مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۴/ دوره ۵/ شماره ۴/ چاپ آنلاین

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه صنعتی شاهرود

محاسبه ضریب نفوذ خشک‌شدن سرامیک رسی به کمک الگوریتم کرم شب‌تاب با بررسی اثرات هندسه قطعه

محسن باقریان[۱]، خلیل خلیلی[۲*] و سید یوسف احمدی بروغنی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

[۲و۳] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۵/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۷

چکیده

در این تحقیق، اثرات متغیرهای خشک‌شدن شامل، درجه حرارت، رطوبت نسبی محیط و سرعت وزش هوا بر ضریب نفوذ موثر ۴ هندسه مختلف سرامیک رسی، بررسی شده است. آزمایش‌های تجربی برای هر ۴ نمونه مورد مطالعه، به صورت فاکتوریل کامل طراحی و اجرا شد. طی هر آزمایش، کاهش جرم و کاهش حجم نمونه به ترتیب توسط ترازو و دوربین‌های متصل به کامپیوتر، ثبت گردید. ضریب نفوذ موثر از داده‌های تجربی و با استفاده از الگوریتم تازه گسترش یافته کرم شب‌تاب، محاسبه شد که تابع هدف در این الگوریتم، کاهش مقدار خطای مقایسه بین مقادیر تحلیلی و مقادیر تجربی است. بررسی‌های آماری و آنالیز واریانس ضریب نفوذ موثر هر نمونه، حاکی از آن است که پارامترهای سرعت، دما و رطوبت محیط خشک‌کن، به‌صورت مستقل از یکدیگر بر فرآیند خشک‌شدن تاثیر داشته، بیشترین تاثیر روی ضریب نفوذ موثر به ترتیب مربوط به درجه حرارت، سرعت و رطوبت محیط است. در انتهای این تحقیق، با استفاده از مدل رگرسیون، ضریب نفوذ موثر هر نمونه، به صورت تابعی از پارامترهای خشک‌شدن محاسبه شد.

کلمات کلیدی: خشک‌شدن سرامیک؛ قانون فیک؛ ضریب نفوذ موثر؛ ترموگرافی سطح؛ بهینه سازی؛ الگوریتم کرم شب‌تاب

Calculation diffusion coefficient of drying clay ceramics using firefly algorithm with study the effects of part geometry

M. Bagherian[1], K. Khalili*[2] and S.Y. Ahmadi Brooghani[3]

[1]Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

[2,3]Department of Mechanic Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

Abstract

In this study, the effects of temperature, relative humidity and air velocity the effective difussion coefficient on four different sample clay ceramics were investigated. A full factorial design of experiments on four cubic samples was performed. In each trial mass and volume reduction were measured using an electronic balance and a vision system and the resulting data were recorded and the drying curve was plotted. Effective diffusion coefficient of moisture using drying curves were calculated using of newly developed Firefly algorithm in which the error defined as the difference between the analytical values and the experimental values were minimized. Statistical analysis and analysis of variance showed that in calculation of the effective diffusion coefficient; the velocity, the temperature and the humidity are independent of each other. The greatest impact on the effective diffusion coefficient is related to the velocity, followed by temperature and environmental humidity respectively. Finally from the drying parameters the regression of the diffusion cofficient was obtaion.

Keywords: Ceramic Drying; Fick's law; Effective Diffusion Coefficient; Surface Thermography; Firefly Algorithm

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۵۸۸۴۲۴۱۸؛ فکس: **********

آدرس پست الکترونیک: M.bagherian@birjand.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

خشک‌شدن، فرآیند پیچیده‌ای است که در آن انتقال حرارت و رطوبت به‌صورت همزمان رخ می‌دهد. این فرآیند، تحت تاثیر پارامترهای خارجی (دما، رطوبت، سرعت محیط، هندسه قطعه) و پارامترهای داخلی (مقدار تخلخل‌ها، توزیع اندازه ذرات) است؛ اگرچه مطالعات فراوانی در زمینه خشک‌شدن محصولات متخلخل انجام شده است، اثرات تغییر مقادیر پارامترهای خارجی با وجود اهمیت و تاثیر بسیار آنها در فرآیند خشک شدن، کمتر مطالعه شده است. این تحقیق، به اثرات پارامترهای خارجی بر خشک‌شدن پرداخته است.

هرچند تغییرات خواص ماده و توزیع غیر یکنواخت حرارت و محاسبه این روش، بر اساس اطلاعات جامعی است که کرانک[1] از مدل‌های انتقال جرم برای شکل‌های مختلف و شرایط مرزی رطوبت، مدل‌سازی فرآیند را دشوار می‌کند، اما ایجاد مدلی جهت توصیف ریاضی فرآیند خشک‌شدن ضروری است. محققان، مکانیزم‌های مختلفی از انتقال جرم را برای خشک‌شدن بیان کرده‌اند. براساس نظر آن‌ها، انتقال رطوبت با مکانیزم‌های نفوذ مایع، نفوذ بخار، برون ریز[2]، نفوذ حرارتی[3]، نیروهای منافذ مویین[4] و یا ترکیبی از آن‌ها صورت می‌گیرد [۱]؛ اگرچه همه این مکانیزم‌ها از پایه فیزیکی قوی برخوردار هستند، در اکثر تحقیقات، انتقال رطوبتی که به دلیل حرکت اتفاقی مولکول‌ها و نفوذ رطوبت رخ می‌دهد، مکانیزمی غالب فرض شده است. طی این مکانیزم، انتقال رطوبت به سطح و تبخیر آن به دلیل وجود گرادیان رطوبت، بین سطح جسم و داخل آن است که توصیف ریاضی این مکانیزم، توسط رابطه فیک بیان می‌شود. یکی از پیچیدگی‌های رابطه فیک، محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت است که در بخشی از این تحقیق، به نحوه محاسبه آن پرداخته شده است. مبنای متفاوت ارائه کرده است [۲].

تعدادی از محققان، توصیف فرآیند خشک‌شدن را با رابطه فیک انجام داده‌اند و جهت محاسبه ضریب نفود از اطلاعات کرانک استفاده کرده‌اند. افریمو [۳]، معادله نفوذ فیک را با شرایط و فرضیات خاصی برای چند نمونه مواد متخلخل حل کرد و نتایج را با داده‌های تجربی سایر محققان مقایسه کرد. آنها دریافتند که افزایش درجه حرارت، با افزایش ضریب نفوذ همراه است. واسیک[5] و همکاران [۴-۷]، چهار مدل مختلف برای توصیف فرآیند خشک‌شدن سرامیک رسی پیشنهاد داده‌اند که در دو مدل، اثرات انقباض را لحاظ کردند و در دو مدل دیگر، از انقباض چشم پوشی کردند. در دو مدل اول، ضریب نفوذ به روش شیب از رابطه ساده شده فیک محاسبه می‌شود و در دو مدل بعدی (که در راستای معادلات نفوذی افریمو بودند)، ضریب نفوذ از مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی بدست می‌آید. آنها نشان دادند که اعمال اثرات انقباض، دقیق‌تر شدن مدل ریاضی فرآیند را به همراه دارد که این نتیجه، صرفا با انجام ۸ آزمایش به دست آمده است. زاگروبا[6] و همکاران [۸]، با تحلیل معادلات بقا (انرژی، جرم، ممنوتوم)، مطالعه ارزشمندی در زمینه تحلیل تنش و انقباض سرامیک رسی انجام داده‌اند و برای ضریب نفوذ رطوبت، رابطه آرنیوسی را پیشنهاد کرده‌اند. آنها فقط با انجام ۵ آزمایش پارامترهای این رابطه را تخمین زدند. چمخی[7] و همکاران [۹]، ضریب نفوذ موثر رطوبت سه نوع مختلف گل را به صورت یک معادله درجه دوم برحسب رطوبت قطعه پیش‌بینی کردند. این تحقیق با معرفی عدد فوریه و استفاده از معادله فیک، صورت گرفت و اثرات درجه حرارت و رطوبت محیط، فقط با انجام ۵ آزمایش بررسی شد و از اثرات سرعت محیط چشم پوشی شد. ساندر[8] و همکاران [۱۰]، با استفاده از شبکه عصبی مقدار رطوبت و دمای نمونه نازکی از سرامیک را به‌صورت ریاضی مدل کردند. آنها دریافتند که با تغییرات دما، خواص انتقال نمونه بصورت نمایی تغییر می‌کند و مدلی نیز با نام خود به ثبت رساندند. آنها صرفا اثرات دمای محیط را روی ضریب نفوذ موثر خشک‌شدن بررسی کردند. بولاود و محمید[9] [۱۱]، تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت هنگام خشک‌شدن مقره‌های الکتریکی را با تغییر در ساختار ماده بررسی کردند. در این تحقیق، آنها پی بردند که افزایش فیبر به مقره‌های سرامیکی، تا حد مشخصی مقدار ضریب نفوذ را

