

## اندازه گیری میزان رطوبت قطعه رسی به وسیله روش تصویربرداری مادون قرمز

خلیل خلیلی<sup>۱\*</sup>، محمد شیوا<sup>۲</sup>، نسیم اسماعیلیان<sup>۳</sup>

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه بیرجند

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

(دریافت: شهریور ۱۳۹۴، پذیرش: دی ۱۳۹۵)

### چکیده

اطلاع داشتن از میزان رطوبت موجود در خاک رس در مرحله خشک کردن علاوه بر اینکه زمان دقیق آماده‌سازی برای مرحله پخت را در اختیار سازنده قرار می‌دهد، می‌تواند باعث کنترل بهتر فرآیند در جهت صرفه‌جویی زمان و انرژی شود. از طرفی اطلاع از چگونگی توزیع رطوبت بر روی سطح قطعه، امکان پیش‌بینی ایجاد ترک و یا عیوب دیگر را امکان پذیر می‌نماید. در این تحقیق با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر عکس‌برداری مادون قرمز به منظور ثبت تغییرات دمایی حاصل از فرآیند کنترل شده خشک کردن چند نمونه‌ی رسی و استفاده از روابط جسم نیمه بینهایت و انتقال حرارت گذرا، به بررسی میزان رطوبت و تغییرات آن در قطعه، در طول فرآیند خشک کردن پرداخته شده است. با مقایسه نمودارهای حاصل از آزمایش‌ها و نمودارهای تئوری موجود در مراجع، مشاهده شد استفاده از مدل جسم نیمه بینهایت و تصویربرداری مادون قرمز به منظور تشخیص میزان رطوبت، روشی قابل استفاده است. از آنجایی که این روش، روشی رایانه‌ای و دیجیتال بوده، از سرعت عملکرد بسیار بالاتری نسبت به روش مکانیکی مرسوم برخوردار است. با استفاده از این روش امکان مشاهده توزیع رطوبت در قطعه بدون نیاز به دخالت مکانیکی وجود دارد.

### کلید واژه‌ها

خشک کردن، ترموگرافی، تشخیص رطوبت

ارجاع به این مقاله:

خلیلی، خ.، شیوا، م.، اسماعیلیان، ن.، (۱۳۹۵)، اندازه گیری میزان رطوبت قطعه رسی به وسیله روش تصویربرداری مادون قرمز، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۲)، ۵۷-۶۵.

## ۱- مقدمه

به ترسیم نقشه رطوبتی یک دیوار گچی نازک در ابعاد بزرگ شدند. آنها تمام تجزیه و تحلیل‌های موجود را فقط به یک لایه نازک گچی محدود کردند و با استفاده از قانون حاکم بر هدایت حرارتی گذرا (قانون فوریه) به رابطه بین ظرفیت گرمایی ویژه و میزان رطوبت موجود در لایه گچی و متناسب با آن به رابطه بین دما و ظرفیت گرمایی دست یافتند.

بیسون و گریزاتو [۵] در ادامه پژوهش‌های قبلی، به منظور دستیابی به روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری میزان رطوبت مواد متخلخل، توانستند روابط ساده دیفرانسیلی را جایگزین روابط پیچیده حاکم بر مواد متخلخل مرطوب کنند. آنها به مدل ساده‌ای از انتقال حرارت یک بُعدی رسیدند که در آن می‌توان رابطه دما/شار حرارتی را با اینرسی حرارتی و ضریب پخش حرارتی مشاهده کرد. این دو در ادامه پژوهش‌های خود به اثبات روش‌های اندازه‌گیری تحلیلی خود با استفاده از آزمایش‌های مختلف پرداختند. در مرحله اول تأثیر مقدار رطوبت بر ضریب هدایت حرارتی ناچیز فرض شد. در نهایت به این نتیجه دست یافتند که تنها زمانی ضریب هدایت حرارتی را می‌توان ثابت فرض کرد که درصد رطوبت کم باشد. با ثابت در نظر نگرفتن ضریب هدایت حرارتی توانستند مقدار رطوبت را با دقت بهتری اندازه‌گیری کنند [۶].

روسینا و لودویج [۷] در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش انفعالی به یافتن محل و مقدار رطوبت در مصالح ساختمانی پرداختند. روش انفعالی به مقدار تبخیر سطحی که خود به مقدار رطوبت نسبی محیط در دمای معین  $T$ ، مقدار آب درون نمونه، عوامل شیمی- فیزیکی ماده و مقدار نمک محلول وابسته است؛ بستگی دارد. با اندازه‌گیری دمای سطح نمونه چنانچه یک مدل مشخص و معینی از میزان دمای محیط، تابش محیطی، سرعت وزش باد و رطوبت نسبی در اختیار باشد؛ می‌توان به یک تخمین دقیق و عددی از نرخ تبخیر و متناسب با آن به میزان رطوبت درون نمونه دست یافت. مزیت روش انفعالی به فعال در این است، که نیاز به تجهیزات گرمایی نیست. بر خلاف روش فعال در روش انفعالی نمی‌توان به طور مستقیم میزان رطوبت نمونه را استخراج نمود.

