فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۹، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۳۹۹

اثر نانو و میکرو سیلیس بر تغییر شکل پایروپلاستیک کاشی پرسلانی داخلی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

حمیدرضا احمدی*[۱]، وجیهه تسبیحی[۲]

[۱] گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد،گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

* ahmadi.hamidreza@gmail.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۱ دی ۱۳۹۸

پذیرش: ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۹

کلید واژه:

کاشی پرسلانی؛ پایروپلاستیک؛ میکرو سیلیس؛ نانو سیلیس.

چکیده:

واژه پایروپلاستیک به تغییر شکل‌های بدنه‌های سفید پخت اشاره می‌کند که در طول پخت بوجود می‌آید. بطور خاص، این پدیده برای کاشی‌های پخته شده در کوره‌های رولری، (بخصوص نازک و با ابعاد بزرگ) و ناهمواری‌های ایجاد شده در سطح آن، ناشی از نیروی عمودی وزن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش ۱، ۳ و ۵ درصد از نانو و میکروسیلیس در بچ اصلی کاشی پرسلانی جایگزین شد. اثر نانو و میکروسیلیس بر پایروپلاستیک، استحکام خمشی و خواص فیزیکی بررسی شد. آنالیزهای XRD و SEM به منظور بررسی‌های فازی و ریزساختاری بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد نانو سیلیس نسبت به میکرو سیلیس موجب افزایش بیشتر پایروپلاستیک می‌شود. نتایج نشان داد که ۱٪ نانو سیلیس کمترین میزان پایروپلاستیک را در میان نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و میکروسیلیس، دربر داشت. همچنین نتایج نشان داد با افزودن ۱٪ نانوسیلیس استحکام خمشی به میزان ۲۱/۱۸ ٪ افزایش یافت. نتایج XRD نشان داد که نسبت به نمونه مرجع، بیشترین شدت پیک فاز کوارتز، مربوط به نمونه میکروسیلیس دار و کمترین آن مربوط به نمونه نانو سیلیس دار است.

۱- مقدمه

واژه پایروپلاستیک به تغییر شکل یا خمش نمونه‌های سرامیکی و یا بدنه‌های سفید پخت در اثر گرانش اشاره می‌کند که در طول پخت بوجود می‌آید [۱ و ۲]. تغییر شکل پایروپلاستیک مجموعه‌ای از عیوب مرتبط با اکثر محصولات سرامیک سنتی را در بر می گیرد؛ چرا که فرآیند زینترینگ در آنها با پیشرفت قابل‌توجه فاز مایع انجام می‌شود. این مساله اساساً بر محصولاتی تاثیر می‌گذارد که با درجه بالایی از تراکم همراه هستند؛ بطوریکه تخلخل باز نهایی در آن‌ها بسیار کم یا نزدیک به صفر است. از این رو، محصولاتی چون چینی‌ها، بدنه‌های سفید پخت، کاشی‌های شیشه‌ای شده[۱] و غیره به خاطر فاز مایع در داخل قطعه در حین پخت، دست‌خوش تغییر شکل می‌شوند [۳]. بطور خاص، این پدیده برای کاشی‌هایی که در کوره‌های رولری پخته می‌شوند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هنگامی که