[1] crank
2. Effusion
3. Thermal Diffusion
4. Capillary Diffusion

[5] Vasić
[6] Zagrouba
[7] Chemkhi
[8] Sander
[9] Boulaoued, Mhimid

Archive of SID

www.SID.ir

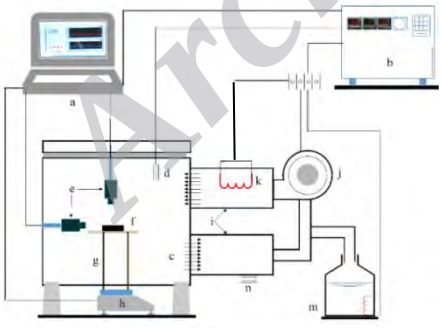
افزایش می‌دهد و بعد از آن با افزایش فیبر، ضریب نفوذ ثابت باقی خواهد ماند. در تحقیق بخشی و همکاران [۱۲]، دو مکانیزم خروج رطوبت برای مراحل اول و دوم خشک‌شدن بتون پیشنهاد شد. آنها دریافتند که در مرحله اول، تبخیر از سطح و در مرحله دوم، نفوذ رطوبت از داخل به سطح انجام می‌شود. آنها معادله فیک را با توجه به شرایط مرزی حاکم، حل و مقادیر ضریب نفوذ را برای هر مرحله، بصورت مجزا محاسبه کردند و در نهایت با استفاده از اجزاء محدود تنش و ترک‌های خشک‌شدن، بتون را در مرحله اول مطالعه کردند. خلیلی و همکاران [۱۳,۱۴] در دانشگاه بیرجند، خشک‌شدن سرامیک رسی را با استفاده از ماشین‌بینایی بررسی کردند. آنها اثرات ضخامت بر خشک‌کردن سرامیک رسی را مورد مطالعه قرار دادند و با اندازه‌گیری تنش تسلیم، تغییرات مدول یانگ را بررسی و در ادامه با معیار تسلیم فون میزز، رشد ترک را در حالت‌های مختلف دو بعدی و سه بعدی پیش‌بینی کردند [۱۵, ۱۶]. در این تحقیقات، نشان داده شد که در رطوبت‌های کم به خاطر پایین بودن تنش تسلیم، احتمال ترک نمونه بیشتر می‌شود. آنها در ادامه به مدل ریاضی انقباض قطعه پرداختند و نتایج را با مقادیر تجربی و در تحقیقات مقایسه کردند [۱۷, ۱۸].

در این تحقیق، ضریب نفوذ رطوبت، اصلی‌ترین عامل در فرآیندهای خشک‌شدن تلقی شده است. تاکنون مطالعات محققان در زمینه خشک‌شدن سرامیک و محاسبه ضریب نفوذ، براساس انجام آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل نبوده، از اثر پارامترهای خشک‌شدن بر ضریب نفوذ و تقابل پارامترها بر یکدیگر اطلاعی نیست. علاوه بر آن، هیچ یک از محققان اثرات هندسه قطعه سرامیکی را بر ضریب نفوذ رطوبت بررسی نکرده، از آن به عنوان پارامتر فرآیند خشک‌شدن یاد نکرده‌اند. نویسندگان این تحقیق، با انتخاب ۴ هندسه مختلف، رفتار خشک‌شدن سرامیک رسی را با محاسبه ضریب نفوذ بررسی کرده‌اند. برای هر هندسه پارامترهای مورد بررسی شامل، دما، رطوبت و سرعت وزش هستند که هر یک در سه سطح انتخاب شدند. در طراحی کامل آزمایش‌ها برای هر قطعه، ۲۷ آزمایش و در مجموع ۱۰۸ آزمایش برای ۴ نمونه انجام شده است. این حجم آزمایش‌ها، یکی از ویژگی‌های متمایز این تحقیق است. طی هر آزمایش، شرایط محیطی توسط سیستم کنترل ساخته شده ثابت بوده، در تعدادی آزمایش، تغییرات دمای سطح قطعه توسط دوربین ترموگرافی ثبت گردید. مقدار ضریب نفوذ موثر از منحنی‌های خشک‌شدن و از دو روش شیب [۱۹- ۲۱] و یا مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی [۲۲- ۲۴]، قابل محاسبه است. ضریب نفوذ با استفاده از روش دوم محاسبه شد و جهت کاهش مقدار خطای مقایسه بین مقادیر تجربی و تحلیلی، از الگوریتم بهینه‌سازی نوین کرم شب‌تاب استفاده شده است. بعد از محاسبه ضریب نفوذ موثر، تحلیل آماری و آنالیز واریانس انجام شد تا اثرات هندسه بر ضریب نفوذ مشخص شود. در ادامه با استفاده از رگرسیون معادله‌هایی جهت پیش‌بینی مقدار ضریب نفوذ موثر برحسب پارامترها ارائه شد. با استفاده از این رابطه، می‌توان تخمینی از ضریب نفوذ را در شرایط محیطی مختلف داشت و با بیان توصیفی فرآیند در راستای بهینه کردن فرآیند و تولید محصولات سرامیکی سالم گام برداشت.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و تجهیزات

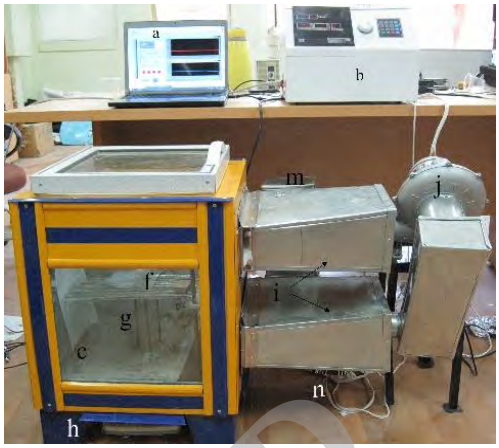
آزمایش‌های تجربی در مرکز تحقیقات خشک‌شدن دانشگاه بیرجند انجام شد. بدین منظور، خشک‌کنی مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شد (شکل ۲). نام و کاربرد اجزای مختلف خشک‌کن، به تفکیک مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- خشک کن طراحی شده و تجهیزات آن

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲- خشک کن ساخته شده و تجهیزات آن

جدول ۱- لیست تجهیزات مورد استفاده در خشک کن به همراه کاربرد آن

مشخصه	نام و ویژگی‌ها	کاربرد
a	کامپیوتر با سیستم عامل ویندوز ۸	ذخیره تصاویر دوربین‌ها، ذخیره جرم، کنترل سیستم
b	سیستم کنترل	تامین شرایط آزمایش
c	محفظه خشک کن	ایجاد فضایی عایق
d	سنسور دما و رطوبت با دقت ۱ °C ± و ۵٪±	فید بک به سیستم کنترل
e	دوربین وب کم (۱.۳ مگاپیکسل)	ثبت تصاویر انقباض
f	نمونه مورد آزمایش	بررسی رفتار خشک شدن
g	پایه نگهدارنده نمونه	انتقال کاهش وزن نمونه
h	ترازو بادقت ۰.۰۱ گرم و ظرفیت ۳۰۰۰ گرم	ثبت وزن با قابلیت اتصال به کامپیوتر
i	کانال هوا	ورود و خروج هوا
j	دمنده	ایجاد هوا با سرعت‌های مختلف
k	گرماساز ۲۰۰۰ وات	گرم کردن هوا حین گردش در سیستم
m	بخار ساز	تامین رطوبت تنظیم شده
n	المان سرد کننده	کاهنده دما و رطوبت

نمونه سرامیک رسی بعد از تجزیه تحلیلی مشابه کار انجام شده توسط خلیلی و همکاران [۱۷]، ابتدا رطوبت زدایی شد و با عبور از مش ۲۰۰ (اندازه ذرات ۷۴ میکرو متر)، یکنواختی اولیه جهت مخلوط شدن با آب به اندازه ۲۰ ٪ را پیدا کرد. جهت ایجاد توزیع یکسان حرارت و رطوبت، قالب-گیری نمونه‌ها ۲۴ ساعت بعد از ایجاد مخلوط اولیه انجام شد. ابعاد داخلی محفظه خشک کن، mm^3 ۴۰۰×۴۰۰×۵۰۰ است و هوا توسط بادزن[1] با سرعت مشخص، بعد از عبور از المنت حرارتی خشک ۲۰۰۰ واتی گرم می‌شود. جهت اطمینان از ایجاد هوای گرم همگن در اطراف قطعه، یکنواخت‌کننده‌ای در ورودی خشک‌کن نصب شده است. مقدار رطوبت مورد نیاز محیط خشک‌کن، توسط دستگاه مولد بخار تامین می‌شود. سرعت جریان هوا توسط، دیمر و درجه حرارت و رطوبت توسط، سنسور SHT7x کنترل می‌شود.

