

## بررسی تأثیر دوره تناوب بر تنش‌های خشک شدن در خشک شدن تناوبی خاک رس با تغییرات دوره‌های رطوبت نسبی

محسن حیدری، خلیل خلیلی، سید یوسف احمدی بروغنی\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<b>چکیده:</b> خشک شدن تناوبی در صورت طرح‌ریزی مناسب یک راهکار مؤثر برای بهبود سینتیک خشک شدن، کیفیت قطعات خشک شده و مقدار مصرف انرژی می‌باشد. تعیین دوره تناوب، دامنه تناوب و زمان شروع تناوب چالش‌های اصلی در طرح‌ریزی فرآیند خشک شدن تناوبی می‌باشند. هدف این مطالعه بررسی تأثیر دوره تناوب بر سینتیک و تنش‌های خشک شدن در خشک شدن تناوبی خمیر رسی با تغییرات دوره‌های رطوبت نسبی می‌باشد. همچنین تنش‌های حرارتی و رطوبتی مورد مقایسه قرار گرفته است. تغییرات پارامترهای خشک شدن نسبت به رطوبت و دما در مدل‌سازی لحاظ گردیده است. مطابقت مناسب متغیرهای متعدد تجربی و شبیه‌سازی نشان‌دهنده صحت و درک کامل هر سه جنبه فرآیند خشک شدن توسط مدل ریاضی ارائه شده می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در هنگام شکسته شدن لوله‌های موئین قطعه باید در دوره خشک شدن با نرخ کمینه قرار داشته باشد. با توجه به شکست تدریجی لوله‌های موئین در دوره گذار، خشک شدن تناوبی روی نقاط مختلف اثر متفاوتی می‌گذارد. از این رو نقاط مستعد ترک برداشتن باید به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. تنش‌های حرارتی در مقایسه با تنش‌های رطوبتی بسیار ناچیز هستند و می‌توان از مدل‌سازی آن‌ها در فرآیند خشک شدن صرف نظر کرد.	<b>تاریخچه داوری:</b> دریافت: بازنگری: پذیرش: ارائه آنلاین:
<b>کلمات کلیدی:</b> خشک شدن تناوبی خشک شدن جابه‌جایی تنش‌های خشک شدن مدل‌سازی ریاضی خاک رس	

### ۱- مقدمه

فرآیند خشک شدن از دیدگاه تحلیلی بسیار پیچیده می‌باشد. همچنین این فرآیند یکی از فرآیندهای پرمصرف انرژی است. حدود ۲۰٪ انرژی صنایع صرف فرآیند خشک شدن می‌شود [۱]. فرآیند خشک شدن از سه جنبه حرارتی، رطوبتی و مکانیکی تشکیل شده است که در طی فرآیند خشک شدن به صورت هم‌زمان پیشرفت می‌کنند و به یکدیگر وابسته می‌باشند. تبخیر رطوبت از سطح باعث ایجاد گرادیان رطوبت و گرادیان دما در قطعه می‌شود. گرادیان رطوبت و دما با ایجاد تغییر شکل غیر یکنواخت به ترتیب باعث ایجاد تنش‌های رطوبتی (تنش‌های ناشی از توزیع غیر یکنواخت رطوبت) و حرارتی (تنش‌های ناشی از توزیع غیر یکنواخت دما) می‌شوند. تغییر رطوبت و دما، باعث تغییر پیوسته خواص فیزیکی و مکانیکی ماده در طول فرآیند خشک شدن می‌شوند [۲]. وابستگی جنبه‌های حرارتی، رطوبتی و مکانیکی فرآیند خشک شدن به یکدیگر یکی از مشکلات اصلی در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن می‌باشد. در بسیاری از مدل‌های خشک شدن از جنبه حرارتی [۳]، مکانیکی [۴] یا هر دوی آن‌ها به صورت جزئی یا کلی صرف نظر شده است.

انقباض/انبساط قطعه در طول فرآیند خشک شدن از مجموع کرنش‌های رطوبتی، حرارتی و مکانیکی که به ترتیب ناشی از خروج رطوبت، انبساط

حرارتی و تنش‌های خشک شدن می‌باشند، حاصل می‌شود. در نظر نگرفتن انقباض [۵] و یا در نظر گرفتن انقباض به صورت ایده‌آل [۶] فرضیات ساده سازی رایج در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن می‌باشند. در حالت انقباض ایده‌آل از کرنش حرارتی و مکانیکی صرف نظر می‌شود و کرنش رطوبتی برابر با مقدار رطوبت خارج شده از قطعه در نظر گرفته می‌شود [۷]. انقباض/انبساط با تغییر سطح قطعه [۸] و خواص ماده مانند چگالی و ضریب نفوذ بر روی سینتیک خشک شدن مؤثر می‌باشد [۹]. کرنش به همراه رطوبت محتوی و دما، سه متغیر اصلی کوپل کننده دستگاه معادلات فرآیند خشک شدن می‌باشند. در این مطالعه به منظور افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی کرنش‌های رطوبتی، حرارتی و مکانیکی در نظر گرفته شده است.

مدل موئینگی [۱۰] و مدل نفوذ [۵] رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی فرآیند خشک شدن می‌باشند. تفاوت روش‌های مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، اغلب در روش مدل‌سازی فرآیند انتقال جرم می‌باشد. در مدل نفوذ گرادیان رطوبت محتوی، نیروی محرک رطوبت از عمق قطعه به سطوح تبادل می‌باشد. مدل نفوذ به دلیل سادگی و دقت بالا یکی از کاربردی‌ترین روش‌های مدل‌سازی فرآیند خشک شدن می‌باشد که مورد استقبال بسیاری از مهندسان قرار گرفته است [۱۱ و ۱۲].

خشک کردن جابه‌جایی در حالت سنتی همراه با تأمین جریان هوا با دما، رطوبت و سرعت وزش ثابت به صورت پیوسته به منظور برداشت رطوبت

از سطح قطعه می‌باشد. خشک شدن در حالت پیوسته هر چند که به لحاظ عملیاتی آسان است اما بازده پایینی دارد. خشک شدن در شرایط سخت (دمای بالا و رطوبت پایین) منجر به تغییر شکل‌های شدید و تنش‌های بزرگ می‌شود که این امر ممکن است باعث ترک برداشتن و آسیب رسیدن به محصول شود [۱۳]. از سوی دیگر در خشک شدن با نرخ پایین تنش‌های کوچک‌تری تولید می‌شود اما زمان خشک شدن افزایش می‌یابد.

خشک شدن تناوبی یکی از روش‌های نوین در فرآیند خشک شدن می‌باشد که امکان خشک شدن با نرخ بالا همراه با حفظ کیفیت محصول را فراهم می‌کند. در این روش با تغییر متناوب شرایط خشک شدن، نرخ خشک شدن افزایش و کاهش می‌یابد. دوره‌ای که در آن نرخ خشک شدن در حالت بیشینه قرار دارد دوره شوک و دوره‌ای که در آن نرخ خشک شدن در حالت کمینه قرار دارد دوره استراحت نامیده می‌شود. دوره شوک با افزایش گرادیان رطوبت و ایجاد نیروهای داخلی باعث افزایش نرخ انتقال رطوبت از عمق به سطح می‌شود به عبارت دیگر سینتیک خشک شدن بهبود می‌یابد. اما از سوی دیگر افزایش نرخ خشک شدن با ایجاد غیر یکنواختی شدید در توزیع رطوبت باعث افزایش تنش‌های خشک شدن می‌شود. از این رو، به منظور پیشگیری از ترک برداشتن محصول بعد از مدت زمان مشخص از شروع دوره شوک، با تغییر پارامترهای محیطی نرخ خشک شدن کاهش می‌یابد و قطعه وارد دوره استراحت می‌شود. در دوره استراحت، با انتقال رطوبت از عمق به سطح با نرخ افزایش یافته در دوره شوک توزیع رطوبت یکنواخت‌تر می‌شود و تنش‌های خشک شدن کاهش می‌یابد. در خشک شدن تناوبی در صورت طرح ریزی مناسب در مقایسه با خشک شدن پیوسته (خشک شدن با نرخ بیشینه در کل فرآیند خشک شدن) بدون افزایش قابل توجه زمان خشک شدن، تنش‌های خشک شدن کاهش قابل توجهی می‌یابد. همچنین با توجه به کاهش دما در دوره استراحت مصرف انرژی کاهش می‌یابد [۱۴]. تعیین دوره تناوب، دامنه تناوب و زمان شروع تناوب، چالش‌های اصلی در فرآیند خشک شدن تناوبی می‌باشند. در ادامه به بررسی مطالعات انجام شده در روش خشک کردن تناوبی خاک رس پرداخته می‌شود.

