

## ارزیابی غیرمخرب استحکام خمثی پخت بدنده‌های کاشی سرامیکی بدون لعاد با استفاده از مدل توزیع آماری دو پارامتری وایبول

ابوالفضل گروئی\*

آزمایشگاه خاک و بدن، شرکت صنایع کاشی و سرامیک الوند

\* ab\_gerveei@yahoo.com

### چکیده:

گرایش روزافرون به تولید کاشی‌های بزرگ‌تر، نیروی محركه شرکت‌های پیشتاز صنعتی جهت توسعه فناوری‌های صنعت کاشی برای برآوردن نیازها و سلیقه‌های مصرف‌کنندگان، معماران و مهندسان ساختمان بوده است. جدای از مسائل فناورانه تولید کاشی (پرس کردن، جابجایی کاشی خام و خشک، اعمال انگوب، لعاد و چاب‌های مختلف، پخت، عملیات سطحی، درجه‌بندی و بسته‌بندی)، مشکلات ناشی از بزرگ شدن ابعاد، بیش از هر چیز بر استحکام کاشی در حالت‌های خام، خشک و پخت اثر می‌گذارد. بنابراین، طراحی فرمولاسیون‌های بدنده‌های کاشی با استحکام‌های خام، خشک و پخت کافی که بتوانند تمام مراحل تولید از پرس تا بسته‌بندی را به سلامت طی کنند، بسیار مهم است. از طرف دیگر، نمونه‌برداری‌های منظم از خط تولید برای اطمینان از صحت فرایند، از جمله اندازه‌گیری استحکام پخت کاشی‌ها خسروی است. شکستن کاشی  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  هزینه زیادی ندارد اما انجام همین آزمون برای کاشی‌هایی با ابعاد (برای مثال)  $160 \times 20 \text{ cm}^2$  به منزله از دست رفتن سطحی بزرگ از محصولی با ارزش اقتصادی بالاست. اهمیت به کارگیری روش‌های غیرمخرب در این آزمون آن است که بدون از دست دادن محصول، ارزیابی اطمینان‌بخشی از استحکام پخت بدنده‌های کاشی تولید شده صورت می‌پذیرد.

در این پژوهش، روشی غیرمخرب و مبتنی بر توزیع آماری وایبول برای ارزیابی استحکام خمثی پخت بدنده‌های کاشی سرامیکی بدون لعاد معروفی شده است که افت استحکام خمثی کاشی‌های تست شده با این روش قابل چشم‌پوشی است و بنابراین، کاشی‌های بررسی شده را مجدداً می‌توان جهت درجه‌بندی و بسته‌بندی به فرایند تولید بازگرداند.

### اطلاعات مقاله:

دربافت: ۱۳۹۵/۳/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۳۰

### کلید واژه:

آزمون غیرمخرب، استحکام خمثی، پخت، تابع توزیع آماری وایبول، قابلیت اطمینان، بدنده کاشی سرامیکی

پانل‌های سرامیکی با سایز بزرگ (برای مثال  $1/20 \times 1/20 \text{ m}^2$ ،  $1/80 \times 1/60 \text{ m}^2$ ،  $3/20 \times 1/60 \text{ m}^2$ ) شده است که پاسخ‌گوی نیاز فزاینده مصرف‌کنندگان، معماران، طراحان داخلی و مهندسان ساختمان به سایزهای بزرگ برای برآورده کردن

### ۱- مقدمه

پیشرفت فناوری‌های شکل‌دهی منجر به ابداع روش‌های نوین تولید کاشی و فراهم شدن امکان تولید کاشی‌ها و



تنش‌های کششی بسیار حساس هستند و فرایند تولید کاشی از پرس تا بسته‌بندی، تنش‌های پیچیده‌ای به بدن‌های سرامیکی در حال حرکت وارد می‌کند. با بزرگ‌تر شدن اندازه کاشی‌ها، اثر تنش‌های اعمالی مهم‌تر می‌شود و پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری شده برای استحکام دور از انتظار نخواهد بود [۶]. به هر حال، استحکام‌های خام، خشک و پخت بدن‌های سرامیکی باید به اندازه کافی بالا باشد تا تمام مراحل تولید را به سلامت طی نماید. به همین دلیل نیز باید استحکام خمثی میانگین بدن‌های سرامیکی به اندازه کافی بالاتر از تنش‌های اعمال شده به کاشی در حین فرایند تولید باشد.

به طور کلی، تابع چگالی احتمال یک متغیر تصادفی وایبول که در اینجا استحکام خمثی ( $\sigma$ ) می‌باشد، تابعی سه پارامتری به صورت زیر است [۷]:

(۱)

$$f(\sigma; \sigma_{thr}, \sigma_0, m) = \begin{cases} \frac{m}{\sigma_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} e^{-[(\sigma - \sigma_{thr})/\sigma_0]^m} & \sigma \geq 0 \\ 0 & \sigma < 0 \end{cases}$$

$\sigma_{thr}$ ،  $m$  و  $\sigma_0$  به ترتیب پارامتر شکل، استحکام خمثی آستانه و پارامتر مقیاس (استحکام مشخصه) هستند. سطر نخست معادله ۱ برای حالت  $\sigma \leq \sigma_{thr}$  صادق است؛ برای حالتی که  $\sigma \leq \sigma_{thr}$  خواهیم داشت:  $f(\sigma; \sigma_{thr}, \sigma_0, m) = 0$ .

پارامتر شکل یا مدول وایبول است و توزیع اندازه ترک (و بنابراین پراکندگی داده‌های استحکام) را توصیف می‌کند [۸]. هر چه  $m$  کوچک‌تر باشد، توزیع استحکام پهن‌تر است [۹ و ۱۰] و مهم‌ترین پارامتر توزیع به شمار می‌رود. استحکام خمثی آستانه،  $\sigma_{thr}$ ، تنی است که در برابر یا کم‌تر از آن، احتمال شکست نمونه‌ها صفر است [۷]. پارامتر مقیاس توزیع یا استحکام شکست مشخصه است.