این سنسور، هر سه ثانیه یک بار هم مقدار درجه حرارت را با دقت ۱ درجه سانتی گراد و هم درصد رطوبت را با دقت ۵ درصد اندازه‌گیری کرده، سپس به سیستم کنترل ارسال می‌کند. در صورت عدم تطابق مقادیر اندازه‌گیری شده با نقطه تنظیمی، دستورات لازم از سمت سیستم به اجزاء مربوطه ارسال می‌شود. در کانال خروجی هوا، خنک‌کننده‌ای آلومینیومی نصب شده، در صورتی فعال می‌شود که درجه حرارت و یا رطوبت محفظه بیشتر از مقدار تنظیمی باشد. نمونه مورد مطالعه روی سینی مشبکی داخل خشک‌کن قرار می‌گیرد. این سینی، توسط پایه‌هایی به ترازوی زیر محفظه متصل است. هدف از این نحوه چیدمان، آن است که اولا جریان هوا روی تغییرات وزن نمونه بی تاثیر باشد، ثانیا زیر قطعه نیز در معرض هوای گرم قرار گیرد. توسط این ترازو، تغییرات جرم نمونه هنگام خشک‌شدن را می‌توان کنترل کرد. ترازو با کابل RS232 به کامپیوتر متصل بوده، به گونه‌ای تنظیم شده است که هر ۵ دقیقه یک بار، وزن نمونه توسط ترازو مشخص و بلافاصله به‌صورت یک فایل متنی در کامپیوتر ثبت می‌شود. کاهش ابعاد نمونه و رفتار انقباضی آن توسط ۲ دوربین کنترل می‌شود. این دوربین‌ها به کامپیوتر متصل بوده، با نرم افزار لب ویو کنترل شده، هر ۵ دقیقه یکبار تصاویر بالایی و جانبی قطعه را ثبت می‌کنند. خشک‌کن ساخته شده قابلیت ایجاد دما در محدوده ۰-۱۲۰±۰.۱ °C رطوبت نسبی ۵٪±۹۹-۲۵ و سرعت جریان ۰-۵ ±۰.۲m/s را دارد.

1 . Blower

Archive of SID

www.SID.ir

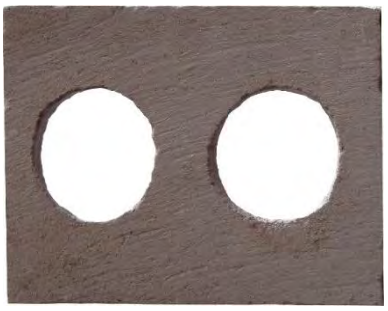
۲-۲ - طراحی آزمایش‌ها

درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا، بعنوان متغیرهای تاثیرگذار بر ضریب نفوذ موثر (فرآیند خشک‌شدن) در نظر گرفته شده است که هر یک از این متغیرها، در سه سطح مطالعه گردید. اثرات هر متغیر بر رفتار خشک‌شدن ۴ نمونه سرامیک با هندسه مختلف، بررسی و ضریب نفوذ برای هر آزمایش، محاسبه شده است. در جدول ۲، پارامترها و سطوح آن‌ها و در جدول ۳، شکل نمونه‌ها به همراه ویژگی‌های آن آورده شده است.

جدول-۲ پارامترها و سطوح مورد بررسی در آزمایش‌ها

پارامتر	علامت	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
رطوبت نسبی (٪)	RH	۳۰	۵۰	۷۰
دمای محیط (^oC)	T	۴۰	۶۰	۸۰
سرعت محیط (ms^{-1})	V	۱	۲	۳

جدول۳ – شکل و ا بعاد نمونه‌های مورد مطالعه تحقیق

نام و ابعاد نمونه‌ها	شکل نمونه ۱ (۱/۲ cm × ۶ × ۸)	نام و ابعاد نمونه‌ها	شکل نمونه ۱ (۱/۲ cm × ۶ × ۸)
قطعه ۱ سطح جانبی کل ۱۲۱/ ۲ حجم ۴۳/ ۲ قطر سوراخ -		**قطعه ۲** سطح جانبی کل ۱۱۸/۵۴ حجم ۳۰/ ۴۷ قطر هر سوراخ ۳	
قطعه ۳ سطح جانبی کل ۱۲۴/۰۲ حجم ۳۶/۸۳ قطر هر سوراخ ۱/۵		**قطعه ۴** سطح جانبی کل ۱۲۸/۷۳ حجم ۳۸/۹۵ قطر هر سوراخ ۱	

جهت بررسی تمامی احتمالات و تعیین دقیق ضریب تاثیر هر پارامتر بر ضریب نفوذ و تقابل پارامترها بر یکدیگر، آزمایش‌های هر ۴ نمونه، به‌صورت فاکتوریل کامل و مطابق جدول ۴ طراحی شد. در این تحقیق برای هر نمونه، ۲۷ آزمایش و در مجموع ۱۰۸ آزمایش انجام شد. تاکنون انجام این حجم آزمایش‌ها در خشک‌شدن، کم نظیراست که فرآیندی زمان‌بر است. در هر آزمایش، ابتدا پارامترهای دستگاه براساس جدول ۴ تنظیم می‌شود و بعد از آنکه خشک‌کن به مقادیر مورد نظر رسید، قطعه داخل آن قرار می‌گیرد و آزمایش شروع می‌شود. به محض قرار دادن قطعه داخل خشک‌کن، تغییرات جرم و تغییرات ابعادی به ترتیب، توسط ترازو و دوربین‌های متصل به کامپیوتر ثبت می‌شود. ناچیز شدن تغییرات جرم نمونه به معنی اتمام آزمایش است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴- طراحی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	مقدار پارامتر T	RH	V	شماره آزمایش	مقدار پارامتر T	RH	V	شماره آزمایش	مقدار پارامتر T	RH	V
۱	۴۰	۳۰	۱	۱۰	۶۰	۳۰	۱	۱۹	۸۰	۳۰	۱
۲	۴۰	۳۰	۲	۱۱	۶۰	۳۰	۲	۲۰	۸۰	۳۰	۲
۳	۴۰	۳۰	۳	۱۲	۶۰	۳۰	۳	۲۱	۸۰	۳۰	۳
۴	۴۰	۵۰	۱	۱۳	۶۰	۵۰	۱	۲۲	۸۰	۵۰	۱
۵	۴۰	۵۰	۲	۱۴	۶۰	۵۰	۲	۲۳	۸۰	۵۰	۲
۶	۴۰	۵۰	۳	۱۵	۶۰	۵۰	۳	۲۴	۸۰	۵۰	۳
۷	۴۰	۷۰	۱	۱۶	۶۰	۷۰	۱	۲۵	۸۰	۷۰	۱
۸	۴۰	۷۰	۲	۱۷	۶۰	۷۰	۲	۲۶	۸۰	۷۰	۲
۹	۴۰	۷۰	۳	۱۸	۶۰	۷۰	۳	۲۷	۸۰	۷۰	۳

با توجه به اینکه طی خشک‌شدن، رطوبت با مکانیزم‌های مختلف از طریق نفوذ مایع، نفوذ بخار، برون ریز (نادسن)، نفوذ حرارتی و یا نیروهای منافذ مویین منتقل می‌شود، اما حرکات اتفاقی مولکول‌های آب، مکانیزم غالبی فرض شده است. طی این فرضیه، رطوبت در مرحله اول خشک‌شدن بر اثر نفوذ مولکولی، به سطح منتقل می‌شود و در ادامه از سطح تبخیر می‌شود. این فرض، توسط پدید آورندگان تحقیق با انجام آزمایش‌های ترموگرافی اثبات شد [۱۴,۱۳].

در این تحقیق، ضخامت در مقایسه با سایر ابعاد تا حد ممکن کوچک انتخاب گردید تا بتوان فرض کرد که تبخیر فقط از سطح نمونه انجام می‌شود. به همین جهت تمام آزمایش‌ها روی قطعه‌ای مکعبی به ابعاد mm ۱۲×۶۰×۸۰ انجام شده است (جدول ۳). با توجه ضخامت انتخاب شده می‌توان برای هر ۴ نمونه، انتقال رطوبت را به صورت دو بعدی در نظر گرفت [۴-۷].

