

سنتز و بررسی کامپوزیت اکسی کلرید منیزیم و منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه به همراه نانوسیلیس

عاصفه شفیعی راد^{۱*}، احمد منشی^۲، علی صفار تلوری^۳

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲-استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۳-استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۰۹/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده ۱۳۹۲/۰۲/۲۰، تاریخ پذیرش قطعی ۱۳۹۲/۰۳/۲۷

چکیده در این تحقیق تولید کامپوزیت سرامیکی از دو پیوند دهنده سیمان اکسی کلرید منیزیم (سورل) و منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه و ذرات تقویت‌کننده نانوسیلیس به روش ریخته‌گری جرمی مورد مطالعه قرار گرفت. برای مشخصه‌یابی محصول تولید شده از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و جهت بررسی ریز ساختار و تایید فازهای تشکیل شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز عنصری (EDX) استفاده گردید. نتایج نشان داد که با افزایش منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه، به سیمان سورل خواص فیزیکی از جمله انحلال در آب، درصد جذب آب، درصد تخلخل بهبود می‌یابد و استحکام فشاری سرد (CCS) کاهش می‌یابد. با افزودن نانوسیلیس به زمینه کامپوزیت، روند استحکام فشاری افزایش و انحلال در آب، درصد جذب آب و درصد تخلخل کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی اکسی کلرید منیزیم، کامپوزیت سرامیکی، منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه، ریخته‌گری جرمی، ذرات نانوسیلیس.

synthesis and Investigation of Composite of Magnesium OxyChloride and Tri hydrate Magnesium Hydrogen Phosphate with Nano Silica

Asefeh Shafiee Rad^{*1}, Ahmad Monshi² and Ali Saffar Talouri³

Advanced Mterials Research Center, Mterials Engineering Department, Najaf Abad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

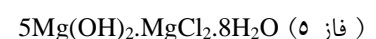
M.Sc. Student¹, Professor², Assistant Professor³

Abstract In this study, production of a ceramic composite composed o two binders, magnesium oxy chloride (Sorel cement) and trihydrate magnesium hydrogen phosphate, together with nano silica, by casting method of shaping castables, is considered. In order to characterize the product, X Ray Diffraction and to investigate the microstructure and the distribution of phases, Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X ray analysis were performed. Results indicated that by increasing trihydrate magnesium hydrogen phosphate toghether with Sorel cement, physical properties such as water dissolution, water absorption and prosity improves and cold crushing strength decrease by adding while nano silica the cold crushing strength increase and the trends of dissolution in water, water absorption and prosity decrease.

Keywords Magnesium Oxy Chloride Cement, Ceramic Nano Composite, Tri hydrate Magnesium hydrogen Phosphate, Castable Casting, Nano Silica Particles.

۱ - مقدمه

سیمان اکسی کلرید منیزیم اولین بار توسط سورل در سال ۱۸۶۷ کشف شد و تحت عنوان سیمان منیزیتی، سیمان سورل یا فرانسوی نام گذاری شده است [۱]. استحکام بالا، قابلیت آسان شکل گرفتن، ضد حریق بودن، مقاوم بودن در برابر سایش، هدایت حرارتی پایین، قابلیت اتصال به مقادیر مختلفی از فیلرهای آلی و معدنی، از خواص این نوع سیمان است. ناپایداری در برابر CO₂ موجود در هوا و مقاومت ضعیف در برابر آب از جمله محدودیت های استفاده از سیمان سورل می باشد [۲-۳]. این سیمان در ضدحریق، کف سازی صنعتی، ابزارهای سایشی و چرخ های ساینده به ویژه سنگ ساب ها استفاده می شود [۴]. سیمان سورل دارای فازهای کریستالی است که از واکنش اکسید منیزیم با محلول کلرید منیزیم ایجاد می شود. این فازها عبارتند از [۵]:



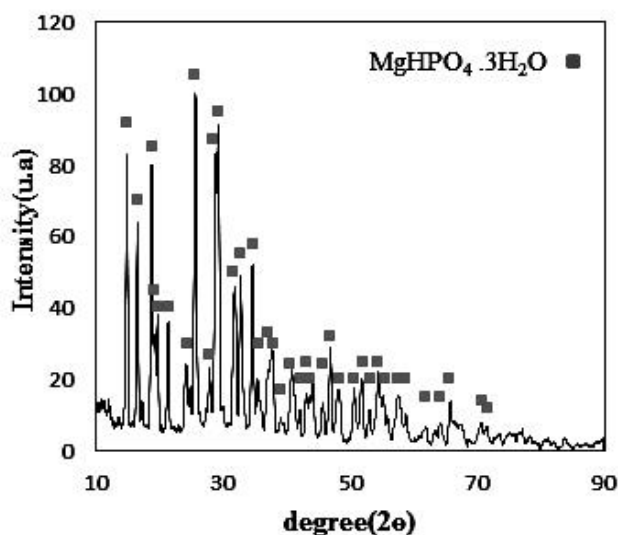
فازهای کریستالی ۳ و ۵ به صورت ترمودینامیکی و شیمیایی در دمای اتاق پایدار بوده و فازهای کریستالی ۲ و ۹ در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی گراد پایدار هستند. مطالعات میکروساختاری سیمان سورل نشان داد که فازهای کریستالی ۳ و ۵ در سیمان به صورت کریستال های سوزنی شکل بوده و کریستال های فاز ۵ در مقایسه با کریستال های فاز ۳، همگن تر، متراکم تر و مستحکم تر هستند. ممکن است محصول واکنشی دیگری نیز در اثر واکنش آب با منیزیم اکسید تشکیل شود، این فاز بروسیت یا منیزیم هیدروکسید Mg(OH)_2 نام دارد. میکرو ساختار بروسیت شامل یه ساختار لایه ای و بشقابی شکل است که یک فاز مناسب برای زمینه سیمان محسوب نمی شود [۵]. یکی از محدودیت های استفاده از سیمان سورل در سیستم های