کوالسکی و پاولوسکی [۱۵] با صرف نظر کردن از انقباض قطعه و تنش‌های خشک شدن به مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن پیوسته و تناوبی در یک قطعه استوانه‌ای پرداخته‌اند. خشک شدن تناوبی در دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول اثر تغییرات دوره‌ای دما و در حالت دوم اثر تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی محیط بر روی سینتیک خشک شدن مطالعه شده است. در خشک شدن تناوبی تا یک ساعت مانده به زمان خشک شدن بحرانی دما و رطوبت نسبی محیط ثابت نگه داشته می‌شوند و در ادامه صورت سینوسی با دوره تناوب دو ساعت تغییر می‌کنند. کیفیت قطعه در خشک شدن تناوبی در هر دو حالت بدون افزایش قابل توجه زمان خشک شدن بهبود یافته است.

کوالسکی و پاولوسکی [۱۶] با انجام سه سری آزمایش به بررسی تجربی کیفیت محصولات خشک شده رسی در روش خشک شدن تناوبی

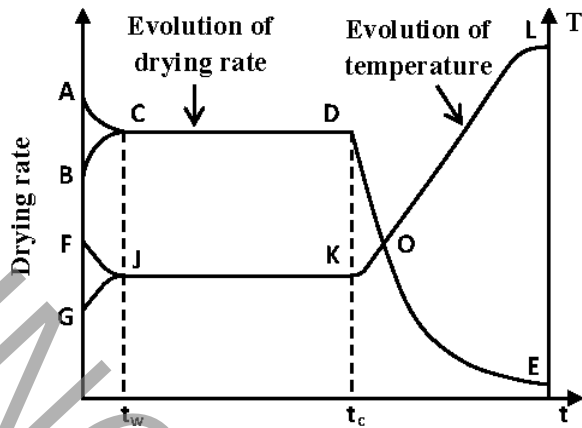
پرداخته‌اند. کیفیت محصولات در فرآیند خشک شدن هم به صورت مشاهده مستقیم و هم با استفاده از تست نشر آوایی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. در سری اول، دوم و سوم آزمایشات به ترتیب کیفیت محصولات در روش خشک شدن پیوسته، خشک شدن تناوبی با تغییرات سینوسی دمای محیط با دوره تناوب دو ساعت و خشک شدن تناوبی با تغییرات سینوسی رطوبت نسبی محیط با دوره تناوب یک ساعت مورد بررسی قرار گرفته است. کیفیت محصولات خشک شده به ترتیب در روش خشک کردن پیوسته، خشک کردن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما و خشک کردن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی افزایش می‌یابد.

کوالسکی و پاولوسکی [۱۷] با انجام آزمایشات متعدد به بررسی کیفیت محصولات خشک شده خاک رس و چوب گردو در روش خشک شدن پیوسته و تناوبی با تغییرات سینوسی دما و رطوبت نسبی محیط با دوره تناوب ۲ ساعت پرداخته‌اند. همچنین با مدل‌سازی و شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن یک قطعه استوانه‌ای مقدار انرژی مصرفی و بازده انرژی را در روش خشک شدن پیوسته و تناوبی محاسبه کرده‌اند. در مدل‌سازی از انقباض قطعه و تنش‌های خشک شدن صرف نظر شده است. در روش‌های الف) خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی، ب) خشک کردن پیوسته و ج) خشک کردن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما بازده انرژی به ترتیب افزایش می‌یابد.

کوالسکی و سادزینسکا [۱۸] به بررسی تجربی اثر فرکانس و دامنه گرمایش، سرمایش و رطوبت زنی بر روی کیفیت محصولات در روش خشک شدن تناوبی پرداخته‌اند. مدت انجام این آزمایشات ۳۶۰ دقیقه می‌باشد که در ۱۲۰ دقیقه اول فرآیند خشک شدن به صورت پیوسته صورت می‌پذیرد. کوالسکی و سادزینسکا مشاهده کردند که با افزایش فرکانس گرمایش و رطوبت زنی کیفیت قطعات خشک شده بهبود می‌یابد. افزایش دامنه تناوب در خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما اثری بر روی نرخ خشک شدن و کیفیت قطعات خشک شده ندارد اما در خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی باعث بهبود قابل توجه کیفیت قطعات خشک شده می‌شود.

مانل و همکاران [۱۹] با مدل‌سازی و شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما در حالت دو بعدی به بررسی اثر فرکانس و زمان شروع تغییرات بر روی مقدار تنش‌های برشی پرداخته‌اند. افزایش فرکانس و کاهش زمان شروع تغییرات باعث کاهش قدر مطلق تنش برشی بیشینه می‌شود اما از سوی دیگر زمان خشک شدن و مقدار مصرف انرژی افزایش می‌یابد.

حیدری و خلیلی [۲۰] به بررسی تأثیر دوره تناوب تغییر دما در خشک شدن تناوبی خاک رس پرداخته‌اند. بر اساس نتایج این تحقیق عدم طرح‌ریزی صحیح فرآیند خشک تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما باعث افزایش تنش‌های خشک شدن و کاهش کیفیت قطعات خشک شده می‌گردد.



شکل ۱: دوره‌های کلاسیک فرآیند خشک شدن خاک رس

مناسب می‌باشد. مدل ریاضی ارائه شده [۲۴ و ۲۵] در سایر مطالعات نویسندگان به تفصیل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. انقباض ماده از طریق رفتار مکانیکی ماده در نظر گرفته شده است. در مدل ریاضی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

- رطوبت و دمای اولیه یکنواخت است.
- از فاز گازی و اثر گرانش صرف نظر شده است.
- رفتار مکانیکی ماده الاستیک خطی است.

انتقال جرم و حرارت به ترتیب با استفاده از معادله فیک [۱۱] و معادله گرما بیان می‌شوند. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده معادلات انتقال جرم و انتقال حرارت به ترتیب به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla w) \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2)$$

با توجه به شبیه استاتیک بودن فرآیند خشک شدن و صرف نظر کردن از فاز گازی و اثر گرانش، معادله مومنتوم به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۲۶].

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad (3)$$

کرنش رطوبتی ( $\varepsilon_w$ ) و کرنش حرارتی ( $\varepsilon_T$ ) به ترتیب متناسب با تغییر رطوبت و دما می‌باشد.

$$\varepsilon_w = \beta(w - w_0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_T = \alpha(T - T_0) \quad (5)$$

$\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب ضریب انبساط حرارتی و رطوبتی می‌باشند. با کم کردن کرنش حرارتی و کرنش رطوبتی از کرنش کل، کرنش مکانیکی حاصل می‌شود.

$$\varepsilon_M = \varepsilon - \varepsilon_w - \varepsilon_T \quad (6)$$

رابطه تنش و کرنش به کمک قانون هوک تعمیم یافته بیان می‌شود.

بر اساس مطالعات بررسی شده نوآوری مطالعه حاضر مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند خشک کردن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی در حالت سه‌بعدی و بررسی تأثیر دوره تناوب بر مقدار تنش اصلی بیشینه در نقاط مستعد ترک برداشتن می‌باشد. همچنین تنش‌های رطوبتی (ناشی از کرنش رطوبتی) و حرارتی (ناشی از کرنش حرارتی) به صورت مجزا در نقاط مختلف قطعه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. مدل‌سازی، شبیه‌سازی و اعتبار سنجی هر سه جنبه رطوبتی، حرارتی و مکانیکی فرآیند خشک شدن یکی دیگر از مشخصات ویژه مطالعه حاضر می‌باشد.