۳- محاسبه ضریب نفوذ موثر

توصیف انتقال رطوبت از داخل نمونه به سطح آن و سپس تبخیر از سطح به محیط پیرامون، به دلیل وجود گرادیان رطوبت بین سطح جسم و داخل آن است و این انتقال توسط رابطه فیک بیان می‌شود. چنانچه ضریب نفوذ متغیری برحسب زمان و درصد رطوبت فرض شود، از رابطه فیک (۱) و در صورت ثابت فرض شدن ضریب نفوذ، از رابطه فیک (۲) جهت توصیف رفتار خشک‌شدن استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = Div(D grad\, M) \quad (۱)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}) \quad (۲)$$

در این تحقیق، ضریب نفوذ متغیر در نظر گرفته شده است؛ زیرا در واقع همزمان با کاهش رطوبت، ضریب نفوذ نیز تغییر کرده، در طول فرآیند ثابت نیست. مقدار ضریب نفوذ موثر از منحنی‌های خشک‌شدن، تجربی و به روش‌های مختلف محاسبه می‌شود [۵].

برخی محققان جهت افزایش دقت مدل، به جای استفاده از ضریب نفوذ (D)، از عامل ضریب نفوذ موثر (D_{eff}) استفاده کرده‌اند [۶, ۷, ۲۳-۲۶]. در این ضریب نفوذ نادسن، حرکت مویینگی، نفوذ بخار و نیز مکانیزم‌های جریان هیدرولیکی نیز گنجانیده شده است؛ یعنی همه مکانیزم‌ها و نیروهای لازم جهت انتقال رطوبت با یکدیگر ترکیب شده، تحت عنوان ضریب نفوذ موثر معرفی می‌شود؛ در نتیجه، رابطه (۱) به‌صورت رابطه (۳) حاصل خواهد شد:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla M) \quad (۳)$$

کرانک، معادله فیک را برای مسائل یک بعدی حل کرد که جواب آن به صورت بی بعد به صورت رابطه (۴) است [۲]:

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)\pi^2} \exp(\frac{-D_{eff}(2n-1)^2\pi^2 t}{(2L)^2}) \quad (۴)$$

در این رابطه، M جرم لحظه‌ای M_e جرم نهایی، M_o جرم اولیه، t زمان، L نصف ضخامت قطعه و MR نسبت رطوبت[1] است که

1. Moisture Ratio

Archive of SID

www.SID.ir

از مقادیر تجربی حاصل می‌شود. مقدار MR در شروع فرآیند یک و با کاهش رطوبت مقدار آن به صفر می‌رسد. رابطه (۴)، دراکثر مطالعات محققان در خشک‌شدن محصولات سرامیکی و غیرسرامیکی استفاده شده است و تاکنون مبنای محاسبات ضریب نفوذ موثر این رابطه است، اما روش‌های استخراج ضریب نفوذ از این رابطه متفاوت است. چنانچه در رابطه (۴)، صرفا جمله اول در نظر گرفته شود و مابقی جملات (به خاطر کوچک بودن) خطا فرض شود، آنگاه رابطه (۵) حاصل خواهد شد [۱۹-۲۱]:

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(\frac{-D_{eff}\pi^2 t}{(2L)^2}\right) \quad (۵)$$

که با معرفی پارامتر ثابت c، مقدارMR را برحسب زمان می‌توان تخمین زد و ضریب نفوذ تقریبی را محاسبه کرد (رابطه ۶و۷)).

$$c = \frac{D_{eff}\pi^2}{(2L)^2} \quad (۶)$$

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \mathcal{R}\exp(-ct) \quad (۷)$$

این روش محاسبه، به نام روش شیب معروف است و از آنجا که برای هر آزمایش، یک مقدار برای ضریب نفوذ موثر حاصل می‌شود، روش دقیقی نیست. در این مطالعه، روش دیگری برای محاسبه ضریب نفوذ استفاده شده است که برخلاف روش قبلی در هر زمان، t یک مقدار برای ضریب نفوذ حاصل می‌شود. در این روش، ابتدا با انتخاب ضریب نفوذ اولیه D_0 مقادیر MR با استفاده از رابطه (۴) محاسبه، در ادامه با MR تجربی مقایسه می‌شود. مقدار خطای مقایسه MR تحلیلی و MR تجربی به صورت رابطه (۸) است:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{i=n}(MR_{ana} - MR_{exp})^2 \quad (۸)$$

مقادیر ضریب نفوذ موثر بهینه با هدف کاهش خطا توسط الگوریتم کرم‌شب تاب برای هر زمان محاسبه خواهد شد. جهت افزایش دقت در محاسبات، اثرات انقباض نیز در رابطه (۴) با معرفی L_t به جای L اعمال گردید و مقدار طول هر لحظه قطعه با استفاده از پردازش تصویر محاسبه، مقدار آن در رابطه (۴) قرار داده شده است.

۳-۱- الگوریتم کرم شب‌تاب

برای پیدا کردن ضریب نفوذ مؤثر، لازم است که خطای بین نتایج تجربی و نتایج تحلیلی (رابطه (۸)) کمینه گردد، به این جهت، استفاده از روش بهینه‌یابی مؤثر ضروریست. الگوریتم کرم شب‌تاب، قابلیت پیدا کردن مقادیر بهینه برای مسائل غیر خطی (مانند ضریب نفوذ موثر) را دارا است و نسبت به سایر روش‌های بهینه‌یابی، جستجوی دقیق‌تری دارد [۲۷]. این الگوریتم بدلیل داشتن سرعت همگرایی بالا استفاده گردید. الگوریتم کرم شب‌تاب، دارای سرعت همگرایی بالایی بوده، لذا ضمن کاهش حجم محاسبات، در تعداد تکرارهای کم به جواب همگرا می‌شود . در این الگوریتم، تابع هدف به سادگی می‌تواند با مقدار روشنایی کرم‌های شب‌تاب متناسب شود . این الگوریتم، بر مبنای هوش جمعی و الهام گرفته از طبیعت کرم شب‌تاب در نحوه ساطع کردن نور خود بدست آمده است و هدف اولیه کرم شب‌تاب از ساطع کردن نور به مانند یک سیستم علامت‌دهی، برای جذب کرم‌های شب‌تاب دیگر است که نخستین بار توسط یانگ[1] در سال ۲۰۰۸ براساس فرضیه‌های زیر ارائه گردید [۲۷]:

الف- کرم‌های شب‌تاب فاقد جنسیت می‌باشند، بنابراین یک کرم شب‌تاب می‌تواند توسط تمامی کرم‌های شب‌تاب دیگر جذب شود.

ب- جذابیت متناسب با نور کرم است و برای هر دو کرم شب‌تاب، کرم با نور کمتر جذب کرم با نور بیشتر می‌شود (به سمت آن حرکت می‌کند)، با افزایش مسافت، کاهش نور کرم شب‌تاب نیز در نظر گرفته می‌شود.

ج- اگر هیچ کرم شب‌تاب نورانی تری نباشد، کرم شب‌تاب به صورت تصادفی حرکت خواهد کرد.

د- روشنایی باید با تابع هدف در ارتباط باشد.

جذابیت یک کرم شب‌تاب، براساس درخشندگی یا شدت نوری تعیین می‌شود که از تابع هدف به دست آمده است. در ساده‌ترین حالت برای مسائل بهینه‌سازی که درآن مقدار بیشینه تابع هدف به دست می‌آید، بیشینه روشنایی، $"I"$ یک کرم شب‌تاب در مکان منحصر به فرد X می‌تواند مقدار روشنایی با تابع هدف متناسب شود ($I(x) \propto f(x)$). با این حال جذابیت، $"\beta"$ کاملا نسبی است و باید در چشمان ناظر دیده شود و یا توسط کرم‌های شب‌تاب دیگر قضاوت شود. بنابراین، جذابیت با مسافت r_{ij} بین کرم شب‌تاب i و کرم شب‌تاب j تغییر می‌کند. شدت نور با افزایش فاصله از

[1] Yang

Archive of SID

www.SID.ir

منبع‌اش کاهش می‌یابد و نور در محیط نیز جذب می‌شود؛ بنابراین باید اجازه داده شود، جذابیت با درجه جذب تغییر کند [۲۸].

در ساده‌ترین حالت شدت نور $I(r)$ با مسافت r بطور پیوسته و نمایی تغییر می‌کند.