نیازهای ساختمان‌ها و معماری مدرن است [۱]. با بزرگ‌تر شدن ابعاد کاشی‌ها اهمیت به کارگیری روش‌های غیرمخرب برای ارزیابی خواص مختلف آن‌ها اهمیت روزافزونی می‌یابد؛ چرا که شکسته شدن کاشی‌هایی با ابعاد (برای مثال)  $120 \times 60$ ،  $180 \times 90$ ،  $320 \times 160 \text{ cm}^2$  و حتی بزرگ‌تر، به معنای از بین رفتن چندین مترمربع از محصولی با ارزش اقتصادی بالا خواهد بود [۲].

در متدوال ترین مواد ساختاری، فرض بر آن است که رفتار مکانیکی، همگن و همسان گرد<sup>۱</sup> است اما معمولاً خواص مکانیکی مواد و کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی<sup>۲</sup> به دلیل ناهمگنی و ویژگی‌های ناهمسان گردی<sup>۳</sup> آن‌ها و نیز تردی زمینه سرامیکی، پراکنده است [۳]. بنابراین، تجزیه و تحلیل دقیق آماری برای فهم ویژگی‌های مکانیکی این مواد ضروری است.

بیشتر سرامیک‌ها در دمای محیط و دماهای متوسط و در بارگذاری‌های کوتاه‌مدت، به صورت ترد می‌شکنند؛ یعنی تا نقطه شکست به طور الاستیک و بدون تغییر شکل دائمی (پلاستیک) رفتار می‌کنند. رفتار ترد سرامیک‌ها به «سهولت تشکیل ترک» و «سهولت گسترش ترک» نسبت داده می‌شود. باری که اعمال می‌شود، تمرکز تنش زیادی در عیوب سطحی یا نقص‌های ریزساختاری بسیار کوچک در مادة سرامیکی به وجود می‌آورد که به سادگی موجب تشکیل ترک می‌گردد. چهره‌گی شکست<sup>۴</sup> پایین بسیاری از مواد سرامیکی نیز باعث سهولت گسترش ترک می‌شود [۴ و ۵]. سرامیک‌ها به دلیل ماهیت تردشان در برابر ضربه و

<sup>1</sup> isotropic<sup>2</sup> Ceramic Matrix Composites, CMCs<sup>3</sup> anisotropic<sup>4</sup> Fracture toughness



نشان داده می شود [۱۳، ۱۱]. اگر  $\sigma > \sigma_{thr}$  خواهیم داشت:  $P_f = 0$ . این نمودار با استفاده از داده های تجربی و با تخمین زدن  $P_f$  با

$$P_f = \frac{n - 0.3}{N + 0.4} \quad (5)$$

رسم می گردد. مقادیر احتمال شکست بر مبنای ترتیب  $n$  امین عدد استحکام در میان تعداد کل  $N$  نمونه است که پس از مرتب کردن مقادیر استحکامها به صورت صعودی به دست می آید. با توجه به تعداد، اندازه، نوع نمونه ها و پارامترهای تأثیرگذار دیگر، فرمول محاسبه  $P_f$  انتخاب می شود. به جز رابطه ۵، روابط دیگری نیز برای احتمال شکست،  $P_f$  در مراجع مختلف معرفی شده اند [۳، ۵، ۷، ۸، ۹-۶].

برای ساده کردن مطالعه سرامیک ها، معمولاً تنش شکست آستانه برابر با صفر فرض می شود؛ یعنی  $\sigma_{thr} = 0$  و معادله ۴ به

$$P_f(\sigma; \sigma_0, m) = 1 - \exp \left[ - \int_V \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad (6)$$

ساده می شود. باید دقت کرد که  $\sigma_0$  و  $m$  پارامترهای ماده هستند و به شکل هندسی نمونه آزمایشی بستگی ندارند. ابعاد پارامترهای ذکر شده به ترتیب تنش ( $Kg/cm^2$ )،  $(cm^3)^{\frac{1}{m}}$  و بدون بعد هستند [۷].

در حالتی که یک ماده سرامیکی تحت کشش قرار می گیرد، ترک ها بیشتر از حالتی که همان سرامیک تحت تنش فشاری است، به وجود می آیند و رشد می کنند. به همین جهت، تنها حجم یا سطحی از ماده که تحت کشش قرار می گیرد، از معادله وایبول (۳) تبعیت می کند. در تنش

پارامتر مقیاس، ارتباط نزدیکی با تنش شکست میانگین دارد [۳] و مقدار تنش وایبول را برای احتمال تجمعی شکست برابر با  $P_f = 0.632$  مشخص می نماید [۱۱].

طبق نظریه ویکست-لینک<sup>۱</sup>، حجم مشخصی از سرامیک که تحت تنش یکنواخت قرار می گیرد، در بحرانی ترین ترک می شکند [۸]. ازتابع توزیع آماری وایبول<sup>۲</sup> به ویژه برای بررسی استحکام سرامیک ها و پراکندگی داده ها استفاده می شود [۳، ۶-۹]. احتمال شکست تجمعی  $P_f$ ، تابعی از تنش  $\sigma$  و حجم  $V$  یا سطح  $S$  تحت تنش کششی است؛ یعنی

$$P_f = f(\sigma, V, S) \quad (2)$$

رابطه وایبول برای سرامیک ها را نیز می توان به شکل ساده سه پارامتری

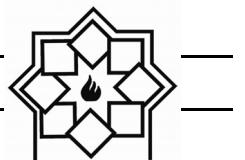
$$f(\sigma) = \left( \frac{\sigma - \sigma_{thr}}{\sigma_0} \right)^m \quad (3)$$