اضافه کردن آب به ذرات رسی به منظور ایجاد مخلوطی شکل‌پذیر اجتناب‌ناپذیر است. آب اضافه شده قبل از مرحله‌ی پخت سرامیک رسی باید زدوده گردد. وجود آب در این مرحله باعث ایجاد ترک و یا حتی تخریب کامل سرامیک در هنگام پخت می‌شود. مرحله خشک‌کردن گل رس به منظور تبخیر آب اضافه شده به مخلوط، صورت می‌گیرد [۱]. اطلاع داشتن از میزان رطوبت موجود در گل در مرحله خشک‌کردن علاوه بر اینکه زمان دقیق آماده‌سازی برای مرحله پخت را در اختیار سازنده قرار می‌دهد؛ امکان صرفه‌جویی در زمان و انرژی را نیز فراهم می‌کند. از طرفی اطلاع از چگونگی توزیع رطوبت بر روی سطح، امکان پیش‌بینی ایجاد ترک و یا عیب را در سرامیک امکان‌پذیر می‌نماید. غیر یکنواخت بودن توزیع رطوبت باعث ایجاد سرعت‌های متفاوت خشک‌شدن در قسمت‌های مختلف سرامیک می‌شود؛ که خود منشا ایجاد تنش در قطعه است [۲، ۳].

روش مرسوم اندازه‌گیری میزان رطوبت سرامیک‌ها توسط وزن نمودن نمونه‌ی مورد نظر صورت می‌گیرد. در این روش قطعه را قبل و در حین خشک‌کردن وزن نموده و اختلاف وزن اولیه با وزن‌های دیگر در هر مرحله‌ی اندازه‌گیری، میزان رطوبت نمونه را مشخص می‌کند. در این روش امکان مشاهده توزیع رطوبت در قطعه وجود ندارد. امکان استفاده از این روش در محل و به صورت آنی وجود ندارد و تنها زمانی که نمونه‌ی آزمایشگاهی در اختیار باشد، می‌توان از این تکنیک بهره برد. استفاده از رطوبت سنج‌های سوزنی نیز روش رایج دیگری به منظور اندازه‌گیری میزان رطوبت قطعات است، اما روش اندازه‌گیری رطوبت مبتنی بر وزن، روشی استاندارد بوده و مورد تایید قرار گرفته است.

روش مبتنی بر عکس‌برداری مادون قرمز و به کارگیری مدل جسم نیمه بینهایت فاقد محدودیت روش وزنی است. حساسیت بالای این روش، امکان نمایش توزیع رطوبت و قابلیت استفاده از آن در اتوماسیون صنعتی به دلیل سرعت پاسخگویی بالا از جمله مزایای این روش است.

گریزاتو و مازولدی [۴] در سال ۱۹۹۱، با پیشنهاد یک روش غیر مخرب مبتنی بر عکس‌برداری مادون قرمز موفق

## ۲- مدل حرارتی

گویند. انتقال حرارت گذرا برای حالتی به کار می رود که دمای جسم پس از گذشت زمان معینی به شرایط دائمی و مستقل از زمان برسد. این تبادل حرارتی تا هم دما شدن جسم با محیط ادامه خواهد یافت. استفاده از جسم بی نهایت در اغلب مسائل مهندسی یک ایده آل سازی مفید است [۱۰]. معادله حاکم برای حالت گذرای جسم نیمه بی نهایت همگن عبارت است از:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T(0, t) = T_0$$

$$T(x, 0) = T_i \quad (3)$$

$$q(x, t) = -K \frac{\partial T}{\partial x}$$

که به کمک تبدیل لاپلاس می توان نوشت:

$$\frac{T(x, t)}{T_0} = \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (4)$$

از این رو دما در سطح برابر خواهد بود با:

$$T(0, t) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t}}{\lambda \rho C} \rightarrow T(t) = \frac{2q(t)}{e} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \quad (5)$$

## ۳- روابط حاکم

شیوه آزمایش های انجام شده در این پژوهش به صورت روش فعال است. در این روش انرژی حرارتی توسط سیستم هوای گرم (جابه جایی) به نمونه سرامیکی منتقل می گردد. روش فعال بر اساس اندازه گیری میزان انرژی ورودی به سیستم و همچنین اندازه گیری تغییرات دمای سطح نمونه بنا شده است. یک شار حرارتی ثابت توسط مکانیزم جابه جایی بر روی نمونه اعمال شده و تغییرات دمایی سطح نمونه به وسیله یک دوربین مادون قرمز در فواصل زمانی معینی ثبت می شود. به دلیل ضریب هدایت پایین و ضخامت کم نمونه می توان از مدل جسم نیمه بی نهایت در حالت گذرا به عنوان معادلات انتقال حرارت استفاده کرد. نمونه ها به صورت همگن و با دمای یکنواخت اولیه  $T_0$  فرض می شوند. در این صورت با یافتن مقدار ظرفیت گرمایی جسم در زمان مشخص می توان به میزان آب موجود پی برد [۷].

$$W = \frac{C_{pd} - C_p}{C_p - C_{pw}} \quad (6)$$

که در رابطه بالا  $C_{pd}$  ظرفیت گرمایی جسم خشک،  $C_{pw}$  ظرفیت گرمایی آب و  $C_p$  ظرفیت گرمایی جسم مرطوب در زمان مشخص است.

