

اثر متغیرهای عملیاتی بر سینتیک خشک شدن قطعه‌های سرامیکی قالب‌ریزی شده به روش ژل

حسن پهلوان زاده*⁺، مهرداد کوكبی و محمد شاهینی

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، بخش مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵

چکیده: قالب‌ریزی ژل، روشی جدید و امیدبخش در ساخت قطعه‌های سرامیکی و فلزی پیچیده است. در این روش برای شکل دهی پودر سرامیک یا فلز، از مونومر، تسریع کننده و آغازگر و حلال استفاده می‌شود. قطعه خارج شده از قالب دو مرحله خشک شدن را سپری می‌کند. مهمترین مرحله خشک شدن مرحله اول است، زیرا دوام و کارایی قطعه نهایی را تضمین می‌کند. در این تحقیق خشک شدن در مرحله اول با استفاده از مایع خشک کن (Liquid Desiccant) انجام شد و اثر متغیرهای عملیاتی متفاوت نظیر دما، غلظت، نوع و مایع خشک کن و دانه بندی سرامیک مورد بررسی قرار گرفت که غلظت مایع خشک کننده مهمترین عامل در افزایش نرخ خشک کردن شناخته شد. مدلی برای خشک شدن قطعه‌ها با فرض متغیر بودن ضریب نفوذ ارایه شد و ضریب‌های نفوذ ثابت در شرایط عملیاتی متفاوت غلظت و دما برای قطعه‌های استوانه ای محاسبه شد که مشخص شد مقدارهای ضریب نفوذ با افزایش غلظت و دما در محلول مایع خشک کننده افزایش می‌یابد. با توجه به آنکه فرایند خشک شدن قطعه‌های قالب‌ریزی شده به روش ژل هنوز ناشناخته مانده است در این تحقیق وجود گروه‌های عامل و تشکیل کمپلکس آب گریز دلیل‌های خروج حلال از قطعه عنوان شد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، مایع خشک کن، سرامیک، ضریب نفوذ، مدل‌سازی

KEY WORDS: *Drying, Liquid desiccant, Ceramic, Diffusion coefficient, Modeling.*

مقدمه

از مهم‌ترین آنهاست. بنابراین، روشی جدید به منظور خارج ساختن حلال از قطعه پیشنهاد شد که در آن از مایع خشک کننده به جای هوای خشک و گرم استفاده می‌شود [۳]. استفاده از خشک کننده مایع سبب می‌شود قطعه به صورت یکنواخت خشک شده و از ایجاد تنش‌هایی که منجر به ایجاد ترک می‌شود جلوگیری شود. از دیگر مزایایی این خشک کننده ها کاهش زمان خشک شدن، بالا بردن کارایی و مطلوبیت قطعه نهایی است [۴-۱]. در این تحقیق فرایند خشک شدن قطعه‌های سرامیکی استوانه ای با نسبت طول به قطر بزرگتر از ۴، به وسیله مایع خشک کننده مورد بررسی

