

## بررسی عوامل مؤثر بر ضریب نفوذ رطوبت در خشک‌شدن سرامیک رسی و تبیین مدل تحلیلی فرآیند\*

محسن باقریان<sup>(۱)</sup> خلیل خلیلی<sup>(۲)</sup> سید یوسف احمدی بروغنی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این مقاله ضریب نفوذ رطوبت به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در توصیف خشک‌شدن سرامیک رسی مورد مطالعه قرار گرفته است. متغیرهای تأثیرگذار بر ضریب نفوذ مؤثر، درجه حرارت (C 40-60-80)، رطوبت نسبی (% 30-50-70) و سرعت جریان هوا ( $ms^{-1}$  1-2-3) در نظر گرفته شده و اثرات آنها بر رفتار خشک‌شدن سرامیک بررسی گردیده است. در این تحقیق، آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل طراحی شده است و طی هر آزمایش، کاهش جرم و کاهش حجم نمونه به‌ترتیب توسط ترازو و دوربین‌های متصل به کامپیوتر، ثبت می‌شود. ضریب نفوذ مؤثر از مقایسه مقدار تحلیلی معادله فیک و مقادیر تجربی و استفاده از الگوریتم تازه گسترش‌یافته کرم شب‌تاب محاسبه شد که در این الگوریتم تابع هدف، کاهش مقدار خطا بین مقادیر تحلیلی و مقادیر تجربی است. بررسی‌های آماری و آنالیز واریانس ضریب نفوذ مؤثر نشان داد که پارامترهای سرعت، دما و رطوبت محیط خشک‌کن به‌صورت مستقل از یکدیگر بر فرآیند خشک‌شدن تأثیر دارند و همچنین بیشترین تأثیر بر روی ضریب نفوذ مؤثر به‌ترتیب مربوط به درجه حرارت، سرعت وزش و رطوبت محیط است. مقایسه نتایج این تحقیق و مطالعات سایر محققان، حاکی از 97٪ تطابق و کاربردی بودن این روش در محاسبه ضریب نفوذ مؤثر در فرآیندهای خشک‌شدن سرامیک است.

**واژه‌های کلیدی** خشک‌شدن سرامیک، قانون فیک، ضریب نفوذ مؤثر، ترموگرافی سطح، بهینه‌سازی.

### Study the Factors affecting the Moisture Diffusion Coefficient in Drying Clay Ceramics and Explanations the Analytical Model Process

M. Bagherian K. Khalili S.Y. Ahmadi Brooghani

**Abstract** In this study, effective diffusion coefficient of drying clay of ceramics drying clay ceramics have been studied. In this study, the effects of temperature (40-60-80 °C), relative humidity (30-50-70%) and air velocity (1-2-3 ms<sup>-1</sup>) on the drying behavior of clay ceramics were investigated. A full factorial design of experiments on a cubic sample was performed. In each trial mass and volume reduction using balance and camera was registered and the drying curve was plotted. Effective diffusion coefficient of moisture using drying curves were calculated using the newly developed algorithm of firefly. In this algorithm, the goal is to reduce the error between the analytical values and experimental values. Statistical analysis and analysis of variance showed that in calculation of the effective diffusion coefficient the velocity, temperature and humidity are independent of each other. The greatest impact on the effective diffusion coefficient is respectively related to the temperature, velocity and environment humidity. The comparison between this study and other studies show that 97% similarity and applicability of this method in calculating the effective diffusion coefficient of the ceramic drying processes.

**Key Words** Ceramic Drying, Fick's law, the effective diffusion coefficient, surface thermography, optimization.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۷/۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۷/۲۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند. M.bagherian@Birjand.ac.ir

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.

## مقدمه

خشک شدن فرآیند پیچیده‌ای است که در آن انتقال حرارت و رطوبت به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد. این فرآیند تحت تأثیر پارامترهای دما، رطوبت و سرعت محیط (عوامل خارجی) و مقدار تخلخل‌ها و توزیع اندازه ذرات (عوامل داخلی) است. اگرچه تغییرات خواص ماده و توزیع غیریکنواخت حرارت و رطوبت، شبیه‌سازی فرآیند را بسیار دشوار می‌کند، ولی با وجود این پیچیدگی‌ها ایجاد مدلی مطمئن برای توصیف فرآیند خشک شدن ضروری است. مطالعات فراوانی در زمینه خشک شدن محصولات متخلخل انجام شده است، که هر یک مکانیزم‌های مختلفی از انتقال جرم را برای خشک شدن بیان نموده‌اند. براساس نظر محققان، انتقال رطوبت با مکانیزم‌های نفوذ مایع، نفوذ بخار، برون‌ریزی (Effusion)، نفوذ حرارتی (Thermal Diffusion)، نیروهای منافذ موین (Capillary Diffusion) و یا ترکیبی صورت می‌گیرد [1]. اگرچه همه این مکانیزم‌ها از پایه فیزیکی قوی برخوردار هستند، اما 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 این توصیف توسط رابطه فیک بیان می‌شود. بر این اساس کرانک [2] اطلاعات جامعی از مدل‌های انتقال جرم برای شکل‌های مختلف و شرایط مرزی متفاوت ارائه نموده است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است [2].

ضریب نفوذ رطوبت به‌عنوان اصلی‌ترین عامل در فرآیندهای خشک شدن مورد استفاده قرار می‌گیرد و با محاسبه این عامل می‌توان به توصیف مدل فرآیند به‌صورت ریاضی پرداخت و در راستای ایجاد محصولی سالم قدم برداشت. بر همین اساس اخیراً تعدادی از محققان بررسی‌هایی در این زمینه انجام

دادند. افریمو [3] 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 نمود. آنها دریافت نمودند که افزایش درجه حرارت، با افزایش ضریب نفوذ همراه است. واسیک و همکاران [4-7] چهار مدل مختلف برای توصیف فرآیند خشک شدن سرامیک رسی پیشنهاد داده‌اند، که در دو مدل اثرات انقباض لحاظ و در دو مدل دیگر از آن چشم‌پوشی شده است. در دو مدل اول، ضریب نفوذ به‌روش شیب از رابطه ساده‌شده فیک محاسبه می‌شود و در دو مدل بعدی (که در راستای معادلات نفوذی افریمو بودند) ضریب نفوذ از مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی به‌دست می‌آید. آنها نشان دادند که اعمال اثرات انقباض، دقیق‌تر شدن مدل ریاضی فرآیند را به‌همراه دارد که این نتیجه صرفاً با انجام هشت آزمایش به‌دست آمده است. زاگروبا و همکاران [8] با تحلیل معادلات بقا (انرژی، جرم، ممنوتوم) مطالعه ارزشمندی در زمینه تحلیل تنش، مقدار رطوبت محتوی و انقباض سرامیک رسی انجام داده‌اند و برای ضریب نفوذ رطوبت رابطه آرنیوسی را پیشنهاد کرده‌اند. آنها با انجام پنج آزمایش پارامترهای این رابطه را تخمین زدند. چمخی و همکاران [9] ضریب نفوذ مؤثر رطوبت سه نوع مختلف گل را به‌صورت یک معادله درجه دوم برحسب رطوبت قطعه پیش‌بینی نمودند. این تحقیق با معرفی عدد فوریه و استفاده از معادله فیک صورت گرفت و اثرات درجه حرارت و رطوبت محیط فقط با انجام پنج آزمایش بررسی شد و از اثرات سرعت محیط چشم‌پوشی کردند. ساندر و همکاران [10] با استفاده از شبکه عصبی مقدار رطوبت و دمای نمونه نازکی از سرامیک را به‌صورت ریاضی مدل کردند. آنها دریافتند که تغییرات دمای خشک شدن و خاصیت‌های انتقال نمونه به‌صورت نمایی تغییر می‌کنند و مدلی نیز با نام خود به‌ثبت رساندند. آنها صرفاً اثرات دمای محیط را بر روی ضریب نفوذ مؤثر خشک شدن بررسی

