

بررسی مهم‌ترین خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان سرباره فسفر*

علی الهوردی^(۱)مصطفی مهین‌روستا^(۲)

چکیده در این مطالعه، خواص مخلوط‌های دوتایی حاوی سرباره فسفر (۸۰ درصد وزنی) و فعال‌کننده مرکب پایه سیمان پرتلند (۲۰ درصد وزنی) در سه نرمی بلین ۲۰۵۰، ۳۰۳۰، و ۴۵۰۰ cm^2/g مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین نرمی بلین ۳۰۳۰ cm^2/g به منظور بررسی اثر دماهای عمل‌آوری ۴۵، ۸۵ و ۲۰۰ $^{\circ}C$ بر روی توسعه مقاومت فشاری انتخاب شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش نرمی بلین جرم حجمی توده و زمان گیرش کاهش و نسبت آب به سیمان در قوام معمول و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و در دماهای بالاتر از ۴۵ $^{\circ}C$ ، مقاومت فشاری در انتهای زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد. **واژه‌های کلیدی** سرباره فسفر، نرمی بلین، عمل‌آوری، فعال‌کننده، مقاومت فشاری.

Investigating the Most Important Physical and Mechanical Properties of Phosphorus Slag Cement

A. Allahverdi

M. Mahinroosta

Abstract In this study, the properties of binary mixtures containing phosphorus slag (80 wt.%) and Portland based-chemical activator (20 wt.%) at three Blaine fineness of 2050, 3030, and 4500 cm^2/g were studied. Also, Blaine fineness of 3030 cm^2/g was selected to investigate the effect of curing temperature of 45, 85, and 200 $^{\circ}C$ on compressive strength improvement. The experimental results showed that with enhancement of Blaine fineness, the bulk density and setting time decrease and water-to-cement ratio and compressive strength increase and at temperatures higher than 45 $^{\circ}C$, compressive strength decreases at later curing times.

Key Words Phosphorus Slag, Blaine Fineness, Curing, Activator, Compressive Strength.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۸/۱۱ تاریخ پذیرش آن ۹۶/۷/۲۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استاد، گروه صنایع شیمیایی معدنی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران.

Email: ali.allahverdi@iust.ac.ir

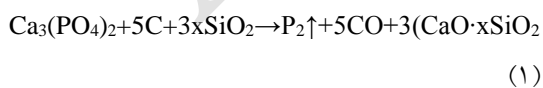
(۲) دانشجوی دکتری، گروه صنایع شیمیایی معدنی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران.

مقدمه

خاکستر بادی به‌عنوان مواد افزودنی به سیمان گردد [1-3]. هدف استفاده از این پسماندهای صنعتی به‌عنوان افزودنی به سیمان، این است که منابع قابل مصرف گسترش یابند، در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود و آلودگی‌های زیست‌محیطی کاهش یابد. همچنین این کار می‌تواند هزینه‌های تولید را کاهش و عملکرد سیمان را بهبود بخشد [2]. در این مقاله، از سرباره فسفر به‌عنوان یک ماده مکمل سیمانی برای تهیه یک سیمان مخلوط که به‌صورت مکانیکی و شیمیایی فعال‌سازی می‌شود، استفاده شده است.

سرباره فسفر

سرباره فسفر، یک محصول جانبی تولید فسفر زرد از طریق ذوب کانی‌های فسفاتی، به‌همراه سیلیس و کک در یک کوره الکتریکی است که عمدتاً (حدود ۹۰ درصد) از اکسید کلسیم (CaO) و سیلیس (SiO₂) تشکیل شده است. اجزای دیگر سرباره فسفر که به طبیعت کانی استفاده‌شده بستگی دارد می‌تواند شامل ۵-۲/۵ درصد آلومینا، ۲/۵-۰/۲ درصد اکسید آهن، ۳-۰/۵ درصد اکسید منیزیم، ۵-۱ درصد اکسید فسفر و ۲/۵-۰ درصد فلورین باشد [4]. کانی‌های فسفاتی معمولاً شامل ذرات کوچک می‌باشند و قبل از عمل ذوب، ماده خام باید به‌صورت توده‌ای درآید و سخت شود. کک با اکسیژن موجود در فسفات ترکیب می‌شود و بخار فسفر آزاد می‌کند. واکنش شیمیایی می‌تواند مطابق زیر باشد [5]:



که x نسبت CaO به SiO₂ در سرباره فسفر می‌باشد که معمولاً از ۰/۸ تا ۱/۲ تغییر می‌کند [5]. به‌ازای تولید یک تن عنصر فسفر تقریباً ده تن سرباره تولید می‌شود [5-6]. سرباره فسفر مذاب می‌تواند هم از طریق هوا و هم از طریق آب سرد شود. اگر از طریق هوا خنک شود، سرباره عمدتاً دارای ترکیبات بلوری مانند CaO·SiO₂ خواهد بود و اگر نسبت CaO به SiO₂ بالا باشد ترکیب

گسترش صنعت سیمان و محصولات مرتبط در چهارچوب اصول توسعه پایدار در بسیاری از تحقیقات مورد بحث واقع شده است. این چهار اصل شامل صرفه‌جویی در منابع طبیعی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، و بهبود دوام سیمان و بتن می‌باشد [1]. توسعه صنعت سیمان علاوه بر سودمند بودن آن برای بشریت با مصرف مقدار زیادی از منابع و انرژی نیز همراه است. تولید سیمان پرتلند نه تنها با مصرف سنگ‌آهک، خاک‌رس، انرژی گرمایی و الکتریکی همراه است، بلکه گازهایی مانند دی‌اکسید کربن، تری‌اکسید گوگرد، و اکسیدهای نیتروژن را وارد جو می‌کند که باعث ایجاد اثر گلخانه‌ای و باران‌های اسیدی می‌شود، بنابراین توسعه صنعت سیمان باید به یک استراتژی توسعه قابل تحمل مقید شود [2]. در قرن بیستم، بسیاری از سازه‌های ایجادشده با بتن مسلح سیمان پرتلند به‌سرعت تخریب شدند، درحالی‌که برخی از سازه‌های ایجادشده با بتن غیرمسلح مانند دیوار بزرگ چین با قدمتی ۲۰۰۰ ساله که از مواد پوزولانی-آهک با سرعت سخت‌شدگی کم ساخته شده‌اند در شرایط مناسبی قرار دارند. وقتی سازه‌های بتنی مدرن در معرض محیط‌های خورنده قرار می‌گیرند، مشکلات مهمی که می‌تواند نهایتاً به تخریب زودهنگام منجر گردد، پدیدار می‌شود. در طول قرن بیستم، غلظت دی‌اکسید کربن که یکی از محصولات جانبی کارخانه‌های فولاد و سیمان پرتلند است، در محیط تا ۵۰٪ افزایش یافته است. بنابراین مواد مناسبی که بتواند جایگزین قسمتی از سیمان در بتن شود راهکار مناسبی برای کاهش میزان نشر این گاز می‌باشد. این مواد نباید باعث آلودگی محیط زیست، افزایش مصرف انرژی و کاهش دوام سازه شوند [3]. این راهکار مناسب می‌تواند باعث گسترش میزان مصرف پسماندهای صنعتی مانند سرباره کوره بلند (Blast furnace slag)، سرباره فولاد، سرباره فسفر (Phosphorus slag)، سرباره کروم، سرباره مس، و

