

# تأثیر سرباره‌ی فولادسازی در خصوصیات مقاومتی و پایداری حجمی خاک‌های رسی تثبیت‌شده با آهک

محمودرضا عبدی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

نوید بھلولی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)  
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۱/۳، ص. ۳۹-۵۰

در این نوشتار، تأثیر سرباره‌ی تولیدی کارخانه‌ی ذوب‌آهن اصفهان در تورم، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری کاتولینیت و کاتولینیت تثبیت‌شده با آهک تحت شرایط خشک و پس از تورم (اشباع شدن) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مقادیر ۱، ۷، ۲۸، ۵ و ۳ درصد آهک و ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۰ درصد سرباره با کاتولینیت مخلوط و پس از ۱، ۷، ۲۸، ۹۰ روز عمل‌آوری تحت دمای ۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تورم، مقاومت فشاری و خصوصیات خمیری نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و سرباره به‌صورت هم‌زمان در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با آهک به مقدار چشم‌گیری بهبود یافته است. بهبود این خصوصیات در نمونه‌های تثبیت‌شده، به مقدار سرباره، آهک و مدت زمان عمل‌آوری بستگی دارد. میزان تورم و مقاومت نمونه‌های کاتولینیت تثبیت‌نشده به ترتیب ۴/۸۵٪ و ۴/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و نمونه‌های تثبیت‌شده با ۵٪ آهک و ۲۰٪ سرباره به ترتیب ۱۴٪ و ۴۶/۵۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تعیین شده است، که بیانگر ۳۵۲٪ کاهش در تورم و ۹۷٪ افزایش در مقاومت است.

واژگان کلیدی: کاتولینیت، سرباره‌ی فولادسازی، آهک، تورم، مقاومت فشاری محدودنشده، حدود اتربرگ.

abdi@kntu.ac.ir  
navidbohlooli@gmail.com

## ۱. مقدمه

ترکیبی غیرفازی حاوی سیلیکات‌های کلسیم، فریت‌های کلسیم و اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منگنز، کلسیم و منیزیم است و به طور هم‌زمان با فولاد تولید می‌شود.<sup>[۱]</sup> نتایج مطالعات برخی پژوهشگران نشان داده است که واکنش‌ها به ترکیبات کانی شناسی، فاز معدنی و مقدار قلیایی و نیز توانایی هیدراته‌شدن سرباره بستگی دارد و گزارش شده است که قلیایی بیشتر باعث بهبود مشخصات هیدرولیکی و افزایش واکنش‌های سرباره می‌شود.<sup>[۱-۹]</sup> در پژوهش دیگری نیز تأثیر آهک و سرباره در خصوصیات کاتولینیت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از سه نوع سرباره‌ی فولاد، یک نوع سرباره‌ی آهن، آهک زنده و سیمان پرتلند استفاده شده و نتایج نشان داده است که افزایش مقاومت نمونه به ترکیبات و مقدار سرباره، حضور آهک به‌عنوان فعال‌کننده، زمان عمل‌آوری و ترکیبات خاک بستگی دارد. تأثیر سرباره‌ی فولاد در پایداری حجمی کاتولینیت بیشتر از تأثیر سرباره‌ی آهن بوده است.<sup>[۱۱]</sup> همچنین پژوهشگران دیگری تأثیر جایگزینی سرباره با آهک را در کاتولینیت تثبیت‌شده با آهک، در حضور گچ بررسی کرده و نتایج مطالعات‌شان نشان داده است که در حضور گچ، جایگزینی سرباره با آهک، تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت خواهد داشت.<sup>[۱۲]</sup> تأثیر آهک و سرباره‌ی فولادسازی در دوام (یخبندان - ذوب یخ) و مقاومت فشاری کاتولینیت در مطالعه‌ی دیگری مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داده است که

تثبیت به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و رفتار مهندسی خاک برای تأمین اهداف از پیش تعیین شده اطلاق می‌شود، که موجب حفاظت از محیط زیست، حفظ منابع و صرفه‌جویی‌های اقتصادی می‌شود. برای خاک‌های رسی یا رس‌دار، تثبیت با آهک و تراکم مخلوط تحت رطوبت بهینه، مناسب‌ترین روش است.<sup>[۲]</sup> پژوهش‌ها نشان داده‌اند که با افزودن فقط ۳٪ آهک هیدراته، رده‌بندی رس‌ها از CH به ML تغییر یافته و درصد ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون در خاک رس به‌صورت آبی از ۵۶ به ۴۰ درصد و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به ۲٪ کاهش یافته است.<sup>[۳]</sup> خاک‌های تثبیت‌شده با آهک، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک کمتر و درصد رطوبت بهینه‌ی بیشتری در مقایسه با خاک تثبیت‌نشده را دارند. افزودن آهک به خاک رس سبب کاهش خصوصیات خمیری، افزایش مقاومت و همچنین کاهش قابل ملاحظه‌ی قابلیت تورم آن می‌شود.<sup>[۳-۶]</sup>

سرباره‌ها از اکسیدهای فلزی یا شبه فلزی تشکیل شده‌اند و به‌هنگام استفاده، شبیه به آنها عمل می‌کنند. طبق تعریف مؤسسه‌ی ASTM<sup>۱</sup>، سرباره‌ی فولادسازی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۷.

جدول ۱. آزمایش های انجام شده.

استاندارد ASTM	آزمایش	استاندارد ASTM	آزمایش
D۴۳۱۸-۸۷ <sup>[۲۳]</sup>	حدود روانی و خمیری	D۲۲۱۶-۷۱ <sup>[۲۲]</sup>	تعیین رطوبت
--	تورم	D۱۵۵۷-۱۲ <sup>[۲۴]</sup>	تراکم
D۱۰۳۱-۹۶ <sup>[۲۶]</sup>	XRD*	D۸۵۴-۱۰ <sup>[۲۵]</sup>	چگالی
E۱۰۳۱-۹۶	XRF**	D۲۱۶۶-۱۳ <sup>[۲۷]</sup>	مقاومت فشاری محدود نشده
--	—	D۴۲۷-۰۴ <sup>[۲۸]</sup>	حد انقباض

\* X-Ray Diffraction

\*\* X-Ray Fluorescence

### ۳.۳. سرباره

در این مطالعه، از سرباره فولادسازی (BOS)<sup>۲</sup> استفاده شده است. سرباره مصرفی با دانه بندی طبیعی رده شده از الک شماره ۴۰ و با چگالی ۳/۳۲ بوده است. اجزاء تشکیل دهنده رس، آهک و سرباره توسط آزمایش XRF و کانی های تشکیل دهنده آنها توسط آزمایش XRD تعیین و در جدول ۳ ارائه شده است. اکسیدهای موجود در سرباره صنایع مختلف، باعث به وجود آمدن درجات مختلف

استفاده از آهک و سرباره به تنهایی یا توأم باعث افزایش مقاومت در برابر یخبندان - ذوب یخ (دوام) نمونه ها می شود.<sup>[۱۳]</sup> در این پژوهش تأثیر سرباره تولیدی کارخانه ذوب آهن اصفهان در میزان پایداری حجمی (تورم - انقباض)، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری کائولینیت و کائولینیت تثبیت شده با آهک تحت شرایط خشک و پس از اشباع شدن مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳. مشخصات شیمیایی مصالح مصرفی.

اجزاء	کائولینیت	آهک	سرباره
تشکیل دهنده	مقدار (%)	مقدار (%)	مقدار (%)
L.O.I	۲,۴۶	۳۰,۷۶	۱۲,۵۲
Na <sub>2</sub> O	۰,۰۷	۰,۱	۰,۱۷
MgO	۰,۴	۰,۳۲	۴,۷۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۶,۳۳	۰,۶۳	۲,۳۳
SiO <sub>2</sub>	۶۷,۵۱	۰,۳۹	۱۰,۰۷
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰,۰۹	۰,۰۲	۱,۳۸
SO <sub>3</sub>	۰,۰۹	۰,۱۶	۰,۸۷
K <sub>2</sub> O	۰,۴۴	۰,۰۲	۰,۰۵
CaO	۱,۸۹	۶۶,۳	۴۵,۷۷
TiO <sub>2</sub>	۰,۰۳	< ۰,۰۳	۰,۹۲
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰,۱	< ۰,۰۱	۱,۴۲
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱	< ۰,۰۳	۰,۲۲
MnO	۰,۱	۰,۰۱	۱,۴۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۴۹	۰,۱	۱۴,۹۲

#### ترکیبات

Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>2</sub>	—	—
Quartz	SiO <sub>2</sub>	—	—
Orthoclase	kAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	—	—
Illite	kAlSi <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	—	—
Montmorillonite	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ۴SiO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	—	—
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>
Portlandite	—	Ca(OH) <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>
Larnite	—	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Periclase	—	—	MgO
Magnetite	—	—	Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

### ۲. آزمایش های شناسایی مصالح

آزمایش های شناسایی مورد نیاز طبق ضوابط استاندارد ASTM انجام شده است، که فهرست آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح

#### ۱.۳. آهک

آهک در بسته های ۴۰ کیلوگرمی از کارخانه آهک سمنان تهیه و جهت جلوگیری از واکنش آن با دی اکسید کربن موجود در هوا در کیسه های نایلونی نگهداری شده است. آهک مصرفی در ساخت نمونه ها، رده شده از الک شماره ۲۰۰ با چگالی ۲/۳ بوده است.