آبی مقاومت ضعیف این سیمان در برابر آب است. بطوری که فازهای ۳ و ۵ در برابر آب ضعیف و ناپایدار شده و به هیدروکسید منیزیم و یون های کلر و منیزیم تجزیه می شوند. دنگ در سال ۲۰۰۳ اثر فسفات های محلول مانند آمونیم دی هیدروژن فسفات و سدیم دی هیدروژن فسفات را بر روی سیمان سورل بررسی کرد و نتایج تحقیقات نشان داد که استفاده از این ترکیب ها موجب افزایش مقاومت به آب و افزایش استحکام کششی می شود [۶]. کریمی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ تغییر مول مواد اولیه در سیمان سورل را بررسی کردند و نتایج تحقیقات نشان داد با انتخاب ۱/۵ مول کلرید منیزیم، ۱۳ مول اکسید منیزیم، ۱۲ مول آب باعث حذف فاز ۳ و افزایش مقدار فاز ۵ در سیمان سورل می شود که این تغییرات منجر به افزایش استحکام شد [۷]. لی و همکارانش در سال ۲۰۰۳، واکنش پذیری اکسید منیزیم را بر روی سیمان سورل بررسی کردند نتایج تحقیقات نشان داد کاهش اندازه ذرات منیزیت کلسینه، باعث کاهش جذب آب و افزایش استحکام فشاری می شود [۸]. کامپوزیت های زمینه سرامیکی دارای خواص مطلوبی از جمله پایداری دما بالا، مقاومت به شوک حرارتی بالا، مقاومت به خوردگی بالا، سبکی وزن و سختی بالا است. یکی از کاربردهای کامپوزیت سرامیکی استفاده در ابزار سایش و ساینده است. چقرمگی شکست سرامیک ها در مقایسه با مواد دیگر به ویژه فلزات، فوق العاده پایین است. بنابراین نیاز شدیدی به افزایش چقرمگی سرامیک ها احساس می شود. یکی از راه های مهم دستیابی به چقرمگی بالاتر در زمینه سرامیکی، گنجاندن الیاف و ذرات تقویت کننده در زمینه است. این بدان دلیل است که ترکی که در زمینه ایجاد می شود توسط ذرات، رشته ها یا ویسکرها متوقف می شود. نتایج تحقیقات نشان می دهد که استفاده از ذرات ساینده در زمینه سیمانی موجب افزایش مقاومت به سایش فاز سیمانی می شود [۸]. از جمله این ذرات ساینده اکسید سیلیسیم است. اکسید سیلیسیم ترکیبی است غیر فلزی، دارای سختی بالا و در زمینه ساینده کاربرد دارد. سیلیس به عنوان عامل تقویت کننده و

درصدوزنی در آب با ۲۵/۵۴ درصدوزنی حل شد. سپس این دو محلول با هم مخلوط شدند و رسوب سفید رنگی ایجاد شد که آن را روی کاغذ صافی قرار داده و با آب مقطر شستشو داده شد. پودر خشک شده حاصله فسفات منیزیم سه‌آبه نام دارد. شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس از رسوب منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه را نشان داده شده است. پیک‌های فاز منیزیم سه‌آبه همخوانی مناسبی با شماره کارت‌های استاندارد JCPD ۰۷۶۲-۰۱۹-۰۰ دارد.

جدول ۱. درصد تغییرات وزنی مواد اولیه

شماره نمونه	کلرید منیزیم	اکسید منیزیم	آب	منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه
D1	۲۷/۶۵	۵۰/۳۵	۱۹/۵۰	۲/۵
D2	۲۷/۳۵	۴۹/۲۰	۱۸/۴۵	۵
D3	۲۶/۵۰	۴۸/۳۵	۱۷/۶۵	۷/۵
D4	۲۵/۶۸	۴۷/۵۵	۱۶/۷۷	۱۰



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه.

