

## بررسی رفتار استحکام فشاری و مقاومت به سایش کاشی کف در دماهای تف جوشی مختلف

هاجر احمدی مقدم<sup>۱\*</sup>، مهدی عبداللهی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵، ش.ص: ۷۴-۶۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱)

### چکیده

کنترل فرآیند تولید کاشی‌های کف برای دست‌یابی به خواص مناسب اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، تأثیر دمای تف جوشی بر رفتار چگالش و خواص مکانیکی بدنه کاشی کف بررسی گردید. به این منظور نمونه‌های تهیه شده با روش پرس تک محوره در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ °C به مدت ۲ ساعت تف جوشی شدند. طبق نتایج حاصل از آنالیز اشعه ایکس، فازهای کوارتز و مولایت به عنوان فازهای اصلی در بدنه‌های کاشی کف شناسایی گردید. بیش‌ترین مقدار چگالی، انقباض خطی و استحکام فشاری برای نمونه‌ی تف جوشی شده در دمای ۱۱۵۰ °C حاصل شد و این نمونه کم‌ترین در صد تخلخل (۵/۰ درصد) و جذب آب (۰/۳ درصد) را داشت. طبق نتایج به دست آمده چگالی و استحکام فشاری نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۲۰۰ °C با کاهش قابل توجهی همراه بود. وجود حفره و ترک در ریزساختار این نمونه را می‌توان به پدیده تف جوشی بیش از حد نسبت داد. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، می‌توان یک ارتباط خطی با شیب زیاد بین استحکام فشاری و چگالی نمونه‌ها برقرار نمود که بیان‌گر وابستگی شدید استحکام فشاری به چگالی آن‌ها می‌باشد. مقاومت سایشی بالا در نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۲۰۰ °C می‌تواند به دلیل سطح شیشه‌ای و زجاجی آن باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کاشی کف، دمای تف جوشی، چگالش، استحکام فشاری، مقاومت سایشی.

<sup>۱</sup> - استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

<sup>۲</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

\*-نویسنده مسئول مقاله: hajar.ahmadi@sku.ac.ir

## پیشگفتار

کاشی‌های سرامیکی با نرخ تولید جهانی ۳۰۰ میلیون متر مربع در سال در حال رشد می‌باشد و تولید ۱۲ بلیون متر مربع کاشی در جهان در سال ۲۰۱۲ میلادی گزارش شده است. موفقیت تجاری کاشی‌های سرامیکی در نتیجه افزایش پیوسته کیفیت از نقطه نظر عملکرد تکنیکی و ظاهری آن‌ها می‌باشد. این بهبود کیفیت حاصل از نوآوری‌های ایجاد شده در محصولات و فرآیندهای تولید کاشی در چند دهه اخیر می‌باشد [۱-۵].

کاشی‌های سرامیکی طبق استاندارد ISO 13006 بر اساس میزان جذب آب گروه بندی می‌شوند: گروه I کم‌تر از ۳ درصد، گروه II بین ۳ تا ۱۰ درصد و گروه III بیش از ۱۰ درصد جذب آب دارند. همچنین گروه‌های I و II به دو زیر گروه a و b بر اساس جذب آب ۰/۵ و ۶ درصد به ترتیب تقسیم بندی می‌شوند (گروه Ia یعنی جذب آب کم‌تر از ۰/۵ و Ib بیش‌تر از ۰/۵ درصد). بر اساس روش شکل‌دهی، کاشی‌ها به دو دسته A روش اکسترژن و B روش پرس طبقه بندی می‌گردند. بدنه‌های سرامیکی بر پایه رنگ بعد از پخت به صورت سفید پخت (از سفید تا قهوه‌ای روشن) و سیاه پخت (از صورتی تا قهوه‌ای سوخته) مشخص می‌شوند. رنگ بدنه وابسته به مقدار اکسید آهن موجود در آن می‌باشد به گونه‌ای که رس‌های مورد استفاده در بدنه‌های سفید پخت بایستی مقدار  $Fe_2O_3$  کمی داشته باشند. کاشی‌ها بر اساس کاربرد در دو نوع کاشی دیوار (گروه‌های III و II b) و کاشی کف (گروه‌های I و II a) هستند [۱].

کاشی‌های سرامیکی از مخلوط مواد اولیه شامل رس، فلدسپار و کوارتز تشکیل می‌شوند و معمولاً یک فرمولاسیون سه تایی شامل ۵۰ درصد رس، ۳۵ درصد فلدسپار و ۱۵ درصد کوارتز را نشان می‌دهند. در این مخلوط، رس به مانند چسب برای اتصال اجزاء در حالت خام عمل می‌کند و پلاستیسیته لازم برای شکل‌دهی را فراهم می‌کند. فاز فلدسپار با دمای ذوب پایین با اجزاء دیگر ترکیب کاشی واکنش می‌دهد و دمای تشکیل فاز مذاب سیستم را کاهش می‌دهد. فاز مذاب تولید شده در ریزساختار گسترش یافته و منجر به چگالش می‌گردد. کوارتز، موجب پایداری در دماهای پخت و در نتیجه کاهش

انقباض و جلوگیری از تغییر شکل می‌گردد. کاشی‌های سرامیکی معمولاً ریزساختارهایی از نوع دانه و باند نشان می‌دهند و ذرات پرکننده (معمولاً کوارتز) درون زمینه متراکم که از کریستال‌های مولایت و یک فاز شیشه‌ای تشکیل شده است، قرار می‌گیرند [۶-۹]. وانگ و همکارانش نشان دادند که دمای تف جوشی تأثیر زیادی بر استحکام خمشی کاشی‌های کف دارد و افزایش دما بیش از حد، منجر به افت استحکام خمشی آن‌ها می‌گردد [۳]. لیو و همکارانش افزایش استحکام خمشی کاشی کف در دمای بهینه تف‌جوشی را به چگالی بالای آن و وجود فاز مولایت بیش‌تر نسبت دادند [۹].

