

## ارزیابی پلاستی‌سیتۀ بدنۀ‌های سرامیکی بر اساس رابطه‌استحکام خمشی خشک- فشار پرس

ابوالفضل گروئی<sup>۱</sup>، فاطمه سادات ترک نیک<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> آزمایشگاه خاک و بدنۀ، شرکت صنایع کاشی و سرامیک الوند، <sup>۲</sup> پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

ab\_gerveei@yahoo.com

### چکیده:

پلاستی‌سیتۀ یکی از ویژگی‌های مهم سیستم‌های رُس-آب است که به صورت تعییر شکل دائمی و بدون گسینختگی 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 مختلفی برای اندازه‌گیری پلاستی‌سیتۀ و تعیین مقدار آب بهینه در یک بدنۀ سرامیکی رسی معروف شده است، لیکن رویه مشترکی برای تمامی بدنۀ‌های سرامیکی که ترکیبی از مواد اولیه با پلاستی‌سیتۀ کم یا زیاد هستند، وجود ندارد. در این مقاله، خواص فیزیکی بدنۀ‌هایی متشکل از دو ماده اولیه بنتونیت سوراوجین با پلاستی‌سیتۀ بالا و کوارتز رسی زنوز با پلاستی‌سیتۀ پایین، با نسبت‌های ۰:۱۰۰، ۰:۳۳۵، ۰:۷۶۷ و ۰:۱۰۰ قبل از پخت مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه روش جدیدی مبتنی بر اندازه‌گیری استحکام خشک بدنۀ‌های پرس شده در فشارهای شکل‌دهی مختلف و مشخصه‌ای به نام «نمای پلاستی‌سیتۀ» برای مقایسه پلاستی‌سیتۀ بدنۀ‌های سرامیکی معرفی شد که قابلیت شبیه‌سازی شرایط واقعی فراوری و تولید در کارخانجات کاشی و سرامیک‌های پرس شده را دارد و علاوه بر سهولت انجام آزمون، نتایج قابل اعتمادی را حاصل می‌نماید.

### اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱ تیر ۱۳۹۴

پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۳۹۴

### کلید واژه:

پلاستی‌سیتۀ، فشار پرس، استحکام خمشی خشک، نمای پلاستی‌سیتۀ

### ۱- مقدمه

صرف مواد اولیه معدنی است، فهم و درک اثر نیروهای شکل‌دهنده وارد بر فرآورده سرامیکی بسیار اهمیت دارد. به طور کلی می‌توان عوامل مؤثر بر پلاستی‌سیتۀ مواد را به دو دستهٔ مرتبط با رس (مقدار رطوبت)، ترکیب کانی‌شناسی، توزیع اندازهٔ 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 به کار رفته) تقسیم کرد [۵]. بسته به ماهیت و شکل ذرات رسی،

تعییر شکل دائمی (پلاستیک) و بدون گسینختگی ماده تحت نیروی خارجی پیوسته، مشخص و بزرگ‌تر از مقدار بحرانی (نشانش تسلیم) را پلاستی‌سیتۀ 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<sup>۳</sup> جسم فشرده شده از قالب می‌باشد [۱۰]. در روش‌های اندازه‌گیری پلاستی سیتۀ مواد اولیه و بدنۀ های سرامیکی، روشی که بر اساس شبیه‌سازی شرایط واقعی فرآوری و تولید باشد، دیده نمی‌شود. رفتار سیلان آزاد<sup>۴</sup> پودرهای در پر 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 موینگی [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<sup>۵</sup> شوند [۱۳]. در صورت جذب لایه نازکی از رطوبت توسط ذرات پودر ماده معدنی، روانکاری ذرات می‌تواند تا اندازه‌ای از جوش خودگی سرد ذرات جلوگیری نموده و درنتیجه، 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<sup>۶</sup> (بزرگ‌تر کردن اندازه از طریق تجمع<sup>۷</sup> کتترل 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 سیتۀ تا مقدار بیشینه‌ای (یعنی جایگزینی تمامی هوای محبوس بین ذرات با آب) افزایش می‌یابد [۱].