قسمتی از قطعه سرامیکی که حاوی رطوبت باشد نیاز به انرژی بیشتری برای ایجاد تغییرات دمایی دارد. و همچنین در یک انرژی ساطع شده یکنواخت مناطقی که حاوی رطوبت هستند؛ کمترین اختلاف دمایی را نسبت به حالت اولیه پیدا می کنند.

مناطق خشک در نمونه، افزایش دمایی بیشتری را از خود نشان می دهند. این مناطق با سرعت بیشتری نسبت به مناطق مرطوب هم دما با محیط می شوند [۸]. این امر به این دلیل صورت می گیرد که مواد سرامیکی جزء مواد متخلخل هستند. مواد متخلخل مانند آجر و سرامیک به صورت دانه دانه هستند و از قسمت های جامد (ذرات تشکیل دهنده)، گاز (فضای بین ذرات) و مایع (آب موجود در منافذ) تشکیل شده است. خواص گرمایی این مواد به نسبت این اجزا بستگی دارد [۵].

اساس خواص گرمایی مواد را چگالی ( $\rho$ )، گرمای ویژه ( $C$ ) و ضریب هدایت حرارتی ( $\lambda$ ) تشکیل می دهد. ترکیب این سه مورد را می توان به دو صورت زیر و تحت عنوان های چگالی حرارتی  $^1 (e)$  و ضریب پخش حرارتی  $^2 (\alpha)$  بیان نمود [۶].

$$e = \sqrt{\lambda \cdot C \cdot \rho} \quad (1)$$

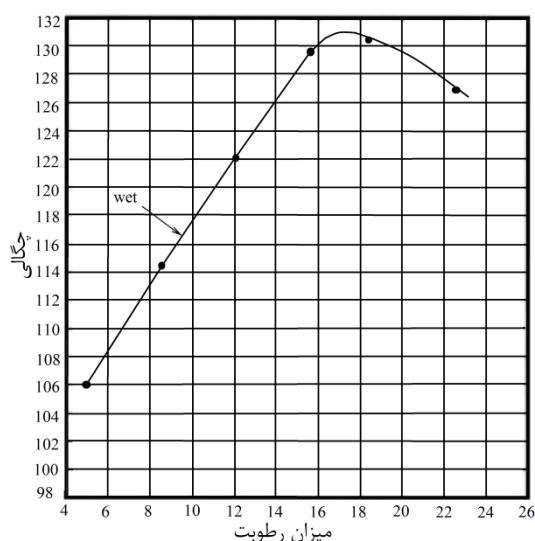
$$\alpha = \frac{\lambda}{C \cdot \rho} \quad (2)$$

چگالی گرمایی توانایی ماده در انتقال انرژی گرمایی به محیط را مشخص می کند؛ به عبارت دیگر مشخص کننده میزان مقاومت ماده در برابر تغییرات دمایی است. ضریب پخش حرارتی بیانگر توانایی ماده در هدایت انرژی حرارتی، نسبت به توانایی آن در میزان جذب انرژی حرارتی است. پس با توجه به تعاریف قبل می توان گفت: دمای جسم با چگالی گرمایی کم، به سرعت افزایش می یابد و انرژی گرمایی در نمونه ای با ضریب پخش حرارتی بالا سریع تر در طول نمونه حرکت می کند [۹].

در یک نمونه متخلخل مانند سرامیک با تغییر میزان رطوبت؛ مقدار چگالی، گرمای ویژه و همچنین ضریب هدایت حرارتی نیز تغییر می کند. این سه مورد به شدت به میزان رطوبت موجود در محصول وابسته هستند.

شرایط مرزی در بسیاری از مسائل انتقال حرارت با زمان تغییر می کند. چنین مسائلی را گذرا یا غیر دائم

نمونه تقریباً تا انتهای فرآیند ثابت می‌ماند و تنها تغییرات وزنی نمونه وجود دارد؛ مقدار چگالی کاهش می‌یابد.



شکل ۱: نمودار تغییرات چگالی با رطوبت [۱۲]

با توجه به رابطه (۱۰) و تغییرات چگالی با استفاده از رابطه (۱۱) می‌توان مقدار ظرفیت گرمایی جسم مرطوب را در زمان مورد نظر مشخص نمود.

$$C_p = \frac{e}{\rho\sqrt{\alpha}} \quad (11)$$

در این رابطه میزان ضریب پخش حرارتی ثابت فرض می‌شود. با قرار دادن ظرفیت گرمایی بدست آمده از رابطه (۱۱) در رابطه (۶) می‌توان مقدار رطوبت جسم را در زمان مورد نظر بدست آورد.