می‌گیرد. دما، رطوبت و سرعت محیط پارامترهای مورد بررسی هستند که هر یک در سه سطح انتخاب می‌شوند. طی هر آزمایش شرایط محیطی توسط سیستم کنترل ساخته شده، ثابت است و در هر آزمایش تغییرات دمای سطح قطعه توسط دوربین ترموگرافی ثبت می‌شود. مقدار ضریب نفوذ مؤثر از منحنی‌های خشک‌شدن و از دو روش شیب [21-19] و یا مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی [24-22] محاسبه می‌شود. در این تحقیق ضریب نفوذ با استفاده از روش دوم محاسبه می‌شود و هم‌چنین برای کاهش مقدار خطای مقایسه مقادیر تجربی و تحلیلی از الگوریتم بهینه‌سازی نوین کرم شب‌تاب استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روش‌های جستجو دقیق‌تر است و تاکنون در خشک‌شدن مورد مطالعه قرار نگرفته است. بعد از محاسبه ضریب نفوذ مؤثر، تحلیل آماری و آنالیز واریانس انجام می‌شود تا اثرپذیری پارامترها مشخص شود. در ادامه با استفاده از رگرسیون معادله‌ای برای پیش‌بینی مقدار ضریب نفوذ مؤثر برحسب پارامترها ارائه شده است. با استفاده از این رابطه می‌توان مدل توصیفی فرآیند خشک‌شدن سرامیک رسی را بیان کرد و در راستای بهینه‌کردن فرآیند و تولید محصولات سرامیکی سالم گام برداشت. در انتها، نتایج این تحقیق با مقادیر ارائه شده در مطالعات سایر محققان مقایسه شده است.

### مطالعات آزمایشگاهی

**مواد و تجهیزات.** آزمایش‌های تجربی در مرکز تحقیقات خشک‌شدن دانشگاه بیرجند انجام شد. بدین منظور خشک‌کنی مطابق شکل (۱) (راست) طراحی و سپس با همکاری تعدادی از دانشجویان برق و مکانیک این دانشگاه مانند شکل (۱) (چپ) ساخته شد. نام کاربرد اجزای مختلف خشک‌کن به تفکیک به‌همراه مشخصه لاتین آنها در جدول (۱) آورده شده است.

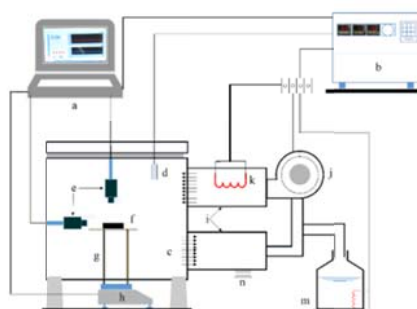
نمودند. بولاود و محمد [11] تغییرات ضریب نفوذ مؤثر را روی مقره‌های الکتریکی با تغییر در ساختار ماده بررسی کردند. در این تحقیق آنها پی بردند که افزایش فیبر به مقره‌های سرامیکی، صرفاً تا حد مشخصی می‌تواند مقدار ضریب نفوذ را افزایش دهد و بعد از آن با افزایش فیبر، ضریب نفوذ ثابت باقی خواهد ماند.

در تحقیق بخشی و همکاران [12] دو مکانیزم مختلف برای مراحل اول و دوم خشک‌شدن 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 به‌صورت مجزا محاسبه و در نهایت با استفاده از اجزای محدود تنش و ترک‌های خشک‌شدن سیمان را در مرحله اول مطالعه کردند. خلیلی و همکاران [۱۳، ۱۴] خشک‌شدن سرامیک رسی را با استفاده از ماشین بینایی 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 و سه‌بعدی پیش‌بینی کردند [۱۵، ۱۶]. در این تحقیقات نشان داده شد که در رطوبت‌های کم به‌خاطر پایین بودن تنش تسلیم احتمال ترک نمونه بیشتر می‌شود. آنها در ادامه به مدل ریاضی انقباض قطعه پرداختند و نتایج را با مقادیر تجربی مقایسه کردند [۱۷، ۱۸].

تاکنون مطالعات محققان در زمینه خشک‌شدن سرامیک و محاسبه ضریب نفوذ براساس طراحی و انجام آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل نیست و اثر هر پارامتر و تقابل عوامل بر یکدیگر بررسی نشده است. این تحقیق با هدف محاسبه ضریب نفوذ مؤثر در شرایط محیطی مختلف انجام شده است و در آن طراحی آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل صورت

مستطیل انجام می‌شود. ابعاد داخلی محفظه خشک‌کن  $500 \times 400 \times 400$  mm است. هوا توسط بادزن (Blower) با سرعت مشخص از المنت حرارتی خشک ۲۰۰۰ واتی عبور کرده و گرم می‌شود. به منظور ایجاد هوای همگن در اطراف قطعه، یکنواخت‌کننده مکانیکی در ورودی خشک‌کن نصب شده است.

نمونه سرامیک رسی بعد از تجزیه و تحلیل [۱۷] و رطوبت زدایی اولیه با عبور از مش ۲۰۰ (اندازه ذرات ۷۴ میکرون متر)، یکنواختی اولیه برای مخلوط شدن با آب به اندازه ۲۰٪ (بر مبنای خشک) را پیدا کرد. برای ایجاد توزیع یکسان حرارت و رطوبت، ۲۴ ساعت بعد از ایجاد مخلوط اولیه، قالب‌گیری نمونه به شکل مکعب



شکل ۱ دیاگرام خشک‌کن طراحی شده (سمت چپ) و خشک‌کن ساخته شده و تجهیزات علامت گذاری شده در آن (سمت راست)

جدول ۱ لیست تجهیزات مورد استفاده در خشک‌کن 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	تأمین شرایط آزمایش
c	محفظه خشک‌کن	ایجاد فضای عایق
d	سنسور دما و رطوبت با دقت $1^\circ\text{C}$ و $\pm 5\%$	بازخورد به سیستم کنترل
e	دوربین	ثبت تصاویر انقباض
f	نمونه مورد آزمایش	بررسی رفتار خشک شدن
g	پایه نگهدارنده نمونه	انتقال کاهش وزن نمونه
h	ترازو با دقت 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	هیتر ۲۰۰۰ وات	گرم کردن هوا حین گردش در سیستم
m	بخارساز	تأمین رطوبت تنظیم شده
n	المان سردکننده	کاهنده دما و رطوبت

۰.۱±۱۲۰- رطوبت نسبی ۵±۹۹-۲۵ و سرعت جریان ۰.۲±۰.۵ m/s را دارد. شکل (۲) نمایی از داخل خشک‌کن را نشان می‌دهد.