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پلاستی سیتۀ مواد اولیه رسی وجود دارد. روش دقیق اندازه‌گیری پلاستی سیتۀ 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 سیتۀ دشوار است [۱، ۳ و ۶]. تا کنون روش‌های ففرکورن<sup>۸</sup>، آتربرگ<sup>۹</sup> و ۳، ریکه<sup>۱۰</sup> و سنجش کارپذیری به وسیله دست [۱ و ۳]، برای اندازه‌گیری پلاستی سیتۀ مواد معدنی استفاده شده‌اند. در روش ریکه، اختلاف دو حد رطوبت «پلاستیک» و «چسبندگی» معیار اندازه‌گیری پلاستی سیتۀ است؛ حد پلاستیک، حداقل درصد آبی است که برای قالب‌گیری رس بدون ظهرور 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

<sup>3</sup> Ejection

<sup>4</sup> Free-flowing

<sup>5</sup> Aggregation

<sup>6</sup> Granulation

<sup>7</sup> Agglomeration

<sup>1</sup> Pfefferkorn  
<sup>2</sup> Atterberg



تعریف کردند. مشخصه  $n$  که برای موادی با پلاستیسیته بالاتر، بیشتر است به نوع و ماهیت ماده اولیه و فشار شکل دهنده پرس وابسته است ولی به اندازه ذرات تشکیل دهنده ماده اولیه چندان حساس نیست. در این پژوهش، با بررسی ارتباط بین فشار شکل دهنده و استحکام خمثی خشک بدنه های سرامیکی دو جزئی متصل از خاک بنتونیت سوراوجین 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 دهنده 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 سوراوجین (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 در پرتو  $\text{Co K}_\alpha = 1/7890 \text{ nm}$  در محدوده زوایه  $20^\circ - 80^\circ$  با گام های  $0.2^\circ$  و زمان هر گام  $8/0$  ثانیه، پس از مقایسه با آنالیز کانی شناسی شناسنامه خاک ها 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  $100:0$ ،  $77:33$ ،  $67:33$  و  $15:85$  به صورت جداگانه به همراه آب و 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  $200-2000 \mu\text{m}$  [۱۰] برای شکل دهنده در صنعت کاشی فراهم کند. سازو کارهایی که می توانند متراکم شدن بدنه را در روش پرس کاری کنترل نمایند شامل بازارایی ذره<sup>۱</sup>، تغییر شکل پلاستیک تماس های ذره ای و نیز خردشگی<sup>۲</sup> هستند [۱۰]. بازارایی تنها سازو کاری است که تا رسیدن به «چیه شدن متراکم تصادفی»<sup>۳</sup> رخ می دهد. برای دستیابی به دانسیته های بالاتر، تغییر شکل پلاستیک یا خردشگی باید رخ دهد که در عمل، این سازو کارها با بازارایی اولیه که در تنش های پل زنی<sup>۴</sup> 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 موازن می شوند [۱۰ و ۱۴]. هنگامی که قطعه فشرده شده از قالب خارج می شود، اگر تنش بُرشی خارج کردن قطعه از قالب، از استحکام خام قطعه فشرده شده بیشتر باشد، شکست اتفاق می افتد. با افزایش فشارهای تراکمی، مقدار این تنش بُرشی ناشی از انبساط قطعه فشرده شده به هنگام خروج از قالب بیشتر می شود [۱۰].

گروئی و ترکنیک [۱۵] مشخصه های به نام «نمای پلاستیسیته»،  $n$ ، را برای ارزیابی پلاستیسیته مواد اولیه سرامیکی شکل دهنده شده به روش پرس و بر اساس رابطه استحکام خمثی خشک ماده اولیه- درصد رطوبت گرانول

<sup>1</sup> Particle rearrangement

<sup>2</sup> Fragmentation

<sup>3</sup> Random Dense Packing, RDP

<sup>4</sup> Bridging stress



و نیز درصد رطوبت حالت های اول و دوم ریکه، با تنظیم زمان آسیاب، مقدار زبره ها نزدیک به هم در نظر گرفته و پلاستی سیتۀ آن ها به روش ریکه تعیین شد (جدول ۳).