[1] vitrified tiles

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

کاشی‌ها در کوره‌های رولری توسط رولرها حرکت می‌کنند بخشی از بدنه به علت نیروی عمودی ناشی از وزنش خمیده می‌شود. در نتیجه محصول نهایی که می‌بایست در طول پخت شکل هندسی معین خود را حفظ کند دارای سطوح ناهمواری خواهد شد. اثر این پدیده در کاشی‌های پرسلانی بخصوص در کاشی‌های نازک و با ابعاد بزرگ بیشتر به چشم می‌خورد. همچنین در کاشی‌های با ابعاد بزرگ، ضخامت کم، مستطیل شکل و حاوی گدازآورهای قوی و پرکننده‌های میکرونی بیشتر دیده می‌شود. بخصوص وقتی که دو یا چند عامل مذکور با هم عمل کنند. این پدیده در هنگام زینترینگ و با استفاده از جریان ویسکوز مقدار زیادی فاز آمورف، فعال می‌شود. پایروپلاستیک تحت تأثیر عواملی چون مقدار، شکل، اندازه و نحوه قرارگرفتن دانه‌های درشت و خواص فیزیکی فازهای آمورف در دمای بالا می‌باشد. اندازه ذرات تعیین می‌کند که آیا مواد اولیه فاز خود را تشکیل می‌دهند یا حل می‌شوند و در فاز مایع وارد می‌شوند و ترکیب و رفتار آن را تغییر می‌دهند. استفاده از مواد اولیه ریز می‌تواند باعث افزایش ویسکوزیته فاز مذاب در دمایی شود که حداکثر تراکم بدنه وجود دارد و این امر می‌تواند منجر به کاهش شاخص پیروپلاستیک شود [۱]. البته تنها وجود مواد اولیه زیر ضامن کاهش پایروپلاستیک نیست بلکه توزیع ذرات در سراسر فاز شیشه نیز مهم است [۴]. در مطالعه‌ای گسترده، آیری و برتلس، الگویی از رفتار ارائه شده در سه مرحله را تعریف کردند، که مرحله اول، شامل تغییر شکل جزئی به علت شکست ساختار متاکائولن است. تغییر شکل، بیشتر همراه با انقباض بدنه سرامیکی و تحرک بالا فاز مذاب با ویسکوزیته پایین است. مرحله دوم، در طول گرمایش و پس از تشکیل فاز مذاب رخ می‌دهد. در نهایت، در مرحله سوم، زمانی که انقباض دیگر رخ نمی‌دهد، ذرات، تغییر شکل را با سرعت بسیار کم و تقریباً ثابت کاهش می‌دهد و باعث افزایش ویسکوزیته مذاب و تشکیل فازهای بلوری می‌شود که ساختار را تقویت می‌کند [۵]. مقدار فاز مذاب تشکیل‌شده در طول پخت، عمدتاً با مقدار فلاکس و دمای آستانه تعیین می‌شود. این جنبه‌ها که برای توسعه ریز ساختار نهایی کاشی‌های پرسلانی ضروری هستند، منجر به ویژگی‌های فنی مورد نظر می‌شوند. رامبالدی و همکارانش پیشنهاد دادند که تغییر شکل پایروپلاستیک در ۹۹۰ درجه سانتیگراد از طریق حرکات در مناطق با ویسکوزیته کم شروع می‌شود، اما نسبت بین مقدار فاز مذاب تشکیل‌شده در طول پخت و تغییر شکل پایروپلاستیک مشخص نیست [۵، ۶]. در کنار اثر منفی پایروپلاستیک، رایموندو و همکارنش از پایروپلاستیک با هدفی خلاقانه برای تولید شکل‌های خاصی از کاشی استفاده کردند [۷]. با توجه به مطالعات انجام شده، پدیده پایروپلاستیک در داخل و بخصوص بر محصول داخلی مورد بررسی قرار نگرفته لذا هدف از این تحقیق بررسی نانو و میکروسیلیس بر این پدیده در کاشی پرسلانی تولید داخل می‌باشد.

۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ و ۲ آمده است. نانو سیلیس و میکروسیلیس در فرمولاسیون کاشی پرسلانی با خاک کائولن (ASI-10) که دارای درصد سیلیس بیشتری بود با مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد جایگزین شد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

جدول ۱- آنالیز شیمیایی (XRF) مواد اولیه

نام ماده	L.O.I	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	Fe_2O_3	TiO_2	Al_2O_3	SiO_2
کائولن بویین زهرا (ASI-10)	۵/۷۷	۳/۳۱	۱/۱۰	۳/۰۱	۰/۸۶	۲/۱۴	۰/۳۱	۱۳/۷۲	۶۸/۸۳
کائولن خراسانلو	۵/۱۱	۰/۸۴	۰/۴۱	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۴۹	۰/۴۰	۱۶/۲۸	۷۵/۶۹
بنتونیت همدان	۱۰/۴۴	۱/۹۶	۰/۵۴	۸/۸۸	۱/۹۷	۱/۷۷	۰/۲۰	۱۱/۵۴	۶۱/۴۳
فلدسپار عباس‌آباد	۳/۳۴	۱/۱۶	۵/۲۵	۲/۹۷	۰/۶۲	۰/۸۵	۰/۳۶	۱۴/۷۹	۶۹/۹۵
تالک زنجان	۲/۳۶	۰/۲۳	۵/۹۹	۰/۹۳	۲/۲۸	۰/۵۸	۰/۲۲	۱۳/۲۹	۷۳/۷۵
نانو سیلیس	۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۰	۰/۰۱	۱/۲	۹۹/۱۶
میکرو سیلیس	۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱۲	۰	۰/۳۰۸	۹۹/۵۴

جدول ۲- مشخصات فیزیکی نانوسیلیس

نوع ماده	رنگ ظاهری	درصد خلوص	میانگین اندازه دانه (nm)	سطح ویژه (m^2/gr)
SiO_2	سفید	٪۹۹	۳۳-۲۱	۷۸۵-۶۰۰

