

ارزیابی پلاستی سینه بدنه‌های سرامیکی بر اساس رابطه استحکام خمشی خشک - فشار پرس

ابوالفضل گروئی^۱، فاطمه سادات ترک نیک^۲

^۱ آزمایشگاه خاک و بدنه، شرکت صنایع کاشی و سرامیک لوند، ^۲ پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

ab_gerveei@yahoo.com

چکیده:

پلاستی سینه یکی از ویژگی‌های مهم سیستم‌های رُس-آب است که به صورت تغییر شکل دائمی و بدون گسیختگی ماده تحت یک نیروی خارجی پیوسته، مشخص و بزرگ‌تر از مقدار بحرانی آن تعریف می‌شود که پس از برداشتن یا کاهش نیرو، در ماده باقی می‌ماند. با وجود این که روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری پلاستی سینه و تعیین مقدار آب بهینه در یک بدنه سرامیکی رسی معرفی شده است، لیکن رویه مشترکی برای تمامی بدنه‌های سرامیکی که ترکیبی از مواد اولیه با پلاستی سینه کم یا زیاد هستند، وجود ندارد. در این مقاله، خواص فیزیکی بدنه‌هایی متشکل از دو ماده اولیه بنتونیت سوراوچین با پلاستی سینه بالا و کوارتز رسی زنوز با پلاستی سینه پایین، با نسبت‌های ۱۰۰:۳۳، ۶۷:۳۳، ۶۷:۳۳ و ۱۰۰:۰ قبل از پخت مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه روش جدیدی مبتنی بر اندازه‌گیری استحکام خشک بدنه‌های پرس شده در فشارهای شکل‌دهی مختلف و مشخصه‌ای به نام «نمای پلاستی سینه» برای مقایسه پلاستی سینه بدنه‌های سرامیکی معرفی شد که قابلیت شبیه‌سازی شرایط واقعی فرآوری و تولید در کارخانجات کاشی و سرامیک‌های پرس شده را دارا است و علاوه بر سهولت انجام آزمون، نتایج قابل اعتمادی را حاصل می‌نماید.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱ تیر ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۳۹۴

کلید واژه:

پلاستی سینه، فشار پرس، استحکام خمشی خشک، نمای پلاستی سینه

۱- مقدمه

مصرف مواد اولیه معدنی است، فهم و درک اثر نیروهای شکل‌دهنده وارد بر فرآورده سرامیکی بسیار اهمیت دارد. به طور کلی می‌توان عوامل مؤثر بر پلاستی سینه مواد را به دو دسته مرتبط با رس (مقدار رطوبت، ترکیب کانی‌شناسی، توزیع اندازه ذره، نوع کاتیون‌های قابل تعویض، حضور نمک‌ها و مواد آلی) [۱، ۲، ۴] و مرتبط با فرآیند قالب‌گیری (فشار اعمالی، دما، ویژگی‌های آب و افزودنی‌های به‌کار رفته) تقسیم کرد [۵]. بسته به ماهیت و شکل ذرات رسی،

تغییر شکل دائمی (پلاستیک) و بدون گسیختگی ماده تحت نیروی خارجی پیوسته، مشخص و بزرگ‌تر از مقدار بحرانی (تنش تسلیم) را پلاستی سینه می‌نامند که پس از برداشتن یا کاهش نیرو، در ماده باقی می‌ماند [۳-۱] و از مشخصه‌های مهم مواد اولیه سرامیکی و سیستم‌های رُس-آب محسوب می‌گردد. در صنعت کاشی و سرامیک که صنعتی مبتنی بر



ویژه کاشی‌ها، فرآیند پرس کاری [۹] است که شامل پُر کردن قالب و متراکم سازی پودر و خارج کردن^۳ جسم فشرده شده از قالب می‌باشد [۱۰]. در روش‌های اندازه‌گیری پلاستی سیتة مواد اولیه و بدنه‌های سرامیکی، روشی که بر اساس شبیه‌سازی شرایط واقعی فرآوری و تولید باشد، دیده نمی‌شود. رفتار سیلان آزاد^۴ پودرها در پرس کردن قالب [۱۱]، متأثر از شرایط سطحی ذرات تشکیل دهنده و دو نیروی مؤثر بر سیلان پودر، یعنی اصطکاک و چسبندگی است. اصطکاک، مقاومت اعمال شده از سوی یک ذره در مقابل حرکت ذره دیگر در نقاط تماس است و چسبندگی، جذب متقابل و مقاومت در برابر جدایش ذرات پودر در تماس با یکدیگر [۱۲]، تحت تأثیر نیروهای واندروالس و الکترواستاتیکی یا پل‌های مویینگی [۱۰] و کشش سطحی [۱۳] است. چسبندگی در پودرهای مرطوب ناشی از پل‌های مایع و پل‌های جامد بین ذرات است. پل‌های مایع به محتوای آب و توزیع آن بستگی دارد و پل‌های جامد می‌توانند منجر به چسبندگی بالاتر و توده شدن^۵ شوند [۱۳]. در صورت جذب لایة نازکی از رطوبت توسط ذرات پودر ماده معدنی، روانکاری ذرات می‌تواند تا اندازه‌ای از جوش خوردگی سرد ذرات جلوگیری نموده و در نتیجه، نیروی اصطکاکی مقاوم در برابر حرکت نسبی ذرات را کاهش دهد [۱۲]. از آنجایی که نیروهای اصطکاکی و چسباننده به طور خطی با قطر ذره متناسبند، راهکار گرانول کردن^۶ (بزرگ‌تر کردن اندازه از طریق تجمع^۷ کنترل شده)، می‌تواند

آب به عنوان روانکار عمل می‌کند [۱]؛ بدین ترتیب که توده‌های با محتوای آب زیاد، به هنگام اعمال نیروهای نسبتاً کوچک، تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای می‌یابند اما توده‌های با محتوای آب کم، بر اثر تغییر شکل‌های کوچک، خرد می‌شوند [۱ و ۲]؛ در نهایت، با افزایش محتوای آب، چسبندگی زیاد شده و پلاستی سیتة تا مقدار بیشینه‌ای (یعنی جایگزینی تمامی هوای محبوس بین ذرات با آب) افزایش می‌یابد [۱].

