

بررسی تأثیر بوراکس بر هیدراتاسیون و خواص سیمان پرتلند

هاجر احمدی مقدم^{۱*}, شهرام میکائیل‌وند^۲, گلرخ شهمزادزاده^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

^۲مدیر کنترل کیفی و آزمایشگاه کارخانه سیمان شهرکرد

^۳سرپرست آزمایشگاه کارخانه سیمان شهرکرد

چکیده: سیمان پرتلند به عنوان سومین ماده مهم در صنعت ساختمان‌سازی شناخته می‌شود. در این تحقیق، تأثیر بوراکس بر خواص سیمان پرتلند از جمله زمان گیرش، درصد هیدراتاسیون و استحکام فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، از بوراکس در مقدار ۰/۲٪، ۰/۴٪ و ۰/۶٪ درصد وزنی استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش مقدار بوراکس زمان گیرش سیمان پرتلند افزایش می‌یابد. افزودن ۰/۶٪ درصد وزنی بوراکس زمان گیرش سیمان پرتلند حدود ۵۰٪ درصد افزایش یافته و گیرش اولیه از ۱۲۰ دقیقه به ۱۷۰ دقیقه رسید. حضور بوراکس در مقدار ۰/۶٪ درصد وزنی، منجر به افزایش درصد هیدراتاسیون و استحکام فشاری سیمان گردید. بیشترین مقدار درجه هیدراتاسیون و استحکام فشاری برای نمونه حاوی ۰/۶٪ درصد وزنی بوراکس حاصل شد. استحکام فشاری ۲۱ روزه به مقدار ۵۷ MPa برای این نمونه حاصل شد که برای نمونه سیمان پرتلند حاصل فشاری ۴۲ روزه به مقدار ۴۲ MPa بود. افزایش استحکام به درصد هیدراتاسیون بالاتر و تخلخل کمتر نسبت داده می‌شود. با افزایش مقدار بوراکس به ۱٪ درصد وزنی، افت چشمگیری در استحکام فشاری سیمان ایجاد شد که به درجه هیدراتاسیون کمتر و درصد تخلخل بالاتر مربوط می‌شود.

کلمات کلیدی: سیمان پرتلند، بوراکس، زمان گیرش، هیدراتاسیون، استحکام فشاری.



نویسنده مسئول و اول:

دکتر هاجر احمدی مقدم

دانشگاه شهرکرد

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه‌های: ۳۲۶ تا ۳۳۳

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۳۳۵۱

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۳۰۹۷

زبان نشریه: فارسی

دسترسی پذیر در نشانی:

www.JICERS.ir

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۹/۱۰

DOI: 20.1001.1.17353551.1401.18.0.3.9

۱- مقدمه

سیمان پرتلند از سال ۱۸۲۴ میلادی که توسط اسپدین معرفی شد، به یکی از مهم‌ترین مواد ساختمانی تبدیل شده است [۱]. سیمان پرتلند از حرارت دادن مواد اولیه سنگ آهک و رس در دمای حدود ۱۴۵۰°C تهیه می‌شود. تولید سیمان نیاز به مصرف انرژی بالا دارد و همراه با آزاد سازی CO₂ به مقدار خیلی زیاد است. به طور کلی مشخص شده است که حدود یک تن CO₂ در تولید هر تن سیمان پرتلند آزاد می‌شود [۲].

افزودنی‌های شیمیایی به صورت رایج برای بهبود خواص مکانیکی و کارپذیری سیمان و بتن و هم‌چنین برای کاهش میزان آلودگی و انرژی مصرفی در کارخانه‌های سیمان استفاده می‌شوند [۳، ۴]. هم‌چنین اخیراً، جایگزین کردن سیمان پرتلند معمولی با مواد پوزولانی مختلف مورد توجه واقع شده است. این مواد به منظور بهبود استحکام فشاری بتن و در سیمان آسفالت خیابان‌ها استفاده می‌شوند [۵، ۶]. افزودنی‌های مورد استفاده در سیمان به دو نوع واکنش‌پذیر و خنثی تقسیم‌بندی می‌شوند. افزودنی‌های خنثی (مانند کوارتز و دولومیت) با قرارگرفتن در فضاهای خالی باقی مانده بین ذرات درشت بدون انجام هیچ گونه واکنش شیمیایی باعث افزایش استحکام فشاری می‌شوند. افزودنی‌های واکنش‌پذیر (مانند پوزولان‌ها و سرباره خرد شده) علاوه بر این که فضای



