

استفاده از باطله های گرانیتی در ترکیب بدنه های سرامیکی

سید امیر راستی الحسینی^۱، حمید عبدلی^۲، سعید باغشاهی^۳، اسماعیل درویشی^۱

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد الیگودرز

۲- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد

۳- دانشگاه بین المللی امام خمینی، دانشکده فنی، قزوین

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۳/۱۱ تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱۰/۳

چکیده

صنایع گرانیت حجم ضایعات بالایی تولید می کند که موجب آلودگی و تخریب محیط زیست می گردد. هدف از این پژوهش، بررسی و امکان سنجی استفاده از ضایعات سنگ گرانیت در صنعت سرامیک است. برای این منظور، ضایعات گرانیت از سنگ بریها تهیه شدند. مشخصه یابی پودر ضایعاتی به منظور تعیین مشخصه های فیزیکی و شیمیایی توسط DTA، TGA و XRD انجام گرفت. سپس به منظور تعیین میزان مناسب قابل افزودن به ترکیبات سرامیک، از آنها در ترکیب فرمولاسیون بیج کاشی های پرسلانی استفاده شد. همچنین جذب آب و استحکام خمشی سه نقطه ای نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج نشان داد که بدنه های رفرموله شده دارای مشخصه های تکنولوژیکی مشابه کاشیهای گرانیتی رایج صنعتی هستند. میزان استفاده از ضایعات در مقیاس آزمایشگاهی به ۳۰ درصد و در مقیاس صنعتی به ۴ تا ۸ درصد وزنی رسید.

واژگان کلیدی: محیط زیست، کاشی گرانیتی، باطله، سنگ گرانیت.

مقدمه

دیواری تغییر نموده، به طور کلی این فرآورده ها از نوع ارتن ور آهکی ساخته شدند. به عبارت دیگر به جای Na_2O و K_2O از CaO به عنوان گدازآور استفاده گردید. این عمل به دو دلیل صورت گرفت، استفاده از CaO (ویا سنگ آهک و موارد مشابه در بدنه خام) موجب کاهش انقباض بدنه در هنگام پخت و در نتیجه پایداری ابعاد گردیده، تغییر شکل را در

کاشی های دیواری و کف را می توان گروهی از فرآورده های سرامیک های ظریف به شمار آورد. بدنه کاشی های دیواری از نوع ارتن ورها هستند. ارتن ورها (Earthenwares) بدنه های سفید یا کرم با جذب آب حدود ۱۵-۱۲٪ هستند. در گذشته (و در بعضی موارد در حال حاضر) بدنه کاشی های دیواری از نوع ارتن ور فلدسپاتی بودند. بعدها بدنه کاشی

درصدهای معین انتخاب شده، عملیات آماده‌سازی پودر روی آنها صورت می‌گیرد. در کاشی‌های پرسلائی مواد به حدی آسیاب می‌شود که حداکثر ۱٪ روی الک ۶۳μ باقی بماند. با انتخاب ترکیبی مناسب دستیابی به تخلخل بسیار پایین (۱/۰٪) امکان‌پذیر خواهد بود. با این وجود انقباض پس از پخت آنها در حدود ۷ الی ۸٪ است. میزان فشار اعمالی در کاشی‌های پرسلائی همیشه بسیار بالاست (بین ۳۴۰ تا ۳۸۰ kg/cm²) که موجب می‌شود پودرها کاملاً متراکم شده، انقباض پخت تا حدی کاهش دهد. خشک‌کایش این محصولات اغلب ساده است. مواد خشک شده دارای ویژگی‌های زیر می‌باشند:

- استحکام مکانیکی: ۱۵-۲۰ kg/cm²

- انقباض خشک‌کایش: ۱٪ ±

- بیشترین رطوبت باقیمانده: ۱٪.

در مرحله پخت، پارامترهای کلیدی، سیکل و دمای پخت (Firing Cycle and Temperature) هستند و باید به نحوی تنظیم شوند که فاز زجاجی با تخلخل بسیار کم حاصل گردد. بطور میانگین سیکل پخت سریع کاشی‌های گرانیتی با دمایی در حدود ۳۰ °C ± و مدت زمانی بین ۵۰ تا ۷۰ دقیقه تعریف می‌شود و قطعات پخته شده دارای خواص زیر هستند:

- جذب آب: ۰/۱٪ تا ۰/۰۱.

- انقباض پخت: ۸٪ تا ۶.

- استحکام خمشی: ۴۸۰ تا ۵۳۰ kg/cm²

- رنگ: سفید-عاجی

مشابهت زیادی میان ترکیب شیمیایی و خواص کاشی‌های گرانیتی با سنگ گرانیت وجود دارد [2]. سنگ گرانیت از سرد شدن مواد مذاب آتشفشان تشکیل شده است که به مرور زمان به صورت معادن سنگ گرانیتی

خلال پخت کاهش می‌دهد و همچنین در بدنه کاشی‌های دیواری موجب کاهش انبساط رطوبتی می‌شود [3].