جدول ۳ فرمولاسیون بدنه‌ها را نشان می‌دهد که در آن هر ترکیب به صورت بچ‌های ۱۲۰۰ گرمی بارگیری شده و به همراه ۰/۲ ٪ کربنات سدیم، ۰/۹ ٪ سیلیکات سدیم و ۶۰٪ آب، به مدت ۶۰ دقیقه توسط دستگاه آسیاب آزمایشگاهی (فست میل) با قندان و گلوله‌هایی از جنس پرسلان سخت آسیاب شده تا زبره دوغاب‌های تهیه شده به کمتر از ۰/۵٪ برسد. دوغاب با چگالی $1/6 g/cm^3$ و ویسکوزیته ریزشی (با قطر 4mm) ۳۰ ثانیه آماده شد. سپس نانو و میکروسیلیس (زیر مش ۲۳۰) به دوغاب‌ها اضافه گردید. دوغاب‌های به دست آمده خشک شده و با رطوبت ۵-۶٪ توسط الک مش ۱۸ به گرانول تبدیل و به مدت ۲۴ ساعت به منظور یکنواختی رطوبت بهتر نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه پرس آزمایشگاهی (مدل ReerKEMAC051) با فشار ۳۰۰bar در ابعاد ۱۵×۳۰cm و ضخامت 8mm پرس و به مدت ۱ساعت در دمای ۱۱۰°C خشک و در داخل کوره رولری خط تولید کارخانه (مدل SACMI) در دمای ۱۱۸۰°C و مدت زمان ۶۰ دقیقه پخت شدند.

برای اندازه‌گیری مقدار پایروپلاستیک نمونه‌ها، بدنه‌هایی با ابعاد مشخص ۳×۱۴cm آماده شدند. پس از خشک شدن، نمونه‌ها بر روی پایه‌های مثلثی شکلی از جنس نسوز با فاصله تکیه‌گاه یکسان ۱۰cm (شکل ۱) قرار داده شدند (مقدار انقباض پخت پایه‌های نسوز مورد استفاده در دمای آزمایش نزدیک به صفر می‌باشد). سپس در داخل کوره متناسب با شرایط تولید قرار داده شد. مقدار پایروپلاستیک PI[1] طبق رابطه ۱ تعریف شده است[۲].

$$PI = \frac{sb^2}{l^4} \qquad (۱)$$

s: حداکثر مقدار تغییر شکل (خمش)، b: ضخامت نمونه، l: فاصله بین دو پایه

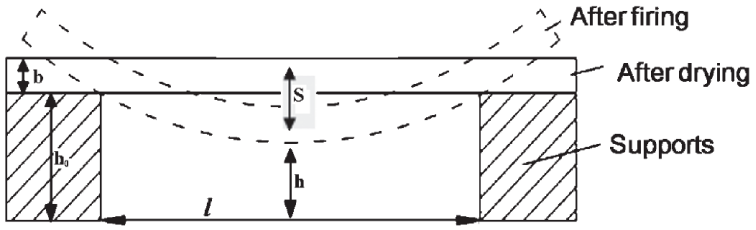
[1] pyroplastic index

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

جدول ۳- فرمولاسیون بدنه‌های نانوسیلیس و میکروسیلیس (درصد وزنی)

کد	نمونه‌ها	کائولن ASI-10	کائولن NK1	فلدسپار عباس آباد	بنتونیت همدان	تالک زنجان	نانو سیلیس	میکروسیلیس
REF	مرجع	۳۱	۲۲	۳۴	۹	۴	۰	۰
NS-1	نانوسیلیس ۱٪	۳۰	۲۲	۳۴	۹	۴	۱	۰
NS-3	نانوسیلیس ۳٪	۲۸	۲۲	۳۴	۹	۴	۳	۰
NS-5	نانوسیلیس ۵٪	۲۶	۲۲	۳۴	۹	۴	۵	۰
MS-1	میکروسیلیس ۱٪	۳۰	۲۲	۳۴	۹	۴	۰	۱
MS-3	میکروسیلیس ۳٪	۲۸	۲۲	۳۴	۹	۴	۰	۳
MS-5	میکروسیلیس ۵٪	۲۶	۲۲	۳۴	۹	۴	۰	۵



شکل ۱- وضعیت نمونه قبل و بعد از پخت برای اندازه گیری تغییر شکل پایروپلاستیک [۴]

برای تعیین مقدار استحکام خمشی بدنه‌ها از دستگاه آزمون شکست سه نقطه‌ای (Clave –IT-10XL) استفاده و مطابق استاندارد ISIRI 9169-4 و ISO 10545-4 و از رابطه ۲ محاسبه شد. که در آن W بار اعمال شده، L فاصله دو تکیه گاه، b عرض نمونه و h ضخامت آن است.

