بررسی اثر نوع مواد اولیه بر فازهای تشکیل شده در سیمان‌های آلومینایی حاوی اسپینل

محمدرضا پویامهر[1*]، علی نعمتی[2] و رحیم نقی زاده[3]

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران

*m_pouyamehr@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۷)

چکیده

در این تحقیق تاثیر نوع دولومیت و مقدار Al_2O_3 بر روی فازهای تشکیل شده در سیمان آلومینایی حاوی اسپینل مورد بررسی قرارگرفته است. برای این منظور از دولومیت خام و کلسینه شده به همراه آلومینای کلسینه شده با نسبت‌های مختلف برای فرآوری سیمان استفاده گردید. ترکیبات مختلف در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از روش سینترینگ واکنشی، فرآوری شدند و سپس به کمک پراش پرتو ایکس آنالیز فازی ترکیبات مشخص گردید. همچنین بررسی‌های ریزساختاری نیز به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج نشان داد که مواد اولیه مورد استفاده تاثیر زیادی بر روی نوع و مقدار فازهای تشکیل شده در ترکیب سیمان دارد. مستقل از نوع دولومیت مورد استفاده، ترکیب سیمان حاصل شامل فاز اسپینل به همراه فازهای CA و CA_2 می‌باشد. با افزایش مقدار Al_2O_3 و در نتیجه کاهش مقدار CaO در ترکیب مواد اولیه از مقدار فاز CA در ترکیب سیمان کاسته و به مقدار فاز CA_2 افزوده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از دولومیت کلسینه شده باعث تشکیل فاز $C_{12}A_7$ در ترکیب سیمان می‌گردد.

واژه‌های کلیدی:

سیمان آلومینایی، اسپینل، دولومیت، CA، $C_{12}A_7$

۱- مقدمه

سیمان آلومینات کلسیم معمول‌ترین سیستم اتصال هیدرولیکی است که در دیرگدازهای ریختنی استفاده می‌شود. مقدار سیمان مورد استفاده بر حسب ترکیب دیرگداز ریختنی می‌تواند از مقادیر خیلی کم تا ۱۰ درصد تغییر کند. به هرحال وجود CaO در ترکیب سیمان می‌تواند دیرگدازی ترکیب دیرگداز ریختنی را کاهش دهد به ویژه در سیستم‌هایی که حاوی میکروسیلیس هستند [۱ و ۴]. اخیراً سیمان‌های آلومینایی جدیدی ساخته و به صنعت معرفی شده است که دیرگدازی بالایی از خود نشان می‌دهند. نتایج نشان داده است در صورتی که مقداری از اکسید کلسیم در کلینکر سیمان با اکسید منیزیم جایگزین شود دیرگدازی سیمان‌های آلومینایی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. این نوع از سیمان‌ها که حاوی ۶ تا ۱۳ درصد اکسید

Archive of SID

www.SID.ir

منیـزیم هـستند بـه سـیمان‌هـای اسـپینلی معروفنـد. اسـپینل در سیمان‌هـای اسـپینلی از لحـاظ هیـدرولیکی فـازی خنثـی اسـت و نمی‌تواند به عنوان سیستم اتصال عمل کند. با این وجود این نـوع سیمان‌ها استحکام مناسبی در دمای بالا از خود نشان می‌دهنـد. از طرف دیگر وجود اسپینل در ترکیب سیمان سبب مـی‌شـود کـه دمای کاربرد دیرگـدازهای ریختنـی‌هـا بـا اگریگیـت مناسـب تـا بالاتر از ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد و مقاومت در برابـر خـوردگی سـرباره نیـز بـه میـزان قابـل تـوجهی بهبـود پیـدا کنـد [۵ و ۷]. در حال حاضر قیمـت بـالای اسـپینل‌هـای سـینتر شـده و ذوبی و سیمان دیرگداز آلومینـا بـالا مـانعی بـر سـر راه توسـعه و اسـتفاده از دیرگـدازهای ریختنـی حـاوی اسـپینل هماننـد آلومینا – اسپینلی محسوب می‌شود. امروزه استفاده از سیمان‌هـای حاوی اسپینل که از مواد اولیه ارزان قیمتـی هماننـد دولومیـت در ساخت آنها استفاده می‌شـود یـک راه حـل بـسیار مناسـبی بـرای کـاهش قیمـت و در نتیجـه توسـعه دیرگـدازهای ریختنـی آلومینا – اسپینلی در دنیا فراهم نموده است [۶ و ۷].

