

بررسی اثر سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن بر رفتار رئولوژی سیمان آمیخته

صادق طاهرمنش، ابراهیم نجفی کانی**

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان

چکیده: هدف اصلی در این مطالعه، بررسی اثر سرباره فسفر و سرباره کوره بلند ذوب آهن بر رفتار رئولوژی سیمان آمیخته می‌باشد. دو سیمان آمیخته یکی با سرباره فسفر و دیگری با سرباره ذوب آهن و با ترکیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی از سرباره در یک آسیاب گلوله‌ای آزمایشگاهی همگن و تولید شد. نسبت آب به سیمان مورد استفاده در همه نمونه‌ها ثابت و معادل با ۴۰٪ در نظر گرفته شد. سیمان پرتلند نیز به عنوان نمونه شاهد مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که رفتار رئولوژی خمیرهای سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن هم مانند خمیر سیمان پرتلند، با مدل بینگهام مطابقت دارد. در طول زمان مورد بررسی، گرانروی نمونه شاهد یک روند به تقریب ثابت و یکنواخت داشت ولی گرانروی نمونه‌های دارای سرباره با گذشت زمان افزایش یافت که در درصد‌های بالاتر از سرباره مقدار افزایش در گرانروی بیش‌تر می‌باشد. در نمونه‌های سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن، گرانروی اندازه‌گیری شده بیش‌تر از نمونه‌های دارای سرباره فسفر است. نتیجه‌ها نشان داد که رئولوژی سیمان آمیخته به ماهیت و مقدار مصرفی سرباره بستگی دارد. در نمونه‌های سیمان آمیخته دارای درصد وزنی یکسان سرباره، نمونه دارای سرباره ذوب آهن نسبت به نمونه‌ی دارای سرباره فسفر افزایش بیش‌تری را در گرانروی، تنش تسلیم و گرانروی پلاستیک نسبت به زمان از خود نشان داد. این امر نشان می‌دهد که سرباره ذوب آهن اثرگذاری بیش‌تری را در پارامترهای رئولوژیکی در مقایسه با سرباره فسفر از خود نشان می‌دهد. تغییر گرانروی پلاستیک همه نمونه‌ها تا زمان ۵-۱۰ دقیقه روند کاهشی را نشان داد و پس از آن روند افزایشی دیده شد که این امر به دلیل پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون نمونه‌ها می‌باشد.

واژگان کلیدی: سیمان آمیخته، رئولوژی، سرباره فسفر، سرباره ذوب آهن، گرانروی.

KEYWORDS: Blended cement, Rheology, Phosphorous slag, Blast furnace slag, Viscosity.

مقدمه

تعیین پایداری و کارایی آن‌ها و در نتیجه سادگی شکل‌پذیری و قالب‌گیری آن‌ها ضروری است [۱] سیالیت خمیر سیمان می‌تواند با استفاده از پارامترهای رئولوژیکی مانند گرانروی یا تنش تسلیم با ویسکومتر یا رئومتر اندازه‌گیری شود. بسیاری از پژوهشگران رئولوژی خمیر سیمان پرتلند را به عنوان مقدمه‌ای برای تعیین رئولوژی ملات و بتن مورد بررسی قرار دادند [۲-۷]. ژانوتکا و همکاران [۸] با بررسی

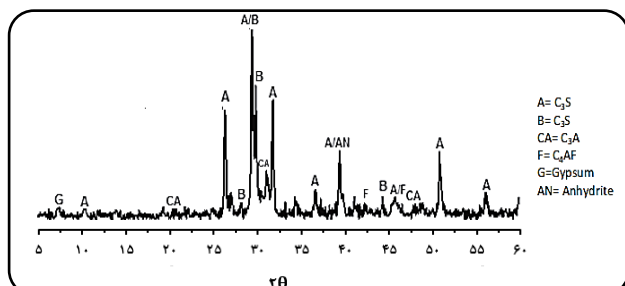
علم رئولوژی، مطالعه تغییر شکل و جریان یک سیال در اثر نیروهای برشی اعمال شده است. اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی برای همه مواد از جمله مایع‌ها مانند محلول‌های رقیق از پلیمرها و سورفکتانت‌ها تا فرمولاسیون پروتئین غلیظ، نیمه جامد مانند خمیرها و کرم‌ها، پلیمرهای مذاب یا جامد و نیز آسفالت قابل استفاده است. درک ویژگی‌های رئولوژیکی خمیرهای سیمان، ملات و بتن برای

* عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: e_najafi@semnan.ac.ir

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی و میزان نرمی بلین سیمان پرتلند، سرباره فسفر و سرباره کوره بلند ذوب آهن

مواد	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	LOI	Blaine (g/cm ³)
PC	۲۱/۹۹	۴/۳۱	۴/۱۵	۶۲/۸۸	۲/۸۶	۰/۲۱	-	۰/۴۷	-	۳۸۰۰
PHS	۴۰/۵۶	۶/۹۵	۱/۶۰	۴۱/۱۵	۱/۴۲	۰/۵۳	۱/۴۴	۱/۲۶	۱/۸۰	۳۵۰۰
BFS	۳۷/۲	۸/۳	۰/۹۰	۳۸	۸/۶	-	-	۰/۳	۲/۵۰	۳۵۰۰



شکل ۱ - طیف پراش پراش ایکس سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱

در این پژوهش اثر دو نوع سرباره بر ویژگی‌های رئولوژی و کارپذیری سیمان آمیخته بر پایه ترکیب سیمان پرتلند و سرباره فسفر و سیمان پرتلند و سرباره کوره بلند ذوب آهن در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت.

بخش تجربی

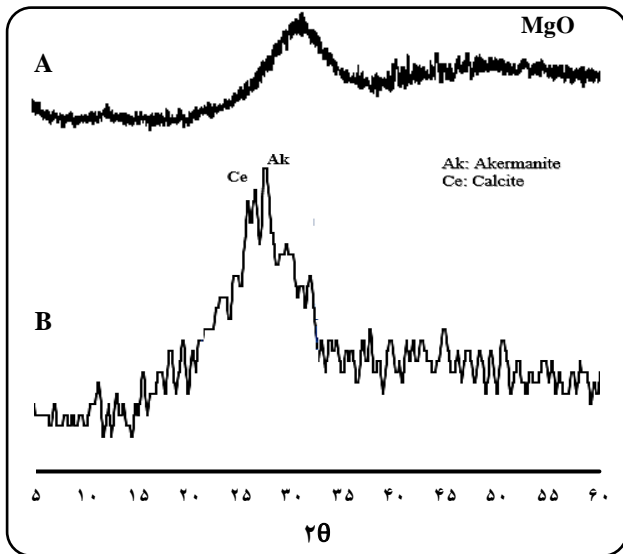
مشخصه‌های مصالح

در این کار، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ (PC) تهیه شده از کارخانه سیمان شرق به عنوان نمونه شاهد استفاده شد. سرباره فسفر (PHS) مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه فسفریک اسید صنایع پارچین و سرباره کوره بلند ذوب آهن (BFS) از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. ترکیب شیمیایی (اندازه‌گیری شده با دستگاه فلورسانس پراش ایکس (XRF)) و نرمی بلین برای سیمان، سرباره فسفر و سرباره کوره بلند ذوب آهن در جدول ۱ آورده شده است. طیف پراش پرتو ایکس برای سیمان پرتلند، سرباره فسفر و سرباره کوره بلند ذوب آهن در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است.