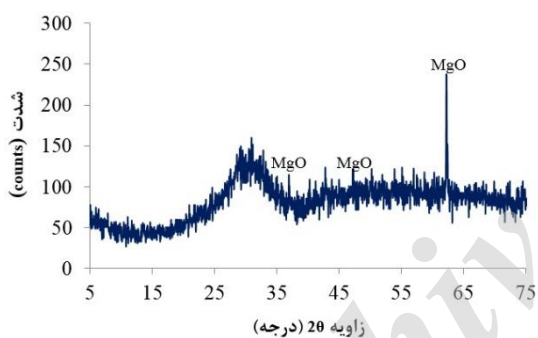
استفاده کردند و دریافتند که مدول آب شیشه تأثیر بسیاری بر روی مقاومت فشاری اولیه دارد و تقریباً بر مقاومت‌های بعد از ۹۰ روز بی تأثیر است. سینگ و باتاچارجی (Singh and Bhattacharjee) [9] در سال ۱۹۹۶ در مطالعه خود ۲/۵ درصد سرباره فسفر دانه‌بندی شده را با کلینکر مخلوط کردند و نتیجه گرفتند که مقاومت فشاری مخلوط بعد از ۲۶ روز افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۰، دونگژو و همکارانش (Dongxu et al.) [1] به بررسی تأثیر مقدار افزودنی‌ها بر روی خواص سیمان سرباره فسفر پرداختند. آنها تأثیر مقدار سرباره فسفر بر روی زمان گیرش را مطالعه کردند و دریافتند زمانی که مقدار سرباره فسفر زیاد می‌شود، زمان گیرش طولانی‌تر می‌شود. به خصوص وقتی که مقدار سرباره فسفر از ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد، زمان گیرش سه برابر می‌شود. بنابراین این روند برای ساخت و ساز مناسب نمی‌باشد. همچنین آنها در سال ۲۰۰۱ [10] با افزودن یک عامل تسریع زمان گیرش و افزایش مقاومت اولیه بر مشکل مقاومت اولیه ضعیف و زمان گیرش طولانی مخلوط سیمانی حاوی مقدار زیاد سرباره فسفر غلبه کردند. آنها در سال ۲۰۰۲ [2] در یک مطالعه دیگر مقادیر ۲۵ تا ۷۰ درصد سرباره فسفر را در مخلوط‌های سیمانی به کار بردند و مقاومت آنها را در برابر محلول‌های سولفات منیزیم و سولفات سدیم بررسی کردند. در سال ۲۰۰۸، پیوی و همکارانش (Peiwei et al.) [3] به بررسی تأثیر سرباره فسفر فوق‌العاده نرم بر روی مقاومت فشاری بتن پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که جایگزینی مناسب سیمان پرتلند با سرباره فسفر فوق‌العاده نرم می‌تواند مقدار و شکل محصولات هیدراتاسیون سیمان را تغییر دهد. در سال ۲۰۰۹، ژیا و همکارانش (Xia et al.) [4] دریافتند که سرباره فسفر تأثیر تأخیری مشخصی بر روی زمان گیرش اولیه و نهایی دارد، طوری که زمان گیرش اولیه و نهایی به طور خطی با مقدار افزودنی معدنی، افزایش می‌یابند. آنها همچنین به بررسی تأثیر مقدار و نرمی سرباره فسفر بر روی جمع‌شدگی خشک خمیر سیمان پرداختند و دریافتند که جمع‌شدگی خشک ملات با نرمی به تدریج افزایش می‌یابد. همچنین

نیز قابل تشخیص خواهد بود. این نوع سرباره خاصیت سیمانی از خود بروز نمی‌دهد و می‌تواند فقط تحت خردایش قرار گرفته و به عنوان سنگدانه به کار رود. اگر سرباره مذاب با آب خنک شود، سرباره خنک شده عمدتاً حاوی ساختاری با تقریباً ۹۸٪ ترکیبات آمورف خواهد بود. سرباره فسفر دانه‌بندی شده دارای یک ساختار آمورف شبیه به سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده است، ولی نسبت به آن از واکنش‌پذیری کمتری برخوردار است که این به علت مقدار کمتر آلومینا و همچنین حضور P_2O_5 می‌باشد [5]. اگر قسمتی از سیلیس در حین تولید فسفر با مواد آلومینایی جایگزین شود تا مقدار آلومینا در سرباره افزایش یابد، واکنش‌پذیری سرباره فسفر دانه‌بندی شده می‌تواند با واکنش‌پذیری سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده رقابت کند. تحقیقات نشان می‌دهد که سرباره فسفر با مساحت سطح ویژه بزرگ‌تر از $600 \text{ m}^2/\text{kg}$ یک پودر آمورف شبیه سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده می‌باشد [4]. سرباره فسفر به طور وسیعی در ساخت و ساز به کار نمی‌رود. دلیل این امر این است که فسفر باقی مانده در سرباره فسفر تأثیر نامطلوبی بر روی زمان گیرش سیمان دارد و مقدار ناکافی آلومینا بر خواص اولیه تأثیر منفی می‌گذارد، طوری که حداکثر مقدار سرباره فسفر در سیمان سرباره فسفر-پرتلند، کمتر از ۲۵ درصد می‌باشد. یک روش متداول برای افزایش مقدار سرباره فسفر در سیمان و افزایش مقاومت اولیه، افزودن یک ترکیب قلیایی مانند سولفات سدیم به مخلوط سیمانی می‌باشد [1]. سیمان‌های سرباره‌ای نسبت به سیمان پرتلند و دیگر مواد مکمل سیمانی مانند خاکستر بادی و دوده سیلیسی رنگ روشن‌تری دارند و این امر به انعکاس بهتر نور کمک می‌کند و در نتیجه محیطی روشن‌تر را در پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، و خیابان‌ها به وجود می‌آورند [7].

زمینه تحقیق

در سال ۱۹۸۹، شی و لی (Shi and Li) [8] از سدیم سیلیکات به عنوان فعال‌کننده سیمان سرباره فسفر

پارچین تهیه شد. نتایج آنالیز شیمیایی تر که طبق استاندارد ASTM C311 به دست آمدند، در جدول (۱) آمده است. نتایج، کیفیت نسبی سرباره را به علت دارا بودن مقدار بالای اکسید کلسیم و سیلیس طبق استاندارد ASTM C618 تأیید می‌کند. دانسیته واقعی سرباره فسفر با استفاده از بالن لوشاتلیه طبق استاندارد ASTM C188 برابر با $2/94 \text{ g/cm}^3$ به دست آمد. شکل (۱) الگوی پراش اشعه ایکس سرباره فسفر خام را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که سرباره فسفر خام متشکل از فازهای آمورف است که تشخیص ترکیب آن توسط آنالیز پراش اشعه ایکس امکان‌پذیر نیست. در آنالیز سرباره فسفر خام تنها پیک مربوط به پریکلاز (Periclase) (MgO) قابل مشاهده است.



شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس سرباره فسفر

یکی از روش‌هایی که برای ارزیابی واکنش‌پذیری هیدرولیکی سرباره‌ها به کار می‌رود اندیس‌های شیمیایی می‌باشند که از ترکیب شیمیایی سرباره محاسبه می‌شوند [12, 17]. این اندیس‌ها در روابط (۲) تا (۱۴) آورده شده‌اند:

$$I1 = \text{CaO}/\text{SiO}_2 \quad (2)$$

$$I2 = \text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 \quad (3)$$

$$I3 = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \quad (4)$$

$$I4 = (\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2 \quad (5)$$

$$I5 = (\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \quad (6)$$

آنها در سال ۲۰۱۱ [11] مشاهده کردند که وقتی ۳۵ درصد سرباره فسفر جایگزین سیمان پرتلند شود، گرمای هیدراتاسیون مخلوط سیمانی حاصل ۴۹/۱۱ درصد کاهش می‌یابد. ژو و همکارانش (Xu et al.) [12] در سال ۲۰۱۲ دریافتند که افزودن سرباره فسفر به سیمان پرتلند دارای اثر تأخیری در زمان گیرش است و این نتیجه‌گیری را با سرباره‌های فسفر مختلف از منشأهای گوناگون تثبیت کردند. لیو (Liu) در سال ۲۰۱۲ [13] در مطالعه خود نتیجه گرفت که سیمان پرتلند حاوی ۴۰ تا ۶۰ درصد سرباره فسفر دارای مقاومت بالاتری نسبت به مخلوط سیمانی حاوی همین مقادیر خاکستر بادی است. ژویو و همکارانش (Xiu-wei et al.) در سال ۲۰۱۳ [14] دریافتند که استفاده از فعال‌کننده شیمیایی برای بهبود خواص مخلوط سیمانی حاوی سرباره فسفر و خاکستر بادی ضروری است. پنگ و همکارانش (Peng et al.) در سال ۲۰۱۳ [15] با استفاده از سرباره فسفر، بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا تهیه کردند. آنها این کار را با جایگزینی ۳۵ درصد سرباره فسفر به جای سیمان و نسبت آب به چسباننده ۰/۱۸ انجام دادند. جینهویی و همکارانش (Jinhui et al.) در سال ۲۰۱۵ [16] به بررسی تأثیر نرمی سیمان بر روی مقاومت فشاری سیمان مخلوط حاوی سرباره فسفر پرداختند و مشاهده کردند که مقاومت سیمان مخلوط با افزایش نرمی، افزایش می‌یابد. در مقاله حاضر مهم‌ترین خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان سرباره فسفر که به صورت هم‌زمان با روش‌های مکانیکی و شیمیایی فعال‌سازی شده است و تأثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری این سیمان، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی ساختار میکروسکوپی خمیر سخت‌شده سیمان پس از ۲۷۰ روز عمل‌آوری در آب اشباع از آهک نیز مطالعه می‌شود.