می‌باشد. استون‌ورها بدنه‌های رنگی و متراکمی هستند که از رس‌های غنی از گدازآورها (Flux) ساخته می‌شوند. وجود میزان زیاد گدازآور اجازه می‌دهد که بدنه در درجه حرارت بالا به سهولت متراکم گردد. از مهم‌ترین ویژگی‌های کاشی کف، جذب آب بالای آنها (در حدود ۲ تا ۵٪) می‌باشد [6]. در دهه ۱۹۸۰، استون‌ورهای پرسلائی پا به عرصه تولید گذاشتند. این بدنه‌ها که بسیار سخت هستند، شامل مخلوط حاوی رس‌های کائولینیتی، فلدسپارها و کوارتز می‌باشند و در دمای ۱۲۰۰-۱۲۵۰ درجه سانتیگراد، بدون اعمال لعاب زینتر می‌شوند. این بدنه‌ها متراکم بوده، در حضور فاز شیشه‌ای به صورت زجاجی درآمده، در نتیجه حاوی تخلخل باقیمانده نزدیک به صفر هستند. لذا پرسلائی‌های سه جزیی از سیستم سه جزیی کوارتز، فلدسپار و کائولن، با یوتکتیکی که اجازه تشکیل فاز مایع (زجاجی) لازم برای رسیدن به بیشترین تراکم ممکن را فراهم سازد، تشکیل شده و حاوی فاز نهایی مولایت می‌باشند [1]. به دلیل ریزساختار حاصله، استون‌ورها دارای خواص مکانیکی و فیزیکی بالا و مقاومت به شوک حرارتی مناسبی هستند. عدم وجود تخلخل در این بدنه‌ها، باعث کاهش سطح تماس رطوبت با فاز شیشه و در نتیجه مقدار انبساط رطوبتی ناچیز می‌شود [8]. مراحل تولید کاشی‌های گرانیتی عبارتند از آماده‌سازی بچ، گرانوله‌سازی از طریق خشک کردن افشانه‌ای، پرسکاری، خشک‌کایش، لعابکاری و پخت. مواد اولیه که بر مبنای فرمولاسیون بدنه انتخاب می‌شوند، با

خواص کمک ذوب یا گداز آور مناسب، مورد توجه پروژه‌های تولید بدنه‌های سرامیکی و کاشی‌ها و آجرهای سقف کاشی‌های کف، کاشی‌های پرس‌لانی (Porcelainized Tile) و غیره قرار گرفته‌اند [8]. با توجه به آنچه گفته شد، برای نخستین بار در ایران، با توجه به منابع فراوان گرانیت و بدنبال آن حجم عظیم حدود سی درصدی ضایعات تولیدی (که بخشی از آن کاملاً غیرقابل اجتناب است)، طرحی ارائه و تعریف شد که هدف از آن تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ضایعات گرانیت یک یا چند معدن گرانیت ایران، بررسی امکان استفاده از ضایعات به عنوان مواد اولیه و تعیین خصوصیات بدنه ساخته شده و مقایسه با بدنه‌های تجاری است. مزایای استفاده از این ضایعات عبارتند از:

- ۳- جنبه‌های مثبت زیست محیطی شامل افزایش زمان در اختیار داشتن منابع طبیعی غیر قابل تجدید و کاهش آلاینده‌گی خاک و آب
 - ۲- احتمال دستیابی به خواص بهتر بدنه سرامیکی (کاشی پرس‌لانی)
 - ۳- حذف بخشی از فرایند تولید نظیر آسیاب
 - ۴- صرفه‌جویی در نیروی انسانی، برق، کاهش نرخ استهلاک دستگاه به علت ریزدانه بودن ضایعات
 - ۵- کاهش قیمت بدنه تولید شده، به جهت جایگزینی فلدسپار گران قیمت با ضایعات که تقریباً قیمتی ندارد.
- هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی امکان استفاده از این پتانسیل بالقوه در بدنه‌های کاشی گرانیتی، به عنوان بخشی از مواد اولیه است. این کار در دو مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی با هدف استفاده حداکثری از پودر ضایعاتی (بدون ایجاد تغییر در خواص) انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند.

بوجود می‌آید. این سنگ نسبت به سایر سنگ‌ها نظیر مرمریت دارای استحکام مکانیکی و مقاومت فشاری بالاتری می‌باشد و با داشتن مینرال‌های کوارتز، فلدسپات و نظیر آن، منبع خوبی برای تامین آلیت، اورتوکلاز و آنورتیت به عنوان فلدسپات‌های عمده فرمولاسیون بدنه های سرامیکی به شمار می‌آیند. سنگ‌های خام گرانیت دارای انواع مختلفی از نقطه نظر مقاومت فشاری، استحکام مکانیکی و نیروهای وارده است. وزن مخصوص آن بیش از ۲/۷ است که از گونه‌هایی نظیر مرمریت و... بیشتر می‌باشد. این سنگ‌ها دارای مقاومت 1690 kg/cm^2 ، مقاومت سایشی بر اثر اصطکاک 0.76 kg/cm^2 و مقاومت کششی 115 kg/cm^2 می‌باشد. طبق آمار، حجم معاملات در حوزه صنایع و معادن گرانیت در جهان در طی دهه گذشته با رشد ۶ درصدی به بیش از ۲۰ میلیارد دلار رسیده است. از این میزان رقمی بالغ بر ۶ میلیارد دلار در بخش استخراج و تولید سنگ هزینه و مابقی صرف تجیزات، لوازم، تکنولوژی‌ها و سایر بخش‌های مرتبط می‌گردد. نکته حائز اهمیت آنکه سنگ‌بری‌های گرانیت سالانه مقادیر زیادی ضایعات در طول فرایند خود تولید می‌کنند [۳]. به طور تقریبی یک‌سوم سنگ‌های ورودی کارخانه‌های سنگ‌بری، به ضایعات تبدیل می‌شود. بدیهی است تبدیل چنین حجم عظیمی از سرمایه به زباله بدون بازگشت، علاوه بر زیانهای زیست محیطی ناشی از ورود آنها به خاک و منابع آب‌های زیرزمینی، لطمات بزرگ اقتصادی نیز در بر خواهد داشت [4].

