ارزیابی مقاومت و تراکم‌پذیری باطله سنگ‌آهن تثبیت‌شده با ژئوپلیمر

چکیده

انباشت باطله‌های سنگ‌آهن به دلیل اشغال زمین، ایجاد گردوغبار و محدودیت کاربردهای ژئوتکنیکی، از چالش‌های زیست‌محیطی و مهندسی است. در این پژوهش، اثر فعال‌سازی قلیایی با هیدروکسید سدیم (NaOH) و افزودن سرباره دانه‌ای آسیاب‌شده کوره بلند (GGBFS) بر رفتار باطله سنگ‌آهن بررسی شد. نوآوری پژوهش، ارزیابی هم‌زمان اثر غلظت NaOH، مقدار GGBFS، زمان عمل‌آوری و فشار محصورکننده بر مقاومت برشی و تراکم‌پذیری بود. غلظت NaOH در سطوح صفر، ۱، ۳ و ۵ مولار و GGBFS در سطوح صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی بررسی شد. نمونه‌ها با آزمایش تراکم استاندارد، سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده در فشارهای محصورکننده ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال، تحکیم یک‌بعدی و میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی شد. نمونه‌های سه‌محوری پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط رطوبتی پس از عمل‌آوری، آزمایش شد. در فشار محصورکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال و غلظت ۵ مولار، افزودن ۹ درصد GGBFS بیشینه تنش انحرافی را از ۱۲۶۵ به ۵۸۲۴ کیلوپاسکال افزایش داد. افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز نیز این مقدار را در نمونه حاوی ۹ درصد GGBFS و محلول یک مولار از ۱۸۱۶ به ۶۲۶۰ کیلوپاسکال رساند. بیشترین چسبندگی و زاویه اصطکاک ظاهری به‌ترتیب ۷۵۰ کیلوپاسکال و ۵۱٫۶۱ درجه بود. شاخص‌های فشردگی Cc و باربرداری Cs نیز از ۰/۶۵۱ و ۰/۰۳۲ در نمونه مرجع به ۰/۰۳۲ و ۰/۰۰۷ در ترکیب ۳ مولار و ۹ درصد GGBFS کاهش یافت. تصاویر SEM افزایش تماس میان ذرات و نواحی پیوسته‌تر را نشان داد. در مجموع، استفاده هم‌زمان از NaOH و GGBFS موجب افزایش مقاومت و محدودشدن تغییرشکل حجمی باطله سنگ‌آهن شد.

واژه‌های کلیدی: *آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده، باطله سنگ‌آهن، تحکیم یک‌بعدی، سرباره دانه‌ای آسیاب‌شده کوره بلند، هیدروکسید سدیم*

Strength and Compressibility Assessment of Iron Ore Tailings Stabilized with a Geopolymer

Abstract

This study investigated the effects of sodium hydroxide activation and ground granulated blast-furnace slag addition on the mechanical behavior and compressibility of iron ore tailings. The novelty of the study lies in the integrated evaluation of NaOH concentration, GGBFS content, curing time, and confining pressure. NaOH concentrations of 0, 1, 3, and 5 M and GGBFS contents of 0, 3, 6, and 9 wt.% were investigated. Standard compaction tests, unconsolidated undrained triaxial tests under confining pressures of 100, 200, and 300 kPa, one dimensional consolidation tests, and scanning electron microscopy were conducted. The triaxial specimens were tested at their as cured moisture condition after 7 and 28 days of curing. At a confining pressure of 200 kPa and a NaOH concentration of 5 M, increasing GGBFS content from 0 to 9% increased the peak deviator stress from 1,265 to 5,824 kPa. Extending curing from 7 to 28 days increased the peak deviator stress of the specimen containing 9% GGBFS and 1 M NaOH from 1,816 to 6,260 kPa. The maximum apparent cohesion and friction angle were approximately 750 kPa and 51.61°, respectively. The compression and unloading indices decreased from 0.651 and 0.032 in the untreated specimen to 0.032 and 0.007 in the mixture containing 3 M NaOH and 9% GGBFS. SEM observations showed broader particle contacts and more continuous regions in the stabilized specimens, particularly in the mixture containing the higher GGBFS content. The combined treatment increased strength and reduced volumetric deformation.

Keywords: *granulated blast-furnace slag, iron ore tailings, one-dimensional consolidation, sodium hydroxide , unconsolidated-undrained triaxial test*

ویرایشنشده

مقدمه

گسترش فعالیت‌های استخراج و فرآوری مواد معدنی با تولید مقادیر زیادی باطله سنگ‌آهن همراه است که به طور معمول برای دوره‌های طولانی در سدهای باطله یا محل‌های انباشت نگهداری می‌شود. استفاده از این مواد در پروژه‌های عمرانی می‌تواند حجم مواد انباشته‌شده و نیاز به مدیریت بلندمدت را کاهش دهد، اما کاربرد ژئوتکنیکی آن‌ها مستلزم شناخت ویژگی‌های مهندسی و در صورت نیاز اصلاح رفتار مکانیکی است. ویژگی‌های باطله‌های سنگ‌آهن به منشا ماده، فرایند فرآوری، دانه‌بندی، وزن مخصوص ذرات و شرایط ذخیره سازی وابسته است و عواملی مانند نسبت تخلخل، شرایط تراکم و وضعیت رطوبتی می‌تواند مقاومت و تغییرشکل آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهند (Coelho & Camacho, 2024; da Silva Ramos et al., 2024; Yellishetty et al., 2008).

تثبیت شیمیایی یکی از روش‌های بهبود رفتار مهندسی خاک‌ها و مواد ریزدانه است. در سال‌های اخیر، استفاده از محصولات جانبی صنعتی واکنش‌پذیر به‌عنوان جایگزین یا مکمل بخشی از چسباننده‌های متداول مورد توجه قرار گرفته است (Behnood, 2018). سرباره دانه‌ای آسیاب شده کوره بلند[1] به دلیل برخورداری از اجزای حاوی کلسیم، سیلیس و آلومینا قابلیت استفاده در سامانه‌های فعال‌شده قلیایی را دارد. هیدروکسید سدیم (NaOH) نیز با افزایش درجه قلیایی بودن محیط می‌تواند انحلال اجزای واکنش‌پذیر را تسهیل کند و به سخت‌شدن تدریجی ساختار کمک کند. بااین‌حال، عملکرد این سامانه‌ها به ترکیب پیش‌ماده، غلظت فعال‌کننده، مقدار ماده واکنش‌پذیر و شرایط عمل‌آوری وابسته است و افزایش مقدار فعال‌کننده همواره به بهبود یکنواخت رفتار مکانیکی منجر نمی‌شود (Atiş et al., 2009; Fernández-Jiménez et al., 1999).

با وجود گسترش مطالعات مربوط به مواد فعال‌شده قلیایی، بخش مهمی از پژوهش‌های موجود بر خمیرها، ملات‌ها، بتن‌ها یا شاخص‌های مقاومتی محدود در خاک‌های تثبیت شده متمرکز بوده است. مطالعات مربوط به باطله‌های سنگ‌آهن نیز بیشتر مقاومت مکانیکی، ویژگی‌های ریز ساختاری، تراکم و کاربرد در انباشت خشک را بررسی کرده است (Consoli et al., 2024; Rios et al., 2019). ازاین‌رو، برای ارزیابی جامع‌تر قابلیت استفاده ژئوتکنیکی این مواد، بررسی مقاومت تحت فشار محصورکننده همراه با رفتار تراکم‌پذیری اهمیت دارد. مطالعات مرتبط و محدودیت‌های آن‌ها در بخش پیشینه پژوهش بررسی خواهد شد.

پیشینه پژوهش

مطالعات مربوط به سامانه‌های فعال‌شده قلیایی نشان داده است که عملکرد این مواد به نوع و ترکیب پیش‌ماده، غلظت فعال‌کننده و شرایط عمل‌آوری وابسته است. Fernández-Jiménez et al. (1999) و Atiş et al. (2009) نشان دادند که نوع و غلظت فعال‌کننده نقش مهمی در توسعه مقاومت سامانه‌های سرباره‌ای دارند و افزایش غلظت فعال‌کننده همواره به افزایش متناسب مقاومت منجر نمی‌شود. پژوهش‌های جدیدتر نیز وابستگی عملکرد GGBFS فعال‌شده به مقدار سرباره، درجه قلیایی بودن محیط و شرایط عمل‌آوری را تایید کرده است (Chakkor, 2025; Gupta & Kumar, 2024; Sithole et al., 2021). بااین‌حال، بخش عمده این مطالعات بر خمیرها، ملات‌ها و چسباننده‌ها متمرکز بوده است و رفتار ژئوتکنیکی مصالح در شرایط تنش چندمحوره کمتر بررسی شده است.

در زمینه تثبیت خاک، Cristelo et al. (2012) نشان دادند که استفاده از چسباننده‌های فعال‌شده قلیایی می‌تواند مقاومت خاک را افزایش دهد، اما میزان بهبود به ویژگی‌های مصالح و شرایط آماده‌سازی وابسته است. Khatibi et al. (2015) اثر مقدار ماده تثبیت‌کننده و زمان عمل‌آوری را بر مقاومت خاک بررسی کردند و Moghadas and Raeesi Estabragh (2017) اهمیت

[1] ground granulated blast-furnace slag (GGBFS)

ویرایشگری شده

شرایط اولیه و مسیر بارگذاری را در پاسخ حجمی نشان دادند. همچنین، Ansar Shourijeh and Raeesi Estabragh (2022) و Jahani et al. (2024) بهبود مقاومت و ویژگی‌های ریز ساختاری خاک‌های رسی در اثر استفاده از سرباره فعال شده را گزارش کردند. بااین‌حال، این مطالعات بیشتر بر خاک‌های طبیعی یا آلوده متمرکز بوده است و تعمیم مستقیم نتایج آن‌ها به باطله‌های سنگ‌آهن، به دلیل تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و ترکیب مصالح، نیازمند بررسی مستقل است.

مطالعات جدیدتر بر باطله‌های سنگ‌آهن نشان داده است که استفاده از چسبانده‌های فعال‌شده می‌تواند مقاومت باطله‌های متراکم‌شده را افزایش دهد و عواملی مانند مقدار چسبانده، نسبت تخلخل، درجه تراکم و زمان عمل‌آوری بر پاسخ مکانیکی مؤثر است (Consoli et al., 2024; Portela Farenzena et al., 2024). بااین‌حال، تمرکز اصلی این پژوهش‌ها بر مقاومت مکانیکی، ریز ساختار و کاربرد در انباشت خشک بوده است و ارزیابی هم‌زمان رفتار سه‌محوری و تراکم‌پذیری یک‌بعدی در دامنه‌ای از غلظت‌های NaOH و مقادیر مختلف GGBFS کمتر گزارش شده است.

بر این اساس، خلا اصلی مطالعات موجود، نبود ارزیابی یکپارچه اثر غلظت NaOH، مقدار GGBFS، زمان عمل‌آوری و فشار محصورکننده بر مقاومت و تراکم‌پذیری باطله واقعی سنگ‌آهن است. هدف پژوهش حاضر بررسی اثر این متغیرها بر بیشینه تنش انحرافی، پارامترهای ظاهری مقاومت برشی و شاخص‌های فشردگی و باربرداری است. نوآوری پژوهش نیز در بررسی هم‌زمان این عوامل با استفاده از آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و تحکیم یک‌بعدی در یک برنامه آزمایشی واحد قرار دارد.