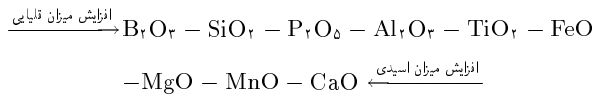
#### ۲.۳. خاک رس

خاک رس استفاده شده با عنوان کائولینیت در بسته های ۵۰ کیلوگرمی از شرکت خاک چینی ایران تهیه و خصوصیات آن در جدول ۲ ارائه شده است. براساس سیستم طبقه بندی متحد، خاک رس مصرفی در رده CL قرار می گیرد.<sup>[۱]</sup>

جدول ۲. مشخصات کائولینیت مصرفی.

مشخصات	مقدار
حد روانی (LL)	٪۴۶
حد خمیری (PL)	٪۲۷
شاخص خمیری (PI)	٪۱۹
حد انقباض (SL)	٪۲۶
چگالی خشک بیشینه ( $\rho_{d\max}$ )	۱/۶۹
رطوبت بهینه ( $\omega$ )	٪۲
چگالی ( $G_s$ )	۲/۶

حالت قلیایی یا اسیدی به این صورت می‌شود:



شود. بخش زیرین از یک دیسک به قطر ۱۰۰ و به ضخامت ۲۰ میلی‌متر تشکیل شده است، که استوانه‌ای بالایی بدون آنکه حرکتی داشته باشد، روی آن نصب شده است. این دو قسمت توسط ۴ عدد پیچ نمره ۵ به یکدیگر متصل شده‌اند. پس از قرارگرفتن نمونه درون قالب، یک کلاهک پلاستیکی سبک، به منظور استقرار میله‌ی کرنش‌سنج، بر روی آن قرار گرفت. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون آب قرار گرفتند و تورم آنها توسط یک شابلون با حساسیت ۰/۰۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مطالعات مقدماتی نشان داد که بیشینه‌ی ۴۸ ساعت، برای تکمیل تورم نمونه‌ها کفایت می‌کند. پس از انجام آزمایش تورم، نمونه‌ها از قالب خارج و رطوبت سطحی آنها خشک شد و بلافاصله تحت آزمایش تک محوری در حالت اشباع قرار گرفتند. بدین طریق تأثیر تغییرات حجم در مقاومت و مقایسه‌ی آن با مقاومت نمونه در حالت خشک میسر شده است.

#### ۴. آزمایش تورم

بررسی خصوصیات تورمی خاک‌ها، به دلیل تأثیر تغییرات حجم در کاهش یا افزایش مقاومت خاک حائز اهمیت است. دستگاه تحکیم، که عمدتاً جهت سنجش تورم مورد استفاده قرار می‌گیرد، امکان انجام آزمایش تورم و مقاومت بر روی یک نمونه‌ی واحد را تأمین نمی‌کند. لذا جهت بررسی تغییرات حجم، یک قالب طراحی و ساخته شد تا نمونه پس از تورم، قابلیت انجام آزمایش مقاومت فشاری را نیز داشته باشد. شکل ۱، قالب طراحی شده و نحوه‌ی انجام آزمایش تورم را نشان می‌دهد. قالب از یک استوانه و یک بخش زیرین تشکیل شده است. ارتفاع استوانه ۱۰۰ میلی‌متر با قطرهای خارجی و داخلی به ترتیب ۵۸ و ۳۸/۲ میلی‌متر بوده است. تعداد ۲۴ عدد سوراخ به قطر ۳ میلی‌متر نیز به صورت متقارن در ۳ ردیف بر روی استوانه ایجاد شده است، تا جذب آب از طریق نمونه آسان‌تر و به‌طور یکنواخت‌تر انجام

#### ۵. نحوه‌ی تهیه و عمل‌آوری نمونه‌ها

مخلوط‌های مختلفی از ترکیب کائولینیت، آهک و سرباره مطابق جدول ۴ ساخته و آزمایش شدند. رطوبت بهینه (OMC) <sup>۳</sup> و چگالی خشک بیشینه (MDD) <sup>۴</sup> برای هر یک از مخلوط‌ها به طور جداگانه تعیین و در ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. طبق استاندارد، نمونه‌هایی به ارتفاع ۷۹ و قطر ۳۸ میلی‌متر تهیه و برای زمان‌های ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تحت دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری و سپس آزمایش شدند. برای هر مخلوط ۶ نمونه تهیه شد، که ۳ نمونه جهت انجام آزمایش تک‌محوری در حالت خشک و ۳ نمونه‌ی دیگر ابتدا مورد آزمایش تورم و سپس تحت آزمایش مقاومت در حالت اشباع قرار گرفتند. نمونه‌های خردشده نیز جهت انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ استفاده شده‌اند. مقدار کائولینیت مورد نیاز جهت ساخت نمونه‌ها با مقادیر مورد نیاز آهک و سرباره به صورت درصدی از وزن خشک به مدت ۳ دقیقه با هم‌زن برقی مخلوط شدند. سپس مقدار رطوبت بهینه‌ی لازم مطابق جدول ۴ به تدریج به مخلوط اضافه شده و اختلاط به مدت ۴ دقیقه‌ی دیگر ادامه یافته است. ساخت نمونه‌ها بلافاصله پس از اختلاط انجام شده است، تا از تغییر رطوبت مخلوط جلوگیری شود. مخلوط در ۴ لایه داخل قاب ریخته و هر لایه جداگانه به‌طور یکنواخت متراکم شده است. پس از اتمام ساخت نمونه‌ها، وزن و ابعاد آنها تعیین شده است.

نمونه‌های ساخته‌شده در چندین لایه‌ی سلفون پیچیده و درون ظرف‌های پلاستیکی دربسته حاوی آب به منظور عمل‌آوری قرار گرفته‌اند. بدین طریق رطوبت نسبی در حدود ۱۰۰٪ تأمین و از تبخیر رطوبت نمونه‌ها در حین عمل‌آوری جلوگیری به عمل آمده است. سپس جعبه‌ها درون گرم‌خانه تحت دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. بعد از اتمام عمل‌آوری، نمونه‌ها از گرم‌خانه خارج و توزین شدند. اختلاف درصد رطوبت نمونه‌ها قبل و بعد از عمل‌آوری در بیشترین حالت، ۳٪ رطوبت اولیه بوده است، که قابل ملاحظه نبوده است.

#### ۶. نتایج

##### ۱.۶. تورم

##### ۱.۱.۶. تورم نمونه‌های کائولینیت - آهک

میزان تورم نمونه‌های کائولینیت و کائولینیت تثبیت‌شده با مقادیر مختلف آهک پس از زمان‌های عمل‌آوری ۱ تا ۹۰ روز در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود



الف) قالب نگهدارنده‌ی نمونه؛



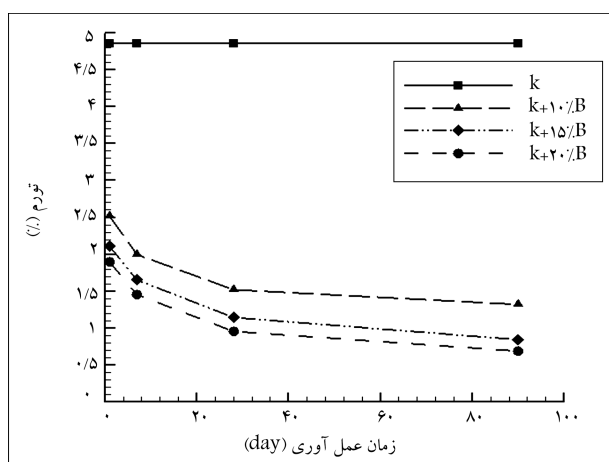
ب) نحوه‌ی اندازه‌گیری تورم.

شکل ۱. روش اندازه‌گیری تورم آزاد نمونه‌های تثبیت‌شده و نشده.

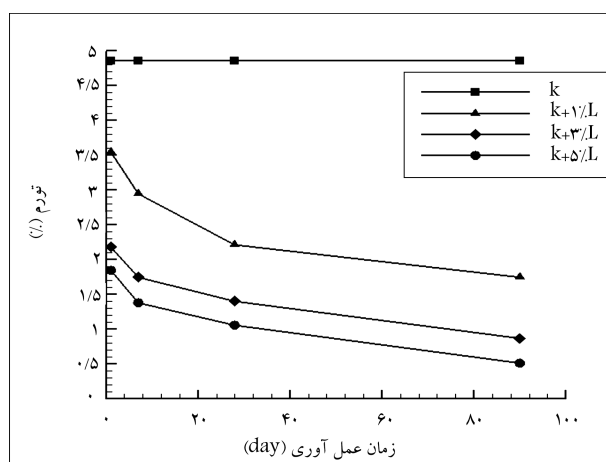
جدول ۴. رطوبت بهینه و چگالی خشک بیشینه‌ی مخلوط‌های مورد مطالعه.