۲-۳ آماده‌سازی کامپوزیت با استفاده از دو پیونددهنده اکسی کلرید منیزیم و منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه با ذرات تقویت کننده نانوسیلیس

زمینه کامپوزیت با کلرید منیزیم شش‌آبه ۲۷/۳۵، اکسید منیزیم ۴۹/۰۲، آب ۱۸/۴۵ و منیزیم فسفات سه‌آبه ۵

پرکننده در صنعت سایش به کار می‌رود، نانو ذرات سیلیس با پخش شدن یکنواخت و پرکردن حفره‌ها در ملات سیمان پرتلند منجر به افزایش دانسیته و کاهش تخلخل شده‌اند در نتیجه استحکام فشاری و خمشی سیمان پرتلند را افزایش داده‌اند [۹-۱۰]. در این پروژة نانو ذرات سیلیس در کنار منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان سورل بکار گرفته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

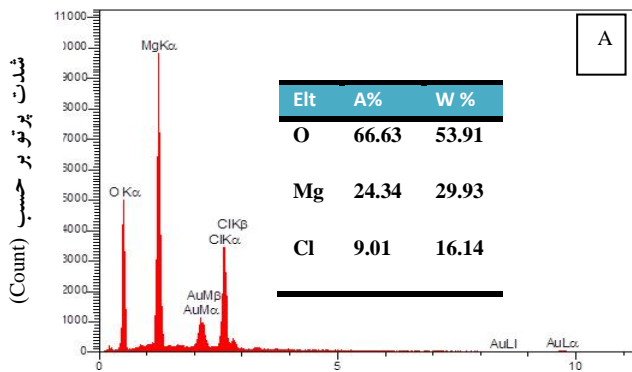
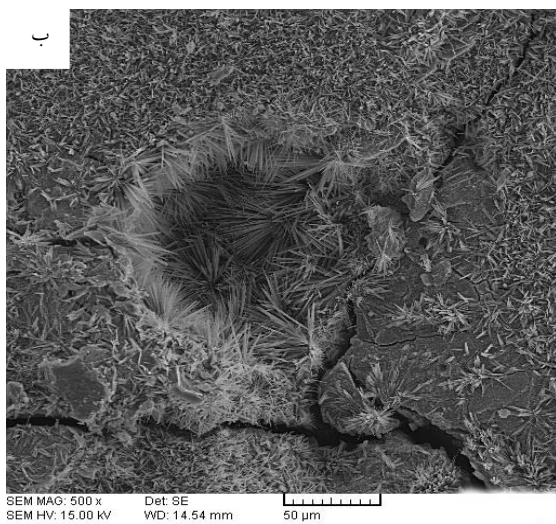
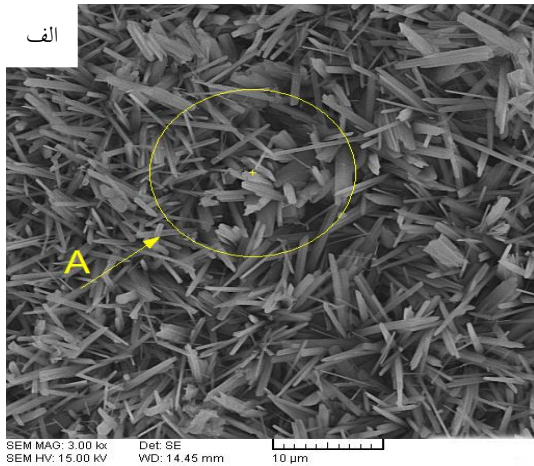
۲-۱- مواد

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل پودر اکسید منیزیم (MgO)، ساخت شرکت منیزیت ایران با میزان خلوص ۹۶٪، نمک کلرید منیزیم ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)، ساخت شرکت Hancheng چین با میزان خلوص ۹۶٪، دی‌پتاسیم فسفات (K_2HPO_4) ساخت شرکت Hancheng چین با میزان خلوص ۹۷٪، نانوسیلیس صنعتی آمورف (SiO_2) ساخت شرکت Hancheng چین با میزان خلوص ۹۹/۹٪ است.

۲-۲ آماده‌سازی زمینه با استفاده از دو پیونددهنده سیمان اکسی کلرید منیزیم و منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه (نمونه‌های سری D)

برای ساخت این زمینه از کلرید منیزیم شش‌آبه ($27/65-50/35$)، اکسید منیزیم ($27/35-49/20$)، آب ($19/50-50/77$) انتخاب شد. سپس فسفات منیزیم سه‌آبه در محدوده ۲/۵ تا ۱۰ درصدوزنی انتخاب شد. در این مرحله کلرید منیزیم و منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه، را به آب اضافه کرده و همزده، سپس اکسید منیزیم به صورت پودر خشک به این محلول اضافه گردید و به مدت زمان ۲۰ دقیقه هم‌زده شد. سپس جرم آماده شده در داخل قالب‌های برنجی به ابعاد $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ریخته‌گری جرمی شد. تغییرات درصدوزنی مواد اولیه در جدول ۱ نشان داده شده است. فسفات منیزیم سه‌آبه از ترکیب شدن کلرید منیزیم شش‌آبه با دی‌پتاسیم هیدروژن فسفات بدست آمد. بدین صورت که ابتدا کلرید منیزیم شش‌آبه با ۳۱/۹۳ درصدوزنی در آب با ۱۵/۳۸ درصدوزنی حل شد، سپس دی‌پتاسیم هیدروژن فسفات با ۲۷/۱۴