بیان کرد که  $\sigma_0$ ،  $\sigma_{thr}$  و  $m$  پارامترهای آن هستند. اگر  $m$  کوچک تر از  $1/0$  باشد نشان دهنده کاهشی بودن نرخ شکست ماده است. اگر  $m$  بزرگ تر از  $1/0$  باشد، نرخ شکست ماده به طور فزاینده افزایش می باید. در صورتی که  $m$  برابر صفر باشد، نرخ شکست ماده ثابت است [۱۲]. با فرض  $\sigma \geq \sigma_{thr}$ ، احتمال شکست تجمعی به عنوان تابعی از حجم به صورت

$$P_f(\sigma; \sigma_{thr}, \sigma_0, m) = 1 - \exp \left[ - \int_V \left( \frac{\sigma - \sigma_{thr}}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad (4)$$

<sup>1</sup> Weakest-Link

<sup>2</sup> Weibull statistic distribution



آزمون‌های غیرمخرب<sup>۲</sup> دسته‌ای بسیار گسترده از آزمون‌ها هستند که برای ارزیابی مواد، ترکیب‌ها، دستگاه‌ها و سامانه‌ها به کار می‌روند، بدون آن که موجب تغییر یا خرابی آن‌ها شوند. به طور کلی، آزمون‌های استاندارد برای صنعت کاشی را می‌توان به دو دسته آزمون‌های مخرب مانند اندازه‌گیری استحکام‌های خمی خام، خشک و پخت آزمون 9169-4 (INSO)، آزمون سایش عمقی کاشی‌های بدون لعاب (INSO 9169-6)، آزمون سایش سطحی کاشی‌های لعاب‌دار (INSO 9169-7) و اندازه‌گیری انبساط رطوبتی (INSO 9169-10) و آزمون‌های غیرمخرب مانند طول و عرض و ضخامت (INSO 9169-2)، مستقیم بودن و گونیا بودن اضلاع کاشی (INSO 9169-2)، تفاوت رنگ‌های جزئی کاشی‌ها (INSO 9169-16) تقسیم‌بندی کرد.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

گرانول بدن‌های کاشی دیواری دو پخت که از لحاظ گروه جذب آب کاشی در رده BIII قرار می‌گیرد، پس از نمونه‌برداری از اسپری درایر، جهت همگن شدن رطوبت به مدت ۲۰ hr در داخل کیسهٔ پلاستیکی در بسته به حال خود گذاشته شد. گرانولومتری (توزیع تجمعی اندازهٔ ذره) گرانول نمونه‌برداری شده در شکل ۱ نشان داده شده است. گرانول همگن شده با فشارهای اولیه و ثانویه به ترتیب ۳۰ و ۳۰۰ bar با پرس هیدرولیکی دستی آزمایشگاهی Sacmi مدل PIL به صورت سرد و تک محوری به شکل بدن‌هایی با ابعاد تقریبی  $100/8 \times 51/1 \times 3/2 \text{ mm}^3$  پرس شد. بدن‌های پرس شده به مدت حداقل ۱۸ hr در فضای آزاد به تدریج خشک شدند.

<sup>2</sup> Non-destructive tests (NDT)

کششی محسن که تمام ماده تحت کشش است، رابطه<sup>۶</sup> به

$$P_f(\sigma; \sigma_0, m) = 1 - \exp \left[ -V \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (7)$$

تبديل می‌شود.

از طرف دیگر در بارگذاری سه نقطه‌ای، حجم مؤثر (که با انتگرال گیری مناسب میدان تنشی در قطعهٔ آزمایشی به دست می‌آید) برابر است با  $\frac{V}{2(1+m)^2}$  [۸]: بنابراین پس

از لگاریتم گرفتن از دو طرف معادله ۷ خواهیم داشت:

$$\ln \ln \left( \frac{1}{1-P_f} \right) = m \cdot \ln \sigma - m \cdot \ln \sigma_0 - 2 \ln(m+1) + \ln \left( \frac{V}{2} \right) \quad (8)$$

از آن‌جا که طبق استاندارد ۹۱۶۹-۴ INSO، استحکام خمی پخت کاشی‌های گروه BIII (با جذب آب بالاتر از ۱۰ درصد) باید بیشتر از  $15 \text{ MPa}$  ( $15^3 \text{ Kg/cm}^2$ ) باشد، این تنש جهت ارزیابی استحکام خمی پخت بدن‌های سرامیکی انتخاب و به عنوان تنش اولیه به بدن‌های بررسی شده اعمال گردید.

قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> آزمون، R از رابطه

$$R(\sigma; \sigma_0, m) = \exp [-(\sigma/\sigma_0)^m] \quad (9)$$

تعیین می‌شود [۱۲]. بدینهی است که در  $\sigma_0 = ۵$  خواهیم داشت  $R=0/632$ .

از آن‌جا که ارزیابی پارامترهای توزیع وایسول از روی تعداد محدودی از آزمون‌ها صورت می‌پذیرد، برآورد کردن درستی مقادیر آن‌ها ارزش آماری بالائی دارد و بنابراین، باید عدم اطمینان تخمین معلوم شود.

<sup>1</sup> Reliability



به دو گروه تقسیم شدند. مشابه روال عادی در فرایند کنترل کیفیت کارخانه‌ها، بارگذاری گروه نخست از صفر تا لحظه شکست بدنها به صورت پیوسته انجام شد. در گروه دوم، نمونه‌ها ابتدا تا حدود  $153 \text{ Kg/cm}^2$  ( $15 \text{ MPa}$ ) (استاندارد INSO 9169-4) تحت تنش قرار گرفتند و بلا فاصله بارگذاری قطع شد. برای ارزیابی این که نمونه‌های بارگذاری شده در صورت بازگردانده شدن به فرایند تولید دارای استحکام پخت کافی هستند یا خیر، مجدداً بارگذاری از صفر تا لحظه شکست بر روی این بدنها (مشابه حالت نخست) انجام گردید.