Kaolinite		Kaolinite+Lime		Kaolinite+B.O.S		Kaolinite+Lime+B.O.S					
MDD	OMC	MDD	OMC	MDD	OMC	MDD	OMC				
(gr/m <sup>۳</sup> )	(%)	(gr/m <sup>۳</sup> )	(%)	(gr/m <sup>۳</sup> )	(%)	(gr/m <sup>۳</sup> )	(%)				
		K + %۱L	۱,۶۸	۲۱,۴	K + %۱۰B	۱,۷۴	۱۹,۷	K + %۱L + %۱۰B	۱,۷۴	۲۰	
								K + %۱L + %۱۵B	۱,۷۷	۱۹,۵	
								K + %۱L + %۲۰B	۱,۸۱	۱۸,۵	
								K + %۳L + %۱۰B	۱,۷۳	۲۰,۵	
K	۱,۶۹	۲۱	K + %۳L	۱,۶۷	۲۲	K + %۱۵B	۱,۷۷	۱۹	K + %۳L + %۱۵B	۱,۷۶	۱۹,۷
									K + %۳L + %۲۰B	۱,۷۹	۱۹
									K + %۵L + %۱۰B	۱,۷	۲۱
									K + %۵L + %۱۵B	۱,۷۳	۲۰,۵
									K + %۵L + %۲۰B	۱,۷۱	۱۹,۷

K=Kaolinite, B.O.S=Basic Oxygen Slag, L=Lime



شکل ۳. تغییرات تورم نسبت به زمان عمل آوری نمونه‌های کائولینیت نیت - سرباره.



شکل ۴. تغییرات تورم نسبت به زمان عمل آوری نمونه‌های کائولینیت - آهک.

سرباره به کائولینیت نیز موجب کاهش تورم نمونه‌ها شده است و این روند با افزایش مقدار سرباره افزایش می‌یابد. پس از ۱ روز عمل آوری نمونه‌های تثبیت شده با سرباره در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک (شکل ۲) تورم کمتری از خود نشان داده‌اند. این در حالی است که ذرات سرباره، عبوری از الک شماره ۴۰ بودند و سطح مخصوص کمتر نسبت به آهک عبوری از الک ۲۰۰ داشتند. سطح مخصوص بزرگ‌تر، بیانگر ریزدانه‌تر بودن ذرات و بنابراین سطوح بیشتر برای انجام واکنش‌های پوزولانی وسیع‌تر است. کاهش تورم ناشی از افزودن سرباره احتمالاً به دلیل اصلاح دانه‌بندی مخلوط و همچنین ترکیبات پوزولانی حاصل از واکنش‌های انجام شده بین سرباره و کائولینیت بوده است، که تابع زمان عمل آوری هستند.

با افزودن سرباره به میزان ۱۰٪، تورم نمونه‌ها پس از ۹۰ روز عمل آوری تقریباً ۱۹۲٪ نسبت به نمونه‌های عمل آوری شده برای ۱ روز و ۳۶۷٪ نسبت به کائولینیت تثبیت نشده کاهش تورم داشته است. مقدار کاهش تورم با افزایش سرباره به ۱۵ و ۲۰ درصد، به ترتیب ۵۷۷ و ۷۰۳ درصد بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مقدار بهینه‌ی سرباره، ۱۵٪ بوده و افزایش بیشتر سرباره به ۲۰٪، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در کاهش تورم نداشته است.

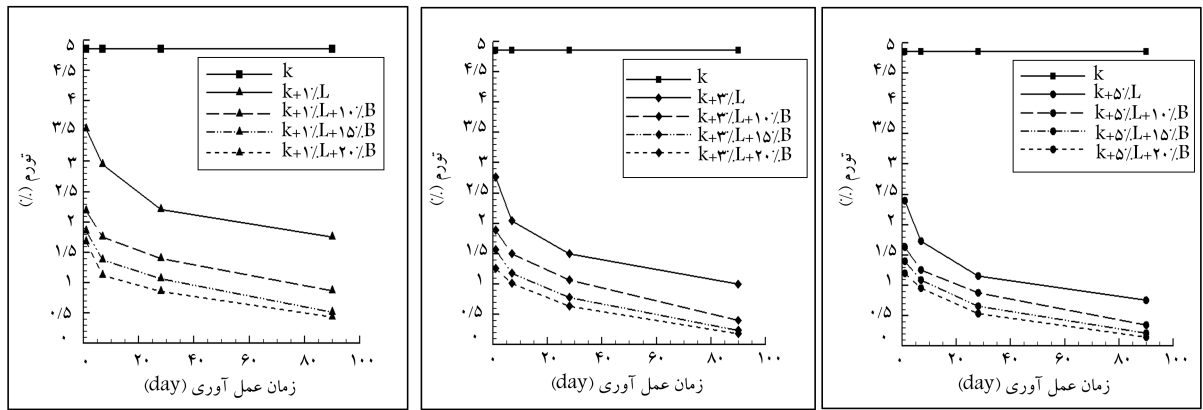
در مطالعات دیگری گزارش شده است که ترکیبات مختلف موجود در سرباره و

که تورم کائولینیت تثبیت نشده برابر با ۴/۸۵٪ بوده و زمان عمل آوری تأثیری در مقدار آن نداشته است، که این امر به دلیل عدم وجود مواد افزودنی و بنابراین ترکیبات پوزولانی بوده است. افزودن آهک به عنوان یک ماده‌ی تثبیت کننده به کائولینیت باعث کاهش خصوصیات تورمی آن شده است، که مقدار آن با افزایش درصد آهک و زمان عمل آوری به شدت کاهش یافته است. با افزودن ۱، ۳ و ۵ درصد آهک به نمونه‌ها و عمل آوری به مدت بیشینه‌ی ۹۰ روز، تورم نمونه‌ها به ترتیب ۱، ۱/۷۵ و ۰/۷۵ درصد تعیین شده است، که به ترتیب ۲۷۷، ۴۸۵ و ۶۴۷ درصد کاهش نسبت به کائولینیت تثبیت نشده نشان می‌دهند.

نرخ کاهش تورم نمونه‌ها طی عمل آوری از ۱ تا ۹۰ روز به صورت چشم‌گیری افزایش یافته است، که این امر بیانگر وابسته بودن واکنش‌های پوزولانی به زمان عمل آوری است. بررسی‌های برخی پژوهشگران نشان داده است که استفاده از ۱/۵٪ آهک باعث کاهش خصوصیات تورمی خاک رس و تبدیل آن به خاک غیرخمیری می‌شود. [۱۶، ۱۵، ۱۳]

#### ۲.۱.۶. تورم نمونه‌های کائولینیت - سرباره

میزان تورم نمونه‌های کائولینیت تثبیت شده با مقادیر مختلف سرباره پس از عمل آوری برای ۱ تا ۹۰ روز در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزودن



ج) ۵٪ آهک + سرباره.

ب) ۳٪ آهک + سرباره.

الف) ۱٪ آهک + سرباره.

شکل ۴. تغییرات تورم نسبت به زمان عمل آوری.

جدول ۵. تورم نمونه‌های کاتولینیت تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و سرباره پس از ۹۰ روز عمل آوری.

تورم (%)	مخلوط	تورم (%)	مخلوط
۰٫۵۱	K + ۱٪A + ۱۵٪B	۰٫۸۵	K
۰٫۴۳	K + ۱٪A + ۲۰٪B	۱٫۷۵	K + ۱٪A
۰٫۴	K + ۳٪A + ۱۰٪B	۱	K + ۳٪A
۰٫۲۳	K + ۳٪A + ۱۵٪B	۰٫۷۵	K + ۵٪A
۰٫۱۸	K + ۳٪A + ۲۰٪B	۱٫۳۲	K + ۱۰٪A
۰٫۳۴	K + ۵٪A + ۲۰٪B	۰٫۸۴	K + ۱۵٪A
۰٫۲۱	K + ۵٪A + ۲۰٪B	۰٫۶۹	K + ۲۰٪A
۰٫۱۴	K + ۵٪A + ۲۰٪B	۰٫۸۷	K + ۱۵٪A + ۲۰٪B

واکنش‌های آنها با خاک تأثیر به‌سزایی در افزایش کارایی آن در بهبود خصوصیات خاک رس دارند.<sup>[۱۷،۱۱]</sup>

### ۳.۱.۶. تورم نمونه‌های کاتولینیت - آهک - سرباره

افزودن آهک و سرباره به کاتولینیت به طور هم‌زمان موجب کاهش هر چه بیشتر تورم مخلوط‌های مورد مطالعه می‌شود و روند این تغییرات با افزایش مقدار سرباره افزایش می‌یابد (شکل ۴). درصد کاهش تورم نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و سرباره پس از ۹۰ روز عمل آوری در جدول ۵ ارائه شده است.