اولـین بـار N. M. A. Khalil و همکـارانش [۶] در سـال ۲۰۰۱ مـیلادی سـیمان دیرگـداز حـاوی اسـپینل تهیـه‌کردنـد کـه بـرای ساخت این نوع سیمان، سینترینگ مخلـوط مناسـبی از دولومیـت خام (به عنـوان منبعـی بـرای اکـسید کلـسیم و اکـسید منیـزیم) و اکسید آلومینوم استفاده شد. نتایج نشان داد که مهمترین فازهـای تـشکیل‌دهنـده سـیمان‌هـای آلومینـایی حـاوی اسـپینل شـامل CA_2 , CA و اسپینل می‌باشد. با توجه به تـاثیر مثبـت اسـپینل بـر افـزایش دیرگـدازی و مقاومـت بـه خـوردگی سـرباره در دیرگدازهای ریختنی تاثیر میزان آن بر خواص مختلف ایـن نـوع سیمان‌ها نیز توسط این محققین مورد بررسی قرار گرفـت. نتـایج نـشان داد کـه بـا اسـتفاده از ۴۰٪ اسـپینل در ترکیـب سـیمان هـم استحکام فشاری مناسب و هم دیرگدازی بالا در ترکیـب سـیمان حاصـل مـی‌شـود. A. H. De Aza و همکـارانش [۵] نیـز بـه بررسی‌های دقیق‌تر واکنش‌ها میان دولومیت و آلومینا پرداختند و مشاهده کردند که تا دمای ۱۲۵۰ درجه سـانتی‌گـراد واکـنش‌هـا کامل می‌شود و پس از آن فرایند سینترینگ شروع می‌شود. طـی بررسی‌های انجـام شـده مـشخص گردیـده اسـت کـه اسـتفاده از سـیمان‌هـای آلومینـایی حـاوی اسـپینل منجـر بـه افـزایش قابـل ملاحظه‌ای در زمان عمر دیرگدازهای ریختنی مـورد اسـتفاده در صنایع حرارتی مختلف می‌گردد [۸ و ۱۰]. اثـر پلـی‌مـورف‌هـای مختلف آلومینا به عنوان یکی از مواد اولیه مـورد مـصرف نیـز در تحقیقـات انجـام شـده توسـط A. E. Lavat و همکـارانش [۷] بررسی شده است. اما اثر نوع دولومیت و مقـدار آلومینـا تـاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله اثـر نـوع مـواد اولیـه همانند نوع دولومیـت کلـسینه نـشده و کلـسینه شـده (دولومـا) و مقدار آلومینای کلسینه شده بر روی ترکیب فازی سیمان حاصـل مورد تحقیق قرار گرفته است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مواد اولیه مصرفی.

اکسید	ماده اولیه		
	دولومیت خام	دولومیت کلسینه شده	آلومینای کلسینه شده
SiO_2	۰/۵۱	۰/۶۶	۰/۰۲
Fe_2O_3	۰/۲۷	۰/۸۴	۰/۰۲
Al_2O_3	۰/۵۴	۰/۲۶	۹۹/۶۰
CaO	۳۱/۳۲	۶۰/۰۲	–
MgO	۲۰/۱۶	۳۷/۸۶	–
Na_2O	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۵
L.O.I	۴۶/۸۲	–	۰/۱۱

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۲): ویژگی‌های مواد اولیه مصرفی.

ویژگی‌ها	ماده اولیه		
	آلومینای کلسینه شده	دولومیت کلسینه شده	دولومیت خام
چگالی (g/cm^3)	۳/۹۲	۳/۳۴	۲/۸۴
متوسط اندازه ذرات (μm)	۴	۳/۷	۳/۲
سطح ویژه (m^2/g)	۱	۲/۸	۳/۱

جدول (۳): ترکیبات مورد استفاده برای سنتز سیمان آلومینایی حاوی اسپینل.

کد نمونه	ماده اولیه (درصد وزنی)		
	دولومیت خام	دولومیت کلسینه شده	آلومینای کلسینه شده
C1	۵۵	–	۴۵
C2	۵۰	–	۵۰
C3	۴۵	–	۵۵
C4	۴۰	–	۶۰
C5	–	۵۰	۵۰
C6	–	۴۵	۵۵
C7	–	۴۰	۶۰
C8	–	۳۵	۶۵
C9	–	۳۰	۷۰

۲- مواد و روش تحقیق

دولومیت خام با خلوص بالا (معادن شهرضا)، دولومیت کلسینه شده و آلومینای کلسینه شده برای ساخت سیمان آلومینایی حاوی اسپینل مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی مواد اولیه مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است. دولومیت کلسینه شده از طریق کلسیناسیون دولومیت خام در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت به دست آمد. خردایش دولومیت خام و کلسینه شده توسط آسیاب گلوله‌ای انجام شد تا ذرات آنها به اندازه مناسب تبدیل شوند. آلومینای کلسینه شده محصول شرکت فیبرونا است که ویژگی‌ها و خصوصیات مواد اولیه مصرفی در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین فرمولاسیون و ترکیبات مورد استفاده در ساخت سیمان آلومینایی حاوی اسپینل و بررسی اثر مقدار Al_2O_3 در جدول (۳) آمده است. پس از توزین دقیق مواد اولیه مورد نیاز برای هر ترکیب (طبق جدول ۲) مخلوط مواد توسط آسیاب گلوله‌ای به صورت خشک، آسیاب شد. پس از آسیاب، مخلوط حاصل توسط پرس با فشار ۸۰۰ kg/cm^2 به صورت قرص، شکل داده شد. قرص‌های حاصل در ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس در کوره الکتریکی با دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت سینتر شد. بررسی‌های آنالیز فازی توسط دستگاه D8ADVANCE, Bruker (XRD) و ریزساختاری توسط دستگاه Jeol, JSM 5410 LV(SEM) مجهز به دستگاه آنالیز EDX بر روی نمونه‌های سینتر شده انجام شد. در این ارتباط از آنالیز فازی به صورت نیمه کمی جهت تعیین مقدار وزنی فازها استفاده شد و بررسی‌های ریزساختاری نیز بر روی سطح شکست نمونه‌های سینتر شده صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های آنالیز فازی