مواد و روش‌ها

برنامه مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش در دو بخش اصلی تنظیم شد. در بخش نخست، مواد مورد استفاده شامل باطله سنگ‌آهن، سرباره دانه‌ای آسیاب شده کوره بلند، هیدروکسید سدیم و آب مقطر معرفی شد. در بخش دوم، برنامه آزمایشگاهی، روش آماده‌سازی نمونه‌ها و روش انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده، تحکیم یک‌بعدی و بررسی ریزساختاری ارائه شد.

مواد مصرفی

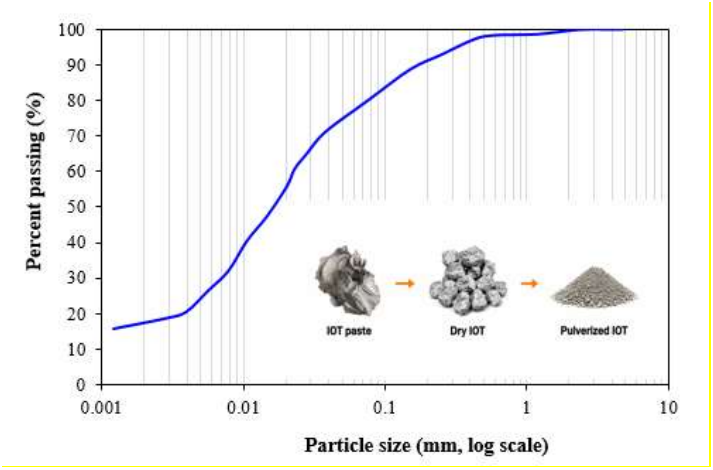
باطله سنگ‌آهن

نمونه‌های باطله سنگ‌آهن از تاسیسات مدیریت باطله معدن سورک در استان یزد برداشت شد. رطوبت طبیعی نمونه‌ها هنگام برداشت در محدوده ۲۹ تا۳۸ درصد قرار داشت. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، برای کاهش اثر تغییرات رطوبت اولیه، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای۲ ± ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد.

پس از خشک‌کردن، ویژگی‌های اولیه باطله شامل حدود اتربرگ، وزن مخصوص ذرات جامد، مشخصات تراکم استاندارد و دانه‌بندی تعیین شد. سپس باطله بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک[۲]طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که باطله مورد مطالعه در گروه CL، یعنی رس با خمیری کم، قرار می‌گیرد. منحنی دانه‌بندی باطله سنگ‌آهن در شکل ۱ ارائه شده است.

[۲] Unified Soil Classification System (USCS)

ویرایش اولیه



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی باطله سنگ‌آهن

سرباره دانه‌ای آسیاب‌شده کوره بلند

در این پژوهش از سرباره دانه‌ای آسیاب شده کوره بلند به‌عنوان ماده مکمل واکنش‌پذیر در سامانه فعال شده قلیایی استفاده شد. برای بررسی اثر سرباره، مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد از جرم کل مواد جامد خشک با سرباره جایگزین شد و مقدار کل مواد جامد خشک در همه مخلوط‌ها ثابت نگه داشته شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی باطله سنگ‌آهن و سرباره دانه‌ای آسیاب‌شده کوره بلند بر اساس نتایج آزمون XRF

ماده	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_t	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	S
باطله سنگ‌آهن(درصد وزنی)	۴۵/۶	۹/۵	۱۸/۶	۱۵/۴	-	۶/۱۵	۲/۰۲	۲/۳
سرباره (درصد وزنی)	۳۵/۹	۹/۴۹	۳۸/۹	-	۰/۹۰	۸/۹۰	۰/۴۷	-
ماده	**TiO_2**	**Cr_2O_3**	**BaO**	**K_2O**	**Cu**	**Pb**	**Zn**	**LOI**
باطله سنگ‌آهن(درصد وزنی)	۰/۴	۰/۰۱	-	-	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۴/۰۳
سرباره(درصد وزنی)	۱/۹۰	۰/۰۱	۲/۱۰	۰/۹۰	-	-	-	۰/۰۹

ترکیب شیمیایی باطله سنگ‌آهن و سرباره دانه‌ای آسیاب شده کوره بلند با استفاده از آزمون فلورسانس پرتو ایکس[۳] تعیین شد. بر اساس نتایج XRF، اکسیدهای اصلی موجود در باطله سنگ‌آهن شامل SiO_2، Fe_2O_3 و Al_2O_3 بود. همچنین، سرباره به دلیل برخورداری از مقادیر قابل‌توجه CaO، SiO_2 و Al_2O_3 به‌عنوان منبع مکمل کلسیم، سیلیس و آلومینا در سامانه فعال شده قلیایی استفاده شد. این ترکیبات می‌تواند در تشکیل محصولات واکنشی و بهبود ساختار مخلوط تثبیت شده نقش داشته باشند. ترکیب شیمیایی مواد اولیه در جدول ۱ ارائه شده است.

هیدروکسید سدیم

هیدروکسید سدیم به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی برای آماده سازی محلول‌های قلیایی استفاده شد. این ماده با ایجاد محیط قلیایی، انحلال بخشی از گونه‌های سیلیسی و آلومینیومی موجود در مواد اولیه را تسهیل می‌کند و زمینه تشکیل محصولات واکنشی در

[۳] X-ray Fluorescence (XRF)

ویرایش شده

سامانه فعال شده قلیایی را فراهم می سازد. در این پژوهش، محلول‌های هیدروکسید سدیم با غلظت‌های صفر، ۱، ۳ و ۵ مولار برای بررسی اثر شدت درجه قلیایی بر رفتار مخلوط‌ها به کار گرفته شد. در حالت صفر مولار، آب مقطر بدون افزودن هیدروکسید سدیم استفاده شد.

آب مقطر

در این پژوهش از آب مقطر برای آماده‌سازی محلول قلیایی، اختلاط نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های مرتبط استفاده شد. انتخاب آب مقطر با هدف کاهش اثر یون‌ها و املاح محلول بر واکنش‌های قلیایی و رفتار فیزیکی و شیمیایی مخلوط‌ها انجام شد.

برنامه آزمایشی

برنامه آزمایشگاهی این پژوهش برای بررسی اثر غلظت فعال‌کننده قلیایی، مقدار سرباره دانه‌ای آسیاب‌شده کوره بلند و زمان عمل‌آوری بر رفتار مکانیکی و تراکم‌پذیری باطله سنگ‌آهن طراحی شد و شامل سه بخش بود. در بخش نخست، رفتار مقاومتی نمونه‌ها با آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده بررسی شد. در بخش دوم، تراکم‌پذیری نمونه‌های منتخب با آزمایش تحکیم یک‌بعدی ارزیابی شد و در بخش سوم، ریزساختار نمونه‌های منتخب با میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی کیفی آرایش ذرات، تماس‌های بین‌ذره‌ای و پیوستگی ساختار مطالعه شد. باطله سنگ‌آهن ماده پایه همه مخلوط‌ها بود و نمونه مرجع بدون هیدروکسید سدیم و سرباره تهیه شد. در سایر نمونه‌ها، محلول هیدروکسید سدیم با غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ مولار به کار رفت و در حالت صفر مولار فقط آب مقطر استفاده شد. برای بررسی اثر سرباره، صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد از جرم کل مواد جامد خشک با سرباره جایگزین شد و مقدار کل مایع در همه ترکیب‌ها ۱۱ درصد جرم خشک مواد و معادل نسبت مایع به جامد ۰٫۱۱ بود. آزمایش‌های اصلی سه‌محوری پس از ۷ روز عمل‌آوری انجام شد و برای بررسی اثر زمان، نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد سرباره و محلول هیدروکسید سدیم یک مولار در فشار محصورکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال پس از ۷ و ۲۸ روز آزمایش و مقایسه شد. آزمایش‌های سه‌محوری در فشارهای محصورکننده ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شد و برای هر ترکیب و فشار، نمونه مستقلی تهیه شد. بیشینه تنش انحرافی از منحنی تنش و کرنش استخراج و حسبندگی و زاویه اصطکاک ظاهری با استفاده از پوش گسیختگی موهر– کولمب در چارچوب تنش کل تعیین شد. آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی نیز بر نمونه‌های منتخب انجام شد. ابتدا اثر غلظت هیدروکسید سدیم در سطوح صفر، ۱، ۳ و ۵ مولار و بدون سرباره بررسی شد و سپس برای ارزیابی اثر سرباره در غلظت ثابت فعال‌کننده، نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد سرباره با محلول هیدروکسید سدیم ۳ مولار آزمایش شد. برنامه آزمایش‌های مکانیکی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. برنامه آزمایش باطله سنگ‌آهن فعال‌شده قلیایی در غلظت‌های مختلف NaOH، مقادیر متفاوت GGBFS و دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز

شرح نمونه	زمان عمل‌آوری (روز)	غلظت NaOH (مولار)	مقدار GGBFS (درصد وزنی)	فشار محصورکننده (کیلوپاسکال)	توضیحات
نمونه مرجع، باطله سنگ‌آهن تثبیت‌نشده	۷	۰	۰	۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰	نمونه مرجع برای مقایسه نتایج
باطله سنگ‌آهن + NaOH، بدون GGBFS	۷	۱، ۳ و ۵	۰	۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰	بررسی اثر فعال‌سازی قلیایی به تنهایی
باطله سنگ‌آهن + NaOH + GGBFS	۷	۱، ۳ و ۵	۳، ۶ و ۹	۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰	بررسی اثر هم‌زمان فعال‌کننده قلیایی و GGBFS

ویرایشی شده

باطله سنگ‌آهن + NaOH یک مولار + مقادیر مختلف GGBFS	۷ و ۲۸	۱	۳، ۶ و ۹	۲۰۰	بررسی اثر زمان عمل‌آوری در غلظت ثابت NaOH

برای افزایش قابلیت اعتماد نتایج، بخ شی از نمونه‌ها به‌منظور کنترل کیفیت آماده شد و تعدادی از آزمایش‌های مکانیکی نیز به‌صورت تکراری انجام گرفت. پیش از انجام آزمایش‌ها، یکنواختی ابعاد، جرم خشک و شرایط رطوبتی نمونه‌ها بررسی شد تا امکان مقایسه معتبر میان ترکیب‌های مختلف فراهم شود.

تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های سه‌محوری

برای بررسی رفتار مکانیکی باطله سنگ‌آهن تثبیت‌شده، ابتدا مشخصات تراکم هر مخلوط شامل وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه با ا ستفاده از آزمایش تراکم ا ستاندارد مطابق ASTM D698 تعیین شد. سپس، نمونه‌های ا ستوانه‌ای سه‌محوری با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع نهایی ۸۰ میلی‌متر تهیه شد. ارتفاع قالب ۱۲۰ میلی‌متر بود و نمونه‌ها پس از خروج از قالب به ارتفاع ۸۰ میلی‌متر برش داده شد تا نسبت ارتفاع به قطر یکسان باشد. جرم خشک مورد نیاز هر نمونه بر اساس حجم هندسی نمونه و وزن مخ صوص خ شک بی شینه مخلوط متناظر محا سبه شد تا نمونه‌ها با درجه تراکم ۱۰۰ در صد تهیه شود. در مخلوط‌های حاوی سرباره، ۳، ۶ و ۹ درصد از جرم کل مواد جامد خشک با GGBFS جایگزین شد و جرم کل مواد جامد ثابت ماند. فعال‌سازی قلیایی با محلول‌های هیدروکسید سدیم صفر، ۱، ۳ و ۵ مولار انجام شد و مقدار کل مایع در همه ترکیب‌ها ۱۱ درصد جرم خشک مواد، معادل نسبت مایع به جامد ۰/۱۱، بود (D698-12, 2012). مواد خشک ابتدا به طور یکنواخت مخلوط و سپس محلول فعال‌کننده به‌تدریج افزوده شد و اختلاط مکانیکی حدود دو دقیقه ادامه یافت. مخلوط در سه لایه داخل قالب قرار گرفت و هر لایه به‌صورت ا ستاتیکی متراکم شد. سطح هر لایه پیش از افزودن لایه بعدی خراش داده شد تا پیو ستگی افزایش یابد. پس از تراکم، نمونه‌ها در کی سه‌های پلی‌اتیلنی آب‌بندی و در دمای ۲ ± ۳۰ درجه سل سیوس عمل‌آوری شدند. پیش از آزمایش، ابعاد، جرم و و ضعیت ظاهری نمونه‌ها کنترل و نمونه‌های دارای ترک، شکستگی، ناپیوستگی آشکار یا تغییرشکل نامتعارف حذف شدند.

نمونه‌های تحکیم یک‌بعدی

نمونه‌های تحکیم یک‌بعدی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع نهایی ۱۷ میلی‌متر در رینگ‌هایی با قطر داخلی ۵۰ و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر تهیه شد. شرایط اولیه این نمونه‌ها با نمونه‌های سه‌محوری متفاوت بود. رطوبت اولیه بر ا ساس حد انقباض برابر ۱۳/۲ در صد و نسبت تخلخل اولیه در همه ترکیب‌ها ۰/۹۴۵ در نظر گرفته شد. ارتفاع و جرم نمونه‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شد که وزن مخ صوص خشک اولیه حدود ۷۰ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه حاصل از آزمایش تراکم استاندارد باشد. نمونه مرجع بدون هیدروکسید سدیم تهیه شد. در نمونه‌های فعال‌شده، ۷/۱۵ گرم فاز مایع شامل اب مقطر یا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت‌های صفر، ۱، ۳ و ۵ مولار به مصالح خشک افزوده شد. برای بررسی اثر سرباره نیز ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی GGBFS از جرم کل مواد جامد خشک جایگزین بخشی از باطله شد و نمونه‌ها با محلول هیدروکسید سدیم ۳ مولار آماده شد.

روش انجام آزمایش‌ها و مطالعه ریزساختاری

آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده (UU)

آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده مطابق ASTM D2850 برای ارزیابی رفتار برشی کوتاه‌مدت و تعیین مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شـده در چارچوب تنش کل انجام شـد. نمونه‌ها با رطوبت تعیین‌شـده در مرحله سـاخت متراکم شـد و پیش از

بارگذاری تحت اشباع سازی یا تحکیم قرار نگرفت، بنابراین شرایط نیمه‌اشباع آن‌ها طی آزمایش حفظ شد که با وضعیت متداول مصالح متراکم‌شده در خاکریزها و انباشتگاه‌های معدنی سازگار است (D2850-15, 2015). پس از عمل‌آوری، هر نمونه روی پایه دستگاه قرار گرفت، با غشای لاتکسی از سیال سلول جدا و دو انتهای غشا با حلقه‌های لاستیکی آب‌بندی شد. سپس کلاهک بارگذاری به صورت هم‌محور نصب و فشارهای محصورکننده ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال اعمال شد، در حالی که شیرهای زهکشی در تمام مدت آزمایش بسته ماند. بارگذاری انحرافی تحت کنترل کرنش و با نرخ جابه‌جایی محوری ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نیروی محوری، تغییرشکل قائم و فشار سلول به‌ترتیب با لودسل الکترونیکی، سامانه ثبت داده دیجیتال و مبدل فشار کالیبره‌شده به‌طور پیوسته اندازه‌گیری شد. با توجه به اندازه‌گیری‌نشدن فشار اب منفذی، نتایج و پارامترهای مقاومت برشی در چارچوب تنش کل تفسیر و منحنی‌های تنش و کرنش برای تحلیل رفتار مکانیکی استخراج شد.

آزمایش تحکیم یک‌بعدی

هدف از آزمایش تحکیم با آزمایش سه‌محوری متفاوت بود. آزمایش تحکیم با هدف بررسی تراکم‌پذیری باطله‌های خمیری در شرایط انباشت معدنی انجام شد، در حالی که آزمایش سه‌محوری برای ارزیابی رفتار مصالح متراکم‌شده در کاربردهای خاکی در نظر گرفته شد. ازاین‌رو، شرایط اولیه نمونه‌ها در این دو مجموعه آزمایش متفاوت انتخاب شد و نتایج آن‌ها برای مقایسه مستقیم رفتار مقاومتی و تراکم‌پذیری یک ترکیب مشخص در نظر گرفته نشد، بلکه هر مجموعه متناسب با شرایط کاربرد موردنظر ارزیابی شد. آزمایش تحکیم یک‌بعدی مطابق ASTM D2435 انجام شد. نمونه‌ها پس از قرارگیری در دستگاه به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور شد. توزین نمونه‌های کنترل پیش و پس از غوطه‌وری نشان داد که درجه اشباع پس از ۲۴ ساعت در محدوده قابل قبول برای شرایط اشباع قرار داشت. سپس تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال به صورت مرحله‌ای اعمال شد. این محدوده تنش با توجه به هدف مقایسه تراکم‌پذیری نمونه‌های شاهد و تثبیت شده انتخاب شد. هر مرحله بارگذاری ۴۸ ساعت ادامه یافت که مضربی از دوره ۲۴ ساعته مورد استفاده در استاندارد است و برای همه نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد. پس از رسیدن به تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال، باربرداری با کاهش مرحله‌ای تنش به ۴۰۰ و سپس ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شد که با الگوی کاهش مرحله‌ای تنش در استاندارد سازگار است.

نشست نمونه‌ها در طول آزمایش برحسب لگاریتم زمان ثبت شد. شاخص فشردگی از بخش فشردگی منحنی $e - \log\sigma_v'$ و شاخص باربرداری از مسیر باربرداری تعیین شد. این آزمایش‌ها برای ارزیابی اثر فعال‌سازی قلیایی و افزودن GGBFS بر کاهش تراکم‌پذیری و تغییر پاسخ حجمی نمونه‌ها انجام شد.

بررسی ریزساختاری

برای بررسی تغییرات ریزساختاری، چهار نمونه منتخب شامل نمونه مرجع بدون NaOH و GGBFS، نمونه حاوی ۵ مولار NaOH و بدون GGBFS و نمونه‌های حاوی ۳ مولار NaOH همراه با ۳ و ۹ درصد GGBFS بررسی شد. نمونه ۵ مولار بدون GGBFS به‌منظور بررسی کیفی اثر فعال‌کننده قلیایی به‌تنهایی در بالاترین غلظت مورد مطالعه انتخاب شد. همچنین، نمونه‌های حاوی ۳ و ۹ درصد GGBFS در غلظت ثابت ۳ مولار NaOH برای مقایسه اثر افزایش مقدار سرباره بر ریزساختار بررسی شد.

سطح نمونه‌ها پیش از تصویربرداری، مطابق روش متداول آماده‌سازی نمونه‌های نارسانا برای SEM، با لایه نازکی از طلا به روش sputter coating پوشش داده شد تا از تجمع بار الکتریکی روی سطح نمونه جلوگیری شود و کیفیت تصویربرداری بهبود یابد (Fischer et al., 2024). تصاویر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی ZEISS در حالت الکترون ثانویه و با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۶ کیلوولت تهیه شد. فاصله کاری هنگام تصویربرداری در محدوده ۷/۵ تا ۹/۵ میلی‌متر قرار داشت. تصاویر برای مقایسه کیفی شکل و آرایش ذرات، فضاهای بین‌ذره‌ای، نحوه تماس میان ذرات و پیوستگی موضعی ساختار استفاده شد. تفسیر تصاویر به‌صورت کیفی انجام شد و از تصاویر SEM برای شناسایی قطعی محصولات واکنش یا اندازه‌گیری کمی تخلخل استفاده

نشد.

یافته‌های پژوهش

نتایج آزمون تراکم استاندارد

آزمایش تراکم استاندارد برای تعیین وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه باطله سنگ‌آهن و مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف سرباره دانه‌ای آسیاب‌شده کوره بلند انجام شد. نتایج جدول ۳ نشان داد که با افزایش GGBFS از صفر به ۹ درصد وزنی، وزن مخصوص خشک بیشینه از ۲۱/۰۹ به ۲۰/۳۰ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش یافت که معادل افت حدود ۳/۷ درصد بود، در حالی که رطوبت بهینه از ۱۱/۰۳ به ۱۲/۱۰ درصد افزایش یافت و رشدی حدود ۹/۷ درصد داشت. وزن مخصوص ذرات جامد نیز از ۳/۲۵ در باطله بدون افزودنی به‌ترتیب به ۳/۲۲، ۳/۲۰ و ۳/۱۷ در مخلوط‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS کاهش یافت. در مجموع، افزایش GGBFS با کاهش پیوسته وزن مخصوص خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه همراه بود، به‌طوری‌که مخلوط حاوی ۹ درصد GGBFS کمترین وزن مخصوص خشک بیشینه و بیشترین رطوبت بهینه را نشان داد.