لذا این ایده که از بازیابی ضایعات تولید شده توسط صنعت، ماده اولیه‌ای جهت استفاده مجدد تهیه گردد، شاید بتواند باعث حفظ منابع غیر قابل تجدید طبیعی، سلامت و امنیت جوامع انسانی، کاهش هزینه‌ها و غیره شود [7]. ضایعات گرانیت به‌عنوان یک ماده اولیه با

روش آزمایش

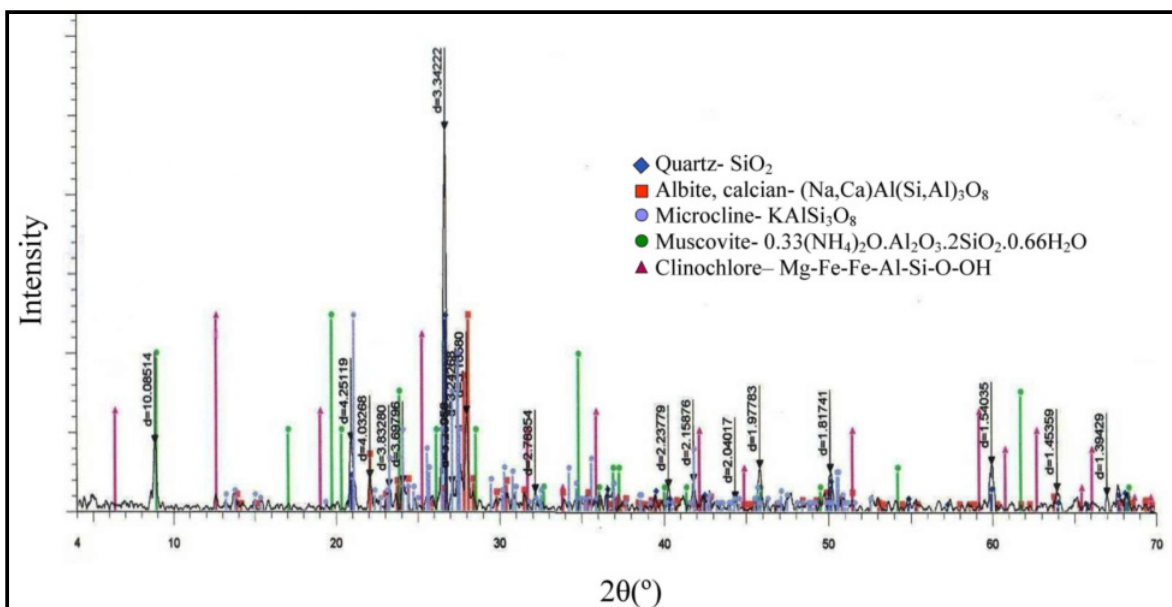
انتخاب پودر باطله گرانیت

که به طور عمده شامل کوارتز و فلدسپات و به همراه مقادیر جزئی از مسکویت است و نیز رنگ سفید پخت آن که نشان دهنده وجود منابع فلدسپاتی بیشتر و اکسیدهای رنگی کمتر (نظیر Fe_2O_3 و TiO_2) است. این سنگ برای ادامه آزمایشات انتخاب شد. نتایج XRF در جدول ۲ نشان دهنده وجود کانی های کوارتز و فلدسپات بوده و نتیجه آزمایش XRD (X-ray diffraction) آن مطابق شکل ۱ می باشد. استفاده از ضایعات سنگ گرانیت انتخاب شده در ترکیب بدنه، در دو مرحله آزمایشگاهی و صنعتی به شرح زیر انجام شد.

در ابتدا و به منظور انتخاب سنگ گرانیت مناسب برای استفاده در ترکیب بدنه کاشی گرانیتی، سنگ گرانیت (با توجه به تنوع سنگ گرانیت در ایران و تنوع آنالیز مینرالی آن ها)، و سپس کارخانه مصرف کننده آن مشخص شد تا بتوان از باطله های آن کارخانه جهت طرح استفاده کرد. مطابق جدول ۱ سنگ های گرانیتی مختلف، شامل نهبندان، صورتی کلاردشت، قرمز ناین، سبز پیرانشهر و سیاه همدان انتخاب و ترکیب آن ها به کمک آنالیز شیمیایی (XRF (X-ray fluorescence)، مشخص گردید. با توجه به کانی های موجود در سنگ گرانیت نهبندان

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سنگ های گرانیت

L.O.I	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	نام اکسید نام سنگ
۱/۹۹	-	۰/۸۶	۵/۵۴	۲/۶۳	۱۶/۸۷	۳/۳۰	۴/۱۳	۶۶/۱۸	قرمز ناین
-	۰/۷۱	۱/۶۸	۱/۵۵	۵/۰۸	۱۶/۹۵	۵/۶۹	۵/۴۸	۶۲/۵۷	سبز پیرانشهر
۰/۸۳	۱/۱۵	۱۴/۴۰	۱۱/۰۲	۰/۹۵	۱۳/۰۲	۲/۲۳	۱۱/۷۲	۴۵/۲۰	سیاه همدان
۰/۴	-	۰/۲۶	۱/۴۲	۵/۱۳	۱۲/۴۸	۲/۷۵	۱/۴۳	۷۶/۱۲	نهبندان
۱/۲۱	-	۱/۲۵	۳/۹۸	۰/۱۴	۱۹/۹	۰/۱۰	۲/۳۱	۶۸/۲۹	صورتی کلاردشت



شکل ۱- الگوی XRD پودر ضایعاتی سنگ گرانیت.