حالی بین ذرات درشت را پر می‌کنند، همچنین از طریق انجام واکنش شیمیایی و تولید هیدراتهای اضافه موجب ایجاد یک زمینه متراکم می‌گردند. واکنش پذیری پوزولان استحکام فشاری بتن را افزایش می‌دهد [۷]. تأثیر افزودنی‌های مختلف بر روی خصوصیات سیمان پرتلند مورد بررسی قرار گرفته است [۸-۱۳]. افزودنی شیمیایی اتانول دی‌ایزوپروپیانول آمین باعث تسريع هیدراتاسیون سیمان و افزایش استحکام فشاری آن می‌شود [۳]. افزایش استحکام خمشی و فشاری سیمان با استفاده از نانو ویسکرهای کاربید سیلیکون به مکانیزم پل زدن این ویسکرها در زمینه سیمان نسبت داده است [۱۴]. حضور اکسید گرافن می‌تواند به عنوان مراکز جوانه‌زنی در گیرش سیمان عمل کند و باعث تسريع هیدراتاسیون آن شود، همچنین گزارش شده در صورت آگلومره شدن ذرات اکسید گرافن این افزودنی به صورت یک افزودنی خشی عمل می‌کند [۱۵]. افزودنی کلراید الومینیوم از طریق افزایش درصد هیدراتاسیون سیمان و کاهش تخلخل منجر به بهبود استحکام فشاری سیمان پرتلند می‌شود [۱۳].

دستیابی به زمان گیرش مناسب و بهبود خواص مکانیکی از اهداف اصلی استفاده از افزودنی‌ها در سیمان است. بنابراین معرفی افزودنی مناسب برای دستیابی به این اهداف اهمیت زیادی خواهد داشت. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر بوراکس به عنوان یک افزودنی بر خصوصیات سیمان پرتلند از جمله زمان گیرش، هیدراتاسیون، فازها و استحکام فشاری آن است.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ ساخت صنایع سیمان شهرکرد استفاده شد. برای تهیه نمونه‌ها نسبت وزنی آب به سیمان ۰/۲۵٪ انتخاب گردید. تأثیر افزودنی بوراکس آبدار با فرمول شیمیایی $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ و مارک مرک در مقادیر ۰/۴، ۰/۶ و ۱ درصد وزنی سیمان بررسی گردید. برای تهیه خمیر سیمان، ابتدا مقدار موردنظر بوراکس در آب حل و سپس سیمان به آرامی به آن اضافه شد و به مدت ۲ دقیقه با مخلوط کن با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه مخلوط و بعد از ۱۵ ثانیه توقف، به مدت ۲ دقیقه دیگر با سرعت بالاتر ۱۲۰ دور بر دقیقه برای تهیه خمیر سیمان کاملاً یکنواخت هم‌زده می‌شود. خمیر تهیه شده برای اندازه‌گیری زمان گیرش اولیه بر اساس استاندارد ASTM C191 به درون حلقه ویکات ریخته شد [۱۶]. همچنین برای تهیه نمونه‌های استحکام فشاری ملات سیمان در قالب‌ها به ابعاد ۵*۵*۵ cm وارد شد و به مدت ۲۴ ساعت در اتاقچه رطوبت ۹۰ درصد و دمای ۲۵°C نگهداری شدند. بعد از خارج کردن نمونه‌ها از درون قالب، برای بررسی تأثیر زمان هیدراتاسیون، خواص نمونه‌ها شامل استحکام فشاری طی مدت زمان‌های ۷، ۲۸ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شدند.

با دستگاه پراش اشعه X (XRD) مدل AW-XDM 300 Asenware تشخیص با طول موج $\text{Cu}-\text{ka}$ $1/\sqrt{542} \text{ \AA}$ ، بررسی فازی نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز هیدراتاسیون صورت گرفت. ریز ساختار و آنالیز EDS با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبیشی (FE-SEM, model 450 FEG, FEI QUANTA) بررسی گردید. درصد تخلخل باز نمونه‌های سیمانی با استفاده از روش ارشمیدس طبق استاندارد ASTMC D792 تعیین گردید [۱۳]. استحکام فشاری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه فشار تک محوره (البرز کوشما) با ظرفیت ۳۰ kN با سرعت ۱ mm/s انجام گرفت. تست فشار برای هر ترکیب بر روی ۳ نمونه انجام و میانگین نتایج آن‌ها گزارش شد.