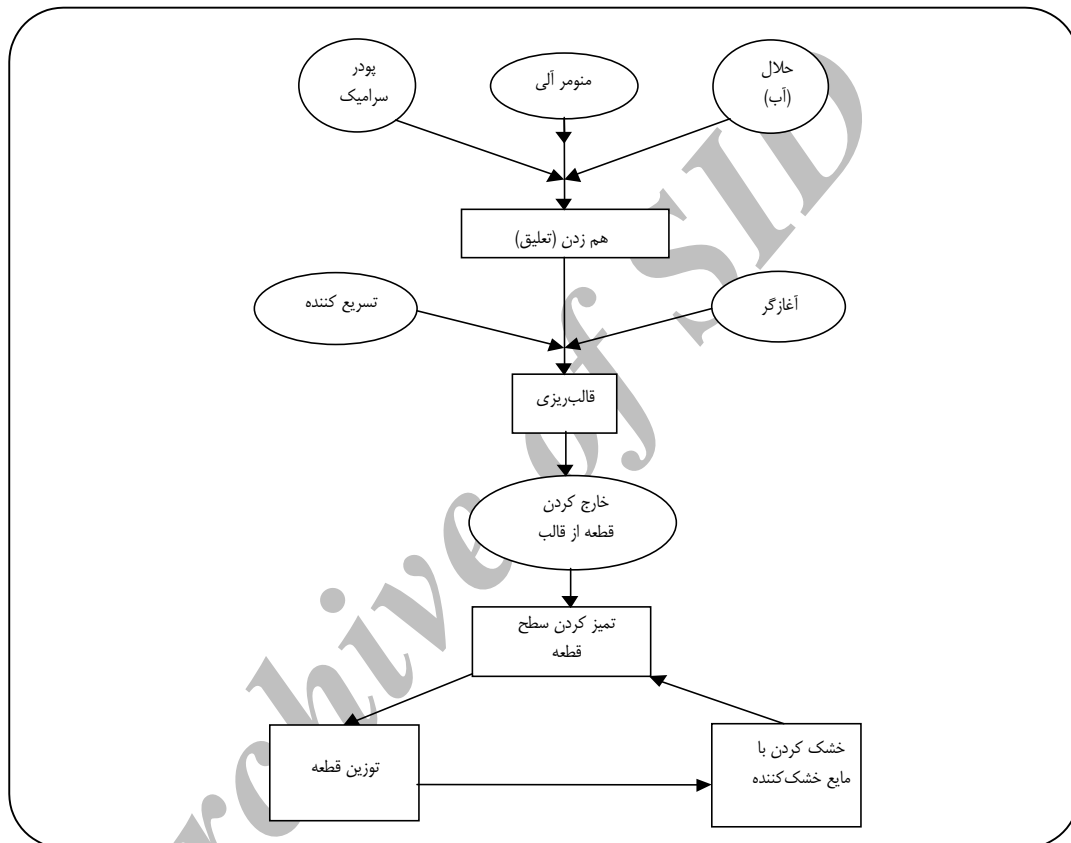
خشک کردن قطعه‌های سرامیکی قالب‌ریزی شده به روش ژل به‌طور عمومی از طریق هوای خشک و گرم انجام می‌شود. در سال ۱۹۹۲ فرایند خشک کردن تحت شرایط کنترل شده رطوبت و دما توسط Omatete و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱]. مدل فیزیکی که خشک شدن قطعه‌های را با استفاده از هوا توجیه می‌کند در سال ۱۹۹۹ توسط Ghosal ارایه شد [۲]. خشک کردن قطعه‌ها با استفاده از این روش مشکل‌های فراوانی را به‌وجود می‌آورد که طولانی بودن زمان فرایند، خشک شدن تدریجی و مقطعی قطعه، تاب برداشتن قطعه در بخش‌های نازک

*عهده‌دار مکاتبات

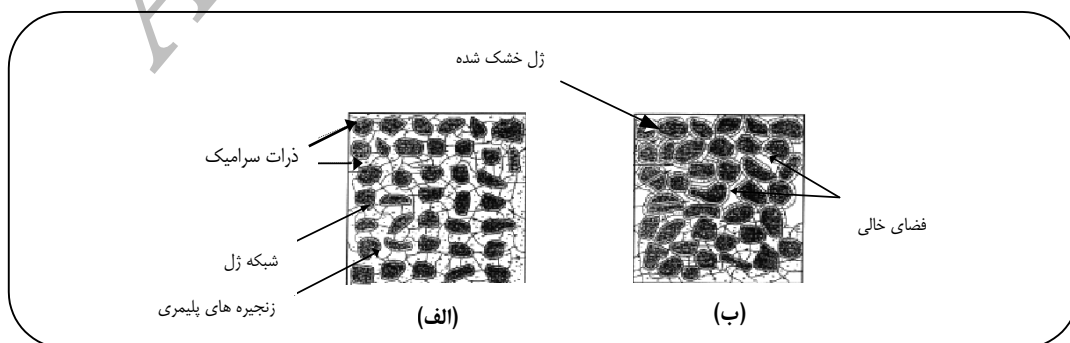
+E-mail: pahlavzh@modares.ac.ir

واکنش پلیمری شدن افزوده می شود. با افزودن شروع کننده، دوغاب شکل قالب را به خود می گیرد [۶ و ۲]، شکل ۱ فرایند تولید قطعه سرامیکی را به روش قالب ریزی ژل و همچنین مراحل انجام آزمایش را به صورت خلاصه نمایش می دهد. شکل ۲ دو حالت مرطوب و نیمه خشک از قطعه سرامیکی را نشان می دهد. ملاحظه می شود با خارج شدن حلال، زمینه ژل ترک خورده، ذره های سرامیک به هم نزدیک می شوند.