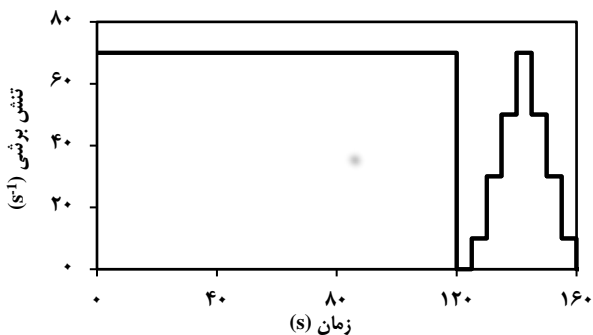
ساخت مخلوط‌ها و روش‌های آزمایش

به منظور استفاده از سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن نخست این مواد در یک دستگاه آسیاب گلوله‌ای آزمایشگاهی (طول و قطر به ترتیب ۳۸۰ و ۱۱۰ میلی‌متر) آسیاب شدند و با استفاده از دستگاه هواتراوایی بلین درجه نرمی آن‌ها با دقت $50 \pm \text{cm}^2/\text{g}$ که در جدول ۱ نشان داده شده تعیین شد. میزان باقی‌مانده روی الک مش ۳۲۵

رفتار رئولوژی، فرایند هیدراتاسیون و ویژگی‌های مکانیکی خمیرهای سیمان آمیخته شده با سه نوع ماسه متاکولین ۳۶٪ (MK-۱)، ۳۱٪/۵ (MK-۲) و ۴۰٪ (MK-۳) به این نتیجه رسیدند که هر سه ماسه متاکولین دارای فعالیت پوزولانی بالا هستند که رفتار رئولوژیکی خمیر سیمان مخلوط شده با ماسه‌های متاکولین مطابق مدل هرشل-بالکی است و تنش تسلیم همه نمونه‌ها با افزایش مقدار متاکولین افزایش یافت. ماسه MK-۳ با بیش‌ترین فعالیت پوزولانی و بالاترین سطح ویژه باعث افزایش بیش‌تر تنش تسلیم شد. با استفاده از نتیجه‌های کالوریمتریک به این نتیجه رسیدند که افزودن ماسه‌های MK-۱ و MK-۲ به سیمان پرتلند باعث تاخیر بیش از دو ساعت در تسریع هیدراتاسیون فرآورده‌های اصلی در خمیر مخلوط شد. یافته‌ها نشان داد که سیمان آمیخته با ماسه متاکولین موجب کاهش قدرت مکانیکی شده که با افزایش مقدار ماسه متاکولین روند کاهشی بیش‌تر شد. گزرزس چیک و همکاران [۹] با بررسی اثر ذره‌ها در سیمان دارای سرباره ذوب آهن با فوق روان کننده‌ها دیدند که افزایش میزان سرباره ذوب آهن در سیمان با قطر ذره‌های کوچک‌تر نسبت به سیمان منجر به کاهش مقدار تنش تسلیم و گرانیروی پلاستیک خمیرها شده که با افزودن فوق روان کننده، کاهش گرانیروی پلاستیک در سیمان دارای سرباره ذوب آهن نسبت به نمونه شاهد سیمان بیش‌تر شد. ژیانویا پینگ و همکاران [۱۰] با بررسی اثر فوق روان کننده‌ها بر روی رئولوژی خمیر سیمان دیدند که هر دو فوق روان ساز پلی کربوکسیلات و نفتالین سولفونات باعث کاهش تنش تسلیم و گرانیروی می‌شود. مهدی زاده و نجفی [۱۱] در پژوهشی با هدف تولید آزمایشگاهی گروت جسابنده‌ی معدنی پلیمری به دست آمده از فعال سازی قلیایی سرباره فسفر و بررسی رفتار رئولوژیکی دریافتند که رفتار رئولوژیکی آن‌ها منطبق بر مدل سیالاتی هرشل-بالکی است و همچنین نوع، غلظت و ترکیب شیمیایی فعال ساز و فوق روان کننده تأثیر مهمی بر رفتار رئولوژیکی و کارپذیری گروت داشته است. هر چند پژوهش‌های بسیاری بر روی سیمان بر پایه سرباره فعال شده با قلیا و سیمان آمیخته با پوزولان‌های گوناگون انجام شده است، ولی تاکنون مطالعه‌ای بر روی رفتار رئولوژیکی سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن انجام نشده است.



شکل ۲ - طیف پراش پراش ایکس (A) سرباره فسفر، (B) سرباره ذوب آهن



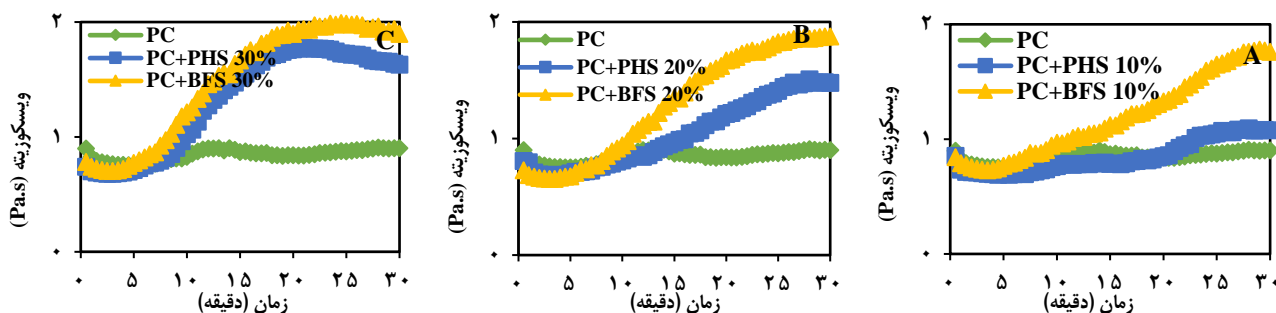
شکل ۳ - سیکل هیستریزس برای اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی دینامیک نمونه‌ها

در پنج ثانیه و از 10^{-1} تا 10^{-2} در پنج ثانیه‌ای انجام شد. این چرخه یازده بار، با یک توقف پنج دقیقه‌ای بین سیکل‌ها تکرار شد و با استخراج داده‌ها با استفاده از نرم افزار متلب و تعیین مقدار R^2 و تطبیق با مدل‌های سیالاتی گوناگون، نوع مدل سیالاتی و پارامترهای رئولوژیکی مورد نظر تعیین شد. برای تعیین کارپذیری نمونه‌های تولید شده از تست مینی اسلامپ استفاده شد [۱۲]. برای انجام این آزمون، مقدار 100 گرم از هر کدام از نمونه‌ها با نسبت آب به سیمان $0/4$ به مدت سه دقیقه مخلوط شده و در یک قالب مخروطی ناقص با اندازه $190 \times 381 \times 572$ mm ریخته شد. پس در زمان‌های تعیین شده، خمیر موجود در مخروط با برداشتن قالب روی سطح رها می‌شود. پس از وارد کردن پانزده ضربه در راستای بالا به پایین، قطر ایجاد شده توسط هر نمونه در چهار برای اندازه‌گیری و میانگین