#### ۴- مکانیزم حاکم بر فرآیند خشک کردن

در ابتدای فرآیند متناسب با دما و رطوبت اولیه نمونه و همچنین دما و رطوبت محیط، زمان رسیدن به دمای حباب‌تر را به منظور شروع فرآیند تبخیر باید لحاظ نمود. در واقع فرآیند تبخیر پس از رسیدن به دمای حباب‌تر آغاز می‌شود. رسیدن به دمای حباب‌تر، آغاز دوره اول خشک کردن است. در این مرحله آب سطحی از روی نمونه‌ها تبخیر می‌شود. سطح نمونه در این مرحله به صورت یک سطح آب آزاد رفتار کرده و سرعت جریان آب به بیرون در حدی است که سطح را همواره مرطوب نگه می‌دارد. از این رو افزایش دمایی در این مرحله صورت نمی‌گیرد و دما همواره ثابت خواهد بود. مرحله دوم خشک کردن و یا به بیان دیگر مرحله اول کاهش سرعت تبخیر بعد از اتمام

مقدار شار حرارتی ورودی به سیستم ( $q$ ) نامشخص است. برای از بین بردن این عامل از روابط، می‌توان از یک جسم مرجع (نمونه سرامیکی کاملاً خشک) بهره جست. با قرار دادن نمونه مرطوب و نمونه خشک درون خشک‌کن و با فرض اینکه شار حرارتی ثابت و برابری به هر دو نمونه می‌رسد و با توجه به رابطه (۵) می‌توان بیان داشت:

$$e_d = \frac{2q(t)}{T_d} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \quad (7)$$

$$e_w = \frac{2q(t)}{T_w} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \quad (8)$$

در این رابطه  $e_d$  چگالی گرمایی جسم خشک و  $e_w$  چگالی جسم مرطوب و  $T_d$ ،  $T_w$  دمای مرتبط با آن دو است. با مقایسه روابط (۷) و (۸) نتیجه می‌شود:

$$e_w = e_d \frac{T_d}{T_w} \quad (9)$$

جسم مرطوب در مقایسه با جسم خشک دارای ضریب جذب تابشی<sup>۳</sup> متفاوتی است و از آنجایی که ثبت دما توسط یک سیستم نوری صورت می‌گیرد نسبت این دو مورد باید در رابطه (۹) قرار داده شود [۶].

$$e_w = e_d \frac{a_w}{a_d} \cdot \frac{T_d}{T_w} \quad (10)$$

$a_d$  و  $a_w$  به ترتیب ضریب جذب تابشی جسم مرطوب و جسم خشک است.

مقدار چگالی نیز متناسب با میزان رطوبت نمونه تغییر می‌نماید. رفتار چگالی نسبت به رطوبت کاملاً یکنوا نمی‌باشد. اضافه کردن آب به نمونه سرامیکی باعث افزایش حجم و جرم قطعه می‌شود. در زمان خشک کردن نمونه، در مرحله اولیه خشک کردن، کاهش حجم نمونه نسبت به کاهش جرم آن بیشتر خواهد بود. به همین دلیل چگالی ابتدائاً تا یک مقدار بیشینه افزایش پیدا کرده و بعد از آن که تغییرات حجم نمونه نسبت به حالت اولیه کاهش پیدا کرد و کاهش وزن برتری یافت؛ چگالی نیز متناسب با آن کاهش می‌یابد. این کاهش چگالی تا زمانی که قطعه کاملاً خشک گردد ادامه می‌یابد. در آن حالت چگالی نمونه برابر با چگالی جسم خشک می‌شود [۱۱].

همانطور که در شکل ۱ نمایان است؛ میزان چگالی در قسمت راست نمودار تا یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد. این افزایش چگالی به دلیل اینکه در این مرحله از خشک کردن تغییرات حجمی نمونه بیش از تغییرات وزنی آن است، رخ می‌دهد. در قسمت دوم و در جایی که حجم

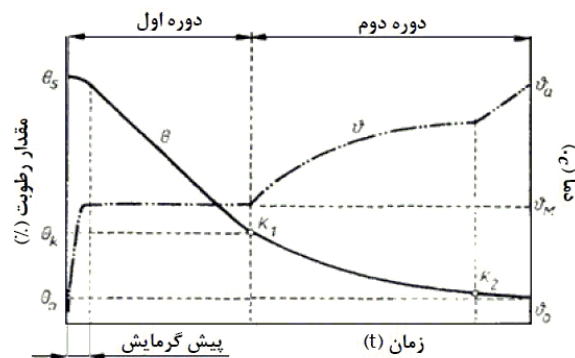
## ۵- روش تحقیق

این پژوهش با انجام آزمایش‌هایی مبتنی بر عکس برداری مادون قرمز به دنبال یافتن میزان رطوبت نمونه سرامیکی در حالت خشک کردن یکنواخت است. برای انجام آزمایش‌ها از نمونه‌های رسی به ابعاد  $8 \times 6 \times 2/5$  سانتی‌متر با رطوبت‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد استفاده می‌شود. مشخصات شیمیایی سرامیک استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. میزان رطوبت نمونه‌ها بر حسب مبنای خشک (برای نمونه ۲۰ درصدی، ۲۰ گرم آب به همراه ۱۰۰ گرم خاک رس) اندازه‌گیری می‌شود. از یک ترازوی دیجیتال با دقت دهم گرم به منظور اندازه‌گیری میزان آب و خاک رس بهره برده شده است. آزمایشات در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. بعد از ترکیب آب و خاک رس و هم زدن این مخلوط تا زمان گذر از مرحله آگلومراسیون شدن، محصول به دست آمده به مدت ۴ ساعت با پلاستیک پوشانده شده و در محفظه‌ای بسته به منظور همگن شدن رطوبت نگهداری می‌شود. استفاده از یک نمونه خشک (به عنوان نمونه مرجع) در این آزمایش ضروری است. نمونه مرجع با همان خاک رس نمونه‌های مرطوب و با همان ابعاد ایجاد می‌شود. تصویر ۳ نمایی از یک نمونه خشک و نمونه مرطوب با ۲۰ درصد رطوبت است. برای عکس برداری مادون قرمز از دوربین *NEC Thermo GEAR G120EX* ساخت کشور آلمان استفاده شده است. تفکیک پذیری دوربین  $320 \times 240$  پیکسل، محدوده دمایی ۴۰- تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، محدودی طیفی ۸ تا ۱۴ میکرومتر و دارای تنظیم فاصله تمام اتوماتیک است.