میزان تورم کاتولینیت تثبیت شده با ۳، ۱ و ۵ درصد آهک به همراه ۲۰٪ سرباره پس از ۹۰ روز عمل آوری ۰٫۴۳، ۰٫۱۸ و ۰٫۱۴ درصد تعیین شده است، که به ترتیب ۴۰٫۷، ۴۸٫۷ و ۵۵ درصد نسبت به کاتولینیت تثبیت شده با همین مقادیر آهک (بدون سرباره) و نسبت به کاتولینیت تثبیت نشده به ترتیب ۱۱۴۱، ۲۷۳۲ و ۳۵۲۷ درصد کاهش داشته است. بخشی از کاهش تورم ناشی از جایگزین شدن ذرات رسی تورم‌پذیر توسط ذرات سرباره و آهک است، لیکن دلیل اصلی این تغییرات افزایش میزان قلیایی محیط و در نتیجه واکنش‌های پوزولانی گسترده‌تر بوده است.<sup>[۱۰،۹]</sup> برخی پژوهشگران نیز تأثیر استفاده از سرباره و آهک در میزان تورم خاک رس سولفات را مورد بررسی قرار دادند، که نتایج بیان‌گر کاهش میزان تورم نمونه‌ها پس از عمل آوری از ۸٪ به ۱٪ تا ۰ (با توجه به مقادیر سولفات موجود در خاک) است.<sup>[۱۸]</sup>

## ۲.۶. مقاومت فشاری

### ۱.۲.۶. مقاومت فشاری نمونه‌های کاتولینیت - سرباره

تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های کاتولینیت - سرباره در حالت خشک و اشباع (پس از انجام آزمایش تورم) در شکل ۵ و جدول ۶ نشان داده شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های کاتولینیت بدون سرباره تا بیشینه ۹۰ روز عمل آوری در حالت خشک و پس از اشباع شدن مقداری ثابت و به ترتیب ۴٫۸ و ۱٫۶۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و مقدار کرنش آنها در لحظه‌ی گسیختگی ۲٫۲۵ و ۷ درصد بوده است. مشاهده می‌شود که زمان عمل آوری هیچ تأثیری در افزایش یا کاهش مقاومت و کرنش این نمونه‌ها نداشته است. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰٪ سرباره در حالت خشک پس از ۹۰ روز عمل آوری، ۱۵٫۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تعیین شده است، که ۲٫۶۲ برابر مقاومت نمونه‌ی عمل آوری شده به مدت ۱ روز و ۳۱۴٪ نسبت به کاتولینیت تثبیت نشده افزایش داشته است. با افزایش مقدار سرباره به ۱۵ و ۲۰ درصد، مقاومت‌های فشاری به ترتیب به ۴۱۸ و ۴۷۴ درصد افزایش یافته‌اند. همچنین میزان کرنش گسیختگی این نمونه‌ها به ترتیب ۱٫۶۳، ۱٫۳۷ و ۱٫۲۳ تعیین شده است. با توجه به مقدار آهک آزاد موجود در سرباره، افزایش مقاومت و کاهش کرنش در لحظه‌ی گسیختگی نمونه‌ها در حالت خشک در روزهای ابتدایی عمل آوری، احتمالاً ناشی از اصلاح دانه‌بندی مخلوط و همچنین تبادل کاتیونی بوده است. با افزایش زمان عمل آوری و انجام واکنش‌های پوزولانی گسترده، خصوصیات مقاومتی نمونه‌ها بهبود می‌یابد.<sup>[۱۹،۱۲]</sup> سرباره تأثیر مناسبی در افزایش مقاومت فشاری و کاهش کرنش گسیختگی نمونه‌های تثبیت شده در حالت اشباع نیز داشته است. مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سرباره پس از ۹۰ روز عمل آوری، به ترتیب ۱۱٫۵۵، ۱۶٫۸۸ و ۱۸٫۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است، که ۶۹۱، ۱۰۱۱ و ۱۰۹۲ درصد نسبت به کاتولینیت تثبیت نشده افزایش نشان می‌دهند.

کرنش این نمونه‌ها در لحظه‌ی شکست نیز به ترتیب ۱٫۸۱، ۱٫۶۳ و ۱٫۴۶ درصد تعیین شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۵ و جدول ۶ ملاحظه می‌شود که مقاومت و کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سرباره در حالت خشک و اشباع تفاوت آن‌چنانی با یکدیگر ندارند. این امر نشان‌دهنده‌ی آن است که واکنش‌های شیمیایی محدود انجام شده نیز برای مقابله با رسوخ آب بین ذرات کفایت کرده است.<sup>[۱]</sup> بنابراین می‌توان گفت که حضور آب در مجاورت نمونه‌های تثبیت شده، تأثیر چندانی در ساختار متراکم شده و رفتار نمونه‌های تثبیت شده نداشته است.

جدول ۶. کرنش نمونه‌های کاتولینیت - سرباره در لحظه‌ی گسیختگی.

زمان عمل آوری	مصالح							
	K/۲۰+B		K/۱۵+B		K/۱۰+B		k	
	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)
۱	۱,۹۴	۲,۳۵	۲	۳	۲,۰۶	۳	۲,۲۵	۷
۷	۱,۷۳	۱,۷۵	۱,۸۳	۲	۱,۹۴	۲,۵۰	۲,۲۵	۷
۲۸	۱,۴۶	۱,۶۳	۱,۶	۱,۸۴	۱,۷۱	۲,۱۳	۲,۲۵	۷
۹۰	۱,۲۳	۱,۴۶	۱,۳۷	۱,۶۳	۱,۶۳	۱,۸۱	۲,۲۵	۷

جدول ۷. کرنش نمونه‌های کاتولینیت - آهک در لحظه‌ی گسیختگی.

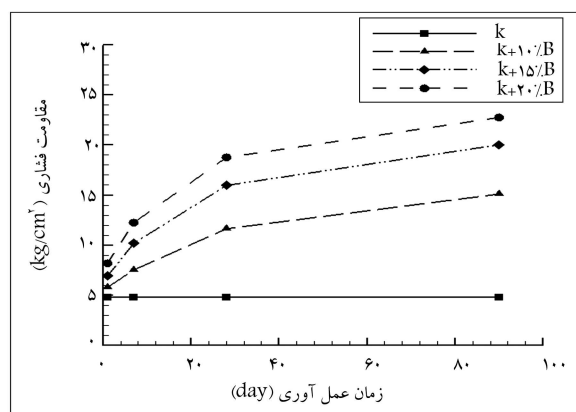
زمان عمل آوری	مصالح							
	K+۵L		K+۳L		K+۱L		k	
	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)
۱	۱,۷۰	۴,۵۰	۱,۸۰	۵	۱,۸۸	۶,۷۵	۲,۲۵	۷
۷	۱,۶۰	۳,۷۵	۱,۷۳	۴,۳۴	۱,۸۳	۵,۷۳	۲,۲۵	۷
۲۸	۱,۴۰	۲,۷۳	۱,۴۵	۳,۱۸	۱,۷۵	۴,۹۱	۲,۲۵	۷
۹۰	۱	۲,۲۵	۱,۲۳	۲,۸۸	۱,۴۶	۴,۱۳	۲,۲۵	۷

### ۲.۲.۶. مقاومت فشاری نمونه‌های کاتولینیت - آهک

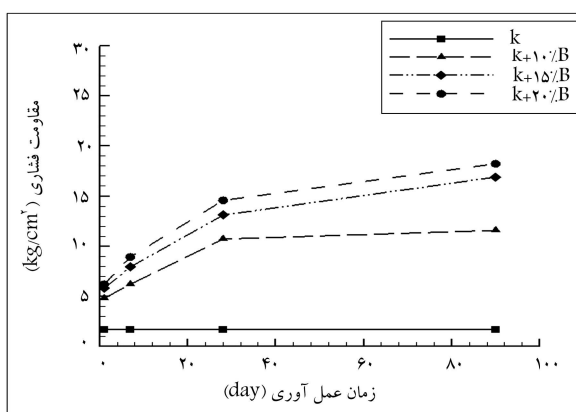
افزودن آهک به کاتولینیت باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها و نیز مقاومت فشاری شده است (شکل ۶). مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۱٪ آهک در حالت خشک پس از ۹۰ روز عمل آوری، برابر نمونه‌های عمل آوری شده به مدت ۱ روز بوده است و ۲۵۶٪ نسبت به کاتولینیت تثبیت نشده افزایش نشان می‌دهد. میزان کرنش این نمونه نیز پس از ۱ روز عمل آوری ۱,۸۸ و پس از ۹۰ روز ۱,۴۶٪ تعیین شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷ مشاهده می‌شود که نمونه‌های رس تثبیت شده با آهک، در نتیجه‌ی اشباع شدن کرنش‌های بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی سرباره از خود نشان داده‌اند، و با افزایش درصد آهک، کرنش‌ها نیز به شدت کاهش یافته‌اند. به عبارت دیگر، افزایش درصد آهک و بنابراین تولید ترکیبات سیمانی (پوزولانی) باعث مقاوم‌تر شدن نمونه‌ها و بنابراین کاهش شکل‌پذیری شده است. فقط پس از یک روز عمل آوری و در حالت اشباع، مقاومت کاتولینیت حاوی ۱٪ آهک، ۱۸۲٪ افزایش داشته و پس از ۹۰ روز عمل آوری به ۸,۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است، که ۴۶۴٪ نسبت به نمونه‌ی تثبیت نشده در حالت اشباع افزایش یافته است. میزان کرنش این نمونه نیز پس از ۱ روز عمل آوری ۶,۷۵ و پس از ۹۰ روز ۴,۱۳٪ تعیین شده است. کرنش نمونه‌های رس تثبیت شده با ۵٪ آهک پس از ۹۰ روز عمل آوری به ترتیب ۱ و ۲,۲۵ درصد تعیین شده است، که کاهش قابل ملاحظه‌ی است.