استحکام فشاری و مقاومت به سایش کاشی‌های کف در کاربرد و دوام آن‌ها اهمیت زیادی دارد. هدف تحقیق حاضر، بررسی وابستگی استحکام فشاری و مقاومت به سایش بدنه کاشی کف به رفتار چگالش آن در طی تف جوشی می‌باشد. به این منظور، تأثیر دمای تف جوشی بر خواص فیزیکی (چگالی، درصد تخلخل و جذب آب) و خواص مکانیکی شامل استحکام فشاری و مقاومت به سایش کاشی کف بررسی گردید.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای بررسی رفتار تف جوشی کاشی کف، پودر کاشی گرانوله از کارخانه کاشی ارژنگ شهرکرد از مواد اولیه شامل کائولن، فلدسپار و کوارتز با ترکیب شیمیایی مخلوط مواد اولیه جدول ۱ تهیه گردید. نمونه‌های دیسکی شکل با قطر ۳۰ mm و ضخامت ۵ mm و همچنین نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۲۰ mm و ضخامت ۲۲ mm برای تعیین استحکام فشاری با استفاده از روش پرس تک محوره با فشار پرس ۳۰۰ MPa شکل داده شدند. نمونه‌ها ابتدا در دمای حدود ۱۱۰ °C به مدت ۵ ساعت خشک گردید. برنامه تف جوشی شامل دو مرحله متوالی بود. در مرحله اول نمونه‌ها تا دمای ۶۰۰ °C حرارت و در این دما به مدت ۲ ساعت نگه داشته شدند. سپس تا دمای پخت با سرعت حرارت دهی ۵ °C/min دما افزایش و در دمای پخت نیز به مدت ۲ ساعت حرارت داده شدند. نمونه‌ها در دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۱۵۰ و ۱۲۰۰ °C تف جوشی شدند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مخلوط مواد اولیه (درصد وزنی)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Minor oxides	L.I.O <sup>1</sup>
۵۳/۳۵	۱۸/۷۹	۳/۸۲	۰/۹۲	۱/۰۳	۱/۳۴	۱/۷۶	۱/۴۱	۰/۳۱	۰/۵۱	۰/۵۲	۱۴/۲

<sup>1</sup>Loss on ignition (پرت حرارتی)

شده بعد از تف جوشی می‌باشند. علاوه بر این، پیک‌های مشخصه هماتیت (-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; JCPDS-ICDD card: 33-0664) نیز در شکل ۱ مشخص شده است که حضور این فاز ناشی از ناخالصی اکسید آهن موجود در مواد اولیه است. فازهای کوارتز و آل‌بیت (فاز موجود در فلدسپار مواد اولیه) نیز از مواد اولیه باقی مانده است. طبق شکل ۱ با افزایش دمای تف جوشی شدت پیک‌های فاز آل‌بیت و در نتیجه مقدار آن کاهش می‌یابد. فاز مولایت در طول تف جوشی در نتیجه تجزیه کائولینیت تشکیل می‌شود. همچنین حضور فاز آمورف در محدوده زاویه ۱۰ تا ۳۵ درجه گزارش شده است [۱۰، ۱۱]. مکانیزم تف جوشی کاشی‌های کف از نوع تشکیل فاز مذاب می‌باشد و فاز مذاب ویسکوز در طی تف جوشی از آل‌بیت ایجاد می‌شود که با سرد شدن به فاز شیشه‌ای تبدیل می‌گردد [۱۲]. در طی تف جوشی کاشی‌های کف، گروه‌های هیدروکسیل موجود در ساختار رس کائولن (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) در دمای حدود ۵۵۰ °C تجزیه و کائولن به متاکائولن (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) تبدیل می‌شود. فاز متاکائولن در محدوده دمایی ۹۵۰-۱۰۰۰ °C تبدیل به ساختار اسپینل (0.56Si<sub>8</sub>Al<sub>10.67</sub>O<sub>32</sub>) و کوارتز آمورف می‌گردد. فاز کوارتز آمورف تشکیل شده در اثر تجزیه متاکائولن بسیار واکنش پذیر و فعال است و می‌تواند با فلدسپار یوتکتیک در دمای حدود ۱۰۵۰ °C تشکیل دهد و منجر به تف جوشی از طریق فاز مذاب و جریان ویسکوز گردد. فاز اسپینل تشکیل شده نیز به صورت ناپایدار و غیرتعادلی است که در دماهای بالای ۱۰۰۰ °C به مولایت تبدیل می‌شود. در دمای ۱۲۰۰ °C فاز مذاب در اثر حل شدن کوارتز در آن به حد اشباع می‌رسد و تبدیل فاز کوارتز به کریستوبالیت شروع می‌گردد. در طی سرد کردن فاز مذاب به فاز شیشه‌ای تبدیل می‌شود. بنابراین کاهش شدت پیک‌های آل‌بیت با افزایش دمای تف جوشی بیان‌گر تبدیل شدن آن به فاز مذاب می‌باشد [۱۳].