بیان ریاضی تغییرات شدت نور در رابطه (۹) آمده است [۲۸].

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (۹)$$

I_0 شدت نور اولیه و γ ضریب جذب نور است. میزان جذب کرم شب‌تاب با شدت نوری متناسب است که از کرم‌های شب‌تاب اطراف ساطع می‌شود. اکنون می‌توان مقدار جذابیت یک کرم شب‌تاب β را طبق رابطه (۱۰) تعریف کرد [۲۸].

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (۱۰)$$

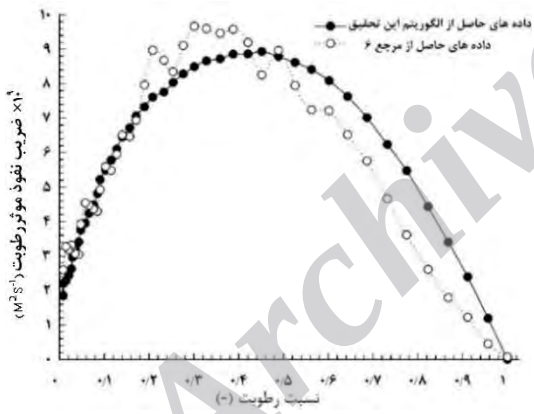
که در آن β_0 مقدار جذابیت درمسافت صفر می باشد. فرآیند بهینه‌سازی این الگوریتم، از تغییرات شدت نور و جذابیت استفاده می‌کند. فاصله بین هر دو کرم شب‌تاب i و j در X_i و X_j را می‌توان از مختصات کارتزین طبق رابطه (۱۱) به دست آورد.

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{n}(X_{i,k} - X_{j,k})^2} \quad (۱۱)$$

که $X_{i,k}$ جزء k از کرم شب‌تاب i است. در این الگوریتم، کرم‌های شب‌تاب به سمت کرم‌های با جذابیت بیشتر حرکت می‌کنند. در هر مرحله، میزان جابجایی کرم جذب شده i به سوی کرم شب‌تاب جذابتر (روشن تر) j، توسط رابطه (۱۲) تعیین می‌شود [۲۸].

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}(x_i - x_j) + \alpha\varepsilon_i \quad (۱۲)$$

قسمت دوم رابطه با جذب در ارتباط است، در حالیکه قسمت سوم تصادفی است که با بردار تصادفی ε_i تغییر می‌کند که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. در اکثر کاربردها می‌توان مقادیر γ=1 ، β_0=1 و $\alpha \in [0,1]$ را در نظر گرفت. پارامتر γ تغییر جذابیت را مشخص می‌کند، و مقدار آن مشخص‌کننده تعیین سرعت همگرایی و چگونگی رفتار الگوریتم کرم شب‌تاب است. در تئوری $\gamma \in [0, \infty)$ اما در عمل گاما مقادیر صفر یا یک را به خود اختصاص می‌دهد و توسط سیستمی تعیین می شود که باید بهینه شود. زمانی‌که $\gamma = 0$، جذابیت ثابت است و $\beta = \beta_0$. در واقع مانند این است که گفته شود شدت نور در فضای ایده‌آل کاهش نمی‌یابد؛ بنابراین کرم شب‌تاب روشن می‌تواند هر جایی از ناحیه دامنه دیده شود؛ بنابراین نقطه بهینه(معمولا بهینه عمومی) می‌تواند براحتی قابل دسترس شود که مطابق با یک حالت خاص الگوریتم پرواز پرندگان است [۲۷]. برنامه این الگوریتم، در متلب نوشته شد و با وارد نمودن MR و مقدار انقباض نمونه و زمان‌های مرحله اول و مرحله دوم، ضریب نفوذ موثر محاسبه می‌شود. جهت تایید نتایج این تحقیق، از داده‌های موجود در مرجع [۶] استفاده گردید. بدین منظور، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار تحلیل نمودار از روی تصویر، داده‌های MR و ضریب نفوذ را از تصاویر موجود در مطالعه مرجع [۶] استخراج و در ادامه با استفاده از آنها مقادیر ضریب نفوذ به روش الگوریتم کرم شب‌تاب محاسبه شد که مقایسه این دو مقدار، در شکل ۸ آمده است؛ چون از تغییرات انقباض قطعه مرجع [۶] طی خشک‌شدن آن اطلاعی در دسترس نبود، تطابق کامل در مرحله اول خشک‌شدن، بین دو روش وجود ندارد؛ اما در مقابل در مرحله دوم خشک‌شدن که انقباض بی‌تاثیر است، انطباق مقادیر ضریب نفوذ دو روش، در حد قابل قبول گزارش شده است.



شکل ۳- مقایسه تحقیق جاری و مرجع [۶]

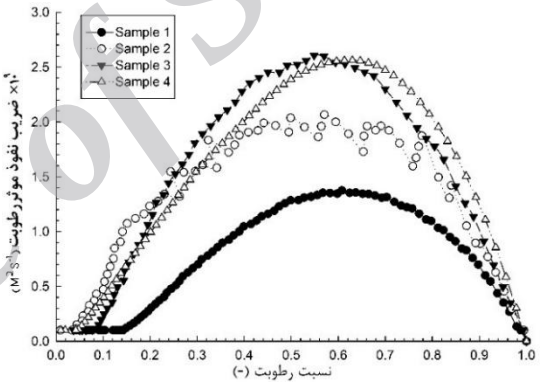
۴ – بحث و نتایج

ضریب نفوذ موثر سرامیک رسی طی خشک‌شدن از نسبت-های رطوبت (MR) آزمایش‌های تجربی در شرایط مختلف و با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب محاسبه گردید، تا با کمک آن اثرات هندسه بر ضریب نفوذ موثر مشخص شود. در تمامی آزمایش‌ها، شیب حرارتی خشک‌کن و تغییرات دما صفر است. نمودار تغییرات ضریب نفوذ برحسب کاهش MR برای ۴ نمونه در شکل‌های ۴ تا ۱۱ ارائه شده است. با توجه

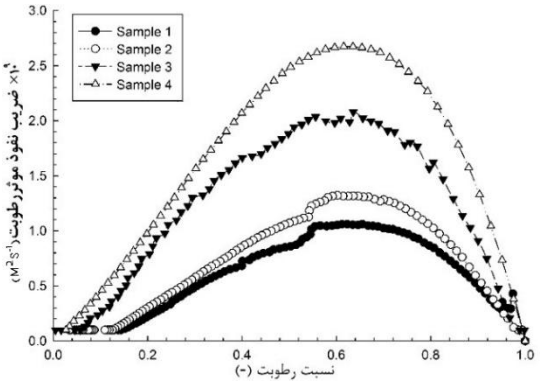
Archive of SID

www.SID.ir

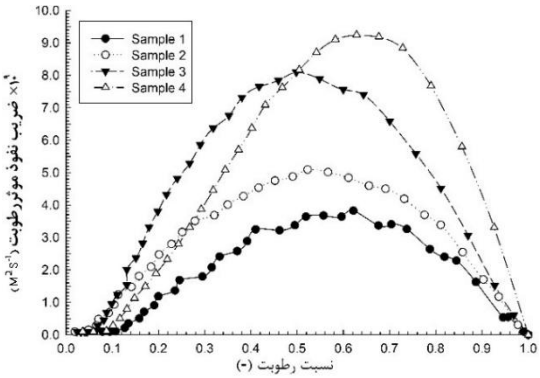
به مشابهت این نمودارها با نمودار سایر آزمایش‌ها و کمبود فضا، صرفا به نمودارهای ۸ آزمایش بسنده شده است. در همه این نمودارها، نمونه ۴ دارای بیشترین ضریب نفوذ و نمونه ۱، دارای کمترین ضریب نفوذ است. در همه این نمودارها، برای نسبت رطوبت بین ۰/۹۵ تا ۱ (ابتدای فرآیند)، مقدار ضریب نفوذ موثر تقریبا صفر است که مرحله پیش‌گرم[1] شدن قطعه است. در مرحله پیش‌گرم ضریب نفوذ برای هر ۴ قطعه، تغییرات چشمگیری ندارد. سرعت خشک‌شدن و ضریب نفوذ در این مرحله، ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. در مرحله پیش‌گرم، حجم اندکی از رطوبت قطعه تبخیر می‌شود و به همین خاطر مقدار انقباض گزارش شده نیز برای هر ۴ نمونه ناچیز گزارش شده است. در این مرحله، سطح ماده از دمای اولیه خود تا رسیدن به دمای حباب‌تر گرم می‌شود و قطعه آماده خشک‌شدن می‌شود.