خشک‌کن مورد استفاده از سیستم جابه‌جایی (هوای گرم، به وسیله وزش باد از روی دو المنت ۳۰۰ وات تولید می‌شود) برای انتقال حرارت به نمونه و همچنین خروج رطوبت از محفظه بهره می‌برد. دمای محفظه توسط یک سنسور حرارتی اندازه‌گیری و مانیتور می‌شود. کنترل دمای محفظه به وسیله کنترل میزان وزش هوای گرم به درون سیستم توسط روشن و خاموش کردن المنت‌ها صورت می‌گیرد. شکل ۴ نمایی از خشک‌کن و دستگاه کنترل دمای محفظه را نشان می‌دهد. رطوبت نسبی محفظه خشک‌کن برابر با رطوبت نسبی محیط (۱۵ تا ۲۰ درصد) است.

مرحله اول خشک کردن آغاز می‌شود. در این مرحله مقداری آب از داخل قطعه به سطح منتقل می‌شود و تبخیر همچنان از سطح انجام می‌شود. امکان ایجاد عیب و ترک در این مرحله بسیار زیاد است. چرا که بیشترین گرادیان دمایی و رطوبتی در این مرحله رخ می‌دهد. افزایش دمای سطح در این بخش باعث ایجاد تبخیر بیشتر در سطح می‌شود، در حالی که هسته نمونه همچنان دمای کمتر و رطوبت بیشتر نسبت به سطح دارد. در آخرین مرحله از خشک کردن (مرحله دوم کاهش سرعت) تبخیر در داخل قطعه صورت گرفته و بخار به طریق نفوذ از درون حفره‌ها به سطح می‌رسد. این مرحله تا زمانی که دمای قطعه با دمای خشک‌کن یکسان شود ادامه خواهد داشت. در نمودارهای به دست آمده از تغییرات دمایی در طول فرآیند، مرحله سوم در قسمتی که تغییرات دما به صورت نمایی است قرار دارد.

متناسب با سه منطقه دمایی، سه منطقه رطوبتی را نیز باید در نظر گرفت. در جایی که قطعه به دمای حباب تر می‌رسد؛ از آنجایی که در این مرحله تبخیری صورت نمی‌گیرد، میزان رطوبت ثابت خواهد بود. پس رسیدن به دمای حباب تر و شروع فرآیند تبخیر (دوره اول و دوم خشک کردن) از آنجایی که فرآیند تبخیر همانند تبخیر آب از درون یک ظرف رو باز است؛ میزان نرخ تبخیر نمونه بالا می‌باشد. پس از اتمام این دوره و شروع مرحله دوم کاهش سرعت، به دلیل اینکه تبخیر دیگر از سطح صورت نمی‌گیرد؛ شیب نمودار رطوبت-زمان کاهش پیدا کرده و به صورت نمایی تا مقدار صفر ادامه خواهد یافت. شکل ۲ سه مرحله نمودارهای دما-زمان و رطوبت-زمان را نشان می‌دهد.

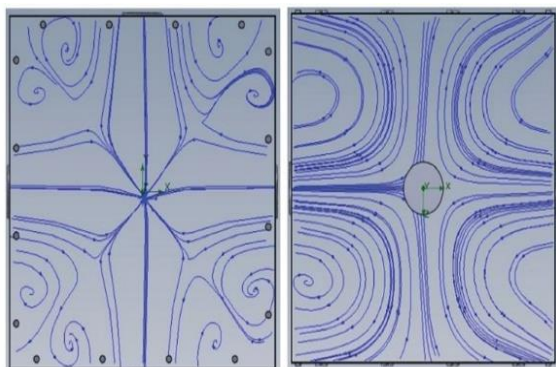


شکل ۲: نمودار تئوری تغییرات دما و رطوبت [۱۳]