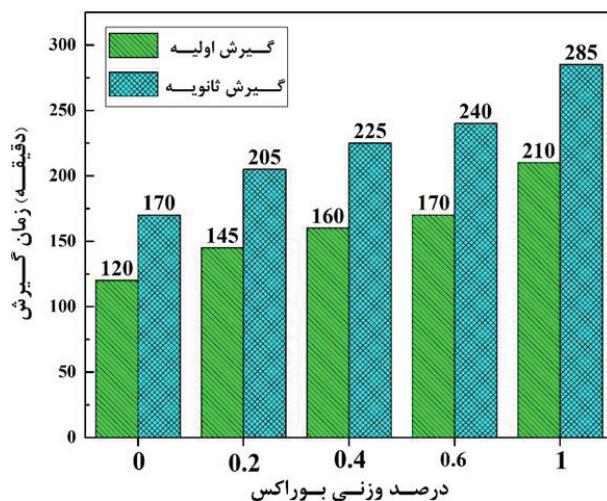
برای مشخص کردن درصد هیدراتاسیون، نمونه‌های سیمانی ابتدا خرد و از الک مش ۴۰ عبور داده شد. سپس پودر حاصل در دمای ۱۱۰°C به مدت ۵ ساعت خشک شدند و وزن آن‌ها ($W_{110^\circ\text{C}}$) با ترازوی با دقت بالا اندازه‌گیری شد. وزن پودر بعد از حرارت دادن در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۳ ساعت ($W_{1000^\circ\text{C}}$) دوباره اندازه‌گیری شد. درجه هیدراتاسیون (α) به عنوان کسر وزنی سیمان واکنش داده طبق روابط زیر به دست آمد: در اینجا LOI مربوط به کاهش وزن پودر سیمان هیدراته نشده (به مقدار ۱/۱ درصد وزنی) است [۱۷].

$$\alpha = (W_n / 0.23 - LOI) * 100 \quad (1)$$

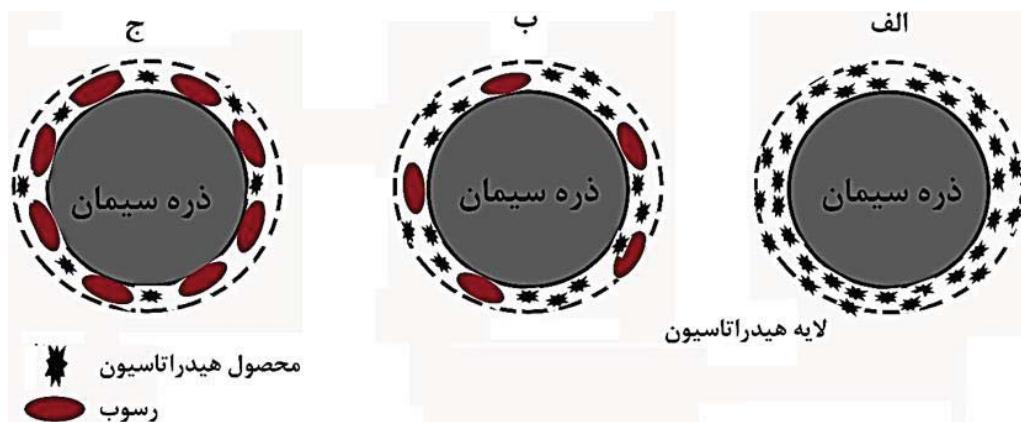
$$W_n = (W_{110^\circ\text{C}} - W_{1000^\circ\text{C}}) / W_{1000^\circ\text{C}} \quad (2)$$

۳- نتایج و بحث

در شکل ۱ نتایج مربوط به تأثیر بوراکس بر زمان گیرش سیمان پرتلنده آورده شده است. طبق نتایج بوراکس باعث تأخیر در گیرش و در نتیجه افزایش در زمان گیرش سیمان شده است. با اضافه کردن بوراکس به مقدار ۶/۰ درصد وزنی، زمان گیرش اولیه سیمان از ۱۲۰ دقیقه به ۱۷۰ دقیقه افزایش یافت. افزایش در زمان گیرش را می‌توان به انجام واکنش بین سیمان پرتلنده و بوراکس نسبت داد. بنابراین بوراکس یک افزودنی واکنش‌پذیر برای سیمان پرتلنده خواهد بود. در طی هیدراتاسیون سیمان یون‌های Ca^{2+} و SO_4^{2-} در محلول آزاد می‌شوند. طبق نتایج گزارش شده توسط محققان، بوراکس با یون‌های Ca^{2+} تشکیل رسوب بورات کلسیم می‌دهد که این رسوب بر سطح ذرات سیمان قرار می‌گیرد که مانع روند سریع هیدراتاسیون و در نتیجه افزایش زمان گیرش سیمان خواهد شد. هم چنین گزارش شده است پتانسیل زتا در خمیر سیمان در حضور بوراکس افزایش می‌یابد و منجر به افزایش بار مثبت سطحی ذرات سیمان می‌گردد که می‌تواند باعث افزایش زمان گیرش سیمان پرتلنده شود [۱۸]. زمان گیرش برای نمونه حاوی ۱ درصد وزنی بوراکس به ۲۱۰ دقیقه افزایش یافت. این افزایش چشمگیر زمان گیرش به افزایش ذرات رسوب بورات کلسیم بر سطح ذرات سیمان و جلوگیری از فرآیند هیدراتاسیون سیمان نسبت داده می‌شود. در شکل ۲ به صورت شماتیک هیدراته شدن یک ذره سیمان در سه حالت بدون وجود بوراکس، بوراکس در مقدار کم و بوراکس در مقدار زیاد نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در سیمان بدون بوراکس، محصول هیدراتاسیون در اطراف ذره سیمان ایجاد شده است. در حضور بوراکس رسوب بر روی سطح ذرات سیمان قرار می‌گیرد که مقدار رسوب با افزایش مقدار بوراکس افزایش و محصول هیدراته کاهش یافته است [۱۸].