جدول ۲ - فهرست مشخصه‌های مواد مورد آزمایش همراه با نامگذاری آن‌ها

نامگذاری	درصد وزنی سرباره	نمونه
PC	-	سیمان پرتلند
PC+PHS ۱۰٪	۱۰	
PC+PHS ۲۰٪	۲۰	سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر
PC+PHS ۳۰٪	۳۰	
PC+BFS ۱۰٪	۱۰	
PC+BFS ۲۰٪	۲۰	سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن
PC+BFS ۳۰٪	۳۰	

برای PHS معادل 13% و برای BFS معادل 12% اندازه‌گیری شد. در این کار دو سیمان آمیخته تولید شد، یکی با ترکیب سیمان و سرباره فسفر و دیگری با ترکیب سیمان و سرباره ذوب آهن. برای تولید سیمان آمیخته، سرباره‌ی فسفر و سرباره‌ی ذوب آهن مطابق با ترکیب درصد‌های ذکر شده در جدول ۲ به مدت 30 دقیقه در آسیاب گلوله‌ای آزمایشگاهی با هم مخلوط شده تا افزون بر اطمینان از همگنی کامل اجزا با یکدیگر، از لحاظ دانه بندی نیز ترکیب یکسانی در نمونه‌های سیمان آمیخته گوناگون تولیدی ایجاد شود. نامگذاری مربوط به هر کدام از سیمان‌های آمیخته دارای سرباره‌ها در جدول ۲ آورده شده است. سیمان پرتلند نیز به عنوان نمونه شاهد مورد استفاده قرار گرفت. نسبت آب به سیمان در همه نمونه‌ها ثابت و معادل $0/4$ در نظر گرفته شد. برای مطالعه رفتار رئولوژی سیمان‌های آمیخته تولیدی، رئومتر بروکفیلد مدل DV3-RV همراه با اسمال سمپل آداپتور و اسپیندل SC4-28 مورد استفاده قرار گرفت. تغییرگرانی نسبت به زمان در یک نرخ برش ثابت یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی در دانش رئولوژی می‌باشد. از این رو با اعمال نرخ برش ثابت $50 s^{-1}$ برای هر نمونه، تغییرهای گرانی تا مدت زمان 30 دقیقه با ثبت داده‌های تغییرهای گرانی در فاصله‌های 30 ثانیه‌ای انجام شد. برای تعیین تنش تسلیم و گرانی پلاستیک، چرخه هیستریزس مربوطه که در شکل ۳ نشان داده شده است، مورد استفاده قرار گرفت. این روش شامل با یک پیش برش در $70 s^{-1}$ به مدت دو دقیقه، بدون ثبت داده آغاز و سپس با یک منحنی بالا رونده از 0 تا $10 s^{-1}$ در پنج ثانیه، از 10 تا $30 s^{-1}$ در پنج ثانیه از 30 تا $50 s^{-1}$ در پنج ثانیه و از 50 تا $70 s^{-1}$ در پنج ثانیه و سپس با یک منحنی پایین رونده از 70 تا $50 s^{-1}$ در پنج ثانیه و از 50 تا $30 s^{-1}$ در پنج ثانیه و از 30 تا $10 s^{-1}$



شکل ۴ - تغییرهای گرانیوی نسبت به زمان گرانیوی در شدت برش ثابت $5 \times s^{-1}$: A: سیمان آمیخته دارای ۱۰٪ سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن، B: سیمان آمیخته دارای ۲۰٪ سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن، C: سیمان آمیخته دارای ۳۰٪ سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن

۱۰٪ سرباره فسفر (سیمان آمیخته دارای ۱۰٪ سرباره فسفر) نخست، مقدار گرانیوی 85 Pa.s اندازه‌گیری شد و پس از ۴ دقیقه مقدار آن به 0.69 Pa.s رسید. سپس تا ۲۰ دقیقه مقدار گرانیوی ثابت ماند و پس از آن گرانیوی افزایش یافت. در نمونه دارای ۱۰٪ سرباره ذوب آهن روند کاهشی گرانیوی تا مدت زمان ۴ دقیقه از 0.73 Pa.s به 0.67 Pa.s رسید و در ادامه با تشکیل زود هنگام ژل C-S-H [۱۵] نسبت به نمونه ۱۰٪ سرباره فسفر، گرانیوی افزایش پیدا کرد (شکل ۴A). در زمان‌های اولیه مورد بررسی، نمونه‌های دارای ۲۰٪ سرباره (فسفر و یا ذوب آهن) در مقایسه با نمونه‌های دارای ۱۰٪ سرباره گرانیوی بیش‌تری از خود نشان دادند. این افزایش در گرانیوی برای سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن نسبت به سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر بیش‌تر می‌باشد (شکل ۴B). در نمونه دارای ۳۰٪ سرباره، گرانیوی در زمان‌های اولیه کاهش داشت ولی در طول زمان به دلیل تشکیل مقدار بیش‌تر از ژل C-S-H [۱۵] گرانیوی با سرعت بیش‌تری در مقایسه با سایر نمونه‌ها افزایش یافت. در نمونه دارای سرباره فسفر افزایش گرانیوی تا زمان ۲۱ دقیقه ادامه یافت و پس از آن تا ۳۰ دقیقه گرانیوی به دلیل با شکستن ژل‌های اولیه، کاهش یافت در حالی که در نمونه دارای سرباره ذوب آهن افزایش گرانیوی تا زمان ۲۵ دقیقه ادامه داشت و پس از آن کاهش یافت (شکل ۴C).

شکل ۵ تأثیر درصد وزنی سرباره‌ها را بر روی تغییرهای گرانیوی در یک شدت برشی ثابت در خمیرهای PC، ۱۰-۳۰٪ PC+PHS و ۱۰-۳۰٪ PC+BFS نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، گرانیوی خمیرهای دارای سرباره (فسفر و ذوب آهن) در طول زمان نسبت به خمیر PC در تمام درصدها بیش‌تر است. گرانیوی در خمیرهای دارای سرباره هم با افزایش درصد سرباره افزایش بیش‌تری پیدا کرد. در خمیر PC گرانیوی نخست 0.9 Pa.s بود و