نتایج آنالیز فازی مربوط به نمونه‌های سیمان فرآوری شده با استفاده از دولومیت خام پس از سینترینگ در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به این نتایج فاز $CaO.Al_2O_3$ (CA)

Archive of SID

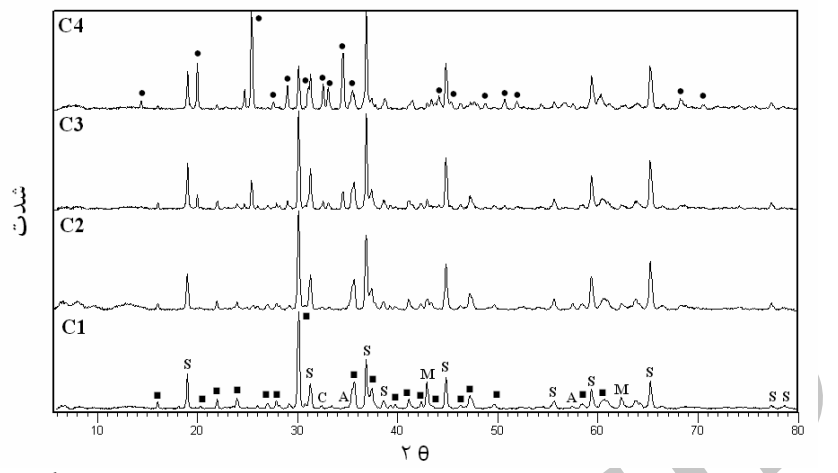
www.SID.ir

علاوه بر اسپینل در همه ترکیبات شناسایی شده است. همچنین مقداری از مواد اولیه به صورت MgO و CaO ناشی از تجزیه دولومیت به همراه Al_2O_3 نیز دیده می‌شود. به طورکلی دولومیت خام با افزایش دما به CaO و MgO تجزیه می‌شود. سپس این اکسیدها با Al_2O_3 واکنش می‌کنند که منجر به تشکیل CA و اسپینل می‌گردد. همانطوری‌که در نتایج دیده می‌شود فاز $CaO.2Al_2O_3$ (CA_2) در نمونه‌های C_2-C_4 تشکیل شده است که بیشترین مقدار آن در نمونه C_4 دیده می‌شود. از طرف دیگر نمونه C_4 بیشترین مقدار Al_2O_3 را در ترکیب خود دارد.