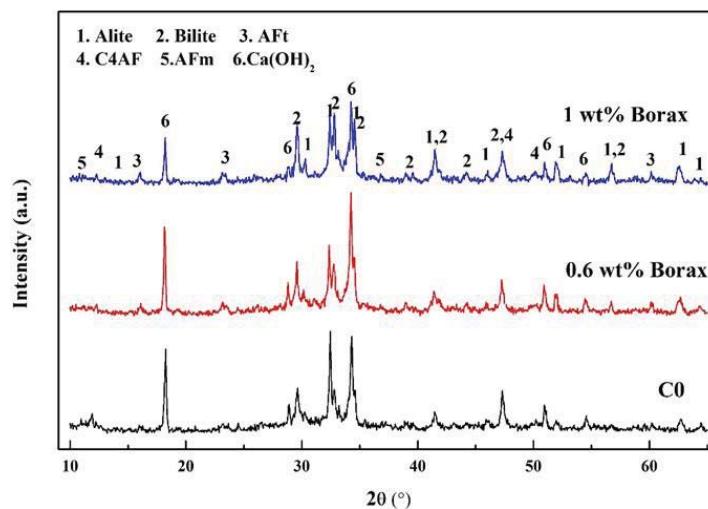


شکل ۱: تأثیر بوراکس بر زمان گیرش سیمان.



شکل ۲: هیدراته شدن یک ذره سیمان (الف) بدون وجود بوراکس، ب) بوراکس در مقدار کم و ج) بوراکس در مقدار زیاد.

شکل ۳ الگوهای پراش اشعه X مربوط به نمونه خالص و نمونه‌های حاوی ۰/۶ و ۱ درصد وزنی بوراکس بعد از ۲۸ روز هیدراتاسیون را نشان می‌دهد. بر طبق الگو پراش اشعه X، فازهای تری‌کلسیم سیلیکات (Alite, Ca_3SiO_5 , C3S, JCPDS Card No. 49-0442)، تراکلسیم فروآلومینات دی‌کلسیم سیلیکات (Belite, Ca_2SiO_4 , C2S, JCPDS Card No. 49-1673)، هیدروکسید کلسیم (Brownmillerite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, JCPDS Card No. 72-0156) و کلسیم سیلیکات هیدراته (AFm, CSH, JCPDS Card No. 33-306) شناسایی شدند [۱۷، ۱۹]. در اثر هیدراته شدن سیمان یعنی واکنش فازهای تری و دی‌کلسیم سیلیکات با آب، فازهای هیدروکسید کلسیم و کلسیم سیلیکات هیدراته به عنوان محصولات هیدراته تشکیل می‌شوند. طبق شکل ۳، با اضافه کردن ۰/۶ درصد وزنی بوراکس، کاهش شدت پیک‌های تری‌کلسیم سیلیکات و افزایش شدت پیک‌های دی‌کلسیم سیلیکات افزایش و شدت پیک‌های هیدروکسید کلسیم نسبت به نمونه خالص می‌شود. در حالی که برای نمونه حاوی ۱ درصد وزنی بوراکس شدت پیک‌های دی‌کلسیم سیلیکات افزایش و شدت پیک‌های هیدروکسید کلسیم نسبت به نمونه خالص کاهش یافته است. بنابراین بوراکس در مقادیر کم می‌تواند از طریق تسريع هیدراتاسیون فاز تری‌کلسیم سیلیکات منجر به افزایش محصول هیدراتاسیون یعنی هیدروکسید کلسیم شود و مقادیر بالاتر بوراکس از هیدراتاسیون سیمان جلوگیری می‌کند [۱۳، ۳].