**طراحی آزمایش‌ها.** در این تحقیق درجه حرارت (C) ۴۰-۶۰-۸۰، رطوبت نسبی (۳۰-۵۰-۷۰) و سرعت جریان هوا (۱-۲-۳ ms<sup>-1</sup>) به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر ضریب نفوذ مؤثر در نظر گرفته می‌شود و اثرات آنها بر رفتار خشک‌شدن سرامیک و ضریب نفوذ بررسی شده است. در جدول (۲) سطوح مربوط به هر یک به همراه علامت اختصاری آن آورده شده است. به منظور بررسی تمامی احتمالات و تعیین دقیق ضریب تأثیر هر پارامتر و تقابل آنها بر یکدیگر و فرآیند، آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل کامل و مطابق جدول (۳) طراحی شد. در هر آزمایش ابتدا پارامترهای دستگاه براساس جدول (۳) تنظیم می‌شود و بعد از آن که 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 و با صفر شدن تغییرات جرم نمونه آزمایش به اتمام می‌رسد و مقدمات آزمایش بعدی فراهم خواهد شد. با توجه به اینکه طی خشک‌شدن، رطوبت با مکانیزم‌های مختلف از طریق نفوذ مایع، نفوذ بخار، برون ریز (نارسن)، نفوذ حرارتی و یا نیروهای منافذ موین منتقل می‌شود، تاکنون توضیح دقیقی در ارتباط با خروج رطوبت بیان نشده است. طبق گفته محققان از بین مکانیزم‌های فوق، نفوذ رطوبت براساس حرکات اتفاقی مولکول‌های آب، مکانیزم غالبی در خشک‌شدن 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 پدیدآورندگان تحقیق با انجام آزمایش‌های ترموگرافی اثبات شد.

مقدار رطوبت مورد نیاز محیط خشک‌کن توسط دستگاه بخور تأمین می‌گردد. شدت جریان هوا توسط دیمر و مقدار درجه حرارت و رطوبت توسط سنسور SHT7x کنترل می‌شود. این سنسور هر سه ثانیه یک بار مقدار درجه حرارت و رطوبت را اندازه‌گیری و به سیستم کنترل ارسال می‌کند. در صورت عدم تطابق با نقطه تنظیمی دستورات لازم از سمت سیستم به اجزای مربوطه ارسال می‌شود. در کانال خروجی هوا، هیت سینکی نصب شده است و در صورتی که درجه حرارت و یا رطوبت محفظه بیشتر از مقدار تنظیمی باشد، فعال می‌شود. 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 اولاً جریان هوا بر روی تغییرات وزن نمونه بی‌تأثیر باشد ثانیاً زیر قطعه نیز در معرض هوای گرم قرار گیرد.



شکل ۲ نمایی از قطعه داخل خشک‌کن

تغییرات جرم نمونه را حین خشک‌شدن می‌توان با این ترازو کنترل کرد. ترازو با کابل R232 به کامپیوتر متصل می‌باشد و به گونه‌ای تنظیم شده است که هر پنج دقیقه یکبار وزن نمونه را ثبت می‌کند. کاهش ابعاد نمونه و رفتار انقباضی آن توسط دو دوربین کنترل می‌شود. این دوربین‌ها به کامپیوتر متصل‌اند و با نرم‌افزار لب‌ویو کنترل می‌شوند و هر پنج دقیقه یکبار تصاویر بالایی و جانبی قطعه را ثبت می‌کنند. خشک‌کن ساخته شده قابلیت ایجاد دما در محدوده ۰°C

سطح، پنج نقطه در قسمت‌های مختلف صفحه تصویر دوربین مانند شکل (۳) ایجاد گردید تا با ثبت دمای این نقاط طی بازه‌های زمانی مختلف، نمودارهای تغییر دمای سطح برحسب زمان ترسیم شوند. بدین منظور دوربین حرارتی در بالای قطعه به نحوی تنظیم شد که هر یک دقیقه یکبار عکس حرارتی بگیرد و ذخیره کند. نمونه‌هایی از تصاویر ترموگرافی در شکل (۴) نشان داده شده است. در ادامه با انتقال تصاویر از دوربین به کامپیوتر، مقادیر دمای پنج نقطه و زمان آن از تصاویر حرارتی استخراج و در یک فایل صفحه‌گسترده ثبت شد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان نمودار ترموگرافی را ترسیم نمود. نمونه‌ای از این نمودارها در شکل (۵) نشان داده شده است که تحلیل آن در بخش بعدی ارائه شده است.

بدین منظور علاوه بر ۲۷ آزمایش فوق، آزمایش‌های دیگری نیز تحت عنوان ترموگرافی سطح، برای بررسی تغییرات درجه حرارت سطح نمونه انجام شد تا با تحلیل نمودارهای حاصل از ترموگرافی و نمودارهای خشک‌شدن، مکانیزم غالب شناسایی شود.

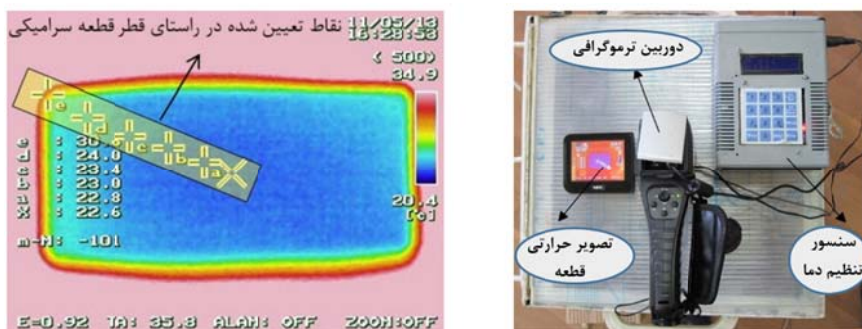
**دمانگاری سطح قطعه.** علاوه بر ۲۷ آزمایش فوق، آزمایش‌های تجربی دیگری نیز انجام شد. در این آزمایش‌ها فقط درجه حرارت به عنوان پارامتر فرآیند در نظر گرفته شد. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی ارتباط درجه حرارت سطح قطعه و دمای محیط بود که تحت عنوان آزمایش‌های ترموگرافی انجام شد. در این آزمایش‌ها از یک دوربین حرارتی مدل ترمو تریسر جی ۱۰۰ استفاده شد. برای بررسی تغییرات دمای

جدول ۲ پارامترها و سطوح مورد بررسی در آزمایش‌های تجربی

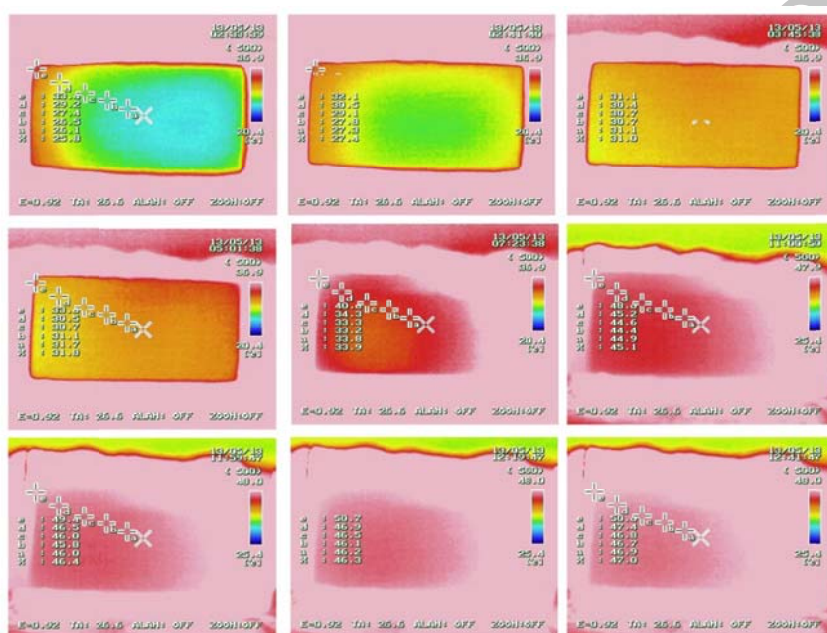
پارامتر	علامت	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
رطوبت نسبی (%)	RH	۳۰	۵۰	۷۰
دمای محیط (°C)	T	۴۰	۶۰	۸۰
سرعت محیط ( $ms^{-1}$ )	V	۱	۲	۳