$$\delta = \frac{3WL}{2bh^2} \qquad (۲)$$

تعیین درصد جذب آب کلیه نمونه‌ها پس از پخت، مطابق استاندارد ملی ۳-۹۱۶۹ و ISO 10545-3 در دستگاه اندازه‌گیری جذب آب (ساخت شرکت کلاو) و همچنین چگالی و تخلخل نمونه‌ها طبق روش ارشمیدس و با استفاده از استاندارد شماره ASTM B962 انجام شد. برای بررسی و شناسایی فازی، شیمیایی و ریزساختاری از دستگاه پراش پرتو X مدل GNR-MPD 3000 و دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل Mira 3, TESCAN استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

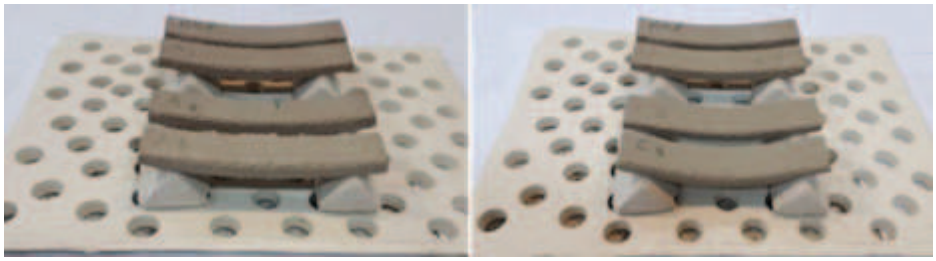
در این قسمت علاوه بر بررسی ظاهری نمونه‌ها به لحاظ شکل ظاهری، ویژگی‌های سطحی، آنالیز فازی و بررسی‌های ریزساختاری، تاثیر ترکیب و اندازه دانه بر روی خاصیت پایروپلاستیک مورد بحث قرار می‌گیرد. جدول ۴ نتایج حاصل از این بررسی‌ها را نشان می‌دهد، که شامل اثر پایروپلاستیک (PI)، استحکام خمشی پخت، جذب آب، تخلخل باز، تخلخل بسته، چگالی بالک، و چگالی ظاهری می‌باشد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

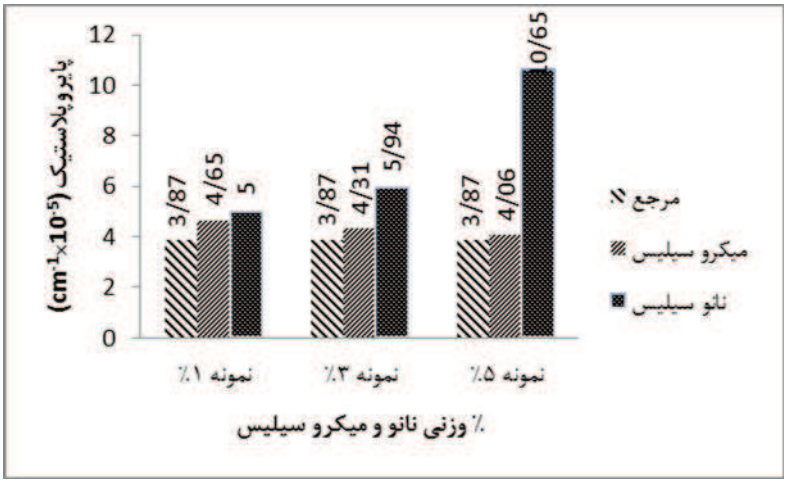
[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

۳-۱- بررسی تغییر شکل پایروپلاستیک

شکل ۲ تغییر شکل، و شکل ۳ نمودار پایروپلاستیک نمونه‌های نانو و میکروسیلیس را نسبت به نمونه مرجع نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر اثر اندازه ذرات سیلیس و درصد آنها بر روی تغییر شکل پایروپلاستیک است. همانطورکه در شکل ۳ مشاهده می‌شود اثر نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس بر روی پایروپلاستیک بیشتر است. به عنوان مثال در نمونه ۵٪ اثر نانوسیلیس بیشتر بوده به طوری‌که ۶۳/۶ ٪ نسبت به مرجع باعث افزایش پایروپلاستیک شده است. این افزایش ناشی از افزایش بیشتر فاز شیشه، نسبت به نمونه‌های میکروسیلیس می‌باشد.