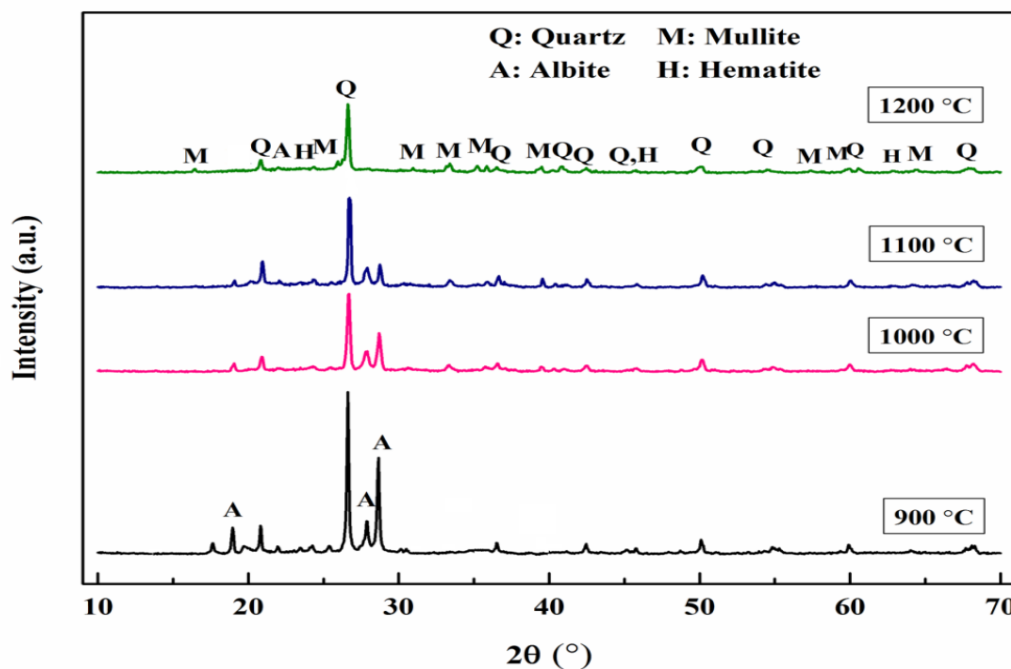
به منظور بررسی رفتار تف جوشی، چگالی و تخلخل ظاهری نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C-373 با استفاده از روش ارشمیدس تعیین گردید. درصد انقباض نمونه‌ها با اندازه‌گیری قطر نمونه‌های دیسکی قبل و بعد از تف جوشی محاسبه شد. همچنین درصد جذب آب (WA) نمونه‌ها با اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها بعد از پخت (m<sub>0</sub>) و بعد از ۲۴ ساعت قرارگیری در آب (وزن اشباع، m<sub>s</sub>) طبق فرمول ۱ محاسبه شد:

$$WA = (m_s - m_0) / m_0 \times 100 (\%) \quad (1)$$

با استفاده از دستگاه پراش اشعه x (XRD) مدل Asenware AW-XDM 300 با تابش پرتوی Cu-ka طول موج ۱/۵۴۲ Å، بررسی فازهای نمونه‌ها صورت گرفت. مورفولوژی و ریز ساختار نمونه‌های تف جوشی شده با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM مدل QUANTA 450 FEG, FEI) بررسی گردید. برای تعیین خواص مکانیکی، تست فشار طبق استاندارد ASTM C1424-15 و تست سایش طبق استاندارد ASTM C501-84 بر روی نمونه‌ها انجام شد. تست فشار با استفاده از دستگاه فشار تک محوره با ظرفیت ۳۰ kN (ساخت البرز کوشا، ایران) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفت. با استفاده از دستگاه سایش ساخت البرز کوشا ایران با وزن ۲/۵ kg و سرعت ۰/۵ m/s به مسافت ۲۰۰ m بر روی نمونه‌های دیسکی شکل تست سایش انجام شد.

## نتایج و بحث

الگوهای پراش اشعه X مربوط به نمونه‌های تف جوشی شده در دماهای مختلف در شکل ۱ آورده شده است. طبق نتایج XRD، آل‌بیت (NaSi<sub>3</sub>AlO<sub>8</sub>; JCPDS-ICDD card: 20-057) مولایت (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) (JCPDS card no. 00-001-0613) و کوارتز (SiO<sub>2</sub>) فازهای شناسایی



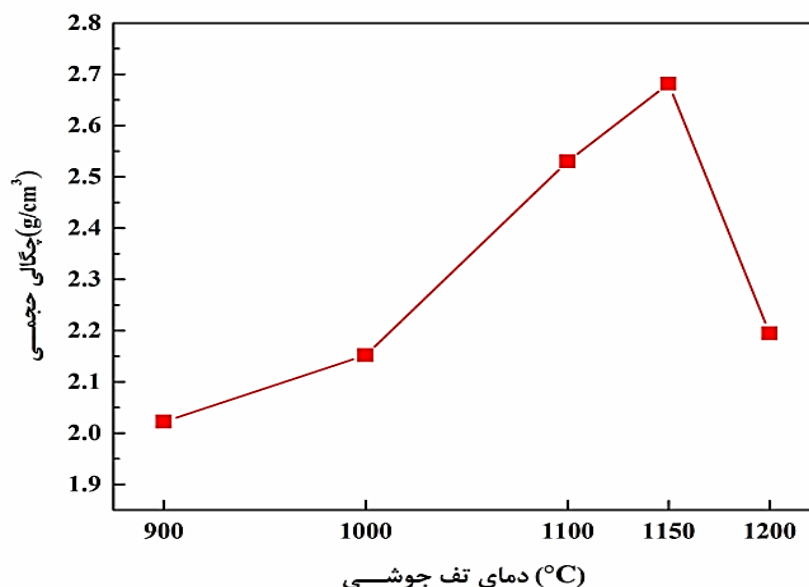
شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌ها تف جوشی شده در دماهای مختلف

فاز مذاب می‌گردد که با ایجاد حفره‌های زیادی درون بدنه سرامیکی همراه خواهد بود. از طرف دیگر دماهای بالا، منجر به رشد دانه نیز خواهد شد که رخ دادن این دو پدیده با هم باعث می‌گردد، سرعت حرکت مرزهای دانه بیش‌تر از سرعت حرکت حفره‌ها شود و موجب حبس شدن حفره-ها درون دانه‌ها گردد و خواص مختلف سرامیک‌ها از قبیل استحکام آن‌ها افت پیدا کند [۹].