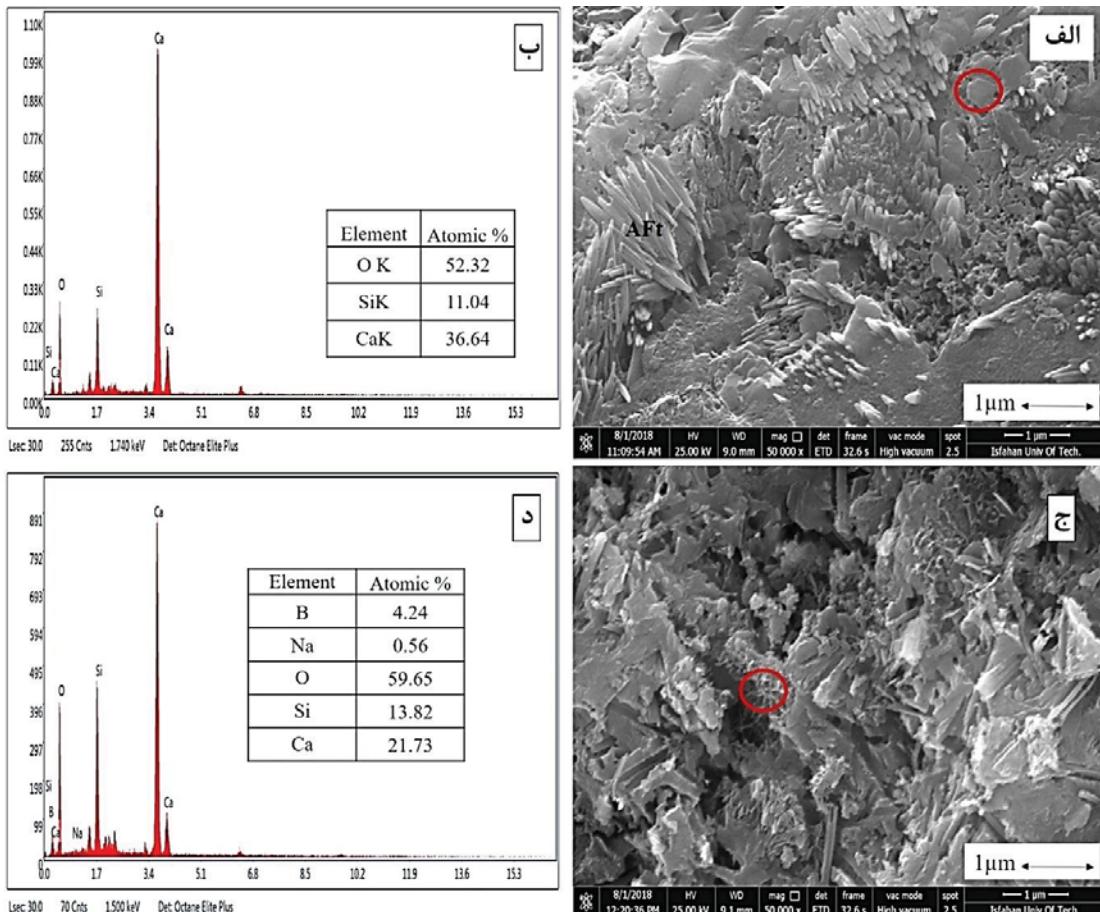


شکل ۳: الگوهای پراش اشعه X نمونه خالص و نمونه‌های حاوی ۰/۶ و ۱ درصد وزنی بوراکس.

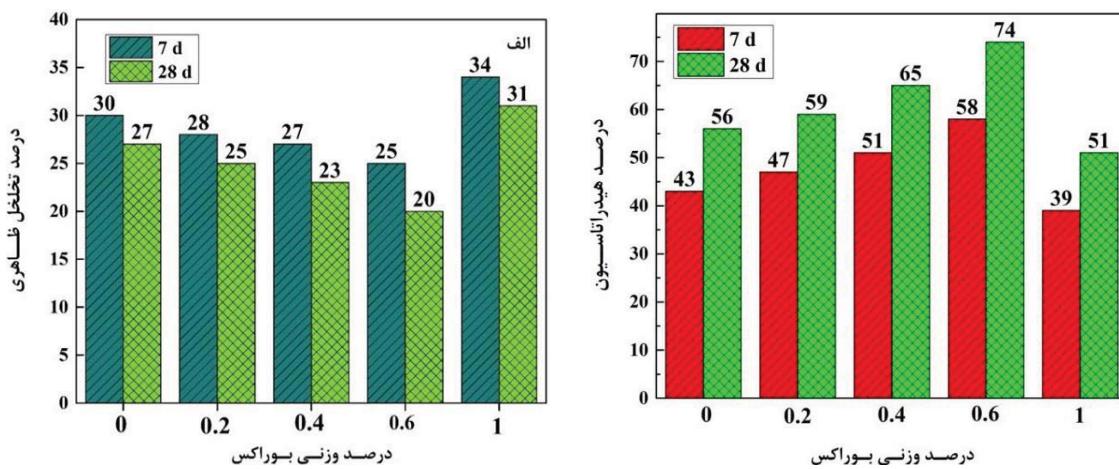
در شکل ۴ تصاویر SEM از سطح شکست و نتایج آنالیز عنصری EDS مربوط به مناطق مشخص شده برای نمونه خالص و نمونه حاوی ۰/۶ درصد وزنی بوراکس بعد از ۲۸ روز هیدراتاسیون آورده شده است. در تصویر SEM نمونه خالص فاز دی‌کلسیم سیلیکات با شکل تقریباً شش‌ضلعی مشخص شده است که وجود این فاز با استفاده از آنالیز EDS نیز تایید گردید و همچنین کریستال‌های سوزنی شکل اترجنت (AFt) نیز در شکل ۴ الف قابل مشاهده است. در نمونه حاوی ۰/۶ درصد وزنی بوراکس، فاز کلسیم سیلیکات هیدراته رشته‌ای شکل مشخص شده است [۱۱، ۱۳]. وجود فاز هیدراته نشده تری‌کلسیم سیلیکات در نمونه خالص بیان گر هیدراتاسیون کمتر در این نمونه است.