### ۳.۲.۶. مقاومت نمونه‌های کاتولینیت - آهک - سرباره

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های کاتولینیت - آهک - سرباره در حالت خشک و اشباع (پس از تورم) به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ و کرنش آنها در لحظه‌ی گسیختگی در جدول ۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افزودن هم‌زمان آهک و سرباره به کاتولینیت به طور فاحشی باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش کرنش نمونه‌ها شده و این روند با افزایش زمان عمل آوری افزایش یافته است. همچنین اشباع کردن نمونه‌ها پس از عمل آوری تأثیر خیلی زیادی در کاهش مقاومت نمونه‌ها نداشته است. این امر احتمالاً به علت افزایش pH محیط و در نتیجه افزایش



الف) خشک؛



ب) اشباع.

شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های کاتولینیت - سرباره، نسبت به زمان عمل آوری.

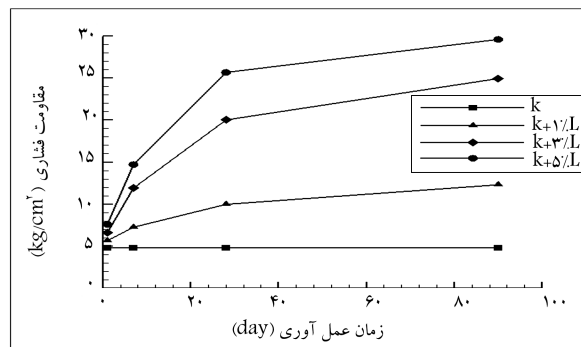
میزان واکنش‌های پوزولانی و هیدراسیون ذرات سرباره به خصوص C<sub>2</sub>S با خاصیت چسبندگی است. افزایش مقاومت به مقدار سرباره، حضور آهک به منزله‌ی فعال‌کننده و زمان عمل‌آوری بستگی دارد. مقاومت نمونه‌ی تثبیت‌شده با ۵٪ آهک و ۲۰٪ سرباره در حالت خشک و اشباع به ترتیب ۴۶/۵۸ و ۳۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است، که ۹۷۰ و ۲۳۳۳ درصد نسبت به کاتولینیت تثبیت‌نشده افزایش نشان می‌دهد.

برخی پژوهشگران در مطالعه‌ی خود گزارش کرده‌اند که استفاده از آهک زنده به جای آهک شکفته، نقش مؤثرتری در افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده دارد.<sup>[۱۷]</sup> نتایج پژوهش دیگری نیز نشان داده است که استفاده‌ی هم‌زمان از آهک و سرباره جهت تثبیت کاتولینیت باعث بهبود مقاومت (دوام) خاک در برابر سیکل‌های یخ‌زدان - ذوب یخ می‌شود.<sup>[۱۳]</sup>

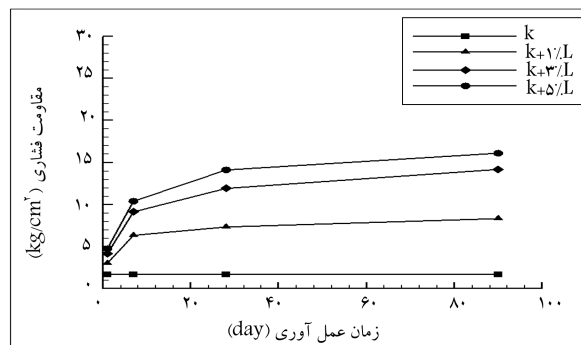
### ۳.۶. حدود اتربرگ

#### ۱.۳.۶. مخلوط‌های کاتولینیت - آهک - سرباره

شکل ۹، تغییرات حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک را نسبت به زمان عمل‌آوری نشان می‌دهد. اضافه‌کردن آهک به کاتولینیت موجب کاهش حد روانی شده و این روند با افزایش میزان آهک به آرامی ادامه یافته است، به طوری که حد روانی نمونه‌های حاوی ۵٪ آهک پس از ۹۰ روز قابل تعیین نبوده است. همچنین با افزودن آهک به کاتولینیت حد خمیری نمونه‌های تثبیت‌شده با ۱ و ۳ درصد آهک پس از ۹۰ روز از ۲۷٪ به ترتیب به ۳۱ و ۳۲ درصد افزایش

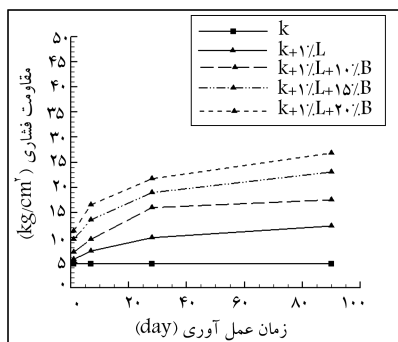


الف) خشک؛

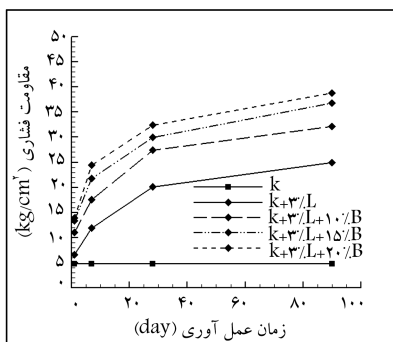


ب) اشباع.

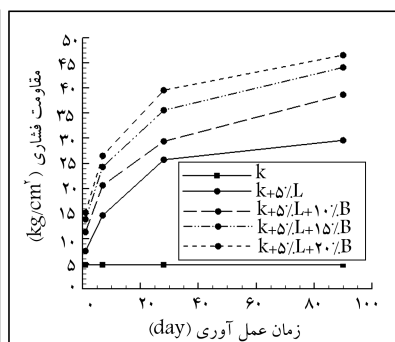
شکل ۶. تغییرات مقاومت نمونه‌های کاتولینیت - آهک، نسبت به زمان عمل‌آوری.



ج) ۵٪ آهک + سرباره.

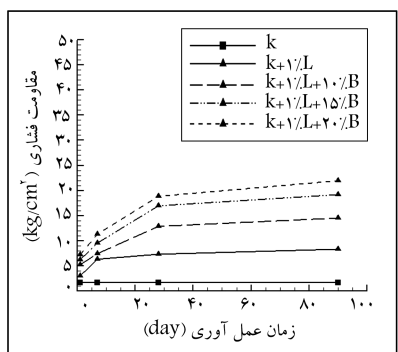


ب) ۳٪ آهک + سرباره؛

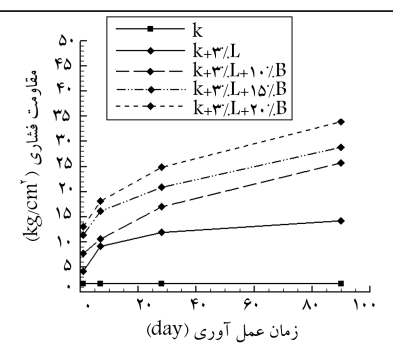


الف) ۱٪ آهک + سرباره؛

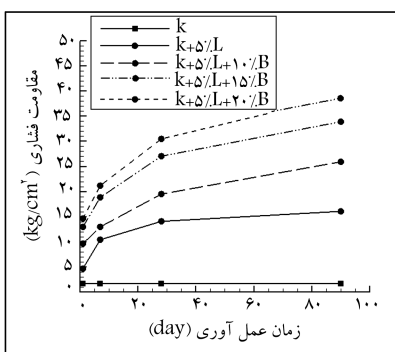
شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های کاتولینیت نسبت به زمان عمل‌آوری در حالت خشک.



ج) ۵٪ آهک + سرباره.

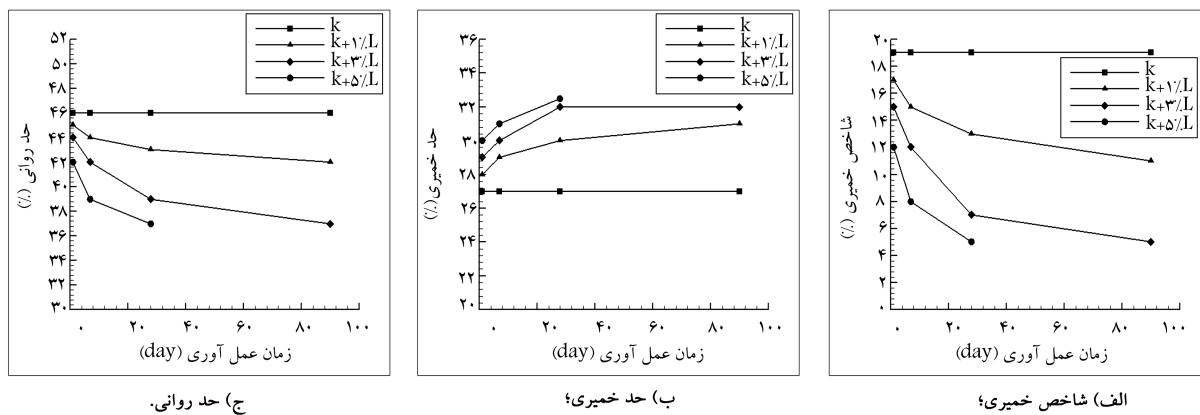


ب) ۳٪ آهک + سرباره؛



الف) ۱٪ آهک + سرباره؛

شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌های کاتولینیت نسبت به زمان عمل‌آوری در حالت اشباع.