در طی حرارت دهی کاشی‌های کف یک سری واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی در دماهای متفاوت اتفاق خواهد افتاد و منجر به ایجاد ریز ساختار ناهمگن شامل فاز سیلیکاتی احاطه شده درون فاز زمینه شیشه‌ای می‌گردد [۱۲]. تصاویر SEM مربوط به سطح شکست دو نمونه تف جوشی شده در دماهای ۱۱۵۰ °C و ۱۲۰۰ °C در شکل ۳ آورده شده است. طبق تصاویر SEM نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۱۵۰ °C ریزساختار متراکم و بدون تخلخل را نشان می‌دهد، در حالی که وجود تخلخل و ترک در نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۲۰۰ °C قابل مشاهده می‌باشد.

در شکل ۲ تغییرات چگالی نمونه‌ها بر حسب دمای تف جوشی نشان داده شده است. با افزایش دما ابتدا چگالی افزایش و سپس کاهش یافته است. ماکزیمم مقدار چگالی  $2/68 \text{ g/cm}^3$  (۹۹/۴ درصد چگالی تئوری) برای نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۱۵۰ °C حاصل شد. افزایش در مقدار چگالی در دماهای تف جوشی ۱۱۰۰ °C و ۱۱۵۰ °C چشم‌گیر می‌باشد و در دمای تف جوشی ۱۲۰۰ °C افت شدیدی در چگالی مشاهده می‌گردد. با افزایش دمای تف جوشی و تبدیل شدن فاز آلیت به فاز مذاب، تخلخل موجود در بدنه توسط فاز مذاب از بین خواهند رفت و منجر به افزایش چگالی خواهد شد [۱۳]. افزایش دمای تف جوشی از طریق دو مکانیزم افزایش سرعت نفوذ و همچنین تشکیل فاز مذاب و فعال‌سازی مکانیزم تف جوشی در حضور فاز مذاب می‌تواند منجر به بهبود چگالش و افزایش چگالی گردد [۱۴]. کاهش شدید در چگالی در دماهای تف جوشی بالا که با نتایج دیگر محققان نیز مطابقت دارد با توجه به پدیده تف جوشی بیش از حد<sup>۱</sup> توجیه می‌شود [۱۵،۹]. تف جوشی بیش از حد در دماهای خیلی بالا منجر به افت شدید در ویسکوزیته

1- Oversintering phenomenon



شکل ۲- تغییرات چگالی حجمی نمونه‌ها بر حسب دمای تف جوشی

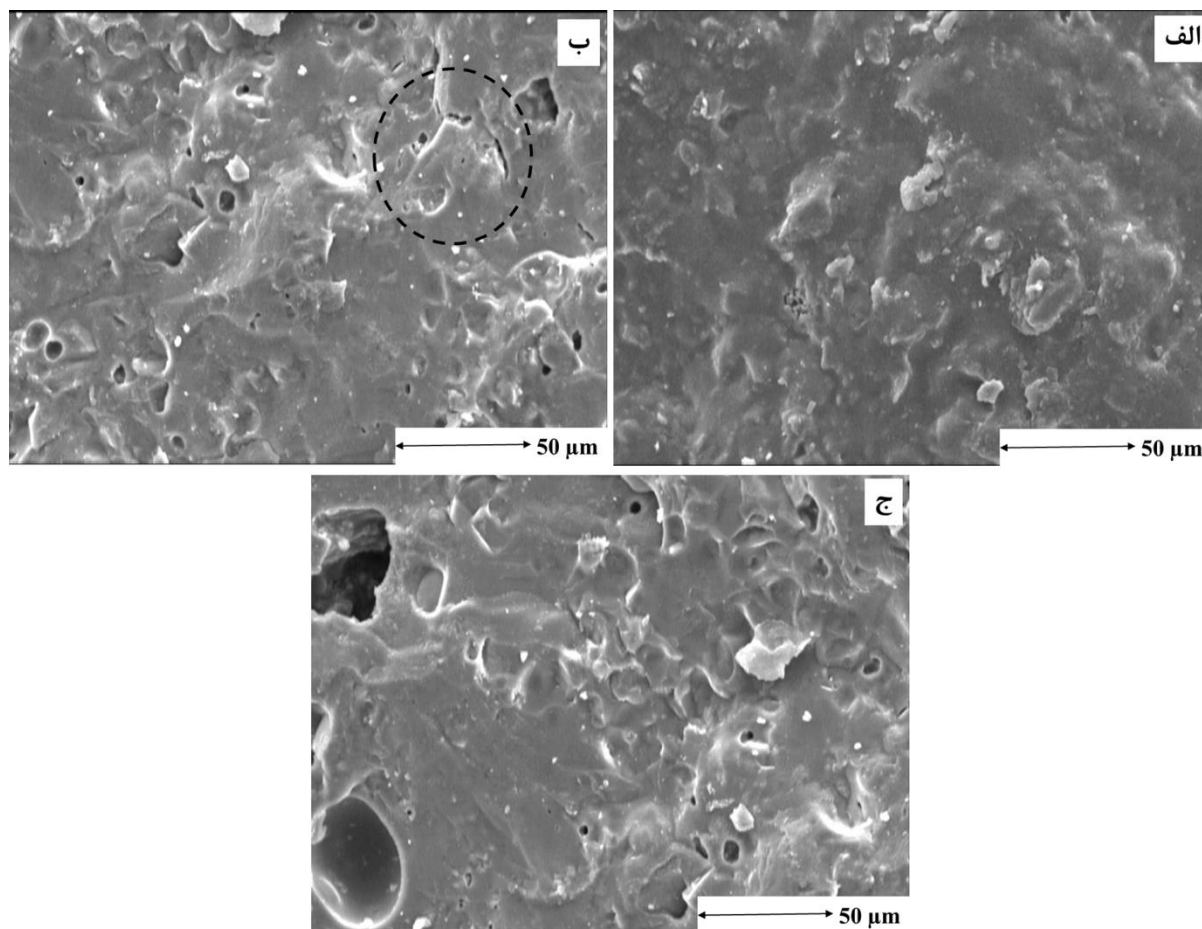
مقدار جذب آب نمونه‌ها در دمای °C ۱۱۵۰ تنها حدود ۰/۳ درصد بود که با توجه به تقسیم بندی ذکر شده در مقدمه، این کاشی جزء گروه Ia قرار می‌گیرد [۱۴].