به دوغاب هایی با زبره (درصد جامد مانده روی الک  $63\text{ }\mu\text{m}$ ) مشخص مورد سایش قرار گرفتند. به دلیل تأثیر «اندازۀ ذرات دوغاب» و خمیر حاصل از آن بر درصد آب کارپذیری

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد اولیۀ سرامیکی بررسی شده.

کد ماده اولیه	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	S	L.O.I.	جمع
Z-Q	۷۱/۹۰	۱۵/۹۸	۰/۶۸	۰/۰۳	۲/۷۳	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۵۳	< ۰/۰۲	۷/۳۳	۹۹/۶۵
B-S	۷۰/۰۱	۱۳/۸۷	۲/۰۸	۰/۳۱	۲/۴۶	۰/۸۵	۱/۰۳	۴/۰۳	< ۰/۰۲	۵/۳۰	۹۹/۹۶

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

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

جدول ۳- مشخصات دوغاب های تهیه شده برای اندازه گیری پلاستی سیتۀ ریکه بدنۀ های 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 $63\text{ }\mu\text{m}$ (زبره)
۵۱/۳	۴۸/۴	۴۴/۸	۴۱/۰	درصد آب دوغاب
۲۴/۰	۲۰/۰	۱۵/۰	۱۰/۰	زمان سایش (دقیقه)
$۲۶/۰۵ \pm ۰/۰۶$	$۲۵/۹۲ \pm ۰/۰۹$	$۲۵/۳۵ \pm ۰/۱۴$	$۲۴/۸۴ \pm ۰/۲۵$	درصد رطوبت حالت اول ریکه
$۱۸/۲۴ \pm ۰/۰۳$	$۱۹/۶۳ \pm ۰/۱۸$	$۲۰/۷۱ \pm ۰/۱۱$	$۲۱/۴۵ \pm ۰/۰۷$	درصد رطوبت حالت دوم ریکه
۷/۸۱	۶/۲۹	۴/۶۴	۳/۳۹	عدد پلاستی سیتۀ ریکه

خروج از خشک کن، کلوخه زدایی انجام و پودرهای حاصله با درصد رطوبت بین  $۴/۶۵-۵/۰۳$  و با گذراندن از الک با روزنۀ  $1\text{ mm}$  گرانول سازی شدند. گرانول ها پس از مدت  $18\text{ h}$  همگن سازی رطوبت، با استفاده از پرس هیدرولیک دستی آزمایشگاهی SACMI مدل PIL در فشار اولیۀ  $50\text{ bar}$  و فشارهای نهایی  $150\text{, }300\text{ و }450\text{ bar}$  به صورت تک محوری شکل دهی شدند. به طور نمونه، دانه بندی گرانول ترکیب حاوی خاک Z-Q به تنهایی با ۵ درصد رطوبت که

همچنین به منظور بررسی تأثیر فشار شکل دهی پرس بر استحکام خمshi خشک سه نقطه ای بدنۀ های سرامیکی، دوغاب هایی 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 بچه هایی با محتوای بالاتر خاک B-S بیشتر انتخاب شد. دوغاب ها پس از تخلیه در ظرف های استیل، به خشک کن الکتریکی با دمای  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  منتقل شدند. پس از  $24\text{ h}$  و