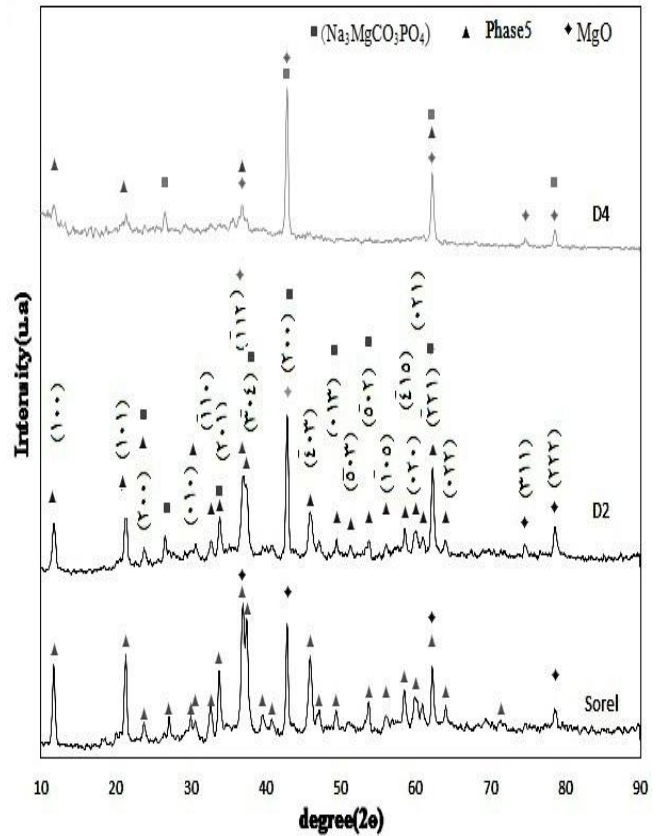
گویای پیک‌های کوچک می‌باشد. در نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در خشک‌کن ترک‌های ریزی ایجاد شد که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده می‌شود.



انرژی، (Kev)

(ج)

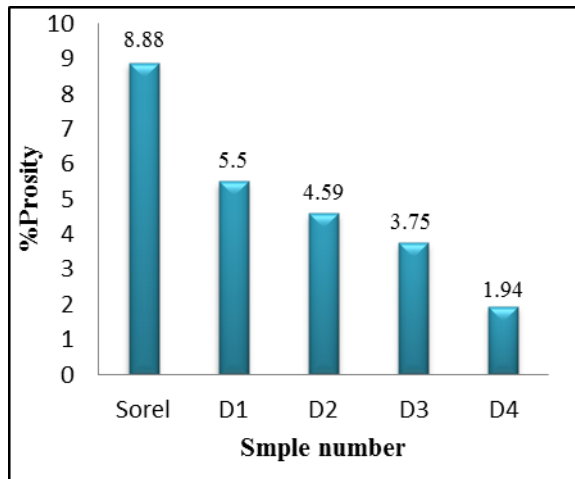
شکل ۳. تصاویر SEM از نمونه D4 (الف، ب)، آنالیز EDX در ناحیه A (ج).



شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه D4، D2 و سیمان سورل.

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه D4

(الف، ب) به همراه نواحی آنالیز عنصری در ناحیه A (ج) نشان داده است. در تصویر (الف) کریستال‌های سوزنی شکل را در نقاط مختلف نشان می‌دهد که این کریستال‌های سوزنی شکل بنا به نتایج بدست آمده از پرتو ایکس و آنالیز عنصری ناحیه A، فاز ۵ می‌باشد. با توجه به تصاویر SEM سطح نمونه D4 از فازهای سوزنی شکل ۵ پوشید شده است در صورتی که در پراش پرتو ایکس فقط در ۴ پیک، فاز ۵ وجود دارد پیک‌های بسیار ضعیف فاز ۵ در دو زاویه $\theta_2 = 11/89^\circ, 21/36^\circ$ وجود دارد و در دو زاویه دیگر $\theta_2 = 36/92^\circ, 62/20^\circ$ با اکسید منیزیم و فاز سدیم منیزیم کربنات فسفات هم‌پوشانی دارد. در زاویه $11/89^\circ$ که پیک مربوط به صفحه (۱۰۰) است و در زاویه $21/36^\circ$ که پیک مربوط به صفحه (۱۰۱) است. نتایج نشان می‌دهد فاز سدیم منیزیم کربنات فسفات، سوزن‌های فاز ۵ را احاطه کرده و اگرچه در SEM زمینه اصلی که سوزن‌های فاز ۵ است دیده می‌شود ولی در XRD عمق نفوذ اشعه فقط



شکل ۵. درصد تخلخل سیمان سورل و نمونه‌های سری D.