شکل ۵ نمودار تغییرات در صد انقباض خطی (قطری) و در صد کاهش وزن نمونه‌ها با دمای تف جوشی را نشان می‌دهد. با افزایش دمای تف جوشی تغییرات درصد انقباض مشابه چگالی می‌باشد و نمونه تف جوشی شده در دمای °C ۱۱۵۰ بیش‌ترین میزان انقباض را نشان داد. افزایش در مقدار انقباض در نمونه °C ۱۲۰۰ را می‌توان به وجود حفره و انبساط ناشی از وجود آن‌ها نسبت داد [۱۲،۹]. با توجه به نوع مواد اولیه، کاهش وزن در اثر حرارت دادن نمونه‌ها مربوط به خروج رطوبت در دماهای پایین و خروج گروه‌های هیدروکسیل رس کائولن و ناخالصی‌های آلی موجود در مواد اولیه در دماهای بالا خواهد بود. افزایش در کاهش وزن نمونه‌ها با افزایش دمای تف جوشی می‌تواند مربوط به دلیل کامل شدن واکنش‌ها در طی تف جوشی مانند دهیدروکسید شدن کائولن و تشکیل مولایت و خروج ترکیبات فرار در مواد اولیه باشد [۱۵].

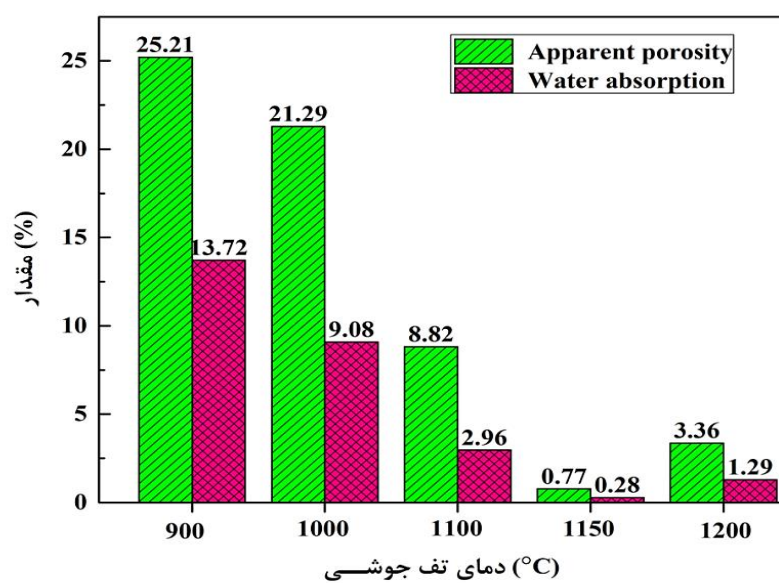
همان گونه که قبلاً اشاره شد، فاز آلبيت در طی تف جوشی تبدیل به فاز مذاب می‌گردد، کاهش قابل توجه شدت پیک‌های این فاز در الگوی پراش x نمونه تف جوشی شده در دمای °C ۱۲۰۰ می‌تواند بیان‌گر تشکیل فاز مذاب بیش‌تر در این نمونه باشد. حضور فاز مذاب بیش‌تر و با ویسکوزیته پایین‌تر در دمای °C ۱۲۰۰ به دلیل تف جوشی بیش از حد می‌تواند منجر به تشکیل حفره در این نمونه گردد. همچنین پدیده باد کردن حفرات<sup>۱</sup> می‌تواند رخ دهد و حفره‌های بزرگ و نامنظم ایجاد شود. ذرات کوارتز می‌توانند به واسطه وجود ترک‌های اطراف آن‌ها مشخص گردد [۱۵،۱۲]. طبق نتایج دیگر محققان، دلیل ایجاد این ترک‌ها به تنش‌های حاصل از اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی ذرات کوارتز با فاز زمینه شیشه‌ای و تغییرات حجمی ناشی از تبدیلات فازی کوارتز مربوط می‌شود [۱۳،۱۶].

تغییرات درصد تخلخل ظاهری و درصد جذب آب نمونه‌های تف جوشی شده در دماهای مختلف در شکل ۴ آورده شده است. طبق نمودار با افزایش دما از °C ۹۰۰ به °C ۱۱۵۰ مقدار تخلخل ظاهری از ۲۵ درصد به حدود ۰/۸ درصد کاهش یافته است. با افزایش دما و تشکیل فاز مذاب در طی تف جوشی، فاز مذاب به داخل حفرات ریزساختار نفوذ می‌کند و منجر به چگالش و کاهش تخلخل می‌گردد.

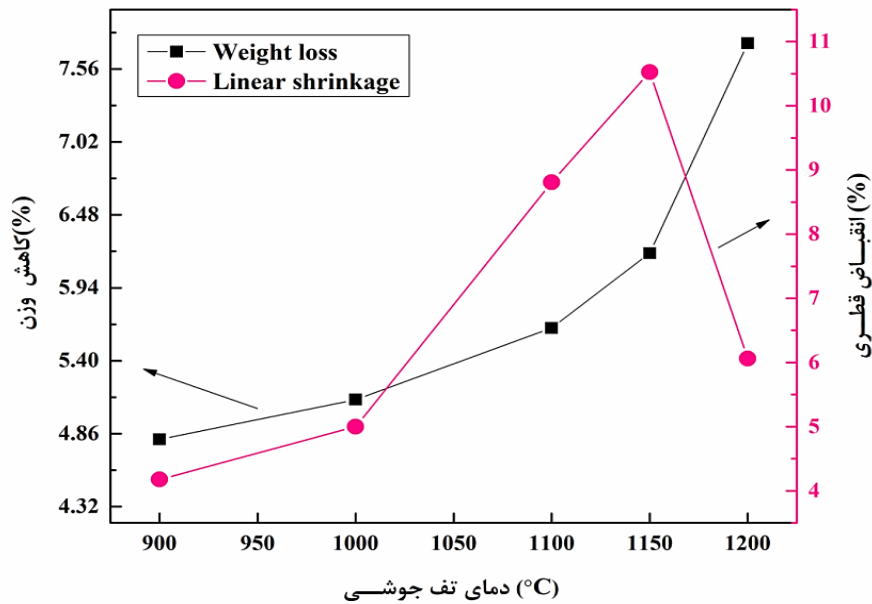
<sup>1</sup>- Swelling of pores



شکل ۳- تصاویر SEM مربوط به سطح شکست دو نمونه تف جوشی شده در دماهای الف) ۱۱۵۰ °C و ب) و ج) ۱۲۰۰ °C از دو قسمت متفاوت نمونه