خشک بدنه‌های شکل دهی شده در فشارهای مختلف پرس اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری طول از کولیس با دقت  $0.01\text{ mm}$  و حداکثر طول قابل اندازه‌گیری برابر با  $200\text{ mm}$  استفاده شد. اندازه‌گیری استحکام خمی سه نقطه‌ای CRC مدل 535Q ساخت شرکت Gabbrielli ایتالیا و مطابق استاندارد EN 100 100 انجام گرفت. دانسیتۀ توده‌ای خشک بدنه‌های شکل دهی 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 خمی سه نقطه‌ای بدنه‌های خشک شده، دست‌کم چهار نمونه پرس شد. بدنه‌های پرس شده به مدت  $24\text{ h}$  در هوای آزاد باقی ماندند و سپس در خشک کن الکتریکی در دمای  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  به مدت  $18\text{ h}$  خشک شدند. بدنه‌ها پس از رسیدن به وزن ثابت و عدم وجود اختلاف در وزن بدنه‌ها در دو اندازه‌گیری متوالی، جهت سردشدن تا دمای محیط به دسیکاتور منتقل شدند. مشخصه‌های خام و

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

Z-Q: B-S				مشخصه بررسی شده
۱۰۰:۰	۶۷:۳۳	۳۳:۶۷	۰:۱۰۰	
۵۰۰/۰	۵۰۰/۰	۵۰۰/۰	۵۰۰/۰	مقدار بج ماده اولیه یا بدنۀ سرامیکی (gr)
۱۵/۰	۱۵/۵	۲۰/۵	۲۷/۵	زمان سایش تر در آسیای سریع (min)
۱/۶۹۷	۱/۶۱۵	۱/۴۸۹	۱/۴۳۴	دانسیتۀ دوغاب ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
$۳/۹۸ \pm 0/02$	$۴/۰۸ \pm 0/02$	$۳/۸۰ \pm 0/05$	$۴/۰۷ \pm 0/03$	زمان ریش $100\text{ cc}$ دوغاب از فوردکاپ با قطر نازل $8\text{ mm}$ (sec)
$۳۳/۷۵ \pm 0/03$	$۳۸/۲۳ \pm 0/03$	$۴۶/۵۳ \pm 0/01$	$۵۱/۰۷ \pm 0/04$	درصد آب دوغاب
۵/۲۲	۵/۳۶	۵/۵۸	۵/۷۳	درصد جامد مانده روی الک $63\text{ }\mu\text{m}$ (زبره)
$۴/۶۵ \pm 0/18$	$۴/۷۷ \pm 0/11$	$۵/۰۳ \pm 0/12$	$۴/۸۷ \pm 0/04$	درصد رطوبت گرانول هنگام پرس کاری

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

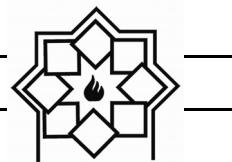
اندازه روزنۀ الک ( $\mu\text{m}$ )									
جمع < ۱۲۵ ۱۲۵ - ۱۸۰ ۱۸۰ - ۲۵۰ ۲۵۰ - ۳۰۰ ۳۰۰ - ۴۲۵ ۴۲۵ - ۶۰۰ ۶۰۰									
درصد مانده روی الک									
۱۰۰/۰	۱/۶	۲/۰	۴/۱	۳/۴	۲۰/۳	۴۸/۹	۱۹/۷		

بدنه‌ها افزایش پیدا می‌کند. در فشار ثابت، با افزایش پلاستیسیتۀ بدنه‌ها (کاهش درصد 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 شکل دهی، تقریباً در بدنۀ حاوی ۳۳ درصد خاک با پلاستیسیتۀ کم Z-Q مشاهده می‌شود.