## ۲- دوره‌های خشک شدن خاک رس

فرآیند خشک شدن بطور کلاسیک از چهار دوره تشکیل شده است که عبارتند از: دوره پیشگرم، دوره اول، دوره گذار و دوره دوم (شکل ۱). دوره اول و دوره دوم به ترتیب دوره خشک شدن با نرخ ثابت و دوره خشک شدن با نرخ نزولی نیز نامیده می‌شوند. در شروع فرآیند خشک شدن قطعه با دمای اولیه  $\rho_0$ ، تا رسیدن به دمای حباب تر ( $\rho_{tr}$ ) گرم/سرد می‌شود (فرآیندهای  $\rho_0 - \rho_{tr}$  /  $\rho_{tr} - \rho_0$ ). هم‌زمان با گرم/سرد شدن قطعه نرخ تبخیر از سطح قطعه نیز افزایش/کاهش می‌یابد (فرآیندهای  $\rho_0 - \rho_{tr}$  /  $\rho_{tr} - \rho_0$ ). این دوره، دوره پیشگرم نامیده می‌شود. با رسیدن دمای سطح قطعه به دمای حباب تر دوره اول شروع می‌شود. در دوره اول نرخ تبخیر ثابت (فرآیند  $\rho - \rho_{tr}$ ) و دمای سطح برابر با دمای حباب تر می‌باشد (فرآیند  $\rho - \rho_{tr}$ ). در این دوره رطوبت از عمق قطعه به وسیله مکانیزم نفوذ به سطوح تبادل مهاجرت می‌کند و در آن جا تبخیر می‌شود [۲۱]. رطوبت قطعه در پایان دوره اول رطوبت بحرانی ( $w_{cr}$ ) نامیده می‌شود. در رطوبت بحرانی نرخ مهاجرت رطوبت از عمق به سطح قطعه کمتر از نرخ تبخیر رطوبت بر روی سطح قطعه می‌شود و لوله‌های موئین به ترتیب از بزرگ به کوچک شکسته می‌شوند [۲۲]. با شکسته شدن اولین لوله موئین دوره گذار شروع و با شکسته شدن آخرین لوله موئین دوره گذار به اتمام می‌رسد (فرآیند  $\rho - \rho_{tr}$ ) و دوره دوم فرآیند خشک شدن شروع می‌شود. دوره دوم تا رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت تعادلی ادامه ( $\rho_{eq}$ ) می‌یابد (فرآیند  $\rho - \rho_{tr}$ ). در دوره گذار (فرآیند  $\rho - \rho_{tr}$ ) و دوره دوم (فرآیند  $\rho - \rho_{tr}$ ) دمای سطح به تدریج افزایش می‌یابد و به دمای خشک کن می‌رسد. انقباض قطعه عملاً در پایان دوره اول با رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت بحرانی متوقف می‌شود و در دوره دوم فرآیند خشک شدن با وجود کاهش رطوبت، کاهش حجم مشاهده نمی‌شود [۲۳].

با تحلیل دقیق توزیع رطوبت در فرآیند خشک شدن مشاهده شده است که بیشترین غیر یکنواختی توزیع رطوبت و دما در پایان دوره اول می‌باشد [۹]. از این رو احتمال ترک برداشتن قطعه در پایان دوره اول بسیار زیاد می‌باشد [۱۱ و ۱۹].

## ۳- مدل ریاضی

یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی عددی، تهیه یک مدل ریاضی

جدول ۱: پارامترهای ثابت مورد استفاده در مدل سازی

مقدار	پارامتر
$w_c = 0.33$	رطوبت محتوی اولیه
$w_{cr} = 0.16$	رطوبت بحرانی
$w_{eq} = 0.01$	رطوبت تعادلی
$T_i = 40^\circ\text{C}$	دمای اولیه قطعه
$T_w = 50^\circ\text{C}$	دمای حباب تر
$\rho_s^s = 3040 \text{ kg/m}^3$	چگالی ذاتی خاک
$\rho_l^l = 1000 \text{ kg/m}^3$	چگالی ذاتی آب
$k_s = 1 \text{ W/mK}$	ضریب رسانایی حرارتی خاک
$k_l = 0.597 \text{ W/mK}$	ضریب رسانایی حرارتی آب
$\alpha = 3 \times 10^{-4}$	ضریب انبساط حرارتی [۲۷]
$\beta = 0.5$	ضریب انبساط رطوبتی در دوره اول
$\nu = 0.4$	ضریب پواسون [۲۸]

$$\sigma = \lambda \text{tr}(\varepsilon) \mathbf{I} + 2\mu \varepsilon - 3K\beta(w - w_0) \mathbf{I} - 3K\alpha(T - T_0) \mathbf{I} \quad (7)$$

در رابطه بالا  $K$ ، مدول بالک  $\mu$  و  $\lambda$  ضرایب لام هستند که بر حسب مدول یانگ ( $E$ ) و ضریب پواسون ( $\nu$ ) به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (10)$$

#### ۴- شرایط اولیه و شرایط مرزی

دما و رطوبت محتوی در ابتدا یکنواخت هستند و به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$t = 0, \quad T = T_0 \quad (11)$$

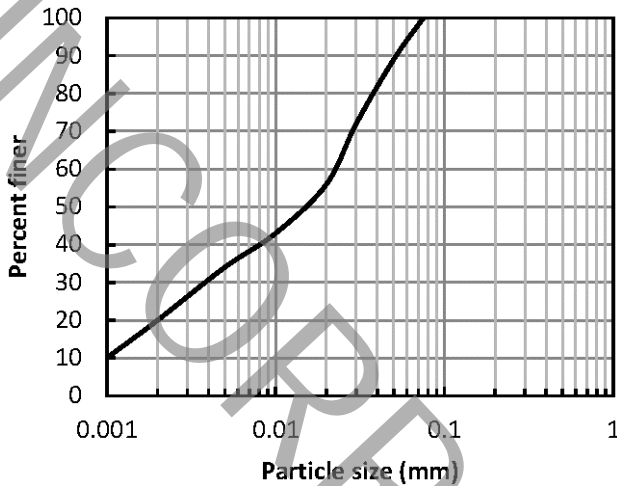
$$t = 0, \quad w = w_0 \quad (12)$$

نرخ انتقال جرم و انتقال حرارت بر روی سطوح تبادل به ترتیب با روابط زیر بیان می‌شود.

جدول ۲: پارامترهای متغیر مورد استفاده در مدل سازی

مقدار / رابطه	پارامتر
$\phi_l = \frac{\rho_l^l w}{\rho_l^l + \rho_s^s w}$	کسر حجمی آب
$C_{ps} = 2000 \text{ J/kgK}$	گرمای ویژه خاک
$C_{pl} = 4220 \text{ J/kgK}$	گرمای ویژه آب
$C_p = \frac{wC_{pl} + C_{ps}}{w+1} \text{ J/kgK}$	گرمای ویژه کل
$\rho = \frac{m_0(1+w)}{V(1+w_0)} \text{ kg/m}^3$	چگالی کل
$E = 0.96 \exp\left(\frac{1}{0.061 + 1.735w^{4.919}}\right) \text{ Pa}$	مدول یانگ [۲۸]
$D_{eff} = 5.61e^{-9} \left(7.5 + \exp\left(\frac{44w}{1.6+w}\right) * \exp\left(-\frac{510}{T}\right)\right) \text{ m}^2/\text{s}$	ضریب نفوذ مؤثر [۲۹]
$F_m = \begin{cases} \dot{m} & \text{for } w > w_{cr} \\ \dot{m} * \frac{w - w_{eq}}{w_{cr} - w_{eq}} & \text{for } w < w_{cr} \end{cases}$	نرخ تبخیر رطوبت [۱۵ و ۳۰]
$\dot{m} = 13 * 10^{-3} * (C_{surf} - C_{inf}) \text{ kg/m}^2\text{s}$	
$C_{inf} = \frac{0.622RH.P_{vs.inf}}{P_{atm} - RH.P_{vs.inf}}$	
$C_{surf} = \frac{0.622a_w.P_{vs.surf}}{P_{atm} - a_w.P_{vs.surf}}$	
$P_{vs.inf} = \exp\left(23.3265 - \frac{3802.7}{T_{inf}} - \left(\frac{472.68}{T_{inf}}\right)^2\right)$	
$P_{vs.surf} = \exp\left(23.3265 - \frac{3802.7}{T_{surf}} - \left(\frac{472.68}{T_{surf}}\right)^2\right)$	

و مکانیک خاک استان خراسان رضوی اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). بر اساس منحنی توزیع اندازه ذرات نمونه مطالعاتی از ۱۹٪ رس، ۶۹٪ لای و ۱۰٪ لوم تشکیل شده است. رفتار خاک‌های ریزدانه به میزان آب داخل مجموعه بستگی دارد. خاک‌های ریزدانه بر حسب درصد رطوبت محتوی می‌توانند در یکی از حالت‌های جامد، نیمه جامد، خمیری و مایع دسته بندی شوند.



شکل ۳: منحنی توزیع اندازه ذرات

بر این اساس حد روانی مرز بین حالت خمیری و حالت روانی خاک، حد خمیری مرز بین حالت خمیری و نیمه جامد و حد انقباض مرز بین حالت نیمه جامد و جامد تعریف می‌شود. حد روانی و حد خمیری و حد انقباض، حدود اتربرگ<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. حد روانی و حد خمیری نمونه مطالعاتی در اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان خراسان رضوی و حد انقباض ( $w_{sl}$ ) در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان تهران اندازه‌گیری شد (جدول ۳). در آزمایش حدود اتربرگ با رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت حد انقباض، کاهش حجم قطعه متوقف می‌شود. اما در فرآیند خشک شدن به دلیل تنش‌های خشک شدن انقباض قطعه می‌تواند در رطوبت‌های بالاتر از حد انقباض متوقف شود. آنالیز شیمیایی خاک رس مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه گردیده است.