مواد و روش‌ها

سرباره فسفر. سرباره فسفر از کارخانه اسید فسفریک

از بین اندیس‌های ارائه شده، اندیس‌های I6, I9, I8, I1, I5 پرکاربردتر از بقیه می‌باشند [12, 17]. اندیس‌های مذکور برای سرباره فسفر استفاده شده در این مطالعه براساس داده‌های موجود در جدول (۱) محاسبه و به‌همراه مقادیر بهینه گزارش شده آنها در منابع در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

$$I6 = (\text{CaO} + 0.56\text{Al}_2\text{O}_3 + 1.4\text{MgO}) / \text{SiO}_2 \quad (7)$$

$$I7 = (\text{CaO} + 1.4\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + 0.33\text{Al}_2\text{O}_3) \quad (8)$$

$$I8 = (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 \quad (9)$$

$$I9 = 20 + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.5\text{MgO} - 2\text{SiO}_2 \quad (10)$$

$$I10 = (\text{CaO} + 0.66\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + 0.33\text{Al}_2\text{O}_3) \quad (11)$$

$$I11 = (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.5\text{MgO} + \text{CaS}) / (\text{SiO}_2 + \text{MnO}) \quad (12)$$

$$I12 = (\text{CaO} + 0.33\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + 0.66\text{Al}_2\text{O}_3) \quad (13)$$

$$I13 = (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 10) / (\text{SiO}_2 + 10) \quad (14)$$

سیمان پرتلند. سیمان پرتلند نوع ۲ از کارخانه سیمان تهران تهیه شد. دانسیته و نرمی بلین این سیمان به ترتیب $3/12 \text{ g/cm}^3$ و $3020 \text{ cm}^2/\text{g}$ بود. ترکیب شیمیایی و ترکیب فازی پتانسیلی بوگ (Bogue's potential phase composition) این سیمان در جدول (۳) آمده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی سرباره فسفر مورد استفاده در مطالعه (برحسب درصد وزنی)

LOI	Cl	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۱/۸۷	نامشخص	نامشخص	۰/۴۳	۰/۵۶	۱/۵۰	۲/۶۰	۴۵/۱۴	۰/۹۰	۷/۶۵	۳۸/۴۲

جدول ۲ مقادیر اندیس‌های شیمیایی محاسبه شده برای سرباره فسفر استفاده شده در این مطالعه به‌همراه مقادیر بهینه آنها

اندیس شیمیایی	مقدار محاسبه شده	مقدار بهینه گزارش شده [۱۲، ۱۷]
اندیس I8	۱/۴۴	بزرگ‌تر از ۱
اندیس I9	۱۹/۷۸	بین ۱۲ و ۲۰
اندیس I6	۱/۳۸	بزرگ‌تر از ۱/۶۵
اندیس I1	۱/۱۷	حداکثر ۱/۴
اندیس I5	۱/۰۳۶	بین ۱ و ۱/۳

جدول ۳ ترکیب شیمیایی و فازی پتانسیل بوگ سیمان پرتلند نوع ۲

ترکیب شیمیایی (برحسب درصد وزنی)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
۶۳/۲۶	۲۲/۵۰	۴/۱۵	۳/۴۴	۳/۲۵	۱/۸۰	۰/۶۵	۰/۲۰	۰/۶۱
ترکیب فازی پتانسیل بوگ (برحسب درصد وزنی)								
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF		
۴۵/۶۲		۳۰/۱۶		۵/۱۸		۱۰/۴۷		

(C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃)

دارد. این دستگاه شامل وسیله مکش هواست که از میان یک بستر سیمانی با تخلخل معین عبور می‌کند. تعداد و اندازه حفره‌ها در بستر سیمانی با تخلخل معین با اندازه دانه‌های سیمان رابطه دارد و مبین جریان هوا در داخل بستر است. برای محاسبه نرمی بلین از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود:

$$S = kv/t \quad (16)$$

که در آن k ثابت دستگاه هوا تراوی بلین، t زمان عبور هوا از بستر سیمانی برحسب ثانیه است که توسط یک زمان‌سنج ثبت می‌شود و S مساحت سطح ویژه برحسب سانتی‌متر مربع بر گرم می‌باشد.

نسبت آب به سیمان. نسبت آب به سیمان در ملات و خمیر در صورتی قابل اندازه‌گیری است که قوام معمول (Normal consistency) آنها معلوم باشد. برای تعیین قوام معمول و نسبت آب به سیمان در نرمی‌های بلین مورد نظر طبق استاندارد ASTM C1437 از میز جریان (Flow table) استفاده شد. برای این منظور ملات و خمیر سیمان پرتلند نوع ۲ به‌عنوان مرجع استفاده شدند. نسبت آب به سیمان برای ملات سیمان پرتلند ۰/۴۸۵ و نسبت ماسه به سیمان طبق استاندارد ASTM C1329 برابر با ۳ می‌باشد.

زمان‌های گیرش. برای تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان سربراره فسفر در نرمی‌های بلین مورد نظر طبق استاندارد ASTM C191 و با استفاده از سوزن و یکات عمل شد.

مقاومت فشاری. آزمون‌ها بعد از ۷، ۱۴، ۲۸، ۹۰، و ۱۸۰ روز از آب اشباع از آهک خارج شدند و مقاومت فشاری آنها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری AZMOONTEST تعیین شد. برای هر اندازه‌گیری، سه آزمون استفاده شد و متوسط سه مقدار به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش شد.

فعال‌کننده شیمیایی. استفاده از فعال‌کننده‌های شیمیایی می‌تواند خاصیت هیدرولیکی نهان در سربراره فسفر را به‌طرز مؤثری فعال نماید [5]. برای تقویت خواص هیدرولیکی در سربراره فسفر از یک فعال‌کننده مرکب بر پایه سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان تهران و مخلوطی از فعال‌کننده‌های شیمیایی مانند سولفات سدیم (۲٪ وزنی) و سولفات کلسیم بی‌آب (۴٪ وزنی) استفاده شده است. ترکیب شیمیایی سولفات کلسیم بی‌آب عبارت است از: $CaO - 36/00$ ، $SO_3 - 54/38$ ، و $SiO_2 - 5/88$.

آب. آب مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها از آب قابل شرب لوله‌کشی آزمایشگاه فراهم شد. دانسیته آب در دمای آزمایشگاه 1 g/cm^3 فرض شده است.

آسیاب کردن. عمل آسیاب کردن با استفاده از یک آسیاب گلوله‌ای آزمایشگاهی با طول و قطر به ترتیب ۳۰ و ۲۶ انجام شد. ابتدا ۸۰ درصد وزنی سربراره فسفر و ۲۰ درصد فعال‌کننده مرکب پایه سیمان پرتلند با یکدیگر مخلوط شدند و در حضور ۰/۰۴ تری‌تانول‌آمین به‌عنوان کمک‌سایش (Grinding aid) تحت سایش هم‌زمان قرار گرفتند تا به مساحت‌های سطح ویژه مطلوب یعنی ۲۰۵۰، ۳۰۳۰، و $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ برسند.