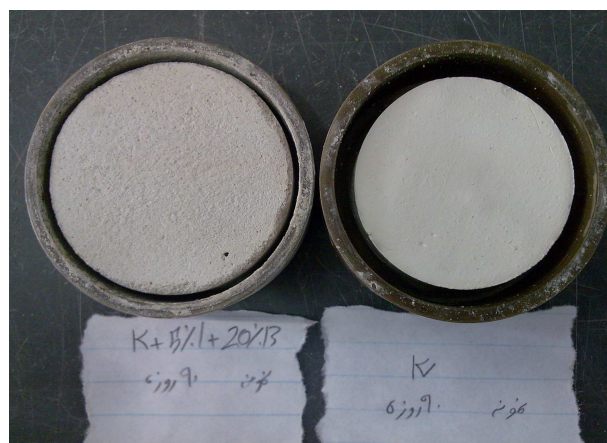


شکل ۹. تغییرات حدود اتر برگ نمونه‌های کاتولینیت تثبیت شده با آهک نسبت به زمان عمل آوری.

جدول ۸. کرنش نمونه‌های کاتولینیت - آهک - سرباره در لحظه‌ی گسیختگی.

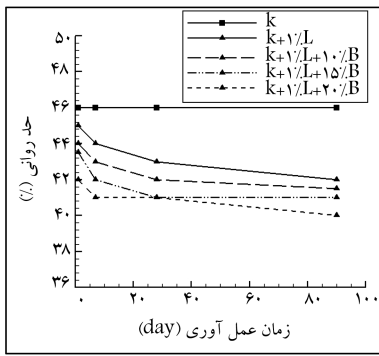
مشخصات										زمان عمل آوری
K+3L+10B		K+1L+20B		K+1L+15B		K+1L+10B		k		
خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	
۱,۸۸	۲,۵۰	۱,۶۳	۲,۱۳	۱,۶۸	۲	۱,۸۸	۲,۷۵	۲,۰۹	۷	۱
۱,۶۳	۱,۸۸	۱,۷۵	۱,۹۴	۱,۵۰	۱,۹۴	۱,۵۹	۲,۱۳	۱,۷۵	۷	۷
۱,۴۳	۱,۶۳	۱,۵۰	۱,۵۶	۱,۲۵	۱,۵۶	۱,۳۵	۱,۶۳	۱,۵۰	۷	۲۸
۱,۱۳	۱,۵۰	۱,۳۱	۱,۴۴	۱	۱,۴۴	۱,۱۵	۱,۶۳	۱,۳۸	۷	۹۰
K+5L+20B		K+5L+15B		K+5L+10B		K+3L+20B		K+3L+15B		زمان عمل آوری
خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	خشک (%)	اشباع (%)	
۱,۴۴	۱,۶۳	۱,۸۸	۲,۲۵	۱,۶۳	۱,۷۵	۱,۵۸	۱,۸۸	۲,۱۳	۱,۷۱	۱
۱,۳۱	۱,۳۸	۱,۶۳	۱,۷۵	۱,۴۶	۱,۵۶	۱,۴۳	۱,۵۰	۱,۶۹	۱,۵۹	۷
۱	۱,۱۳	۱,۲۵	۱,۵۰	۱,۱۰	۱,۲۵	۱,۲۰	۱,۲۵	۱,۳۸	۱,۳۱	۲۸
۰,۸۸	۱	۱,۱۳	۱,۳۸	۰,۹	۱,۳۸	۱	۱,۱۹	۰,۸۸	۱,۳۸	۹۰

یافته است. مطالعات برخی پژوهشگران نشان داده است که افزودن آهک به خاک باعث کاهش خصوصیات خمیری و گاهی غیر خمیری شدن مخلوط خاک - آهک می‌شود. [۲۰] شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ نشان‌دهنده‌ی تأثیر آهک و سرباره بر انقباض و حدود اتر برگ نمونه‌های تثبیت شده است. افزودن سرباره به کاتولینیت تثبیت شده با آهک، باعث کاهش حد روانی نمونه‌ها و نیز با افزایش مقدار سرباره، نرخ کاهش آن بیشتر می‌شود. همچنین حد خمیری مخلوط‌ها افزایش و شاخص خمیری آنها کاهش می‌یابد و این روند با افزایش مقدار سرباره به آرامی انجام می‌شود. زمان عمل آوری نیز در تغییر حدود اتر برگ کاتولینیت تثبیت شده با سرباره و آهک تأثیرگذار است. افزودن هم‌زمان آهک و سرباره به رس باعث افزایش pH و ایجاد شرایط مناسب‌تر برای تبادل کاتیون‌ها و همچنین انجام واکنش‌ها و تولید مواد پوزولانی بیشتر می‌شود. این امر موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر، کاهش تخلخل، کاهش سطح مخصوص و در نتیجه کاهش میل ذرات برای جذب آب می‌شود. شکل ۱۴، تغییرات تورم و شاخص خمیری نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شاخص خمیری نمونه‌ها، میزان تورم آنها نیز افزایش می‌یابد. میزان تورم

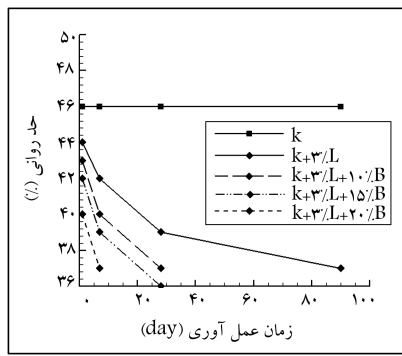


شکل ۱۰. انقباض نمونه‌های کاتولینیت و کاتولینیت تثبیت شده با ۵٪ آهک + ۲۰٪ سرباره.

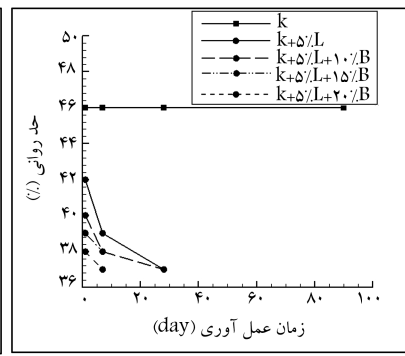




ج) ۵٪ آهک + سرباره.

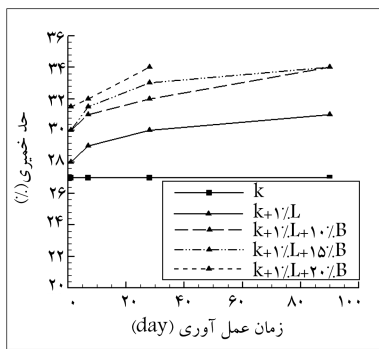


ب) ۳٪ آهک + سرباره؛

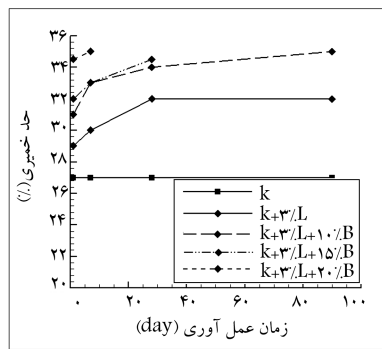


الف) ۱٪ آهک + سرباره؛

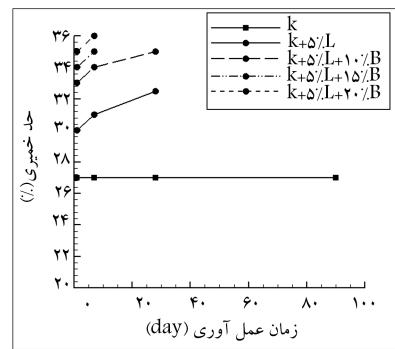
شکل ۱۱. تغییرات حد روانی نمونه‌های کاتولینیت تثبیت شده نسبت به زمان عمل آوری.



ج) ۵٪ آهک + سرباره.

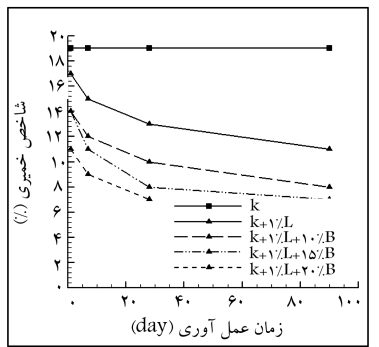


ب) ۳٪ آهک + سرباره؛

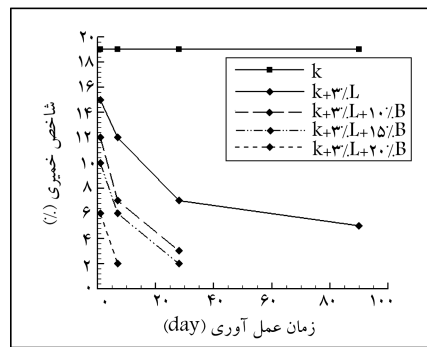


الف) ۱٪ آهک + سرباره؛

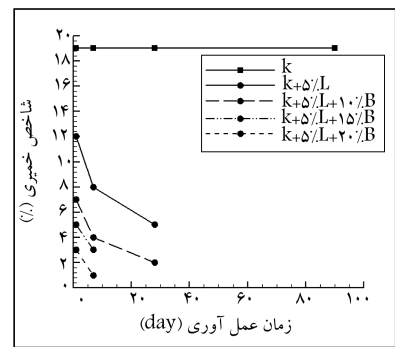
شکل ۱۲. تغییرات حد خمیری نمونه‌های کاتولینیت تثبیت شده نسبت به زمان عمل آوری.