درصد هیدراتاسیون و درصد تخلخل ظاهری نمونه‌های سیمانی حاوی مقادیر متفاوت بوراکس در زمان‌های ۷ و ۲۸ روز هیدراتاسیون در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش زمان هیدراتاسیون از ۷ به ۲۸ روز درصد هیدراتاسیون نمونه‌ها افزایش و میزان تخلخل ظاهری نمونه‌ها کاهش می‌یابد که به پیشرفت واکنش هیدراتاسیون سیمان با زمان و افزایش محصولات هیدراتاسیون مربوط می‌شود [۱۰، ۱۷]. با افزایش مقدار بوراکس، درصد هیدراتاسیون افزایش یافته است و بیشترین درصد هیدراتاسیون برای نمونه حاوی ۰/۶ درصد بوراکس به مقدار ۷۴ درصد حاصل شد. با افزایش مقدار بوراکس به ۱ درصد، هیدراتاسیون کاهش و درصد

تخلخل ظاهری افزایش یافت. گزارش شده است که تشکیل رسم بورات کلسیم در مراحل اولیه هیدراته شدن سیمان انجام می‌گیرد. در مقادیر بالای بوراکس، با قرار گرفتن ذرات زیاد رسم ب بر سطح ذرات، مانع ادامه هیدراته شدن ذرات سیمان می‌شوند و درصد هیدراتاسیون کاهش خواهد یافت. بنابراین آب در طی هیدراته شدن مصرف نمی‌شود و به صورت آب آزاد بین ذرات باقی می‌ماند، در اثر خروج این آب آزاد تخلخل بیشتر در نمونه حاوی بوراکس بالا ایجاد می‌شود [۱۸].

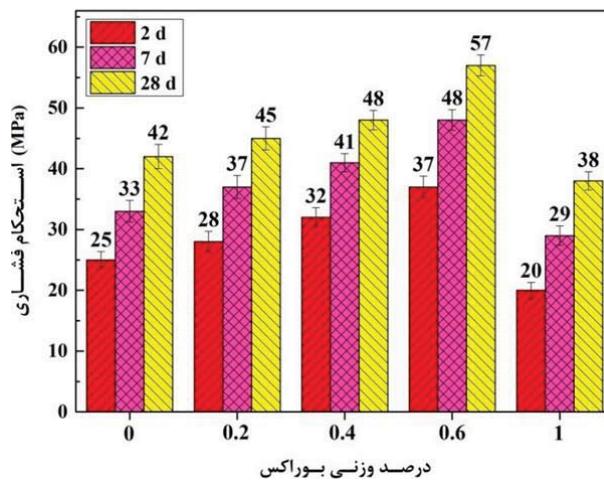


شکل ۴: تصاویر SEM و آنالیز عنصری EDS مریبوط به الف و ب) نمونه خالص، ج و د) نمونه حاوی ۰/۶ درصد وزنی بوراکس.



شکل ۵: تأثیر بوراکس بر (الف) تخلخل ظاهری و ب) درصد هیدراتاسیون نمونه‌های سیمانی در زمان‌های ۷ و ۲۸ روز.