مقدار و نسبت وزنی فازهای مختلف در ترکیبات سیمان‌های حاصل توسط آنالیز کمی تعیین شد که نتایج آن به صورت تابعی از میزان Al_2O_3 موجود در ترکیب مواد اولیه در شکل (۲) ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار فاز CA در ترکیب سیمان با افزایش میزان Al_2O_3 کاهش می‌یابد. از طرف دیگر مقدار فاز CA_2 با اضافه شدن Al_2O_3 زیاد می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار فازهای تشکیل شده به مقدار Al_2O_3 در ترکیب مواد اولیه بستگی دارد. CA مهمترین فاز سیمان‌های آلومینایی است و نقطه ذوب نسبتا بالایی (۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) دارد. همچنین این فاز نقش مهمی را در توسعه استحکام سیمان دارد. در دمای ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد CA با Al_2O_3 واکنش می‌کند و باعث تشکیل فاز CA_2 می‌گردد. بنابراین فاز CA پس از واکنش با Al_2O_3 به فاز CA_2 تبدیل شده و از مقدارش کاسته می‌شود. از طرف دیگر CA_2 فاز ثانویه در ترکیب سیمان آلومینایی محسوب می شود و دیرگدازتر از CA است. اما زمان بیشتری برای گیرش کامل نیاز دارد. استحکام آن نیز پس از سه روز قابل مقایسه با CA می‌باشد. محققان نشان داده اند که فعالیت هیدرولیکی سیمان حاصل بستگی به نسبت CA/CA_2 و همچنین به $CA/C_{12}A_7$ دارد. فعالیت هیدرولیکی سیمان آلومینایی همچنین توسط اندازه ذرات سیمان و افزودنی‌ها تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۸ و ۱۰]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خواص سیمان‌های آلومینایی همانند زمان گیرش و استحکام بستگی به مقدار Al_2O_3 در ترکیب مواد اولیه دارد. نتایج آنالیز فازی سیمان‌های فرآوری شده با استفاده از دولومیت کلسینه شده پس از سینترینگ در شکل (۳) ارایه شده است. در همه ترکیبات پس از پخت، فازهای CA, CA_2, $12CaO.7Al_2O_3$ ($C_{12}A_7$) و اسپینل تشکیل شده‌اند. همچنین مقدار قابل توجهی از مواد اولیه همانند MgO, Al_2O_3 و مقداری نیز CaO در ترکیب سیمان وجود دارد و در واکنش‌ها شرکت نکرده‌اند. به طورکلی با افزایش دما، MgO و CaO موجود در دولوما با Al_2O_3 واکنش می‌کند که منجر به تشکیل فازهای مذکور می‌گردد. مقایسه بین شکل‌های (۱) و (۳) نشان می‌دهد که فاز $C_{12}A_7$ (ماینیت) در ترکیب سیمان‌های فرآوری شده با استفاده از دولومیت کلسینه شده به وجود می‌آید. بنابراین با توجه به نتایج شکل‌های مذکور، کلسیناسیون دولومیت می‌تواند تاثیر زیادی بر روی نوع و مقدار فازهای تشکیل شده در ترکیب سیمان داشته باشد. مقدار فازهای تشکیل شده پس از سینترینگ در ترکیبات سیمان توسط آنالیز کمی مشخص شدند. نتایج این اندازه‌گیری‌ها به عنوان تابعی از مقدار Al_2O_3 استفاده شده در ترکیب مواد اولیه در شکل (۴) ارایه شده است. تغییر در میزان فازهای تشکیل شده در شکل (۴) بسیار مشابه با شکل (۲) می‌باشد. بنابراین مقدار فازهای تشکیل شده در اینجا نیز به مقدار Al_2O_3 بستگی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار فازهای CA و $C_{12}A_7$ در ترکیب سیمان با افزایش مقدار Al_2O_3، کاهش می‌یابند درصورتی‌که مقدار فاز CA_2 افزایش می‌یابد. با استفاده از دولومیت کلسینه شده برای تولید سیمان فاز $C_{12}A_7$ در دماهای پایین می‌تواند به دلیل فعالیت شیمیایی بالای CaO در دولوما تشکیل گردد. به طور کلی $C_{12}A_7$ سرعت گیرش بالا و نقطه ذوب نسبتا پایین (۱۴۹۵-۱۴۱۵ درجه سانتی‌گراد) دارد و با افزایش دما می‌تواند به فاز CA طبق واکنش $C_{12}A_7 + 5A \rightarrow 12CA$ تبدیل شود. از طرف دیگر فاز CA نیز به تدریج با Al_2O_3 واکنش می‌کند و باعث تشکیل CA_2 می‌گردد. فاز $C_{12}A_7$ پایین‌ترین نقطه ذوب را در بین فازهای موجود در ترکیب سیمان داراست [۸ و ۱۰]. بنابراین وجود این فاز می‌تواند دیرگدازی ترکیب سیمان را کاهش دهد.

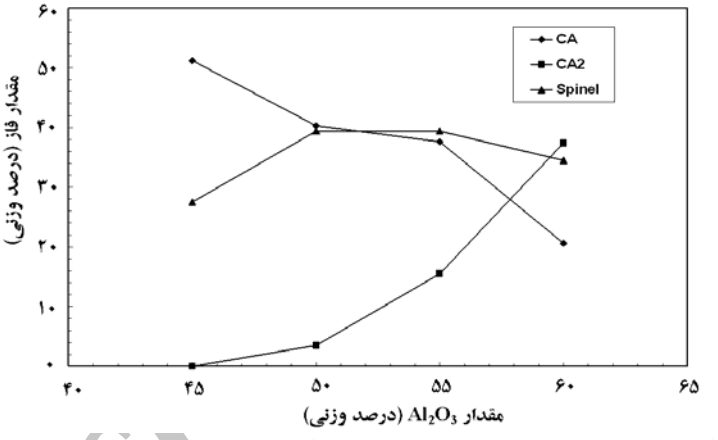
Archive of SID

www.SID.ir

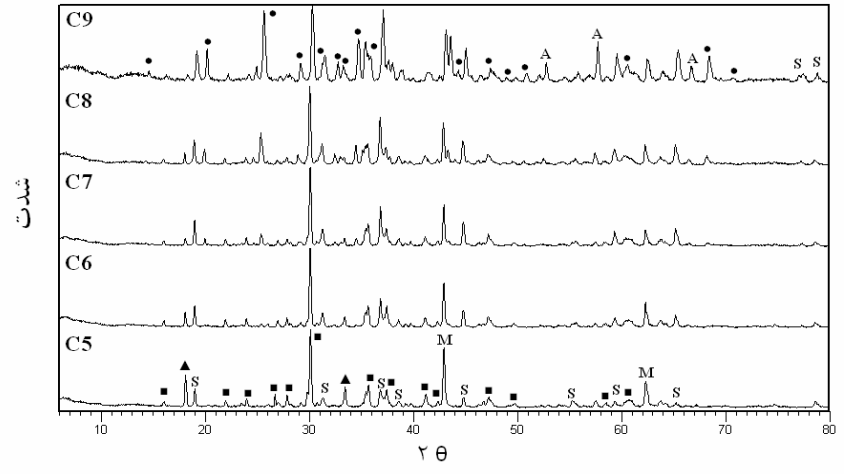


شکل (۱) : نتایج آنالیز فازی سیمان‌های فرآوری شده با استفاده از دولومیت خام پس از سینترینگ

■: CA, ●: CA_2, S: Spinel, M: MgO, A: Al_2O_3, C:CaO.