جرم حجمی توده. جرم حجمی توده سیمان سربراره فسفر با استفاده از یک استوانه مدرج و رابطه (۱۵) تعیین گردید که در آن W_0 وزن استوانه مدرج خالی، W وزن استوانه مدرج پر از نمونه سیمان سربراره فسفر، و V حجم استوانه مدرج است.

$$\rho = (W - W_0) / V \quad (15)$$

نرمی بلین. برای تعیین مساحت سطح ویژه (نرمی بلین) مطابق با استاندارد ASTM C204 از دستگاه هوا تراوی بلین استفاده شد. اساس کار این دستگاه بر مبنای نفوذ حجم معینی از هوا از میان بستر فشرده‌ای از سیمان قرار

سرباره فسفر که در این مقاله به ترتیب بدانها پرداخته می‌شود شامل تغییر جرم حجمی توده‌ای برحسب نرمی بلین، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی، نسبت آب به سیمان، و مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات در سه نرمی بلین ۲۰۵۰، ۳۰۳۰، و ۴۵۰۰ cm^2/g است. سپس نرمی بلین $3030 \text{ cm}^2/\text{g}$ به منظور تأثیر دماهای عمل‌آوری بر توسعه مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات انتخاب می‌گردد. برای انجام این بررسی‌ها ابتدا، تعداد کافی آزمونه ملات در ابعاد $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ طبق استاندارد ASTM C109 تهیه شد. همچنین به منظور مطالعات تکمیلی توسط SEM تعداد کافی آزمونه‌های خمیر سیمان سرباره در ابعاد $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ تهیه شد. بعد از ریختن ملات یا خمیر تازه در داخل قالب‌ها، آنها در یک محفظه‌ای با رطوبت نسبی بیش از ۹۵ درصد و دمای 25°C به مدت ۲۴ ساعت نگهداری و سپس از قالب خارج شدند. عمل‌آوری آزمونه‌ها در آب اشباع از آهک در دمای 25°C تا زمان اندازه‌گیری انجام شد. برای هر اندازه‌گیری مقاومت فشاری در هر نرمی بلین و هر دمای عمل‌آوری و اندازه‌گیری زمان‌های گیرش از سه آزمونه استفاده شد و مقادیر متوسط آنها به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد.

نتایج و بحث

جرم حجمی توده. نتایج مربوط به تعیین جرم حجمی توده سیمان سرباره فسفر در شکل (۲) نشان داده است. شاید این انتظار می‌رفت که جرم حجمی توده با افزایش نرمی و ریز شدن ذرات افزایش یابد، اما از شکل (۲) مشخص است که با افزایش نرمی بلین، جرم حجمی توده سیمان سرباره فسفر کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که با افزایش نرمی بلین، تخلخل سیمان سرباره فسفر افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه جرم حجمی توده کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان دخیل بودن این عامل دانست که با افزایش نرمی بلین، ذرات دارای انرژی سطحی بیشتری می‌شوند و به یکدیگر می‌چسبند و ذرات درشت‌تری را به وجود می‌آورند که بین این ذرات درشت، فضای خالی

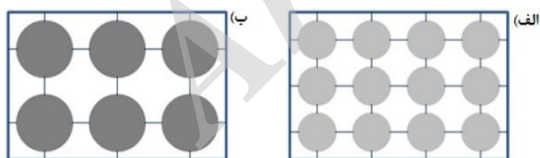
عمل‌آوری گرمایی. برای عمل‌آوری آزمونه‌های ملات سیمان سرباره فسفر در دماهای 45°C و 85°C از اون Fan Azma Gostar استفاده شد. این اون دارای کنترلی برای تنظیم دمای داخل آن و زمان می‌باشد. برای عمل‌آوری آزمونه‌های ملات سیمان سرباره فسفر در دمای 200°C از اتوکلاو Azmoon Test استفاده شد. این اتوکلاو دارای کنترلی برای تنظیم فشار بخار متناظر با دمای موردنظر و زمان عمل‌آوری می‌باشد.

آزمون‌های تکمیلی. برای تعیین الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) سرباره فسفر، از دستگاه Philips PW 1800 با الکتروود تابشی $\text{CuK}\alpha$ استفاده شد. به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی خمیر سیمان سرباره فسفر با نرمی بلین ۲۰۵۰ و $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ بعد از عمل‌آوری ۲۷۰ روزه و همچنین خمیر سیمان سرباره فسفر عمل‌آوری شده در دماهای ۴۵، ۸۵، و 200°C از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. برای این منظور، قطعاتی از خمیر سخت‌شده سیمان سرباره فسفر تهیه شد. در ابتدا، این قطعات به وسیله لایه نازکی از طلا پوشش داده شده و سپس توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی TESCAN مدل VEGAII و با استفاده از ولتاژ شتاب‌دهنده 30 kV مورد بررسی قرار گرفتند.

آزمونه‌ها و ترتیب انجام آزمایش‌ها. به منظور ساخت آزمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها، ابتدا سیمان سرباره فسفر شامل ۸۰ درصد وزنی سرباره فسفر و ۲۰ درصد وزنی فعال‌کننده مرکب پایه سیمان پرتلند بدین طریق تهیه شد که ابتدا اجزای فوق با یکدیگر مخلوط شدند و از طریق هم‌زدن مکانیکی مورد هم‌گن‌سازی قرار گرفتند. سپس مخلوط سیمانی فوق با استفاده از آسیاب گلوله‌ای تا نرمی‌های بلین ۲۰۵۰، ۳۰۳۰، و $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ آسیاب گردید. مهم‌ترین خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان

هیدراته شدن سیمان دارد. هرچه اندازه ذرات به سبب آسیاب کردن بیشتر کوچک‌تر شود، انرژی سطحی آنها افزایش می‌یابد و می‌توانند درجه اتصال را افزایش و زمان گیرش را کاهش دهند. از طرفی چون مساحت سطح ویژه افزایش می‌یابد، سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون افزایش می‌یابد و محصولات هیدراتاسیون با سرعت بیشتری شکل می‌گیرند.

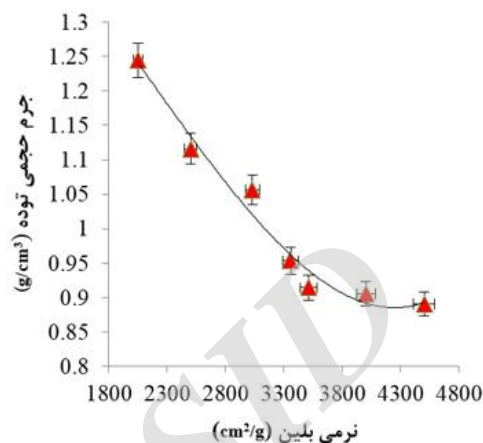
همچنین با افزایش نرمی بلین، تعداد دانه‌های سیمان در یک حجم مشخصی افزایش می‌یابد و در نتیجه تعداد نقاط اتصال ذرات به یکدیگر بیشتر می‌شود. این موضوع را می‌توان در شکل (۴) مشاهده کرد. باید خاطر نشان کرد که سیمان سرباره فسفر نسبت به سیمان پرتلند معمولی به آهستگی واکنش می‌دهد و باتوجه به زمان‌های گیرش اولیه و نهایی سیمان پرتلند نوع ۲ که طبق استاندارد ASTM C150، حداقل ۴۵ دقیقه و حداکثر ۳۷۵ دقیقه می‌باشند، سیمان سرباره فسفر دارای زمان گیرش نهایی طولانی‌تری است. فسفر باقی‌مانده به صورت P_2O_5 در سرباره فسفر می‌تواند ناشی از اورتوفسفات‌ها و فسفات‌های کندانس شده باشد. اورتوفسفات‌ها بسیار انحلال‌پذیرند و زمان گیرش را افزایش می‌دهند. فسفات‌های کندانس شده به صورت شکل‌دهنده شبکه عمل می‌کنند و واکنش‌پذیری سرباره را کاهش می‌دهند، زیرا پیوندهای P-O انرژی پیوند بیشتری نسبت به پیوندهای Si-O یا Al-O دارند [5].