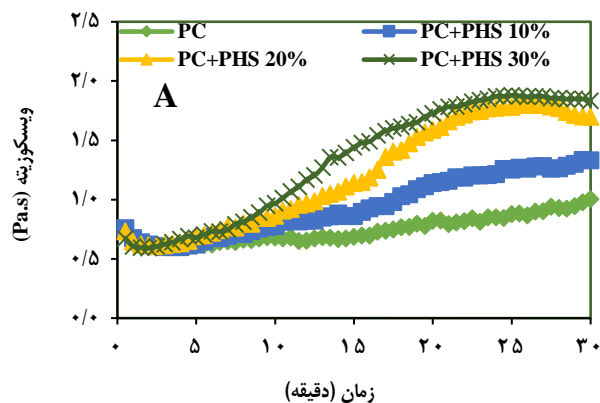
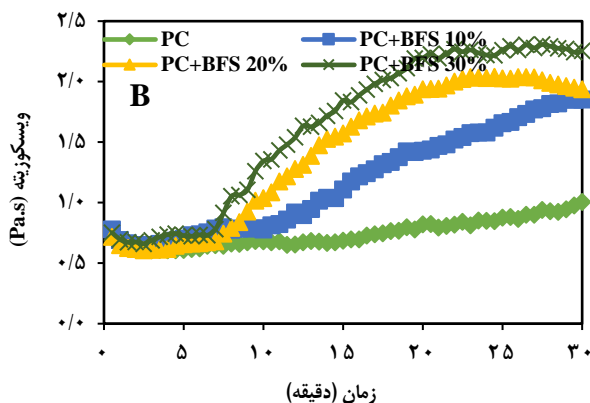
قطر به عنوان قطر پراکندگی آن‌ها تعیین شد. این آزمون در زمان‌های ۳، ۷، ۱۱، ۱۵ و ۳۰ دقیقه برای هر نمونه تکرار شد. همه آزمون‌های رفتار رئولوژی و کارپذیری در دمای ثابت محیط (25°C) انجام شد.

نتیجه‌ها و بحث

تأثیر ماهیت و مقدار سرباره بر تغییرهای گرانیوی نسبت به زمان

شکل ۴ تغییر گرانیوی نسبت به زمان را برای نمونه شاهد و نمونه‌های سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، مقدار گرانیوی اولیه نمونه شاهد معادل 0.9 Pa.s است. سپس با یک روند کاهشی تا مدت زمان ۵ دقیقه گرانیوی آن به مقدار 0.75 Pa.s رسید و تا پایان زمان آزمون به مقدار کمی افزایش یافت. به نظر می‌رسد که ژل هیدراته اولیه تشکیل شده در خمیر سیمان شاهد پس از اعمال نیروی برشی توسط دستگاه رئومتر شکسته شده و به تدریج یک خمیر روان به دست آمده است [۱۳].

کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) یکی از بیش‌ترین فراورده‌های هیدراتاسیون سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن بوده که به دلیل ماهیت پوزولانی این سرباره تولید می‌شود [۲۰-۱۴] و مقدار آن نیز با گذشت زمان افزایش یافته و فعالیت بیش‌تری از خود نشان می‌دهد. مقدار بیش‌تر فاز C-S-H می‌تواند باعث افزایش گرانیوی در خمیر سیمان دارای سرباره می‌شود [۱۵]. در سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر با توجه به تفاوت در ترکیب شیمیایی سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن مشخص شد که پارامترهای رئولوژیکی (گرانیوی، تنش تسلیم و گرانیوی پلاستیک) در سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن نسبت به سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر مقدارهای بیش‌تری را نشان می‌دهند. در نمونه دارای



شکل ۵ - تأثیر مقدار سرباره بر گرانیوی در شدت برش ثابت $5.0 s^{-1}$ ، (A): سیمان آمیخته دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ سرباره فسفر، (B): سیمان آمیخته دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ سرباره ذوب آهن

تعیین پارامترهای رئولوژیکی (تنش تسلیم و گرانیوی پلاستیک)

مطالعه رئولوژی خمیر سیمان و بررسی مدل سیالاتی آن شامل قرار دادن نمونه در شدت‌های برشی گوناگون و مطابق با هیستریسیس طراحی شده می‌باشد تا ژلهایی که به‌طور عمده به علت هیدراتاسیون دانه‌های سیمان شکل گرفته‌اند شکسته شود. به‌طور معمول، منحنی پایین رونده شدت برشی در مقابل تنش برشی یک خط مستقیم است که با مدل بینگهام (معادله (۱)) مطابقت دارد.

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

که در معادله بالا τ ، τ_0 ، η و $\dot{\gamma}$ به ترتیب تنش برشی، تنش تسلیم، گرانیوی پلاستیک و شدت برش را نشان می‌دهند که گرانیوی پلاستیک مربوط به تعداد و اندازه بلورهای سوزنی شکل است، در حالی که تنش تسلیم، اندازه‌گیری مقاومت و تعداد اتصال‌های بین بلورهایی است که هنگامی که شدت برشی اعمال می‌شود از هم گسیخته می‌شوند [۱۲]. پیرو مطالعه‌های گذشته مدل‌های دیگری که می‌توانند رفتار رئولوژی خمیر سیمان را به خوبی توصیف کنند عبارتند از مدل هرشل بالکی (معادله (۲)) و مدل قانون توانی (پاورلا) (معادله (۳)).

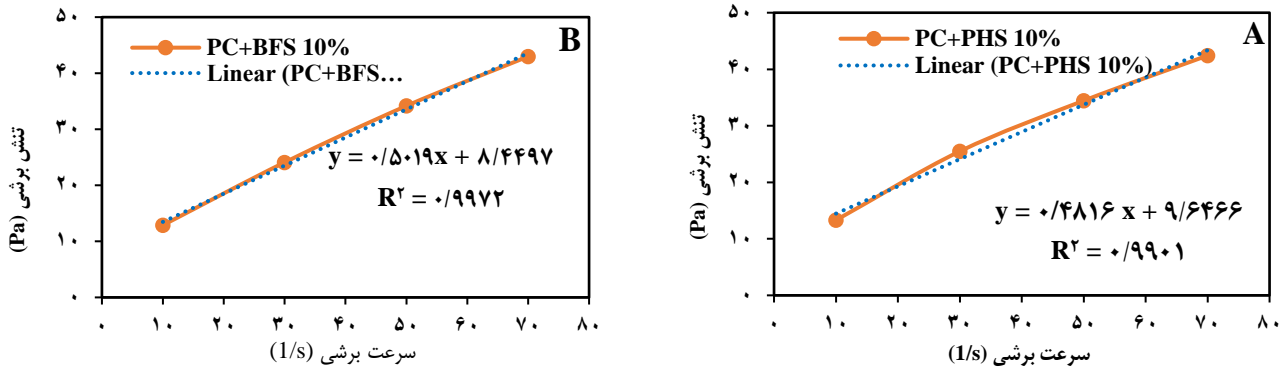
$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