قرار گرفته و اثر عوامل موثر در نرخ خشک شدن مطالعه شده است. با قرار گرفتن قطعه سرامیکی قالب ریزی شده به روش ژل در حلال، حجم آن تغییر می کند. به طور معمول تغییر حجم قطعه تابع شرایط حلال نظیر دما، غلظت، نوع و pH است. تغییر حجم ژل بر اساس نوع آن ممکن است پیوسته یا ناپیوسته باشد [۵]. روش قالب ریزی ژل با اختلاط پودر سرامیک یا فلز با مونومر آلی در حلال و در نتیجه تهیه تعلیق آغاز می شود. به تعلیق به دست آمده، نرم کننده، تسریع کننده و شروع کننده



شکل ۱- فرایند تهیه قطعه های سرامیکی به همراه مراحل انجام آزمایش



شکل ۲ - حالت های مرطوب (الف) و نیمه خشک (ب) قطعه سرامیکی

نرم افزار ۴- Qualitek به دست می آید که پس از مرتب کردن جدول ۲ حاصل می شود. از لوله های PVC به عنوان قالب استفاده شد. تهیه قطعه مطابق روند شکل ۱ انجام شد. قطعه ها پس از خارج شدن از قالب با آب مقطر تمیز و سطح آنها با پارچه مناسب خشک شد. پس از توزین، قطعه ها با دقت درون ظرف محتوی مایع خشک کننده قرار گرفت. توزین نمونه ها در ابتدا با فاصله های زمانی ۱۵ دقیقه ای انجام شد و پس از مدتی که نرخ خشک شدن کاهش می یابد، توزین هر ۳۰ دقیقه یک بار انجام شد تا به حالت تعادل رطوبتی برسد. زمانی که تغییر وزن قطعه متوقف می شود تعادل دینامیکی بین رطوبت موجود در قطعه و محیط برقرار شده است [۷].

جدول ۳ نمونه ای از نتیجه های آزمایش ها را برای قطعه های کوچک و بزرگ نمایش می دهد. هر آزمایش با سه قطعه به قطر ۹ میلی متر و سه قطعه به قطر ۷ میلی متر انجام شد. برای اطمینان از نتیجه های هر آزمایش حداقل ۲ بار تکرار شد تا تکرارپذیری نتیجه ها نیز در نظر گرفته شده باشد.

مدل ریاضی نفوذ

تحقیق در مورد حالت ژل و علوم سرامیک نشان می دهد هنگامی که اطلاعات کیفی و کمی دقیق در مورد خشک شدن ژل ها و سرامیک ها در دسترس نباشد، مدل های عمومی معتبر برای تفسیر فرایند خشک شدن وجود نخواهد داشت. مدل های ریاضی نفوذ در حالت کلی به سه دسته تقسیم می شوند. مدل های نفوذ فیکس، مدل های نفوذ جامع و مدل های نفوذ غیر فیکس. انحراف از رفتار فیکس به طور معمول به تعدادی از پدیده های انتقال نظیر تغییر سطح، سستی شبکه پلیمر، وابستگی ضریب نفوذ به عوامل خاص و تنش های متفاوت موجود بین اجزای ژل بستگی دارد [۵]. مدل های مذکور منحنی های تورم و اضمحلال را برای حالتی که تغییرهای حجمی زیاد است به خوبی پیش بینی می کند ولی به سه محدودیت همواره باید توجه داشت: ۱- کاربرد این مدل ها برای حرکت لایه ژل جایز شمرده نمی شود ۲- این مدل ها بیشتر از سه پارامتر برای برازش داده های تجربی نیاز دارند ۳- ضریب های نفوذ ممکن است یک وابستگی غیر معمول را نسبت به ترکیب از خود نشان دهد.

در شرایطی که ضریب نفوذ ثابت است، مدل نفوذ یک بعدی برای خشک شدن قطعه های سرامیکی ارایه شده است که در مورد

برای بررسی فرایند خشک شدن قطعه های سرامیکی ابتدا قطعه با درصدهای معینی از مواد تشکیل دهنده ساخته و به وسیله خشک کننده های مایع خشک شد. این آزمایش ها به منظور بررسی اثر تعدادی از پارامترهای موثر روی خشک شدن انجام گرفت.