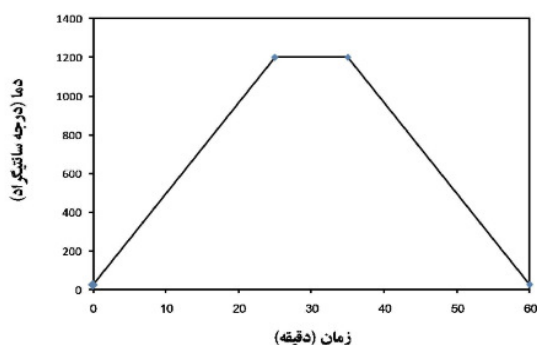
جدول ۲- آنالیز XRF سنگ گرانیت نهبدان

درصد	اکسید	درصد	اکسید
۰/۲۶	MgO	۲/۷۵	Na ₂ O
۵/۱۳	K ₂ O	۱۲/۴۸	Al ₂ O ₃
۱/۴۲	CaO	۷۶/۱۲	SiO ₂
۱/۲۳	Fe ₂ O ₃	۰/۱۲	SO ₃

ضخامت ۰/۵ سانتی متر توسط پرس سرد تک محور با فشار 450 kg/cm^2 تهیه شد. نتایج حاصل از اعمال فشارهای مختلف (450 و 400 ، 350 kg/cm^2) نشان داد که میزان فوق، مقدار بهینه جهت تراکم نمودن و ساخت نمونه های خام می باشد. در مرحله بعد نمونه ها در خشک کن با دمای 110°C قرار گرفته، سپس در کوره با دمای 1200°C پخته شد. از آنجا که این دسته از محصولات سرامیکی، از جمله بدنه های پخت سریع به حساب می آیند، مجموعه مراحل گرمایش از دمای محیط به دمای بیشینه، ماندن در دمای بیشینه و سرمایش تا دمای محیط، به مدت ۶۰ دقیقه و مطابق شکل ۲ صورت پذیرفت. زمان رسیدن از دمای محیط به 1200°C (گرمایش) و برعکس (سرمایش)، هر کدام ۲۵ دقیقه به طول انجامید. در نتیجه زمان باقی ماندن در دمای 1200°C ، ۱۰ دقیقه بود. پس از آن، استحکام خمشی سه نقطه ای نمونه های خام و پخته شده، جذب آب، انقباض بعد از خشک شدن و پخت و آنالیز حرارتی (PL-LAB STA, Germany) نمونه ها

مرحله آزمون های آزمایشگاهی

پودر ضایعاتی سنگ گرانیت با آب مخلوط شده، سپس از الک $100 \mu\text{m}$ عبور داده شد. گل الک شده در دمای 110°C خشک و سپس کلوخه ها بوسیله هاون خرد شد. فرمولاسیون های مختلفی از مخلوط کردن ضایعات گرانیت و رس های ۱ و ۲ و فلدسپار آماده شد (جدول ۳). بر این اساس سه سری نمونه شامل ۲۰، ۳۰ و ۴۰٪ رس (شامل میزان برابری از دو نوع رس) تهیه شد. در هر سری، میزان فلدسپار در ترکیب، با پودر ضایعات گرانیت جایگزین شد. نمونه هایی با طول ۷/۱، عرض ۳/۲ و



شکل ۲- دیاگرام سیکل پخت نمونه ها

مرحله آزمون‌های صنعتی

پس از تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، امکان استفاده از ضایعات سنگ گرانیت در یک کارخانه تولید کاشی گرانیتی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور دو بدنه معمول و سفید انتخاب و چهار فرمول مختلف، مطابق جدول ۴ تهیه شد.

جدول ۴- ترکیب شیمیایی نمونه های ساخته شده در کارخانه

نام نمونه	نمونه کد
بدنه معمولی	N
بدنه معمولی + ۴٪ GR (ضایعات گرانیت)	NGR4
بدنه معمولی + ۸٪ GR (ضایعات گرانیت)	NGR8
بدنه سفید	W
بدنه سفید + ۴٪ GR (ضایعات گرانیت)	WGR4
بدنه سفید + ۸٪ GR (ضایعات گرانیت)	WGR8

آزمایش شد. ریزساختار نمونه بهینه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (Cambridge S360) بررسی شد.

جدول ۳- ترکیب شیمیایی نمونه ها

ترکیب شماره	رس ۱	رس ۲	فلدسپار	ضایعات گرانیت
۱	۲۰	۲۰	۰	۶۰
۲	۲۰	۲۰	۱۰	۵۰
۳	۲۰	۲۰	۲۰	۴۰
۴	۲۰	۲۰	۳۰	۳۰
۵	۲۰	۲۰	۴۰	۲۰
۶	۲۰	۲۰	۵۰	۱۰
۷	۱۵	۱۵	۰	۷۰
۸	۱۵	۱۵	۱۰	۶۰
۹	۱۵	۱۵	۱۵	۵۵
۱۰	۱۵	۱۵	۲۰	۵۰
۱۱	۱۵	۱۵	۲۵	۴۵
۱۲	۱۵	۱۵	۳۰	۴۰
۱۳	۱۵	۱۵	۳۵	۳۵
۱۴	۱۵	۱۵	۴۰	۳۰
۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۲۵
۱۶	۱۵	۱۵	۵۰	۲۰
۱۷	۱۵	۱۵	۶۰	۱۰
۱۸	۱۰	۱۰	۰	۸۰
۱۹	۱۰	۱۰	۲۰	۶۰
۲۰	۱۰	۱۰	۴۰	۴۰
۲۱	۱۰	۱۰	۶۰	۲۰
۲۲	۱۰	۱۰	۷۰	۱۰

به این منظور عملیات آسیاب تر به مدت حداقل ۴۰ دقیقه انجام گرفت تا پس از عبور دادن دوغاب از الک مش $63 \mu\text{m}$ ، مانده روی الک کمتر از ۱٪ باشد. سپس گرانوله‌سازی انجام و گرانوله‌ها از الک مش $230 \mu\text{m}$

فلدسپات) و مجموع تقریباً یکسانی از اکسیدهای قلیایی و قلیایی خاکی (۹/۵۶٪ در ضایعات و ۱۰/۳۵٪ در فلدسپات) می‌باشند.