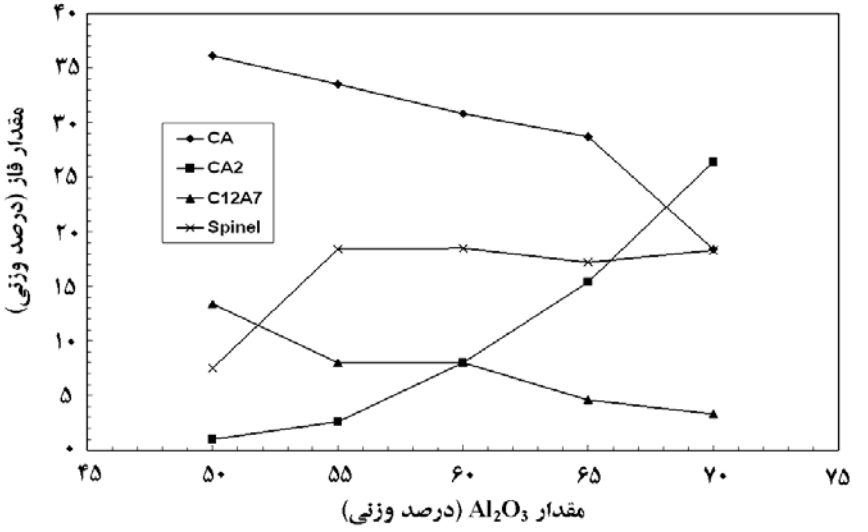
شکل (۲): تاثیر میزان Al_2O_3 بر روی میزان فازهای تشکیل شده در سیمان آلومینایی فرآوری شده با استفاده از دولومیت خام.



شکل (۳): نتایج آنالیز فازی سیمان‌های فرآوری شده با استفاده از دولومیت کلسینه شده پس از سینترینگ

■: CA, ●: CA_2, ▲: $C_{12}A_7$, S: Spinel, M: MgO, A: Al_2O_3

www.SID.ir

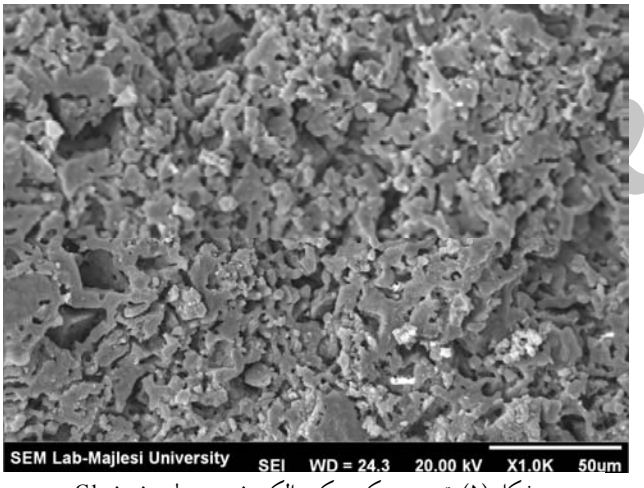


شکل (۴): تاثیر میزان Al_2O_3 بر میزان فازهای تشکیل شده در سیمان آلومینایی فرآوری شده با استفاده از دولومیت کلسینه شده.

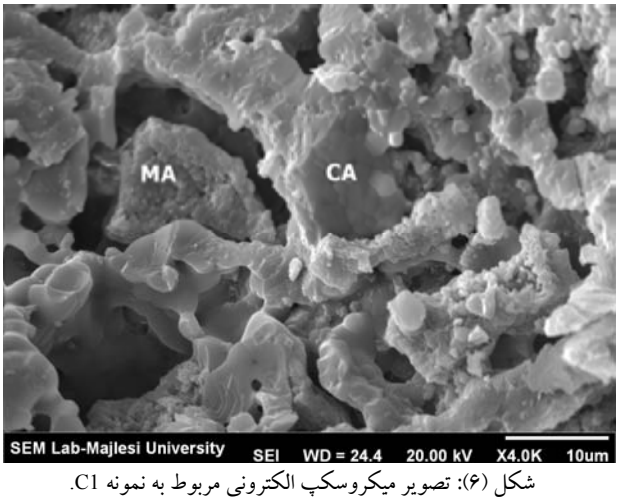
۲-۳- بررسی‌های ریزساختاری

در شکل‌های (۵) و (۶) تصاویر مربوط به ریزساختار نمونه C1 حاوی دولومیت خام و کلسینه نشده پس از سینترینگ ارایه شده است.

با توجه به تصاویر ارایه شده مشخص می‌شود که نمونه C1 پس از سینترینگ به صورت بدنه‌ای متخلخل و متشکل از دانه‌هایی با اندازه‌های مختلف و حاوی فازهای کریستالی مختلف می‌باشد. تخلخل‌های موجود در ساختار این بدنه می‌تواند از طریق تجزیه حرارتی دولومیت خام مورد استفاده در ترکیب سیمان ایجاد شده باشد. طبق نتایج آنالیز فازی شکل (۱) فازهای موجود در ترکیب نمونه پس از سینترینگ شامل CA و اسپینل می‌باشد که به واسطه سینترینگ، ذرات آنها به یکدیگر سینتر شده‌اند. فاز CA به صورت ذرات تقریبا کروی شکل و فاز اسپینل تشکیل شده در ساختار نیز به صورت خوشه‌ای از کریستال‌های مکعبی شکل اسپینل دیده می‌شود. در شکل (۷) تصویر میکروسکپی از این خوشه‌های کریستالی مکعبی شکل مشاهده می‌گردد که در شکل (۸) نیز آنالیز EDX این کریستال‌ها ارایه شده است. آنالیز EDX ارایه شده تایید کننده این امر است که این کریستال‌ها فاز اسپینل می‌باشد.