با کاهش درصد تخلخل، درصد جذب آب نیز کمتر می‌شود. این مطلب در داده‌های جدول ۳ به خوبی مشهود است. افزایش درصدوزنی منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه در سیمان سورل به طور کلی منجر به کاهش درصد تخلخل شده است. احتمال دارد وجود منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه باعث کاهش ویسکوزیته دوغاب شده و قطعه را متراکم‌تر می‌کند و تخلخل را کاهش می‌دهد البته تغییرات دانسیته حجمی چندان زیاد نیست.

جدول ۳. تغییرات درصد جذب آب و دانسیته حجمی نمونه‌های D و

سیمان سورل.

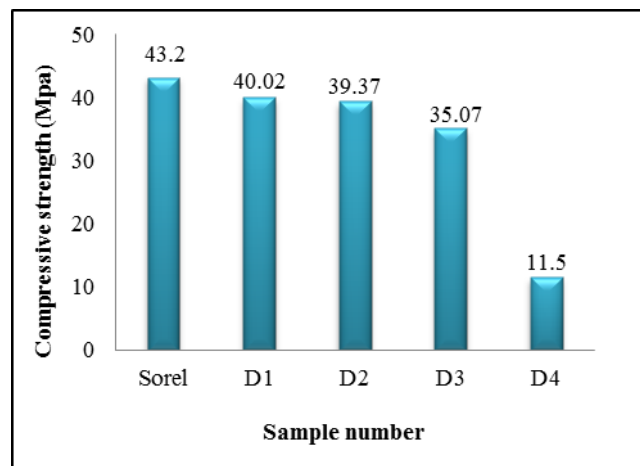
شماره نمونه	Sorel	D1	D2	D3	D4
% جذب آب	۴/۸۷	۴/۸۵	۴/۸۰	۴/۶۲	۲/۸۰
دانسیته حجمی	۱/۸۲	۱/۷۰	۱/۷۲	۱/۸۰	۱/۸۶

در اثر واکنش یون‌های فسفات با یون‌های Mg^{2+} ، فسفات‌های نامحلول تشکیل می‌شود. این فسفات‌های نامحلول سطح ذرات فاز ۵ را می‌پوشاند و تماس بین ساختار داخلی و آب خارج از سیستم را کاهش می‌دهد و باعث بهم چسبیدن کریستال‌ها و متراکم شدن آن‌ها می‌شود. پس نفوذپذیری آب را به داخل

۳-۲- بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های

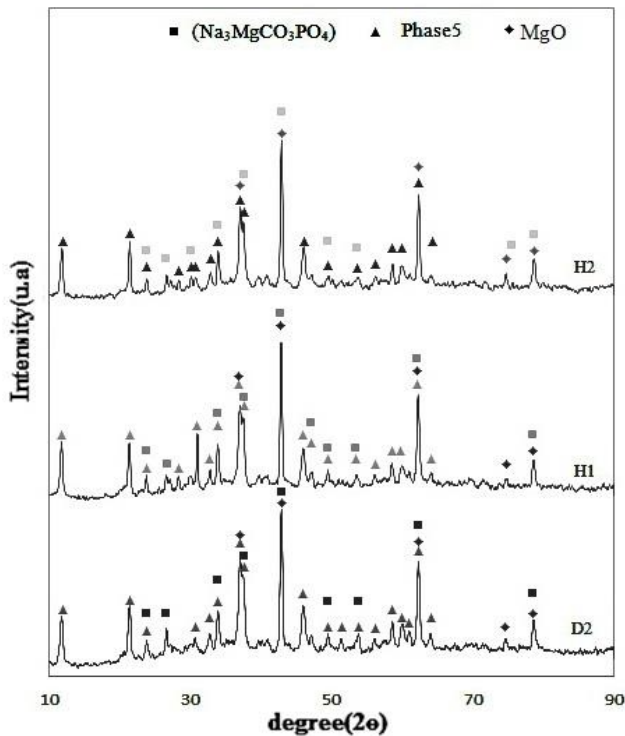
سری E

از نمونه‌های سری D بعد از ۱۴ روز استحکام فشاری گرفته شد. نتایج بدست آمده در نمودار استحکام فشاری شکل ۴ نشان داده شده است. استحکام نمونه‌ها نسبت به سیمان سورل روند کاهشی دارد این بدان علت است که فازهای فسفاتی گروه D، پیوند بین فازهای ۵ و زمینه را کم کرده و فاز ۵ خاصیت تقویت‌کنندگی خود را تا حدودی از دست می‌دهد. این موضوع را می‌توان به کاهش چسبندگی فازهای سوزنی ۵ و زمینه سیمان نسبت به چسبندگی فازهای سوزنی ۵ و فاز فسفاتی دانست.