نتایج مربوط به استحکام فشاری نمونه‌های مختلف در زمان‌های ۰، ۰.۲، ۰.۴، ۰.۶ و ۱ روز هیدراتاسیون در شکل ۶ آورده شده است. افزایش در استحکام فشاری با افزایش زمان به مقدار بیشتر محصولات هیدراته مربوط می‌شود. طبق نتایج، افزایش قابل توجه در استحکام فشاری سیمان پرتلنده در نمونه حاوی ۰/۶ درصد بوراکس، بیان گر تأثیر این افزودنی بر خواص مکانیکی سیمان پرتلنده است. بهبود استحکام فشاری در این نمونه را می‌توان به درجه بالاتر هیدراتاسیون و تخلخل کمتر آن نسبت داد [۳، ۱۰، ۱۳، ۱۷]. دو عامل درصد هیدراتاسیون و تخلخل تأثیر چشمگیری بر استحکام فشاری سیمان دارند. طبق نتایج گزارش شده، وابستگی استحکام فشاری سیمان به تخلخل نسبت به درصد هیدراتاسیون شدیدتر است و کاهش در تخلخل منجر به افزایش بیشتر در استحکام فشاری سیمان خواهد شد [۳]. کاهش استحکام فشاری اندازه‌گیری شده برای نمونه حاوی ۱ درصد بوراکس می‌تواند به دلیل درجه هیدراتاسیون کمتر و تخلخل بیشتر در این نمونه باشد. در جدول ۱ نتایج مربوط به استحکام فشاری سیمان پرتلنده در حضور چند افزودنی مختلف با نتیجه مطالعه حاضر مقایسه شده است. طبق نتایج، افزودنی‌ها حتی در مقادیر کم می‌توانند تأثیر چشمگیر بر خواص سیمان پرتلنده به همراه داشته باشند. افزودنی بوراکس را می‌توان به عنوان افزودنی مناسب در نظر گرفت که افزایش در زمان گیرش به همراه افزایش در استحکام فشاری را فراهم می‌کند.



شکل ۶: استحکام فشاری نمونه‌های مختلف در زمان‌های ۰ و ۰.۲ روز هیدراتاسیون.

جدول ۱: نتایج مربوط به استحکام فشاری ۰.۲ روز هیدراتاسیون سیمان پرتلنده در حضور چند افزودنی مختلف.

مرجع	استحکام فشاری (MPa)	مقدار بهینه افزودنی (درصد وزنی)	نوع ماده افزودنی
[۱۴]	۶۴/۲	۰/۲۵	نانو کاربید سیلیکون
[۱۳]	۶۰/۶	۰/۴	کلراید آلومنیوم
[۷]	۵۲	۵	خاکستر بادی
[۷]	۵۰	۵	پوزولان
[۱۱]	۵۳	۱۰	سریاره زغال سنگ
کار حاضر	۵۷	۰/۶	بوراکس

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی افزودنی بوراکس بر خواص سیمان پرتلنده پرداخته شد. طبق نتایج حاصل، بوراکس به عنوان افزودنی واکنش‌پذیر می‌تواند منجر به تغییرات زیادی در خواص سیمان پرتلنده گردد. تأثیر بوراکس بر خواص سیمان به مقدار آن بستگی دارد. افزودنی بوراکس باعث افزایش زمان گیرش سیمان پرتلنده می‌شود. در مقادیر کمتر از ۰/۶ درصد وزنی بوراکس منجر به افزایش هیدراتاسیون، کاهش تخلخل ظاهری و بهبود استحکام فشاری سیمان پرتلنده می‌گردد. در نمونه حاوی مقادیر بالا بوراکس،



استحکام فشاری کاهش یافت که دلیل آن می‌تواند به درجه هیدراتاسیون پایین‌تر نسبت داده شود.

تشکر و قدردانی

نویسنده مسئول مقاله بر خود لازم می‌داند از همکاری صمیمانه مجموعه کارخانه سیمان شهرکرد برای انجام این کار پژوهشی تشکر و قدردانی داشته باشد.