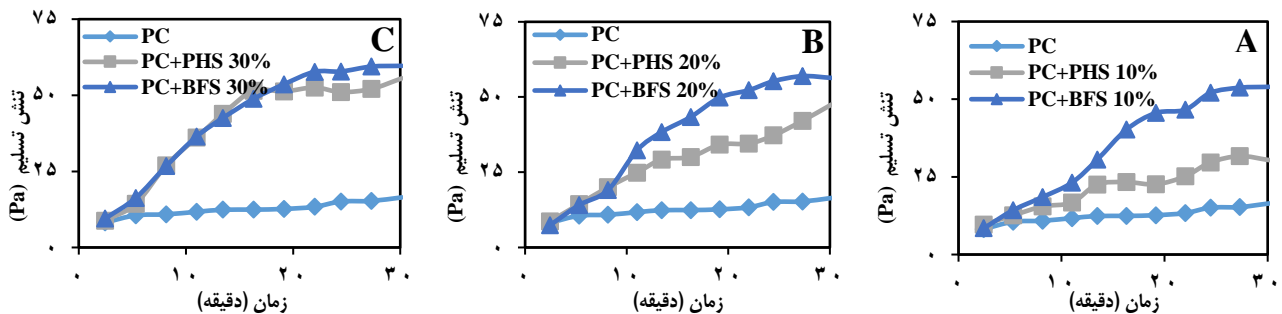
که n و k به ترتیب شاخص پایداری و شاخص جریان می‌باشند. در مطالعه‌های پیشین [۱۷، ۱۸، ۱۳، ۱۰]. نشان داده شده است که رفتار رئولوژی خمیر سیمان پرتلند به‌طور عمده با مدل بینگهام تطابق دارد. در این مطالعه، بررسی منحنی‌های هیستریسیس یا منحنی‌های

با گذشت زمان ۵ دقیقه به حدود ۱۵٪ کاهش پیدا کرد و سپس تا ۳۰ دقیقه با یک روند به نسبت کم افزایش یافت. با افزودن ۱۰٪ سرباره فسفر به سیمان، نخست گرانیوی کم‌تری نسبت به خمیر PC دیده شد و مقدار گرانیوی آن در آغاز شروع آزمایش ۰/۸۵ Pa.s بود و با کاهش ۱۶٪ تا مدت زمان ۶ دقیقه به مقدار ۰/۶۹ Pa.s رسید. در خمیر دارای ۲۰٪ سرباره فسفر گرانیوی تا زمان ۴ دقیقه به مقدار ۱۲٪ کاهش یافت. در خمیر دارای ۳۰٪ سرباره فسفر روند کاهشی تا زمان ۴ دقیقه ادامه داشت و حدود ۵٪ کاهش یافت. نمونه‌های ۱۰٪ PC+PHS، ۲۰٪ PC+PHS و ۳۰٪ PC+PHS به ترتیب تا زمان ۲۰، ۱۳ و ۸ دقیقه مقدار گرانیوی کمتری نسبت به خمیر PC داشتند و پس از زمان‌های یاد شده گرانیوی خمیرهای ۳۰-۱۰٪ PC+PHS نسبت به خمیر PC افزایش چشمگیری نشان داد.

در نمونه‌های دارای سرباره ذوب آهن با درصد‌های وزنی همانند سرباره فسفر، مقدار گرانیوی نخست کمتر از نمونه‌های دارای سرباره فسفر بود ولی با شکل‌گیری زود هنگام ژل C-S-H مقدار گرانیوی افزایش یافت. مقدار گرانیوی در خمیرهای ۰٪ PC+BFS، ۲۰٪ PC+BFS، ۳۰٪ PC+BFS به ترتیب تا زمان‌های ۵، ۴ و ۲ دقیقه کم‌تر از نمونه PC بودند و پس از زمان‌های گفته شده گرانیوی نمونه‌های ۳۰-۱۰٪ PC+BFS نسبت به خمیر PC افزایش یافت. تغییر در گرانیوی خمیرهای دارای سرباره فسفر و ذوب آهن به ماهیت سرباره‌ها وابسته بود که کاهش در گرانیوی در زمان‌های آغازین به دلیل از هم گسیختن فراورده‌های هیدراته که نخست شکل گرفته مربوط است در حالی که پس از گذشت زمان، افزایش در گرانیوی به شکل‌گیری دوباره فراورده‌های هیدراته نسبت داده می‌شود [۱۳، ۱۹].



شکل ۶ - تغییر تنش برشی با سرعت برش نمونه: (A)؛ PC+PHS ۱۰٪ و (B)؛ PC+BFS ۱۰٪



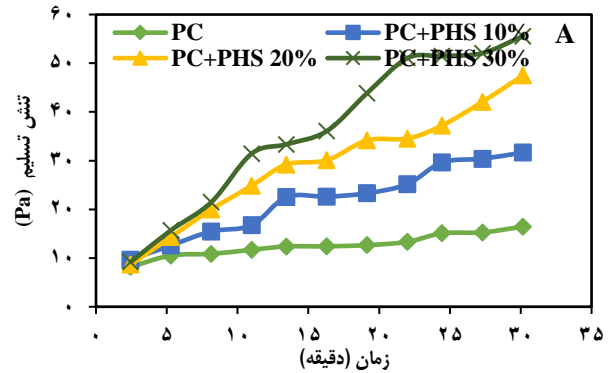
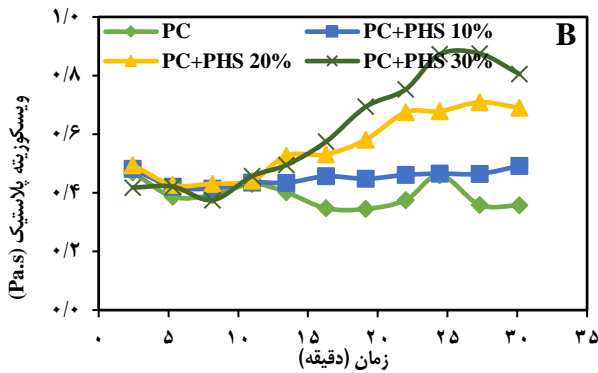
شکل ۷ - تاثیر ماهیت سرباره بر تنش تسلیم، (A): سیمان آمیخته دارای ۱۰٪ سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن، (B): سیمان آمیخته دارای ۲۰٪ سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن، (C): سیمان آمیخته دارای ۳۰٪ سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن

تنش برش در مقابل شدت برش برای همه نمونه‌های سیمان آمیخته با سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن، نشان داد که مدل سیالیتی این نمونه‌ها مطابق بهتری با مدل بینگهام (معادله (۱)) دارد. همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، در نمونه‌های ۱۰٪ PC+BFS و ۱۰٪ PC+PHS منحنی پایین رونده یک خط مستقیم است که متناسب مدل بینگهام بوده و مقدار R^2 به دست آمده از تطبیق مدل با نتیجه‌های آزمایشگاهی برای هر دو نمونه به ترتیب برابر ۰/۹۹۷۲ و ۰/۹۹۰۱ می باشد.