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پلاستی سیتة مواد اولیه رسی وجود دارد. روش دقیق اندازه‌گیری پلاستی سیتة به کمک دستگاه‌های پلاستومتر است. اما در روش‌های تجربی و غیر دستگاهی به دلیل تأثیر عوامل متعدد و نیز به کارگیری دستگاه‌های مورد نیاز، اندازه‌گیری پلاستی سیتة دشوار است [۱، ۳ و ۶]. تا کنون روش‌های ففركورن^۱ [۷]، آتربرگ^۲ [۱ و ۳]، ریکه [۸] و سنجش کارپذیری به وسیله دست [۱ و ۳]، برای اندازه‌گیری پلاستی سیتة مواد معدنی استفاده شده‌اند. در روش ریکه، اختلاف دو حد رطوبت «پلاستیک» و «چسبندگی» معیار اندازه‌گیری پلاستی سیتة است؛ حد پلاستیک، حداقل درصد آبی است که برای قالب‌گیری رس بدون ظهور ترک (پلاستیک کردن رس) لازم است [۱ و ۳] و حد چسبندگی نیز معرف مقدار آبی است که رس چسبندگی‌اش را از دست می‌دهد و بین حد پلاستیک و حد مایع واقع است [۸]. حد مایع نیز مقدار رطوبتی است که در بالاتر از آن نمی‌توان ماده را قالب‌گیری کرد [۱ و ۳].

یکی از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی قطعات سرامیکی به

³ Ejection
⁴ Free-flowing
⁵ Aggregation
⁶ Granulation
⁷ Agglomeration

¹ Pfefferkorn
² Atterberg



تعریف کردند. مشخصه n که برای موادی با پلاستیسیته بالاتر، بیشتر است به نوع و ماهیت ماده اولیه و فشار شکل دهی پرس وابسته است ولی به اندازه ذرات تشکیل دهنده ماده اولیه چندان حساس نیست. در این پژوهش، با بررسی ارتباط بین فشار شکل دهی و استحکام خمشی خشک بدنه های سرامیکی دو جزئی متشکل از خاک بنتونیت سوراوچین با پلاستیسیته بالا و خاک کوارتز رسی زنوز با پلاستیسیته پائین در درصد های مختلف، معیاری برای اندازه گیری پلاستیسیته بدنه های سرامیکی تعریف می شود که می تواند در کارخانه های تولید محصولات سرامیکی با روش شکل دهی پرس، مفید و قابل اعتماد باشد.

۲- فعالیت های تجربی

دو ماده اولیه سرامیکی مورد مصرف در ترکیب بدنه های کاشی، شامل کوارتز رسی زنوز مرند (پلاستیسیته کم) و بنتونیت سوراوچین (پلاستیسیته زیاد) به ترتیب با کدهای Z-Q و B-S و آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ انتخاب شدند. فازهای بلوری این مواد معدنی به کمک دستگاه پراش سنج Philips PW3710 هلند با پرتو $\text{Co } K\alpha = 1/789.010 \text{ nm}$ در محدوده زاویه 2θ برابر $5-80^\circ$ با گام های 0.02° و زمان هر گام 0.8 ثانیه، پس از مقایسه با آنالیز کانی شناسی شناسنامه خاکها شناسایی شدند و نتیجه به دست آمده به صورت سه فاز اصلی در کنار فازهای فرعی با ترتیب اولویت وجود در جدول ۲ ارائه شدند.

ترکیب های دو جزئی B-S:Z-Q شامل ۱۰۰:۰، ۶۷:۳۳، ۳۳:۶۷ و ۰:۱۰۰، به صورت جداگانه به همراه آب و 0.15 درصد روان ساز جامد تری پلی فسفات سدیم (در مرحله آخر و پیش از تخلیه دوغاب) در آسیاب گلوله ای سریع تا رسیدن

پودرهایی با سیلان آزاد به قطر مناسب $200-20 \mu\text{m}$ [۱۰] برای شکل دهی در صنعت کاشی فراهم کند. سازوکارهایی که می توانند متراکم شدن بدنه را در روش پرس کاری کنترل نمایند شامل بازآرایی ذره^۱، تغییر شکل پلاستیک تماس های ذره ای و نیز خردشدگی^۲ هستند [۱۰]. بازآرایی تنها سازوکاری است که تا رسیدن به «چیده شدن متراکم تصادفی»^۳ رخ می دهد. برای دستیابی به دانسیته های بالاتر، تغییر شکل پلاستیک یا خردشدگی باید رخ دهد که در عمل، این سازوکارها با بازآرایی اولیه که در تنش های پل زنی^۴ کم اتفاق می افتد، هم پوشانی می کنند. وقتی تنش های تماسی از استحکام تسلیم ماده بیشتر می شوند، با تغییر شکل پلاستیک تماس های ذره ای، فاصله مرکز به مرکز بین ذرات کاهش و دانسیته و تراکم افزایش می یابد. با افزایش هم زمان سطح تماس که به طور معکوس تنش های تماسی را کاهش می دهد، تنش های تماسی با استحکام تسلیم ماده موازنه می شوند [۱۰ و ۱۴]. هنگامی که قطعه فشرده شده از قالب خارج می شود، اگر تنش برشی خارج کردن قطعه از قالب، از استحکام خام قطعه فشرده شده بیشتر باشد، شکست اتفاق می افتد. با افزایش فشارهای تراکمی، مقدار این تنش برشی ناشی از انبساط قطعه فشرده شده به هنگام خروج از قالب بیشتر می شود [۱۰].