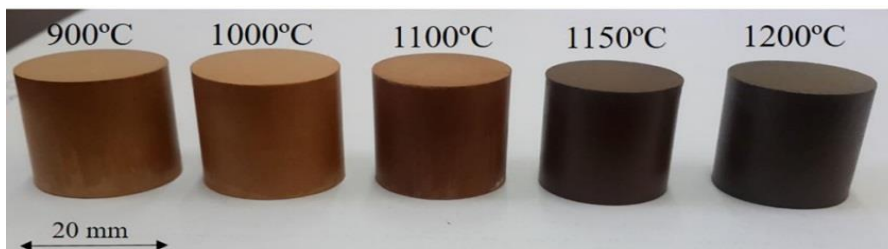
شکل ۴- تغییرات درصد تخلخل ظاهری و درصد جذب آب نمونه‌های تف جوشی شده در دماهای مختلف



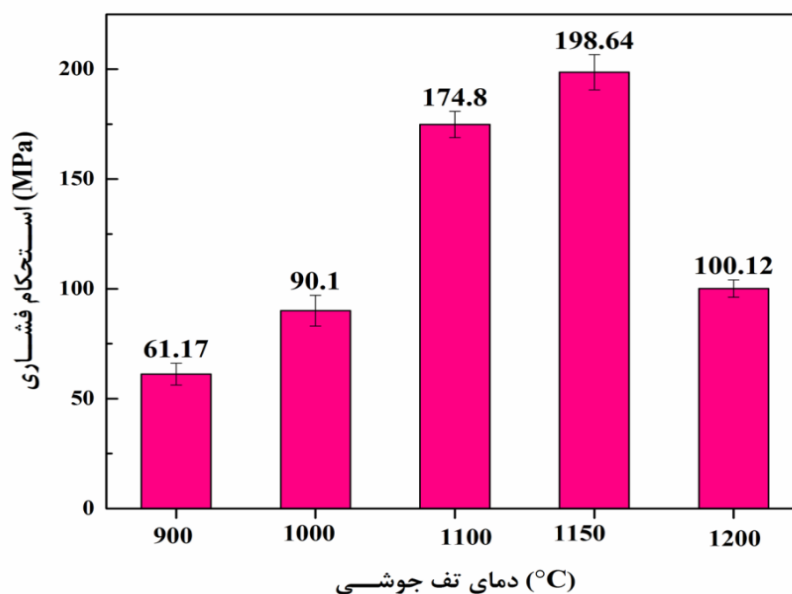
شکل ۵- نمودار تغییرات درصد انقباض خطی (قطری) و درصد کاهش وزن نمونه‌ها با دمای تف جوشی

مقدار استحکام فشاری بدنه تف جوشی شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  بسیار پایین به دست آمد. یکی از پارامترهای بسیار مؤثر بر خواص مکانیکی سرامیک‌ها چگالی آن‌ها می‌باشد و افزایش اندک چگالی و کاهش تخلخل منجر به افزایش شدید در استحکام سرامیک‌ها می‌گردد [۱۷، ۱۴، ۹]. کاهش در استحکام فشاری نمونه تف جوشی شده در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  می‌تواند به دلیل چگالی پایین آن باشد. در شکل ۸ نمودار تغییرات استحکام فشاری بر حسب چگالی آن‌ها ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ارتباط خطی با تطابق بالا ( $R^2=0.997$ ) و شیب زیاد بین استحکام فشاری و چگالی نمونه‌ها وجود دارد که مقدار قابل توجه شیب نمودار می‌تواند بیان‌گر وابستگی شدید استحکام فشاری به چگالی باشد.

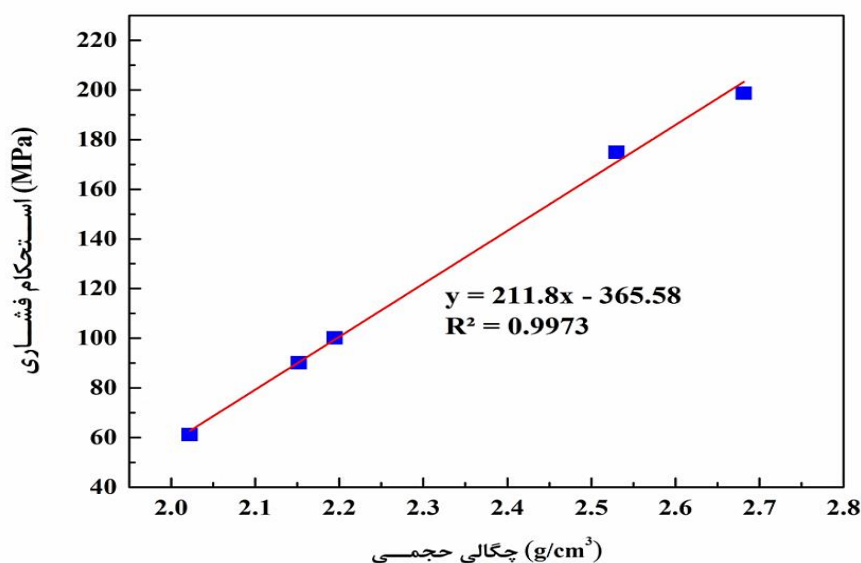
در شکل ۶ تصویر نمونه‌های استحکام فشاری و در نمودار ۷ نتایج مربوط به تست استحکام فشاری آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با تغییر دمای تف جوشی رنگ بدنه‌های کاشی کف نیز از قهوه‌ای روشن به قهوه‌ای تیره تغییر می‌یابد. این تغییر رنگ مربوط به تأثیر هماتیت با افزایش دمای تف جوشی می‌باشد. مقدار استحکام فشاری نمونه‌ها با افزایش دمای تف جوشی افزایش چشم‌گیری یافته است. به گونه‌ای که بیش‌ترین استحکام فشاری در دمای تف جوشی  $1150^{\circ}\text{C}$  حدود سه برابر استحکام فشاری نمونه تف جوشی شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است، فاز مولایت در نمونه تف جوشی در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  تشکیل نشده است، حضور فاز مولایت در کاشی‌های کف منجر به افزایش استحکام می‌گردد [۳]. به همین دلیل