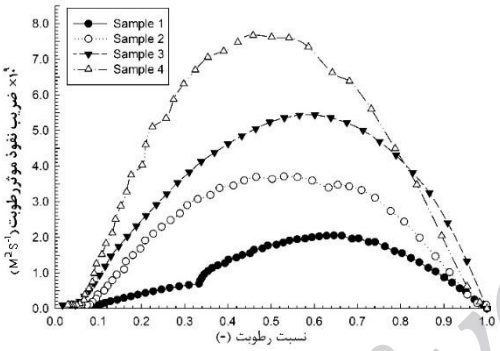
شکل ۴- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۲ برای ۴ نمونه



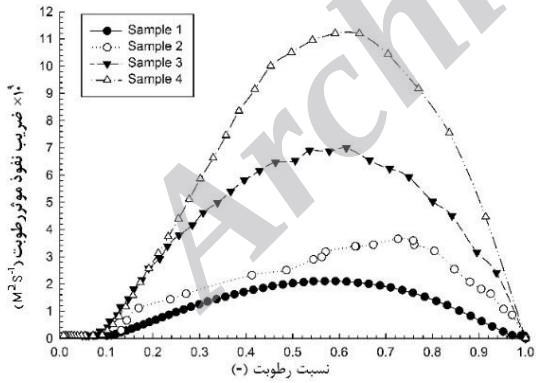
شکل ۵- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۵ برای ۴ نمونه



شکل ۶- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۱۲ برای ۴ نمونه



شکل ۷- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۱۴ برای ۴ نمونه

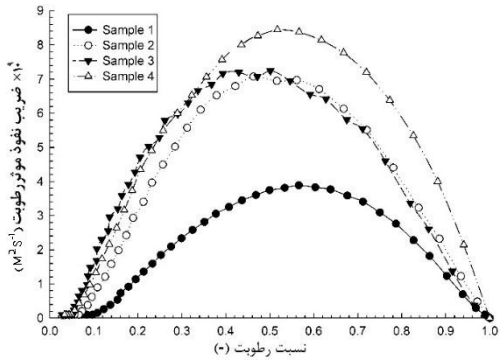


شکل ۸- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۱۹ برای ۴ نمونه

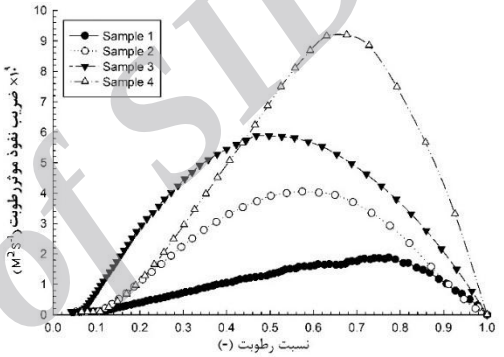
[1] Preheating

Archive of SID

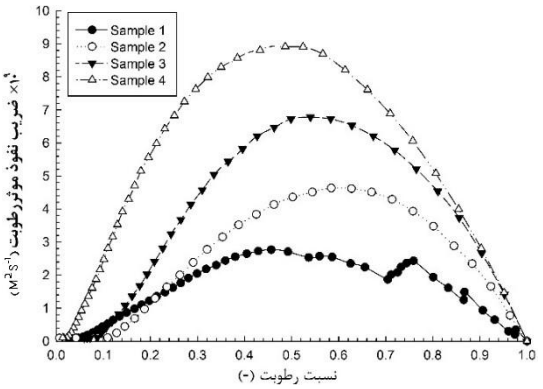
www.SID.ir



شکل ۹- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۲۰ برای ۴ نمونه



شکل ۱۰- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۲۶ برای ۴ نمونه



شکل ۱۱- تغییرات ضریب نفوذ آزمایش ۲۷ برای ۴ نمونه

بعد از مرحله گرم شدن اولیه، با کاهش MR ضریب نفوذ به صورت خطی افزایش می‌یابد؛ تا اینکه در یک MR مشخص به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این فاصله، به‌عنوان مرحله سرعت ثابت خشک‌شدن (مرحله اول) تلقی می‌شود. در مرحله اول، اختلاف تغییرات ضریب نفوذ برای هر قطعه مشخص‌تر است و دامنه تغییرات برای آزمایش‌هایی که سرعت خشک‌شدن بیشتری دارد (آزمایش‌های ۳، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷)، آشکارتر است. در این مرحله، سطح ماده به صورت پیوسته با لایه‌ای از آب پوشیده می‌شود و با تبخیر رطوبت از سطح، رطوبت داخلی قطعه جایگزین رطوبت تبخیر شده از سطح خواهد شد. بدین ترتیب، سطح قطعه همواره اشباع نگه داشته می‌شود، رطوبت قطعه به فضای داخل خشک‌کن منتقل و دمای قطعه تا رسیدن به دمای حباب تر افزایش پیدا می‌کند. مرحله اول خشک‌شدن، مشابه تبخیر آب از یک ظرف است که سایرین [۱۲] به آن اشاره کرده‌اند. به دلیل پدیده مویینگی، مرحله اول همواره با انقباض همراه است و تا این مرحله، تغییر حجم ماده برابر با حجم رطوبت تبخیر شده از سطح ماده است. در ادامه فرآیند با گذشت زمان رطوبت از سطح نمونه تبخیر می‌شود، اما دمای سطح قطعه افزایش چشم‌گیری نداشته، سطح قطعه به خاطر مرطوب بودن در دمای حباب تر باقی می‌ماند. در انتهای مرحله اول، فشار مویینگی به حداکثر مقدار خود رسیده، احتمال ایجاد ترک در این نقطه زیاد است. وقوع ترک در آزمایش‌هایی که سرعت خشک‌شدن بیشتری دارد، محتمل است. در این تحقیق، قطعه ۲ در چهار مورد آزمایش، قطعه ۳ در نه مورد و قطعه ۴ در دو مورد ترک خورد، اما برای قطعه ۱ در هیچ مورد آزمایشی ترک اتفاق نیفتاد.

با پیشرفت فرآیند خشک‌شدن، به تدریج درجه حرارت سطح افزایش پیدا می‌کند. مقدار MR، همچنان کاهش یافته و دمای سطح قطعه به تدریج بالا می‌رود. تغییرات دمایی سطح نمونه طی خشک‌شدن با استفاده از دوربین ترموگرافی بررسی شد. در این مرحله، دیگر سطح قطعه کاملا اشباع نیست و مقداری سطوح خشک روی سطح قطعه نمایان می‌شود که نشان‌دهنده شروع مرحله دوم خشک‌شدن است، به رطوبت این نقطه، رطوبت بحرانی گویند. بیشترین تفاوت ضرایب نفوذ برای ۴ نمونه در رطوبت بحرانی گزارش شده است،زیرا ضریب نفوذ تا رسیدن به این نقطه، روندی افزایشی داشته و در ادامه فرآیند با کاهش نسبت رطوبت، ضریب نفوذ کاهش می‌یابد. رسیدن به نقطه رطوبت بحرانی به عواملی نظیر، نرخ خشک شدن، ضخامت نمونه، درجه حرارت محیط و رطوبت آن وابسته است. این تفاوت در رسیدن به نقطه بحرانی، در شکل‌های ۴ تا ۱۱ مشخص است. در مرحله دوم

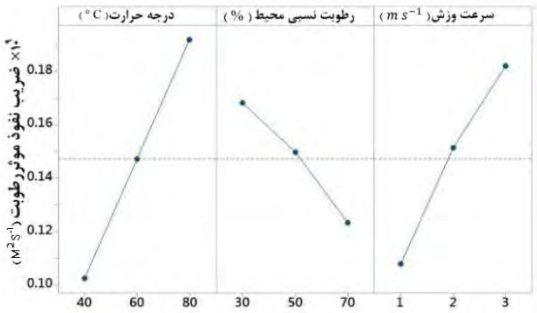
Archive of SID

www.SID.ir

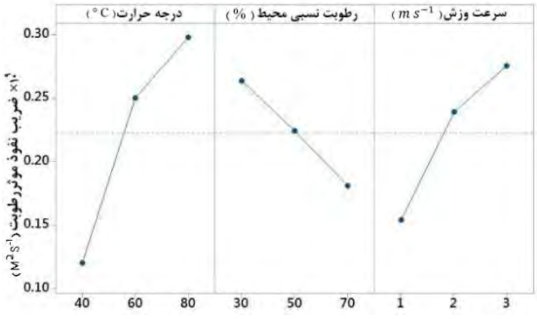
خشک‌شدن، درجه حرارت محیط و خواص سرامیک، تاثیر زیادی بر خروج و انتقال رطوبت باقی‌مانده از قطعه دارند. انتقال رطوبت در این مرحله از حالت بندی[1] به حالت آونگی[2] صورت می‌گیرد. در حالت بندی، بین رطوبت نمونه پیوستگی مایع وجود دارد و مکانیزم حرکت مایع به طرف سطوح نمونه از طریق مویینگی صورت می‌گیرد. هنگامی‌که رطوبت به سمت سطوح قطعه حرکت می‌کند، پیوستگی مایع در سوراخ های ماده از بین رفته، هوا به داخل این سوراخ ها مکیده شده و حالت دوم، یعنی حالت آونگی را به وجود می‌آورد. در این صورت، انتقال رطوبت از سوراخ‌های مویین فقط به صورت موضعی امکان پذیر است. مقدار ضریب نفوذ با کاهش MR، کاهش یافته و با پیشرفت فرآیند مقدار سطوح تر از سطح قطعه، کاملا از بین می‌رود و حباب‌های گازی، باعث عدم پیوستگی رطوبت در منافذ خواهد شد.