گروئی و ترک نیک [۱۵] مشخصه ای به نام «نمای پلاستیسیته»، n ، را برای ارزیابی پلاستیسیته مواد اولیه سرامیکی شکل دهی شده به روش پرس و بر اساس رابطه استحکام خمشی خشک ماده اولیه-درصد رطوبت گرانول

¹ Particle rearrangement

² Fragmentation

³ Random Dense Packing, RDP

⁴ Bridging stress



به دوغاب‌هایی با زبره (درصد جامد مانده روی الک $63\mu\text{m}$) مشخص مورد سایش قرار گرفتند. به دلیل تأثیر «اندازه ذرات دوغاب» و خمیر حاصل از آن بر درصد آب‌کارپذیری و نیز درصد رطوبت حالت‌های اول و دوم ریکه، با تنظیم زمان آسیاب، مقدار زبره‌ها نزدیک به هم در نظر گرفته و پلاستی سیتة آن‌ها به روش ریکه تعیین شد (جدول ۳).

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد اولیه سرامیکی بررسی شده.

جمع	L.O.I.	S	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	کد ماده اولیه
۹۹/۶۵	۷/۳۳	< ۰/۰۲	۰/۵۳	۰/۲۰	۰/۲۵	۲/۷۳	۰/۰۳	۰/۶۸	۱۵/۹۸	۷۱/۹۰	Z-Q
۹۹/۹۶	۵/۳۰	< ۰/۰۲	۴/۰۳	۱/۰۳	۰/۸۵	۲/۴۶	۰/۳۱	۲/۰۸	۱۳/۸۷	۷۰/۰۱	B-S

جدول ۲- فازهای بلوری شناسایی شده در مواد اولیه سرامیکی بررسی شده.

فازهای بلوری	کد ماده اولیه
کوارتز، کلسیت، کائولینیت، دولومیت، مسکویت	Z-Q
کوارتز، آلیت، مسکویت، کائولینیت، کلسیت، مونت موریلونیت	B-S

جدول ۳- مشخصات دوغاب‌های تهیه شده برای اندازه‌گیری پلاستی سیتة ریکه بدنه‌های مورد بررسی.

B-S:Z-Q				مشخصه بررسی شده
۱۰۰:۰	۶۷:۳۳	۳۳:۶۷	۰:۱۰۰	
۲/۲	۱/۹	۲/۰	۲/۰	درصد جامد خشک مانده روی الک $63\mu\text{m}$ (زبره)
۵۱/۳	۴۸/۴	۴۴/۸	۴۱/۰	درصد آب دوغاب
۲۴/۰	۲۰/۰	۱۵/۰	۱۰/۰	زمان سایش (دقیقه)
۲۶/۰۵±۰/۰۶	۲۵/۹۲±۰/۰۹	۲۵/۳۵±۰/۱۴	۲۴/۸۴±۰/۲۵	درصد رطوبت حالت اول ریکه
۱۸/۲۴±۰/۰۳	۱۹/۶۳±۰/۱۸	۲۰/۷۱±۰/۱۱	۲۱/۴۵±۰/۰۷	درصد رطوبت حالت دوم ریکه
۷/۸۱	۶/۲۹	۴/۶۴	۳/۳۹	عدد پلاستی سیتة ریکه

خروج از خشک‌کن، کلوخه‌زدایی انجام و پودرهای حاصله با درصد رطوبت بین ۴/۶۵-۵/۰۳ و با گذراندن از الک با روزنه ۱ mm گرانول‌سازی شدند. گرانول‌ها پس از مدت ۱۸ h همگن سازی رطوبت، با استفاده از پرس هیدرولیک دستی آزمایشگاهی SACMI مدل PIL در فشار اولیه ۵۰ bar و فشارهای نهایی ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ bar به صورت تک‌محوری شکل‌دهی شدند. به طور نمونه، دانه‌بندی گرانول ترکیب حاوی خاک Z-Q به تنهایی با ۵ درصد رطوبت که

همچنین به منظور بررسی تأثیر فشار شکل‌دهی پرس بر استحکام خمشی خشک سه‌نقطه‌ای بدنه‌های سرامیکی، دوغاب‌هایی مشابه روش فوق و با شرایط مندرج در جدول ۴ نیز تهیه شد. به منظور رفع مشکلات ناشی از ویسکوزیته بالاتر دوغاب و کاهش راندمان سایش، درصد آب مصرفی برای بیج‌هایی با محتوای بالاتر خاک B-S، بیشتر انتخاب شد. دوغاب‌ها پس از تخلیه در ظرف‌های استیل، به خشک‌کن الکتریکی با دمای $105\pm 5^\circ\text{C}$ منتقل شدند. پس از ۲۴ h و



خشک بدنه‌های شکل‌دهی شده در فشارهای مختلف پرس اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری طول از کولیس با دقت 0.1 mm و حداکثر طول قابل اندازه‌گیری برابر با 200 mm استفاده شد. اندازه‌گیری استحکام خمشی در حالت خشک نیز با دستگاه استحکام‌سنج خمشی سه نقطه‌ای CRC مدل 535Q ساخت شرکت Gabrielli ایتالیا و مطابق استاندارد EN 100 انجام گرفت. دانسیته توده‌ای خشک بدنه‌های شکل‌دهی شده به روش غوطه‌وری در جیوه و بر اساس اصل ارشمیدس اندازه‌گیری شد.