جدول ۳ طراحی آزمایش‌ها

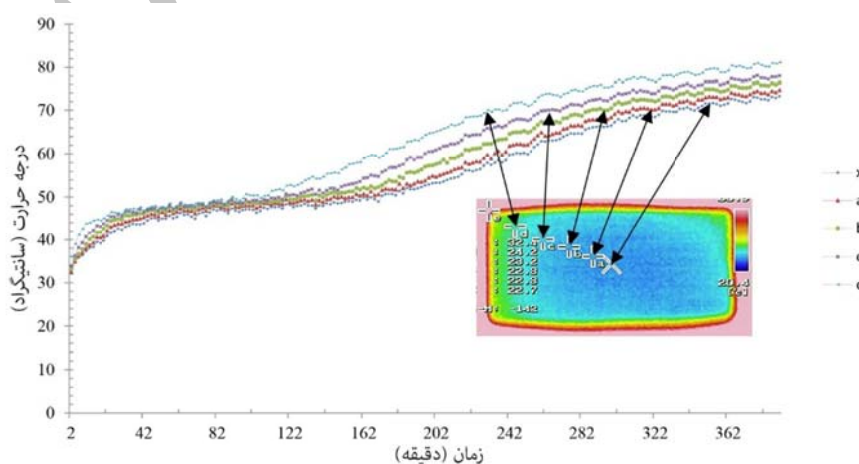
شماره آزمایش	مقدار پارامتر	شماره	مقدار پارامتر	شماره	مقدار پارامتر	شماره	مقدار پارامتر	شماره	مقدار پارامتر	شماره	مقدار پارامتر
آزمایش	T	RH	V	آزمایش	T	RH	V	آزمایش	T	RH	V
۱	۴۰	۳۰	۱	۱۰	۶۰	۳۰	۱	۱۹	۴۰	۳۰	۱
۲	۴۰	۳۰	۲	۱۱	۶۰	۳۰	۲	۲۰	۴۰	۳۰	۲
۳	۴۰	۳۰	۳	۱۲	۶۰	۳۰	۳	۲۱	۴۰	۳۰	۳
۴	۴۰	۵۰	۱	۱۳	۶۰	۵۰	۱	۲۲	۴۰	۵۰	۱
۵	۴۰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



شکل ۳ نمایش دوربین ترموگرافی بر روی خشک کن (راست)، تصویر حرارتی دوربین (چپ)



شکل ۴ ترموگرافی سطح در ۵۰ درجه سانتی گراد



شکل ۵ ترسیم نمودار تغییرات دمای سطح با استفاده از ترموگرافی در محیط ۷۵ درجه

## محاسبه ضریب نفوذ مؤثر

توصیف انتقال رطوبت از داخل نمونه به سطح آن و سپس تبخیر از سطح به دلیل وجود گرادیان رطوبت بین سطح جسم و داخل آن است و توسط رابطه فیک بیان می‌گردد. چنانچه ضریب نفوذ متغیر فرض شود از رابطه فیک (۱) و در صورت ثابت فرض شدن ضریب نفوذ از رابطه فیک (۲) برای توصیف رفتار خشک‌شدن استفاده می‌شود. در این تحقیق ضریب نفوذ متغیر در نظر گرفته شده است و نحوه تغییرات آن از منحنی‌های خشک‌شدن تجربی به روش‌های مختلف محاسبه می‌شود [5].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{Div}(D \text{grad } M) \quad (1)$$

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

محققان به منظور افزایش دقت مدل، به جای استفاده از ضریب نفوذ (D)، از عامل ضریب نفوذ مؤثر ( $D_{eff}$ ) استفاده می‌کنند [6, 7, 23-26]. در این ضریب خواص مولکولی، نفوذ ناسن، حرکت موینگی، نفوذ بخار و نیز مکانیزم‌های جریان هیدرولیکی گنجانیده شده است. یعنی همه مکانیزم‌ها و نیروهای لازم برای انتقال رطوبت با یکدیگر ترکیب شده‌اند که تحت عنوان ضریب نفوذ مؤثر معرفی می‌گردد و رابطه (۱) به صورت رابطه (۳) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla M) \quad (3)$$

کرانک معادله فیک رابطه (۳) را برای مسائل یک‌بعدی به صورت رابطه (۴) حل نموده است [2]:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff}(2n-1)^2\pi^2 t}{(2L)^2}\right) \quad (4)$$

در این رابطه MR نسبت رطوبت (Moisture Ratio) است و از مقادیر تجربی حاصل می‌شود [3]. مقدار MR در شروع فرآیند یک و با کاهش رطوبت مقدار آن به صفر می‌رسد. رابطه (۴) در اکثر مطالعات محققان در خشک‌شدن محصولات سرامیکی و غیرسرامیکی استفاده شده است و تاکنون مبنای محاسبات ضریب نفوذ مؤثر این رابطه است، اما روش‌های استخراج ضریب نفوذ از این رابطه متفاوت است. برخی محققان [19-21] با انتخاب زمان طولانی، سمت راست سری رابطه (۴) را به صورت رابطه (۵) همگرا کردند:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{eff}\pi^2 t}{(2L)^2}\right) \quad (5)$$

آنها با معرفی پارامتر ثابت c به صورت رابطه (۶)، مقدار MR را برحسب زمان تخمین زدند و ضریب نفوذ را محاسبه نمودند (رابطه ۷).

$$c = \frac{D_{eff}\pi^2}{(2L)^2} \quad (6)$$

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \mathcal{R} \exp(-ct) \quad (7)$$

این روش محاسبه به نام روش شیب معروف است و از آنجا که برای هر آزمایش یک مقدار برای ضریب نفوذ مؤثر حاصل می‌شود روش دقیقی نیست. در این مطالعه از روش دیگر 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 نفوذ اولیه  $D_0$  مقادیر MR با استفاده از رابطه (۴) محاسبه و در ادامه با MR تجربی مقایسه می‌شود. مقدار خطای MR تحلیلی و تجربی به صورت رابطه (۸) است.

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^n (MR_{analytical} - MR_{experimental})^2 \quad (8)$$



د- روشنایی باید با تابع هدف در ارتباط باشد. جذابیت یک کرم شب تاب بر اساس درخشندگی یا شدت نوری تعیین می شود که از تابع هدف به دست آمده است. در ساده ترین حالت برای مسائل بهینه سازی که در آن مقدار بیشینه تابع هدف به دست می آید، بیشینه روشنایی "I" یک کرم شب تاب در مکان منحصر به فرد  $X$  می تواند مقدار روشنایی با تابع هدف متناسب شود ( $I(x) \propto f(x)$ ). با این حال جذابیت، " $\beta$ " کاملاً نسبی است و باید در چشمان ناظر دیده شود و یا توسط کرم های شب تاب دیگر قضاوت شود. بنابراین، جذابیت با مسافت  $r_{ij}$  بین کرم شب تاب  $i$  و کرم شب تاب  $j$  تغییر می کند. شدت نور با افزایش فاصله از منبع اش کاهش می یابد، و نور در محیط نیز جذب می شود بنابراین باید اجازه داده شود جذابیت با درجه جذب تغییر کند [28].