شکل ۲- تغییر شکل پایروپلاستیک بدنه‌ها در کنار نمونه مرجع، الف: میکرو سیلیس، ب: نانو سیلیس



شکل ۳- نمودار تغییر شکل پایروپلاستیک بدنه‌های میکرو سیلیس و نانو سیلیس در مقایسه با مرجع

با افزایش میزان نانوسیلیس مقدار پایروپلاستیک افزایش یافته است اما برخلاف آن با افزایش میکروسیلیس شاهد کاهش اثر آن بر پایروپلاستیک هستیم. در واقع تاثیر نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس بر روی پایروپلاستیک بسیار بیشتر است بطوریکه در مقادیر بالاتر (۵٪) اختلاف این تاثیر بین میکرو و نانو سیلیس مشهودتر است. با این حال نسبت به مرجع، اثر هر دو (میکرو و نانوسیلیس) بر روی پایروپلاستیک اثری منفی است زیرا باعث افزایش پایروپلاستیک نسبت به مرجع شده است.

یکی از متغیرهای شاخص پایروپلاستیک تغییر اندازه دانه

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

است که بر ترکیب و ویسکوزیته فاز شیشه تاثیر می‌گذارد. معمولا تغییر شکل پایروپلاستیک از طریق حرکت در مناطق با ویسکوزیته کم شروع می‌شود، همچنین برخی از محققان معتقدند که فاز شیشه نقش مهمی را در تغییرشکل پایروپلاستیک ایفا می‌کند. اصلاح خواص فاز شیشه، برای ایجاد تثبیت بدنه سرامیکی در هنگام پخت، می‌تواند به کاهش مشکل تغییر شکل پایروپلاستیک کمک کند [۱، ۵]. چون نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس سطح ویژه بیشتری دارد در نتیجه واکنش پذیری آن افزایش می‌یابد و می‌تواند مشارکت بیشتری در تشکیل فاز شیشه داشته باشد و سبب کاهش ویسکوزیته فاز مذاب می‌شود در نتیجه میزان پایروپلاستیک آن افزایش می‌یابد. افزایش درصد میکروسیلیس بر خلاف نانوسیلیس تغییرات ناچیزی را بر روی تغییر شکل پایروپلاستیک داشته است. بنابر آنچه که مشاهده می‌شود به علت اینکه فاز شیشه کمتری ناشی از میکروسیلیس در بدنه تشکیل شده، شاهد تغییرات کمتر تغییر شکل پایروپلاستیک نسبت به نمونه‌های نانوسیلیس می‌باشیم.