شکل ۶- تصویر نمونه‌های استحکام فشاری در دماهای تف جوشی متفاوت



شکل ۷- نتایج مربوط به تست استحکام فشاری بر حسب دمای تف جوشی



شکل ۸- نمودار تغییرات استحکام فشاری بر حسب چگالی حجمی آن‌ها

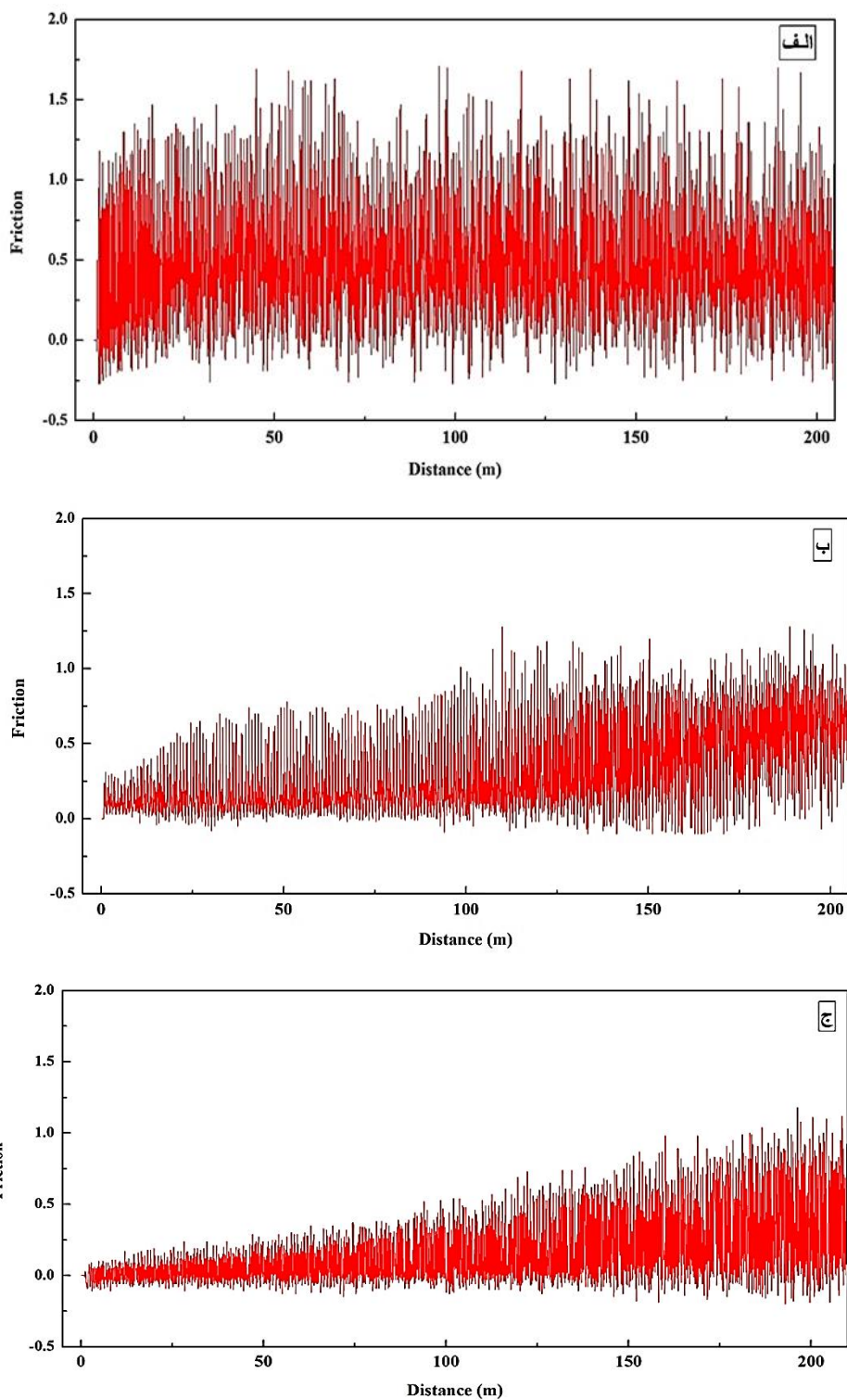
اصطکاک کم و سپس با افزایش زمان سایش مقدار آن افزایش یافته است. ضریب اصطکاک نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۲۰۰ °C نسبت به دو نمونه دیگر مقدار کمتری داشت که می‌تواند بیانگر مقاومت سایشی بالاتر سطح این نمونه باشد. بدنه‌های سرامیکی کاشی کف پخته شده در دمای بالای پیک تف جوشی (در اینجا ۱۱۵۰ °C) سطحی شیشه‌ای و زجاجی خواهند داشت که همین سطح می‌تواند منجر به افزایش مقاومت سایشی لایه‌های

در شکل ۹ نمودارهای مربوط به تست سایش (ضریب اصطکاک بر حسب مسافت) نمونه‌های تف جوشی شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۵۰ و ۱۲۰۰ °C آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای تف جوشی ضریب اصطکاک کاهش یافته است. طبق شکل ۹ الف، از همان ابتدا مقدار اصطکاک و سایش نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۰۰۰ °C زیاد بوده است در حالی که برای نمونه تف جوشی شده در دمای ۱۱۵۰ °C ابتدا ضریب



وزن بسیار ناچیز و ۰/۰۰۱ درصد اندازه گیری شد که بیان گر مقاومت به سایش بالای بدنه های کاشی کف می باشد.