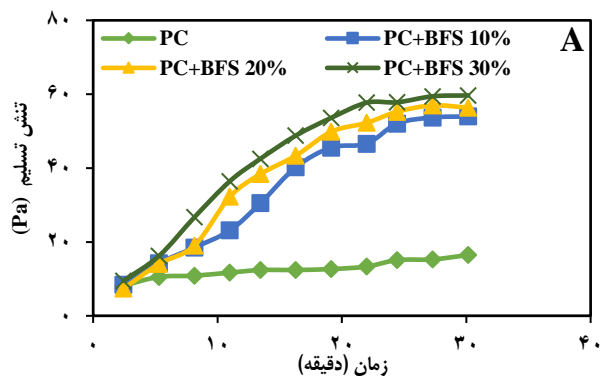
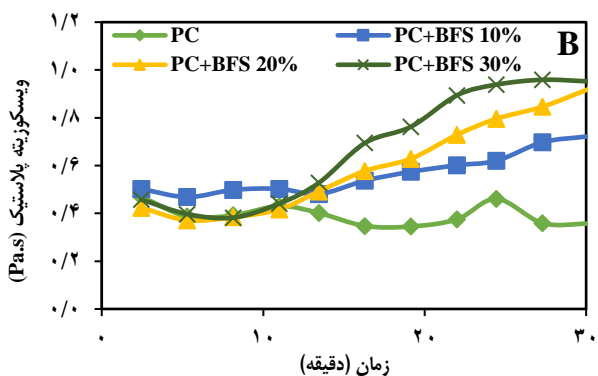
نتیجه‌های تنش تسلیم خمیرهای PC، ۱۰٪ PC+PHS و ۱۰٪ PC+BFS در شکل ۷A نشان می‌دهد که در خمیر PC مقدار تنش تسلیم نسبت به خمیرهای ۱۰٪ PC+PHS و ۱۰٪ PC+BFS پایین تر است. تغییرهای تنش تسلیم خمیر PC پس از یازده سیکل در شکل ۷ نشان داد که تا پایان سیکل چهارم تنش تسلیم افزایش می‌یابد و سپس در حدود ۸ تا ۱۶ Pa ثابت باقی می‌ماند. این موضوع ممکن است به علت افزایش فعل و انفعال بین بلورهای سوزنی شکل و تشکیل بیش تر ژل C-S-H در طی واکنش هیدراتاسیون باشد [۱، ۱۷]. تنش تسلیم در خمیرهای ۱۰٪ PC+PHS و ۱۰٪ PC+BFS

نسبت به خمیر PC افزایش یافت که این افزایش می‌تواند به دلیل ترکیب‌های شیمیایی متفاوت سرباره‌های مورد استفاده باشد. در خمیر ۱۰٪ PC+PHS تنش تسلیم تا پایان سیکل چهارم به شکل پایداری افزایش یافت و سپس تا پایان سیکل پنجم یک افزایش ناگهانی که به علت شکل گیری فراورده‌های هیدراتاسیون به علت حضور سرباره فسفر می‌باشد دیده شد. در ادامه تا پایان سیکل هفتم این روند ثابت ماند و سپس با تشکیل ژل هیدراته بیش تر، تنش تسلیم نیز افزایش یافت و این رفتار تا سیکل دهم دیده شد. سپس، تا پایان سیکل یازدهم با شکسته شدن و تغییر فراورده‌های هیدراته، تنش تسلیم کاهش یافت. در خمیر ۱۰٪ PC+BFS، تنش تسلیم از پایان سیکل اول تا پایان سیکل یازدهم به طور چشمگیری افزایش یافت. این امر می‌تواند به علت افزایش واکنش سیلیکات و کلسیم موجود در سرباره ذوب آهن با سیمان پرتلند و شکل گیری بیش تر ژل C-S-H باشد [۱۲]. در نمونه‌های دارای ۲۰٪ وزنی سرباره (یعنی خمیرهای ۲۰٪ PC+PHS و ۲۰٪ PC+BFS) تنش تسلیم افزایش بیشتری یافت. در نمونه‌های ۲۰٪ PC+PHS از پایان سیکل اول تا سیکل یازدهم تنش تسلیم به ترتیب از ۸ تا ۴۸ Pa افزایش یافت که این افزایش

نتیجه‌های تنش تسلیم خمیرهای PC، ۱۰٪ PC+PHS و ۱۰٪ PC+BFS در شکل ۷A نشان می‌دهد که در خمیر PC مقدار تنش تسلیم نسبت به خمیرهای ۱۰٪ PC+PHS و ۱۰٪ PC+BFS پایین تر است. تغییرهای تنش تسلیم خمیر PC پس از یازده سیکل در شکل ۷ نشان داد که تا پایان سیکل چهارم تنش تسلیم افزایش می‌یابد و سپس در حدود ۸ تا ۱۶ Pa ثابت باقی می‌ماند. این موضوع ممکن است به علت افزایش فعل و انفعال بین بلورهای سوزنی شکل و تشکیل بیش تر ژل C-S-H در طی واکنش هیدراتاسیون باشد [۱، ۱۷]. تنش تسلیم در خمیرهای ۱۰٪ PC+PHS و ۱۰٪ PC+BFS



شکل ۸. تأثیر درصد وزنی سرباره بر پارامترهای رئولوژیکی؛ (A): تغییرهای تنش تسلیم سیمان آمیخته دارای سرباره های فسفر؛ (B): تغییرهای گرانروی پلاستیک سیمان آمیخته دارای سرباره های فسفر



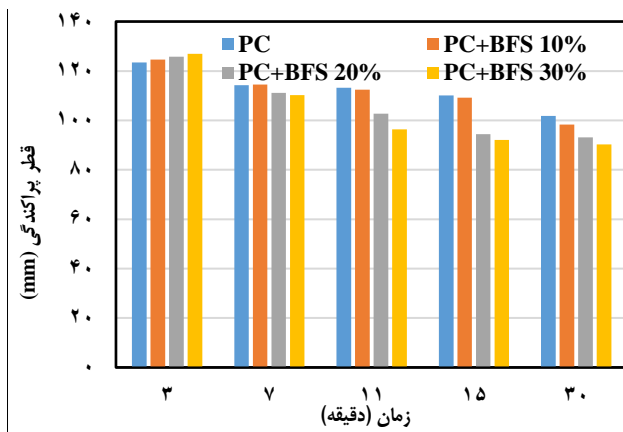
شکل ۹ - اثر درصد وزنی سرباره بر پارامترهای رئولوژیکی؛ (A): تغییرهای تنش تسلیم خمیرهای سیمان، آمیخته با سرباره های ذوب آهن؛ (B): تغییرهای گرانروی پلاستیک خمیرهای سیمان، آمیخته با سرباره های ذوب آهن

تسلیم نیز افزایش یافته است. نخست تنش تسلیم خمیرهای PC+PHS ۱۰-۳۰٪ مشابه نمونه PC بود که در طول زمان با شکل گیری و فعل و انفعال بین ترکیب‌های موجود در سرباره، سیمان و آب به مراتب تنش تسلیم افزایش یافت.