جدول ۳. نتایج آزمایش تراکم استاندارد و وزن مخصوص ذرات جامد باطله سنگ‌آهن و مخلوط‌های حاوی GGBFS

نمونه	درصد GGBFS وزنی	رطوبت بهینه، (%)	حداکثر وزن مخصوص خشک، (kN/m^3)	وزن مخصوص ذرات جامد، G_s
باطله سنگ‌آهن		۱۱/۰۳	۲۱/۰۹	۳/۲۵
باطله سنگ‌آهن حاوی GGBFS	۳	۱۱/۴۰	۲۰/۸۵	۳/۲۲
باطله سنگ‌آهن حاوی GGBFS	۶	۱۱/۷۵	۲۰/۶۰	۳/۲۰
باطله سنگ‌آهن حاوی GGBFS	۹	۱۲/۱۰	۲۰/۳۰	۳/۱۷

تحکیم یک بعدی و شاخص‌های تراکم‌پذیری

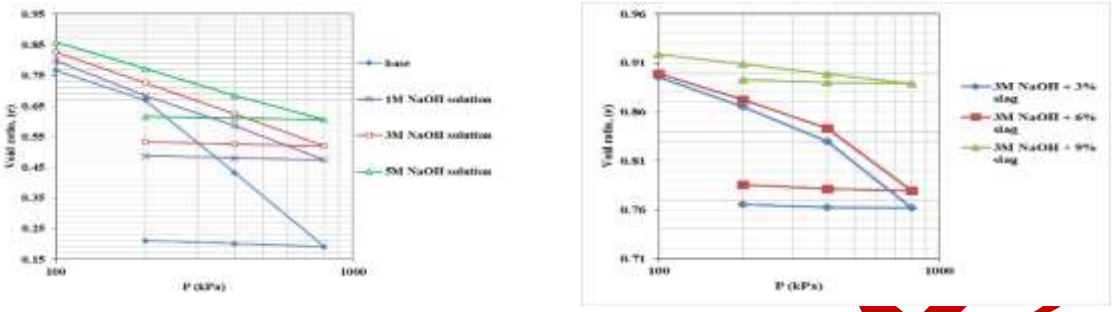
رفتار تحکیمی نمونه‌ها با استفاده از منحنی‌های $e - \log\sigma_v'$، شاخص فشردگی (C_c) و شاخص باربرداری (C_s) ارزیابی شد و نتایج در جدول ۴ و شکل۲ ارائه شده است. ابتدا اثر افزایش غلظت NaOH از صفر تا ۵ مولار در نمونه‌های بدون GGBFS و سپس، در غلظت ثابت ۳ مولار، اثر افزودن ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی GGBFS بررسی شد. فعال‌سازی قلیایی و افزودن سرباره هر دو موجب کاهش شیب بخش فشردگی و مسیر باربرداری شد. مقدار (C_c) از ۰/۶۵۱ در نمونه مرجع به ۰/۳۵۴، ۰/۳۳۸ و ۰/۲۸۱ در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ مولار کاهش یافت و بیشترین تغییر در بازه صفر تا ۱ مولار مشاهده شد. در غلظت ثابت ۳ مولار، افزودن ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS مقدار (C_c) را از ۰/۳۳۸ به‌ترتیب به ۰/۱۴۵، ۰/۱۲۹ و ۰/۰۳۲ رساند که مقدار نهایی حدود ۹۵ درصد کمتر از نمونه مرجع بود. مقدار (C_s) نیز از ۰/۰۳۲ در نمونه مرجع به ۰/۰۲۳، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۱۷ در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ مولار کاهش یافت و با افزودن ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS در غلظت ۳ مولار به‌ترتیب به ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۰۷ رسید. در مجموع، افزودن GGBFS در غلظت ۳ مولار اثر بیشتری بر کاهش شاخص‌های تراکم‌پذیری نسبت به افزایش غلظت NaOH در نمونه‌های بدون سرباره داشت و کاهش (C_c) و (C_s) بیانگر بهبود پایداری حجمی در محدوده تنش‌های بررسی‌شده بود.

جدول۴. مقادیر شاخص فشردگی و شاخص باربرداری نمونه‌های باطله سنگ‌آهن

نمونه	شاخص باربرداری، (C_s)	شاخص فشردگی، (C_c)
باطله سنگ‌آهن	۰/۰۳۲	۰/۶۵۱
باطله سنگ‌آهن + NaOH یک مولار	۰/۰۲۳	۰/۳۵۴
باطله سنگ‌آهن + NaOH سه مولار	۰/۰۲۲	۰/۳۳۸
باطله سنگ‌آهن + NaOH پنج مولار	۰/۰۱۷	۰/۲۸۱

ویرایش اولیه

باطله سنگ‌آهن + NaOH سه مولار همراه با ۳ درصد GGBFS	۰/۰۱۲	۰/۱۴۵
باطله سنگ‌آهن + NaOH سه مولار همراه با ۶ درصد GGBFS	۰/۰۱۰	۰/۱۲۹
باطله سنگ‌آهن + NaOH سه مولار همراه با ۹ درصد GGBFS	۰/۰۰۷	۰/۰۳۲



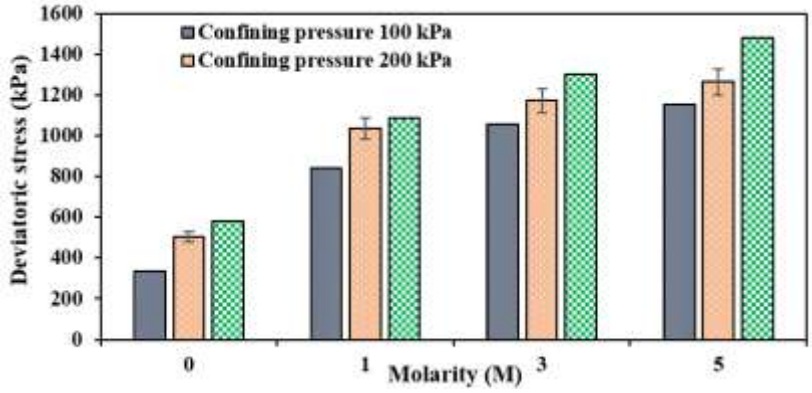
(ب) (الف)

شکل ۲. تغییرات نسبت تخلخل (e) با فشار اعمالی (P) برای (الف) نمونه شاهد و بدون سرباره و (ب) نمونه‌های با جایگزینی سرباره

ویژگی‌های مقاومتی نمونه ها

اثر غلظت هیدروکسید سدیم بر بیشینه تنش انحرافی

نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده پس از ۷ روز عمل‌آوری نشان داد که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم در همه فشارهای محصورکننده موجب افزایش بیشینه تنش انحرافی شد، هرچند این رابطه خطی نبود. مطابق شکل ۳، در نمونه‌های بدون GGBFS، افزایش غلظت NaOH از صفر به ۱ مولار بیشترین رشد مقاومت را ایجاد کرد، در حالی که با افزایش غلظت به ۳ و ۵ مولار، نرخ افزایش کاهش یافت و اختلاف نتایج ۳ و ۵ مولار کمتر از صفر و ۱ مولار بود. نمونه مرجع بدون NaOH و GGBFS نیز در هر سه فشار محصورکننده کمترین بیشینه تنش انحرافی را نشان داد. بر اساس شکل ۵، در نمونه‌های حاوی GGBFS نیز افزایش غلظت NaOH از ۱ به ۳ و ۵ مولار مقاومت را افزایش داد و این اثر در حضور سرباره آشکارتر بود، هرچند مقدار ان به درصد GGBFS و فشار محصورکننده وابسته بود. همچنین، در هر ترکیب ثابت، افزایش فشار محصورکننده از ۱۰۰ به ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال موجب افزایش بیشینه تنش انحرافی شد. در مجموع، پاسخ مقاومتی حاصل اثر هم‌زمان غلظت فعال‌کننده، مقدار GGBFS و فشار محصورکننده بود و بیشترین اثر افزایش NaOH در بازه صفر تا ۱ مولار مشاهده شد.



شکل ۳. اثر غلظت هیدروکسید سدیم بر بیشینه تنش انحرافی نمونه‌های باطله سنگ‌آهن پس از ۷ روز عمل‌آوری

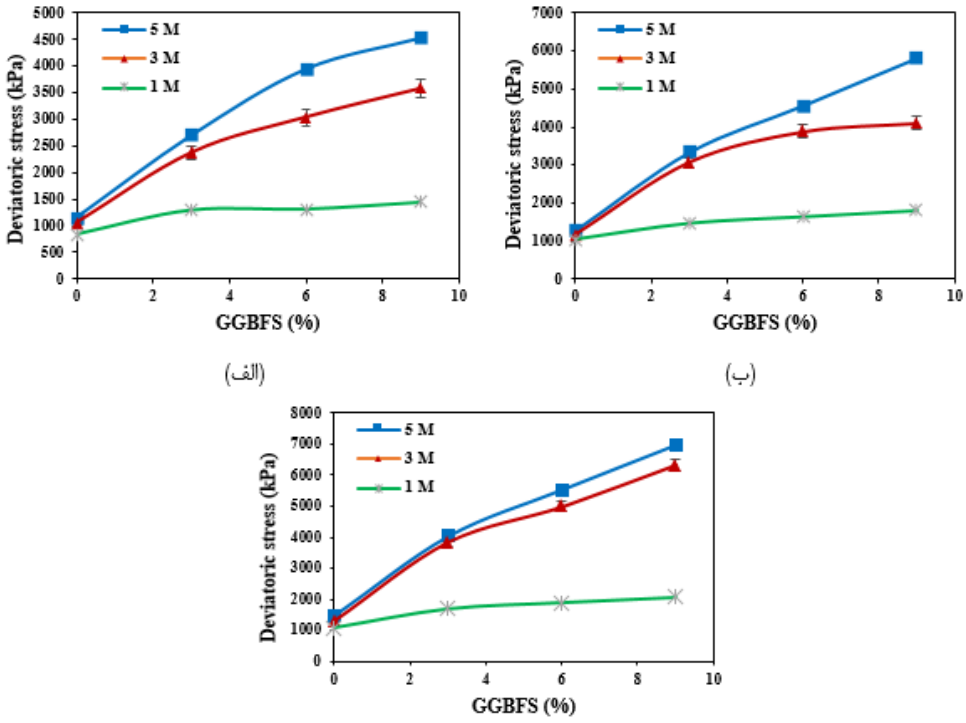
اثر مقدار GGBFS بر بیشینه تنش انحرافی

شکل ۴ اثر مقدار سرباره دانه‌ای آسیاب شده کوره بلند بر بیشینه تنش انحرافی نمونه‌های عمل‌آوری شده به‌مدت ۷ روز را در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ مولار NaOH و فشارهای محصورکننده ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. در همه شرایط، افزایش GGBFS از صفر به ۹ درصد وزنی موجب افزایش بیشینه تنش انحرافی شد و این اثر در غلظت‌های بیشتر NaOH برجسته‌تر بود. در غلظت ۱ مولار و فشار محصورکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال، افزایش GGBFS از ۳ به ۹ درصد مقاومت را از حدود ۱۴۰۰ به ۱۸۰۰ کیلوپاسکال رساند، در حالی که در غلظت‌های ۳ و به‌ویژه ۵ مولار اختلاف میان نتایج بیشتر بود. در فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال و غلظت ۵ مولار، افزایش GGBFS از صفر به ۹ درصد بیشینه تنش انحرافی را از ۱۲۶۵ به ۵۸۲۴ کیلوپاسکال افزایش داد. همچنین، افزایش فشار محصورکننده در هر ترکیب موجب افزایش مقاومت شد و بیشترین مقدار در نمونه‌های ۷ روزه، حدود ۶۹۰۰ کیلوپاسکال، در نمونه حاوی ۹ درصد GGBFS و محلول ۵ مولار NaOH تحت فشار محصورکننده ۳۰۰ کیلوپاسکال به دست آمد. در مجموع، بیشینه تنش انحرافی تحت تاثیر هم‌زمان مقدار GGBFS، غلظت NaOH و فشار محصورکننده افزایش یافت و اثر سرباره در محیط‌های قلیایی‌تر برجسته‌تر بود.