جدول ۵- ترکیب شیمیایی مواد استفاده شده (نتایج تست XRF)

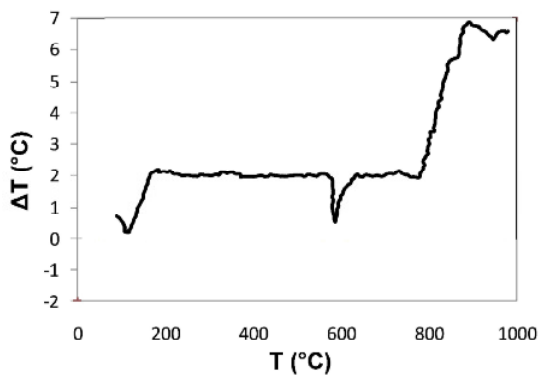
ماده درصد	رس ۲	فلدسپات	ضایعات گرانیت
SiO ₂	۶۵	۷۳/۹	۷۶/۱۲
Al ₂ O ₃	۲۵	۱۴/۳۶	۱۲/۴۸
CaO	۰/۵	۰/۷۹	۱/۴۲
Na ₂ O	۰/۴	۴/۰۶	۲/۷۵
K ₂ O	۰/۵	۵/۵	۵/۱۳
MgO	۰/۵۲	-	۰/۲۶
Fe ₂ O ₃	۰/۳۵	۰/۱۶	۱/۲۳
SO ₃	-	-	۰/۱۲
TiO ₂	۰/۰۴	-	-
LOI	۱۰/۵	۱/۱	۰/۴

همچنین باید توجه داشت که در ترکیب پودر سنگ گرانیت پس از برش، میزان جزیی از موادی که در حین فرآوری و برش آن (نظیر ابزار برش، روغنکاری و ...) مورد استفاده قرار میگیرند، وجود دارد. شکل ۳ توزیع اندازه ذرات ضایعات گرانیت را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که این توزیع دارای گستره بزرگی است، با اینحال کلیه ذرات دارای اندازه کمتر از ۱۰۰ μm می‌باشند. همچنین سطح ویژه پودر ضایعاتی گرانیت به روش BET، به میزان ۹/۹۶ m²/g ارزیابی شد.

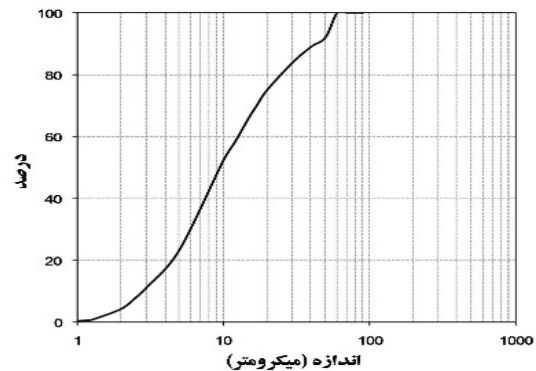
عبور داده شد. نمونه‌ها به کمک پرس تک محور، تحت فشار ۴۵۰ kg/cm² مترامک شده، عملیات پخت در کوره صنعتی (در دمای ۱۲۰۰°C) انجام گرفت. آزمایش جذب آب، طبق استاندارد ISO1054-3 صورت گرفت. بهترین فرمولاسیون با در نظر گرفتن این موارد انتخاب شد: الف) جذب آب مطابق استاندارد (کمتر از ۰/۵٪)؛ ب) بیشترین میزان پودر سنگ گرانیت مورد استفاده؛ ج) رنگ مناسب برای کاشی های ساخته شده به روش صنعتی. علاوه بر آزمون جذب آب، دانستیه نمونه‌های خام و پخته شده به روش ارشمیدس ارزیابی شد. آنالیزهای توزیع اندازه ذرات و TG و DTA روی پودر صورت گرفت. آزمون استحکام خمشی سه نقطه‌ای و اندازه‌گیری‌های تغییرات وزنی و ابعادی در حین خشک شدن و زیترینگ انجام شد.

نتایج مرحله آزمایشگاهی

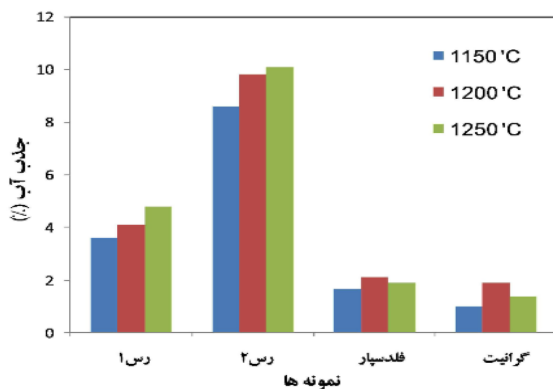
مواد اولیه‌ای که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند، شامل دو نوع رس، فلدسپار و پودر ضایعاتی سنگ گرانیت نه‌بندان بودند. ترکیب شیمیایی مواد استفاده شده در جدول ۵ آمده است. مطابق تحلیل‌های صورت گرفته روی پودر سنگ گرانیت ضایعاتی، کانی‌های عمده موجود در ضایعات گرانیت عبارتند از کوارتز (۲۷/۲٪ وزنی)، فلدسپات پتاسیک (۲۵٪ وزنی)، فلدسپات‌های سدیک و کلسیک (مجموعاً ۳۷/۱٪ وزنی) مسکویت (۷/۱٪ وزنی) و کلریت یا سیلیکات منیزیم (۳/۶٪ وزنی) مقایسه میان ترکیب شیمیایی ضایعات گرانیت و فلدسپات استفاده شده نشان می‌دهد که هر دو دارای میزان بالای SiO₂ (۷۶/۱۲٪ در ضایعات و ۷۳/۹٪ در فلدسپات)، مقدار مشابهی از Al₂O₃ (۱۲/۴۸٪ در ضایعات و ۱۴/۳۶٪ در