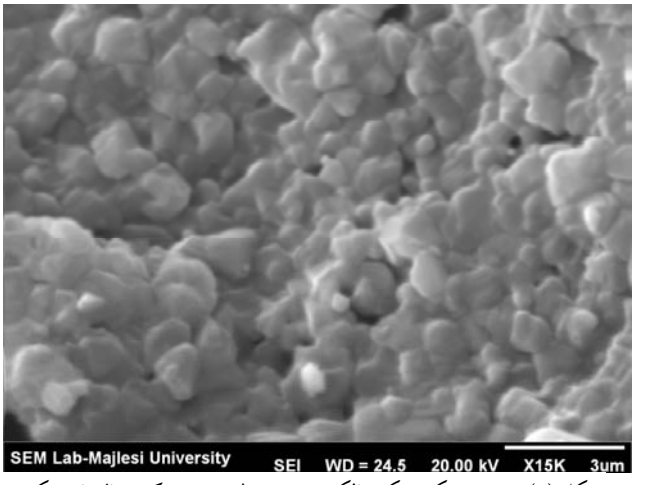


شکل (۵): تصویر میکروسکپ الکترونی مربوط به نمونه C1.

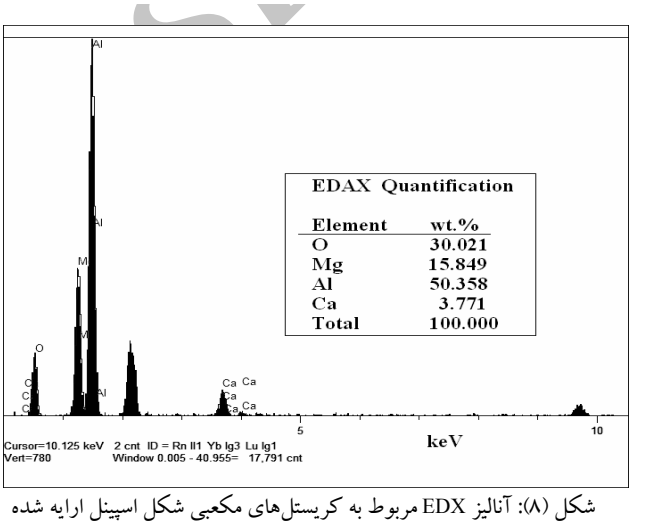


شکل (۶): تصویر میکروسکپ الکترونی مربوط به نمونه C1.

www.SID.ir

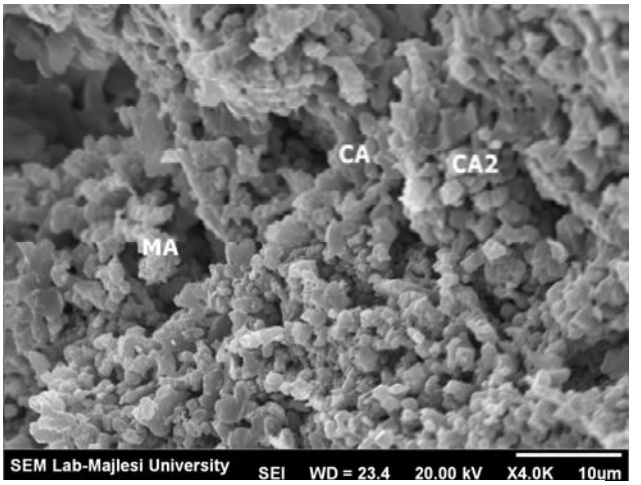


شکل (۷): تصویر میکروسکپ الکترونی مربوط به تجمع کریستال‌های مکعبی شکل در نمونه C1.