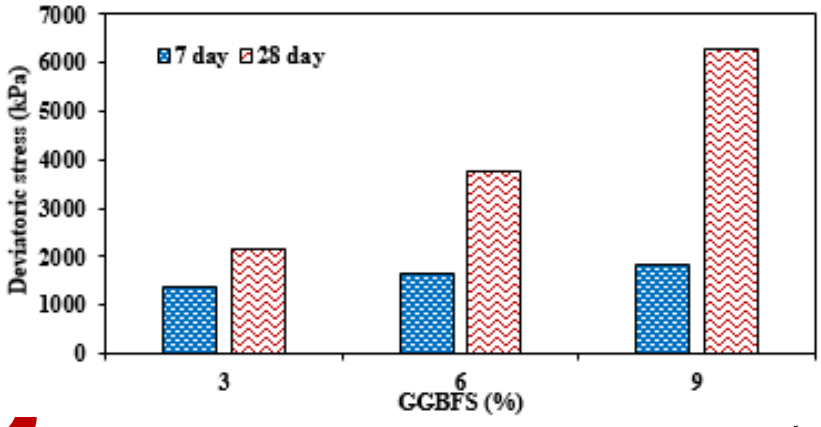
اثر زمان عمل‌آوری بر بیشینه تنش انحرافی

شکل ۵ اثر زمان عمل‌آوری بر بیشینه تنش انحرافی نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی GGBFS را در غلظت ثابت ۱ مولار NaOH و فشار محصورکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز مقاومت همه نمونه‌ها را افزایش داد و این اثر با افزایش مقدار سرباره برجسته‌تر شد. بیشینه تنش انحرافی نمونه‌های حاوی ۳ و ۶ درصد GGBFS به‌ترتیب از حدود ۱۳۷۰ به ۲۱۵۰ و از ۱۶۴۰ به ۳۷۸۰ کیلوپاسکال رسید که معادل افزایش تقریبی ۵۷ و ۱۳۰ درصد بود. بیشترین اثر در نمونه حاوی ۹ درصد GGBFS مشاهده شد که مقاومت از ۱۸۱۶ به حدود ۶۲۶۰ کیلوپاسکال افزایش یافت و مقدار ۲۸ روزه حدود ۳/۴ برابر مقدار ۷ روزه، معادل افزایش ۲۴۵ درصد، بود. اختلاف مقاومت نمونه‌ها در سن ۷ روز محدود بود، اما پس از ۲۸ روز افزایش یافت و به‌ویژه تغییر GGBFS از ۶ به ۹ درصد با رشد مشخص مقاومت همراه شد. در مجموع، اثر زمان عمل‌آوری در مقادیر بیشتر GGBFS شدیدتر بود و نمونه حاوی ۹ درصد سرباره در سن ۲۸ روز بیشترین بیشینه تنش انحرافی را نشان داد.

ویرایش استاندارد شده



شکل ۴. اثر مقدار GGBFS بر بیشینه تنش انحرافی نمونه‌های عمل‌آوری‌شده به مدت ۷ روز در غلظت‌های مختلف NaOH و تحت فشارهای محصورکننده (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (ج) ۳۰۰ کیلوپاسکال

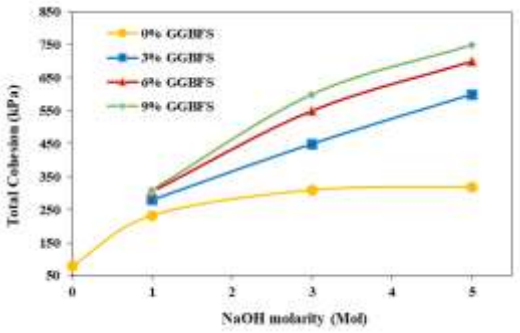


شکل ۵. اثر زمان عمل‌آوری بر بیشینه تنش انحرافی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف GGBFS تحت فشار محصورکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال و غلظت یک مولار NaOH

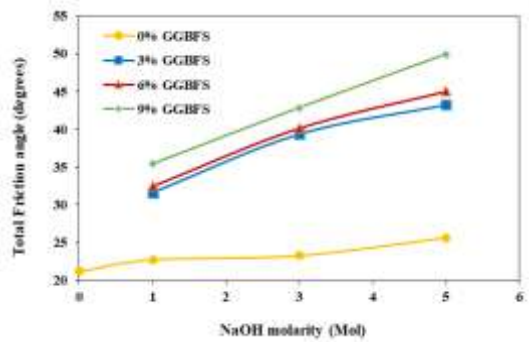
پارامترهای مقاومت برشی

پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های ۷ روزه با استفاده از پوش گسیختگی موهر–کولمب و بر پایه بیشینه تنش انحرافی در فشارهای محصورکننده ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال تعیین شد. با توجه به انجام آزمایش‌ها به روش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و اندازه‌گیری‌نشدن فشار آب حفره‌ای، چسبندگی و زاویه اصطکاک به‌صورت پارامترهای ظاهری در چارچوب تنش کل تفسیر شد. مطابق شکل ۶، در نمونه‌های بدون GGBFS، چسبندگی ظاهری با افزایش NaOH از صفر به ۱، ۳ و ۵ مولار،

به‌ترتیب از حدود ۸۰ به ۲۳۵، ۳۱۰ و ۳۲۰ کیلوپاسکال رسید و بیشترین تغییر در بازه صفر تا ۱ مولار مشاهده شد. در نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS، این مقادیر در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ مولار به‌ترتیب حدود ۲۸۰، ۳۰۵ و ۳۱۰، سپس ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ و در نهایت ۶۰۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ کیلوپاسکال بود و بیشترین مقدار به ترکیب ۹ درصد GGBFS و ۵ مولار NaOH تعلق داشت. بر اساس شکل ۷، زاویه اصطکاک ظاهری نیز روند افزایشی داشت و در نمونه‌های بدون سرباره از ۲۱/۱۸ درجه در صفر مولار به ۲۵/۶۴ درجه در ۵ مولار رسید. این پارامتر برای نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ مولار به‌ترتیب حدود ۳۲، ۳۲/۵ و ۳۵/۵، سپس ۳۹، ۴۰ و ۴۳ و در نهایت ۴۳، ۴۵ و ۵۱/۶۱ درجه بود. در مجموع، افزایش هم‌زمان NaOH و GGBFS هر دو مؤلفه پوش موهر–کولمب را افزایش داد، اما این مقادیر به‌دلیل اندازه‌گیری شدن فشار آب حفره‌ای و محدودبودن سطوح فشار محصورکننده، به‌عنوان پارامترهای ظاهری تنش کل در شرایط آزمایش حاضر قابل تفسیرند.



شکل ۶. اثر غلظت NaOH بر زاویهٔ اصطکاک ظاهری نمونه‌های عمل‌آوری‌شده به مدت ۷ روز، در آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و در شرایط رطوبتی پس از عمل‌آوری

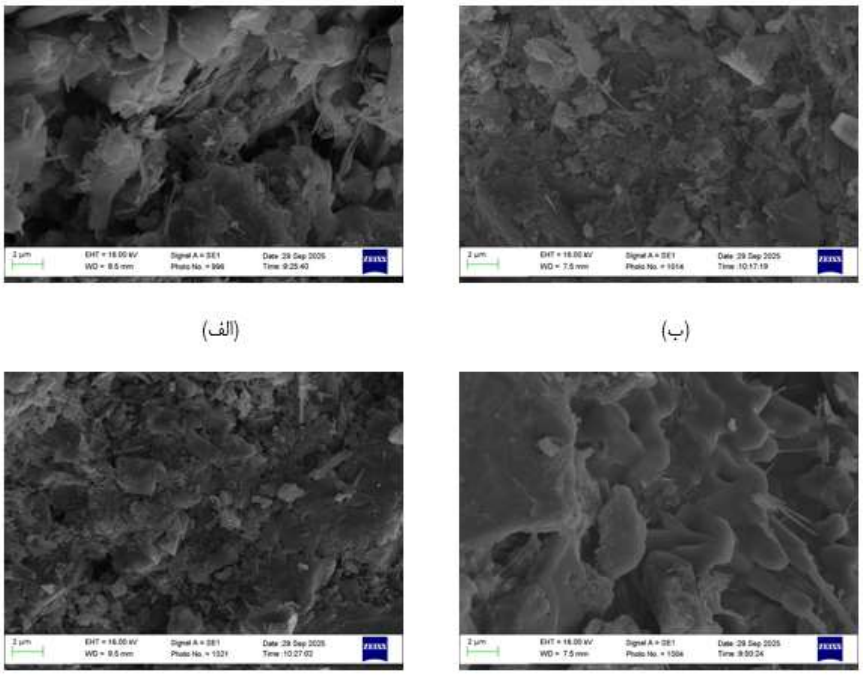


شکل ۷. اثر غلظت NaOH بر زاویهٔ اصطکاک ظاهری نمونه‌های عمل‌آوری‌شده به مدت ۷ روز، در آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و در شرایط رطوبتی پس از عمل‌آوری

ویژگی‌های ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های منتخب در شکل ۸ ارائه شده‌اند. در نمونه مرجع، ذرات ورقه‌ای و نامنظم با مرزهای تا حدی مشخص و فضاهای بین‌ذره‌ای باز مشاهده شد. در نمونه فعال‌شده با محلول ۵ مولار NaOH و بدون GGBFS، تجمع موضعی ذرات و افزایش تماس میان آن‌ها نسبت به نمونه مرجع دیده شد، هرچند بخش زیادی از ذرات همچنان به‌صورت مجزا قابل تشخیص بود. در نمونه حاوی ۳ درصد GGBFS، حضور ذرات ریزتر و نواحی متصل بیشتری در اطراف ذرات درشت مشاهده شد. با افزایش مقدار GGBFS به ۹ درصد، سطوح هموارتر و نواحی پوشاننده پیوسته‌تری میان ذرات ظاهر شد. این مشاهدات از نظر کیفی نشان می‌دهد که فعال‌سازی قلیایی و افزودن GGBFS با تغییر آرایش ذرات و افزایش پیوستگی موضعی ساختار همراه بوده‌اند. بااین‌حال، این تصاویر به‌تنهایی تشکیل محصول واکنشی مشخصی را اثبات نمی‌کند.

ویرایش شده



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های منتخب باطله سنگ‌آهن: (الف) نمونه مرجع بدون NaOH و GGBFS، (ب) نمونه فعال‌شده با محلول ۵ مولار NaOH و بدون GGBFS، (ج) نمونه حاوی محلول ۳ مولار NaOH و ۳ درصد وزنی GGBFS و (د) نمونه حاوی محلول ۳ مولار NaOH و ۹ درصد وزنی GGBFS

بحث

ویژگی‌های تراکمی

افزایش مقدار GGBFS با کاهش تدریجی وزن مخصوص خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه همراه بود. بخشی از کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه را می‌توان به جایگزینی باطله با وزن مخصوص بیشتر و کمی از آهن با GGBFS دارای وزن مخصوص کمتر نسبت داد، هرچند دانه‌بندی، شکل ذرات، سطح ویژه و نحوه آرایش آن‌ها نیز بر وزن مخصوص خشک قابل دستیابی تحت شرایط تراکم یکسان اثر می‌گذارد. افزایش رطوبت بهینه نشان‌دهنده افزایش نیاز آبی مخلوط‌های حاوی GGBFS برای دستیابی به وضعیت تراکمی مناسب است. در سامانه‌های فعال‌شده قلیایی، وجود مقدار کافی آب برای انحلال اجزای واکنش‌پذیر و انتقال گونه‌های یونی ضروری است و از این دیدگاه، افزایش محدود نیاز آبی می‌تواند به پیشرفت فرایند فعال‌سازی کمک کند. بااین‌حال، افزایش بیش از حد مقدار آب می‌تواند موجب افزایش فاصله میان ذرات و کاهش تراکم ساختار شود و در نتیجه وزن مخصوص خشک قابل دستیابی را کاهش دهد. بنابراین، افزایش رطوبت بهینه به‌تنهایی نباید به‌عنوان یک اثر مطلوب یا نامطلوب ارزیابی شود و باید همراه با پاسخ مکانیکی مخلوط تفسیر شود. همچنین، کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه همواره به افزایش تراکم‌پذیری تحکیمی یا افت عملکرد مهندسی منجر نمی‌شود، زیرا رفتار تحکیمی به ساختار اولیه، نسبت تخلخل، شرایط اشباع، مسیر تنش و مقاومت تماس‌های ایجادشده میان ذرات وابسته است. در پژوهش حاضر، کاهش شاخص فشردگی در نمونه‌های تثبیت‌شده نشان داد که تغییرات حاصل از آزمایش تراکم و تحکیم بیانگر دو جنبه متفاوت از رفتار مخلوط است و باید به‌صورت مستقل تفسیر شود.