مواد و دستگاهها

اجزای اصلی فرایند قالب ریزی ژل که برای تهیه قطعه های مورد استفاده قرار می گیرد عبارت است از: پودر آلومینا (سرامیک)، آکریل آمید (مونومر)، مونومر دو عامل N، N - متیلن بیس آکریل آمید (اتصال دهنده عرضی)، آب مقطر (حلال)، آمونیم پرسولفات (شروع کننده واکنش پلیمر شدن) و N، N، N، N - تترا متیل اتیلن دی آمین (تسریع کننده)، مشخصات مواد مصرف شده در این کار به طور کامل در جدول ۱ آورده شده است. سایر تجهیزات استفاده شده در این آزمایش عبارتند از: حمام آب گرم، گیره، بشر ۵۰۰ میلی لیتری، همزن مکانیکی و گیره مخصوص برای معلق نگه داشتن قطعه ها در مایع خشک کننده.

در فرایندهای جدید قالب ریزی ژل از یک نرم کننده نیز استفاده می شود تا فرایند ماشین کاری قطعه پس از پایان کار به راحتی انجام پذیرد و قطعه نهایی عاری از ترک و لب پر شدن^(۱) باشد. نرم کننده مناسب باید در حلال قابل حل باشد و عمل ژل شدن را متوقف نکند. پلی اتیلن گلیکول ها به عنوان نرم کننده قابل استفاده هستند [۶].

روش آزمایش

آزمایش ها با هدف بررسی چهار متغیر عملیاتی (نوع، غلظت، دما و اندازه ذره های سرامیک) در سه سطح برنامه ریزی شد. پلی اتیلن گلیکول (PEG) در سه وزن مولکولی ۶۰۰ و ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ انتخاب شد که از هر کدام محلول آبی با غلظت های وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد تهیه شد. حمام آب گرم برای تنظیم دمای عملیاتی با ۰/۱ درجه سانتی گراد به کار گرفته شد و آزمایش ها در سه دمای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه سانتی گراد انجام شد. در ضمن از ذره های سرامیکی با اندازه های بین ۴ تا ۳۰ میکرون برای ساخت قطعه های مورد بررسی استفاده شد. برای تعیین تعداد منطقی آزمایش ها با توجه به اینکه چهار متغیر در سه سطح ارزیابی می شود آرایش L_۹ از طرح متعام آزمایش تاگوجی با استفاده از

(۱) Chipping

جدول ۱- مشخصات مواد مصرفی در فرایند قالب‌ریزی ژل

نام ماده	نوع استفاده	فرمول شیمیایی	چگالی (gr/ml)	جرم مولکولی	شرکت سازنده	علامت اختصاری
آلومینا	پودر سرامیک	Al_2O_3	۳/۹۸	—	Good fellow	—
آکریل آمید	مونومر تک عامله	$C_2H_5CONH_2$	—	۷۱/۰۸	Mrck	AM
N,N-متیلن بیس آکریل آمید	مونومر دو عامله	$(C_2H_5CONH_2)_2NH_2$	—	۱۵۴/۲	Sigma	MBAM
آمونوم پر سولفات	شروع کننده	$(NH_4)_2S_2O_8$	—	۲۲۸/۲	Merck	APS
N,N,N,N-تترا متیل اتیل دی آمین	شتاب دهنده	$C_6H_{16}N_4$	—	—	Merck	TEMED
پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰	محلول خشک کننده	$HO(C_2H_4)_nH$	۱/۱۲۷	۶۳۰-۵۷۰	Merck	PEG 600
پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰	محلول خشک کننده	$HO(C_2H_4)_nH$	—	۱۰۵۰-۹۵۰	Merck	PEG 1000
پلی اتیلن گلیکول ۲۰۰۰	محلول خشک کننده	$HO(C_2H_4)_nH$	—	—	Fluka	PEG 2000