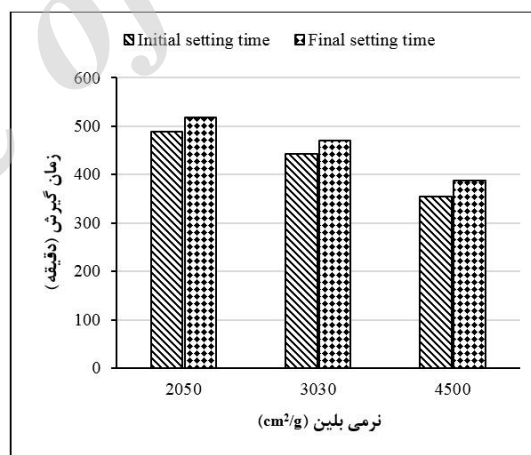
شکل ۴ تأثیر تعداد دانه‌های سیمان در روند گیرش در یک حجم مشخصی از خمیر سیمان: (الف) نرمی بلین بالا، (ب) نرمی بلین پایین

نسبت آب به سیمان. نسبت آب به سیمان برای ملات سیمان سرباره فسفر در نرمی‌های بلین ۲۰۵۰، ۳۰۳۰ و $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۳۷ و ۰/۳۸۶ و برای خمیر آن ۰/۲۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۸۸ به دست آمد. نسبت آب

ایجاد می‌شود. نتیجه این فرایند افزایش تخلخل می‌باشد. افزایش تخلخل باعث می‌شود که در یک حجم معین، جرم کمتری از ذرات سیمان سرباره فسفر قرار بگیرد و در نتیجه، جرم حجمی توده کاهش یابد.



شکل ۲ تغییر جرم حجمی توده سیمان سرباره فسفر با نرمی بلین



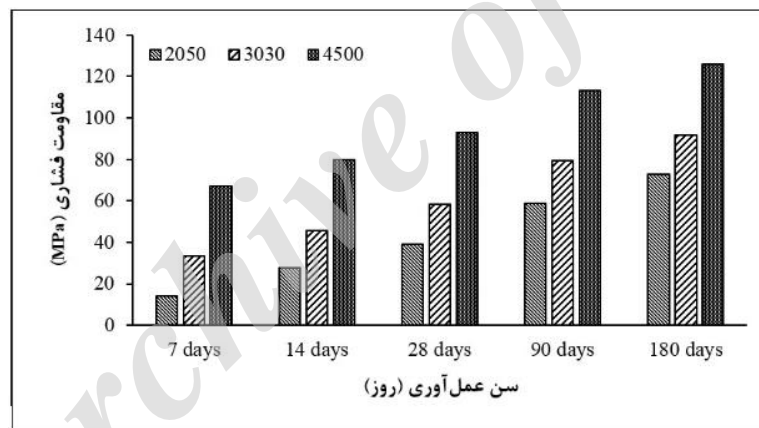
شکل ۳ زمان‌های گیرش اولیه و نهایی در نرمی‌های بلین مورد مطالعه

زمان‌های گیرش. نتایج زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان سرباره فسفر در نرمی‌های بلین مورد مطالعه در شکل (۳) آمده است. کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی با افزایش نرمی بلین را می‌توان تحت تأثیر دو عامل مساحت سطح ویژه و تعداد دانه‌های سیمان در یک حجم مشخصی از خمیر سیمان دانست. تشکیل ساختار گیرش ارتباط نزدیکی با تعداد نقاط اتصال در میان ذرات در حال

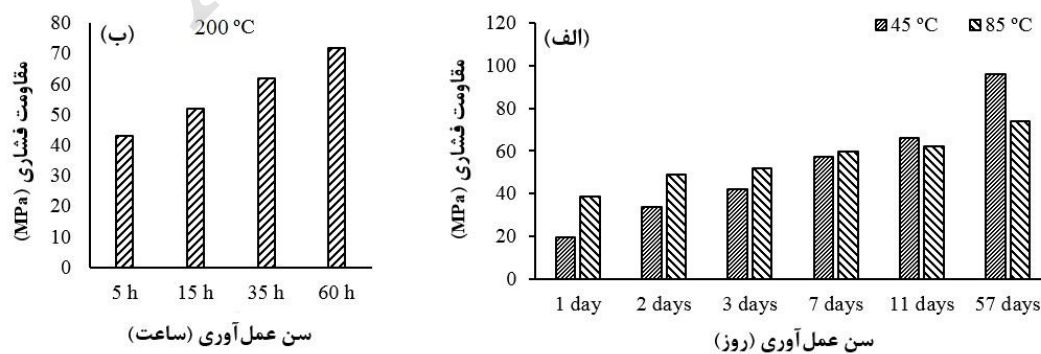
این شکل مشخص است که مقاومت فشاری ملات سیمان سرباره فسفر در یک سن عمل آوری معین (مثلاً ۷، ۱۴ یا ۲۸ روز) با افزایش نرمی بلین افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان به دو عامل افزایش واکنش پذیری ذرات سرباره فسفر و خاصیت پرکنندگی آنها نسبت داد. با افزایش مساحت سطح ویژه (نرمی بلین)، سطح تماس موجود برای واکنش‌های هیدراتاسیون بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش نرمی بلین که با کوچک‌تر شدن ذرات همراه است، ذرات حفره‌های موجود در ماتریس را بهتر پر می‌کنند. در نتیجه تأثیر این دو عامل، مقاومت فشاری نیز همراه با افزایش نرمی بلین افزایش می‌یابد. همچنین در شکل (۶)، مقادیر مقاومت فشاری در سه دمای عمل آوری ۴۵، ۸۵ و ۲۰۰ °C در سن‌های عمل آوری مختلف دیده می‌شود.

به سیمان تحت تأثیر ویژگی‌هایی از سیمان سرباره فسفر مانند اندازه ذرات، شکل ذرات و مساحت سطح ویژه آنها است. آب مخلوط در ملات و خمیر را می‌توان شامل آب پرکننده و آب فیلمی دانست. آب پرکننده، حفره‌های خالی بین ذرات جامد را پر می‌کند و آب فیلمی، ذرات جامد را به هم فشرده می‌کند. با افزایش نرمی بلین (مساحت سطح ویژه)، تعداد حفره‌های خالی و همچنین تعداد ذرات نامنظم کاهش می‌یابد. بنابراین، آب پرکننده کمتری برای پر کردن این حفره‌ها لازم است تا یک مخلوط همگن‌تر شکل بگیرد. اگرچه، آب فیلمی به علت افزایش مساحت سطح ویژه، افزایش می‌یابد.

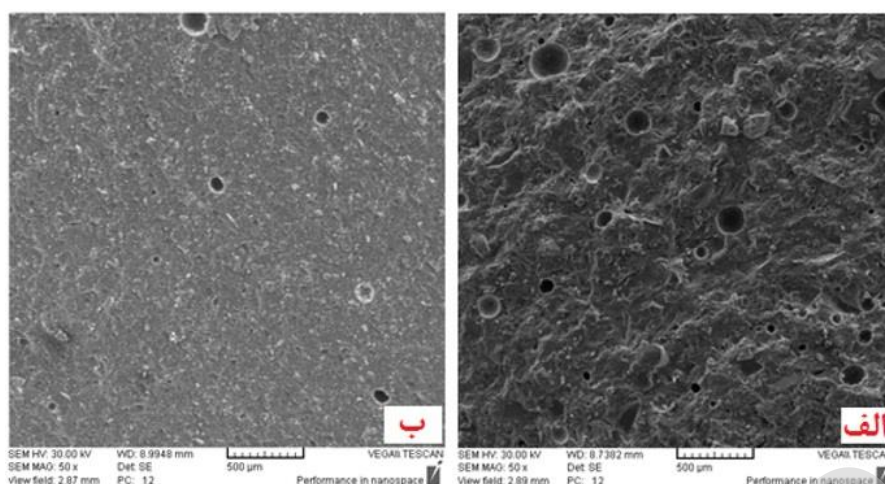
مقاومت فشاری. مقاومت‌های فشاری ۷، ۱۴، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه ملات سیمان سرباره فسفر در سه نرمی بلین (مساحت سطح ویژه) در شکل (۵) آورده شده است. از