رفتار تحکیمی و شاخص‌های تراکم‌پذیری

مقدار تا حدی زیاد شاخص فشردگی نمونهٔ شاهد را می‌توان با شرایط اولیه و نحوه بازسازی نمونه مرتبط دانست. با وجود طبقه‌بندی باطله در گروه CL، شاخص فشردگی تنها تابع نوع خاک نیست و رطوبت، نسبت تخلخل و ساختار اولیهٔ نمونه نیز بر آن اثر دارد. خشک‌کردن باطله، بازسازی آن در رطوبت حد انقباض و سپس غوطه‌وری پیش از بارگذاری می‌تواند امکان بازآرایی بیشتر ذرات و کاهش نسبت تخلخل تحت تنش قائم را فراهم کرده باشد. فعال سازی با NaOH حتی در نبود GGBFS موجب کاهش تراکم‌پذیری شد. نسبت به نمونهٔ شاهد، شاخص فشردگی در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ مولار به‌ترتیب حدود ۴۵/۶، ۴۸/۱ و ۵۶/۸ درصد کاهش یافت. بیشترین تغییر در بازهٔ صفر تا ۱ مولار رخ داد و افزایش بیشتر غلظت NaOH کاهش محدودتری در شاخص فشردگی ایجاد کرد. این روند نشان می‌دهد که بخش عمدهٔ اثر فعال سازی قلیایی بر محدودکردن تغییر شکل قائم در غلظت‌های پایین‌تر حاصل شده است و افزایش بیشتر غلظت همواره به کاهش متناسب تراکم‌پذیری منجر نمی شود. کاهش شاخص فشردگی را می‌توان با افزایش مقاومت تماس‌های بین‌ذره‌ای و محدودشدن بازآرایی ذرات تحت تنش قائم مرتبط دانست، هرچند به دلیل انجام‌نشدن شناسایی فازی، نمی‌توان این رفتار را به تشکیل محصول واکنشی مشخصی نسبت داد.

اثر GGBFS بر کاهش تراکم‌پذیری برجسته‌تر بود. در غلظت ثابت ۳ مولار NaOH، افزودن ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS شاخص فشردگی را نسبت به نمونهٔ بدون سرباره به‌ترتیب حدود ۵۷/۱، ۶۱/۸ و ۹۰/۵ درصد کاهش داد و ترکیب حاوی ۹ درصد GGBFS نسبت به نمونهٔ شاهد حدود ۹۵/۱ درصد کاهش نشان داد. کاهش شدیدتر در مقدار بیشتر GGBFS بیانگر محدودشدن بیشتر بازآرایی ذرات و تغییرشکل قائم ساختار تثبیت‌شده در محدودهٔ تنش بررسی‌شده است. مشاهدات SEM و تحلیل تصاویر با ImageJ نیز با این تفسیر سازگار بود و کاهش نواحی باز و افزایش پیوستگی ظاهری ساختار را با افزایش مقدار GGBFS نشان داد. شاخص باربرداری نیز در ترکیب حاوی ۳ مولار NaOH و ۹ درصد GGBFS نسبت به نمونهٔ شاهد حدود ۷۸/۱ درصد کاهش یافت که بیانگر کاهش تغییرشکل در مسیر باربرداری مورد بررسی است. بااین‌حال، شاخص باربرداری نباید به‌عنوان معیار مستقیم تورم آزاد تفسیر شود و نتایج آن فقط به مسیر تنش اعمال‌شده در این آزمایش مربوط است.

ویژگی‌های مقاومتی نمونه ها

اثر غلظت هیدروکسید سدیم بر بیشینه تنش انحرافی

افزایش غلظت NaOH در نمونه‌های فاقد GGBFS موجب افزایش بیشینه تنش انحرافی شد، اما این روند خطی نبود. بیشترین افزایش مقاومت در بازه صفر تا ۱ مولار مشاهده شد و با افزایش غلظت به ۳ و ۵ مولار، نرخ افزایش کاهش یافت. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش غلظت فعال‌کننده به‌تنهایی همواره به افزایش متناسب مقاومت منجر نمی‌شود و پاسخ مکانیکی به مقدار ماده واکنش‌پذیر نیز وابسته است. در نمونه‌های بدون سرباره، مقدار محدود NaOH به احتمال زیاد بخشی از اجزای واکنش‌پذیر باطله را فعال کرده است، اما در غلظت‌های بیشتر، محدودبودن پیش‌ماده واکنش‌پذیر می‌تواند افزایش مقاومت را محدود کرده باشد. مطالعات پیشین نیز نشان داده است که اثر غلظت فعال‌کننده بر مقاومت سامانه‌های فعال‌شده قلیایی به نوع و مقدار ماده واکنش‌پذیر، نسبت مایع به جامد، دما و زمان عمل‌آوری وابسته است و بیشترین مقاومت همواره در بالاترین غلظت NaOH حاصل نمی‌شود. در پژوهش حاضر نیز تفاوت میان نمونه‌های بدون GGBFS و مخلوط‌های حاوی سرباره این وابستگی را نشان داد. در نمونه‌های فاقد سرباره، بخش عمده افزایش مقاومت در غلظت‌های پایین‌تر رخ داد، در حالی که در حضور GGBFS، افزایش NaOH از ۱ به ۳ و ۵ مولار همچنان مقاومت را به‌طور محسوسی افزایش داد که می‌تواند با مشارکت بیشتر اجزای واکنش‌پذیر GGBFS در محیط قلیایی‌تر مرتبط باشد.

اثر مقدار GGBFS بر بیشینه تنش انحرافی

افزودن GGBFS در همه غلظت‌های NaOH و فشارهای محصورکننده بررسی شده موجب افزایش بیشینه تنش انحرافی شد. برجسته‌ترین تغییر در فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال و غلظت ۵ مولار مشاهده شد، به‌گونه‌ای که افزایش GGBFS از صفر به ۹ درصد

غیرقابل ویرایش

وزنی، بیشینه تنش انحرافی را از ۱۲۶۵ به ۵۸۲۴ کیلوپاسکال رساند که معادل افزایش حدود ۳۶۰ درصدی و ۴/۶ برابرشدن مقاومت بود. بیشترین مقاومت نمونه‌های ۷ روزه نیز حدود ۶/۹ تا ۷ مگاپاسکال و مربوط به ترکیب حاوی ۹ درصد GGBFS، محلول ۵ مولار NaOH و فشار محصورکننده ۳۰۰ کیلوپاسکال بود. افزایش اختلاف میان نتایج مقادیر مختلف سرباره در غلظت‌های ۳ و ۵ مولار نشان داد که اثر GGBFS به قلیائیت محیط وابسته است. افزودن سرباره مقدار اجزای واکنش‌پذیر کلسیمی، سیلیسی و الومینیومی را افزایش داد و اثر ان در محیط‌های قلیایی‌تر برجسته‌تر بود. در غلظت ۱ مولار، اختلاف مقاومت نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS محدودتر بود، اما در غلظت‌های بیشتر افزایش یافت. مشاهدات ریزساختاری شکل ۷ نیز با این روند سازگار بودند. مقایسه تصاویر الف و ب نشان داد که فعال سازی قلیایی بدون GGBFS با تجمع بیشتر ذرات و افزایش تماس‌های موضعی همراه بود. همچنین، مقایسه تصاویر ج و د در غلظت ثابت ۳ مولار نشان داد که افزایش GGBFS از ۳ به ۹ درصد با نواحی پوشاننده پیوسته‌تر و تماس‌های گسترده‌تر میان ذرات همراه شد که می‌تواند انتقال تنش را بهبود دهد و بازارایی ساختار را هنگام بارگذاری محدود کند. بنابراین، مشاهدات SEM با افزایش بیشینه تنش انحرافی سازگار بودند، هرچند بدون شناسایی فازی مستقیم نمی‌توان این تغییرات را به تشکیل محصول واکنشی مشخصی نسبت داد. مطالعات پیشین نیز مقدار سرباره، غلظت فعال‌کننده، تخلخل و زمان عمل‌آوری را از عوامل مؤثر بر مقاومت سامانه‌های فعال‌شده قلیایی گزارش کرده‌اند (Consoli et al., 2024).

اثر زمان عمل‌آوری بر بیشینه تنش انحرافی

زمان عمل‌آوری تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت داشت و این اثر با افزایش مقدار GGBFS برجسته‌تر شد. در غلظت ۱ مولار NaOH و فشار محصورکنندهٔ ۲۰۰ کیلوپاسکال، افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، بیشینهٔ تنش انحرافی نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد GGBFS را به‌ترتیب حدود ۵۷، ۱۳۰ و ۲۴۵ درصد افزایش داد. در نمونهٔ حاوی ۹ درصد GGBFS، مقاومت از ۱۸۱۶ به حدود ۶۲۶۰ کیلوپاسکال رسید و حدود ۳/۴ برابر شد. این روند نشان می‌دهد که اثر زمان عمل‌آوری در مخلوط‌های دارای مقدار بیشتر GGBFS محسوس‌تر بوده است و افزایش زمان عمل‌آوری فرصت بیشتری برای ادامهٔ سخت شدن و تقویت تماس‌ها و پیوندهای بین‌ذره‌ای فراهم کرده است. افزایش مقاومت با زمان عمل‌آوری در سامانه‌های حاوی GGBFS نیز در مطالعات پیشین گزارش شده است (Sithole et al., 2021).

با توجه به اینکه در این پژوهش شناسایی فازی محصولات واکنش انجام نشد، نمی‌توان افزایش مقاومت را به تشکیل فاز واکنشی مشخصی نسبت داد. بنابراین، این افزایش به ادامهٔ سخت‌شدن ساختار، تغییر آرایش ذرات و تقویت تماس‌ها و پیوندهای بین‌ذره‌ای در طول دورهٔ عمل‌آوری نسبت داده می‌شود. مشاهدات SEM نیز از نظر ریخت‌شناختی با این تفسیر سازگار است، اما برای تعیین ماهیت شیمیایی محصولات واکنش کافی نیست.