جدول ۲- شرایط تعریف شده برای انجام آزمایش‌ها

شماره آزمایش	نوع خشک کننده	دمای خشک کننده (°C)	غلظت خشک کننده (درصد وزنی)	اندازه‌ی ذره‌های سرامیک در قطعه (µm)
۱	PEG ۶۰۰	۱۵	۱۰	بزرگتر از ۳۰
۲	PEG ۶۰۰	۳۰	۲۰	بین ۳۰ و ۴۰
۳	PEG ۶۰۰	۴۵	۳۰	کوچکتر از ۴
۴	PEG ۱۰۰۰	۱۵	۲۰	کوچکتر از ۴
۵	PEG ۱۰۰۰	۳۰	۳۰	بزرگتر از ۳۰
۶	PEG ۱۰۰۰	۴۵	۱۰	بین ۳۰ و ۴۰
۷	PEG ۲۰۰۰	۱۵	۳۰	بین ۳۰ و ۴۰
۸	PEG ۲۰۰۰	۳۰	۱۰	کوچکتر از ۴
۹	PEG ۲۰۰۰	۴۵	۲۰	بزرگتر از ۳۰

جدول ۳- تغییرات جرم قطعه‌های با قطر ۷ و ۹ میلی‌متر با زمان در طول آزمایش

زمان خشک شدن (دقیقه)		جرم قطعه (گرم)	
قطعه کوچک	قطعه بزرگ	قطعه کوچک	قطعه بزرگ
۰	۰	۳/۱۱	۵/۲۱
۱۲	۱۲	۲/۹۹	۵/۱۶
۲۳	۲۶	۲/۹۲	۵/۱۱
۵۷	۴۱	۲/۸۶	۵/۰۸
۱۰۱	۶۹	۲/۸	۵/۰۳
۱۳۴	۱۰۱	۲/۷۵	۵/۰۲
۱۵۸	۱۳۱	۲/۷۲	۴/۹۹
۱۹۲	۱۶۳	۲/۶۹	۴/۹۷
۲۲۰	۱۹۳	۲/۶۷	۴/۹۶
۲۵۵	۲۲۱	۲/۶۶	۴/۹۴
۲۸۳	۲۵۱	۲/۶۴	۴/۹۲
۳۱۳	۲۸۱	۲/۶۴	۴/۸۹
۳۴۳	۳۱۱	۲/۶۴	۴/۸۹

جزء حجمی پلیمر در فرایند خشک شدن، ضریب نفوذ متغیر به صورت تابعی از جزء حجمی پلیمر به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$D_m = D_o \cdot \varphi_p^{-m} \quad (7)$$

در این رابطه D_m = ضریب نفوذ متوسط، φ_p = جزء حجمی پلیمر و m و D_o اعداد ثابت بوده و برای هر قطعه متفاوت است. برای به دست آوردن مدل ریاضی انتقال جرم با ضریب نفوذ متغیر با توجه به آنکه نفوذ یک بعدی و واکنش شیمیایی وجود ندارد از معادله های کلی نفوذ در مختصات استوانه ای استفاده می شود [۹] که در روابط فوق θ تابعی از فاصله و زمان بدون بعد (τ_0, x) می باشد. معادله (۴) نفوذ حلال از قطعه به محیط را در حالتی که ضریب نفوذ متغیر باشد توصیف می کند. با در نظر گرفتن ضریب نفوذ متغیر رابطه (۱) برای حالتی که حلال از قطعه به محیط نفوذ می کند به صورت رابطه (۸) در می آید.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau_0} = \frac{x}{Z} \left(\frac{dz}{d\tau_0} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{1}{Z^2} \left[\frac{1}{x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] + \quad (8)$$

$$\frac{1}{Z^2} \left[\frac{m(\varphi_p^0 - \varphi_p^\infty)}{\varphi_p^0 - \theta(\varphi_p^0 - \varphi_p^\infty)} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \right]$$

با مقایسه معادله های (۱) و (۸) وجود یک جمله اضافی در معادله (۸) ملاحظه می شود که مربوط به متغیر بودن ضریب نفوذ است. با استفاده از روش تفاوت محدود^(۱) معادله (۴) به شکل جدید (۹) تعریف شده و در نهایت به روش صریح^(۲) حل شده است.

$$\theta_i^{j+1} = D(\theta_{i+1}^j - \theta_{i-1}^j)^2 + A\theta_{i+1}^j + B\theta_i^j + C\theta_{i-1}^j \quad (9)$$