در ساده ترین حالت شدت نور  $I(r)$  با مسافت  $r$  به طور پیوسته و نمایی تغییر می کند. بیان ریاضی تغییرات شدت نور در رابطه (۹) آمده است [28].

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (9)$$

$I_0$  شدت نور اولیه و  $\gamma$  ضریب جذب نور است. میزان جذب کرم شب تاب با شدت نوری که از کرم های شب تاب اطراف ساطع می شود متناسب است. اکنون می توان مقدار جذابیت یک کرم شب تاب  $\beta$  را طبق رابطه (۱۰) تعریف نمود [28].

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (10)$$

شبه کد الگوریتم کرم شب تاب که در آن  $\beta_0$  مقدار جذابیت در مسافت صفر است در شکل (۶) نمایش داده شده است.

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

**الگوریتم کرم شب تاب.** از آنجا که ضریب نفوذ مؤثر به صورت غیرخطی تغییر می کند، بنابراین برای یافتن جواب های بهینه به الگوریتم های بهینه سازی مؤثر و کارا نیاز است. در این تحقیق محاسبه مقادیر ضریب نفوذ بهینه توسط الگوریتم تازه گسترش یافته کرم شب تاب انجام می شود که در آن تابع هدف به صورت رابطه (۸) تعریف شده است.

این الگوریتم بر مبنای هوش جمعی و الهام گرفته از طبیعت کرم شب تاب در نحوه ساطع کردن نور خود به دست آمده است و هدف اولیه کرم شب تاب از ساطع کردن نور به مانند یک سیستم علامت دهی برای جذب کرم های شب تاب دیگر است که نخستین بار توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ بر اساس فرضیه های زیر ارائه گردید [27]:

الف- کرم های شب تاب فاقد جنسیت می باشند، بنابراین یک کرم شب تاب می تواند توسط تمامی کرم های شب تاب دیگر جذب شود.

ب- جذابیت متناسب با نور کرم است و برای هر دو کرم شب تاب، کرم با نور کمتر جذب کرم با نور بیشتر می شود (به سمت آن حرکت می کند)، با افزایش مسافت کاهش نور کرم شب تاب نیز در نظر گرفته می شود.

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

**Firefly Algorithm**

Objective function  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$   
 Initialize a population of fireflies  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )  
 Define light absorption coefficient  $\gamma$   
 while ( $t < \text{MaxGeneration}$ )  
 for  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies  
 for  $j = 1 : i$  all  $n$  fireflies  
 Light intensity  $I_i$  at  $x_i$  is determined by  $f(x_i)$   
 if ( $I_j > I_i$ )  
 Move firefly  $i$  towards  $j$  in all  $d$  dimensions  
 end if  
 Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$   
 Evaluate new solutions and update light intensity  
 end for  $j$   
 end for  $i$   
 Rank the fireflies and find the current best  
 end while  
 Postprocess results and visualization

شکل ۶ شبه کد الگوریتم کرم شب تاب [29]

هم‌گرایی و چگونگی رفتار الگوریتم کرم شب تاب است. در تئوری  $\gamma \in [0, \infty)$  اما در عمل 1 یا  $\gamma = 0$  توسط سیستمی که باید بهینه شود تعیین می‌شود. در نهایت زمانی که  $\gamma = 0$ ، جذابیت ثابت است و  $\beta = \beta_0$ . در واقع مانند این است که گفته شود شدت نور در یک فضای ایده‌آل کاهش نمی‌یابد. بنابراین یک کرم شب تاب روشن می‌تواند در هر جایی از ناحیه دامنه دیده شود. بنابراین یک نقطه بهینه (معمولاً بهینه عمومی) می‌تواند به راحتی قابل دسترس شود که مطابق با یک حالت خاص الگوریتم پرواز پرنندگان است [27].

**بحث و نتایج**

ضریب نفوذ مؤثر سرامیک رسی طی خشک شدن از نسبت‌های رطوبت MR آزمایش‌های تجربی در شرایط مختلف و با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب محاسبه گردید. نمودار تغییرات ضریب نفوذ در طی کاهش MR برای این آزمایش‌ها در شکل‌های (۹-۷) آمده است. از این نمودارها و سایر داده‌های تجربی می‌توان در راستای تحلیل فرآیند استفاده نمود. در این نمودارها مشخص است که در ابتدای فرآیند، مقدار ضریب نفوذ

فرآیند بهینه‌سازی این الگوریتم از تغییرات شدت نور و جذابیت استفاده می‌نماید. فاصله بین هر دو کرم شب تاب  $i$  و  $j$  در  $X_i$  و  $X_j$  را می‌توان از مختصات کارتزین طبق رابطه (۱۱) به دست آورد.

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{i,k} - X_{j,k})^2} \quad (11)$$

$X_{i,k}$  جزء  $k$  از کرم شب تاب  $i$

در این الگوریتم کرم‌های شب تاب به سمت کرم‌های با جذابیت بیشتر حرکت می‌کنند. در هر مرحله میزان جابه‌جایی کرم جذب شده  $i$  به سوی کرم شب تاب جذابتر (روشن تر) توسط رابطه (۱۲) تعیین می‌شود [28].

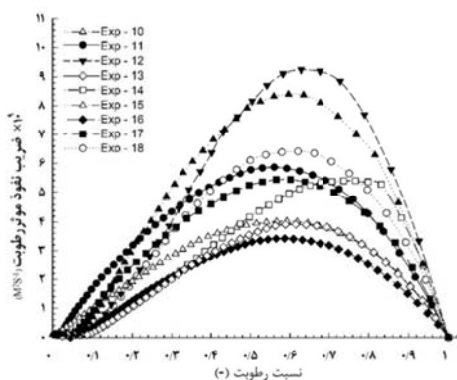
$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_i - x_j) + \alpha \varepsilon_i \quad (12)$$

قسمت دوم رابطه با جذب در ارتباط است، در حالی که قسمت سوم تصادفی است که با بردار تصادفی  $\varepsilon_i$  تغییر می‌کند که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. در اکثر کاربردها می‌توان مقادیر  $\gamma=1$ ،  $\beta_0=1$  و  $\alpha \in [0,1]$  را در نظر گرفت. پارامتر  $\gamma$  تغییر جذابیت را مشخص می‌کند، و مقدار آن مشخص کننده تعیین سرعت

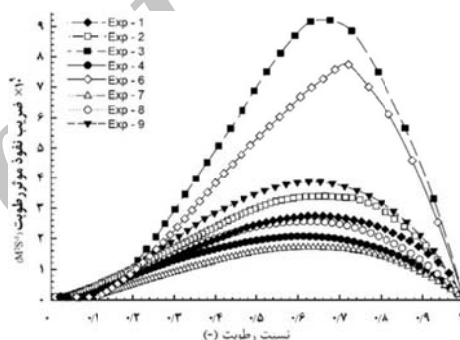
در یک MR مشخص به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این دوره، به‌عنوان مرحله سرعت ثابت خشک‌شدن تلقی می‌شود. در این مرحله سطح ماده به‌صورت پیوسته با لایه‌ای از آب پوشیده می‌شود و با تبخیر رطوبت از سطح، رطوبت داخلی قطعه جایگزین رطوبت تبخیر شده از سطح می‌شود و بدین ترتیب سطح قطعه همواره اشباع نگه داشته می‌شود. به‌همین دلیل درجه حرارت سطح قطعه در این مرحله ثابت و برابر مقدار درجه حرارت محیط است (فاصله A تا B در شکل ۱۰). محققان این مرحله را مانند تبخیر آب از یک ظرف پرآب فرض کرده‌اند [12].