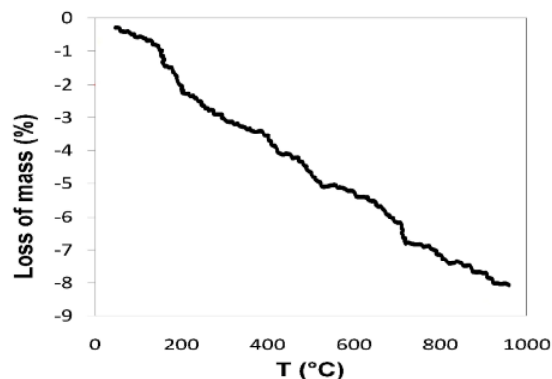
شکل ۴- آنالیز DTA مربوط به پودر سنگ گرانیت



شکل ۳- توزیع اندازه ذرات ضایعات گرانیت



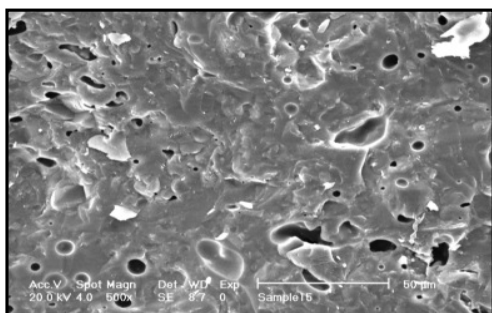
شکل ۶- جذب آب نمونه های زیرتر شده در دماهای مختلف



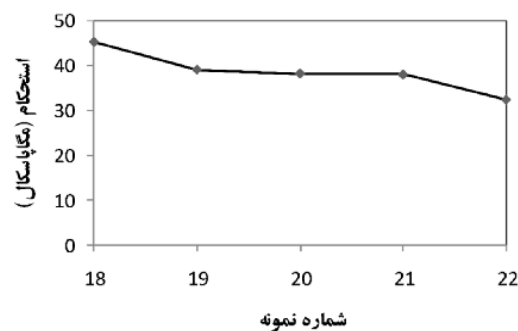
شکل ۵- آنالیز TG مربوط به پودر سنگ گرانیت

استحکام نمونه ها را، که فرمولاسیون آنها در جدول ۳ آورده شده، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که در یک محدوده معین از درصد وزنی رس و همچنین ضایعات گرانیت، جذب آب به مقدار حداقل خود رسیده است. افزایش درصد ضایعات گرانیت، از این میزان خاص، باعث افزایش جذب آب می‌گردد. شکل ۱۶، ریزساختار یک نمونه تهیه شده در آزمایشگاه را که به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است نشان می‌دهد. ریزساختار بدست آمده همانند ریزساختارهای معمول کاشی های گرانیتی، از همگنی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

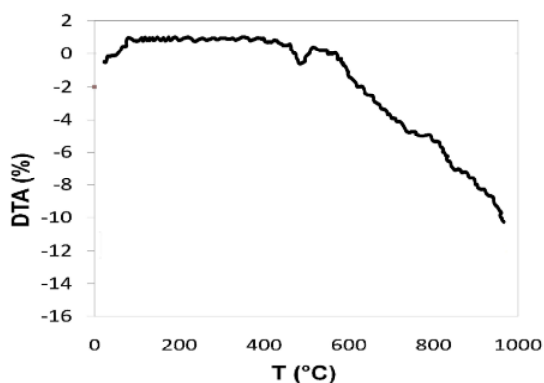
نتایج آزمون کالریمتری، شامل آنالیزهای DTA و TG به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ آمده است. در شکل ۴ پیک گرمادهی که می‌تواند در اثر تغییر حالت کوارتز α به β باشد، در حوالی دمای $570-580^{\circ}\text{C}$ به خوبی قابل ملاحظه است. همچنین در آنالیز TG، گراف مربوطه کاهش وزنی در حدود ۸٪ وزنی را نشان می‌دهد. قابلیت جذب آب قرص‌هایی که در سه درجه حرارت $1150-1200-1250^{\circ}\text{C}$ به مدت ۱ ساعت زیرتر شدند، در شکل ۶ نشان داده شده است. این میزان برای دو نوع رس استفاده شده در حدود ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر از فلدسپات و ضایعات گرانیت بود. شکل‌های ۷ تا ۱۵ میزان جذب آب، دانسیته و



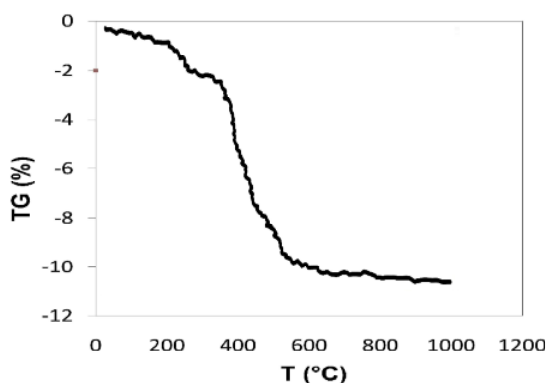
شکل ۱۶- ریزساختار نمونه بهینه ساخته شده در آزمایشگاه



شکل ۱۵- استحکام نمونه حاوی ۲۰٪ رس



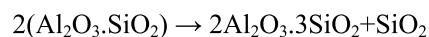
شکل ۱۷- DTA کاشی ساخته شده در آزمایشگاه



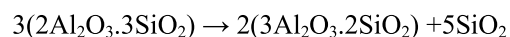
تصویر ۱۸- TG کاشی ساخته شده در آزمایشگاه

چنانکه در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، استفاده از ۴ درصد ضایعات در بدنه معمولی بدون اشکال است و افزایش آن به مقدار ۸ درصد رنگ را کمی تیره می‌کند. اما در بدنه سفید تغییر رنگ کاملاً محسوس است و برای رفع آن استفاده از سفید کننده‌های سرامیکی لازم است.