#### ۶-۲- چیدمان تجهیزات آزمایشات تجربی

آزمایشات تجربی در محفظه یک خشک کن انجام گردید. طرح‌واره‌ی از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در آزمایشات تجربی در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه مکعبی برروی نگهدارنده مشبک که در وسط خشک کن قرار دارد گذاشته می‌شود. نگهدارنده مشبک امکان تبخیر رطوبت از سطح پایینی قطعه را فراهم می‌کند و به کمک چهار میله رابط برروی ترازوی دیجیتال GF۳۰۰۰ A&D با دقت ۰/۰۱ گرم قرار گرفته است.

$$-D_{eff} \nabla w = F_m \quad (13)$$

$$-k \nabla T = h(T_s - T_{inf}) - h_v F_m \quad (14)$$

در رابطه بالا  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر،  $F_m$  نرخ تبخیر رطوبت،  $h_v$  گرمای نهان تبخیر،  $k$  و  $h$  به ترتیب ضریب انتقال حرارت رسانشی و جابه‌جایی هستند.

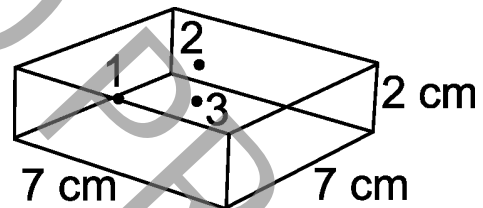
در فرآیند خشک شدن تغییر شکل ماده به دلیل خارج شدن رطوبت از ماده می‌باشد و هیچگونه نیروی خارجی به ماده اعمال نمی‌گردد. بنابراین در سطوح تبادل رابطه زیر برقرار می‌باشد.

$$\sigma.n = 0 \quad (15)$$

مقادیر پارامترهای ثابت مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول ۱ و مقادیر پارامترهای متغیر در جدول ۲ ارائه شده است.

#### ۵- شبیه‌سازی

دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم بر فرآیند خشک شدن با استفاده از روش المان محدود فرمولبندی و با استفاده از یک حلگر عددی حل گردید. فرآیند خشک شدن خاک رس در یک قطعه مکعبی به ابعاد  $7 \times 7 \times 2$  سانتیمتر شبیه سازی شده است (شکل ۲). در مش بندی قطعه از تکنیک مش زنی آزاد و  $11342$  المان هرمی چهار وجهی استفاده شده است. در شبیه سازی به دلیل رفتار انقباضی فرآیند خشک شدن و تغییر ابعاد و مکان سطوح تبادل از دیدگاه فرمول بندی اویلر- لاگرانژ اختیاری<sup>۱</sup> استفاده شده است. رطوبت اولیه و دمای اولیه قطعه در شبیه‌سازی برابر با مقادیر مورد استفاده در آزمایش تجربی (بخش ۶-۱) در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با گام زمانی  $50$  ثانیه استخراج شده است. در ترسیم داده‌ها سه نقطه نشان داده شده در شکل ۲ مورد استفاده قرار گرفته است. نقطه ۱ در وسط ضلع سطح فوقانی، نقطه ۲ در مرکز سطح فوقانی و نقطه ۳ در مرکز قطعه قرار دارد.



شکل ۲: هندسه مورد استفاده در شبیه‌سازی

#### ۶- اعتبارسنجی مدل و نتایج شبیه‌سازی

##### ۶-۱- ماده مطالعاتی

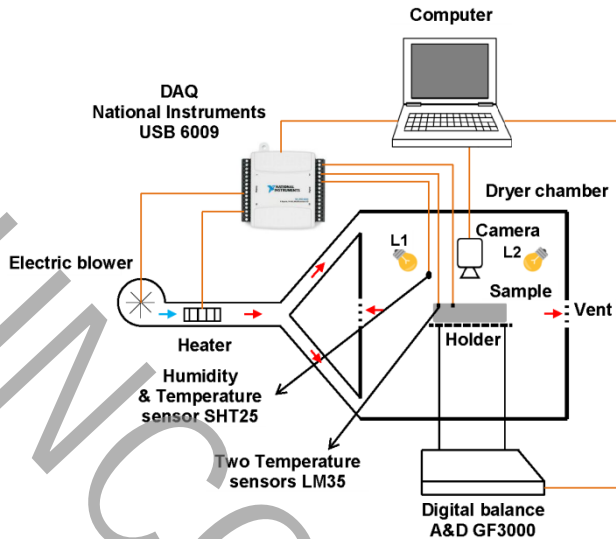
خاک رس استخراج شده از شهرستان بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی به منظور انجام آزمایش تجربی مورد استفاده قرار گرفت. توزیع اندازه ذرات نمونه مطالعاتی به کمک آزمایش دانه‌بندی در اداره کل آزمایشگاه فنی

جدول ۳: حدود اتربرگ

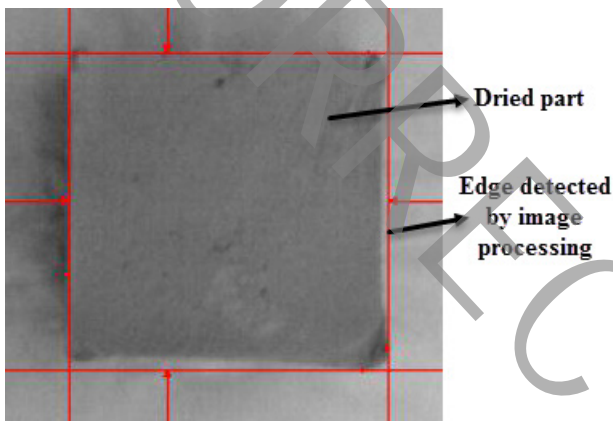
حدود اتربرگ	رطوبت محتوی
حد روانی	۲۶%
حد خمیری	۱۹%
حد انقباض	۱۲%

جدول ۴: آنالیز شیمیایی خاک رس

عنصر	درصد
Si	۵۹/۵
Ca	۷/۸۳
Mg	۴/۲۰
Fe	۴/۵۰
Al	۷/۸۰
Ti, Mn	<۱
L.O.I	۹/۸۰



شکل ۴: طرح ویژه تجهیزات آزمایشگاهی



شکل ۵: منحنی توزیع اندازه ذرات

فراهم می‌کند. به کمک تکنیک‌های پردازش تصویر، تغییرات ابعاد قطعه اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۵). جهت عکس برداری از دوربین Asus Fonepad ۷ FE۳۷۵CG با رزولوشن ۵ مگا پیکسل استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری به کیفیت عکس‌های گرفته شده وابسته می‌باشد. به منظور افزایش کیفیت عکس‌های گرفته شده، از دو عدد لامپ استفاده شده است.

### ۶-۳- اعتبار سنجی

اعتبار سنجی مدل به کمک مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی فرآیند خشک شدن پیوسته انجام شده است. به منظور انجام آزمایش تجربی خاک رس با مقدار مشخص آب مخلوط می‌شود تا خمیر رسی با قابلیت شکل‌پذیری و رطوبت اولیه ۳۳٪ ساخته شود. خمیر رسی به منظور همگن شدن به مدت ۴۸ ساعت درون یک محفظه آب بندی نگهداری می‌شود. برای تهیه نمونه آزمایش از یک قالب به فرم مکعب مستطیل با ابعاد ۲×۲×۷ سانتیمتر استفاده شد.

جریان هوای تولید شده توسط دمنده پس از عبور از روی گرمکن وارد محفظه خشک‌کن می‌شود. به منظور تأمین شرایط خشک شدن یکسان برای تمام سطوح قطعه، جریان هوا از بالا و پایین وارد محفظه خشک‌کن می‌شود و از طریق چهار دریچه که بر روی و وجوه جانبی خشک‌کن قرار دارد خارج می‌شود.

دما و رطوبت نسبی محفظه خشک‌کن به کمک سنسور دما رطوبت (SHT۲۵) اندازه‌گیری می‌شود و از طریق کارت داده‌برداری<sup>۱</sup> مدل usb-۶۰۹ ساخت شرکت نشنال اینسترومنت<sup>۲</sup> به کامپیوتر ارسال می‌گردد. دقت اندازه‌گیری سنسور SHT۲۵ به ترتیب ۰/۲ درجه سانتیگراد و ۱/۱٪ در اندازه‌گیری دما و رطوبت می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری تغییرات دمای سطح قطعه دو عدد سنسور LM۳۵ یکی در مرکز و دیگری نزدیک به لبه با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ درجه سانتیگراد بر روی سطح قطعه قرار داده شده است (نقطه ۱ و ۲ در شکل ۲).

کارت داده‌برداری اطلاعات دریافتی از سنسور دما و رطوبت را به نرم‌افزار لب ویو<sup>۳</sup> منتقل می‌کند. این اطلاعات در نرم‌افزار مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در ادامه با توجه به شرایط تعیین شده برای انجام آزمایش، دستورات لازم جهت کنترل توان دمنده و گرمکن، توسط کامپیوتر به خروجی‌های کارت داده‌برداری ارسال می‌گردد.