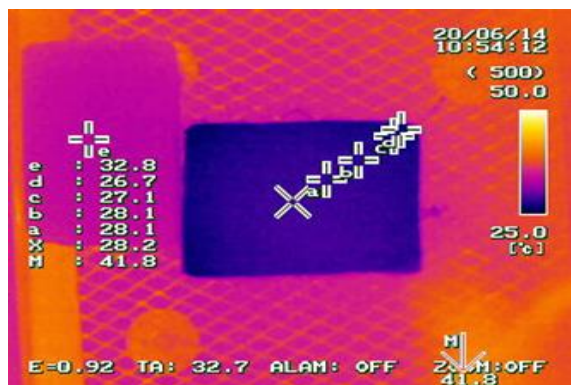
جدول ۱: خواص شیمیایی سرامیک

SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	نمونه
%											
۰/۲۴	۶/۳۶	۰/۱۳	۸/۲۳	۰/۱۱	۰/۶۲	۲/۴۳	۳/۵۵	۰/۰۶۳	۱۳/۰۱	۴۶/۳۴	19517-HB 200

دوربین قرار داشته باشد، به صورت هر ۲/۵ دقیقه یکبار صورت می‌گیرد. قابل ذکر است که دمای محفظه در طول کل فرآیند به صورت ثابت نگه داشته می‌شود. شکل ۶، تصویر مادون قرمز گرفته شده از نمونه مرطوب و نمونه مرجع است. مناطق دمایی  $X, a, b, c, d$  و  $e$  به منظور اندازه‌گیری دقیق دمای سطح نمونه‌های مرطوب و خشک مشخص شده‌اند. منطقه دمایی  $e$  بر روی نمونه خشک قرار داده شده است (از آنجایی که دمای تمام سطح نمونه مرجع به یک نسبت تغییر می‌کند؛ تنها قرار دادن یک منطقه دمایی کافی است). مناطق  $c$  و  $d$  به ترتیب بر روی حاشیه و مرز نمونه‌ی مرطوب قرار دارند و  $X$  نشان دهنده مرکز نمونه‌ی مرطوب است.



شکل ۵: نحوه پخش هوا درون محفظه شبیه‌سازی شده توسط کار جامد



شکل ۶: نمونه‌ای از تصویر ترموگرافی گرفته شده توسط دوربین



شکل ۳: الف: نمونه مرجع ب: نمونه با ۲۰ درصد رطوبت



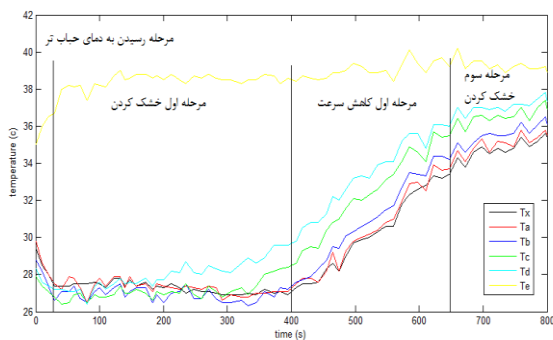
شکل ۴: خشک کن و دستگاه کنترل دما

نحوه‌ی وزش هوا درون سیستم به گونه‌ای طراحی شده است، که خشک شدن قطعه به صورت جهتی نباشد و تمام سطح نمونه به صورت یکنواخت خشک شود (شکل ۵). تحلیل صورت گرفته در بخش شبیه ساز کار جامد<sup>۴</sup> گویای این امر است [۱۴].

با استفاده از ترازوی دیجیتالی مخلوطی از ۲۰۰ گرم خاک رس الک شده با مش ۲۰۰، به همراه ۴۰ گرم آب تهیه گردید. بعد از هم‌زدن ترکیب تا گذر از مرحله آگلومراسیون مخلوط حاصل شده، به مدت ۴ ساعت در محفظه‌ای بسته به منظور همگن شدن قرار داده می‌شود. مخلوط همگن شده، قالب گیری شده و به همراه نمونه مرجع (هر دو هم دما با محیط هستند) درون خشک‌کن با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. عکس‌برداری از درون محفظه به گونه‌ای که هر دو نمونه در میدان دید

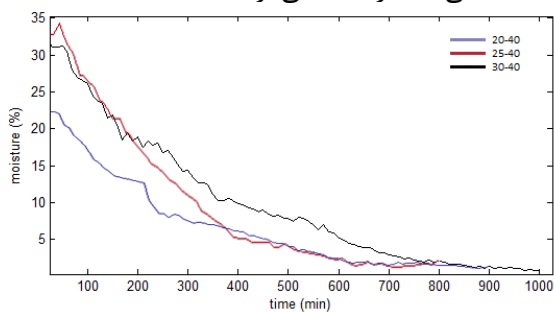
## ۶- بحث و بررسی نتایج

خشک‌کن هم‌دما شود. پس از این مرحله‌ی کوتاه مشاهده می‌شود که دمای نمونه‌های تر تقزیم‌آب ثابت و البته بسیار کمتر از دمای نمونه مرجع باقی می‌ماند. همانطور که در بخش ۴ ذکر شد، علت این اتفاق نیز شباهت این مرحله، به حالت تبخیر از سطح آزاد است که در طی آن دما ثابت است. مدت زمان لازم برای سپری شدن این مرحله بستگی به میزان رطوبت موجود در قطعه دارد که این موضوع نیز در نمونه‌های ۲۰ درصد، ۲۵ درصد و ۳۰ درصد مشاهده می‌شود. پس از گذار از این مرحله، دمای سطح نمونه شروع به افزایش نموده و تا خشک شدن کامل نمونه و رسیدن به دمای سطح نمونه کاملاً خشک (مرجع) ادامه می‌یابد. شکل ۱۰ تفکیک این مراحل را نشان می‌دهد. در این شکل با توجه به سرعت تغییرات دمایی که مرتبط با سرعت تغییرات رطوبت است، مراحل خشک شدن نیز نمایش داده شده است.