برای هر نمونه، می‌توان مقدار اثرگذاری هر پارامتر بر ضریب نفوذ موثر هر قطعه را توسط تحلیل‌های آماری حاصل کرد. از شیب منحنی‌های نمودارهای اثرگذاری پارامترها (شکل‌های ۱۲ تا ۱۵) مشخص شد که دمای محیط، سرعت وزش و رطوبت نسبی محیط به ترتیب، بیشترین تاثیر را بر ضریب نفوذ دارد. از این نمودارها، می‌توان دریافت که درجه حرارت و سرعت جریان هوا با ضریب نفوذ رابطه مستقیم و رطوبت نسبی با ضریب نفوذ رابطه عکس دارد؛ اما شدت این رابطه برای نمونه‌های مختلف تفاوت دارد؛ یعنی شدت اثر گذاری درجه حرارت برای نمونه ۱ و نمونه ۴، یکسان نیست و هر چقدر مقدار ضریب نفوذ بیشتر شود، شدت اثرگذاری پارامتر بالاتر خواهد رفت.

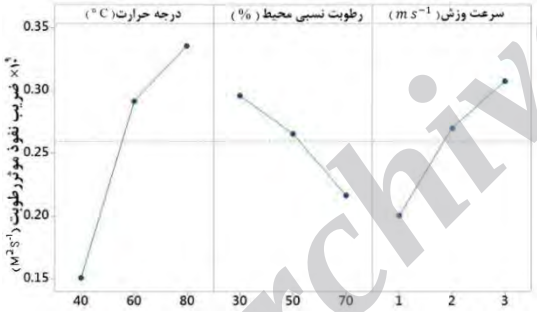
با توجه به اهمیت ضریب نفوذ در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، ایجاد رابطه تجربی بین ضریب نفوذ موثر و پارامترهای خشک‌شدن ضروری است. چون بعضا لازم است که این پارامتر را در شرایط مختلف محیطی بدون انجام آزمایش پیش‌بینی کرد. این رابطه تجربی با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی و آنالیز واریانس، قابل انجام است. بدین جهت ابتدا تحلیل اثر گذاری پارامترها بر یکدیگر انجام شد تا



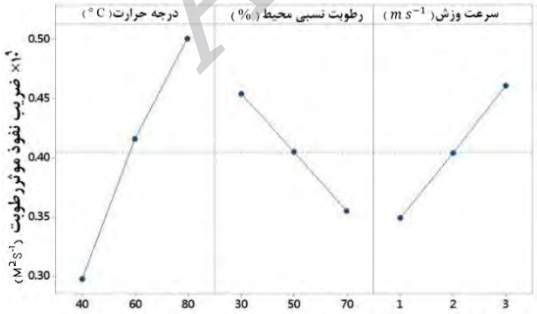
شکل ۱۲- نمودار اثر گذاری پارامترهای خشک‌کن بر ضریب نفوذ (نمونه ۱)



شکل ۱۳- نمودار اثر گذاری پارامترهای خشک‌کن بر ضریب نفوذ (نمونه ۲)



شکل ۱۴- نمودار اثر گذاری پارامترهای خشک‌کن بر ضریب نفوذ (نمونه ۳)



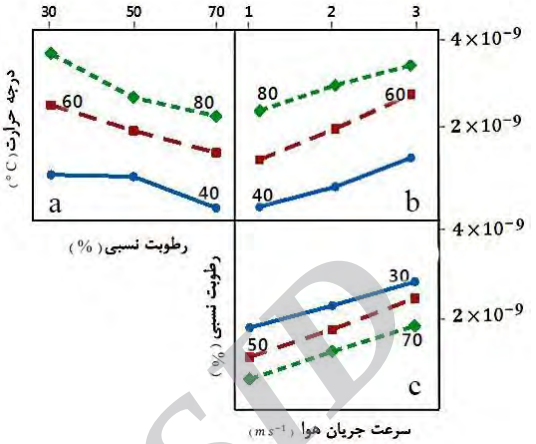
شکل ۱۵- نمودار اثر گذاری پارامترهای خشک‌کن بر ضریب نفوذ (نمونه ۴)

[1] funicular
[2] pendular

Archive of SID

www.SID.ir

پارامترهای مستقل و یا وابسته به یکدیگر شناسایی شوند. نمودار شکل ۱۶، ابزار مناسبی برای شناسایی تقابل پارامترها بر یکدیگر است.



شکل ۱۶- نمودار تقابل پارامترها

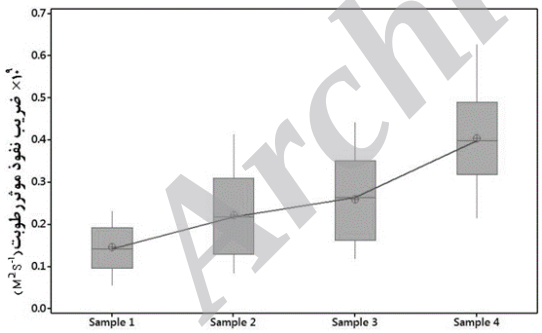
این شکل مربوط به نمونه ۴ است و بخاطر مشابه بودن با سایر نمودارها، به همین یک نمودار بسنده شد. در شکل ۱۶، سه نمودار و در هر یک سه منحنی وجود دارد که هر منحنی، نشان‌دهنده یک سطح از پارامتر محور عمودی نمودار است. در دو نمودار سمت راست (نمودار a و b) خطوط داخل نمودار، موازی هستند و موازی بودن خطوط (سطوح پارامترها)، مبین عدم تقابل آنها بر یکدیگر است. این امر نشان‌دهنده آن است که به ازای ترکیب‌های مشخصی از پارامترها و سطوح آنها، مقدار ضریب نفوذ متفاوت است. نمودار سمت چپ (نمودار c) که تقابل بین رطوبت نسبی و درجه حرارت محیط است، با دو نمودار دیگر متفاوت است و با یکدیگر موازی نبوده و برخورد دارند. این برخورد، نشان دهنده تاثیر دو پارامتر رطوبت نسبی و دمای محیط بر یکدیگر است؛ یعنی تقابل دما و رطوبت جهت تعیین ضریب نفوذ معنی‌دار است؛ اما برای تقابل سرعت و رطوبت نسبی و تقابل سرعت و دما در تحلیل آماری معنی‌دار نیست.

این تحلیل برای سایر نمونه‌ها انجام و در ادامه رابطه رگرسیونی برای هر نمونه حاصل شد. جدول ۵ ضرایب رگرسیون ۴ نمونه را نشان می دهد. با استفاده از این رابطه‌ها می‌توان مقدار ضریب نفوذ را با دقت ٪۹۴-۸۸٪ پیش‌بینی کرد.

جدول ۵- ضرایب رگرسیون ۴ نمونه برای تخمین ضریب نفوذ $\times10^{9}$

	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
T	$\frac{2192}{10^6}$	$\frac{2965}{10^6}$	$\frac{4428}{10^6}$	$\frac{7}{10^3}$
RH	$\frac{-1149}{10^6}$	$\frac{-1602}{10^6}$	$\frac{-2148}{10^6}$	-
V	$\frac{3654}{10^5}$	-	$\frac{5106}{10^5}$	$\frac{5399}{10^5}$
$RH\times T$	-	-	-	$\frac{-41}{10^6}$
$V\times T$	-	$\frac{1023}{10^6}$	-	-

در شکل ۱۷، بازه تغییرات میانگین ضریب نفوذ موثر ۴ نمونه برای تمام آزمایش‌ها رسم شده است. بیشترین بازه تغییرات و بزرگترین میانگین ضریب نفوذ، مربوط به نمونه ۴ و کمترین آن‌ها را نمونه ۱ به خود اختصاص داده است. نحوه تغییرات میانگین ضریب نفوذ بین نمونه‌ها با ترسیم خط میانگین بین هر نمونه قابل مشاهده است. از این نمودار نتیجه گرفته می‌شود، مساحت جانبی رابطه مستقیم و غیرخطی با مقدار ضریب نفوذ موثر دارد. کیفیت این رابطه را به کمک آنالیزهای آماری می‌توان درک کرد.