دوربین قرار گرفته در بالای قطعه، امکان عکس‌برداری از قطعه در فاصله‌های زمانی مشخص شده و انتقال عکس‌ها به کامپیوتر را

- 1 Data acquisition (DAQ)
- 2 National Instruments Corporation
- 3 Lab View

با رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت بحرانی (نقطه C در شکل ۷) و شکسته شدن لوله‌های موئین به ترتیب از بزرگ به کوچک، دوره اول فرآیند خشک شدن به پایان می‌رسد و نرخ تبخیر کاهش می‌یابد. در دوره گذار و دوره دوم فرآیند خشک شدن، با کاهش نرخ تبخیر (C-E در شکل ۸)، دمای سطح قطعه افزایش می‌یابد و به دمای محفظه خشک کن می‌رسد (C-E در شکل ۶).

در دوره پیشگرم و دوره اول فرآیند خشک شدن (A-C در شکل‌های ۶ تا ۱۰)، انقباض قطعه تقریباً برابر با مقدار آب خارج شده از قطعه می‌باشد. از این رو، در این دوره قطعه در حالت اشباع باقی می‌ماند. در دوره اول آب توسط لوله‌های موئین، از عمق قطعه به سطح قطعه منتقل می‌شود. به عبارت دیگر در این دوره اتصال هیدرولیکی بین عمق قطعه و سطح قطعه برقرار می‌باشد. با انقباض قطعه، قطر لوله‌های موئین کاهش می‌یابد. با کاهش قطر لوله‌های موئین، فشار موئینگی افزایش می‌یابد و امکان انتقال رطوبت از عمق بیشتر به سطح قطعه فراهم می‌شود. با رسیدن رطوبت نقاط سطح قطعه به رطوبت بحرانی، انقباض سطح قطعه در این نقاط متوقف می‌شود. از این رو، امکان کاهش بیشتر قطر لوله‌های موئین فراهم نمی‌باشد. با ادامه فرآیند خشک شدن لوله‌های موئین قدرت کافی (قطر لازم) برای انتقال آب از عمق قطعه به سطح قطعه را ندارند و شکسته می‌شوند. به عبارت دیگر اتصال هیدرولیکی بین عمق قطعه و سطح قطعه، قطع می‌شود. مکانی که رطوبت محتوی در آن جا تبخیر می‌شود، جبهه تبخیر نامیده می‌شود. در دوره اول جبهه تبخیر بر روی سطح قطعه قرار دارد. با قطع شدن اتصال هیدرولیکی، جبهه تبخیر به داخل قطعه عقب نشینی می‌کند.

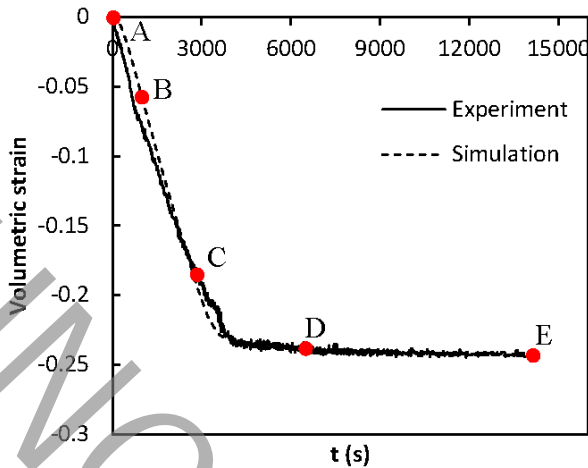
با توجه به آنکه خشک شدن با شدت بیشتری در گوشه‌ها و لبه‌ها انجام می‌شود، رطوبت این نقاط زودتر از نقاط دیگر به رطوبت بحرانی می‌رسد. با رسیدن رطوبت اولین نقطه از سطح به رطوبت بحرانی و شکسته شدن لوله موئین، دوره گذار (دوره انتقال از دوره اول فرآیند خشک شدن به دوره دوم) شروع می‌شود (نقطه C در شکل‌های ۶ تا ۱۰) و با شکسته شدن آخرین لوله موئین دوره گذار به اتمام می‌رسد و دوره دوم فرآیند خشک شدن شروع می‌شود (نقطه D در شکل‌های ۶ تا ۱۰). با شکسته شدن تمامی لوله‌های موئین انقباض قطعه عملاً متوقف می‌شود (نقطه D در شکل ۹)، هر چند نقاط داخلی قطعه به دلیل کاهش رطوبت محتوی تمایل به منقبض شدن دارند، اما سطح خشک شده مانع انقباض بیشتر این نقاط می‌شود.

در دوره پیشگرم و دوره اول فرآیند خشک شدن، خروج آب از قطعه و کاهش حجم قطعه (A-C در شکل ۹) (برابر با مقدار آب خارج شده) به صورت هم‌زمان صورت می‌گیرد. با توجه به بیشتر بودن چگالی خاک از آب، چگالی کل قطعه در این دوره افزایش می‌یابد (A-C در شکل ۱۰). در دوره گذار و دوره دوم فرآیند خشک شدن با توجه به شکسته شدن تدریجی لوله‌های موئین و توقف تدریجی کاهش حجم قطعه (C-E در شکل ۹)، با وجود خروج رطوبت، چگالی کل قطعه در این دوره کاهش می‌یابد (C-E در شکل ۱۰).

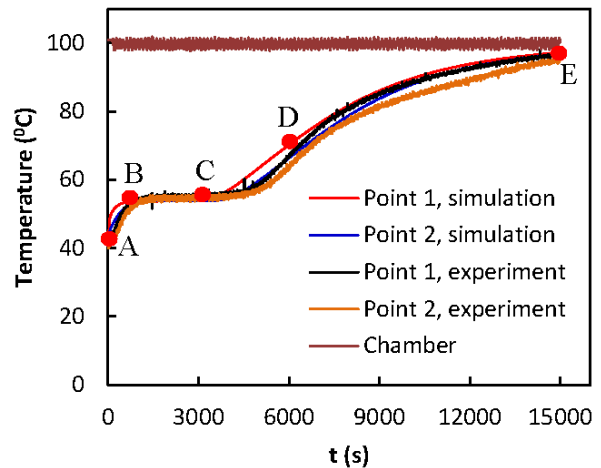
بعد از قالب گیری و خارج کردن نمونه از داخل قالب، نمونه بر روی نگه‌دارنده در داخل محفظه خشک کن که دمای آن ۱۰۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی آن ۱۰٪ می‌باشد، قرار داده شد. دمای نمونه در هنگام شروع آزمایش ۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. در مدت زمان فرآیند خشک شدن سیستم کنترلی دما و رطوبت نسبی را در داخل محفظه خشک کن ثابت نگه می‌دارد. تبخیر شدن رطوبت از سطح قطعه باعث افزایش رطوبت نسبی در داخل محفظه خشک کن می‌شود. رطوبت نسبی در داخل محفظه خشک کن به وسیله وزش هوای محیط به داخل محفظه خشک کن ثابت نگه داشته می‌شود. دمای محفظه خشک کن با روشن/خاموش کردن گرمکن در زمان‌های مناسب کنترل می‌شود. این موضوع باعث نوسان اندک دمای محفظه خشک در محدوده دمای مشخص شده می‌شود. در طول فرآیند خشک شدن، تغییرات وزن قطعه توسط ترازوی دیجیتال هر ۱۰ ثانیه یکبار ثبت گردید، همچنین به منظور اندازه‌گیری تغییرات سطح نمونه، هر ۱۰ ثانیه یک بار از نمونه، عکس برداری شد. تغییرات جرم، تغییرات دمای سطح و تغییرات ابعاد سطح قطعه، داده‌های خروجی از آزمایش خشک شدن می‌باشند. با تحلیل داده‌های فوق، رطوبت محتوی میانگین، دمای سطح، نرخ تبخیر، کرنش حجمی و چگالی قطعه محاسبه می‌شود.

در شکل ۶ منحنی نتایج شبیه سازی و تجربی تغییرات دمای نقطه ۱ و ۲ و منحنی تغییرات دمای محفظه خشک کن نشان داده شده است. در شکل‌های ۷ تا ۱۰ به ترتیب منحنی تغییرات میانگین رطوبت محتوی، منحنی میانگین نرخ تبخیر سطحی، منحنی کرنش حجمی و منحنی تغییرات چگالی میانگین حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این منحنی‌ها نقطه A نشان دهنده شروع فرآیند خشک شدن، نقطه B نشان دهنده پایان دوره پیشگرم و شروع دوره اول، نقطه C نشان دهنده پایان دوره اول و شروع دوره گذار، نقطه D نشان دهنده پایان دوره گذار و شروع دوره دوم و نقطه E نشان دهنده پایان فرآیند خشک شدن و رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت تعادلی می‌باشد. زمان خشک شدن قطعه در حدود ۴ ساعت و کرنش حجمی قطعه در حدود ۲۵٪ می‌باشد.