مشابه دیگر بدنه‌ها بود، در جدول ۵ ارائه شده است. برای اندازه‌گیری درصد انبساط پس از پرس، تغییر ابعاد پس از خشک شدن و استحکام خمشی سه نقطه‌ای بدنه‌های خشک شده، دست‌کم چهار نمونه پرس شد. بدنه‌های پرس شده به مدت 24 h در هوای آزاد باقی ماندند و سپس در خشک‌کن الکتریکی در دمای $105 \pm 5^\circ \text{C}$ به مدت 18 h خشک شدند. بدنه‌ها پس از رسیدن به وزن ثابت و عدم وجود اختلاف در وزن بدنه‌ها در دو اندازه‌گیری متوالی، جهت سرد شدن تا دمای محیط به دسیکاتور منتقل شدند. مشخصه‌های خام و

جدول ۴- مشخصات دوغاب‌ها برای بررسی تأثیر فشار پرس بر استحکام خمشی خشک سه نقطه‌ای بدنه‌های سرامیکی.

Z-Q: B-S				مشخصه بررسی شده
۱۰۰:۰	۶۷:۳۳	۳۳:۶۷	۰:۱۰۰	مقدار بچ ماده اولیه یا بدنه سرامیکی (gr)
۵۰۰/۰	۵۰۰/۰	۵۰۰/۰	۵۰۰/۰	زمان سایش تر در آسیای سریع (min.)
۱۵/۰	۱۵/۵	۲۰/۵	۲۷/۵	دانسیته دوغاب ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
۱/۶۹۷	۱/۶۱۵	۱/۴۸۹	۱/۴۳۴	زمان ریزش 100 cc دوغاب از فوردکاپ با قطر نازل 8 mm (sec)
$3/98 \pm 0/02$	$4/08 \pm 0/02$	$3/80 \pm 0/05$	$4/07 \pm 0/03$	درصد آب دوغاب
$33/75 \pm 0/03$	$38/23 \pm 0/03$	$46/53 \pm 0/01$	$51/07 \pm 0/04$	درصد جامد مانده روی الک $63 \mu\text{m}$ (زیره)
۵/۲۲	۵/۳۶	۵/۵۸	۵/۷۳	درصد رطوبت گرانول هنگام پرس‌کاری
$4/65 \pm 0/18$	$4/77 \pm 0/11$	$5/03 \pm 0/12$	$4/87 \pm 0/04$	

جدول ۵- توزیع اندازه گرانول ماده اولیه Z-Q.

اندازه روزه الک (μm)	۶۰۰	۴۲۵	۳۰۰	۲۵۰	۱۸۰	۱۲۵	< ۱۲۵	جمع
درصد مانده روی الک	۱۹/۷	۴۸/۹	۲۰/۳	۳/۴	۴/۱	۲/۰	۱/۶	۱۰۰/۰

بدنه‌ها افزایش پیدا می‌کند. در فشار ثابت، با افزایش پلاستیسیته بدنه‌ها (کاهش درصد Z-Q) انبساط پس از پرس بعد از رسیدن به کمینه‌ای، افزایش می‌یابد. با توجه به مواد اولیه به کار رفته در این پژوهش، کمینه انبساط پس از پرس در تمامی فشارهای شکل‌دهی، تقریباً در بدنه حاوی ۳۳ درصد خاک با پلاستیسیته کم Z-Q مشاهده می‌شود.

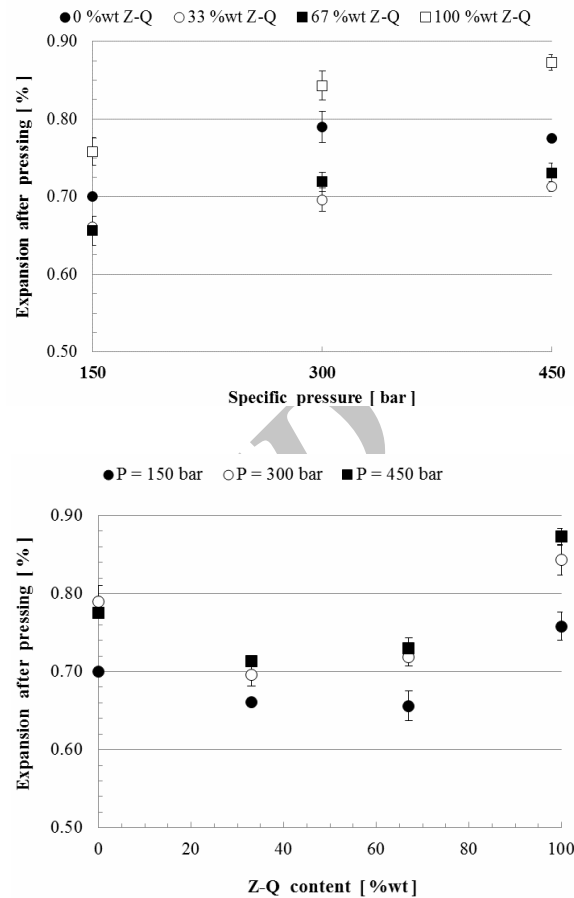
۳- نتایج و بحث

۳-۱- انبساط پس از پرس

شکل ۱ میزان انبساط پس از پرس را بر حسب فشارهای شکل‌دهی نشان می‌دهد. در درصد رطوبت ثابت گرانول‌ها، با افزایش فشار شکل‌دهی، انبساط پس از پرس تمامی

