر کرده است. جایگزین کردن ۱۰٪ از سیمان با باطله های زغال سنگ عبوری از الک ۲۰۰ و یا محلول، به دلیل ایجاد واکنش های شیمیایی و پوزولانی بین ذرات سیمان و باطله های زغال سنگ مقاومت بیشینه تک محوری افزایش می یابد و در واقع درصد بهینه اختلاط باطله های زغال سنگ با سیمان به نسبت وزنی ۱۰ به ۹۰ حاصل شده است. اختلاط سیمان با درصد های وزنی یکسان از باطله های زغال سنگ، مشخص می گردد که اختلاط سیمان با محلول باطله زغال سنگ نسبت به زغال سنگ عبوری از الک ۲۰۰ منجر به مقاومت بیشینه تک محوری بیشتری شده است. هر چقدر ذرات باطله های زغال سنگ ریزتر باشند، منجر به مقاومت بیشینه بزرگ تری نسبت به حالت بدون استفاده از باطله های زغال سنگ می گردد. در حالتی که از محلول باطله زغال سنگ استفاده می گردد، به دلیل اشباع بودن باطله های زغال سنگ و انجام هر چه بهتر فرآیند هیدراتاسیون سیمان، مقاومت بیشینه بیشتری حاصل می گردد.

## منابع

- [1] J.-M. Dupas, A. Pecker, Static and Dynamic Properties of Sand-Cement, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105(3) (1979) 419-436.
- [2] G.W. Clough, N. Sitar, R.C. Bachus, N.S. Rad, Cemented Sands under Static Loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 107(6) (1981) 799-817.
- [3] H. Bikdeli, M. Jiryaei Sharahi, B. Badarloo, A.

- concrete using response surface methodology, *Journal of Building Engineering*, 45 (2022) 103472.
- [11] M. Taslimi Paein Afrakoti, A. Janalizadeh Choobbasti, M. Ghadakpour, S. Soleimani Kutanaei, Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil, *Construction and Building Materials*, 239 (2020) 117848.
- [12] A. Modarres, Y.M. Nosoudy, Clay stabilization using coal waste and lime—Technical and environmental impacts, *Applied clay science*, 116 (2015) 281-288.
- [13] O.P. Navagire, S.K. Sharma, D. Rambabu, Stabilization of black cotton soil with coal bottom ash, *Materials Today: Proceedings*, 52 (2022) 979-985.
- [14] A. Modarres, S. Hesami, M. Soltaninejad, H. Madani, Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement—environmental and technical assessment, *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8) (2018) 748-761.
- [15] S. Mansouri, M. Nasiri, A. Modarres, Technical and environmental impacts of coal waste used as a soil stabilizer in construction projects of forest roads, *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 42(3) (2021) 491-500.
- [16] M.S. Shirin, M.M. Islam, M. Kumruzzaman, Stabilization of coal mine waste and its practical application as a road subgrade, *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 5(5) (2020) 51-56.
- Golabchifard, Experimental investigation of using reclaimed asphalt pavement aggregate in scrap tire encased stone column, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(10) (2021) 4505-4518.
- [4] M.S. Soltani, M. Jiryaei Sharahi, M. Amelsakhi, Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 759-774.
- [5] A. Giahi, M. Jiryaei Sharahi, B. Mohammadnezhad, Evaluation of a by-product and environmental-friendly chemical additives for clay soils with different mixing and curing methods, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(2) (2021) 659-674.
- [6] L. Li, Y. Lei, D. Pan, Economic and environmental evaluation of coal production in China and policy implications, *Natural Hazards*, 77(2) (2015) 1125-1141.
- [7] M. Frías, M.S. De Rojas, R. García, A.J. Valdés, C. Medina, Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement, Cement and concrete composites, 34(5) (2012) 678-683.
- [8] C.R. dos Santos, J.R. do Amaral Filho, R.M.C. Tubino, I.A.H. Schneider, Use of coal waste as fine aggregates in concrete paving blocks, (2013).
- [9] M. Naghipour, M. Tazikeh, B. Hoseinian, The Use of Coal Waste in Concrete Construction & Survey of Compressive Strength, *Concrete Research*, 9(2) (2017) 43-53.
- [10] H. Amiri, S. Azadi, M. Karimaei, H. Sadeghi, D. Farshad, Multi-objective optimization of coal waste recycling in

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Amiri, M. Jiryaei Sharahi, Investigation of the effect of particle size and coal waste solution on sand stabilization with cement, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(7) (2023) 1323-1336.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21428.7719](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21428.7719)