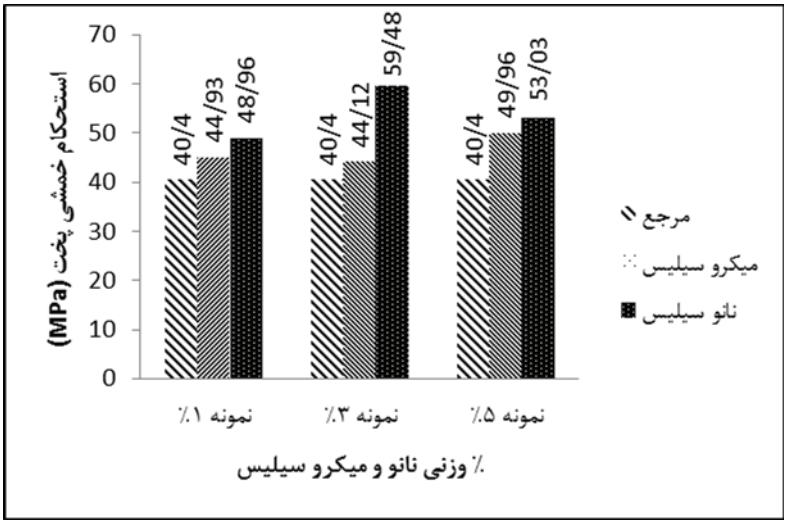
۳-۲- بررسی استحکام خمشی

اندازه دانه کوارتز در مقایسه با دمای پخت و مقدار کوارتز، تأثیر بیشتری بر استحکام خمشی دارد[۸]. شکل ۴ تأثیر اندازه دانه سیلیس را بصورت نانو و میکرو بر استحکام خمشی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که استحکام خمشی نمونه مرجع می‌تواند از اندازه دانه سیلیس، چه در حد نانو و چه در حد میکرو، تأثیر بپذیرد و افزایش آنرا در پی داشته باشد که مطابق با نظر محققین است [۱۰- ۸]. این افزایش می‌تواند ناشی از " اثر پیش تنش[1]" باشد. مطابق این اثر، اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی بین فاز شیشه و ذرات کوارتز باقی مانده در محدوده دمایی ۲۰ تا ۷۰۰°C، تنش فشاری در فاز شیشه ایجاد می‌کند که باعث بهبود استحکام خمشی می‌شود [۱۰- ۸]. محققین این اثر بیشتر در محدوده ۳۲- ۱۰ و یا ۲۰- ۵ میکرون گزارش کرده‌اند [۸ و ۹] ولی با توجه به شکل ۴ به نظر می‌آید که در ابعاد نانو نیز، سیلیس می‌تواند " اثر پیش تنش" را نسبت به ابعاد میکرو بیشتر تقویت کند چراکه میزان افزایش استحکام خمشی پخت ناشی از نانو سیلیس بیشتر از میکروسیلیس است. علاوه بر این دیده می‌شود، هر چقدر درصد نانو سیلیس بیشتر می‌شود، نمونه از استحکام خمشی پخت بالاتری برخوردار است. هر چه قدر ذرات سیلیس ریزتر باشد، در طول فرآیند زینتر، با سرعت بیشتری حل می‌شود[۸]. بنابراین نانوسیلیس به دلیل ریزدانگی و سطح ویژه بیشتر، در طول فرآیند زینتر، سریع‌تر حل شده و باعث کاهش وسکوزیته مذاب و افزایش فاز شیشه می‌شود [۸] و یک فاز پیوسته ایجاد می‌کند، و علاوه بر اثر فوق، باعث کاهش تخلخل‌ها شده در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد. به عنوان مثال استحکام پخت در نمونه ۳٪ نانوسیلیس، ۳۲ ٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که در نمونه ۵٪ میکروسیلیس، تنها ۲۳/۶ ٪ نسبت به نمونه مرجع استحکام تغییر پیدا کرده است. در نتیجه به دلیل اینکه میکرو سیلیس نسبت به نانوسیلیس قدرت واکنش پذیری کمتری دارد، باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود، بنابراین میزان افزایش استحکام پخت آن نسبت به نانوسیلیس کمتر است.

[1] Per- stressing effect

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

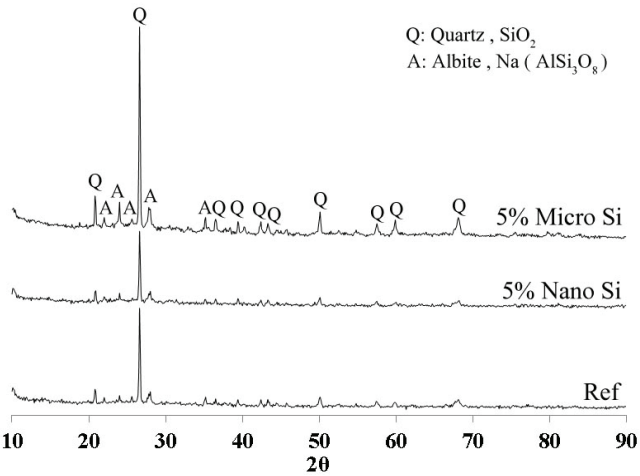


شکل ۴- نمودار استحکام خمشی پخت نمونه‌های میکروسیلیس و نانو سیلیس در مقایسه با مرجع

در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس با افزایش درصد نانو از ۱٪ به ۳٪ استحکام افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد که این امر به ترتیب با کاهش تخلخل باز و بسته و افزایش تخلخل بسته در بیش از ۳٪ همراه است. همچنین با افزایش نانوسیلیس از ۳٪ به ۵٪ میزان تخلخل بسته ۱۱/۴ ٪ افزایش می‌یابد که احتمالا این افزایش باعث کاهش استحکام شده است.

۳-۳- مطالعات فازی و ریزساختاری

شکل ۵ الگوی پراش پرتو X (XRD) نمونه‌های نانوسیلیس و میکروسیلیس را به همراه نمونه مرجع نشان می‌دهد. بررسی منحنی آنالیزهای فازی (XRD) نشان می‌دهد که فازهای عمده تشکیل دهنده کوارتز (کد ICSD 062404) و آلبیت (کد COD database 9001630) هستند.