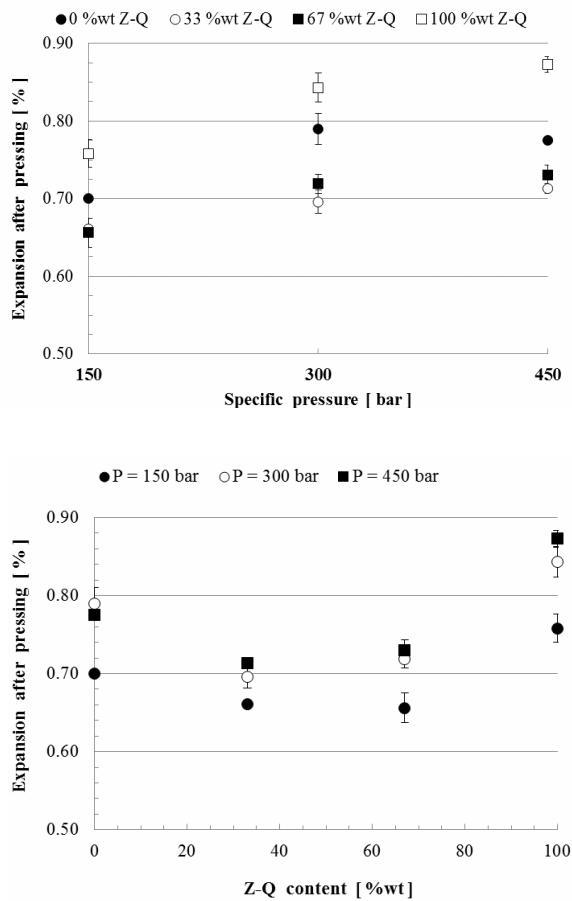
### ۳- نتایج و بحث

#### ۱-۳- انبساط پس از پرس

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

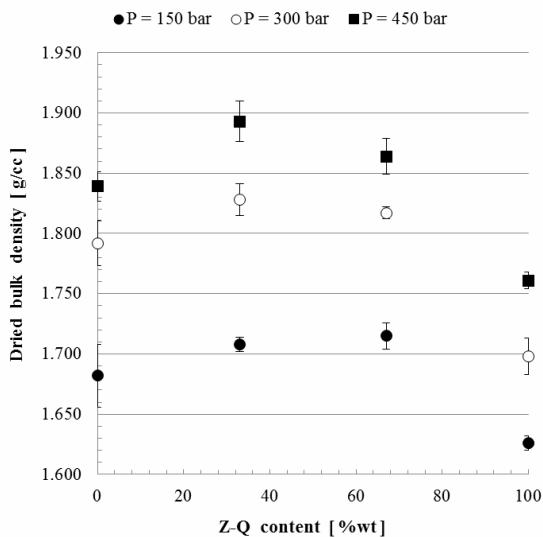
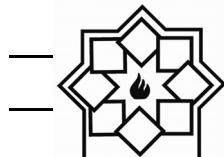


امر می‌توان گفت هنگامی که فشارهای تراکمی افزایش می‌یابند، نیروهای اصطکاکی عمل کننده میان گرانول و دیواره قالب افزایش می‌یابد و تنش برشی ناشی از انبساط قطعه فشرده شده به هنگام خروج از قالب نیز بیشتر می‌شود [۱۰]. فشارهای بالاتر منجر به دانسیته‌های توده‌ای خشک بالاتر می‌شود که حاکی از تراکم بیشتر بدندها 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 بدنۀ خاک Z-Q با پلاستیسیته B-S کم در تمامی فشارهای شکل‌دهی، بیشتر از بدنۀ خاک با پلاستیسیته بالا است؛ اما بدندهای 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 تسليم)، 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 بدنۀ Z-Q نسبت به بدنۀ B-S و بدندهای ترکیبی از این دو ماده اولیه، به اختلاف قابل ملاحظه حضور فازهای بلوری تشکیل دهنده خاک مجبور 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 بدندها، بازنگاری از نوع و درصد فازهای بلوری، تأثیر روانکاری آب، نیروهای چسبندگی (نیروهای واندروالس، الکترواستاتیکی یا پل‌های مویننگی) [۱۰] و اصطکاک ذرات آن‌هاست.