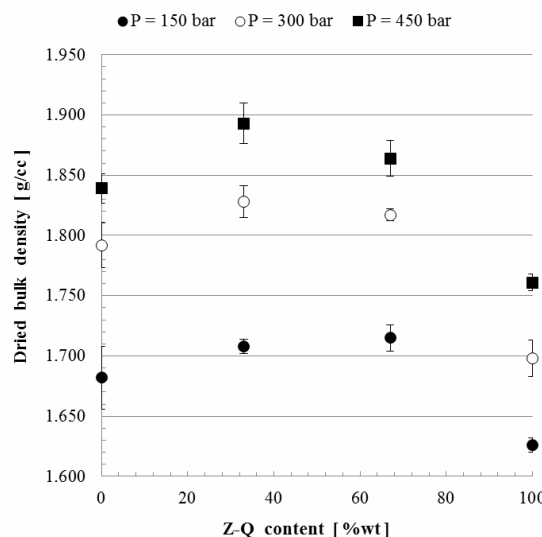


امر می‌توان گفت هنگامی که فشارهای تراکمی افزایش می‌یابند، نیروهای اصطکاکی عمل کننده میان گرانول و دیواره قالب افزایش می‌یابد و تنش برشی ناشی از انبساط قطعه فشرده شده به هنگام خروج از قالب نیز بیشتر می‌شود [۱۰]. فشارهای بالاتر منجر به دانسیته‌های توده‌ای خشک بالاتر می‌شود که حاکی از تراکم بیشتر بدنه‌ها است. با افزایش فشار شکل‌دهی، ناحیه تماس بین ذرات با تغییر شکل پلاستیک ناشی از روانکاری آب، افزایش می‌یابد و سبب می‌شود تا اتصالات جامد بیشتری تشکیل گردد [۱۶]. میزان انبساط پس از پرس بدنه خاک Z-Q با پلاستی سیتة کم در تمامی فشارهای شکل‌دهی، بیشتر از بدنه خاک B-S با پلاستی سیتة بالا است؛ اما بدنه‌های تهیه شده از مخلوط این دو ماده اولیه، مقادیر انبساط پس از پرس پایین‌تری را نشان می‌دهند. از آن‌جا که عواملی نظیر اصطکاک و خواص ماده (نظیر تنش تسلیم)، نقش مؤثری در بروز تنش‌های غیر یکنواخت در میان قطعه فشرده شده و میزان انبساط بالا پس از باربرداری و خروج قطعه فشرده شده دارند [۱۷]، انبساط بالاتر بدنه Z-Q نسبت به بدنه B-S و بدنه‌های ترکیبی از این دو ماده اولیه، به اختلاف قابل ملاحظه حضور فازهای بلوری تشکیل دهنده خاک مزبور یعنی مقدار قابل توجه کانی غیرپلاستیک کوارتز به عنوان فاز بلوری اصلی در کنار فاز دوم کلسیت و فاز سوم کائولینیت نسبت داده می‌شود که به وضوح از شدت پیک XRD شکل ۳ قابل مشاهده است. بدین ترتیب، رفتار انبساط پس از پرس بدنه‌ها، بازتابی از نوع و درصد فازهای بلوری، تأثیر روان‌کاری آب، نیروهای چسبندگی (نیروهای واندروالس، الکترواستاتیکی یا پل‌های موئینگی) [۱۰] و اصطکاک ذرات آن‌هاست.

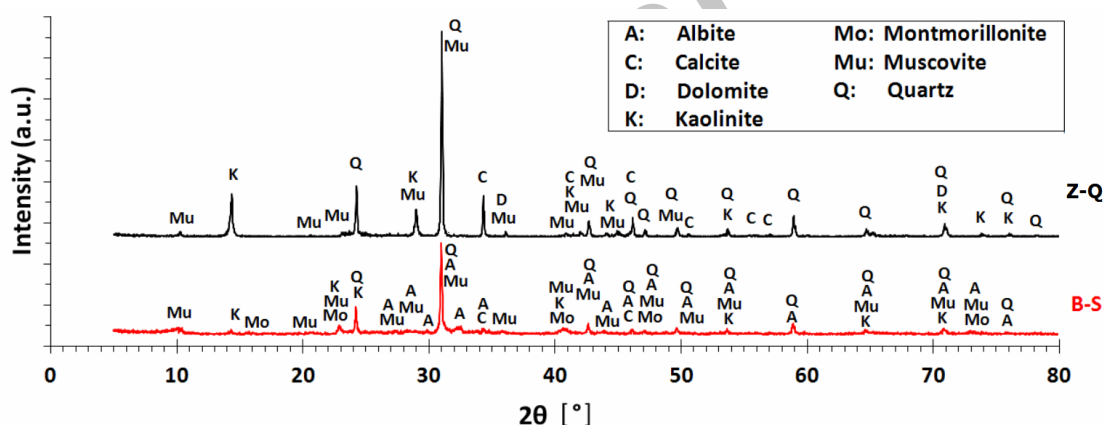


شکل ۱- انبساط پس از پرس بدنه‌های بررسی شده بر حسب فشار شکل‌دهی و ترکیب.

بررسی دانسیته توده‌ای خشک بدنه‌های شکل‌دهی شده بر حسب فشار شکل‌دهی که در شکل ۲ ارائه شده است، نشان می‌دهد که بیشترین دانسیته توده‌ای خشک در تمامی فشارهای شکل‌دهی بررسی شده، تقریباً در بدنه حاوی ۳۳ درصد Z-Q است. این بیشینه دانسیته توده‌ای خشک حتی از دانسیته توده‌ای ۱۰۰ درصد خاک B-S نیز بیشتر است. به بیان دیگر، ترکیبی از دو ماده اولیه با پلاستی سیتة‌های متفاوت (کم و زیاد)، در حصول بدنه‌ای با فشردگی بالا مؤثرتر از استفاده از تنها یک ماده اولیه است. در توجیه این



شکل ۲- دانسیته توده‌ای خشک بدنه‌های شکل‌دهی شده به عنوان تابعی از فشار شکل‌دهی و ترکیب بدنه.



شکل ۳- الگوهای XRD مواد اولیه مورد بررسی؛ Z-Q: کوآرتز رسی زنوز و B-S: بنتونیت سوراوجین.