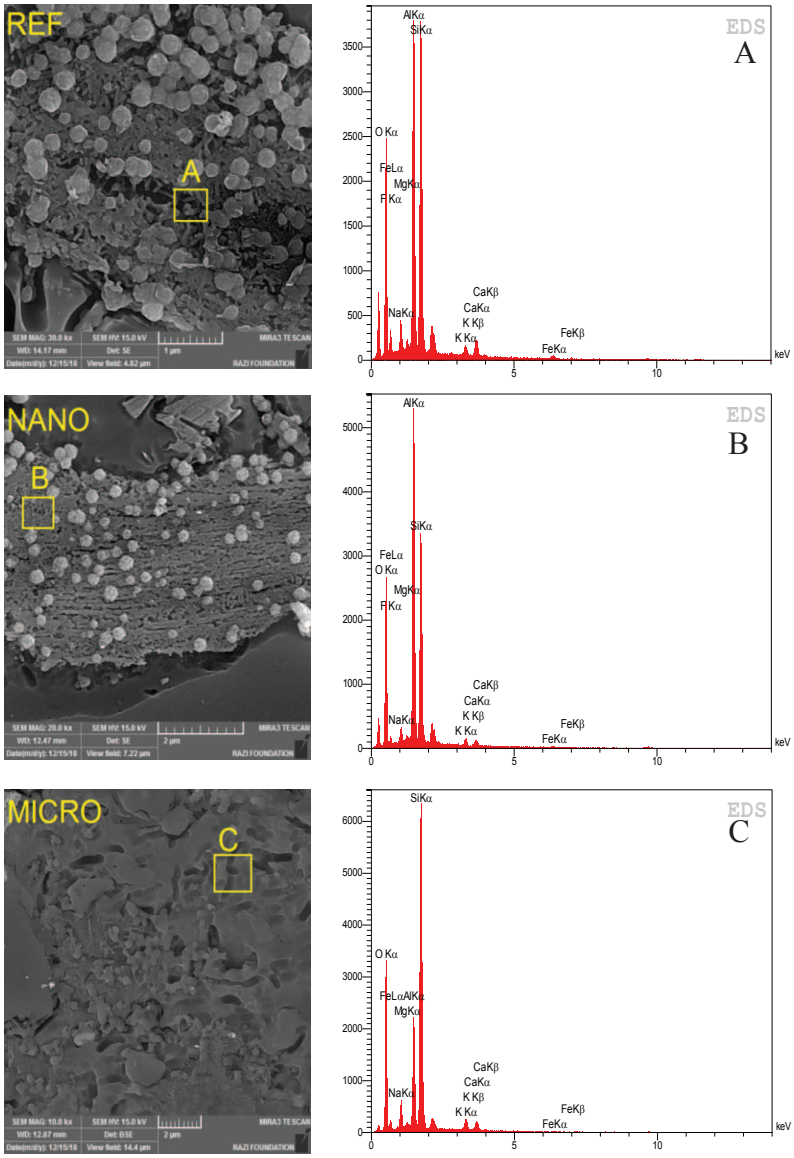
شکل ۵- الگوی پراش پرتو X (XRD) نمونه‌های مرجع و نانو سیلیس ۵٪ و میکرو سیلیس ۵٪

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود شدت پیک کوارتز نمونه نانوسیلیس کمتر از نمونه مرجع و میکروسیلیس می‌باشد که نشان دهنده این است که کوارتز کمتری در این نمونه وجود دارد چون که نانوسیلیس به دلیل ریزدانگی و سطح ویژه بیشتر، مشارکت بیشتری در تشکیل فاز شیشه داشته و مقدار فاز مذاب تشکیل شده را افزایش می‌دهد در نتیجه شدت پیک‌های کوارتز و آلبیت که معمولاً به صورت حل نشده در ساختار باقی می‌مانند، به شدت کاهش می‌یابد. این در حالی است که در نمونه میکروسیلیس شدت پیک فاز کوارتز نسبت به مرجع و نانو سیلیس بیشتر می‌باشد چرا که میکروسیلیس واکنش پذیری کمتری نسبت به نانوسیلیس داشته در نتیجه فاز کوارتز بیشتری به صورت حل نشده در آن باقی مانده است. که این امر موید نتایج شکل ۳ نیز می‌تواند باشد.

شکل ۶ ریز ساختار و تصاویر میکروسکوپ الکترونی



شکل ۶- تصاویر ریزساختار الکترونی (SEM) نمونه‌های مرجع و نانو سیلیس و میکرو سیلیس به همراه آنالیز نقطه‌ای (EDS)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