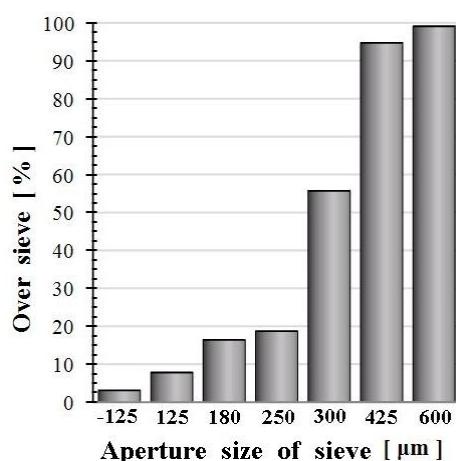
### ۳- نتایج و بحث

خواص فیزیکی پیش و پس از پخت بدنها سرامیکی پرس شده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ درج شده است. بدنها بررسی شده، تغییر ابعاد خام به خشک نزدیک به صفر و تغییر ابعاد پس از پخت بسیار کم ( $0.7\%$  درصد انبساط نسبت به طول قالب یا  $0.7\%$  درصد انقباض نسبت به طول خام) نشان دادند.

جدول ۱- خواص فیزیکی خام و خشک بدنها کاشی دیواری دو پخت پرس شده

درصد رطوبت	درصد انبساط	درصد تغییر ابعاد پس
گرانول	پس از پرس	از خشک شدن
تقریباً صفر	$0.77 \pm 0.01$	$0.1 \pm 0.34$

سپس نمونه‌ها به خشک کن آزمایشگاهی در دمای  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  منتقل گردیدند و تا وزن ثابت و عدم تغییر وزن در دو توزین متالی و با فاصله  $20 \text{ min}$ . در خشک کن باقی ماندند. برای اندازه‌گیری طول نمونه‌ها از کولیس دیجیتال کالیبره شده با دقت  $0.1 \text{ mm}$  استفاده شد. برای هر سری آزمون، ۱۵ نمونه پرس شد. بدنها خشک شده بر روی ساگار کوردیریتی مشبك (شرکت سرامیک اقبال، شهر صنعتی البرز، قزوین) با ابعاد  $33 \times 33 \text{ cm}^2$  گذاشته و در کوره رولری پخت سریع بیسکوئیت کاشی دیواری در دمای  $1121^\circ\text{C}$  و چرخه  $33 \text{ min}$ . پخت داده شدند.



شکل ۱- گرانولومتری (توزیع تجمعی اندازه ذره) گرانول بدن کاشی دیواری دو پخت استفاده شده در این پژوهش جذب آب، دانسیت بالک و درصد تخلخل های باز بدنها بیسکوئیت بر اساس استاندارد ۳ INSO 9169-3 اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری استحکام خمی پخت نیز با دستگاه استحکام‌سنج خمی سه نقطه‌ای CRC مدل 535Q ساخت شرکت Gabbrielli ایتالیا و مطابق استاندارد EN100 انجام گرفت.

به منظور اندازه‌گیری استحکام خمی، بدنها پخته شده



$$\text{نمودار } \sigma = \ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right) - \ln(\text{معادله ۸})$$

وایبول،  $m$  به دست می‌آید. استحکام مشخصه،  $\sigma_0$  نیز با داشتن  $m$  و حجم نمونه ( $V$ ) از معادله ۸ به سادگی تعیین می‌شود. مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده شکل ۲ در جدول ۵ خلاصه شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، استحکام پخت میانگین نمونه‌های حالت دوم کمتر از حالت نخست است ( $1/3$  درصد کمتر) اما هنوز از حداقل استحکام بیان شده در استاندارد ۴-۹۱۶۹ INSO بسیار بالاتر است (حدود  $47/9$  درصد یا  $73 \text{ Kg/cm}^2$  بیشتر). افت استحکام خمshi بدنه‌های سرامیکی در حالت دوم، به دلیل ایجاد و گسترش ترک‌های از پیش موجود در قطعه، تحت تنفس اولیه اعمال شده است [۸]. مشخصه مجازور مربعات  $R^2$  که نشان‌دهنده دقیق معادله‌ها می‌باشد، به ترتیب  $0/90$  و  $0/95$  برای آزمون حالت نخست و حالت دوم بود و مُبین پراکندگی قابل قبول داده‌ها است.

جدول ۳- داده‌های مربوط به استحکام خمshi پخت نمونه‌های بیسکوئیت کاشی دیواری در بارگذاری تک مرحله‌ای از صفر تا شکست نمونه. برای محاسبه استحکام مشخصه ( $\sigma_0$ )، از مدول واایبول ( $m$ ) به دست آمده از شکل ۲ استفاده شده است.