خاک B-S و بدنه دارای ۶۷ درصد B-S، در هنگام خشک شدن منقبض می‌شوند و بدنه‌ای با نسبت Z-Q: B-S برابر با ۳۳:۶۷، تقریباً هیچ تغییر طولی را نشان نمی‌دهد. بدنه تک خاک Z-Q نیز در هنگام خشک شدن به طور قابل توجهی منبسط می‌شود. انبساط جزئی بدنه، به تضعیف نیروهای کشش سطحی که در نقش نیروهای تراکمی، ذرات را نزدیک یکدیگر نگه می‌دارند، نسبت داده می‌شود

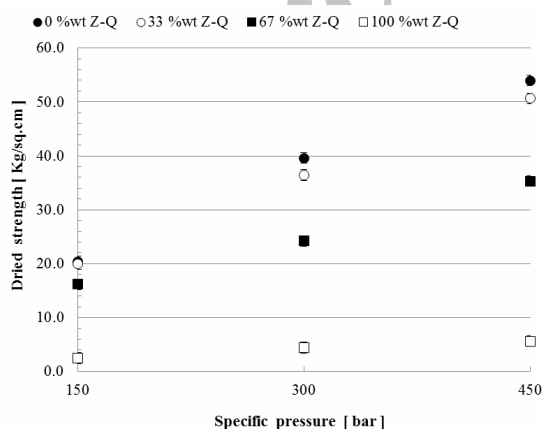
۳-۲- تغییر ابعاد پس از خشک شدن

شکل ۴ تغییر ابعاد بدنه‌های خشک شده را به عنوان تابعی از ترکیب و فشار شکل‌دهی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با کاهش پلاستیسیته بیج (افزایش درصد Z-Q)، بدنه شکل‌دهی شده در هنگام خشک شدن به طور فزاینده‌ای منبسط می‌شود. این در حالی است که بدنه تک



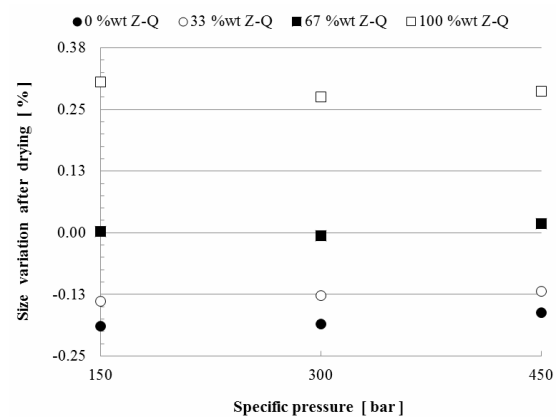
درصد ماده اولیه B-S (با پلاستی سیتة بالا) و/یا افزایش فشار اعمالی، استحکام خمشی خشک به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد که شیب این تغییرات برای بدنه‌های حاوی مواد اولیه با پلاستی سیتة ریکه بالاتر (نظیر خاک B-S یا ترکیب دارای درصد بالاتر B-S) بیشتر است. زیرا در فشار بالا، در اثر روانکاری آب موجود در لوله‌های مویینه، سطح تماس بین ذرات بر اثر تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد و با از میان رفتن فضاهای خالی (انقباض بیشتر)، اتصالات جامد بیشتری تشکیل می‌شود [۲۰] (شکل ۴)؛ از این‌رو ازدیاد تعداد اتصالات باعث افزایش استحکام خمشی خشک می‌گردد.

نکته‌ای که جالب توجه است این است که ترکیب B-S: Z-Q برابر با ۶۷:۳۳ که بالاترین دانسیته توده‌ای خشک را در تمامی فشارهای اعمالی دارد (شکل ۲)، لزوماً بیشترین استحکام خمشی خشک را از خود نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر، ممکن است بتوان نتیجه‌گیری کرد که دانسیته توده‌ای بالاتر نشان دهنده چپش متراکم‌تر ذرات در هنگام شکل‌دهی است اما قدرت اتصالات را برهمکنش‌های آب-رس و نیروهای چسباننده بین ذره‌ای [۱۰] در مواد پلاستیک تعیین می‌کنند.



شکل ۵- استحکام خمشی خشک بدنه‌های پرس شده به عنوان تابعی از ترکیب و فشار شکل‌دهی.

[۱۸]. در هنگام خشک شدن، نیروهای چسباننده [۱۰] در تقابل با نیروهای منبسط کننده (حاصل از بازیابی مؤلفه الاستیک کرنش، رهایش تنش شعاعی پس از باربرداری [۱۷، ۱۹ و ۲۰] و نیز تبخیر آب میان ذره‌ای [۱۸])، میزان تغییر ابعاد حاصل از خشک شدن را تعیین می‌کنند. انقباض جزئی بدنه نیز به حضور کانی‌های رده مونت موریلونیت با تمایل زیاد به حفظ رطوبت نسبت داده می‌شود که به هنگام خشک شدن با نزدیک شدن ذرات منفرد رس به یکدیگر و کاهش فضاهای خالی، باعث افزایش فشار مویینی و انقباض می‌شوند [۱۸]؛ البته با افزایش درصد رطوبت، اثر نیروهای چسباننده ناشی از پل‌های مایع و جامد بین ذرات بیشتر می‌گردد [۱۰ و ۱۳]. بنابراین، تغییر ابعاد بدنه در اثر خشک شدن، با ثابت نگهداشتن درصد رطوبت گرانول، به نحوی که قابل ملاحظه باشد به فشار شکل‌دهی حساس نیست ولی به شدت تابع ترکیب بدنه است.



شکل ۴- تغییر ابعاد بدنه‌های بررسی شده در اثر خشک شدن بر حسب ترکیب و فشار شکل‌دهی.