مؤثر تقریباً صفر است. این مرحله، مرحله پیش‌گرم (Preheating) قطعه است. سرعت خشک‌شدن و ضریب نفوذ در مرحله گرم‌شدن ناچیز و قابل چشم‌پوشی است به‌همین خاطر حجم اندکی از رطوبت قطعه تبخیر می‌شود و مقدار انقباض گزارش شده نیز ناچیز است.

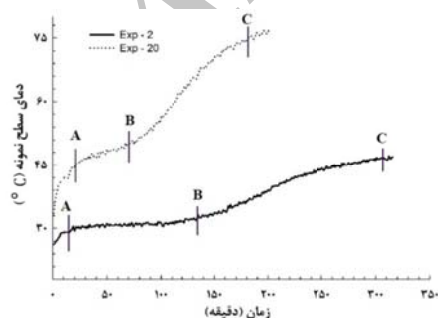
در این مرحله، سطح ماده از دمای اولیه خود تا رسیدن به دمای حباب تر گرم می‌شود. در شکل (۱۰) که تغییرات دمای سطح قطعه آورده شده است نیز می‌توان طول مرحله گرم‌شدن اولیه قطعه را دید (نقطه A). ضریب نفوذ بعد گذر از مرحله گرم‌شدن اولیه، با کاهش MR به‌صورت خطی افزایش می‌یابد تا این‌که



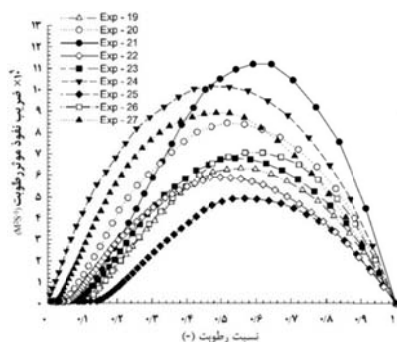
شکل ۸ تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در برابر نسبت رطوبت برای آزمایش ۱۰ تا ۱۸



شکل ۷ تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در برابر نسبت رطوبت برای آزمایش ۱ تا ۹

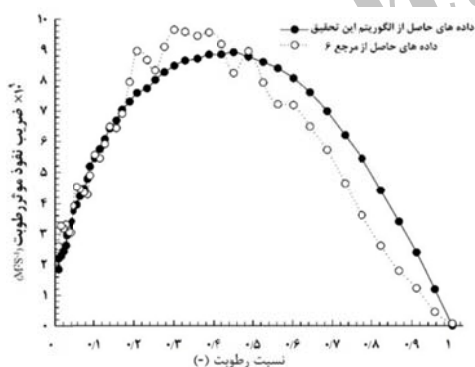


شکل ۱۰ نمودار ترموگرافی سطح خشک‌شدن سرامیک رسی



شکل ۹ تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در برابر نسبت رطوبت برای آزمایش ۱۹ تا ۲۷

می‌رود و حباب‌های گازی باعث عدم پیوستگی رطوبت در منافذ خواهد شد. نقطه C که نقطه رطوبت بحرانی پایینی نامیده می‌شود، مشخص‌کننده انتهای انتقال از حالت بندی به آونگی است و هم‌زمان با آن خشک‌شدن متوقف می‌شود و ضریب نفوذ رطوبت به سمت صفر میل می‌کند. برای تأیید نتایج این تحقیق، از داده‌های موجود در مرجع [6] استفاده شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از نرم‌افزار تحلیل نمودار از روی تصویر، داده‌های MR و ضریب نفوذ از تصاویر موجود در مطالعه مرجع [6] استخراج شد و در ادامه با استفاده از آنها مقادیر ضریب نفوذ به روش الگوریتم کرم شب‌تاب محاسبه شد که مقایسه این دو مقدار در شکل (۱۱) آمده است. بدین علت که از تغییرات انقباض قطعه مرجع [6] طی خشک‌شدن آن، اطلاعی در دسترس نبود، در مرحله اول خشک‌شدن بین دو روش تطابق ۱۰۰٪ اتفاق نیفتاد. اما در مقابل در مرحله دوم خشک‌شدن که انقباض بی‌تأثیر است، انطباق مقادیر ضریب نفوذ دو روش در حد قابل قبول گزارش شد.



شکل ۱۱ مقایسه تحقیق جاری و مرجع [6]

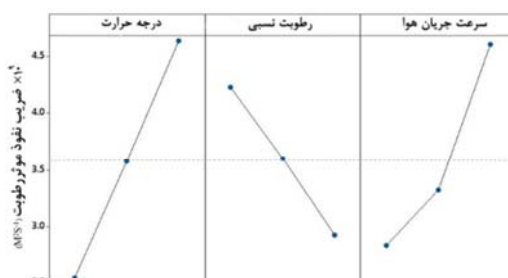
به‌منظور تعیین اثرگذاری هر پارامتر بر ضریب نفوذ مؤثر، تحلیل‌های آماری نیز به‌کمک نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد. در شکل (۱۲) نمودار اثرگذاری سه پارامتر بر ضریب نفوذ مؤثر آمده است و از آن می‌توان

به‌دلیل پدیده مویبندی مرحله اول همواره با انقباض همراه است [30] و ثابت شده است که تغییر حجم ماده برابر با حجم رطوبت تبخیرشده از سطح ماده است. در انتهای این مرحله فشار مویبندی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و احتمال ایجاد ترک در این نقطه زیاد است [31]. علاوه بر آن افزایش سرعت خروج بخار آب از میان ساختار متخلخل بر اثر افزایش درجه حرارت نیز باعث ترک قطعه می‌شود. جایگزینی آب تبخیر شده با آب داخل قطعه در مرحله اول توسط چند مکانیزم مختلف توصیف می‌شود [6]. اشباع ماندن منافذ مویب و اختلاف پتانسیل مویبندی، انتقال رطوبت به‌صورت مایع و کاهش MR را به‌همراه دارد. با پیشرفت فرآیند مقدار MR هم‌چنان کمتر شده و دمای سطح قطعه نیز به‌تدریج بالا می‌رود. در این مرحله دیگر سطح قطعه کاملاً اشباع نیست و مقداری سطوح خشک روی سطح قطعه نمایان می‌شود (نقطه B). این نقطه به‌عنوان نقطه بحرانی بالایی تلقی می‌شود که نمایانگر شروع انتقال رطوبت از حالت بندی (funicular) به حالت آونگی (pendular) است. رسیدن به این نقطه به عواملی نظیر نرخ خشک‌شدن، ضخامت نمونه، درجه حرارت محیط و رطوبت آن وابسته است. در این مرحله درجه حرارت محیط و خواص سرامیک تأثیر زیادی بر خروج و انتقال رطوبت باقی‌مانده از قطعه دارند. در حالت بندی بین رطوبت نمونه پیوستگی مایع وجود دارد و حرکت مایع به طرف سطح خارجی ماده، از طریق مویبندی صورت می‌گیرد. هنگامی که آب به‌سمت سطح خارجی ماده حرکت می‌کند پیوستگی مایع در سوراخ‌های ماده از بین می‌رود و هوا به داخل این سوراخ‌ها مکیده می‌شود و حالت دوم یعنی حالت آونگی را به‌وجود می‌آورد. در این صورت انتقال رطوبت از سوراخ‌های مویب فقط به‌صورت موضعی امکان‌پذیر است و مقدار ضریب نفوذ با کاهش MR، کاهش می‌یابد. با پیشرفت فرآیند مقدار سطوح تر از سطح قطعه کاملاً از بین

آنها برای هر آزمایش در جدول (۴) آمده است. در جدول (۴) بیشترین مقدار ضریب نفوذ و سرعت تبخیر متعلق به آزمایش ۲۱ و کمترین مقدار متعلق به آزمایش ۷ است.