اثر فشار محصورکننده و تفسیر پارامترهای ظاهری مقاومت برشی

افزایش فشار محصورکننده از ۱۰۰ به ۲۰۰ و سپس ۳۰۰ کیلوپاسکال در همه ترکیب‌ها موجب افزایش بیشینه تنش انحرافی شد و وابستگی مقاومت به حالت تنش را نشان داد. افزایش فشار محصورکننده با محدودکردن تغییرشکل جانبی، تنش محوری لازم برای گسیختگی را افزایش می‌دهد و رفتار مشابهی برای باطله‌های سنگ‌آهن متراکم‌شده گزارش شده است (da Silva Ramos et al., 2024). افزایش غلظت NaOH و مقدار GGBFS نیز موجب انتقال پوش گسیختگی به مقادیر بالاتر و افزایش شیب آن شد. بیشترین چسبندگی و زاویه اصطکاک ظاهری، به‌ترتیب حدود ۷۵۰ کیلوپاسکال و ۵۱/۶۱ درجه، در نمونه حاوی ۹ درصد GGBFS و محلول ۵ مولار NaOH به دست آمد. بااین‌حال، ماهیت آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شود. آزمایش‌ها در شرایط رطوبتی پس از عمل‌آوری و بدون اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای انجام شد، بنابراین تنش مؤثر در گسیختگی مشخص نیست و مقادیر حاصل ترکیبی از اثر پیوند میان ذرات، اصطکاک، شرایط نیمه‌اشباع، مکش

ویرایش نشده

احتمالی و پاسخ نامشخص فشار آب حفره‌ای است. ازاین‌رو، مقادیر چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک به‌دست‌آمده فقط پارامترهای ظاهری در چارچوب تنش کل و مختص شرایط زهکشی‌شده و نیمه‌اشباع این آزمایش‌ها است و به هیچ عنوان نباید به‌عنوان پارامترهای مقاومت مؤثر یا پارامترهای طراحی در شرایط زهکشی شده به کار رود. زاویه اصطکاک ظاهری ۵۱/۶۱ درجه نیز از برازش پوش گسیختگی بر نتایج فشارهای محصورکننده ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به دست آمد و فقط بیانگر رفتار نمونه‌ها در محدوده تنش‌های بررسی‌شده است. برای تعیین پارامترهای مؤثر و تعمیم نتایج به دامنه‌های تنش گسترده‌تر، انجام آزمایش‌های تحکیم‌یافته همراه با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای ضروری است.

ویژگی‌های ریزساختاری

تصاویر SEM علاوه بر ارزیابی کیفی، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ به‌صورت کمی تحلیل شد. پس از تبدیل تصاویر به مقیاس خاکستری و اعمال روش آستانه‌گذاری یکسان، سهم سطحی نواحی باز قابل مشاهده در هر تصویر محاسبه شد. نتایج نشان داد که این مقدار در نمونهٔ مرجع، شکل ۸ الف، برابر ۲۷/۶ درصد بود. در نمونهٔ فعال‌شده با محلول ۵ مولار NaOH و بدون GGBFS، شکل ۸ ب، سهم نواحی باز به ۲۲/۴ درصد کاهش یافت. در نمونهٔ حاوی ۳ درصد GGBFS و محلول ۳ مولار NaOH، شکل ۸ ج، این مقدار به ۱۵/۱ درصد رسید و با افزایش GGBFS به ۹ درصد، شکل ۸ د، به ۳/۷ درصد کاهش یافت. بنابراین، در مجموعه تصاویر بررسی‌شده، فعال‌سازی قلیایی و به‌ویژه افزایش مقدار GGBFS با کاهش تدریجی سطح نواحی باز قابل مشاهده و افزایش پیوستگی ظاهری ساختار همراه بود.

این روند با مشاهدات کیفی تصاویر نیز سازگار است. در نمونهٔ مرجع، ذرات ورقه‌ای و نامنظم همراه با فضاهای بین‌ذره‌ای باز مشاهده شد، در حالی که در نمونه‌های تثبیت شده تماس میان ذرات افزایش یافت و نواحی پیوسته‌تر و پوشاننده بیشتری مشاهده شد. به‌ویژه، افزایش GGBFS از ۳ به ۹ درصد در غلظت ثابت ۳ مولار NaOH، سهم سطحی نواحی باز را از ۱۵/۱ به ۳/۷ درصد کاهش داد. این تغییرات با روند افزایش مقاومت و کاهش تراکم‌پذیری نمونه‌های تثبیت‌شده سازگار بود. بااین‌حال، مقادیر حاصل از تحلیل ImageJ بیانگر کسر سطحی دوبعدی نواحی باز در تصاویر SEM است و نباید به‌عنوان تخلخل حجمی واقعی نمونه تفسیر شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف این پژوهش، ارزیابی اثر غلظت NaOH، مقدار GGBFS، زمان عمل‌آوری و فشار محصورکننده بر رفتار مقاومتی و تراکم‌پذیری باطلهٔ سنگ‌آهن بود. مهم‌ترین نتایج پژوهش به شرح زیر است:

- ✓ فعال سازی قلیایی به‌تنهایی مقاومت باطلهٔ سنگ‌آهن را افزایش داد و بیشترین تغییر اولیه با افزایش غلظت NaOH از صفر به ۱ مولار مشاهده شد. افزودن GGBFS اثر تقویتی بیشتری ایجاد کرد. در فشار محصورکنندهٔ ۲۰۰ کیلوپاسکال و غلظت ۵ مولار، افزودن ۹ درصد GGBFS بیشینهٔ تنش انحرافی را از ۱۲۶۵ به ۵۸۲۴ کیلوپاسکال افزایش داد.
- ✓ بیشترین مقاومت در میان نمونه‌های ۷ روزه، حدود ۶/۹ تا ۷ مگاپاسکال، در نمونهٔ حاوی ۹ درصد GGBFS و ۵ مولار NaOH تحت فشار محصورکنندهٔ ۳۰۰ کیلوپاسکال به دست آمد. افزایش فشار محصورکننده از ۱۰۰ به ۳۰۰ کیلوپاسکال نیز در همهٔ ترکیب‌ها با افزایش مقاومت همراه بود.
- ✓ افزایش زمان عمل‌آوری نقش قابل‌توجهی در توسعهٔ مقاومت داشت. در نمونهٔ حاوی ۹ درصد GGBFS و ۱ مولار NaOH تحت فشار محصورکنندهٔ ۲۰۰ کیلوپاسکال، افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز بیشینهٔ تنش انحرافی را از ۱۸۱۶ به حدود ۶۲۶۰ کیلوپاسکال افزایش داد.
- ✓ بیشترین چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک ظاهری به‌ترتیب حدود ۷۵۰ کیلوپاسکال و ۵۱/۶۱ درجه در ترکیب حاوی ۹ درصد GGBFS و ۵ مولار NaOH به دست آمد. این مقادیر به دلیل اندازه‌گیری‌نشدن فشار آب منفذی، فقط

پارامترهای ظاهری در چارچوب تنش کل هستند.

- ✓ در مجموعهٔ مستقل آزمایش‌های تحکیم، فعال‌سازی قلیایی و افزودن GGBFS موجب کاهش تراکم‌پذیری شد. شاخص فشردگی از ۰/۶۵۱ در نمونهٔ شاهد به ۰/۲۸۱ در نمونهٔ حاوی ۵ مولار NaOH و بدون GGBFS کاهش یافت. در غلظت ثابت ۳ مولار، افزودن ۹ درصد GGBFS شاخص فشردگی و شاخص باربرداری را به‌ترتیب به ۰/۰۳۲ و ۰/۰۰۷ کاهش داد.
- ✓ مشاهدات SEM و تحلیل کمی تصاویر با ImageJ نشان داد که تثبیت نمونه‌ها با کاهش سهم سطحی نواحی باز از ۲۷/۶ درصد در نمونهٔ مرجع تا ۳/۷ درصد در نمونهٔ حاوی ۹ درصد GGBFS و افزایش پیوستگی ساختار همراه بود. این روند با افزایش مقاومت و کاهش تراکم‌پذیری نمونه‌های تثبیت‌شده سازگار است. بااین‌حال، تصاویر SEM و تحلیل تصویری به‌تنهایی برای شناسایی قطعی محصولات واکنش کافی نیست.
- ✓ در میان مقادیر GGBFS بررسی‌شده، ۹ درصد بیشترین بهبود رفتار مقاومتی و کمترین تراکم‌پذیری را در مجموعه‌های آزمایشی مربوط نشان داد. با توجه به تفاوت هدف و شرایط اولیهٔ نمونه‌های سه‌محوری و تحکیم، نتایج این دو مجموعهٔ آزمایش نباید به‌صورت مستقیم برای یک ترکیب مشخص با یکدیگر مقایسه شد.

محدودیت‌های اصلی پژوهش شامل اندازه‌گیری‌نشدن فشار آب منفذی در آزمایش سه‌محوری، محدودبودن بررسی ریزساختاری به مشاهدات کیفی SEM و محدودبودن بررسی اثر زمان عمل‌آوری به سنین ۷ و ۲۸ روز بود. برای ادامهٔ پژوهش، انجام آزمایش‌های سه‌محوری با اندازه‌گیری فشار آب منفذی، بررسی زمان‌های عمل‌آوری طولانی‌تر، آزمون‌های دوام تر و خشک و بارگذاری تکراری، شناسایی فازی محصولات واکنش، ارزیابی کمی تخلخل و توزیع اندازهٔ منافذ و انجام مطالعات مقیاس بزرگ و ارزیابی اقتصادی پیشنهاد می‌شود.

منابع

Ansar Shourijeh, A., & Raeesi Estabragh, A. (2022). Evaluation of the effect of activated GGBS and hydrated lime on the improvement of a clay soil contaminated with methyl tert-butyl ether. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(8), 1743-1756. https://doi.org/https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345688.669316

Atiş, C. D., Bilim, C., Çelik, Ö., & Karahan, O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, *23*(1), 548-555. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.011

Behnood, A. (2018). Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, *17*, 14-32. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002

Chakkor, O. (2025). Durability and Microstructural Evaluation of Geopolymer Mortars Exposed to Sulphuric Acid Using Industrial By-Product Fillers. *Polymers*, *17*(17), 2310.

Coelho, P., & Camacho, D. (2024). The experimental characterization of iron ore tailings from a geotechnical perspective. *Applied Sciences*, *14*(12), 5033. https://doi.org/doi.org/10.3390/app14125033

Consoli, N. C., Lotero, A., Scheuermann Filho, H. C., Khajeh, A., Daassi-Gli, C. P. A., Vogt, J. C., & Silva, J. P. d. S. (2024). Effect of cement type on compacted iron ore tailings-binder response blends: comparative study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *36*(8), 04024230.

Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D., & Silva, R. (2012). Soil stabilisation

using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, *36*, 727-735. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037

ASTM D698-12, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3)). *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA* (2012).

ASTM D2850-15, Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils. *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, Vol. D2850−15, pp. 1–6 (2015).