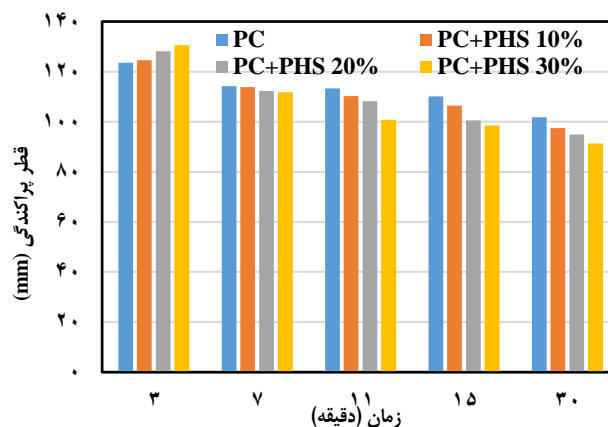
همان‌گونه که در شکل B ۸ نشان داده شده است، گرانروی پلاستیک در نمونه‌های PC+PHS ۱۰-۳۰٪ تا پایان سیکل چهارم همانند خمیر PC بود، ولی از پایان سیکل چهارم به پس با افزایش درصد سرباره یک رفتار افزایشی نسبت به خمیر سیمان پرتلند دیده شد. در خمیر PC+PHS ۱۰٪ مقدار گرانروی پلاستیک در همه سیکل‌ها به نسبت دیگر خمیرها با تغییرهای کم ثابت ماند. شکل A ۹، تغییرهای تنش تسلیم و شکل B ۹، تغییرهای گرانروی پلاستیک را برای نمونه‌های PC+BFS ۱۰-۳۰٪ نشان می‌دهد. در این نمونه مانند نمونه PC+PHS ۱۰-۳۰٪، تنش تسلیم نسبت به خمیر PC تا پایان سیکل یازدهم بیش‌تر بود که این امر می‌تواند به علت رفتار پوزولانی سرباره ذوب آهن می‌باشد. به جز

به علت حضور سرباره فسفر با مقدار بالاتر و در نتیجه اثر آن در ایجاد فراورده‌های هیدراتاسیون متفاوت می‌باشد. در خمیر PC+BFS ۲۰٪ افزایش تنش تسلیم در طول زمان بیش‌تر از نمونه PC+PHS ۲۰٪ بود و یک افزایش ناگهانی در پایان سیکل چهارم دیده شد (شکل B ۹). در نمونه‌های دارای ۳۰٪ سرباره، تنش تسلیم دیده شده تا پایان سیکل پنجم در هر دو نمونه سرباره تقریباً مشابه هم بوده و تا پایان آزمون، تنش تسلیم نمونه PC+PHS ۳۰٪ در حدود ۵۱ تا ۵۵ Pa ثابت باقی ماند در صورتی که نمونه‌ی PC+BFS ۳۰٪ یک رفتار افزایشی از خود بروز داد (شکل C ۹).

شکل ۸ تغییرهای تنش تسلیم و گرانروی پلاستیک، خمیرهای PC+PHS ۱۰-۳۰٪ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل A ۸ نشان داده شده است، مقدار تنش تسلیم خمیرهای PC+PHS ۱۰-۳۰٪ نسبت به خمیر PC در پایان یازده سیکل بیش‌تر بود. مقدار تنش تسلیم با افزایش درصد وزنی سرباره بین ۴۷ تا ۵۶٪ افزایش یافت. یعنی با افزودن بیشتر سرباره فسفر به سیمان، تنش



شکل ۱۱ - تغییر قطر پراکندگی به زمان برای خمیرسیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن



شکل ۱۰ - تغییر قطر پراکندگی به زمان برای خمیر سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر

نسبت به سیمان دارای سرباره کاهش پیدا می‌کند و سیمان دارای مقدار سرباره بیش‌تر نخست سیالیت بیش‌تری دارد که با گذشت زمان این روند وارونه شد و از میزان سیالیت کاسته شد. نتیجه‌های به دست آمده از تنش تسلیم نسبت به زمان در شکل ۸ A نشان داد که با افزودن درصد وزنی سرباره فسفر به سیمان تنش تسلیم نسبت به زمان افزایش پیدا می‌کند که با نتیجه‌های به دست آمده از سیالیت که با استفاده از مینی اسلامپ انجام شد، سازگار است.

با بررسی رفتار سیالیت سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن که در شکل ۱۱ نشان داده شده است دیده شد که همانند سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر در زمان ابتدایی ۳ دقیقه رفتار سیالیت سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن بیش‌تر از سیالیت سیمان نمونه شاهد است. با گذشت زمان این روند وارون شد و سیمان دارای سرباره با درصد وزنی بیشتر سیالیت کم‌تری داشت. در نمونه سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن هر چند که روند کاهش سیالیت نسبت به زمان، همانند روند سرباره فسفر بود ولی سیالیت نمونه‌های دارای سرباره فسفر بیش‌تر از سرباره ذوب آهن بود. رفتار سیالیت سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن نشان داده شده در شکل ۱۱، در آزمون مینی اسلامپ با رفتار تنش تسلیم این نمونه نسبت به زمان در شکل ۹ A که با افزایش درصد وزنی سرباره و با گذشت زمان افزایش پیدا کرد، سازگار است

نتیجه‌گیری

۱- گرانروی سیمان پرتلند به عنوان نمونه شاهد دارای یک روند به تقریب ثابت و یکنواخت می‌باشد ولی برای نمونه‌های دارای سرباره با گذشت زمان گرانروی آن‌ها افزایش یافته که این افزایش با افزودن

در سیکل‌های اول تا سوم که مقدار تنش تسلیم در خمیر ۱۰٪ PC+BFS با تنش تسلیم ۲۰٪ PC+BFS برابر بود در بقیه سیکل‌ها با افزایش درصد وزنی سرباره، تنش تسلیم افزایش یافت. تغییر گرانروی پلاستیک برای خمیرهای ۱۰-۳۰٪ PC+BFS کمی نسبت به خمیرهای ۱۰-۳۰٪ PC+PHS متفاوت‌تر بود. در این نوع خمیرها، مقدار گرانروی پلاستیک از پایان سیکل اول تا پایان سیکل پنجم تغییرهای زیادی نداشت و مقدار گرانروی پلاستیک بین ۰/۵۰ تا ۰/۴۸ Pa.s بود، ولی از سیکل پنجم تا یازدهم افزایش داشت و مقدار گرانروی پلاستیک به ۰/۷۲ Pa.s رسید. در نمونه ۲۰٪ PC+BFS از پایان سیکل اول تا پایان سیکل دوم گرانروی پلاستیک کاهش یافت و در ادامه تا پایان سیکل یازدهم با افزایش همراه بود. رفتار گرانروی پلاستیک نمونه ۳۰٪ PC+BFS همانند نمونه ۲۰٪ PC+BFS بود با این تفاوت که افزایش بیش‌تری نسبت به نمونه ۲۰٪ PC+BFS از سیکل پنجم به پس دیده شد.

کارپذیری (آزمون مینی اسلامپ)

تغییر قطر پراکندگی نمونه‌های سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر و نمونه شاهد نسبت به زمان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتیجه‌های رفتار سیالیت و کارپذیری نمونه‌ها با استفاده از آزمون مینی اسلامپ در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که خمیر سیمان در مدت زمان ۳ دقیقه سیالیت کم‌تری نسبت به سیمان‌های آمیخته دارای سرباره فسفر دارد. سیالیت سیمان آمیخته با افزایش درصد وزنی سرباره در زمان اولیه ۳ دقیقه افزایش یافت ولی با گذشت زمان با افزایش درصد وزنی سرباره سیالیت آن کاهش یافت و دیده شد که سیالیت سیمان با گذشت زمان به مقدار کم‌تری

نشان داد. این امر نشان می‌دهد که سرباره ذوب آهن اثرگذاری بیش‌تری را در پارامترهای رئولوژیکی در مقایسه با سرباره فسفر از خود نشان می‌دهد.
۴- تغییر گرانروی پلاستیک همه نمونه‌ها تا زمان ۵-۱۰ دقیقه روند کاهشی را نشان داد و پس از آن روند افزایشی دیده شد که به دلیل پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون نمونه‌ها می‌باشد.