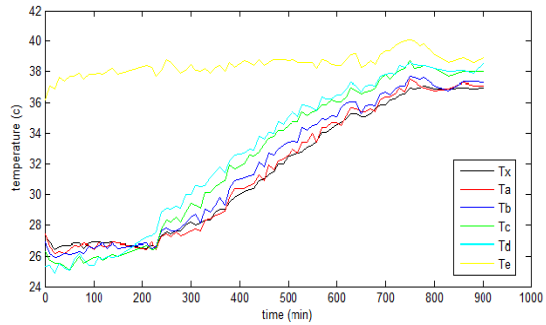
شکل ۱۰: نمودار دما زمان و سه مرحله اصلی خشک کردن

متناسب با رابطه‌ی (۶)، رابطه‌ی تغییرات چگالی گرمایی (۱۰)، ظرفیت گرمایی و تغییرات غیر خطی چگالی نمونه در طول فرآیند، میزان تغییرات رطوبت را می‌توان محاسبه نمود. شکل ۱۱ بیانگر نمودارهای رطوبت-زمان نمونه‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد رطوبت حاصل از آزمایش‌ها و استفاده از تکنیک عکس‌برداری مادون قرمز در دمای ثابت محیطی ۴۰ درجه سانتی‌گراد هستند.

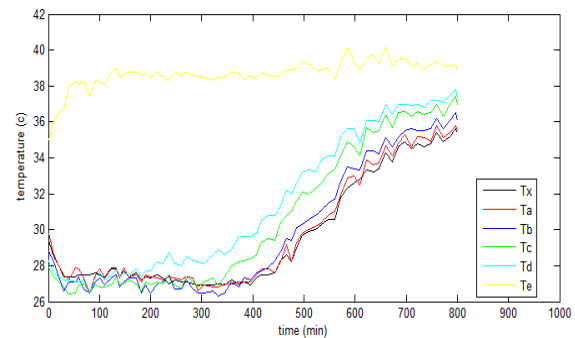


شکل ۱۱: تغییرات رطوبت مرکز نمونه با رطوبت نسبی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

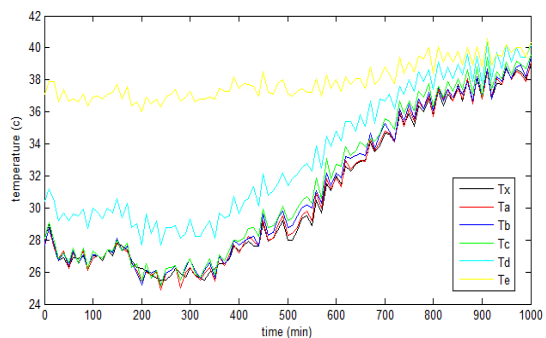
تغییرات دمایی نمونه‌های مرطوب و مرجع در طول فرآیند متناسب با میزان رطوبت اولیه موجود در آنها در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ آورده شده است.



شکل ۷: تغییرات دمای سطح نمونه ۲۰ درصد رطوبت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۸: تغییرات دمای سطح نمونه ۲۵ درصد رطوبت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۹: تغییرات دمای سطح نمونه ۳۰ درصد رطوبت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

بررسی تغییرات دمایی که در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است بیانگر این مطلب است که در ابتدای فرآیند و برای مدت زمان کوتاهی، دمای سطح نمونه‌ها اعم از نمونه‌های تر و نمونه خشک (مرجع) مقداری کاهش یا افزایش دارد که این تغییرات به این دلیل است که مدت کوتاهی زمان می‌برد تا نمونه به صورت کامل با محیط



- نمودارهای تغییرات دما در مراحل مختلف خشک شدن برای نمونه‌های متعدد و در شرایط مختلف خشک‌شدن (شکل‌های ۷ الی ۱۰) و تطابق آن با نمودارهای تئوری و تحلیلی (شکل ۲) نشان می‌دهد برای تعیین مقدار رطوبت/دما و تغییرات آن در طی قرآیند خشک شدن ترموگرافی می‌تواند ابزاری مناسب باشد.
- استفاده از روش عکس‌برداری مادون قرمز، به منظور تشخیص میزان و توزیع رطوبت نمونه، روشی کاربردی و قابل قبول است که بر خلاف روش مرسوم (روش مکانیکی)، روشی دیجیتال، رایانه‌ای، غیر مخرب و غیر تماسی است. استفاده از این روش در اتوماسیون صنعتی نه تنها امکان‌پذیر بوده بلکه کلیه مزیت‌های تصویر برداری دیجیتال شامل قابلیت ذخیره‌سازی و داده‌کاوی بر آن مترتب است.