شکل ۱۷- نمودار جعبه‌ای تغییرات ضریب نفوذ ۴ نمونه

۵ - نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار خشک‌شدن سرامیک رسی با تغییر هندسه قطعه با طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی به‌صورت کامل بررسی شد. با مقایسه نسبت رطوبت بدست آمده بین روش تجربی و رابطه تحلیلی و همچنین کمینه کردن مجموع

Archive of SID

www.SID.ir

مربعات خطا (رابطه ۸)، ضریب نفوذ بدست آمده است. در این تحقیق مشخص شد، افزایش مساحت جانبی از ۲ /۱۲۱ (نمونه ۱) به ۱۲۸/۷۳ (نمونه ۴)، افزایش تقریبا ۵ برابری ضریب نفوذ را به همراه خواهد داشت. افزایش مساحت جانبی با تغییر هندسه قطعه، مزایایی مثل کاهش انرژی، افزایش کیفیت محصول (مقایسه ترک‌های نمونه ۲ و نمونه ۴) و کاهش مسیر خروج رطوبت از داخل قطعه به هوای بیرون را به همراه دارد.

تحلیل‌های آماری روی میانگین ضریب نفوذ موثر ۴ نمونه، نشان داد که پارامترهای دما، سرعت و رطوبت محیط به‌صورت مستقل عمل نموده، به یکدیگر وابسته نیستند و ضریب نفوذ موثر رطوبت با دما و سرعت محیط رابطه مستقیم و با رطوبت محیط، رابطه‌ی معکوس دارد. در این تحقیق، مشخص شد که بیشترین اثرگذاری بر ضریب نفوذ را به ترتیب دما، سرعت و رطوبت نسبی به خود اختصاص داده است. جهت تخمین ضریب نفوذ برحسب پارامترهای خشک-شدن، روابطی بر مبنای رگرسیون غیرخطی پیشنهاد شد تا با پیش‌بینی مقدار ضریب نفوذ موثر بتوان خشک‌شدن سرامیک را به‌صورت ریاضی مدل کرد.

۶- مراجع

[1] S. J. Kowalski, Thermomechanics of drying processes: Spring Sci& Busi, 2012 .

[2] J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford, UK, 1975, pp. 414

[3] G. I. Efremov, Drying kinetics derived from diffusion equation with flux-type boundary conditions, DRY TECHNOL, Vol. 20, No. 1, pp. 55-66, 2002 .

[4] M. R. Vasic, Z. M. Radojevic, M. V. Arsenovic, Z. B. Grbavcic, Determination of the effective diffusion coefficient, REV ROM MAT, Vol. 41, No. 2, pp. 169-175, 2011 .

[5] M. Vasić, Ž. Grbavčić, Z. Radojević, Methods of determination for effective diffusion coefficient during convective drying of clay products, 2012 .

[6] M. Vasić, Ž. Grbavčić, Z. Radojević, Analysis of Moisture Transfer During the Drying of Clay Tiles with Particular Reference to an Estimation of the Time-Dependent Effective Diffusivity, DRY TECHNOL, Vol. 32, No. 7, pp. 829-840, 2014 .

[7] M. Vasić, Ž. Grbavčić, Z. Radojević, Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying, CHEM ENG PROG ,Vol. 76, pp. 33-44, 2014 .

[8] F. Zagrouba, D. Mihoubi, A. Bellagi, Drying of clay. II Rheological modelisation and simulation of physical phenomena, DRY TECHNOL, Vol. 20 ,No. 10, pp. 1895-1917, 2002 .

[9] S. Chemkhi, F. Zagrouba, Water diffusion coefficient in clay material from drying data, Desalination, Vol. 185, No. 1, pp. 491-498, 2005 .

[10] A. Sander, D. Skansi, N. Bolf, Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs, CERAM IND, Vol. 29, No. 6, pp. 641-653, 2003 .

[11] I. Boulaoued, A. Mhimid, Determination of the diffusion coefficient of new insulators composed of vegetable fibers, THERM SCI, Vol. 16, No. 4, pp. 987-995, 2012 .

[1] M. Bakhshi, B. Mobasher, C. Soranakom, Moisture loss characteristics of cement-based materials under early-age drying and shrinkage conditions, CONSTR BUILD MATER, Vol. 30, pp. 413-425, 2012 .

[۱۳] خلیل خلیلی، سید یوسف احمدی بروغنی، محسن باقریان، مطالعه آزمایشگاهی و عددی فرایند خشک شدن سرامیک ها و ایجاد ترک در آنها، مکانیک سازه ها و شاره ها، دوره ۴،۱۳۹۳، ۱۱۹ -۱۲۹.

[۱۴] خلیل خلیلی، سید یوسف احمدی بروغنی، محسن باقریان، مدل سازی فرآیند خشک شدن مخلوط اشباع خاک رس و انقباض قطعه در طی فرآیند، علم و مهندسی سرامیک، جلد ۳، شماره ۱، ۱۳۹۳، ۶۵-۸۰ .

[۱۵] خ. خلیلی، م. حیدری، مدلسازی عددی انقباض یک قطعه سرامیکی در فرآیند خشک شدن, مهندسی مکانیک مدرس, دوره ۱۲، شماره ۳، ۱۳۹۱، ۷۱-۵۸.

[۱۶] خ. خلیلی, م. حیدری, عنوان مقاله: بررسی تاثیر ضخامت جسم بر امکان وقوع ترک در فرآیند خشک شدن. مهندسی مکانیک مدرس, دوره ۱۲، شماره ۳، ۱۳۹۱، ۱۰۳-۱۱۶

[۱۷] خلیل خلیلی، محسن باقریان، سید یوسف احمدی بروغنی، شبیه سازی خشک شدن سرامیک ها به کمک اجزاء محدود و مقایسه با آزمایشات تجربی، فصلنامه سرامیک ایران، تابستان

[18] K. Khalili ,M. Bagherian, S. Khisheh, Numerical Simulation of Drying Ceramic Using Finite Element and Machine Vision, Proc Tech, Vol. 12, pp. 388-393, 2014 .

[19] L. M. Batista, C. A. da Rosa, L. A. Pinto, Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan, J FOOD ENG, Vol. 81, No. 1, pp. 127-132, 2007 .

[20] N. Hamdami, J.-Y. Monteau, A. Le Bail, Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures .Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data, J FOOD ENG, Vol. 62, No. 4, pp. 385-392, 2004 .

Archive of SID

www.SID.ir

[21] L. Pinto, S. Tobinaga, Diffusive model with shrinkage in the thin-layer drying of fish muscles, DRY TECHNOL, Vol. 24, No. 4, pp. 509-516, 2006 .

[22] A. Dissa, H. Desmorieux, J. Bathiebo, J. Koulidiati, Convective drying characteristics of Amelie mango with correction for shrinkage, J FOOD ENG, Vol. 88, No. 4, pp. 429-437, 2008 .

[23] G. Efremov, T. Kudra, Calculation of the effective diffusion coefficients by applying a quasi-stationary equation for drying kinetics, DRY TECHNOL, Vol. 22, No. 10, pp. 2273-2279, 2004 .

[24] I. Ruiz-López, M .García-Alvarado, Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity, J FOOD ENG, Vol. 79, No. 1, pp. 208-216, 2007 .

[25] M. Vasić, Z. Radojević, Ž. Grbavčić, Calculation of the effective diffusion coefficient during the drying of clay samples, J Serbian Chem Soc, Vol. 77, No. 4, pp. 523-533, 2012 .

[26] D. Kimpton, F. Wall, Determination of diffusion coefficients from rates of evaporation, j Phy Chem, Vol. 56, No. 6, pp. 715-717, 1952 .

[27] X.-S. Yang, Nature-inspired metaheuristic algorithms: Luniver press, 2010 .

[28] X.-S. Yang, Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation, Int J Bio-Ins Comp, Vol. 2, No. 2, pp. 78-84, 2010 .

Archive of SID

www.SID.ir