$\sigma_0$ ( $\text{Kg/cm}^2$ ) $(\text{cm}^3)^{1/m}$	$V$ ( $\text{cm}^3$ )	$P_f$	$\sigma$ ( $\text{Kg/cm}^2$ )	ردیف	$\sigma_0$ ( $\text{Kg/cm}^2$ ) $\cdot (\text{cm}^3)^{1/m}$	$V$ ( $\text{cm}^3$ )	$P_f$	$\sigma$ ( $\text{Kg/cm}^2$ )	ردیف
۱۸۸/۶۰	۱۵/۷۴	۰/۵۶	۲۲۸/۳۸	۹	۲۰۳/۰۳	۱۵/۸۶	۰/۰۵	۲۰۹/۷۱	۱
۱۸۷/۵۰	۱۶/۰۴	۰/۶۳	۲۲۸/۸۹	۱۰	۱۹۴/۰۶	۱۶/۱۰	۰/۱۱	۲۱۱/۸۵	۲
۱۹۰/۷۰	۱۶/۰۳	۰/۶۹	۲۳۴/۹۱	۱۱	۱۹۰/۵۳	۱۶/۱۵	۰/۱۸	۲۱۳/۶۹	۳
۱۹۲/۸۸	۱۶/۰۷	۰/۷۶	۲۳۹/۸۰	۱۲	۱۹۲/۹۲	۱۵/۷۳	۰/۲۴	۲۲۰/۷۳	۴
۱۹۳/۲۷	۱۵/۸۲	۰/۸۲	۲۴۲/۹۶	۱۳	۱۹۲/۵۷	۱۵/۹۹	۰/۳۱	۲۲۳/۳۸	۵
۱۹۲/۰۲	۱۵/۵۳	۰/۸۹	۲۴۴/۳۹	۱۴	۱۹۲/۴۴	۱۵/۹۱	۰/۳۷	۲۲۶/۰۳	۶
۱۹۹/۷۳	۱۶/۰۵	۰/۹۵	۲۵۸/۹۸	۱۵	۱۹۰/۸۵	۱۵/۸۴	۰/۴۴	۲۲۶/۶۴	۷
					۱۹۰/۴۳	۱۶/۱۴	۰/۵۰	۲۲۸/۱۷	۸

جدول ۲- خواص فیزیکی پخت بدنه‌های بیسکوئیت کاشی دیواری؛ دما و چرخه پخت:  $1121^\circ\text{C}$  و  $33 \text{ min}$ .

طول	$100/07 \pm 0/03$
پهنا	$50/72 \pm 0/03$
ضخامت	$3/15 \pm 0/03$
درصد تغییر ابعاد پس از پخت (نسبت به طول قالب)	$+ 0/07 \pm 0/03$
درصد تغییر ابعاد پس از پخت (نسبت به طول خام)	$- 0/70 \pm 0/04$
درصد جذب آب	$18/18 \pm 0/18$
دانسیتۀ بالک پخت ( $\text{g/cm}^3$ )	$1/783 \pm 0/007$
درصد تخلخل‌های باز	$32/14 \pm 0/21$
درصد پرت حرارتی (L.O.I.)	$10/17 \pm 0/05$

نتایج آزمون استحکام خمshi پخت در حالت نخست (بارگذاری پیوسته از صفر تا شکست) و حالت دوم (بارگذاری اولیه از صفر تا حدود  $153 \text{ Kg/cm}^2$  و قطع نیرو و سپس بارگذاری مجدد از صفر تا شکست نمونه) به ترتیب در جداول ۳ و ۴ و شکل ۲ آورده شده است. با تعیین شبیه خط



جدول ۴- داده‌های مربوط به استحکام خمشی پخت نمونه‌های بیسکوئیت کاشی دیواری در بارگذاری دو مرحله‌ای (پس از اعمال تنش حدود  $153 \text{ Kg/cm}^2$ ، بارگذاری متوقف و نیروی اعمالی صفر شد و سپس بارگذاری از صفر تا شکست نمونه ادامه یافت). برای محاسبه استحکام مشخصه ( $\sigma'$ )، از مدول واپیول (' $m'$ ) به دست آمده از شکل ۲ استفاده شده است.

$\sigma'$ ( $\text{Kg/cm}^2$ ) · ( $\text{cm}^3$ ) <sup>1/m</sup>	V ( $\text{cm}^3$ )	P <sub>f</sub>	$\sigma$ ( $\text{Kg/cm}^2$ )	ردیف	$\sigma'$ ( $\text{Kg/cm}^2$ ) · ( $\text{cm}^3$ ) <sup>1/m</sup>	V ( $\text{cm}^3$ )	P <sub>f</sub>	$\sigma$ ( $\text{Kg/cm}^2$ )	ردیف
190/88	16/10	0/56	229/81	۹	195/71	16/10	0/05	202/57	۱
189/55	16/19	0/63	230/11	۱۰	186/22	16/19	0/11	203/29	۲
188/79	16/10	0/69	231/23	۱۱	189/84	16/01	0/18	212/77	۳
188/26	15/78	0/76	232/87	۱۲	190/16	16/00	0/24	216/95	۴
190/47	15/72	0/82	237/97	۱۳	194/88	16/04	0/31	225/42	۵
191/67	16/09	0/89	242/05	۱۴	193/52	16/25	0/37	226/34	۶
190/70	15/93	0/95	245/41	۱۵	193/08	16/23	0/44	228/17	۷
					192/43	16/14	0/50	229/60	۸

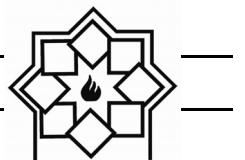
به دست نمی‌دهد. در کمینه تنش درج شده در استاندارد INSO 9169-4 (۵=۱۵۳  $\text{Kg/cm}^2$ ) برای بیسکوئیت کاشی‌های دیواری با جذب آب بالاتر از ۱۰ درصد (گروه BIII) قابلیت‌های اطمینان محاسبه شده برای حالت‌های نخست و دوم بارگذاری «تقریباً» برابر با ۰/۹۸۶ است. در این حالت‌ها تقریباً ۱/۴۰ درصد بدنه‌های سرامیکی دچار شکست می‌شوند ( $R=6/98\%$ ). بنابراین کاشی‌هایی که کمینه استحکام خمشی پخت مندرج در استاندارد را دارا باشند، می‌توان با اطمینان بالاتر از ۹۸ درصد از این که در جریان ادامه مراحل تولید تا مصرف دچار شکست نمی‌شوند، به خط تولید باز گرداند.