۳-۳- استحکام خمشی خشک

تغییرات استحکام خمشی خشک بدنه‌های پرس شده در فشارهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش



توانی با شکل عمومی $S = m \cdot P^n$ برآزش کرد که n و m اعداد ثابتی هستند. عدد ثابت n به نوع ماده اولیه بستگی دارد و هر چه ماده اولیه پلاستیک‌تر باشد، بزرگ‌تر است. هنگام مقایسه مواد بر اساس این معادله، لازم است که ضریب m برای مواد مورد بررسی یکسان‌سازی شود. برای این منظور، در یک فشار شکل‌دهی اختیاری (P_{arb}) که در فرآیند تولید سرامیک‌ها به عنوان فشار بهینه (استاندارد) شناخته می‌شود، محاسبات بعدی انجام می‌گیرد؛ برای نمونه در صنعت «کاشی» می‌توان مقدار P_{arb} را برابر با ۳۰۰ در نظر گرفت. با تعریف ضریب m به شکل عبارت $m = P_{arb}^q$ (که بنا بر مقدار m مقدار ثابت q مثبت یا منفی است)، معادله توانی اصلاح شده به صورت $S = P_{arb}^{q+n}$ در می‌آید. از این‌رو در معادلات اصلاح شده، صرفاً نمای n که از این به بعد با عنوان «نمای پلاستیسیته» به آن اشاره می‌شود، متفاوت است. بدین ترتیب از عبارت « $q+n$ » می‌توان برای قضاوت در خصوص پلاستیسیته مواد اولیه و بدنه‌های مختلف استفاده نمود. با توجه به معادله‌های توانی اصلاح شده (جدول ۶) می‌توان گفت که پلاستیسیته بدنه $B-S$ بیشتر از بدنه $Z-Q$ و دو بدنه دیگر است.

۳-۴- نمای پلاستیسیته n به عنوان معیاری جهت ارزیابی پلاستیسیته بدنه‌ها

در جدول ۶ صورت‌های خطی و توانی استحکام خمشی خشک بر حسب فشار شکل‌دهی در «درصد رطوبت گرانول ثابت» مبتنی بر داده‌های شکل ۵ ارائه شده است. در این معادلات، S ، نشان دهنده استحکام خمشی خشک (Kg/cm^2) و P ، فشار اعمالی است. مشخصه R^2 نیز مؤید دقت معادله مربوطه در تمام نقاط مورد بررسی جهت تخمین رابطه «استحکام خمشی خشک-فشار شکل‌دهی» است. در «درصد رطوبت گرانول ثابت» هر دو معادله خطی و توانی دقت قابل قبولی را نشان می‌دهند؛ اما با توجه به این که در بررسی رابطه استحکام خمشی خشک بر حسب درصد رطوبت گرانول در «فشار ثابت»، معادله توانی، دقت بالاتری را نسبت به معادله خطی نشان می‌دهد [۱۵] و بنابر سهولت استفاده، معادله توانی انتخاب شد و مورد بررسی قرار گرفت. در روش شکل‌دهی بدنه‌ها به روش پرس تک‌محوری، تغییرات استحکام خمشی خشک بر حسب فشار شکل‌دهی را می‌توان به صورت تابع

جدول ۶- معادلات برآزش شده برای داده‌های استحکام خمشی-فشار پرس اعمالی در شکل ۵.

B-S:Z-Q				ترکیب بدنه
۱۰۰:۰	۶۷:۳۳	۳۳:۶۷	۰:۱۰۰	شکل معادله
$S = 0.119 \cdot P + 4.454$ ($R^2 = 0.993$)	$S = 0.1023 \cdot P + 5.004$ ($R^2 = 0.998$)	$S = 0.0639 \cdot P + 6.072$ ($R^2 = 0.991$)	$S = 0.0105 \cdot P + 1.045$ ($R^2 = 0.984$)	خطی
$S = 0.2368 \cdot P^{0.892}$ ($R^2 = 0.997$)	$S = 0.2836 \cdot P^{0.8498}$ ($R^2 = 0.999$)	$S = 0.4801 \cdot P^{0.6975}$ ($R^2 = 0.983$)	$S = 0.0594 \cdot P^{0.7489}$ ($R^2 = 0.994$)	توانی اولیه
$S = P_{arb}^{0.639}$	$S = P_{arb}^{0.629}$	$S = P_{arb}^{0.569}$	$S = P_{arb}^{0.254}$	توانی اصلاح شده

شکل‌دهی (مثلاً) ۴۵۰ و ۱۵۰ bar به عنوان معیار دیگری برای پلاستیسیته بدنه‌ها نشان دهد؛ به گونه‌ای که نیازی

شکل ۵ را می‌توان مجدداً به صورتی رسم نمود که اختلاف مقادیر استحکام خمشی خشک را در فشارهای مختلف

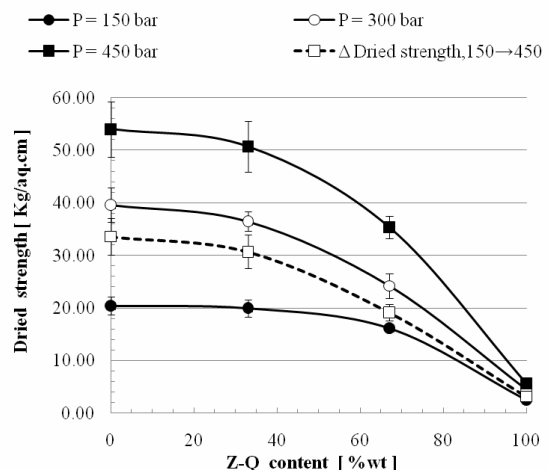


عمومی $S = m \cdot P^n$ که S ، استحکام خمشی خشک (Kg/cm^2) و P ، فشار شکل‌دهی است و نیز با تعریف ضریب m به صورت $m = P_{\text{arb}}^q$ که P_{arb} فشار شکل‌دهی بهینه در فرآیند تولید فرآورده سرامیکی مورد نظر و q عدد ثابتی است، این معادله به شکل اصلاح شده $S = P_{\text{arb}}^{q+n}$ در خواهد آمد که به وسیله نمای n که «نمای پلاستی سیتة» نام‌گذاری شد، می‌توان پلاستی سیتة بدنه‌های مختلف را که به روش پرس کاری شکل‌دهی می‌شوند، به طور کمی مقایسه نمود. نتایج نشان داد که مشخصه پلاستی سیتة n ، به نوع و ماهیت ماده اولیه مصرفی در بدنه و فشار شکل‌دهی پرس وابسته است و در بدنه‌ای حاوی مواد با پلاستی سیتة بالاتر، بیشتر است.