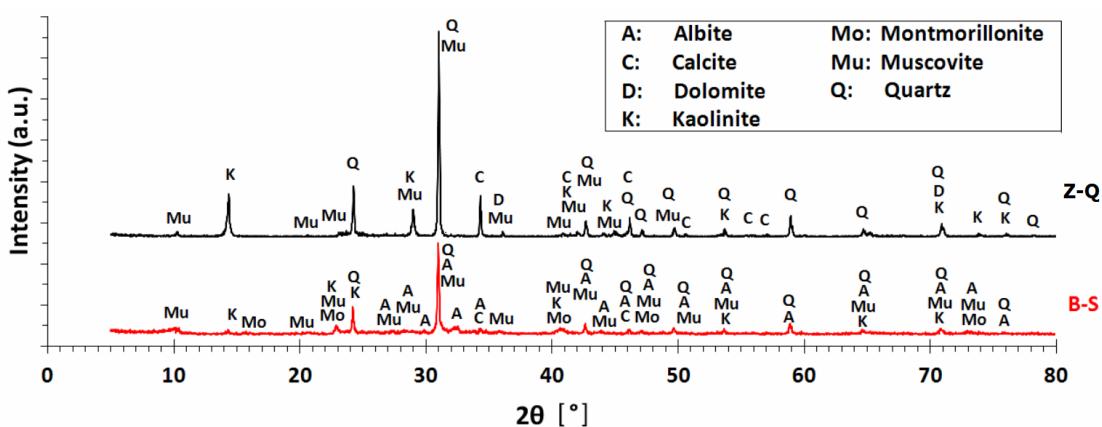


شکل ۱- انبساط پس از پرس بدنۀای بررسی شده بر حسب فشار شکل‌دهی و ترکیب.

بررسی دانسیته توده‌ای خشک بدنۀای 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 بدنۀ 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 پلاستیسیته‌های متفاوت (کم و زیاد)، در حصول بدندهای با فشردگی بالا مؤثرتر از استفاده از تنها یک ماده اولیه است. در توجیه این



شکل ۲- دانسیتۀ توده‌ای خشک بدنۀ‌های شکل‌دهی شده به عنوان تابعی از فشار شکل‌دهی و ترکیب بدنۀ.

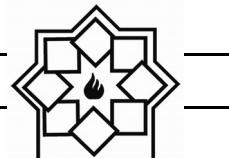


شکل ۳- الگوهای XRD مواد اولیه مورد بررسی؛ Z-Q: کوارتز رسی زنوز و B-S: بنتونیت سوراوجین.