اگر بارگذاری حالت دوم برای ارزیابی غیرمخرب استحکام خمشی پخت بدنه‌های کاشی سرامیکی مدنظر قرار گیرد، با توجه به مقدار ۵۰ به دست آمده در این حالت (جدول ۵)، استحکام خمشی  $36/8$  درصد نمونه‌ها دستکم برابر  $189/84 \text{ Kg/cm}^2$  خواهد بود. مجدداً در این حالت با تعریف قابلیت اطمینان  $0/95$  و  $0/90$  و جایگذاری در معادله قابلیت

احتمال شکست سازه‌های مهندسی مهم مانند هواپیما، پل، سد، سازه‌های هسته‌ای، کشتی‌ها، اجزای میکروالکترونیکی و کاشتی‌های پزشکی ساخته شده از زیست‌مواد<sup>۱</sup> باید در حد پایین و نوعاً کمتر از  $10^6$  نگه داشته شود [۱۴]. برای بعضی کاربردها این اندازه از قابلیت اطمینان الزامی نیست و می‌توان سطوح مختلف اطمینان (برای مثال، ۹۵ و ۹۰) تعريف کرد.

نمودارهای قابلیت اطمینان، R برای هر دو آزمون حالت‌های نخست و دوم بارگذاری در شکل ۳ آورده شده است. با وجودی که کمینه استحکام‌های خمشی پخت بدنه‌ها در حالت‌های نخست و دوم بارگذاری به ترتیب  $209/71 \text{ Kg/cm}^2$  (جدول ۳) و  $202/57 \text{ Kg/cm}^2$  (جدول ۴) بود، روش محاسباتی به کار رفته بر پایه قابلیت اطمینان، احتمال شکست نمونه‌ها در تنش‌های اعمالی کمتر از این مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده برای استحکام را برابر با صفر

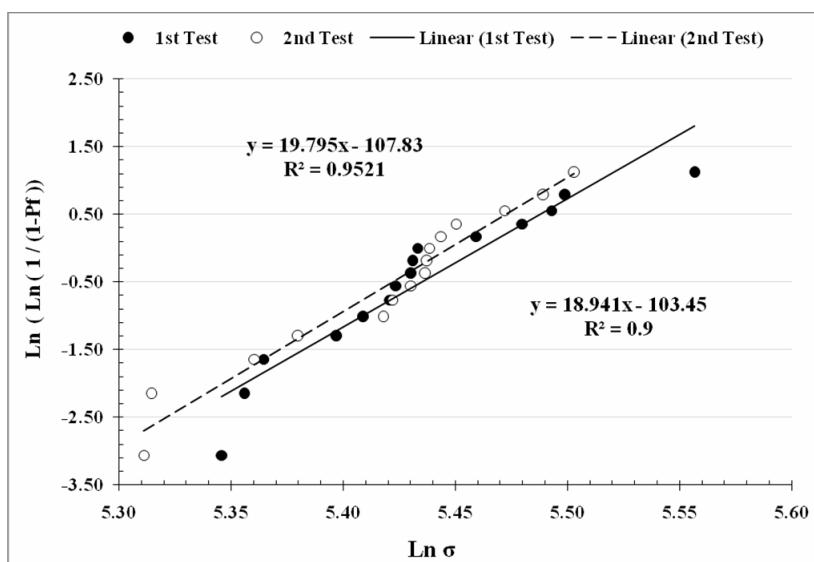
<sup>1</sup> Biomaterial



هر دو حالت بارگذاری نخست و دوم تقریباً برابر بود،  $\sigma_{thr} = 128 \text{ Kg/cm}^2$  تخمین زده شد و نشان می‌دهد که با توجه به ترکیب و شرایط ساخت بدنه و نحوه انجام آزمون‌ها، حتی در تنش‌های اعمالی کمتر از  $153 \text{ Kg/cm}^2$  (و بیشتر از  $128 \text{ Kg/cm}^2$ ) نیز احتمال شکست بدنه‌های کاشی بررسی شده صفر نیست، هر چند کمینه استحکام‌های خمشی پخت واقعی و اندازه‌گیری شده از این مقدار بسیار بالاتر باشند.

اطمینان، استحکام‌های خمشی پخت بدنه‌های کاشی سرامیکی به ترتیب  $163/3$  و  $169/4 \text{ Kg/cm}^2$  خواهد بود [جدول ۶]. به بیان دیگر، تنها کمتر از ۵ و ۱۰ درصد از بدنه‌های کاشی به ترتیب در دو تنش ذکر شده دچار شکست خواهند شد و هر دو از استحکام خمشی قید شده در استاندارد ۹۱۶۹-۴ INSO بالاترند.

با بهره‌گیری از نمودار  $R-5$  می‌توان بیشینه تنشی را که احتمال شکست نمونه‌ها صفر است یعنی  $P_f = 0$  (تنش آستانه)، از روش محاسباتی تخمین زد. این مقدار که برای



شکل ۲- طرح وایبول برای نخستین آزمون (بارگذاری پیوسته از صفر تا شکست نمونه، خط توپر) و دومین آزمون (بارگذاری دو مرحله‌ای؛ مرحله نخست: بارگذاری تا نزدیک  $153 \text{ Kg/cm}^2$  و قطع کامل نیرو و مرحله دوم: بارگذاری پیوسته همان نمونه از صفر تا شکست نمونه، خط منقطع).

جدول ۵- خلاصه پارامترهای اندازه‌گیری و محاسبه شده برای آزمون‌های اول و دوم. اعداد داخل پرانتز برای  $R-5$ ، مقادیر تعیین شده به روش هندسی را نشان می‌دهند.