مراجع

- [1] F. A. Andrade, H. A. Al-Qureshi, D. Hotza, "Measuring the plasticity of clays: A review", *Appl. Clay Sci.*, 51 (1-2) (2011), 1-7.
- [2] W. W. Perkins, "Ceramic glossary", (Westerville, OH: The American Ceramic Society, 1995).
- [3] V. Doménech, E. Sánchez, V. Sanz, J. García, F. Ginés, "Assessing the plasticity of ceramic masses by determining indentation force", (III World Congress on Ceramic Tile Quality, AICE/ITC, Castellón, Spain, 1994), 59-69.
- [4] F. Bergaya, B. K. G. Theng, G. Lagaly, eds., "Handbook of clay science", (Elsevier, Amsterdam, 2006), 141-246.
- [5] V. Uz, A. Ceylan, B. Yilmaz, H. Ozdag, "Plasticity and drying behavior of terra cotta bodies in the presence of cellulose", *Appl. Clay Sci.*, 42(3-4) (2009), 675-678.
- [6] F. Händle, ed., "Extrusion in ceramics", (Springer, New York, 2007).

به بررسی معادلات ریاضی توانی نداشته باشد (شکل ۶). این معیار را از آن جهت می‌توان به عنوان اندیسی برای پلاستی سیتة انتخاب کرد که در مواد پلاستیک‌تر، نیروهای چسباننده ذرات [۱۰] قوی‌ترند و هر عاملی (مانند فشار پرس) که سبب برقراری تماس ذره-ذره بیشتری گردد، پل‌های جامد بیشتری ایجاد می‌کند و تفاوت مقادیر استحکام خشک در فشارهای مختلف، بیشتر است. به بیان دیگر، مقادیر استحکام‌های خشک در دو فشار شکل‌دهی مختلف، مشابه درصد‌های رطوبت ماده اولیه (یا بدنه) در حالت‌های اول و دوم ریکه است که از تفاضل آن‌ها اندیس دیگری برای پلاستی سیتة به دست می‌آید.



شکل ۶- رسم مجدد شکل ۵ که تفاضل مقادیر استحکام خشک بدنه‌های مختلف را در دو فشار ۴۵۰ bar و ۱۵۰ bar به عنوان معیار دیگری برای پلاستی سیتة نشان می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

بررسی داده‌های استحکام خمشی خشک بدنه‌هایی متشکل از دو ماده اولیه برحسب فشار شکل‌دهی اعمال شده نشان داد که با استفاده از معادله برازش یافته توانی به شکل



- Dielectric Response", *Powder Technol.* 50 (3) (1987), 237-241.
- [17] B. McWilliams, J. Dearnaley, "Ejection of Porous Compacts", (Department of Materials Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, 2012), 1-6.
- [18] "Technology through Machinery to Kilns for Sacmi Tile: Technological Notes on the Manufacture of Ceramic Tiles", (Sacmi Experimental Centre, Sacmi Imola, 1986).
- [19] N. Lordi, P. Shiromani, "Mechanisms of Hardness of Aged Compacts", *Drug Dev. Ind. Pharm.*, 10 (5) (1984), 729-752.
- [20] B. J. Briscoe, S. L. Rough, "The effects of wall friction on the ejection of pressed ceramic parts", *Powder Technol.* 99 (1998), 228-233.
- [7] J. H. Van der Velden, "Analysis of the Pfefferkorn test", *Ziegelind. Int.*, 32 (9) (1979), 532-542.
- [8] A. Kooistra, P. N. W. Verhoef, W. Broere, D.J.M. Ngan-Tillard, A.F. van Tol., "Appraisal of stickness of natural clays from laboratory tests", *Engineering Geology and Infrastructure*, (1998), 101-113 Ingeokring.
- [9] B. J. McEntire., "Dry pressing", *Engineered Material Handbook*, vol. 4: *Ceramics and glasses*, ed. S.J. Schneider, (ASM International, 1991) 140-146.
- [10] R. Riedel, I-Wei Chen, eds., "Ceramics science and technology, Synthesis and Processing (Vol. 3)", 1st Edition, (Weinheim Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2012), 1-35.
- [11] M. Takahashi, S. Suzuki, eds., "Compaction behavior and mechanical characteristics of ceramic powders", *Handbook of Ceramics and Composites*, vol. 1, ed. N.P. Cheremisinoff (Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1990), 65-97.
- [12] A. Nokhodchi, "An overview of the effect of moisture on compaction and compression", *Pharmaceutical Technology*, (January 2005), 46-67.
- [13] S. Dawoodbahai, C. T. Rhodes, "The effect of moisture on powder flow and on compaction and physical stability of tablets", *Drug Dev. Ind. Pharm.*, 15 (10) (1989), 1577-1600.
- [14] D. Bortzmeyer, "Dry pressing of ceramic powders", *Ceramic Processing*, ed. R.A. Terpstra, (Chapman & Hall, London, Weinheim, 1995).
- [۱۵] ا. گروئی، ف. س. ترک‌نیک، "ارزیابی پلاستی‌سیتة مواد اولیه سرامیکی بر اساس رابطه استحکام خشک-درصد رطوبت گرانول"، اولین کنفرانس بین‌المللی کاشی، سرامیک و چینی بهداشتی ایران (ICTS-2014)، تهران، ۹-۸ آذر ۱۳۹۳.
- [16] F. Khan, N. Pilpel, "An Investigation of Moisture Sorption in Microcrystalline Cellulose Using Sorption Isotherms and