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

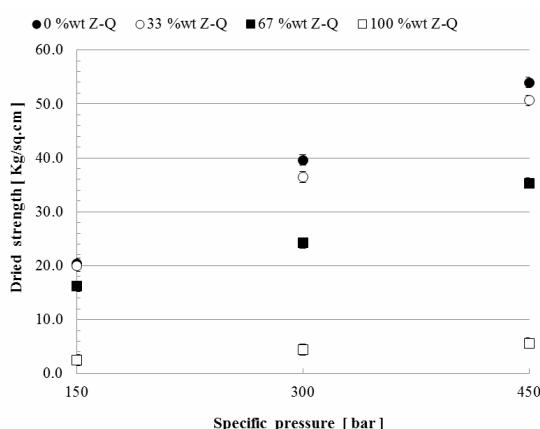
### ۲-۳- تغییر ابعاد پس از خشک شدن

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



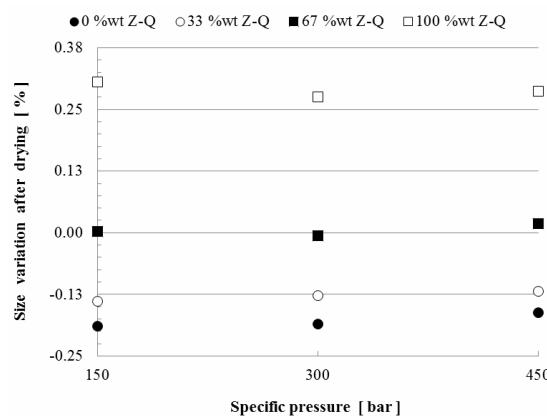
درصد ماده اولیه B-S (با پلاستیسیته بالا) و/یا افزایش فشار اعمالی، استحکام خمثی خشک به طور پیوسته افزایش می- یابد که شبیه این تغییرات برای بدندهای حاوی مواد اولیه با پلاستیسیته ریکله بالاتر (نظیر خاک B-S یا ترکیب دارای درصد بالاتر B-S) بیشتر است. زیرا در فشار بالا، در اثر روانکاری آب موجود در لوله‌های 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 از دیدار تعداد اتصالات باعث افزایش استحکام خمثی خشک می‌گردد.

B-S: Z-Q نکته‌ای که جالب توجه است این است که ترکیب Z-Q برابر با ۳۳:۶۷ که بالاترین دانسیته توده‌ای خشک را در تمامی فشارهای اعمالی دارد (شکل ۲)، لزوماً بیشترین استحکام خمثی خشک را از خود نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر، ممکن است بتوان نتیجه‌گیری کرد که دانسیته توده‌ای بالاتر نشان دهنده چینش 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 خمثی خشک بدندهای پرس شده به عنوان تابعی از ترکیب و فشار شکل‌دهی.

[۱۸]. در هنگام خشک شدن، نیروهای چسباننده [۱۰] در مقابل با نیروهای منبسط کننده (حاصل از بازیابی مؤلفه الاستیک کرنش، رهایش تنفس شعاعی پس از باربرداری [۱۷، ۱۹ و ۲۰] و نیز تبخیر آب میان ذره‌ای [۱۸])، میزان تغییر ابعاد حاصل از خشک شدن را تعیین می‌کند. انقباض جزئی بدنه نیز به حضور کانی‌های رده مونت موریلوبونیت 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 مویینگی 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 بدندهای بررسی شده در اثر خشک شدن بر حسب ترکیب و فشار شکل‌دهی.

### ۳-۳-۳- استحکام خمثی خشک

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



توانی با شکل عمومی  $S = m \cdot P^n$  برازش کرد که  $m$  و  $n$  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 را برابر با  $300$  درنظر گرفت. با تعریف ضریب  $m$  به شکل عبارت  $S = P_{arb}^n$  (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 پلاستیکی» به آن اشاره می‌شود، متفاوت است. بدین ترتیب از عبارت « $q+n$ » می‌توان برای قضاوت در خصوص پلاستیکیتّ مواد اولیه و بدنّه‌های مختلف استفاده نمود. با توجه به معادله‌های توانی اصلاح شده (جدول ۶) می‌توان گفت که پلاستیکیتّ بدنّه  $S$  بیشتر از بدنّه  $Z-Q$  و دو بدنّه دیگر است.

### ۴-۳- نمای پلاستیکیتّ $n$ به عنوان معیاری جهت ارزیابی پلاستیکیتّ بدنّه‌ها

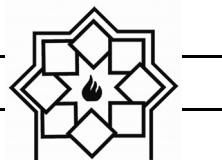
در جدول ۶ صورت‌های خطی و توانی استحکام خمشی خشک بر حسب فشار شکل‌دهی در «درصد رطوبت گرانول ثابت» مبتنی بر داده‌های شکل ۵ ارائه شده است. در این معادلات،  $S$  نشان دهنده استحکام خمشی خشک ( $\text{Kg/cm}^2$ ) و  $P$ ، فشار اعمالی است. مشخصه  $R^2$  نیز مؤید دقت معادله مربوطه در تمام نقاط مورد بررسی جهت 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 بدنّه‌ها به روش پرس تک‌محوری، تغییرات استحکام خمشی خشک بر حسب فشار شکل‌دهی را می‌توان به صورت تابع