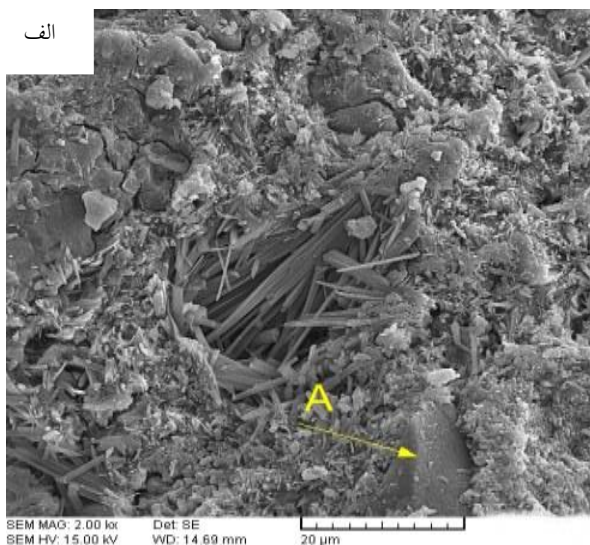
شکل ۴. استحکام فشاری نمونه‌های D و سیمان سورل بعد از گذشت ۱۴ روز.

تغییرات درصد تخلخل سیمان سورل و نمونه‌های سری D در شکل ۵ نشان داده شده است. درصد تخلخل در نمونه‌های سری D نسبت به سیمان سورل کاهش یافته است که این کاهش در اثر افزودن منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه است که با ایجاد فاز سدیم منیزیم کربنات فسفات باعث می‌شود تخلخل‌ها و حفرات پر شوند و درصد تخلخل کاهش یابد.

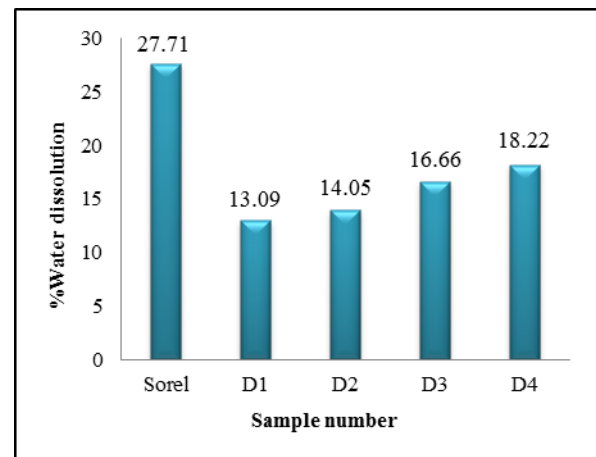


شکل ۷. الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه‌ها H2، H1، D2

شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه H2 (الف، ب) به همراه نواحی آنالیز عنصری با طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس در نواحی A و B (ج، د) نشان داده شده است. حضور عنصر K در آنالیز ناحیه B به دلیل مواد اولیه مانند دی پتاسیم هیدروژن فسفات است که برای تولید رسوب منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه استفاده شد.



سیمان اکسی کلرید منیزیم کاهش می‌دهد. فاز ۵ با یون‌های فسفات بسیار پایدار می‌شود و می‌تواند در آب بدون تغییر باقی بماند [۶]. در شکل ۶، درصد انحلال در آب سیمان سورل و نمونه‌های سری D نشان داده شده است. نمونه‌های سری D نسبت به سیمان سورل انحلال در آب کمتری دارند زیرا سطح خارجی ذرات فاز ۵ با سدیم منیزیم کربنات فسفات پوشیده شده است. در مقادیر زیاد منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه احتمال می‌رود پوسته ایجاد شده اطراف سوزن‌های فاز ۵ ترد و شکننده شود و امکان تماس آب با سطح خارجی ذرات فاز ۵ را فراهم آورد و باعث افزایش انحلال در آب می‌شود.



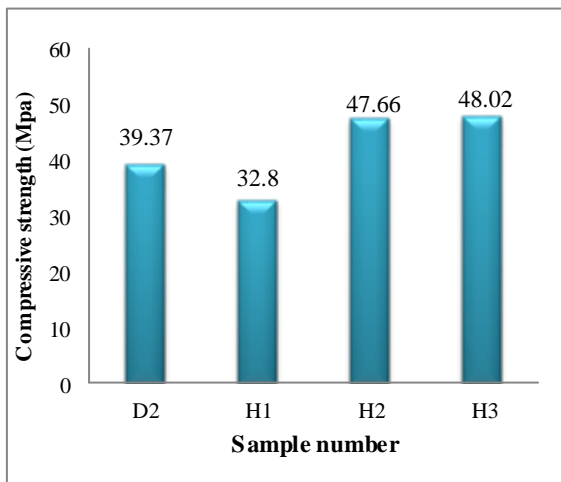
شکل ۶. درصد انحلال در آب نمونه‌های سری D و سیمان سورل.

۳-۳- مطالعه به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی

و الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های سری H و الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه H1 و H2 و D2 در شکل ۷ نشان داده شده است. در هر سه نمونه فاز سدیم منیزیم کربنات فسفات، فاز ۵ و اکسید منیزیم مشاهده می‌شود.