سطحی آنها شود [۹]. مقدار کاهش وزن نمونه ها در طی سایش بسیار کم بود به گونه ای که برای نمونه تفجوشی شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  این مقدار ۰/۰۱ درصد و برای نمونه تفجوشی شده در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  در صد کاهش



شکل ۹- نمودارهای مربوط به تست سایش سه نمونه تفجوشی شده در دماهای الف)  $1000^{\circ}\text{C}$ ، ب)  $1150^{\circ}\text{C}$  و ج)  $1200^{\circ}\text{C}$

**نتیجه گیری**

گردید. نتایج نشان داد که استحکام فشاری نمونه‌ها وابستگی خطی با چگالی آن‌ها دارد.

در این مطالعه، تأثیر دمای تف جوشی بر رفتار چگالش و خواص مکانیکی بدنه‌های کاشی کف بررسی گردید. نتایج نشان داد که دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  به عنوان دمای بهینه تف جوشی این بدنه می‌باشد. در این دما بدنه سرامیکی بیش‌ترین چگالی، کم‌ترین تخلخل و درصد جذب آب و بیش‌ترین استحکام فشاری و مقاومت سایشی مناسب را دارا بود. در دمای بالاتر از این دما، به دلیل پدیده تف جوشی بیش از حد، افت در خواص بدنه سرامیکی ایجاد

**تشکر و قدردانی**

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری پرسنل کارخانه کاشی ارزنگ شهرکرد تشکر و قدردانی داشته باشند.

**References:**

- 1- M. Dondi, M. Raimondo, and C. Zanelli, "Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification," *Applied Clay Science*, vol. 96, pp. 91–109, 2014.
- 2- D. Gabaldón-Estevan, E. Criado, and E. Monfort, "The green factor in European manufacturing: a case study of the Spanish ceramic tile industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 70, pp. 242–250, 2014.
- 3- W. Wang, W. Chen, H. Liu, and C. Han, "Recycling of waste red mud for production of ceramic floor tile with high strength and lightweight," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 748, pp. 876–881, 2018.
- 4- B. Stawiski, and T. Kania, "Testing quality of ceramic tiles in order to evaluate condition of the manufacturing process," *Procedia engineering*, vol. 161, pp. 937–943, 2016.
- 5- J. L. Amorós, E. Blasco, A. Moreno, and M. P. Gómez-Tena, "Sintering of raw glazes for floor and porcelain tiles: A non-isothermal kinetic model," *Ceramics International*, vol. 42, pp. 16169–16179, 2016.
- 6- M. Awaad, S.M. Naga, and N.El-Mehalawy, "Effect of replacing weathered feldspar for potash feldspar in the production of stoneware tiles containing fish bone ash," *Ceramics International*, vol. 41, pp. 7816–7822, 2015.
- 7- D. Gouvea, T.T. Kaneko, H. Kahn, E. de Souza Conceição, and J.L. Antoniassi, "Using bone ash as an additive in porcelain sintering," *Ceramics International*, vol. 41, pp. 487–496, 2015.
- 8- K. Dana, S. Das, and S.K. Das, "Effect of substitution of fly ash for quartz– in triaxial kaolin quartz feldspar system," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, pp. 3169–3175, 2004.
- 9- Y. Luo, S. Zheng, S. Ma, C. Liu, and X. Wang, "Ceramic tiles derived from coal fly ash: Preparation and mechanical characterization," *Ceramics International*, vol. 43, pp. 11953–11966, 2017.
- 10- B. C. A. Pinheiro, and J. N. F. Holanda, "Obtainment of porcelain floor tiles added with petroleum oily sludge," *Ceramics International*, vol. 39, pp. 57–63, 2013.
- 11- B. Cicek, E. Karadagli, and F. Duman, "Valorisation of boron mining wastes in the production of wall and floor tiles," *Construction and Building Materials*, vol. 179, pp. 232–244, 2018.
- 12- M. A. S. Schettino, F. B. Siqueira, and J. N. F. Holanda, "Densification behavior of floor tiles added with sugarcane bagasse ash waste," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 28, pp. 60–66, 2016.

13- W.M. Carty, and U. Senapati, "Porcelain—raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 81(1), pp. 3-20, 1998.

14- M. N. Rahaman, "Ceramic Processing and Sintering", Marcel Dekker, New York, 1995.

15- H. Wang, M. Zhu, Y. Sun, R. Ji, L. Liu, and X. Wang, "Synthesis of a ceramic tile base based on high-alumina fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 155, pp. 930–938, 2017.

16- A. De Noni Jr, D. Hotza, V.C. Saler, E.S. Vilches, "Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, p.

11730, 2010.

۱۷- س. امیری، م.ح. پایدار، "مقایسه خصوصیات مکانیکی، الکتریکی و پایداری شیمیایی الکترولیت های کامپوزیتی هادی پروتون ( $\text{BaCe}_{0.7}\text{Zr}_{0.1}\text{Y}_{0.2}\text{O}_3$ - $\delta$ (BCZY7)-(Li/Na) $_2\text{CO}_3$ ) تولید شده به روش های مخلوط سازی مکانیکی و غوطه وری در مذاب"، *مجله مواد نوین*، دوره ۹، شماره ۳۴، ص ۳۰-۱۷، زمستان ۱۳۹۷.