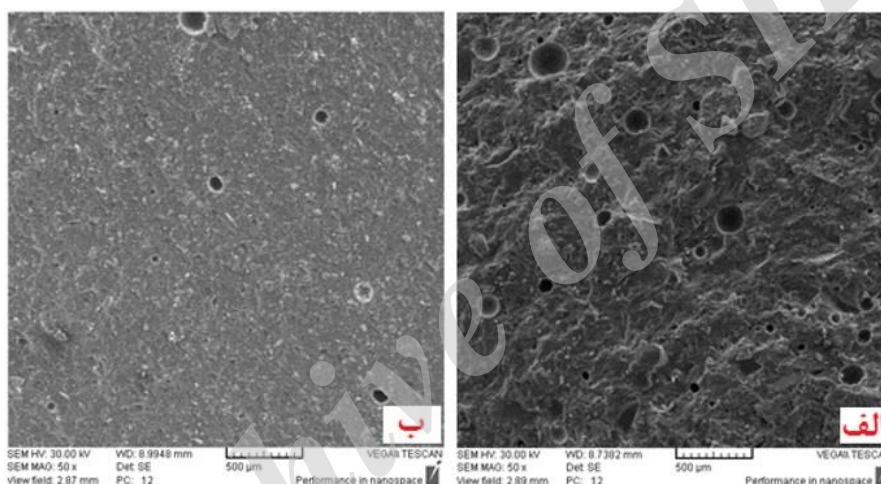
شکل ۵ مقادیر مقاومت فشاری ملات سیمان سرباره فسفر در سه نرمی بلین و سن‌های عمل آوری مختلف



شکل ۶ مقادیر مقاومت فشاری ملات سیمان سرباره فسفر عمل آوری شده در دماهای مختلف



شکل ۷ تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰X از بافت خمیر سخت‌شدهٔ سیمان سرپارهٔ فسفر در دو نرمی بلین (الف) (۲۰۵۰، ب) $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$



شکل ۸ تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۲۰۰X از بافت خمیر سخت‌شدهٔ سیمان سرپارهٔ فسفر در دو نرمی بلین (الف) (۲۰۵۰، ب) $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$

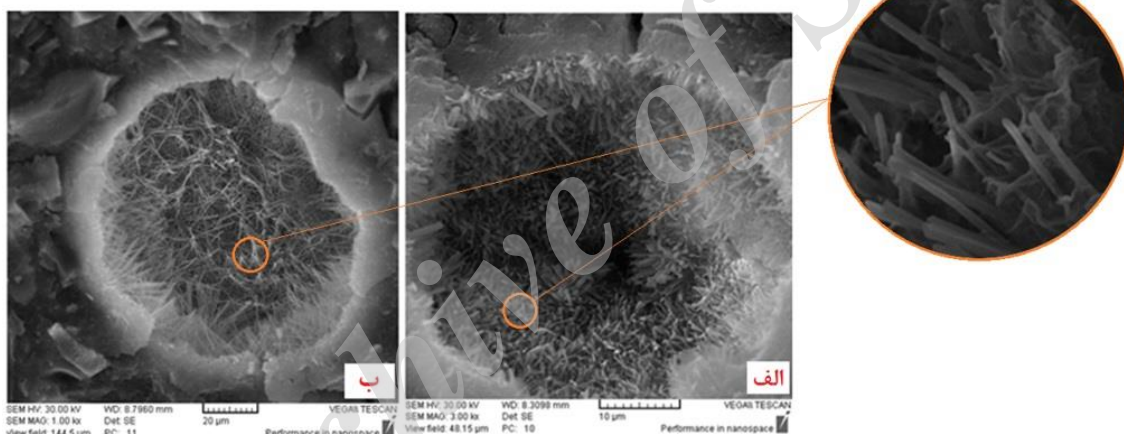
است. این بدان علت است که دانه‌های سرپاره در نرمی بلین بالا، ریزتر می‌باشند و بعد از واکنش، بافت یکنواخت‌تری را به وجود می‌آورند. وجود حفره‌های بیشتر و بزرگ‌تر سبب ضعف ساختاری می‌شود و می‌تواند دلیلی بر کمتر بودن مقاومت فشاری در نرمی بلین پایین باشد. مشاهدهٔ دانه‌های سرپاره در ماتریس سیمانی نشان‌دهندهٔ ادامهٔ روند هیدراتاسیون سرپاره در بازه‌های زمانی طولانی (۲۷۰ روز) است. تصاویر (الف) و (ب) در شکل (۹) حفره‌های مشاهده‌شده در بافت خمیر سخت‌شده را به ترتیب در نرمی‌های بلین ۲۰۵۰ و $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ نشان می‌دهد.

ساختار میکروسکوپی. تصاویر (الف) و (ب) شکل (۷)، به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به بافت خمیر سخت‌شدهٔ سیمان سرپارهٔ فسفر در دو نرمی بلین ۲۰۵۰ و $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ با بزرگ‌نمایی ۵۰X می‌باشد. تصویر با بزرگ‌نمایی ۲۰۰X نیز در شکل (۸) نشان داده شده است. خمیرها در هر دو نرمی بلین به مدت ۲۷۰ روز در آب اشباع از آهک عمل‌آوری شده‌اند. همان‌طور که از شکل‌های (۷) و (۸) مشخص است، در نرمی بلین بالاتر ریزساختار دارای حفره‌های کمتر و کوچک‌تری است. همچنین بافت خمیر در نرمی بلین بالا بسیار یکنواخت‌تر از بافت خمیر در نرمی بلین پایین

(نرمی بلین $3030 \text{ cm}^2/\text{g}$) عمل‌آوری شده در دماهای ۴۵، ۸۵ و 200°C را نشان می‌دهند. در این شکل می‌توان دانه‌های سرباره فسفر (مشخص شده با فلش) در حال واکنش را مشاهده کرد. ریزساختار خمیر سخت‌شده سیمان در هر دو نرمی بلین ترکیبی از ماتریس سیمانی (یا همان پیش‌زمینه ساختار) و دانه‌های سرباره‌ای است که در حال هیدراته شدن هستند. ماتریس سیمانی از محصولات هیدراتاسیون سرباره و سیمان شکل گرفته و با پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون انتظار می‌رود بر تراکم و یکنواختی آن افزوده گردد. دانه‌های سرباره نیز از روی کناره‌ها و گوشه‌های صاف و تیزشان قابل تمایز هستند. دانه‌های سرباره به‌مرور زمان به دلیل هیدراته شدن تغییر شکل می‌دهند.

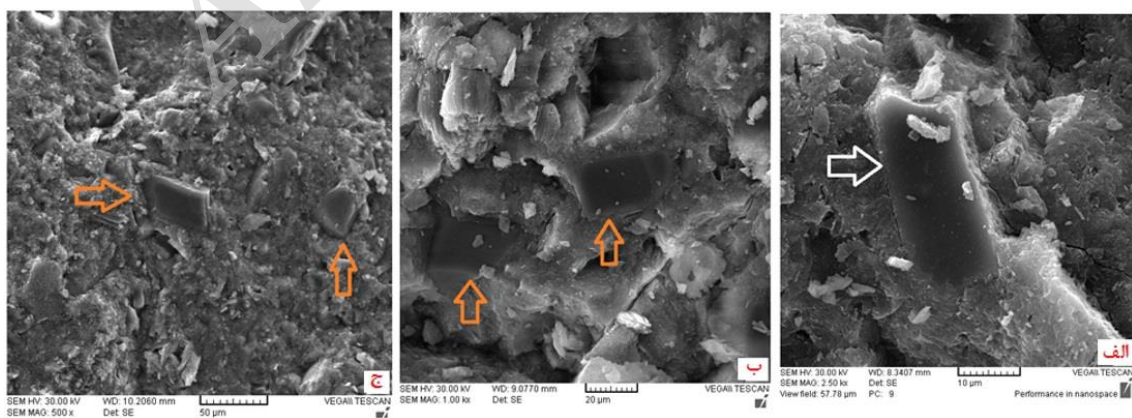
چنانچه مشاهده می‌شود، این حفره‌ها پر از بلورهای سوزنی شکل پرتلندایت (Portlandite) (هیدروکسید کلسیم) می‌باشند. پرتلندایت حاصل واکنش‌های هیدراتاسیون فازهای هیدرولیکی موجود در سرباره و سیمان پرتلند است. از آنجایی که تشکیل پرتلندایت در نرمی‌های بلین بالا به علت پیشرفت بهتر واکنش‌های هیدراتاسیون، بیشتر می‌باشد، لذا می‌توان در نرمی بلین بالاتر ($4500 \text{ cm}^2/\text{g}$) پرتلندایت بیشتری انتظار داشت که البته چنین مشاهده‌ای با میکروسکوپ الکترونی مقدور نیست و یا دقیق نمی‌باشد، اما می‌توان برای این منظور از روش‌های آنالیز شیمیایی تر بهره برد.