(SEM) نمونه‌های حاوی نانو و میکروسیلیس را به عنوان جایگزین بخشی از کائولن آمیز بدنه در کنار نمونه مرجع به همراه آنالیز شیمیایی نقطه‌ای (EDS) برخی از نقاط مشخص شده، نشان می‌دهد. در تصویر ریزساختار نمونه مرجع مشاهده می‌شود که بدنه فوق پس از پخت دارای ذرات حل نشده به همراه فازهای بلوری پراکنده درون آن می‌باشد. با توجه به آنالیز نقطه‌ای ذرات مشخص شده در تصاویر SEM و نیز بررسی‌های فازی انجام شده توسط XRD (شکل ۵)، ترکیب ذرات فوق می‌تواند به مواد اولیه حل نشده مانند کوارتز تعلق داشته باشد و در تجزیه EDX نقطه A، Si و Al دیده می‌شوند، که احتمال دارد به فازهای بلوری مولایت تعلق داشته باشد ولی مقدار آن در نمونه بسیار کم می‌باشد در نتیجه در XRD مشاهده نشدند. در ریزساختار نمونه نانوسیلیس وجود فاز شیشه به صورت یک زمینه پیوسته مشاهده می‌شود در تصویر ریزساختار و آنالیز نقطه‌ای مربوط به نمونه میکروسیلیس ذرات حل نشده مواد اولیه که عمدتاً کوارتز هستند مشاهده می‌شود که به واسطه دانه‌بندی درشت‌تر در فرایند تولید و عملیات حرارتی پخت سریع، در فاز شیشه تشکیل شده، حل نشده و در فاز زمینه باقی مانده است [۱۱]. همچنین در تصویر ریزساختار میکروسیلیس وجود برخی از بلورهای بسیار ریز در زمینه شیشه‌ای تشکیل شده، مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

- با افزودن نانو و میکرو سیلیس استحکام خمشی پخت، نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌یابد.
- افزودن نانو و میکروسیلیس باعث افزایش میزان پایروپلاستیک نسبت به نمونه مرجع می‌شود.
- بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس تاثیر بیشتری بر پایروپلاستیک داشته و میزان تغییر شکل آن را بیشتر افزایش می‌دهد.
- نتایج پایروپلاستیک نشان داد که مقدار بهینه در استفاده از نانو سیلیس حدود ۱٪ است.
- نتایج نشان داد با افزودن ۱٪ نانوسیلیس استحکام خمشی ۲۱/۱۸ ٪ افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] F. G. Melchiades, A. O. Boschi, L. R. dos Santos, M. Dondi, C. Zanelli, M. Paganelli, V. Mercurio" An Insight into the Pyroplasticity of Porcelain Stonware Tilest" Proceedings of the 13th World Congress on Ceramic Tile Quality, QUALICER 2014.Ceramic.

[2] M. Bernardin, D. S. de Medeiros, H. G. Riella," Pyroplasticity in porcelain tiles" Materials Science and Engineering A, Vol. 427, pp. 316–319, 2006.

[3] E. Sánchez ,V. Sanz, E. Cañas, J. Sales, K. Kayaci, M. U. Taşkiran, Ü. E. Anil, Ş. Türk "Revisiting pyroplastic deformation. Application for porcelain stoneware tile bodies" Journal of the European Ceramic Society, Vol. 39, pp. 601-609, 2019.

[4] T. Deng, B. LIU, X. XU and J. WU" The effect of different solid phases on the pyroplastic deformation of porcelain" Joumal of the ceramic society of Japan. Vol. 123, pp. 1004–1009, 2015.

[5] L. R. dos Santos C., Fábio G. Melchiades, S. Nastri, A. O. Boschi, M. Dondi, G. Guarini, M. Raimondo, C. Zanelli" Pyroplastic deformation of porcelain stoneware tiles: Wet vs. dry processing" Journal of the European

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]

Ceramic Society, Vol. 37, pp. 333–342, 2017.

[6] E. Rambaldi, W.M. Carty, A. Tucci, L. Esposito" Using waste glass as a partial flux substitution and pyroplastic deformation of a porcelain stoneware tile body" Ceramics International, Vol. 33, pp. 727–733, 2007.

[7] M. Raimondo, C. Zanelli, G. Guarini, M. Dondi, R. Fabbroni, T. Cortesi" Process of pyroplastic shaping for special-purpose porcelain stoneware tiles" Ceramics International, Vol. 35, pp. 1975–1984, 2009.

[8] W. Ochen, F. Mutonyi D'ujanga, B. Oruru" Effect of Quartz Particle Size on Sintering Behavior and Flexural Strength of Porcelain Tiles Made from Raw Materials in Uganda" Advances in Materials, Vol. 8, pp. 33-40, 2019.

[9] G. Stathis, A. Ekonomakou, C. J. Stournaras, and C. Ftikos, "Effect of firing conditions, filler grain size and quartz content on bending strength and physical properties of sanitaryware porcelain," J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 24, pp. 2357–2366, 2004.

[10] O. I. Ece and Z. E. Nakagawa, "Bending strength of porcelains," Ceramics International, Vol. 28, pp. 131–140, 2002.

[11] M. Romero, J. M. Pérez" Relation between the microstructure and technological properties of porcelain stoneware. A review" Materiales de Construcción Vol. 65, pp. 1- 19, 2015.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.3.4.6]