در این رابطه i معرف تعداد گره ها در قطعه و j مشخصه زمان خشک شدن قطعه بوده و ضرایب A, B, C و D عبارتند از:

$$D = \frac{\Delta \tau_0 m}{\tau \Delta x^2 Z^2} \frac{(\varphi_p^0 - \varphi_p^\infty)}{\varphi_p^0 - (\varphi_p^0 - \varphi_p^\infty)} \quad (10)$$

$$A = \frac{\Delta \tau_0}{Z \Delta x} \left(\frac{x}{\tau} \left(\frac{dz}{d\tau_0} \right) + \frac{1}{\tau x Z} + \frac{1}{Z \Delta x} \right) \quad (11)$$

$$B = 1 - \frac{\tau \Delta \tau_0}{Z^2 \Delta x^2} \quad (12)$$

صفحه، کره و استوانه قابل کاربرد است [۸]. معادله های ارایه شده در حالت بدون بعد برای استوانه به قرار زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau_0} = \frac{x}{Z} \left(\frac{dZ}{d\tau_0} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{1}{Z^2} \left[\frac{1}{x} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] \quad (1)$$

$$\frac{dZ}{d\tau_0} = [\Phi - 1] \frac{1}{Z} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=1} \quad (2)$$

در رابطه های بالا

θ = جزء حجمی بدون بعد پلیمر

τ_0 = زمان بدون بعد

x = فاصله بدون بعد

Z = موقعیت مرز بدون بعد

Φ = نسبت حجم ژل نهایی به اولیه

است و به صورت زیر تعریف می شود.

$$\theta = \frac{\varphi_p^0 - \varphi_p}{\varphi_p^0 - \varphi_p^\infty} \quad (3)$$

$$\tau_0 = \frac{D_m t}{R_o^2} \quad (4)$$

$$x = \frac{r}{R} \quad (5)$$

$$z = \frac{R}{R_o} \quad (6)$$

معادله (۱) شکل بدون بعد قانون اول فیک در مختصات استوانه ای است [۵].

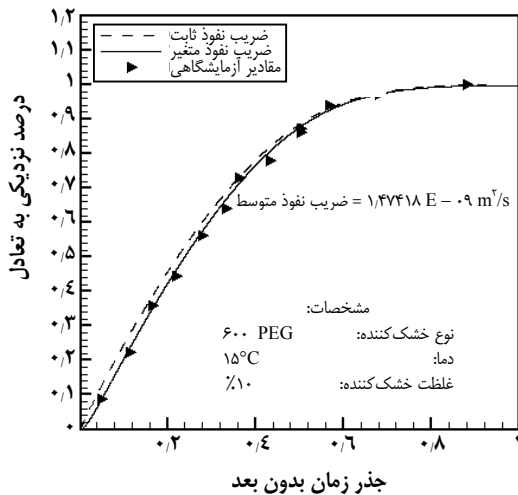
معادله (۲) مربوط به سطح مشترک قطعه و محیط (مابعد خشک کننده) می باشد. معادله های ارایه شده در بالا اگر چه برای ژل خالص ارایه شده است اما خشک شدن قطعه های حاوی سرامیک را نیز توجیه می کند (شکل ۳).

نتایج و بحث

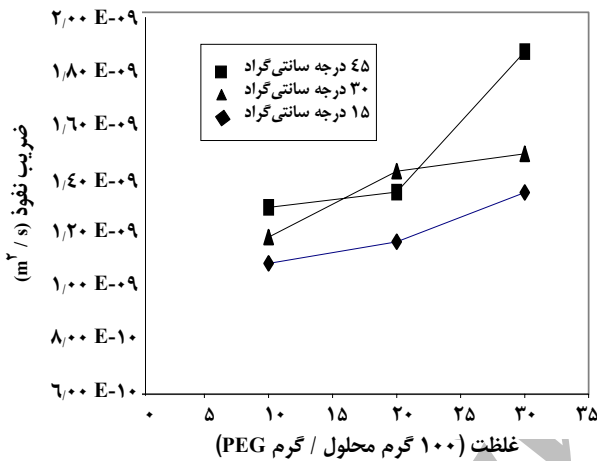
به دلیل ثابت فرض کردن ضریب نفوذ در معادله های ارایه شده توسط Singh [۵] و با توجه به تغییر حجم زیاد قطعه در همان لحظات اولیه به نظر می رسد با متغیر گرفتن ضریب نفوذ نتیجه حاصل دقیق تر و قابل اطمینان تر باشد. با توجه به اهمیت