تصاویر (الف)، (ب)، و (ج) شکل (۱۰)، به ترتیب تصاویر SEM نمونه‌های خمیر سیمان سرباره فسفر



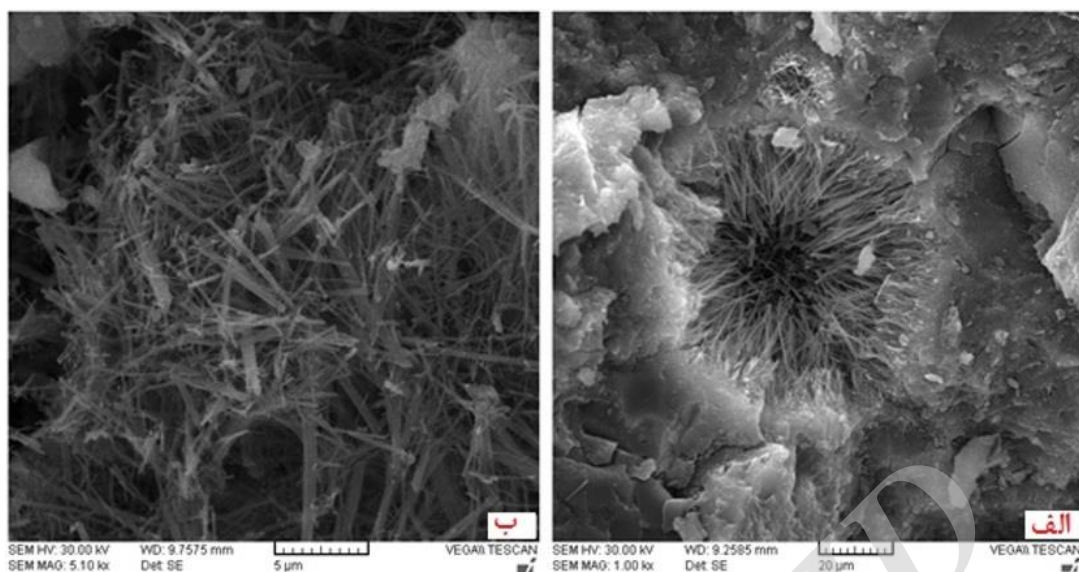
شکل ۹ تصاویر SEM بلورهای سوزنی شکل پرتلندایت در سیمان سرباره فسفر با نرمی بلین

(الف) $2050 \text{ cm}^2/\text{g}$ ، (ب) $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$

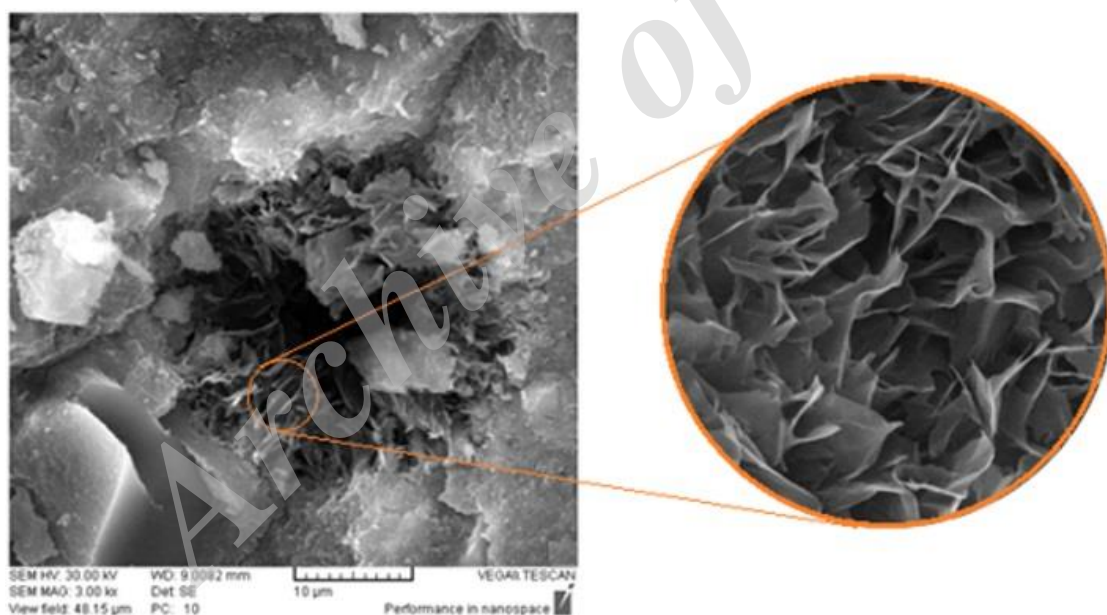


شکل ۱۰ تصاویر SEM مربوط به خمیر سیمان سرباره فسفر (نرمی بلین $3030 \text{ cm}^2/\text{g}$) عمل‌آوری شده در دماهای

(الف) 45°C ، (ب) 85°C (ج) 200°C



شکل ۱۱ تصاویر SEM بلورهای پرتلندایت در خمیر سیمان سرباره فسفر (نرمی بلین $3030 \text{ cm}^2/\text{g}$) عمل‌آوری شده در دمای 45°C



شکل ۱۲ تصاویر SEM بلورهای پرتلندایت در خمیر سیمان سرباره فسفر (نرمی بلین $3030 \text{ cm}^2/\text{g}$) عمل‌آوری شده در دمای 85°C

وارد واکنش شده و قسمت کوچکی از آنها باقی مانده است که با مرور زمان، امکان واکنش دادن این بخش‌ها نیز وجود دارد. می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش دمای عمل‌آوری دانه‌های سرباره وارد واکنش شده

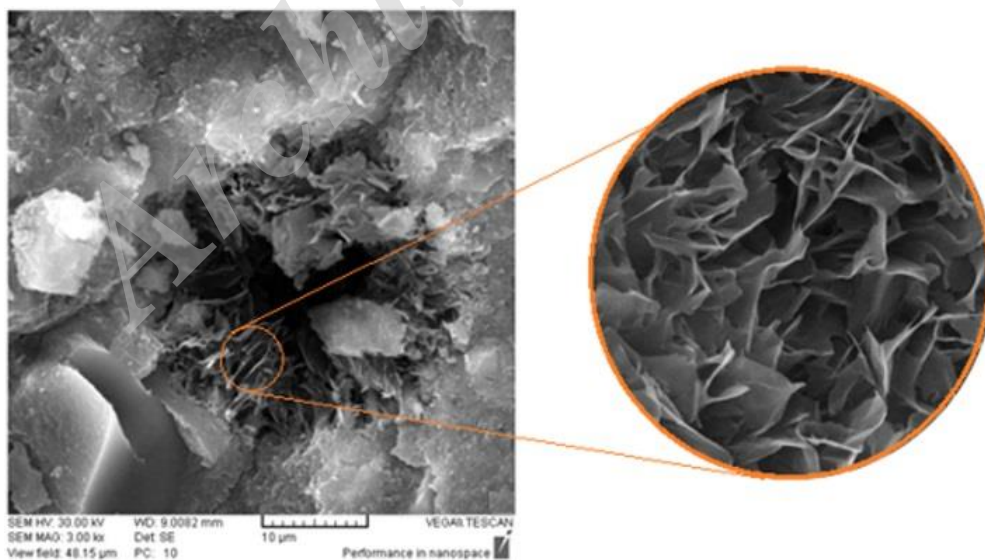
تصویر (الف) یک دانه بزرگ سرباره فسفر را نشان می‌دهد که به‌طور عمده‌ای وارد واکنش نشده و سطح آن تا حد زیادی سالم باقی مانده است. در تصاویر (ب) و (ج) نمایی از دانه‌های سرباره فسفر را می‌بینیم که بیشتر

هستند و به صورت ورقه‌ای می‌باشند.