با توجه به اهمیت ضریب نفوذ در مدل‌سازی فرآیند خشک‌شدن ایجاد رابطه تجربی بین ضریب نفوذ مؤثر و پارامترهای خشک‌شدن ضروری است؛ تا بتوان این پارامتر را در شرایط مختلف محیطی بدون انجام آزمایش‌ها پیش‌بینی نمود. این رابطه با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی و آنالیز واریانس قابل انجام است. بدین جهت ابتدا تحلیل اثرگذاری پارامترها بر یکدیگر انجام شد تا مشخص شود آیا پارامترها به صورت مستقل یا وابسته از یکدیگر عمل می‌کنند. در شکل (۱۳) این تحلیل انجام شد و با توجه به موازی بودن خطوط در شرایط مختلف می‌توان استنباط نمود که پارامترهای مورد بررسی هیچ تقابلی بر یکدیگر ندارند و مستقل از هم عمل می‌کنند.

درک نمود که درجه حرارت و سرعت جریان هوا رابطه مستقیم و رطوبت نسبی رابطه معکوس با ضریب نفوذ دارند. از شیب هر نمودار در این شکل می‌توان دریافت که بیشترین تأثیر بر ضریب نفوذ مؤثر را به ترتیب دمای محیط، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی محیط به خود اختصاص داده‌اند.

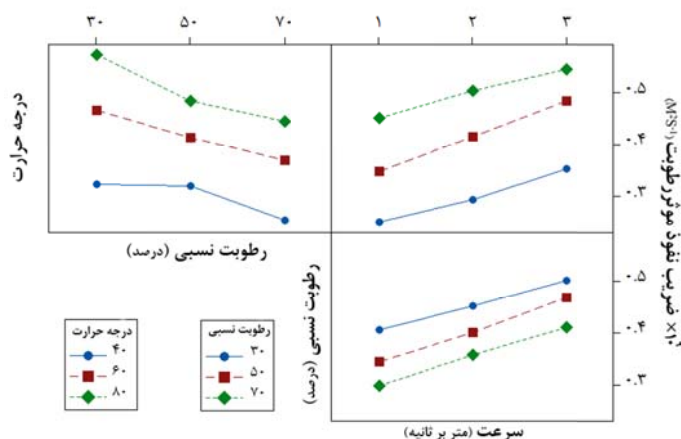


شکل ۱۲ نمودار اثرگذاری پارامترهای خشک‌کن بر سرعت خشک‌شدن قطعه

لازم به ذکر است که در تحلیل اثرگذاری، میانگین ضریب نفوذ مؤثر هر آزمایش لحاظ گردید که مقادیر

جدول ۴ متوسط ضریب نفوذ مؤثر و سرعت خشک‌شدن برای ۲۷ آزمایش

شماره آزمایش	نرخ خشک‌شدن gr/min	ضریب نفوذ (m <sup>2</sup> /s) × 10 <sup>-9</sup>	شماره آزمایش	نرخ خشک‌شدن gr/min	ضریب نفوذ (m <sup>2</sup> /s) × 10 <sup>-9</sup>	شماره آزمایش	نرخ خشک‌شدن gr/min	ضریب نفوذ (m <sup>2</sup> /s) × 10 <sup>-9</sup>
۱	۰/۰۴۱۳	۲/۰۸۳۲	۱۰	۰/۰۸۰۰	۳/۳۱۱۸	۱۹	۰/۱۰۱۷	۴/۴۴۵۵
۲	۰/۰۶۹۷	۲/۴۱۰۸	۱۱	۰/۰۹۴۴	۳/۸۳۵۰	۲۰	۰/۱۲۴۸	۵/۴۱۰۴
۳	۰/۰۸۶۷	۴/۴۸۵۶	۱۲	۰/۱۰۶	۵/۵۹۹۷	۲۱	۰/۱۳۳۳	۶/۵۳۸۴
۴	۰/۰۳۷۱	۱/۶۲۲۱	۱۳	۰/۰۶۹۷	۲/۸۰۱۸	۲۲	۰/۰۹۷۷	۴/۳۲۱۶
۵	۰/۰۴۶۰	۱/۹۹۱۸	۱۴	۰/۰۸۹۴	۳/۸۳۲۵	۲۳	۰/۱۰۷۳	۴/۳۶۲۲
۶	۰/۰۶۷۲	۴/۰۷۷۴	۱۵	۰/۰۹۱۹	۴/۳۵۲۵	۲۴	۰/۱۲۵۸	۵/۲۷۳۳
۷	۰/۰۳۶۶	۱/۳۸۹۴	۱۶	۰/۰۶۰۷	۲/۲۸۸۹	۲۵	۰/۰۹۲۴	۳/۲۰۰۴
۸	۰/۰۴۵۱	۱/۹۸۳۲	۱۷	۰/۰۶۷۱	۲/۳۷۸۷	۲۶	۰/۰۹۹۱	۲/۶۶۵۲
۹	۰/۰۴۵۶	۲/۸۲۶۷	۱۸	۰/۰۸۶۳	۳/۷۴۸۴	۲۷	۰/۱۱۲۵	۴/۵۸۰۸



شکل ۱۳ نمودار تقابل پارامترها بر یکدیگر برای ضریب نفوذ

پنج دقیقه‌ای به دست آمد. طبق مطالعات تجربی دیگری که توسط ترموگرافی سطح انجام شد، صحت مدل نفوذ فیک برای خشک شدن قطعات مکعبی سرامیکی بررسی شد. با مقایسه نسبت رطوبت به دست آمده بین روش تجربی و رابطه تحلیلی و هم چنین کمینه نمودن مجموع مربعات خطا، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب محاسبه شد. در این تحقیق توصیف انتقال رطوبت با مکانیزم نفوذ و توسط قانون دوم فیک بیان گردید.

تحلیل‌های آماری میانگین ضریب نفوذ مؤثر نشان داد که پارامترهای دما، سرعت و رطوبت محیط به صورت مستقل عمل می‌کنند و به یکدیگر وابسته نیستند و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با دما و سرعت محیط رابطه مستقیم و با رطوبت محیط رابطه 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. در نهایت، معادله‌ای جهت تخمین ضریب نفوذ برحسب پارامترهای خشک شدن پیشنهاد شد چرا که با داشتن مقدار ضریب نفوذ مؤثر می‌توان خشک شدن سرامیک را به صورت ریاضی مدل نمود و در راستای بهینه نمودن پارامترها و رسیدن به محصولی سالم گام برداشت.