(۱) Finit – Difference Method

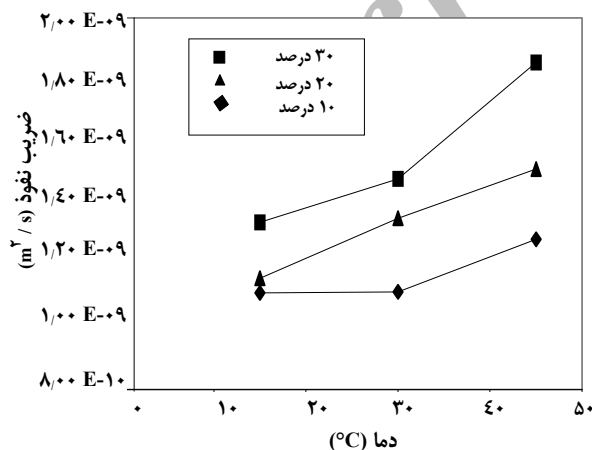
(۲) Explicit



شکل ۳- مدل خشک شدن در دو حالت ضریب نفوذ متغیر و ثابت



شکل ۴- تغییرهای ضریب نفوذ در غلظت‌های متفاوت برای یک دمای ثابت



شکل ۵- تغییرهای ضریب نفوذ در دماهای متفاوت برای یک غلظت ثابت

$$C = -\frac{\Delta\tau_0}{Z\Delta x} \left(\frac{x}{2} \left(\frac{dZ}{d\tau_0} \right) + \frac{1}{2xZ} - \frac{1}{Z\Delta x} \right) \quad (13)$$

با توجه به اینکه در روش صریح باید تمام ضریب‌های A ، B ، C و D مثبت باشند، تنها محدودیت موجود با اعمال شرط $B > 0$ برطرف می‌شود و در نتیجه حداکثر مقدار $\Delta\tau_0$ به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از یک برنامه کامپیوتری معادله‌های بالا حل می‌شود. شکل ۳ تفاوت بین مدل انتقال جرم در دو حالت ضریب نفوذ ثابت و متغیر را نمایش می‌دهد. اثر متغیر فرض کردن ضریب نفوذ به‌طور کامل در شکل ملاحظه می‌شود (F کسر جرمی متمایل به تعادل است که از تقسیم رطوبت از دست رفته از قطعه در هر لحظه بر کل رطوبتی که قطعه می‌تواند در طول فرایند خشک شدن از دست بدهد به دست می‌آید). این موضوع در حالتی که مقدار عدد Φ بسیار بزرگ باشد چشم‌گیر خواهد بود. مقدارهای ضریب نفوذ با استفاده نتیجه‌ها حل مدل و آزمایش‌های انجام شده به دست می‌آید. مطابق این روش ابتدا مقدار F بر اساس تغییرهای جرم قطعه در طول فرایند خشک شدن محاسبه شده و سپس بر مبنای معادله (۸) جذر زمان بدون بعد به دست می‌آید و در نهایت از معادله (۴) مقدارهای ضریب نفوذ مشخص می‌شود. مقدار D_0 و m برای آزمایش ۹ به ترتیب $۱۳۴۹ \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و $۰/۰۱۳۸$ محاسبه شد.

با توجه به اینکه هدف نهایی مقایسه مقدارهای ضریب نفوذ برای شرایط عملیاتی متفاوت بوده است، ضریب‌های نفوذ با فرض ثابت بودن به دست آمده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد غلظت و دمای محلول خشک‌کننده^(۱) موثرترین عوامل در فرایند خشک شدن هستند. شکل ۴ اثر غلظت و شکل ۵ اثر دمای محلول مایع خشک‌کننده را روی ضریب نفوذ به ترتیب در دما و غلظت ثابت نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود با افزایش غلظت و دما مقدارهای ضریب نفوذ افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان از روی مکانیسم خروج آب از قطعه و تاثیر غلظت و دما بر آن تفسیر کرد. اما همان‌گونه که گفته شد هنوز روش خشک شدن زل‌ها به خوبی شناخته شده نمی‌باشد. مکانیسمی که احتمال انجام پذیری آن بیشتر پیش بینی می‌شود ورود مایع خشک‌کننده به درون قطعه و تشکیل یک کمپلکس آب‌گریزی در درون خلل و فرج قطعه است. در کنار نیروهای آب‌گریزی، نیروهای قطبی ایجاد شده بین گروه‌های عامل خارج از قطعه و مولکول‌های آب درون قطعه، عمل خارج کردن آب از