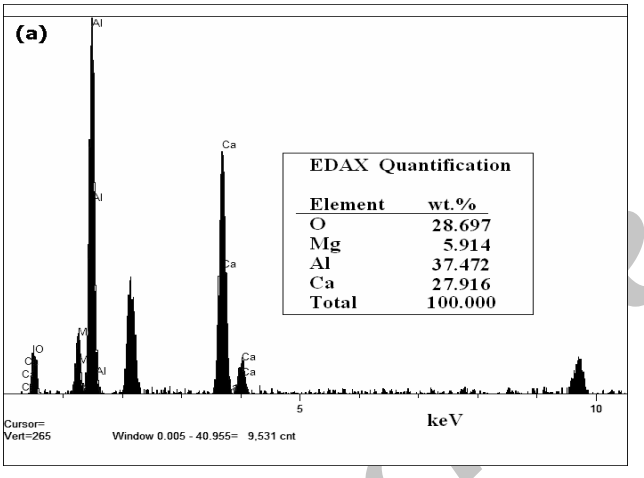


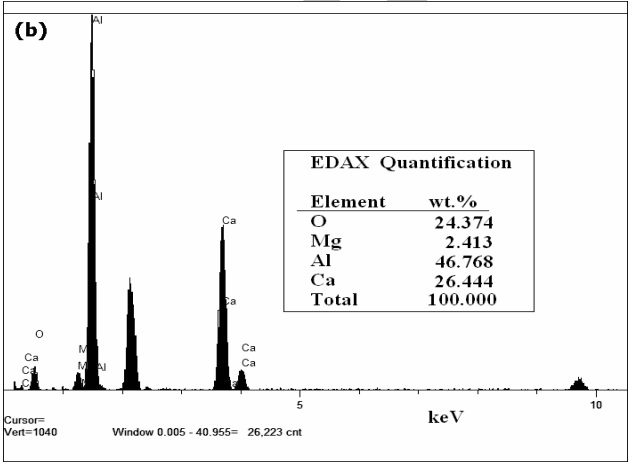
شکل (۸): آنالیز EDX مربوط به کریستال‌های مکعبی شکل اسپینل ارایه شده در شکل(۷).

شکل (۹): تصویر میکروسکپ الکترونی مربوط به نمونه C3



شکل (۱۰): تصویر میکروسکپ الکترونی مربوط به نمونه C3





شکل (۱۱): آنالیز EDX مربوط به فازهای CA شکل (a) و CA2 شکل (b)

www.SID.ir

تصاویر مربوط به ریزساختار نمونه C3 پس از سینترینگ در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارایه شده است.

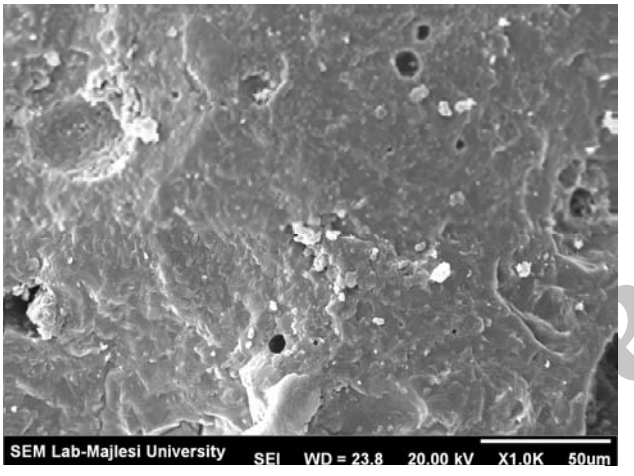
نمونه C3 مقدار دولومیت کلسینه نشده کمتری نسبت به نمونه C1 دارد. بنابراین با توجه به تصاویر ارایه شده مشخص می‌شود که مقدار تخلخل کمتری ناشی از تجزیه حرارتی دولومیت در نمونه C3 ایجاد شده است. بر طبق نتایج آنالیز فازی ارایه شده در شکل (۱) فازهای کریستالی موجود در ترکیب شامل CA_2, CA و اسپینل می‌باشد. شکل کریستال‌های CA_2 بسیار مشابه CA می‌باشد و هر دو تقریبا کروی شکل می‌باشند و کنتراست یکسانی دارند. بنابراین تشخیص و تفکیک این دو فاز در ساختار از یکدیگر مشکل می‌باشد و برای این منظور بایستی از آنالیز EDX استفاده گردد. نتایج مربوط به آنالیز EDX در شکل (۱۱) ارایه شده است.

تصاویر مربوط به ریزساختار نمونه C5 حاوی دولومیت کلسینه شده پس از سینترینگ در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) ارایه شده است.

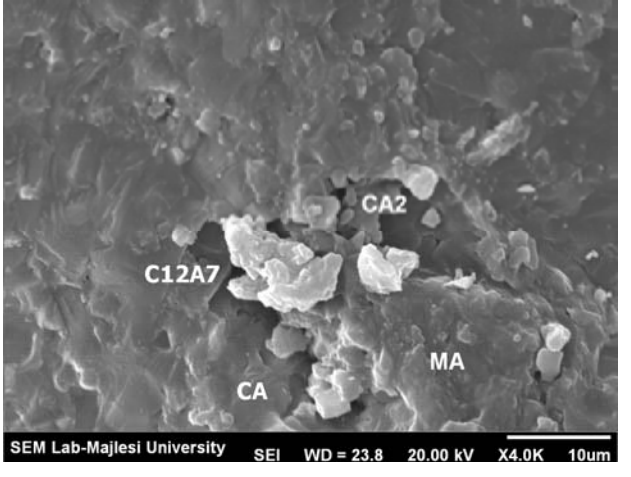
بررسی ریزساختار نمونه C5 حاکی از وجود تخلخل بسیار کم در این نمونه است. همچنین ساختار کریستالی متراکمی در این نمونه به وجود آمده است. با توجه به نتایج آنالیز فازی ارایه شده در شکل (۳) در ترکیب نمونه پس از سینترینگ فازهای کریستالی $C_{12}A_7$, CA_2, CA و اسپینل تشکیل شده است. بررسی سطح شکست این نمونه تشکیل فاز $C_{12}A_7$ را به صورت شبه آمورف نشان می‌دهد که در شکل (۱۴) آنالیز EDX مربوط به این فاز ارایه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق تاثیر زیاد نوع دولومیت و مقدار Al_2O_3 را بر روی ترکیب فازی سیمان‌های آلومینایی حاوی اسپینل نشان داد. همچنین نتایج دلالت بر این دارد که ترکیب مینرالی این نوع سیمان‌ها شامل فازهای اسپینل CA و همچنین CA_2 است که مقدار آنها بستگی به مقدار Al_2O_3 به کار رفته در ترکیب مواد اولیه دارد. همچنین مقدار فاز CA با افزایش مقدار Al_2O_3 کاهش می‌یابد درصورتی‌که مقدار فاز CA_2 افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که فاز $C_{12}A_7$ در ترکیب سیمان حاوی دولومیت کلسینه شده در ترکیب مواد اولیه تشکیل می‌شود. بنابراین کلسیناسیون دولومیت تاثیر زیادی بر روی نوع و مقدار فازهای تشکیل شده در ترکیب این نوع سیمان‌ها دارد. با توجه به تاثیر زیاد فازهای تشکیل شده روی خواص، افزودن Al_2O_3 و همچنین کلسیناسیون دولومیت می‌تواند خواص و ویژگی‌های این نوع سیمان‌ها را تغییر دهد.