شکل‌های ۱۷ و ۱۸، منحنی‌های DTA و TG نمونه بهینه ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. از آنجا که رس‌ها به‌خاطر سطح ویژه بالای خود، میزان آب زیادی به‌خود می‌گیرند، لازم است این آب تا پیش از دمای 200°C حذف و خارج شود. اکسیداسیون ترکیبات آلی تا دمای 700°C رخ می‌دهد. در 573°C ، تبدیل حالت کوارتز به شکل بتا انجام می‌شود. بین دماهای 450°C و 600°C ، کائولینیت پیوندهای شیمیایی خود را از دست می‌دهد و به متاکائولن تغییر حالت می‌دهد. افت وزنی اندک در حوالی 600°C تا 700°C می‌تواند مربوط به مینرال-های ایلیت و مسکوویت باشد. در حوالی 900°C تا 1000°C شبکه به‌طور کامل متلاشی می‌گردد، سیلیس حذف شده، اسپینل تشکیل می‌گردد:

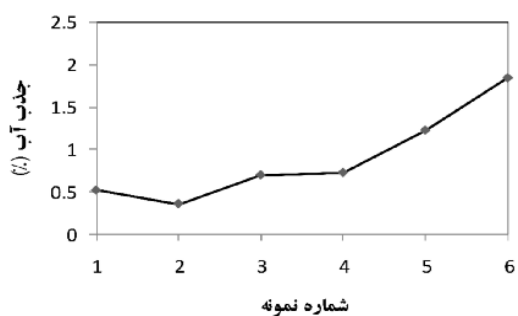


اسپینل نیز در حوالی 1150°C به مولایت تغییر حالت می‌دهد:

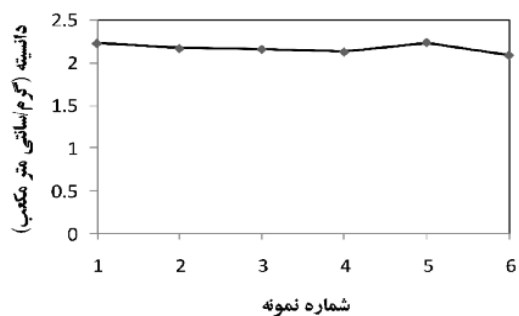


نتایج مرحله صنعتی

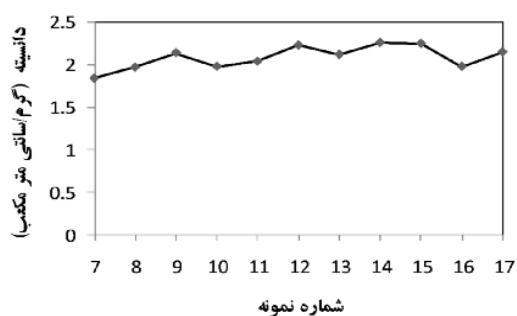
جدول ۶ نتایج مجموعه آزمایش‌های انجام شده را روی نمونه‌های ساخته شده در کارخانه نشان می‌دهد.