	میانگین تنش اولیه اعمال شده (Kg/cm <sup>2</sup> )	استحکام خمشی پخت مشخصه، $\sigma_0$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	میانگین استحکام خمشی پخت، $\sigma_m$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	مدول وایبول، m	مدول (Kg/cm <sup>2</sup> )
حالت نخست	$229/23 \pm 13/36$	$191/58 \pm 3/71$	$(235/50)$	$18/94$	صفر
حالت دوم	$226/30 \pm 12/60$	$189/84 \pm 2/44$	$(232/14)$	$19/79$	$154/64 \pm 1/13$



جدول ۶- استحکام‌های خمشی پخت ( $\text{Kg/cm}^2$ ) متناظر با قابلیت‌های اطمینان ۹۵ و ۹۰ درصد برای آزمون‌های بارگذاری  
حالت نخست و دوم.

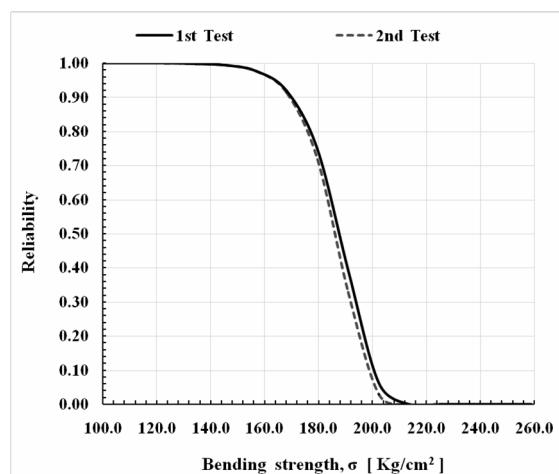
R = ۹۰	R = ۹۵	روش آزمون
۱۷۰/۱	۱۶۳/۸	حالت نخست
۱۶۹/۴	۱۶۳/۳	حالت دوم

شده از تقاطع خط‌های راست برآش شده در شکل ۲ در داخل پرانتز در جدول ۵ درج شده‌اند. این مقادیر به دست آمده از روش هندسی برای آزمون‌های حالت نخست و دوم به ترتیب  $۲۲/۹۲$  و  $۲۲/۲۸$  درصد بیشتر از میانگین مقادیر منفرد محاسبه شده برای  $۵۰$  هستند و به میانگین مقادیر استحکام خمشی پخت واقعی اندازه‌گیری شده بدنها بسیار نزدیک‌ترند و به ترتیب  $۲/۷۴$  و  $۲/۵۸$  درصد «بیشتر» از مقادیر واقعی برای استحکام خمشی پخت میانگین می‌باشند؛ به همین دلیل به نظر می‌رسد که میانگین مقادیر منفرد محاسبه شده برای  $۵۰$  ارزش عملی بیشتری نسبت به عدد به دست آمده از روش هندسی خواهد داشت.

مقادیر  $m$  به دست آمده در این پژوهش بالاتر از  $۱/۰$  هستند که نشان می‌دهد بدن‌های کاشی دیواری تمایل دارند تا به‌ازای هر واحد افزایش در تنفس اعمالی، با احتمال بالاتری بشکنند [۱۲].

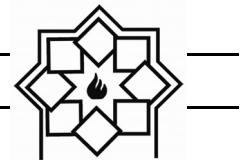
در آزمون‌های استحکام سرامیک‌ها در مراجع مختلف، مقادیر  $m$  بین  $۳/۴$  تا  $۱۳/۹$  برای مواد اولیه کائولینیتی [۱۵]،  $۵-۳۰$  (نمونه‌های تولید صنعتی به‌طور کلی) [۵]،  $۱۵/۰$  برای کاشی‌های سرامیکی با جذب آب کمتر از  $۳$  درصد [۱۶]،  $۷/۰$  و  $۲۸/۵$  برای بارگذاری دینامیک شیشه [۱۷] و کمتر از  $۴۰$  برای دو گروه کاشی‌های استونور پرسلانی و متخلخل [۱۴] ارائه شده است. مدول‌های واپیول

بدیهی است که معادله‌های به دست آمده علاوه بر نوع بدنۀ سرامیکی به فرایند ساخت (دانه‌بندی و درصد رطوبت گرانول، فشار پرس، روش شکل‌دهی، دما و چرخه پخت، خواص فیزیکی و مکانیکی بدنۀ، توزیع و اندازه نقص‌هایی مانند تخلخل‌ها و ترک‌ها و عوامل دیگر) نیز بستگی دارد.



شکل ۳- نمودارهای قابلیت اطمینان برای آزمون‌های حالت نخست و دوم.

در صورتی که درتابع واپیول دو پارامتری، معادله خط راست برآش شده در نمودار  $\ln(\frac{1}{1-P_f}) - \ln \sigma$  را به صورت کلی  $Y_0 = m \cdot x + Y_0$  نشان دهیم، استحکام مشخصه را می‌توان به روش «هندسی» و از محل تقاطع این خط راست با محور عرضه‌ها و از رابطه  $\sigma_0 = \exp(-Y_0/m)$  نیز به دست آورد [۱۲]. مقادیر محاسبه



مجددًا به خط تولید بازگرداند. رویه پیشنهادی فوق پیش از اجرا در واحدهای تولیدی باید به صورت دقیق مورد بررسی قرار گیرد و با توجه به فرایند تولید، استحکام خمشی تعریف شده در استاندارد، قابلیت اطمینان مورد نظر و روش انجام آزمون، فرمولاسیون بدن کاشی باید برای برآورده ساختن شرایط و نیازمندی‌های تعریف شده در صورت لزوم بهینه‌سازی گردد.