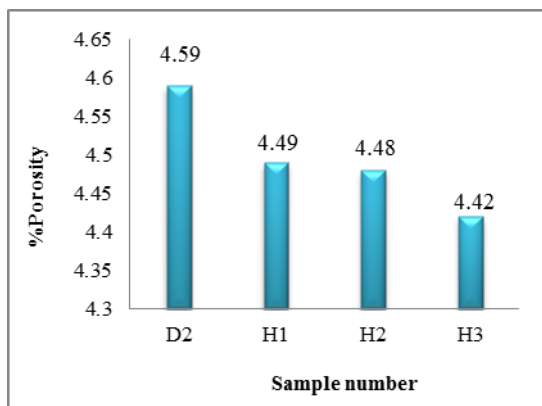
۳-۴- بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های سری H

به منظور بررسی خواص مکانیکی پس از ۱۴ روز، از نمونه‌های سری H استحکام فشاری گرفته شد. نتایج بدست آمده در نمودار استحکام فشاری شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استحکام ترکیب‌های H1 تا H4 با افزودن درصد بیشتری از نانوسیلیس به زمینه نمونه D2 روند افزایشی داشته است.

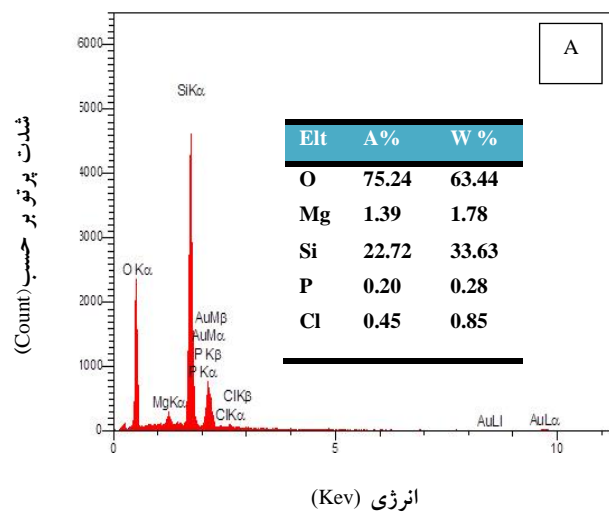
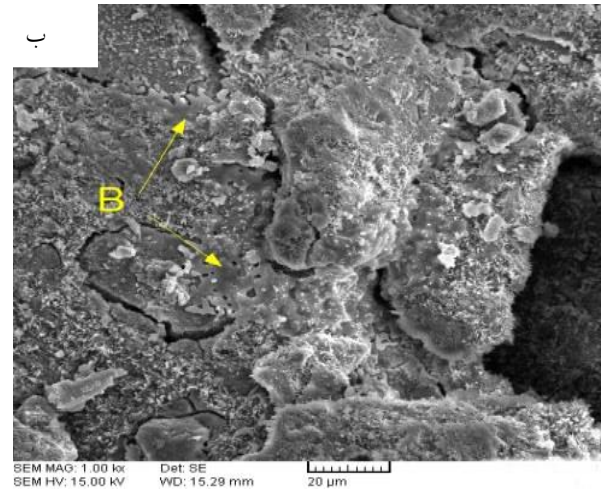


شکل ۸. استحکام فشاری نمونه‌های سری H و نمونه D2 بعد از ۱۴ روز.

تغییرات درصد تخلخل در شکل ۹ نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده افزایش نانو باعث کاهش درصد تخلخل نسبت به نمونه D2 می‌شود. چون نانوسیلیس حفرات موجود در نمونه را پر می‌کند و ظاهراً به صورت پل ارتباطی موثر و دارای چسبندگی بالا با زمینه عمل می‌کند.

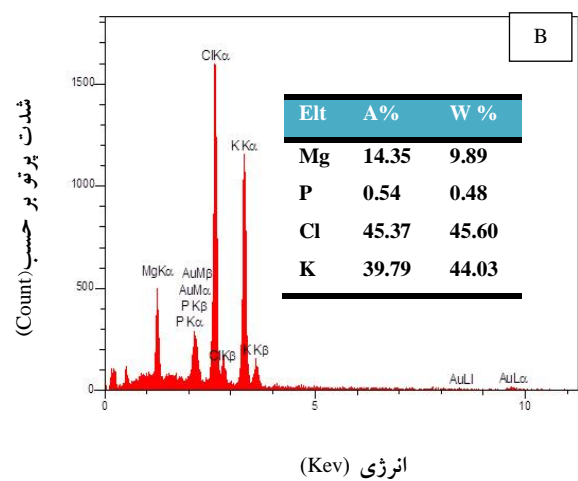


شکل ۹. تغییرات درصد تخلخل نمونه‌های سری H و نمونه D2.



انرژی (Kev)

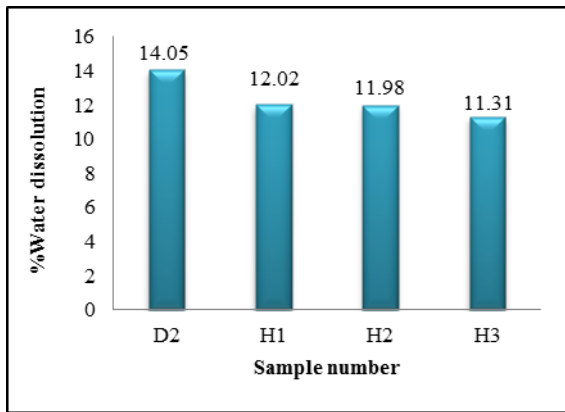
(ج)



انرژی (Kev)

(د)

شکل ۷. تصاویر SEM از نمونه D4 (الف، ب)، آنالیز EDX در ناحیه A.