ج) ۵٪ آهک + سرباره.

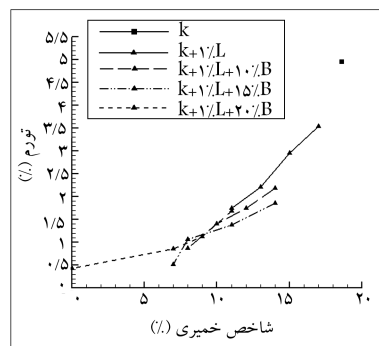


ب) ۳٪ آهک + سرباره؛

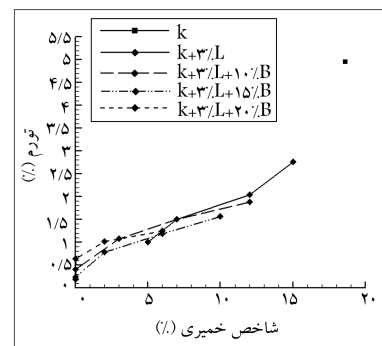


الف) ۱٪ آهک + سرباره؛

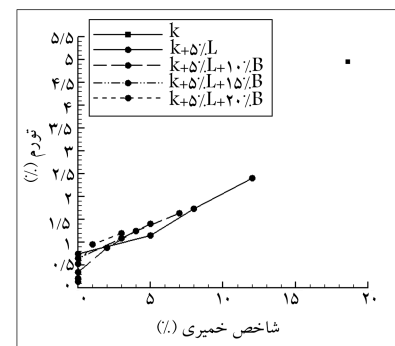
شکل ۱۳. تغییرات شاخص خمیری کاتولینیت تثبیت شده نسبت به زمان عمل آوری.



ج) ۵٪ آهک + سرباره.

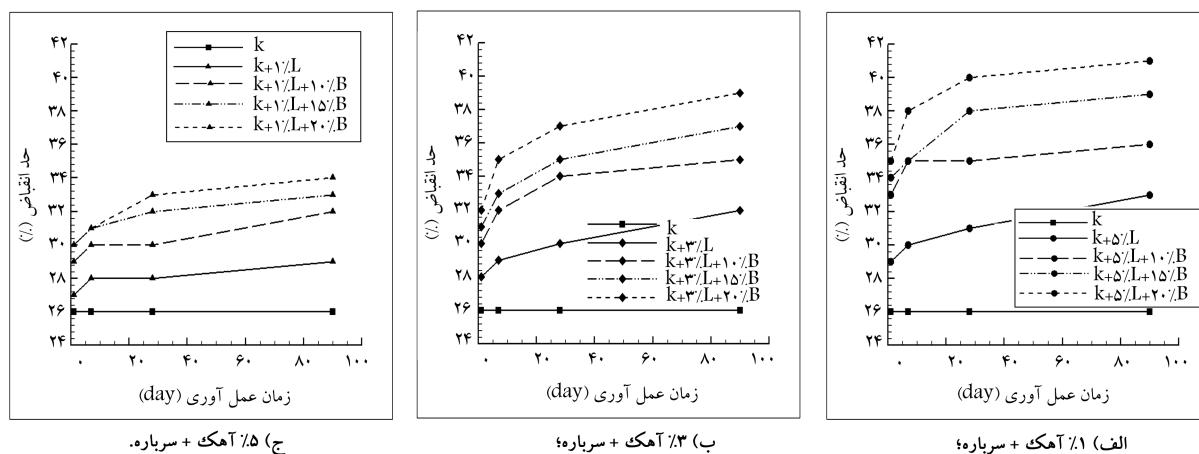


ب) ۳٪ آهک + سرباره؛

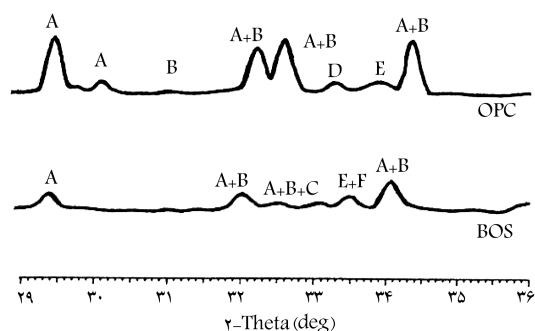


الف) ۱٪ آهک + سرباره؛

شکل ۱۴. تغییرات تورم نمونه‌های کاتولینیت تثبیت شده.



شکل ۱۵. تغییرات حد انقباض نسبت به زمان عمل آوری نمونه‌های کاتولینیت تثبیت شده.



شکل ۱۶. نتایج آزمایش XRD برای سرباره‌ی فولادسازی (BOS) و سیمان پرتلند معمولی (OPC).  $A = C_2S$ ,  $B = \beta - C_2S$ ,  $C = \gamma - C_2S$ ,  $D = C_2A$ ,  $E = C_2F$ ,  $F = C_2AF$ .

که باعث چسبیدن ذرات کاتولینیت به یکدیگر و پر شدن فضاهای خالی میان ذرات می‌شود. اما از آنجایی که ذرات کاتولینیت آب‌دوست هستند، مانع رسیدن آب به سرباره و تکمیل هیدراتاسیون می‌شوند، که این مسئله موجب مطرح شدن استفاده از یک فعال‌کننده در هنگام استفاده از سرباره به‌عنوان مصالح تثبیت‌کننده می‌شود.<sup>[۹]</sup> برای ارزیابی احتمالی تشابه خواص سرباره با سیمان پرتلند معمولی آزمایش‌هایی با اشعه‌ی X انجام شده است، که نتایج به‌دست آمده از آزمایش XRD سرباره (BOS) و سیمان پرتلند معمولی (OPC)<sup>۹</sup> در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مقایسه‌ی الگوهای به‌دست آمده چندین نقطه‌ی اوج و ساختار کریستالی نسبتاً مشابه را نشان می‌دهند. این ساختار بیانگر آن است که هیدراتاسیون سرباره، مکانیسم اصلی در ایجاد ثبات در خاک‌های تثبیت شده در حضور رطوبت است.

ترکیبات معدنی اصلی برای واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان پرتلند معمولی،  $C_2S$ ,  $C_2A$ ,  $C_2AF$  و  $C_2AF$  است. نتایج برخی مطالعات نشان داده است که حضور این مواد در سرباره، خصوصیات سیمانی شدن را فراهم می‌کنند.<sup>[۱۰، ۱۱]</sup> همچنین گزارش شده است که ترکیب غالب در سرباره،  $C_2S$  است؛ که خصوصیات سیمانی شدن خاصی در دماهای پائین از خود نشان می‌دهد.

شکل‌های مختلف  $C_2S$  یا به عبارت دیگر، پلی‌مورف‌های  $C_2S$  به  $\alpha$ ،  $\alpha'$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  هستند. هیدراتاسیون  $\beta - C_2S$  و  $\gamma - C_2S$  موجود در سرباره در صورت عمل آوری نمونه‌های تثبیت شده به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد. دی کلسیم سیلیکات ( $C_2S$ ) موجود در ذرات BOS به تدریج

و شاخص خمیری کاتولینیت تثبیت نشده به ترتیب ۴/۸۵ و ۱۹ درصد تعیین شده است، که با اضافه کردن فقط ۱٪ آهک و عمل آوری نمونه‌ها پس از ۹۰ روز، این مقادیر به ۱۳ و ۱۳٫۳۲ درصد تقلیل یافته است.

شکل‌های ۱۰ و ۱۵، نشان دهنده‌ی میزان تأثیر سرباره در حد انقباض کاتولینیت و کاتولینیت تثبیت شده با آهک است.

مطابق شکل ۱۰، نمونه‌ی تثبیت شده با آهک و سرباره (نمونه‌ی سمت چپ) انقباض بسیار کمی در مقایسه با کاتولینیت تثبیت نشده (نمونه‌ی سمت راست) از خود نشان داده است. میزان حد انقباض نمونه‌های آزمایش شده در شکل ۱۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود حد انقباض با افزودن آهک و سرباره به کاتولینیت و تثبیت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. حد انقباض نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ آهک و ۲۰٪ سرباره به صورت مجزا پس از ۹۰ روز عمل آوری ۳۳٪ تعیین شده است، که این مقدار در نمونه‌های تثبیت شده با همین مقدار آهک و سرباره به طور هم‌زمان به ۴۱٪ افزایش یافته است.