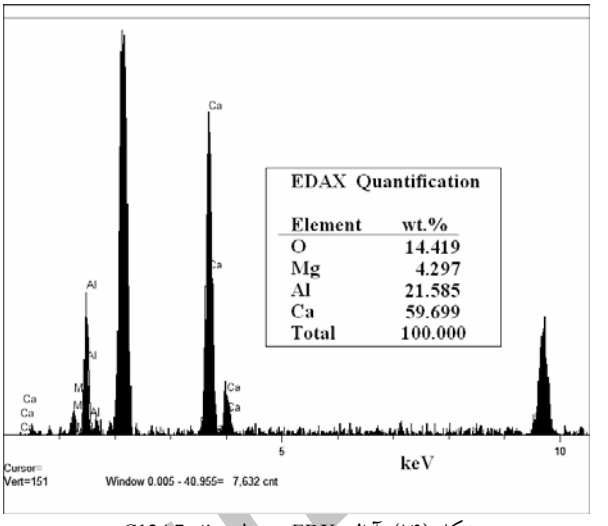
شکل (۱۲): تصویر میکروسکپ الکترونی مربوط به نمونه C5.



شکل (۱۳): تصویر میکروسکپ الکترونی مربوط به نمونه C5.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۱۴): آنالیز EDX مربوط به فاز C12A7.

۵- مراجع

[1] M. V. Gerotto, A. R. Studart, R. G. Pileggi and V. C. Pandolfelli, "Zero-Cement High-Alumina Castable", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 79, pp. 75-83, 2000.

[2] S. Mukhopadhyay, P. Pai and B. Nag, "Influence of Gel-derived Nanocrystalline Spinel In A High Alumina Castable", Ceram. Int., Vol. 33, pp. 175-186. 2007.

[3] S. H.Badiee and S.Otroj, "Non-cement Refractory Castables Containing Nano-Silica: Performance, Microstructure, Properties", Ceramics – Silikáty., Vol. 53, pp. 1-4. 2009.

[4] I. R. Oliveira, A. R. Studart and V. C. Pandolfelli, "Zero-cement Refractory Castables", Am. Ceram. Soc. Bull, Vol. 81, pp. 27-34, 2002.

[5] A. H. De Aza, P. Pena, M. A. Rodriguez, R. Torrecillas and S. De Aza, "New Spinel-containing Refractory Cements" ,Journal of the European Ceramic Society, Vol. 23, pp. 737–744, 2003.

[6] N. M. A. Khalil, S. A. S. El-Hemaly and L. G. Girgis, "Aluminous Cements Containing Magnesium Aluminate Spinel from Egyptian Dolomite", Ceramics International., Vol. 27, pp. 865-873, 2001.

[7] A. E. Lavat, M. C. Grasselli and E. G. Lovecchio, "Effect of α and γ Polymorphs of Alumina on the Preparation of MgAl2O4-spinel-containing Refractory Cements", Ceramics International, Vol. 36, pp. 15-21, 2010.

[8] L. A. Díaz and R. Torrecillas, "Hot Bending Strength and Creep Behavior at 1000–1400 ◦C of High Alumina Refractory Castables with Spinel, Periclase and Dolomite Additions", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 29, pp. 53–58, 2009.

[9] L. A. Díaz, R. Torrecillas, A. H. de Aza, P. Pena and S. De Aza, "Alumina-rich Refractory Concretes With Added Spinel, Periclase and Dolomite: A Comparative Study Of Their Microstructural Evolution With Temperature", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 25, pp. 1499–1506, 2005.

[10] L. A. Díaz and R. Torrecillas, "Phase Development And High Temperature Deformation in High Alumina Refractory Castables With Dolomite Additions", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 27, pp. 67–72, 2007.

Archive of SID

www.SID.ir