به همین دلیل رابطه رگرسیونی میانگین ضریب نفوذ مؤثر صرفاً برحسب سه پارامتر مستقل دمای محیط، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی به صورت رابطه (۱۳) ایجاد می‌شود.

$$Deff \times 10^9 = 0.05479 T - 0.03101 RH + 0.9194 V \quad (13)$$

در این رابطه  $T$ ،  $RH$  و  $V$  به ترتیب درجه حرارت محیط، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا هستند. با استفاده از رابطه (۱۳) می‌توان تخمینی از ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برحسب پارامترهای خشک شدن در راستای مدل سازی فرآیند داشت.

### نتیجه گیری

در این تحقیق اثرات متغیرهای خشک شدن شامل درجه حرارت محیط، رطوبت نسبی محیط و سرعت وزش هوا (هر یک در سه سطح) بر ضریب نفوذ مؤثر یک قطعه سرامیک رسی بررسی شده است. برای متغیرهای فوق، آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل کامل طراحی و در آزمایشگاه خشک شدن دانشگاه بیرجند انجام شد. هدف از این آزمایش‌ها محاسبه نسبت رطوبت بود که برای هر آزمایش از وزن کردن نمونه در بازه‌های

## مراجع

1. Kowalski, S.J., "Thermomechanics of drying processes", Vol. 8, *Springer Science & Business*, (2012).
2. Crank, J., "*The Mathematics of Diffusion*", ed: Oxford, UK, pp. 296-340, (1975).
3. Efremov, G.I., "Drying kinetics derived from diffusion equation with flux-type boundary conditions", *Drying Technology*, Vol. 20, pp. 66-55, (2002).
4. Vasic, Z.M., Radojevic, R.M., Arsenovic M.V. and Grbavcic, Z.B., "Determination of the effective diffusion coefficient", *Revista Romana de Material*, Vol. 41, pp.175-169, (2011).
5. Vasić, M., Grbavčić, Ž. and Radojević, Z., "Methods of determination for effective diffusion coefficient during convective drying of clay products", pp. 295-309, (2012).
6. Vasić, M., Grbavčić, Ž. and Radojević, Z., "Analysis of Moisture Transfer During the Drying of Clay Tiles with Particular Reference to an Estimation of the Time-Dependent Effective Diffusivity", *Drying Technology*, Vol. 32, pp. 829-840, (2014).
7. Vasić, M., Grbavčić, Ž. and Radojević, Z., "Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 76, pp. 33-44, (2014).
8. Zagrouba, F., Mihoubi, D. and Bellagi, A., "Drying of clay. II Rheological modelisation and simulation of physical phenomena," *Drying technology*, Vol. 20, pp. 1895-1917, (2002).
9. Chemkhi, S. and Zagrouba, F., "Water diffusion coefficient in clay material from drying data", *Desalination*, Vol. 185, pp. 491-498, (2005).
10. Sander, A., Skansi, D. and Bolf, N., "Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs," *Ceramics international*, Vol. 29, pp. 641-653, (2003).
11. Boulaoued, I. and Mhimid, A., "Determination of the diffusion coefficient of new insulators composed of vegetable fibers," *Thermal Science*, Vol. 16, pp. 987-995, (2012).
12. Bakhshi, M., Mobasher, B. and Soranakom, C., "Moisture loss characteristics of cement-based materials under early-age drying and shrinkage conditions," *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 413-425, (2012).
۱۳. خلیلی، خلیل، باقریان، محسن، احمدی بروغنی، سید یوسف، "شبیه سازی خشک شدن سرامیک ها به کمک اجزاء محدود و مقایسه با آزمایشات تجربی"، فصلنامه سرامیک ایران، ۳۹-۵۳، (۱۳۹۳).
۱۴. خلیلی، خلیل، احمدی بروغنی، سید یوسف، باقریان، محسن، "مدل سازی فرآیند خشک شدن مخلوط اشباع خاک رس و انقباض قطعه در طی فرآیند"، علم و مهندسی سرامیک، جلد ۳، شماره ۱، ۶۵-۸۰، (۱۳۹۳).
۱۵. خلیلی، خلیل، حیدری، "محسن، مدلسازی عددی انقباض یک قطعه سرامیکی در فرآیند خشک شدن"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۲، شماره ۳، ۵۸-۷۱، (۱۳۹۱).
۱۶. خلیلی، خلیل، حیدری، محسن، "بررسی تاثیر ضخامت جسم بر امکان وقوع ترک در فرآیند خشک شدن"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۲، شماره ۳، ۱۰۳-۱۱۶، (۱۳۹۱).
۱۷. خلیلی، خلیل، احمدی بروغنی، سید یوسف، باقریان، محسن، "مطالعه آزمایشگاهی و عددی فرایند خشک شدن سرامیک ها و ایجاد ترک در آنها"، مکانیک سازه ها و شماره ها، دوره ۴، ۱۱۹-۱۲۹، (۱۳۹۳).
18. Khalili, K., Bagherian, M. and Khisheh, S., "Numerical Simulation of Drying Ceramic Using Finite Element and Machine Vision," *Procedia Technology*, Vol. 12, pp. 388-393, (2014).

19. Batista, L. M. da Rosa, C. A., Pinto, L. A., "Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan," *Journal of Food Engineering*, Vol. 81, pp. 127-132, (2007).
20. Hamdami, N., Monteau, J.-Y., Le Bail, A., "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," *Journal of food engineering*, Vol. 62, pp. 385-392, (2004).
21. Pinto, L., Tobinaga, S., "Diffusive model with shrinkage in the thin-layer drying of fish muscles," *Drying Technology*, Vol. 24, pp. 509-516, (2006).
22. Dissa, A., Desmorieux H., Bathiebo J., Koulidiati J., "Convective drying characteristics of Amelie mango with correction for shrinkage," *Journal of food Engineering*, Vol. 88, pp. 429-437, (2008).
23. Efremov, G., Kudra, T., "Calculation of the effective diffusion coefficients by applying a quasi-stationary equation for drying kinetics," *Drying technology*, Vol. 22, pp. 2273-2279, (2004).
24. Ruiz-López, I., García-Alvarado, M., "Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity," *Journal of food engineering*, Vol. 79, pp. 208-216, (2007).
25. Vasić, M., Radojević, Z., Grbavčić, Ž., "Calculation of the effective diffusion coefficient during the drying of clay samples," *Journal of the Serbian Chemical Society*, Vol. 77, pp. 523-533, (2012).
26. Kimpton, D., Wall F., "Determination of diffusion coefficients from rates of evaporation," *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 56, pp. 715-717, (1952).
27. Yang, X.-S., "Nature-inspired metaheuristic algorithms", Luniver press, pp. 72-98, (2010).
28. Yang, X.-S., "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation," *International Journal of Bio-Inspired Computation*, Vol. 2, pp. 78-84, (2010).
29. Mandal, D., Pal S. K., Saha P., "Modeling of electrical discharge machining process using back propagation neural network and multi-objective optimization using non-dominating sorting genetic algorithm-II," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, pp. 154-162, (2007).
30. Kowalski, S. J., "Thermomechanical approach to shrinking and cracking phenomena in drying," *Drying technology*, Vol. 19, pp. 731-765, (2001).
31. Somiya, S., "Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties", Academic Press, pp. 723-1210, (2013).