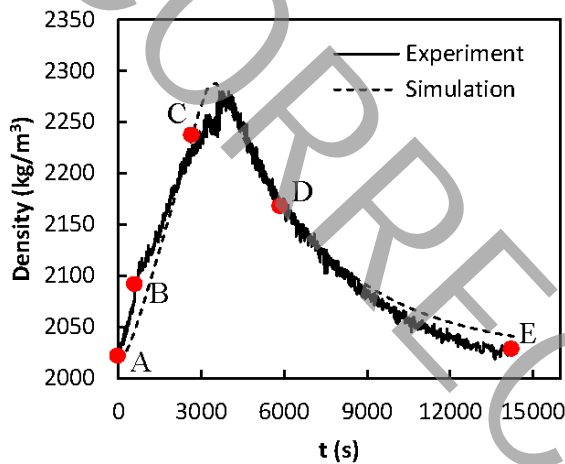
در شروع فرآیند خشک شدن اختلاف دمای اولیه قطعه با محیط باعث انتقال حرارت از محیط به قطعه از طریق مکانیزم جابه‌جایی می‌شود (شار مثبت حرارت). اما از سوی دیگر تبخیر رطوبت از سطح قطعه باعث خروج حرارت از قطعه می‌شود (شار منفی حرارت). در دوره اول به دلیل بزرگتر بودن شار مثبت حرارت جابه‌جایی از شار منفی حرارت تبخیر، دمای سطح افزایش می‌یابد (A-B در شکل ۸). با افزایش دمای سطح و کاهش اختلاف دمای بین قطعه و محیط شار مثبت حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش دمای سطح باعث افزایش نرخ تبخیر و شار منفی حرارت تبخیر می‌شود. با رسیدن دمای سطح به دمای حباب تر (۵۴ درجه سانتیگراد) (نقطه B در شکل ۶) شار حرارت جابه‌جایی برابر با شار حرارت تبخیر می‌شود، دوره پیشگرم به پایان می‌رسد و دوره اول فرآیند خشک شدن شروع می‌شود. با توجه به ثابت بودن نرخ تبخیر در دوره اول (B-C در شکل ۸) دمای سطح قطعه در این دوره ثابت باقی می‌ماند (B-C در شکل ۶).



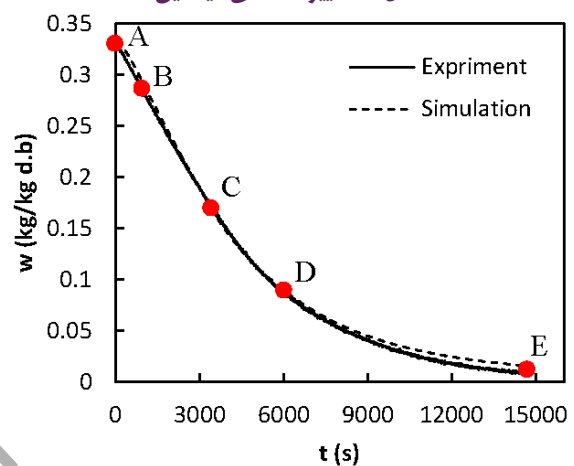
شکل ۹: تغییرات کرنش حجمی



شکل ۶: تغییرات دمای میانگین

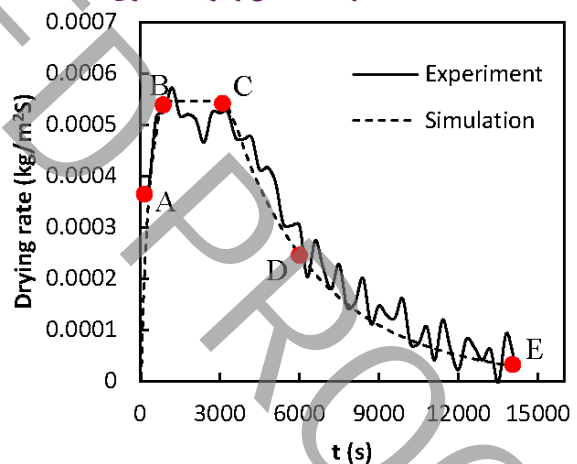


شکل ۱۰: تغییرات چگالی کل



شکل ۷: تغییرات میانگین رطوبت محتوی

رطوبت بحرانی، شکسته شده است و این نقاط وارد دوره دوم فرآیند خشک شدن شده‌اند. روشن شدن رنگ تصویر در این نقاط نشان دهنده پرش سطح تبخیر در این نقاط به داخل قطعه می‌باشد. شکل ۱۱-الف مطابق با نقطه C در شکل‌های ۶ تا ۱۰ می‌باشد. در شکل ۱۱-ب تصویر گرفته شده از قطعه در دوره گذار (C-D در شکل‌های ۶ تا ۱۰) نشان داده شده است. در این شکل سطح قطعه توسط یک دایره به صورت تقریبی به دو قسمت خارجی و داخلی تقسیم شده است. در نقاط قرار گرفته در قسمت خارجی که با رنگ روشن‌تر از نقاط داخلی متمایز شده‌اند، رطوبت محتوی به زیر رطوبت بحرانی کاهش یافته است و این نقاط وارد دوره دوم فرآیند خشک شدن شده‌اند. رطوبت محتوی در نقاط قرار گرفته در قسمت داخلی، بیشتر از رطوبت بحرانی می‌باشد. سطح تبخیر در این نقاط بر روی سطح قطعه قرار گرفته است و همین موضوع باعث رنگ تیره‌تر این نقاط داخلی شده است. در شکل ۱۱-ج تصویر گرفته شده از قطعه بعد از گذشت زمان ۶۰۰۰ ثانیه از شروع آزمایش که مطابق با پایان دوره گذار می‌باشد نشان داده شده است. در این لحظه از فرآیند خشک شدن تمامی لوله‌های موئین شکسته شده است،



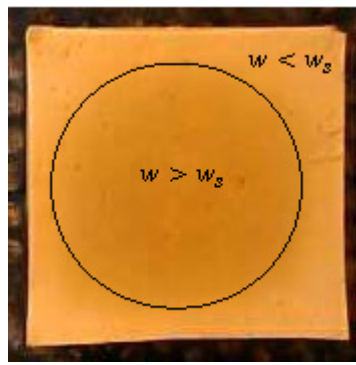
شکل ۸: تغییرات نرخ خشک شدن

در شکل ۱۰، عکس‌های گرفته شده از سطح قطعه در زمان‌های مختلف خشک شدن نشان داده شده است. در شکل ۱۱-الف مطابق با شروع دوره گذار در فرآیند خشک شدن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لوله‌های موئین در نقاط قرار گرفته بر روی لوله، با رسیدن رطوبت محتوی این نقاط به

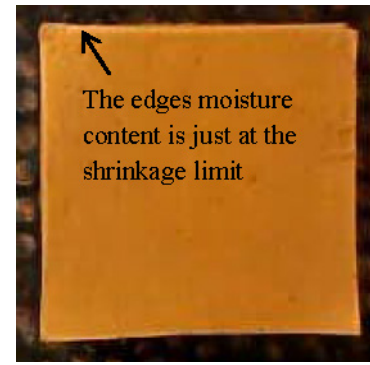




$t = 3000s$  (الف)



$t = 4500s$  (ب)



$t = 6000s$  (ج)

شکل ۱۱: عکس‌های گرفته شده از قطعه در زمان‌های مختلف

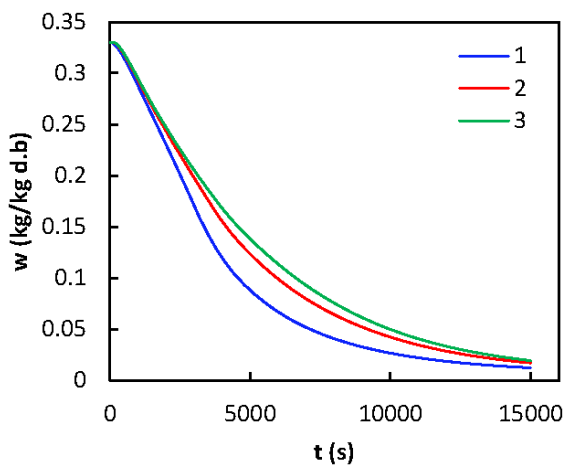
شروع دوره دوم فرآیند خشک شدن، گرادیان رطوبت محتوی و دما به تدریج کاهش یافته و در پایان فرآیند خشک شدن در هر چهار نقطه رطوبت محتوی به رطوبت تعادلی و دما به دمای محفظه خشک کن می‌رسد. با توجه به رفتار نیمه ترد خمیر رسی در رطوبت‌های زیر ۲۰٪ [۳۲]، تنش‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی تغییرات تنش اصلی اول، دوم و سوم به ترتیب در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده است. در دوره پیشگرم و دوره اول فرآیند خشک شدن، لایه‌های نزدیک به سطح قطعه به دلیل از دست دادن رطوبت بیشتر نسبت به عمق قطعه، تمایل بیشتری به انقباض دارند. این اختلاف باعث ایجاد تنش‌های کششی بر روی سطح قطعه (نقطه ۱ و ۲) و تنش‌های فشاری در عمق قطعه (نقطه ۳) می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تنش مربوط به تنش اصلی اول در نقطه ۱ می‌باشد. گرادیان انقباض و در نتیجه تنش‌های خشک شدن در پایان دوره اول به حداکثر مقدار خود می‌رسند. با رسیدن تدریجی نقاط قرار گرفته بر روی سطح قطعه به رطوبت حد انقباض و شروع دوره دوم، انقباض در این نقاط متوقف می‌شود و در ادامه فرآیند خشک شدن گرادیان انقباض و در تنش‌های خشک شدن کاهش می‌یابند. لازم به ذکر است، در دوره دوم فرآیند خشک شدن، نقاط موجود در قسمت‌های داخلی