منابع

- [1]. H. F. Taylor, *Cement Chemistry*. second ed., Thomas Telford. 1997.
- [2]. L. Qin, X. Gao, and Q. Li, "Upcycling carbon dioxide to improve mechanical strength of Portland cement," *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196, 726–738.
- [3]. X. Lu, Z. Ye, L. Zhang, P. Hou, and X. Cheng, "The influence of ethanol-diisopropanolamine on the hydration and mechanical properties of Portland cement," *Construction and Building Materials*, 2017, 135, 484–489.
- [4]. R. Kubiliute, R. Kaminskas, and A. Kazlauskaitė, "Mineral wool production waste as an additive for Portland cement," *Cement and Concrete Composites*, 2018, 88, 130–138.
- [5]. Q. Wu, Y. Wu, W. Tong, and H. Ma, "Utilization of nickel slag as raw material in the production of Portland cement for road construction," *Construction and Building Materials*, 2018, 193, 426–434.
- [6]. S.K. Tulashie, P. Ebo, J.K. Ansah, and D. Mensah, "Production of Portland pozzolana cement from rice husk ash," *Materialia*, 2021, 16, 101048.
- [7]. R. Kaminskas, V. Cesnaukas, and R. Kubiliute, "Influence of different artificial additives on Portland cement hydration and hardening," *Construction and Building Materials*, 2015, 95, 537–544.
- [8]. Z. Yu, C. Ni, M. Tang, and X. Shen, "Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash," *Construction and Building Materials*, 2018, 175, 458–466.
- [9]. A. Terzić, L. Pezo, N. Mijatović, J. Stojanović, M. Kragović, and L. Miličić, and L. Andrić, "The effect of alternations in mineral additives (zeolite, bentonite, fly ash) on physico-chemical behavior of Portland cement based binders," *Construction and Building Materials*, 2018, 180, 199–210.
- [10]. H. Li, Y. Xiang, and C. Xu, "Effect of C–S–H seed/PCE nanocomposites and triisopropanolamine on portland cement properties: Hydration kinetic and strength," *Journal of Building Engineering*, 2022, 57, 104946.
- [11]. B. Fu, Z. Cheng, D. Wang, and N. Li, "Investigation on the utilization of coal gasification slag in Portland cement: Reaction kinetics and microstructure," *Construction and Building Materials*, 2022, 323, 126587.
- [12]. J. Ma, X. Shu, S. Zheng, S. Qi, and Q. Ran, "Effects of polyurethane–silica nanohybrids as additives on the mechanical performance enhancement of ordinary Portland cement paste," *Construction and Building Materials*, 2022, 338, 127666.
- [13]. H. Ahmadimoghadam, A. Mirzaei and Z. Abedi Dehghi. "The relation between porosity, hydration degree and compressive strength of Portland cement pastes in the presence of aluminum chloride additive," *Construction and Building Materials*, 2020, 250, 118884.
- [14]. N. H. De Azevedo, and P. J. P. Gleize, "Effect of silicon carbide nanowhiskers on hydration and mechanical properties of a Portland cement paste," *Construction and Building Materials*, 2018, 169, 388–395.
- [15]. S. Ghazizadeh, P. Du, N. T. Skipper, and Y. Bai, "Understanding the behaviour of graphene oxide in Portland cement paste," *Cement and Concrete Research*, 2018, 111, 169–182.
- [16]. G. Sant, C.F. Ferraris, and J. Weiss, "Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development," *Cement and Concrete Research*, 2008, 38, 1286–1296.
- [17]. Y. Ma and J. Qian, "Influence of alkali sulfates in clinker on the hydration and hardening of Portland cement," *Construction and Building Materials*, 2018, 180, 351–363.
- [18]. H. Tan, Y. Guo, F. Zou, S. Jian, B. Ma, and Z. Zhi, "Effect of borax on rheology of calcium sulfoaluminate cement paste in the presence of polycarboxylate superplasticizer," *Construction and Building Materials*, 2017, 139, 277–285.
- [19]. A. Allahverdi, A. Maleki and M. Mahinroosta, "Chemical activation of slag-blended Portland cement," *Journal of Building Engineering*, 2018, 18, 76–83.



Investigating the Effect of Borax on the Hydration and Properties of Portland Cement

Hajar Ahmadimoghadam^{1*}, Shahram Mikael Vand², Golrokhs Shahmoradzadeh³

¹ Associate Professor, Department of Material Engineering, Faculty of Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

² Manager of Quality Control and Laboratory of Shahrood Cement Factory, Shahrood, Iran

³ Laboratory supervisor of Shahrood cement factory, Shahrood, Iran

* hajar.ahmadi@sku.ac.ir

Abstract: Portland cement is known as the third most important material in the construction industry. In this research, the effect of borax on the properties of Portland cement including setting time, hydration percentage and compressive strength has been investigated. For this purpose, borax was used in amounts of 0.2, 0.4, 0.6 and 1 wt%. The obtained results showed that the setting time of Portland cement increases with increasing the amount of borax. The addition of 0.6 wt% of borax increased the setting time of Portland cement by about 50%, and the initial setting increased from 120 minutes to 170 minutes. The presence of borax in amounts less than 0.6 wt% led to an increase in the percentage of hydration and compressive strength of cement. The highest values of degree of hydration and compressive strength were obtained for the sample containing 0.6 wt% of borax. The 28-day compressive strength was 57 MPa for this sample, which was 42 MPa for the pure Portland cement sample. The increase in strength is attributed to the higher degree of hydration and lower porosity. By increasing the amount of borax to 1 wt%, there was a significant drop in the compressive strength of cement, which is related to the lower degree of hydration and a higher percentage of porosity.

Keywords: Portland cement, Borax, Setting time, Hydration, Compressive strength.