شکل ۱۰. تغییرات درصد انحلال در آب نمونه‌های سری H و نمونه D2

۴- نتیجه گیری

۱- افزودن منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه، به سیمان سورل باعث بهبود درصد انحلال در آب، تخلخل ظاهری، جذب آب و دانسیته حجمی شده است به نظر می‌رسد فاز سدیم منیزیم کربنات فسفات اطراف فاز ۵ را احاطه می‌کند و مانع از انحلال این فاز در آب می‌گردد ولی چون باعث کاهش اتصال پیوند بین فاز ۵ و زمینه شد و استحکام فشاری کاهش یافت، افزودن آن به سیمان سورل توصیه نمی‌شود.

۲- افزودن نانوسیلیس به سیمان سورل شامل ۵ درصد منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه توصیه می‌شود زیرا باعث افزایش استحکام فشاری و کاهش درصد تخلخل، جذب آب و انحلال در آب شد. درصد انحلال در آب آن حدود ۵۹/۱۸ درصد سیمان سورل است و استفاده آن در صنعت توصیه می‌شود.

مراجع

1. T. Tar, "Analysis of fillers for production of alternative building materials using magnesia cement", Addis ababa university, 2008.
2. Li.G, Yu.Y, Li. J, Wang. Y, Liu. H, "Experimental study on urban refuse / magnesium oxychloride cement compound floor tile", cement and concrete research, Vol. 33, pp. 1663-1668, 2003.
3. Fan.W, Songb.X, Sun. S, Zhao. X, "Hydrothermal formation and characterization of magnesium hydroxide chloride hydrate nanowires", Journal of Crystal Growth, Vol. 305, pp. 167-174, 2007.

درصد جذب آب و دانسیته برای نمونه‌های سری H در جدول ۴ نشان داده شده است. از آنجا که تخلخل با جذب آب رابطه مستقیم دارد پس کاهش تخلخل، باعث کاهش نفوذ پذیری و جذب آب نیز می‌شود. عامل اصلی در تراکم، تخلخل است. پس کاهش تخلخل نسبت به نمونه پایه باعث افزایش دانسیته نسبت به پایه D2 شده است. تراکم نمونه‌ها شامل مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس تقریباً یکسان است.

جدول ۴. تغییرات درصد جذب آب و دانسیته حجمی نمونه‌های سری H و

D2

شماره نمونه	D2	H1	H2	H3
درصد جذب آب	۴/۸۰	۳/۲۲	۳/۰۲	۲/۹۸
دانسیته حجمی	۱/۷۲	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۸۴

علاوه بر فازهای فسفاتی موجود در نمونه D2، نانوسیلیس نقش موثری بر روی کاهش درصد انحلال در آب نسبت به نمونه D2 داشته است. به نظر می‌رسد نانوسیلیس سطح سیمان را پوشانده و باعث تشکیل یک لایه آب‌گریز بر روی سیمان شده و نفوذ رطوبت به داخل ذرات را مشکل می‌کند و باعث پایداری فازهای اصلی سیمان در آب می‌شود. تغییرات درصد انحلال در آب نمونه‌های سری H در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزودن نانوسیلیس به سیمان سورل شامل ۵ درصد منیزیم هیدروژن فسفات سه‌آبه توصیه می‌شود.

4. Misra. A. K and Mathur. R, “ Magnesium Oxychloride Cement concert”, Journal of Material Science ,Vol. 30, pp. 239-246, 2007.
5. Chau.C. K, Li.Z , “Microstructures of magnesium Oxychloride”, Journal of Material Structure, Vol. 41, pp. 853-862, 2008.
6. Deng. D, "The mechanism for soluble phosphate Improve the water resistance of magnesium Oxychloride cement” ,Cement and Concret , Vol.33, pp. 1311-1317, 2003.
7. Karimi. Y, Monshi. A, “Effect of magnesium chloride concentrations on the properties of magnesium oxychloride cement for nano SiC composites purposes”, Ceramics international, Vol. 37, pp. 2405-2410, 2011.

۸. ف. ماتیسوس، "علم و مهندسی کامپوزیت"، ترجمه شکوه فر، سیزه‌وار اردکانی، انتشارات فردوسی مشهد، ۱۳۸۴.

9. M.Aiu , “The chemistry and physics of nano-cement”, NSF- REU University of Delaware, 2006.
10. Liu. Y, Kontopoulou. M, “The structure and physical properties of polypropylene thermoplastic olefin nano composites containing nanosilica”, Vol.47, pp.7731-7739, 2006.

۱۰. ا. منشی، سرامیک‌ها و مواد نسوز، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ سوم، ۱۳۷۵.