انقباض قطعه متوقف و قطعه وارد دوره دوم فرآیند خشک شدن شده است. در شکل ۱۱-ج مطابق با نقطه D در شکل‌های ۶ تا ۱۰ می‌باشد. منحنی تغییرات دما (شکل ۶)، منحنی تغییرات میانگین رطوبت محتوی (شکل ۷)، منحنی تغییرات نرخ میانگین تبخیر سطحی (شکل ۸)، منحنی کرنش حجمی (شکل ۹) و منحنی تغییرات چگالی کل قطعه (شکل ۱۰)، حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی مطابقت مناسبی با یکدیگر در طول فرآیند خشک شدن دارند. این موضوع نشان دهنده صحت و قابل اعتماد بودن مدل ریاضی بسط داده شده در مدل‌سازی جنبه حرارتی (شکل‌های ۶ و ۸)، جنبه رطوبتی (شکل‌های ۷ و ۱۰) و جنبه مکانیکی (شکل‌های ۹ و ۱۰) می‌باشد. بنابراین مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای پیش‌بینی تنش‌های خشک شدن و کیفیت قطعه مورد استفاده قرار گیرد.

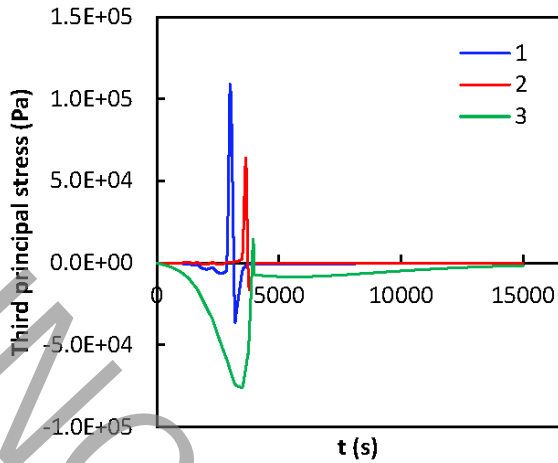
#### ۷- تنش‌های اصلی در خشک شدن پیوسته

سیر تکاملی تغییرات رطوبت و دما در فرآیند خشک شدن که به تدریج به عمق قطعه نفوذ می‌کند، باعث ایجاد گرادیان انقباض بین سطح و عمق می‌شود. انقباض غیر یکنواخت، باعث ایجاد تنش در فرآیند خشک شدن می‌شود. منحنی تغییرات رطوبت محتوی، دما و تنش‌های اصلی در ۳ نقطه نشان داده شده در شکل ۲، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۲ منحنی تغییرات رطوبت محتوی نشان داده شده است. رطوبت محتوی در نقطه ۱ که بیشتر از نقاط دیگر در معرض جریان هوا قرار دارد، به سرعت کاهش می‌یابد. نقاط ۲ و ۳ به ترتیب بعد از نقطه ۱ خشک می‌شوند. در شکل ۱۳ منحنی تغییرات دما نشان داده شده است. چهار دوره کلاسیک فرآیند خشک شدن در منحنی تغییرات دمای هر نقطه مشاهده می‌شود. دمای نقاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب افزایش می‌یابد و به دمای محفظه خشک کن می‌رسد. اختلاف دمای بین نقاط بسیار اندک می‌باشد که مشابه با نتایج مطالعات دیگر می‌باشد [۳۱].

با بررسی شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که گرادیان رطوبت محتوی و دما در بین چهار نقطه با افزایش زمان خشک شدن افزایش می‌یابد و در پایان دوره اول فرآیند خشک شدن به بیشینه مقدار خود می‌رسد. با

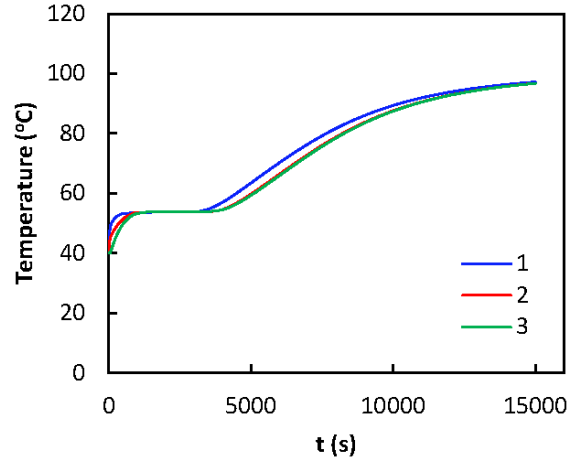


شکل ۱۲: تغییرات رطوبت محتوی در سه نقطه قطعه



شکل ۱۶: تغییرات تنش اصلی سوم در سه نقطه قطعه

قطعه که هنوز به رطوبت حد انقباض نرسیده‌اند، با از دست دادن رطوبت تمایل به انقباض دارند در حالی سطح قطعه خشک شده است. در شرایط خاص (گرادیان دما و رطوبت بالا، چسبندگی بالای خاک) این موضوع باعث برعکس شدن جهت تنش‌ها (تنش‌های فشاری در سطح و تنش‌های کششی در عمق) در دوره دوم می‌شود.

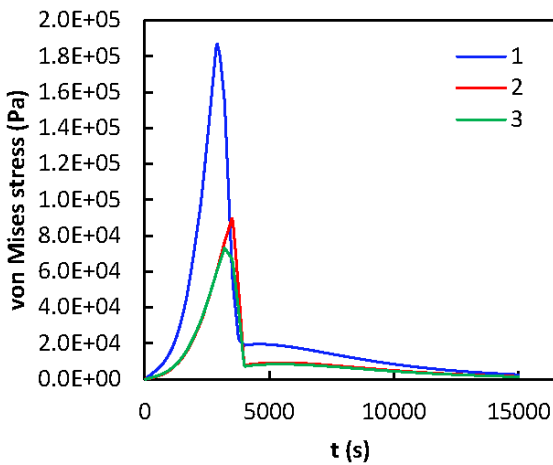


شکل ۱۳: تغییرات دما در سه نقطه قطعه

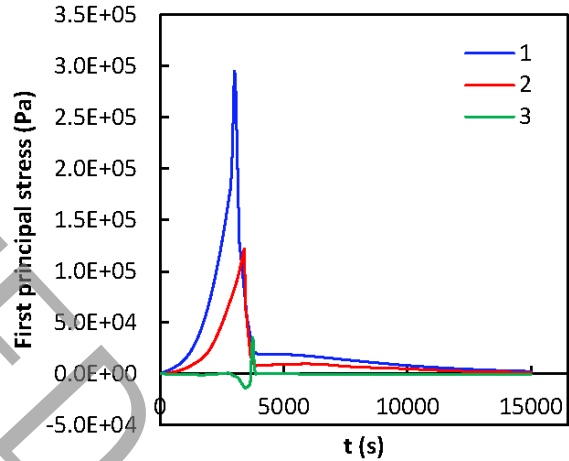
#### ۸- مقایسه تنش‌های حرارتی و رطوبتی در خشک شدن پیوسته

در شکل ۱۷ تنش‌های ون-میزز ناشی از توزیع غیریکنواخت رطوبت و در شکل ۱۸ تنش‌های ون-میزز ناشی از توزیع غیریکنواخت دما نشان داده شده است.