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

ترکیب بدنّه	شكل معادله	B-S:Z-Q
خطی	۱۰۰:	۶۷:۳۳
توانی اولیه	$S = 0.119 \cdot P + 4.454$ ( $R^2 = 0.993$ )	$S = 0.1023 \cdot P + 5.004$ ( $R^2 = 0.998$ )
توانی اصلاح شده	$S = 0.2368 \cdot P^{0.892}$ ( $R^2 = 0.997$ )	$S = 0.2836 \cdot P^{0.8498}$ ( $R^2 = 0.999$ )

شكل‌دهی (مثالاً  $450$  و  $150$  bar) به عنوان معیار دیگری برای پلاستیکیتّ بدنّه‌ها 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

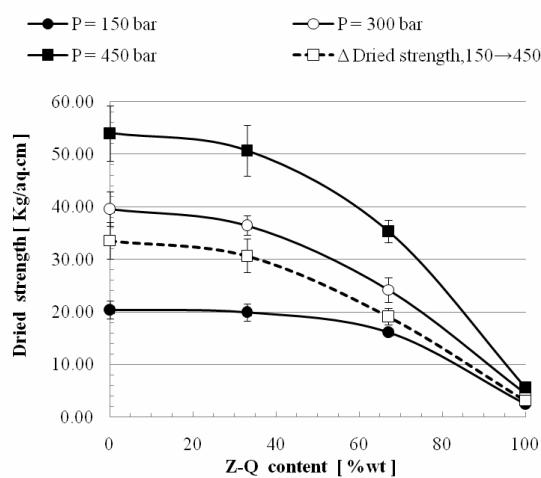


عمومی  $S = m \cdot P^n$  که  $S$ ، استحکام خمثی خشک ( $\text{Kg/cm}^2$ ) و  $P$ ، فشار شکل دهی است و نیز با تعریف ضریب  $m$  به صورت  $m = P_{\text{arb}}^{-q}$  که  $P_{\text{arb}}$  فشار شکل دهی بهینه در فرآیند تولید فرآورده سرامیکی مورد نظر و  $q$  عدد ثابتی است، این معادله به شکل اصلاح شده  $S = P_{\text{arb}}^{q+n}$  در خواهد آمد که به وسیله نمای  $n$  که «نمای پلاستیسیته» نامگذاری شد، می‌توان پلاستیسیته بدندهای مختلف را که به روش پرس کاری شکل دهی می‌شوند، به طور کمی مقایسه نمود. نتایج نشان داد که مشخصه پلاستیسیته  $n$ ، به نوع و ماهیت ماده اولیه مصرفی در بدنه و فشار شکل دهی پرس وابسته است و در بدندهای حاوی مواد با پلاستیسیته 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. Härdle, 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 پلاستیسیته 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 شکل دهی مختلف، مشابه درصدهای رطوبت ماده اولیه (یا بدنه) در حالت‌های اول و دوم ریکه است که از تفاضل آن‌ها اندیس دیگری برای پلاستیسیته به دست می‌آید.



شکل ۶- رسم مجدد شکل ۵ که تفاضل مقادیر استحکام خشک بدندهای مختلف را در دو فشار ۱۵۰ bar و ۴۵۰ bar (۳۰۰±۱۵ bar) به عنوان معیار دیگری برای پلاستیسیته نشان می‌دهد.

## ۴- نتیجه‌گیری

بررسی داده‌های استحکام خمثی خشک بدندهایی متشكل از دو ماده اولیه بر حسب فشار شکل دهی 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 stickiness 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).
- [15] ا. گروئی، ف. س. ترکنیک، "ارزیابی پلاستیسیته مواد اولیه سرامیکی بر اساس رابطه استحکام خشک-درصد رطوبت گرانول"، اولین کنفرانس بین‌المللی کاشی، سرامیک و چینی بهداشتی ایران .۱۳۹۳ آذر (ICTS-2014)
- [16] F. Khan, N. Pilpel, "An Investigation of Moisture Sorption in Microcrystalline Cellulose Using Sorption Isotherms and