ASTM D2435/D2435M-25: Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2435_D2435M-25

da Silva Ramos, L. T., de Azevedo, R. C., da Silva Bezerra, A. C., do Amaral, L. M., & Oliveira, R. D. (2024). Iron ore tailings as a new product: A review-based analysis of its potential incorporation capacity by the construction sector. *Cleaner Waste Systems*, *7*, 100137. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100137

Fischer, E. R., Hansen, B. T., Nair, V., Hoyt, F. H., Schwartz, C. L., & Dorward, D. W. (2024). Scanning electron microscopy. Current Protocols, 4(5), e1034. https://doi.org/10.1002/cpz1.1034

Fernández-Jiménez, A., Palomo, J., & Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, *29*(8), 1313-1321. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00154-4

Gupta, S., & Kumar, S. (2024). Mechanical and microstructural analysis of soft kaolin clay stabilized by GGBS and dolomite-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, *421*, 135702.

Jahani, A., Raeesi Estabragh, A., Jahani, M., & Vakili, G. (2024). Assessment of the effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) and activated GGBS on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *54*(11), 1647-1665. https://doi.org/https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365905.669583

Khatibi, M., RAEESI, E. A., Abbasi, N., & ABDOLAHI, A. J. (2015). Experimental Assessment of soil-cement mechanical behavior incorporated with organic pollution. https://doi.org/https://doi.org/10.22059/ijswr.2015.54303

Moghadas, M., & Raeesi Estabragh, A. (2017). Investigation change trend of moisture and volume of unsaturated silty soil during consolidation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *48*(1), 195-203. https://doi.org/https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.61353

Portela Farenzena, H., Bruschi, G. J., Schmitt Medina, G., de Sousa Silva, J. P., Lotero, A., & Consoli, N. C. (2024). Iron ore tailings stabilization with alternative alkali-activated cement for dry stacking: mechanical and microstructural insights. *Canadian Geotechnical Journal*, *61*(4), 649-667. https://doi.org/https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0125

Rios, S., Ramos, C., Viana da Fonseca, A., Cruz, N., & Rodrigues, C. (2019). Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *23*(2), 245-267. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1275987

Silva, J. P. S., Rissoli, A. L. C., Cacciari, P. P., da Fonseca, A. J. P. V., Scheuermann Filho, H. C., Wagner, A. C., de Azambuja Carvalho, J. V., Festugato, L., & Consoli, N. C. (2024). Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum

of confining pressures. *Soils and Foundations*, *64*(2), 101438. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101438

Sithole, T., Tsotetsi, N., & Mashifana, T. (2021). Synthesis of ambient cured GGBFS based alkali activated binder using a sole alkaline activator: a feasibility study. *Applied Sciences*, *11*(13), 5887. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app11135887

Yellishetty, M., Karpe, V., Reddy, E., Subhash, K., & Ranjith, P. G. (2008). Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, *52*(11), 1283-1289. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.007

ویرایشاری

EXTENDED ABSTRACT

Background

The expansion of mining and mineral-processing activities has generated large quantities of iron ore tailings, commonly stored in tailings dams or disposal facilities for extended periods. Their accumulation requires substantial storage areas and long-term management and monitoring. Reuse in civil and geotechnical engineering may reduce stored volumes, but direct application is often limited by insufficient shear resistance and excessive deformation under loading. The engineering behavior of iron ore tailings depends on particle-size distribution, mineralogical composition, specific gravity, initial void ratio, moisture condition, and degree of compaction. Fine particles and limited interparticle bonding may restrict their use as embankment fill, foundation material, structural backfill, or subgrade, requiring improvements in shear resistance and volumetric stability. Chemical stabilization with cement or lime is commonly used to improve soils and industrial residues, while reactive industrial by-products can serve as alternative or supplementary binders. Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS), containing calcium-, silicon-, and aluminum-bearing components, can participate in alkaline activation, while sodium hydroxide (NaOH) increases system alkalinity and facilitates dissolution of reactive components, promoting progressive hardening. The mechanical response of alkali-activated mixtures depends on activator concentration, reactive precursor content, liquid content, compaction condition, curing period, and stress state. Increasing NaOH concentration may enhance activation, but its relationship with strength is not necessarily linear. Likewise, the contribution of GGBFS depends on system alkalinity and curing time. Despite growing interest in alkali-activated binders, the combined effects of these variables on the triaxial strength and one-dimensional compressibility of actual iron ore tailings remain insufficiently understood.

Objective

This study evaluated the effects of NaOH concentration and GGBFS content on the compaction characteristics, triaxial response, apparent total-stress shear parameters, and one-dimensional compressibility of iron ore tailings, together with the effects of curing period and confining pressure. The novelty lies in the integrated assessment of NaOH concentration, GGBFS content, curing period, and confining pressure within a unified experimental program. Particular attention was given to peak deviator stress, apparent total-stress cohesion and friction angle, compression index, and unloading index, enabling simultaneous evaluation of strength development and one-dimensional compressibility.

Materials and Methods

Iron ore tailings collected from the Sork mining area in Yazd Province, Iran, were used as the base material and dried at 60 ± 2 °C for 72 h to minimize variations in natural moisture content. Their physical properties, including Atterberg limits, specific gravity of solids, and standard compaction characteristics, were determined, and the material was classified as low-plasticity clay (CL) according to the Unified Soil Classification System. GGBFS was used as the supplementary reactive material and NaOH as the alkaline activator. The chemical compositions of the untreated tailings and GGBFS were determined by X-ray fluorescence analysis. The tailings contained substantial silica, iron oxide, and alumina, whereas GGBFS contained higher proportions of calcium oxide, silica, and alumina. Chemical characterization was limited to the raw materials and was not used to identify reaction products in stabilized specimens. NaOH concentrations of 0, 1, 3, and 5 M and GGBFS contents of 0, 3, 6, and 9 wt.% of total dry solids were investigated, with distilled water used for the 0 M condition. Standard compaction tests were conducted according to ASTM D698 to determine maximum dry unit weight and optimum moisture content. Cylindrical specimens 38 mm in diameter were prepared for unconsolidated-undrained triaxial testing. The specimens were initially compacted to a height of 120 mm and trimmed to a final height of 80 mm. The required dry mass was calculated from specimen volume and the corresponding maximum dry unit weight, and specimens were prepared at 100% relative compaction. The total liquid content was maintained at 11% of dry solids, corresponding to a liquid-to-solid ratio of 0.11. Dry materials were mixed before gradual addition of the liquid phase, compacted in three layers, and each layer was lightly scarified before placement of the next. Specimens were sealed in polyethylene bags and cured at 30 ± 2 °C for 7 or 28 days. Unconsolidated-undrained triaxial tests were performed according to ASTM D2850 under confining pressures of 100, 200, and 300 kPa. Specimens were tested at their as-cured moisture condition without prior saturation or consolidation, using a constant axial displacement rate of 1 mm/min. Because pore-water pressure was not measured, Mohr–Coulomb shear parameters were interpreted as apparent cohesion and apparent friction angle in terms of total stress. One-dimensional consolidation tests were conducted according to ASTM D2435/D2435M on separately prepared specimens with a diameter of 50 mm, final height of 17 mm, initial moisture content of 13.2%, and initial void ratio of 0.945. Specimens were submerged for 24 h before successive vertical stresses of 100, 200, 400, and 800 kPa were applied for 48 h at each stage, followed by unloading to 400 and 200 kPa. The compression index, (C_c), was obtained from the compression portion of the $e - \log\sigma_v'$ curve, whereas the unloading index, (C_s), was determined from the unloading path. Selected untreated and stabilized specimens were also examined by scanning electron microscopy, including untreated tailings, tailings activated with 5 M NaOH without GGBFS, and mixtures containing 3 M NaOH with 3 and 9 wt.% GGBFS. The surfaces were gold-coated and imaged using a ZEISS scanning electron microscope in secondary electron mode at 16 kV. SEM observations were used for qualitative comparison of particle morphology, interparticle spaces, particle contacts, and local structural continuity, without identifying specific reaction products or quantifying porosity.

Results

Increasing GGBFS content from 0 to 9 wt.% reduced the maximum dry unit weight from 21.09 to 20.30 kN/m³ and increased the optimum moisture content from 11.03 to 12.10%, while the specific gravity of solids decreased from 3.25 to 3.17, indicating changes in compaction behavior. Increasing NaOH concentration increased the peak deviator stress of slag-free specimens at all confining pressures, with the largest gain between 0 and 1 M and smaller additional gains at 3 and 5 M. GGBFS produced a greater strength increase, particularly at higher NaOH concentrations. At 200 kPa and 5 M NaOH, increasing GGBFS from 0 to 9 wt.% raised the peak deviator stress from 1,265 to 5,824 kPa. The highest value among 7-day specimens was approximately 6.9 MPa for 9 wt.% GGBFS and 5 M NaOH at 300 kPa. Peak deviator stress also increased with confining pressure. Curing significantly enhanced strength. At 1 M NaOH and 200 kPa, extending curing from 7 to 28 days increased peak deviator stress from approximately 1,370 to 2,150 kPa for 3 wt.% GGBFS and from 1,640 to 3,780 kPa for 6 wt.% GGBFS. The largest increase occurred at 9 wt.% GGBFS, from 1,816 to approximately 6,260 kPa. Apparent total-stress shear parameters also increased with NaOH and GGBFS content. Apparent cohesion increased from approximately 80 to 750 kPa, while the apparent friction angle increased from 21.18° to 51.61°. Because pore-water pressure was not measured, these values represent apparent total-stress rather than effective-stress parameters. One-dimensional consolidation results showed reduced compressibility. The compression index decreased from 0.651 in the untreated specimen to 0.281 with 5 M NaOH and no GGBFS, and further to 0.032 with 3 M NaOH and 9 wt.% GGBFS. The unloading index similarly decreased from 0.032 to 0.007. SEM observations showed irregular plate-shaped particles and visible interparticle spaces in untreated tailings, whereas NaOH activation increased local particle aggregation and contact. At 3 M NaOH, increasing GGBFS from 3 to 9 wt.% produced smoother surfaces and more continuous regions between particles. These qualitative observations were consistent with increased triaxial strength and reduced one-dimensional compressibility, although SEM alone could not identify the chemical nature of the reaction products.

Conclusion

The results showed that NaOH activation and GGBFS addition improved the mechanical response and reduced the one-dimensional compressibility of iron ore tailings. NaOH alone increased peak deviator stress, particularly from 0 to 1 M, while GGBFS produced greater strength gains that became more pronounced at 3 and 5 M NaOH. The highest peak deviator stress was obtained with 5 M NaOH and 9 wt.% GGBFS, whereas the lowest compression and unloading indices in the separate consolidation series occurred with 3 M NaOH and 9 wt.% GGBFS. Longer curing substantially increased strength, especially at higher GGBFS contents. Apparent total-stress cohesion and friction angle also increased after treatment, but because pore-water pressure was not measured, these parameters cannot be interpreted in terms of effective stress. SEM observations

provided qualitative evidence of increased particle contact and structural continuity, consistent with strength development, progressive hardening, and reduced particle rearrangement. However, because reaction products were not directly identified, these improvements cannot be conclusively attributed to specific reaction phases. Overall, combined NaOH activation and GGBFS addition improved the geotechnical performance of iron ore tailings, although long-term durability, wetting–drying response, effective-stress behavior, and field-scale performance require further investigation before practical implementation.

ویراستاری شده