نتیجه‌گیری

مقاومت فشاری ملات سیمان سرباره فسفر در سه نرمی بلین مختلف و زمان‌های عمل‌آوری معین اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری با افزایش نرمی بلین، افزایش می‌یابد. همچنین، مقاومت فشاری برحسب زمان عمل‌آوری در سه دمای مورد مطالعه روند افزایشی داشت، با این تفاوت که در دو دمای بالاتر از 45°C ، مقاومت فشاری در انتهای زمان عمل‌آوری کاهش یافت. نسبت آب به سیمان ملات و خمیر سرباره فسفر در نرمی بلین بالا بیشتر از نرمی بلین پایین بود که علت این امر، افزایش مساحت سطح تماس دانه‌های سیمان بود. زمان‌های گیرش اولیه و نهایی سیمان سرباره فسفر با افزایش نرمی بلین کاهش یافتند؛ به طوری که با افزایش نرمی بلین از $2050\text{ cm}^2/\text{g}$ تا $4500\text{ cm}^2/\text{g}$ ، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی به ترتیب $27/25$ و $25/28$ درصد کاهش یافتند، ولی زمان‌های گیرش اولیه و نهایی سیمان سرباره فسفر از زمان‌های گیرش اولیه و نهایی سیمان پرتلند نوع ۲ بیشتر بود.

و شکل اولیه خود را زودتر از دست می‌دهند. مشاهدات میکروسکوپی نشان داد عمل‌آوری در دماهای نسبتاً بالا نیز منجر به تشکیل بلورهای پرتلندایت در درون حفره‌های موجود در ریزساختار می‌گردد. شکل (۱۱) حفره‌ای حاوی بلورهای سوزنی شکل پرتلندایت را نشان می‌دهد که مربوط به سیمان سرباره فسفر (نرمی بلین $3030\text{ cm}^2/\text{g}$) عمل‌آوری شده در دمای 45°C است. تصاویر SEM نشان داده شده در شکل (۱۲) مربوط به خمیر سیمان سرباره فسفر (نرمی بلین $3030\text{ cm}^2/\text{g}$) عمل‌آوری شده در دمای 85°C است. در این دما بلورهای پرتلندایت از مورفولوژی متفاوتی (ورقه‌ای شکل) برخوردارند و دارای ساختار متفاوتی نسبت به بلورهای پرتلندایت سوزنی شکل تشکیل شده در دمای 45°C می‌باشند. شکل (۱۳) شامل تصاویری از بلورهای پرتلندایت تشکیل شده در خمیر سیمان سرباره فسفر (نرمی بلین $3030\text{ cm}^2/\text{g}$) می‌باشد که در دمای 200°C عمل‌آوری شده‌اند. بلورهای پرتلندایت در این دما دارای ساختاری مشابه با بلورهای موجود در دمای 85°C



شکل ۱۲ تصاویر SEM بلورهای پرتلندایت در خمیر سیمان سرباره فسفر

(نرمی بلین $3030\text{ cm}^2/\text{g}$) عمل‌آوری شده در دمای 85°C

عمل‌آوری 200°C نیز می‌توان دانه‌های سرباره را مشاهده نمود. همچنین بلورهای پرتلندایت ناشی از هیدراتاسیون سرباره و سیمان پرتلند در دماهای مختلف از مورفولوژی‌های متفاوتی برخوردار می‌باشند.

این موضوع به دلیل آهسته‌تر بودن سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون در سیمان سرباره فسفر نسبت به سیمان پرتلند نوع ۲ می‌باشد. مطالعه میکروسکوپی ریزساختار خمیر سخت‌شده سیمان و مشاهده دانه‌های واکنش‌نداده و یا در حال واکنش سرباره حکایت از روند نسبتاً کند واکنش‌های هیدراتاسیون در زمان‌های طولانی است، به طوری که حتی در نرمی بلین $4500\text{ cm}^2/\text{g}$ و در دمای

مراجع

1. Dongxu, L., Jinlin, S., Liangxi, M., and Xuequan, W., "The Influence of Admixtures on the Properties of Phosphorous Slag Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, PP. 1169–1173, (2000).
2. Dong-xu, L., Lin, C., Zhong-zi, X., and Zhi-min, L., "A Blended Cement Containing Blast Furnace Slag and Phosphorous Slag", *Wuhan University of Technology*, Vol. 17, PP. 62-65, (2002).
3. Peiwei, G., Xiaolin, L., Chuanxi, Y., Xiaoyan, L., Nannan, S., and Shaochun, J., "Microstructure and Pore Structure of Concrete Mixed with Superfine Phosphorous Slag and Super-plasticizer", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, PP. 837–840, (2008).
4. Xia, C., Li, Z., and Kunhe, F., "Anti-crack Performance of Phosphorous Slag Concrete", *Wuhan University, Journal of Natural Sciences*, Vol. 14, PP. 080–086, (2009).
5. Shi, C., and Krivenko, P.V., "Alkali-activated Cements and Concrete", Taylor & Francis, London and New York, (2006).
6. Behim, M., Beddar, M., and Clastres, P., "Reactivity of Granulated Blast Furnace Slag", *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, PP. 7-14, (2013).
7. Slag Cement and the Environment, Slag Cement Association, www.slagcement.org. (2003).
8. Shi, C., and Li, Y., "Investigation on Some Factors Affecting the Characteristics of Alkali-phosphorus Slag Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, PP. 527-533, (1989).
9. Singh, N.B., and Bhattacharjee, K.N., "Phosphorous Furnace Slag-A Potential Waste Material for the Manufacture of Cements", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 3, PP. 41-44, (1996).
10. Dongxu, L., Jinlin, S., Lin, C., and Xuequan, W., "Influence of Fast-setting/early-strength Agent on High Phosphorous Slag Content Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, PP. 19-24, (2001).
11. Xia, C., Kunhe, F., Huaquan, Y., and Hua, P., "Hydration Kinetics of Phosphorus Slag-cement Paste", *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science*, Vol. 26, PP. 142–146, (2011).
12. Xu, X., Zhang, Y., and Li, S., "Influence of Different Localities Phosphorous Slag Powder on the Performance of Portland Cement", *Procedia Engineering*, Vol. 27, PP. 1339–1346, (2012).

13. Liu, D.M., "Effect of Phosphorus Slag and Fly Ash on Mechanical Properties of High Belite Cement", *Advanced Materials Research*, Vol. 598, PP. 535-538, (2012).
14. Xiu-wei, L., Lin, Y., and Bin, Z., "Utilization of Phosphorus Slag and Fly Ash for the Preparation of Ready-mixed Mortar", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 423-426, PP. 987-992, (2013).
15. Peng, Y., Huang, J., and Ke, J., "Preparation of Ultra-high Performance Concrete Using Phosphorous Slag Powder", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 357-360, PP. 588-591, (2013).
16. Jinhui, T., Min, D., Aiguo, W., and Lilan, X., "Influence of the Cement Fineness on Strengths of Cement Pastes Containing High Phosphorus Slag", *Journal of Materials in Civil Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001316.
17. Sajedi, F., and Abdul Razak, H., "The Effect of Chemical Activators on Early Strength of Ordinary Portland Cement-slag Mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, PP. 1944-1951, (2010).

Archive of SID