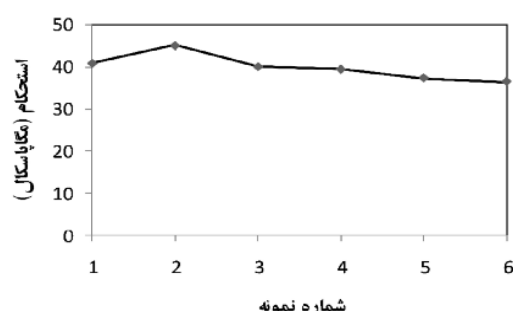
شکل ۸- جذب آب نمونه حاوی ۴۰٪ رس



شکل ۷- دانسیته نمونه حاوی ۴۰٪ رس



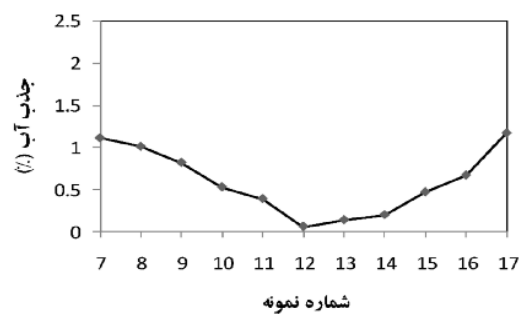
شکل ۱۰- دانسیته نمونه حاوی ۳۰٪ رس



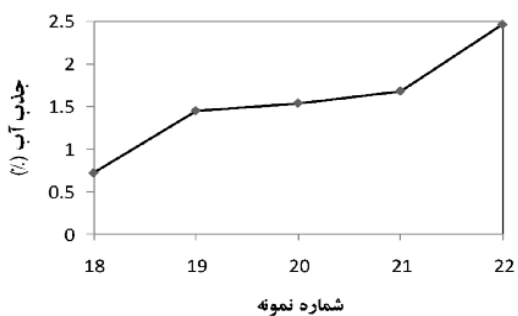
شکل ۹- استحکام نمونه حاوی ۴۰٪ رس



شکل ۱۲- استحکام نمونه حاوی ۳۰٪ رس



شکل ۱۱- جذب آب نمونه حاوی ۳۰٪ رس



شکل ۱۴- جذب آب نمونه حاوی ۲۰٪ رس



شکل ۱۳- دانسیته نمونه حاوی ۲۰٪ رس

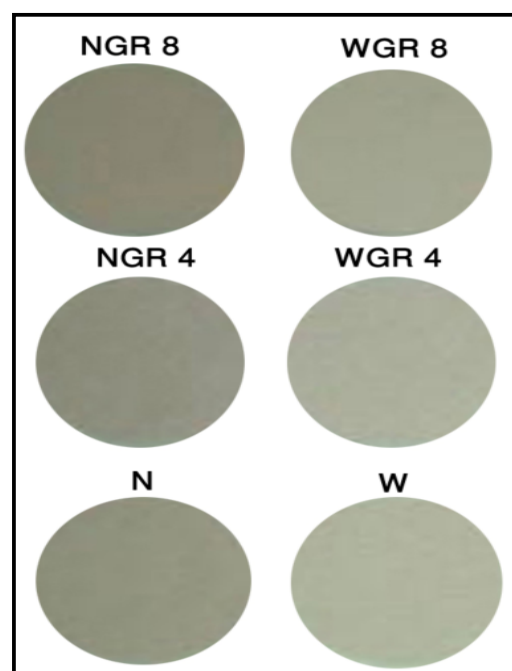
جدول ۶- نتایج به دست آمده مربوط به نمونه های ساخته شده در کارخانه بهسرام

WGR8	WGR4	W	NGR8	NGR4	N	کد نمونه / مشخصه
۳/۸۳	۳/۸۲	۳/۸۵	۳/۸۹	۳/۲۸	۴/۱۱	پرت حرارتی
۳/۸۴	۳/۸۷	۳/۹۳	۳/۹۳	۳/۹۸	۴/۲	ابعاد خام
۷/۶۷	۷/۶۷	۷/۱۷	۸/۱۶	۸/۱۶	۸/۱۴	انقباض
	عادی		کمی تیره	عادی		رنگ

درصد از ضایعات سنگ گرانیت را در ترکیب مواد اولیه کاشی های گرانیتی، مورد استفاده قرار داد. به عنوان مهم ترین نتیجه، می توان گفت که امکان استفاده از ضایعات در ترکیب وجود دارد، هر چند این کار باید با ملاحظات انجام گردد که علت آن تغییر رنگ ایجاد شده در بدنه است. در نمونه های آزمایشگاهی (نمونه های شماره ۱۱ تا ۱۵ و ۱۸) خواص پس از افزودن ضایعات گرانیتی همچنان در محدوده استاندارد باقی ماندند. به این ترتیب نشان داده شد که در یک محدوده معین از فرمولاسیون اولیه (۱۱ تا ۱۵) امکان به کار بردن ضایعات در ترکیب بدنه وجود دارد. در نمونه های صنعتی نیز نشان داده شد که در بدنه های معمولی تا ۸ درصد و در بدنه های حساس تر سفید تا ۴ درصد می توان از ضایعات گرانیت به عنوان بخشی از مواد اولیه استفاده نمود. پیشنهاد می شود، این ایده روی نمونه هایی با حساسیت کمتر (چه رنگ محصول و چه خواص نهایی آن) مورد آزمایش قرار گیرد. به نظر می رسد بتوان از میزان بیشتری از ضایعات سنگ گرانیت در کاشی های دیواری و کف در کاشی های گرانیتی، که دارای حساسیت کمتری نسبت به انواع گرانیتی هستند، استفاده کرد.

تقدیر و تشکر

از آقای مهندس مهرداد همتی مدیر تولید شرکت کاشی گرانیت بهسرام کاشان بدلیل مساعدت و زحمات بیدریغ ایشان قدردانی می شود.



شکل ۱۹- نمونه های ساخته شده در کارخانه بهسرام

نتیجه گیری

در این پژوهش امکان بهینه سازی فرمولاسیون کاشی گرانیتی (به دو صورت آزمایشگاهی و در کارخانه) مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که در آزمایشگاه و کارخانه، می توان به ترتیب مقادیر ۳۰ و ۴

منابع

- 1-Acchar, W., Vieira, F.A. & Hotza D., (2006), Effect of marble and granite sludge in clay materials, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 419:306-309.
- 2-Delgado, J., Vazquez, A., Juncosa, R. & Barrientos, V., (2006), Geochemical assessment of the contaminant potential of granite fines produced during sawing and related processes associated to the dimension stone industry, *J. Geochem. Explor.*, Vol. 88: 24– 27.
- 3-Hernandez-Crespo, M.S. & Rincon, J.M (2001), New porcelainized stoneware materials obtained by recycling of MSW incinerator fly ashes and granite sawing residues, *Ceram. Int.*, Vol. 27: 713–720.
- 4-Matteucci, F., Dondi, M. & Guarini, G., (2002), Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles, *Ceram. Int.*, Vol. 28: 873–880.
- 5-Menezes, R.R., Ferreira, H.S., Neves, G.A., Lira, H.L. & Ferreira H.C., (2005), Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 25: 1149–1158.
- 6-Monteiro, S.N., Pecanha, L.A. & Vieira, C.M.F., (2004), Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations, *J. Eur. Ceram. Soc.* Vol. 24: 2349–2356.
- 7-Torres, P., Fernandes, H.R., Agathopoulos, S., Tulyaganov, D.U. & Ferreira, J.M.F., (2004), Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 24: 3177–3185.
- 8-Vieira, C.M.F., Soares, T.M., Sánchez & R., (2004), Monteiro, S.N., Incorporation of granite waste in red ceramics, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 373: 115–121.