### مراجع

- [1] Khalili K. and Bagherian M., 2011, "Experimental and numerical study on behavior of ceramic materials during drying", Fisrt Middle East Conference on drying process MEDC2012, Ahvaz, Iran, (In Persian).
- [2] Khalili K. and Heydari M., 2012, "Studying the effect of thickness of object on occurrence of crack during drying process", Modares Mechanical Engineering Journal, vol.12 (3), pp103-116, (In Persian).
- [3] Heydari M. and Khalili K., 2016, "Investigation on the effect of Young's Modulus variation on drying-induced stresses", Transport in Porous Media, vol.112, Issue 2, pp 519-540.
- [4] Grinzato, E.G. and Mazzoldi A.; 1991; "Infrared detection of moist areas in monumental buildings based on thermal inertia analysis", Proc. SPIE 1467, Thermosense XIII, (1 March 1991); doi: 10.1117/12.46425.
- [5] Bison P. G, Bressan C., Grinzato E. G., Marinetti S., and Vavilo V. P.; (1993); "Active thermal testing of moisture in bricks", Proc. SPIE 1933, Thermosense XV: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications, 207 (April 6, 1993); doi: 10.1117/12.141970.
- [6] Bison, P.G, E.G. Grinzato E. G., and Marinetti S.; 1994; "Moisture evaluation by dynamic thermography data modeling", Proc. SPIE 2245,

نمودارهای رطوبت-زمان به دست آمده از روابط جسم نیمه بینهایت و تغییرات دمایی سطح نمونه‌ها، سه منطقه‌ی متفاوت را نشان می‌دهند. در مرحله اول که در آن دمای سطح نمونه به دمای حباب تر می‌رسد، هیچ‌گونه تبخیری از سطح صورت نمی‌گیرد. از این رو مقدار رطوبت در این مرحله ثابت می‌ماند. پس از رسیدن به دمای حباب تر قرآیند تبخیر آغاز می‌شود و از آنجایی که در این مرحله سطح نمونه همواره با لایه نازکی از آب پوشانده شده، میزان نرخ تبخیر سطحی بسیار بالا است. همان‌طور که در نمودارهای رطوبت-زمان نشان داده شده در شکل ۱۱ مشهود است گرادیان تغییرات رطوبت در این قسمت بسیار بالا بوده و نمودار به صورت تقریباً خطی و با شیب زیادی کاهش می‌یابد. در انتهای این مرحله و از آنجایی که تبخیر در درون نمونه صورت می‌گیرد؛ سرعت تغییرات رطوبت کاهش پیدا کرده و به صورت یک تابع نمایی تا مقدار رطوبت صفر امتداد می‌یابد.

این نمودارها روند کلی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد، هرچند با توجه به تفاوت میزان درصد رطوبت اولیه زمان رسیدن به نمونه خشک و همچنین شیب نمودارها قدری تفاوت دارد. به عنوان مثال نمونه با ۳۰ درصد رطوبت با چشم‌پوشی از مقداری خطا، همواره در طی زمان رطوبت بیشتری از نمونه‌های ۲۵ درصد و ۲۰ درصد و همچنین نمونه ۲۵ درصد رطوبت بیشتری نسبت به ۲۰ درصد داشته است.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر عکس‌برداری مادون قرمز به منظور ثبت تغییرات دمایی حاصل از قرآیند کنترل شده خشک‌کردن نمونه‌های رسی و استفاده از روابط جسم نیمه بینهایت و انتقال حرارت گذرا، به بررسی میزان رطوبت و تغییرات آن در قطعه، در طول قرآیند خشک‌کردن پرداخته شد. و نتایج زیر به طور خلاصه بدست آمد:

- با مقایسه نمودار تئوری تغییرات دما و رطوبت نسبت به زمان (شکل ۲) و نمودارهای حاصل شده از آزمایش‌ها (شکل ۱۱) می‌توان دید که روند تغییرات این نمودارها بسیار به یکدیگر شباهت دارد.



Thermosense XVI: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications, 176 (March 21, 1994); doi: 10.1117/12.171168.

[7] Rosina, E. and Ludwig N.; 1999; "Optimal thermographic procedures for moisture analysis in building materials", Proc. SPIE 3827, Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications, (10 September 1999); doi: 10.1117/12.361015.

[8] Grinzato, E., G. Cadelano, and P. Bison; 2010; "Moisture map by IR thermography", Journal of Modern Optics, 57(18): p1770-1778.

[9] Baehr, H.D. and Karl S.; 2008; "Wärme-und Stoffübertragung", Springer-Verlag Berlin, doi: 10.1007/978-3-540-87689-2.

[10] Incropera, F.P.; 2011; "Introduction to heat transfer", John Wiley & Sons.

[11] Davison, L.; 2000; "Dry-density/water-content relationship", available at <http://iitmweb.iitm.ac.in/phase2/courses/105103097/52>.

[12] ASTM D 698; 2004; "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", DOI: 10.1520/D0698-07.

[13] Kowalski, S. J.; 2012; "Thermomechanics of drying processes", Vol. 8, Springer Verlag Berlin.

[14] Heydari M., 2011, "Analysis and modeling of drying process", MSc. Dissertation, University of Birjand, Iran, (In Persian).

- 
- 1- Effusivity
  - 2- Diffusivity
  - 3- Absorptivity Coefficients
  - 4- Solidwork

**THIS PAGE IS INTENTIONALLY LEFT BLANK**