(1) Desiccant

Δx	تغییرات فاصله بدون بعد	قطعه را تشدید می کنند. از این رو در غلظت‌های بالای مایع
R	شعاع قطعه، m	خشک کننده، تفاوت پتانسیل شیمیایی آب در درون و برون قطعه
RO	شعاع اولیه قطعه، m	افزایش یافته و در نهایت منجر به بالا رفتن نرخ انتقال جرم و
Z	موقعیت مرز بدون بعد	خارج شدن مقدار بیشتری آب از قطعه خواهد شد.
$\Phi =$	نسبت حجم قطعه نهایی به حجم اولیه قطعه	
D	ضریب نفوذ، m^2/s	
m	عدد ثابت	
A, B, C, D	ضرایب قابل محاسبه	

نتیجه گیری

تحلیل آزمایش‌های انجام شده نشان می دهد فرض متغیر بودن ضریب نفوذ در فرایند خشک شدن قطعه‌های سرامیکی قالب‌ریزی شده به روش ژل، به‌طور کامل درست بوده و با افزایش عدد Φ این فرض تقویت می شود. همچنین مشخص شد غلظت و دمای محلول خشک کننده، بیشترین تاثیر را بر نرخ خشک شدن قطعه‌ها نسبت به دیگر متغیرهای عملیاتی دارد.

فهرست علائم

ϕ	کسر حجمی
θ	جزء حجمی بدون بعد پلیمر
F	کسر جرمی متمایل به تعادل
τ_0	زمان بدون بعد
$\Delta\tau_0$	تغییرات زمان بدون بعد
x	فاصله بدون بعد
∞	مقدار نهایی
i و j	به ترتیب تعداد گره‌ها در قطعه و زمان خروج حلال از قطعه
P	پلیمر
M	مقدار متوسط
O	مقدار اولیه

زیر نویس‌ها

بالا نویس‌ها

تاریخ دریافت: ۱۱/۱۲/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۲/۷/۱۵

مراجع

- [1] Omatete, O.O., Strehlow, R.A. and Walls, C.A., Drying of Gelcast Ceramic, *Trans. Am. Ceram. Soc.*, **26**, 101-107, (1992).
- [2] Ghosal, S., Emami-Naeini, A., Ham, Y.P., Draskovich, B. and Polinger, J.P., A Physical Model for the Drying of Gelcast Ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82** (3), 513 (1999).
- [۳] براتی، ابوالفضل؛ کوبی، مهرداد و فامیلی، نوید، "روشی بدیع در خشک کردن قطعه‌های سرامیکی تولید شده به روش قالب‌ریزی ژل"، ششمین کنگره مهندسی شیمی ایران، اصفهان، (۱۳۸۰).
- [۴] شاهینی، محمد؛ پهلوانزاده، حسن؛ کوبی، مهرداد و براتی، ابوالفضل، "عوامل مؤثر بر خشک کردن قطعه‌های سرامیکی قالب‌ریزی شده به روش ژل با استفاده از مایع خشک کننده" هفتمین کنگره مهندسی شیمی ایران. تهران، (۱۳۸۱).
- [5] Singh, J., Weber, M.E., Kinetics of one Dimensional Gel Swelling and Collapse for Large Volume Change, *Chemical Engineering Science.*, **51** (19) pp.4499 (1996).
- [6] Janney, M.A., Walls, S.A.H., "Gelcasting Compositions Having Improved Drying Characteristics and Mechanability" United States Patent, US 6228299 B1, may 8, (2001).

- [7] Ishidao, T., Akagi, M., Sugimoto, H., Onoue. Y., Iwai, Y. and Arai, Y., Swelling Equilibria of Poly(N-isopropylacrylamide) Gel in Aqueous Polymer Solution, *Fluid Phase Equilibria*, **104**, pp.119, (1995).
- [8] Barati, A., Kokabi, M. and Famili, N., Modeling of Liquid Desiccant Drying Method for Gelcast Ceramic Parts., *Ceram. Int.*, **29** (2) p. 199 (2003).
- [9] Treybal. R., “Mass Transfer Operation”, Mc Graw Hill, (1980).

Archive of SID