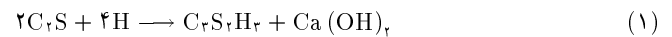
## ۷. تفسیر نتایج آزمایشگاهی

نتایج این مطالعه نشان دهنده‌ی آن است که می‌توان از سرباره‌ی فولادسازی (به تهایب و یا به همراه آهک) به‌عنوان ماده‌ی افزودنی جهت تثبیت خاک‌های رسی و متورم‌شونده استفاده کرد. ترکیبات موجود در خاک رس به خصوص سیلیکا و آلومینا، نقش مهمی در گسترش و تولید مواد با خصوصیات سیمانی شدن دارند، که باعث کاهش خصوصیات تورمی و بهبود خصوصیات مقاومتی خاک رس می‌شود. پس از واکنش‌های اولیه‌ی سریع، که باعث تغییر خصوصیات حالت خمیری خاک می‌شود، واکنش‌های شیمیایی به آرامی و با افزایش زمان عمل آوری در نمونه‌های تثبیت شده رخ می‌دهد.<sup>[۱۳]</sup> دانه‌بندی نسبتاً مناسب سرباره‌ی استفاده شده باعث به وجود آمدن طیف نسبتاً مناسبی از ریزدانه و درشت‌دانه در نمونه‌ها و ایجاد یک اسکلت مناسب می‌شود، که این خود عاملی در جهت کاهش تورم و بهبود خصوصیات کاتولینیت تثبیت شده است. از آنجایی که سرباره، آهک آزاد دارد، به محض افزودن آن واکنش‌های کاتیونی مشابه واکنش‌های انجام شده بین آهک و کاتولینیت رخ می‌دهد، که باعث کاهش تورم نمونه‌ها می‌شود. در اثر افزودن سرباره به کاتولینیت واکنش پوزولانی نیز اتفاق می‌افتد. سیلیکات کلسیم موجود در ذرات سرباره در مجاورت آب هیدراته شده و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته را تولید می‌کند،

## ۸. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های تورم، مقاومت فشاری محدود نشده و حدود اتربرگ می‌توان گفت که افزودن آهک و سربراره به کاتولینیت، باعث کاهش تورم، پایداری حجمی نمونه‌ها، افزایش مقاومت و کاهش کرنش گسیختگی در حالت خشک و اشباع می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که تورم نمونه‌ها باعث کاهش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده پس از اشباع شدن تا یک سوم حالت خشک می‌شود. با مقایسه‌ی تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سربراره و مقاومت آنها در حالت اشباع می‌توان گفت که مصالح استفاده شده قابلیت مناسبی در کاهش تورم نمونه‌ها دارند، که این عامل باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در حالت اشباع شده است. همچنین استفاده‌ی هم‌زمان از آهک و سربراره موجب می‌شود تا اختلاف بین مقاومت خشک و اشباع به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. شاخص خمیری در تورم نمونه‌ها تأثیرگذار است، به‌طوری که با کاهش شاخص خمیری نمونه‌های تثبیت شده از میزان تورم نمونه‌ها به شدت کاسته می‌شود. طولانی شدن زمان عمل‌آوری نیز باعث تأثیر بیشتر مصالح تثبیت‌کننده در اصلاح خصوصیات کاتولینیت شده است. نتایج پژوهش نشان داده است که استفاده از ۱۵٪ سربراره بدون حضور آهک و همچنین استفاده‌ی هم‌زمان از ۲۰٪ سربراره و ۵٪ آهک، مقدار بهینه برای تثبیت کاتولینیت مورد مطالعه بوده است. شایان ذکر است که در صورت به‌کارگیری از مصالح مذکور، مقادیر بهینه‌ی آهک و سربراره باید به‌طور جداگانه برای خاک در محل پروژه‌ی مورد نظر تعیین شود.

هیدراته و به سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تبدیل می‌شود. این محصول دارای خواص سمناسیون است و باعث چسبیدن ذرات رسی به یکدیگر می‌شود. معمولاً C-S-H حاوی مقادیر کمی از Fe، Mg و Al است. این تذکر لازم است که در صورت بالا بودن مقدار آلومین در خاک، محصولات هیدراسیون سربراره علاوه بر ترکیباتی نظیر C-S-H شامل ترکیبات آلومینات کلسیم هیدراته C-A-H (همانند  $C_2AH_6$ ) و سیلیکات آلومینات کلسیم هیدراته C-S-A-H (همانند  $C_2SASH_8$ ) نیز خواهد بود. با فرض اینکه  $C_2S_2H_2$  محصول نهایی هیدراسیون  $C_2S$  باشد، می‌توان واکنش هیدراسیون را به صورت رابطه‌ی ۱ نوشت: [۱۰-۲۱]



استفاده‌ی هم‌زمان از سربراره و آهک جهت تثبیت کاتولینیت باعث کاهش هر چه بیشتر تورم و بهبود خصوصیات نامناسب کاتولینیت شده است. استفاده از آهک به‌عنوان فعال‌کننده و سربراره باعث می‌شود که لایه‌های Si-O و Al-O اطراف ذرات سربراره بشکند و آب به ذرات سربراره نفوذ کند. در نتیجه واکنش‌های هیدراسیون تکمیل و مقدار ژل سیلیکات کلسیم هیدراته‌ی بیشتری تولید می‌شود، که باعث کاهش میزان تورم و افزایش پایداری حجمی نمونه‌ها، افزایش مقاومت فشاری و کاهش شاخص خمیری می‌شود. [۱۷]

## پانویس‌ها

1. American society of testing & materials
2. basic oxygen slag
3. optimum moisture content
4. maximum dry density
5. ordinary portland cement

## منابع (References)

1. Bohloli, N., Investigating the effects of steel slag on swelling / shrinkage characteristics of clays. MSc. Dissertation, Islamic Azad University, Zandjan, (in Persian) (2009).
2. Sherwood, R.T., *Alternative Materials in Road Construction: A Guide to the Use of Waste, Recycled Materials and By-Products*, Thomas Telford, London (1995).
3. Basama, A.A. and Tuncer, E.R. "Effect of lime on volume change compressibility of expansive clays", *Transportation Research Record*, **6**(1), PP. 295-307 (1991).
4. Bell, F.G. and Coulthard, J.M. "Stabilization of clay soils with lime", *Manual Engineering*, **7**, pp. 125-140 (1990).
5. Broms, B. and Boman, P. "Stabilization of soil with lime", *Ground Engineering*, **12**(4), pp. 23-32 (1977b).
6. Cristalo, N., Glendinning, S., Fernandes, L. and Pito, A.T. "Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation", *Construction and Building Materials*, **29**, pp. 167-174 (2012).
7. Lee, A.R., *Blast Furnace and Steel Slag: Production, Properties and Uses*, Edward Arnold, London (1974).
8. Proctor, D.M., Fehling, K.A., Shay, E.C., Wittenborn, J.L., Green, J.J., Avent, C., Bigham, R.D., Connolly, M., Lee, B., Shepker, T.O. and Zak, M.A. "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags", *Environmental Science and Technology*, **34**(8), pp.1576-1582 (2000).
9. Altun, I.A. and Yilmaz, I. "Study on steel furnace slags with high MgO as additives in Portland cement", *Cement and Concrete Research*, **32**(8), pp. 1-3 (2002).
10. Shi, C.J. and Quin, J.S. "High performance cementing materials from industrial slags- A review, Resources", *Conservation Recycling*, **29**(3), pp. 195-207 (2000).
11. Poh, H.Y. "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **5**, pp. 243-259 (2006).
12. Wild, S., Kinthia, J.M., Jones, G.I. and Higgines, D.D. "Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag - GGBS - on the strength properties of lime - stabilised sulphate bearing clay soils", *Eng. Geol. (Amsterdam)*, **51**(1), pp. 37-53 (1998).

13. Abdi, M.R. "Effects of basic Oxygen steel slag (BOS) on strength and durability of kaolinite", *International Journal of Civil Engineering*, **9**(2), pp. 81-89 (2010).
14. Lewis, D.W. "Resource conservation by use of iron and steel slag extending aggregate resources", *ASTM STP774, Philadelphia*, **4**, pp. 31-42 (1982).
15. Khashab, M.N. and Hayalee, M.T. "Stabilization of expansive clayey soil modified by lime with an emulsified asphalt addition", *Eng. & Technology*, **26**(10), pp.1247-1266 (2008).
16. Sivapullaiyah, P.V., Sridhran, A. and Rmesh, H.N. "Effect of sulphate on the shear strength of lime-treated soil", *Ground Improvement*, **10**(1), pp. 23-30 (2006).
17. Poh, H.Y., Ghataora, G.S. and Ghazireh, N. "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines", *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, **18**, pp. 229-240 (March/April 2006).
18. Celik, C. and Nalbantoglu, Z. "Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils", *Engineering Geology*, **163**, pp. 20-25 (2013).
19. Yadu, L. and Tripathi, R.K. "Effects of granulated blast furnace slag on the engineering behaviour of stabilized soft soil", *Procedia Engineering*, **51**, pp. 125-131 (2013).
20. Gharib, M., Saba, H. and Barazesh, A. "Experimental investigation of impact of adding lime on atterberg limits in golestan province soils", *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, **3**(4), pp. 796-800 (2012).
21. Shi, C.J. "Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production", *Cement and Concrete Research*, **32**(3), pp. 459-462 (2002).
22. "ASTM D2216-98", Standard Method for Laboratory Determination Of Moisture Content Of Soil and Rocks by Mass, 04.09.
23. "ASTM D4318-87", Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, 04.08.
24. "ASTM D1557-12", Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil, Using Standard Effort, 04.08.
25. "ASTM D854-10", Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, 04.08.
26. "ASTM E1031-96", Standard Test Method for Analysis of Iron-Making and Steel-Making Slags by X-Ray.
27. "ASTM D2166-13", Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soils, 04.08.
28. "ASTM D427-04", Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method, 04.08, ASTM Standards, West Conshohocken, PA.