۵- سیالیت نمونه‌های دارای سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن در زمان آغازین (۳ دقیقه اول) بیش‌تر از نمونه شاهد دیده شد ولی با گذشت زمان این روند برعکس شد و سیالیت نمونه‌های سیمان آمیخته دارای سرباره‌ها کمتر از نمونه سیمان شد. با گذشت زمان، سیالیت همه نمونه‌ها کاهش یافت و این کاهش با افزایش درصد وزنی سرباره‌ها بیش‌تر شد و این روند کاهشی در نمونه‌های دارای سرباره فسفر روند پایدارتری نسبت به سرباره ذوب آهن داشته است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳

درصد وزنی بیش‌تر سرباره افزایش بیش‌تری از خود نشان می‌دهد. در نمونه‌های سیمان آمیخته دارای سرباره ذوب آهن مقدار گرانروی نسبت به زمان بیش‌تر از نمونه‌های دارای سرباره فسفر می‌باشد، که دلیل این امر می‌تواند به علت تشکیل فراورده‌های هیدراتاسیون بیش‌تر در زمان‌های اولیه در ماتریس خمیر سخت شده آن باشد.

۲- همه نمونه‌های مورد بررسی شامل سیمان پرتلند، سیمان آمیخته دارای سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن با مدل سیالاتی بینگهام مطابقت داشتند.

۳- پارامترهای رئولوژیکی (گرانروی، تنش تسلیم و گرانروی پلاستیک) تحت تاثیر درصد وزنی سرباره تغییر می‌یابند به گونه‌ای که در نمونه‌های با درصد وزنی بیش‌تر سرباره پارامترهای رئولوژیکی افزایش می‌یابد. در نمونه‌های سیمان آمیخته دارای درصد وزنی یکسان سرباره، نمونه دارای سرباره ذوب آهن نسبت به نمونه دارای سرباره فسفر افزایش بیش‌تری را در گرانروی، تنش تسلیم و گرانروی پلاستیک نسبت به زمان از خود

مراجع

- [1] Puertas F., Varga C., Alonso M.M., *Rheology of Alkali-Activated Slag Pastes. Effect of the Nature and Concentration of the Activating Solution*, *Cem & Concr. Comp.*, **53**: 279-288 (2014).
- [2] Kong X., Zhang Y., Hou Sh., *Study on the Rheological Properties of Portland Cement Pastes with Polycarboxylate Superplasticizers*, *Rheo. Acta.*, **52(7)**: 707-718 (2013).
- [3] Ferraris C. F., Obla K.H., Hill R., *The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete*, *Cem. & Concr. Res.*, **31(2)**: 245-255 (2001).
- [4] Felekoğlu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B., *The Effect of Fly Ash and Limestone Fillers on the Viscosity and Compressive Strength of Self-Compacting Repair Mortars*, *Cem. & Concr. Res.*, **36(9)**: 1719-1726 (2006).
- [5] Burgos M. O., Palacios M., Rivilla P., Puertas F., *Compatibility Between Superplasticizer Admixtures and Cements Mineral Additions*, *Constr. & Build. Mat.*, **31**: 300-309 (2012).
- [6] Zingga A., Winnefeld F., Holzera L., Pakusch J., Becker S., Figi R., Gauckler L., *Interaction of Polycarboxylate-Based Superplasticizers with Cements containing Different C₃A Amounts*, *Cem & Concr. Comp.*, **31**: 153-162 (2009).
- [7] Alonso M. M., Palacios, M., Puertas F., *Compatibility Between Polycarboxylate-Based Admixtures and Blended-Cement Pastes*, *Cem & Concr. Comp.*, **35(1)**: 151-162 (2013).
- [8] Janotka I., Puertas F., Palacios M., Kuliffayová M., Varga C., *Metakaolin Sand-Blended-Cement Pastes: Rheology, Hydration Process and Mechanical Properties*, *Constr. Build. Mat.*, **24(5)**: 791-802 (2010).
- [9] Grzeszczyk S., Janowska R. E., *The Influence of Small Particle on the Fluidity of Blast Furnace Slag Cement Paste Containing Superplasticizers*, *Constr. Build. Mat.*, **26(1)**: 411-415 (2012).

- [10] Peng J., Deng D., Huang H., Yuan Q., Peng J., [Influence of Superplasticizer on the Rheology of Fresh Cement Asphalt Paste](#). *Case. Stud. Constr. Mat.*, **3**: 9-18 (2015).
- [11] Mehdizadeh H., Kani E.N., [Rheology and Apparent Activation Energy of Alkali Activated Phosphorous Slag](#), *Constr. Build. Mat.*, **171**: 197-204 (2018).
- [12] Kantro D.L., [Influence of Water-Reducing Admixtures on the Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test](#), *Cem. Concr. Aggr.*, **2**: 95-102 (1981).
- [13] Torres-Carrasco M., Rodríguez-Puertas C., del Mar Alonso M., Puertas, F., [Alkali Activated Slag Cements Using Waste Glass as Alternative Activators. Rheological Behaviour](#), *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, **54(2)**: 45-57 (2015).
- [14] Monshi A., Asgarani M.K., [Producing Portland Cement from Iron and Steel Slags and Limestone](#), *Cem. & Concr. Res.*, **29(9)**: 1373-1377 (1999).
- [15] Samet B. Chaabouni M., [Characterization of the Tunisian Blast-Furnace Slag and Its Application in the Formulation of a Cement](#), *Cem. & Concr. Res.*, **34(7)**: 1153-1159 (2004).
- [16] Lübeck A., Gastaldini A.L.G., Barin D.S., Siqueira H.C., [Compressive Strength and Electrical Properties of Concrete with White Portland Cement and Blast-Furnace Slag](#), *Cem. & Concr. Comp.*, **34(3)**: 392-399 (2012).
- [17] Song S., Jennings H.M., [Pore Solution Chemistry of Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag](#), *Cem. & Concr. Res.*, **29(2)**: 159-170 (1999).
- [18] Palacios M., Puertas F., Bowen P., Houst Y.F., [Effect of Pcs Superplasticizers on the Rheological Properties and Hydration Process of Slag-Blended Cement Pastes](#), *J. Mat. Sci.*, **44(10)**: 2714-2723 (2009).
- [19] Lee T., Li Z., [Conditioned MSWI Ash-Slag-Mix as a Replacement for Cement in Cement Mortar](#), *Constr. Build. Mater.*, **24**: 970-979 (2010).
- [20] Dong-xu L., Lin C., Zhong-zi X., Zhi-min L., [A Blended Cement Containing Blast Furnace Slag and Phosphorous Slag](#), *J. Wuhan Uni. Techn-Mater. Sci. Ed.*, **17(2)**: 62-65 (2002).