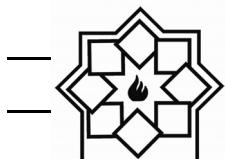
## مراجع

- [1] P. Giacomini, "Qutone Tiles, new large-format tiles Made in India", Ceramic World Review, № 111, Pp. 66-69, Year 25, April/May 2015.
- [2] P. Giacomini, "Advanced finishing for XXL sizes", Ceramic World Review, № 112, Pp. 66-71, Year 25, July 2015.
- [3] E. Barbero, J. Fernández-Sáez, C. Navarro, "Statistical analysis of the mechanical properties of composite materials", Composites, Part B: Engineering, 31, 2, pp. 375-381, 2000.
- [4] L. Esposito, G. Timellini, A. Tucci, "Fracture toughness of traditional ceramic materials: a first approach", Proceedings Fourth Euro Ceramics, Aetas 4a Conf Soc Ceram Eur., ed. C. Palmonati, Gruppo editorial Faenza Editrice S.p.A., Italy, Vol. 11, pp. 221-230, 1995.
- [5] P. Boch, Jean-Claude Nièpce, eds., Ceramic Materials: Processes, Properties and Applications, ISTE Ltd., ISBN 13:978-1-905209-23-1, London, 2007.
- [6] Z. P. Bažant and M. T. Kazemi, "Size effect in fracture of Ceramics and its use to determine fracture energy and effective process zone length", J. Am. Cer. Soc., 73 (7), pp. 1841-1853, 1990.
- [7] S. F. Duffy, L. M. Powers, A. Starlinger, "Reliability analysis of structural ceramic components using a three-parameter Weibull distribution", 37<sup>th</sup> International

به دست آمده در این پژوهش (۱۹/۹۴ و ۱۸/۹۶) نشان‌دهنده پراکندگی انک ک توزیع استحکام در آزمون هاست. به نظر می‌رسد علاوه بر روش آزمون، دقت دستگاهی و اپراتوری، فرایند ساخت، شکل‌دهی و دمای پخت، نوع بدن کاشی سرامیکی نیز در بزرگی مدول واپیول،  $m$  اندازه‌گیری شده مؤثر هستند.

## ۴- نتیجه‌گیری

- استحکام مشخصه بدن کاشی سرامیکی بررسی شده ( $\sigma_0$ ) کمتر از میانگین استحکام خمشی واقعی همین بدن‌ها بود و نشان‌دهنده ضریب اطمینان مناسب فرمولاسیون بدن کاشی دیواری طراحی شده است.
- مدل توزیع آماری دو پارامتری واپیول اینزار مناسبی برای بررسی پراکندگی داده‌های استحکام خمشی پخت بدن کاشی سرامیکی محسوب می‌شود و می‌توان سطوح مختلف قابلیت اطمینان را برای طراحی فرمولاسیون‌های مناسب جهت انواع بدن‌های کاشی تعریف نمود.
- با استفاده از مدل توزیع آماری واپیول و معادله قابلیت اطمینان،  $R$ ، می‌توان استحکام خمشی آستانه ( $\sigma_{thr}$ ) را که در آن احتمال شکست بدن‌های کاشی سرامیکی صفر است، تخمین زد.
- افت استحکام خمشی پخت بدن‌های کاشی سرامیکی با روش آزمون غیرمخرب پیشنهاد شده (بارگذاری از صفر تا  $153 \text{ Kg/cm}^2$  و قطع نیرو) برای «فرمولاسیون بدن کاشی سرامیکی به کار رفته در این پژوهش» قابل چشمپوشی بود و نمونه‌های ارزیابی شده را می‌توان



- Bazant, "Scaling of strength and lifetime probability distributions of quasi-brittle structures based on atomistic fracture mechanics", PNAS, Vol. 106, No. 28, pp. 11484-11489, July 14, 2009.
- [15] G. P. Souza, R. Sanchez, J. N. F. de Holanda, "Characteristics and physical-mechanical properties of fired kaolinitic materials", Cerâmica 48 (306), pp. 102-107, April/May/June 2002.
- [16] L. J. M. G. Dortmans, G. de With, A. Reymer, "Size effects for the strength of ceramic tiles", Klei Glas Keramiek (KGK), Vol. 17, No.9, pp. 23-25, 1996.
- [17] X. Brajer, P. Forquin, R. Gy, F. Hild, "The role of surface and volume defects in the fracture of glass under quasi-static and dynamic loadings", Journal of Non-Crystalline Solids, 316, pp.42-53, 2003.
- Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cologne, Germany, June 1-4, 1992.
- [8] D. W. Richerson, "Modern ceramic engineering", 2<sup>nd</sup> edition, Marcel Dekker Inc., 1992.
- [9] R. Danzer, T. Lube, P. Supancic, "Fracture statistics of Ceramics – A short overview", 11th International Conference on Fracture 2005 (ICF11), Turin, Italy, 20-25 March 2005, Volume 1 of 8, ISBN: 978-1-61782-063-2, pp. 5729-5734.
- [10] M. Abubakar, M. N. Tamin, N. Ahmad, "A three parameter Weibull of flexural strength variation of porous sintered clay", in Recent Advances in Mathematical and Computational Methods, Proceedings of 17<sup>th</sup> International conference on Mathematical and Computational Methods in science and engineering (MACMESE'15), ed. I. J. Rudas, ISBN: 978-1-61804-302-3, ISSN: 2227-4588, pp. 125-132, Kuala Lumpur, Malaysia, April 23-25, 2015.
- [11] B. Wasiluk, J.P. Pettit and R.H. Dodds, Jr., "Temperature Dependence of Weibull Stress Parameters: Studies Using the Euro-Material Similar to ASME A508 Class-3 Steel", Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001, NRC Job Code Y6951.
- [12] A. Suresh Babu and V. Jayabalaji, "Weibull probability models for fracture strength of Aluminium (1101)-Alumina particle reinforced metal matrix composite", J. Mater. Sci. Technol., Vol. 25, No. 3, pp. 341-343, 2009.
- [13] R. Jain, "Effective area and effective volume calculations for ceramic test specimens", Ph.D. thesis in civil engineering, Cleveland State University, May 2008.
- [14] Z. P. Bažant, Jia-Liang Le and M. Z.