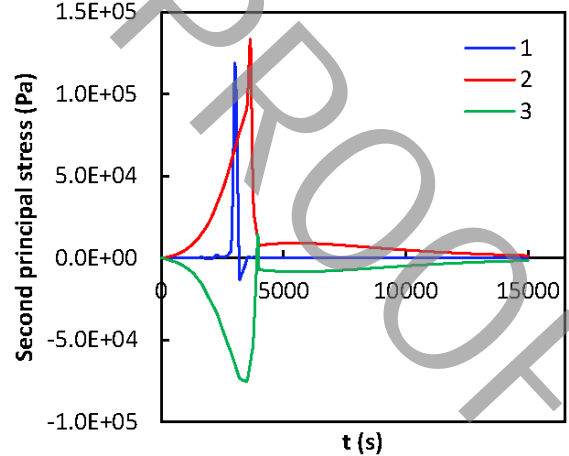
با توجه به ضریب انبساط حرارتی بسیار کوچک خاک رس نسبت به ضریب انبساط رطوبتی (جدول ۱) و همچنین گرادیان ناچیز دما بین نقاط مختلف قطعه (شکل ۱۳) نسبت به گرادیان رطوبت محتوی (شکل ۱۲) تنش‌های حرارتی بسیار کوچکتر از تنش‌های رطوبتی می‌باشند و می‌توان از مدل‌سازی تنش‌های حرارتی در شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن صرف نظر کرد. باید توجه کرد که پدیده انتقال حرارت در فرآیند خشک شدن نقش بسیار پر رنگی دارد و به شدت بر روی پدیده انتقال جرم اثر گذار می‌باشد. این رو به هیچ عنوان نمی‌توان از مدل‌سازی پدیده انتقال حرارت در فرآیند خشک شدن صرف نظر کرد.



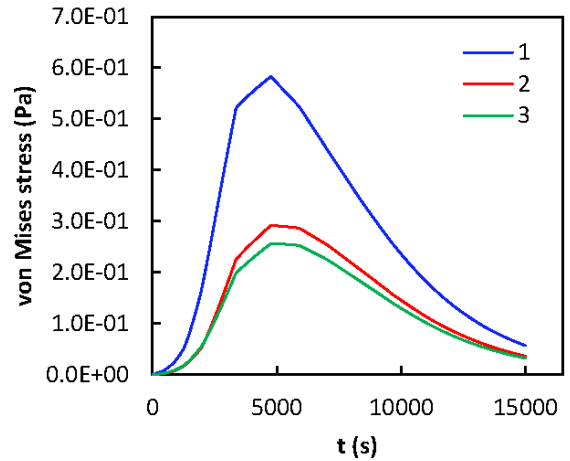
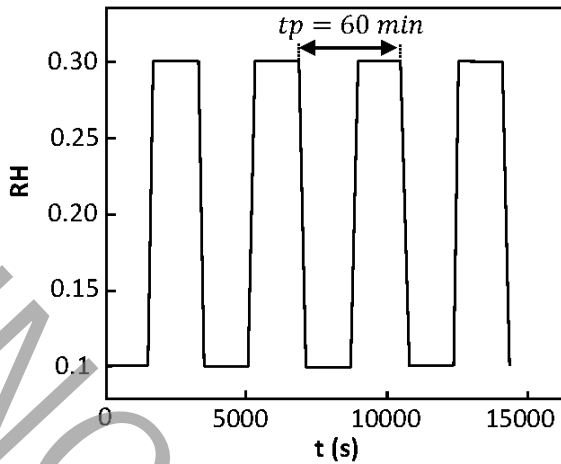
شکل ۱۷: تنش ون-میزز ناشی از انتقال رطوبت در سه نقطه



شکل ۱۴: تغییرات تنش اصلی اول در سه نقطه قطعه

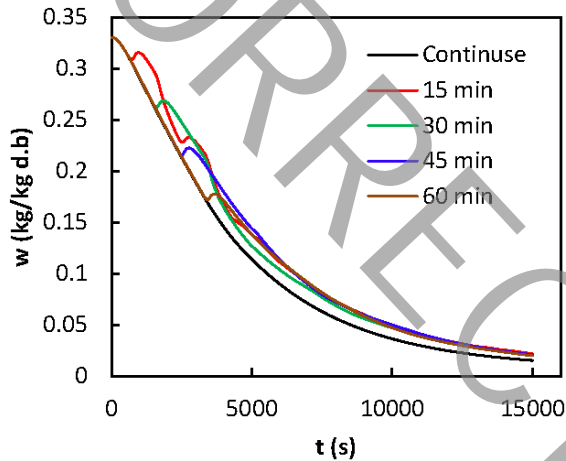


شکل ۱۵: تغییرات تنش اصلی دوم در سه نقطه قطعه

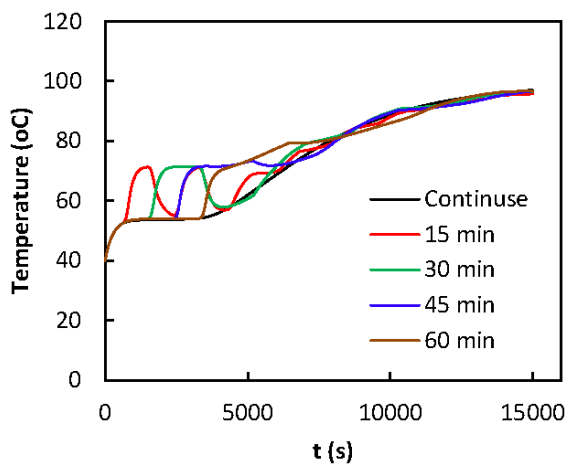


شکل ۱۸: تنش ون- میز ناشی از انتقال حرارت در سه نقطه

شکل ۱۹: تغییرات رطوبت نسبی محفظه خشک کن در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۶۰ دقیقه



شکل ۲۰: تغییرات رطوبت میانگین قطعه در خشک شدن تناوبی و پیوسته



شکل ۲۱: تغییرات دمای میانگین قطعه در خشک شدن تناوبی و پیوسته

### ۹- خشک شدن تناوبی

در این مطالعه فرآیند خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی بین مقادیر ۱۰٪ و ۳۰٪ با دوره تناوب ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفته است. مدت زمان ۵ دقیقه جهت کاهش/افزایش تدریجی رطوبت نسبی محفظه خشک کن در نظر گرفته شده است. منحنی تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی محفظه خشک کن با دوره تناوب ۶۰ دقیقه در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

با تغییر رطوبت نسبی محفظه خشک کن، بین مقادیر ۱۰٪ و ۳۰٪، دمای حباب تر بین دمای ۵۴ و ۷۱/۵ درجه سانتیگراد و دمای نقطه شبنم بین دمای ۴۵ و ۷۰ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند. منحنی تغییرات رطوبت و دمای میانگین قطعه در چهار حالت خشک شدن تناوبی با خشک شدن پیوسته به ترتیب در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مقایسه شده است. افزایش رطوبت نسبی با افزایش چگالی بخار آب در محیط، باعث کاهش نرخ تبخیر می‌شود. در صورتی که دمای سطح از دمای نقطه شبنم کمتر باشد بخار آب بر روی سطح تقطیر می‌شود. تقطیر بخار آب با دمای بالا بر روی سطح باعث افزایش دمای سطح می‌شود. با رسیدن دمای سطح به دمای نقطه شبنم متوقف، تقطیر بخار آب متوقف می‌شود.

از سوی دیگر افزایش رطوبت نسبی باعث افزایش دمای سطح به دلیل کاهش نرخ تبخیر و حرارت تبخیر می‌شود. افزایش دمای سطح باعث افزایش نرخ تبخیر می‌شود. این موضوع تا حدی کاهش نرخ تبخیر ناشی از افزایش چگالی بخار محیط را جبران می‌کند. نتایج مشابه در مطالعات دیگر گزارش شده است [۱۶]. زمان خشک شدن در خشک شدن تناوبی نسبت به خشک شدن پیوسته به مقدار اندکی افزایش یافته است.

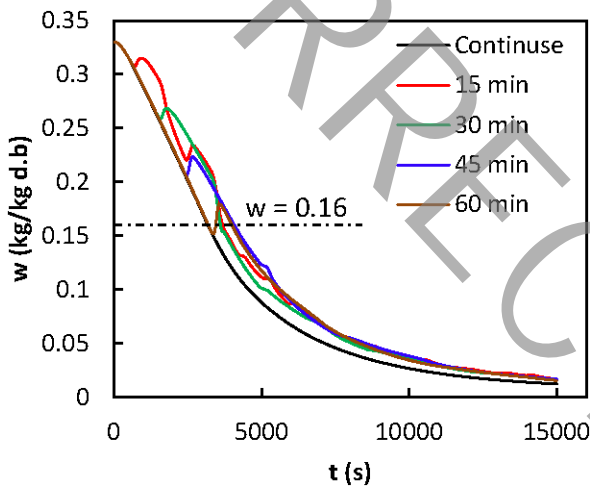
تنش بیشینه در فرآیند خشک شدن پیوسته مربوط به تنش اصلی اول در نقطه ۱ می‌باشد (شکل ۱۴). تأثیر دوره تناوب در خشک شدن تناوبی با تغییرات رطوبت نسبی بر روی مقدار تنش بیشینه در شکل ۲۲ نشان داده شده است. در دوره شوک (دوره‌ای که رطوبت نسبی محفظه خشک کن

۱۰٪ می‌باشد) شرایط خشک شدن سخت باعث ایجاد گرادیان رطوبت و گرادیان انقباض شدید در قطعه می‌شود. با بیشتر شدن گرادیان رطوبت از

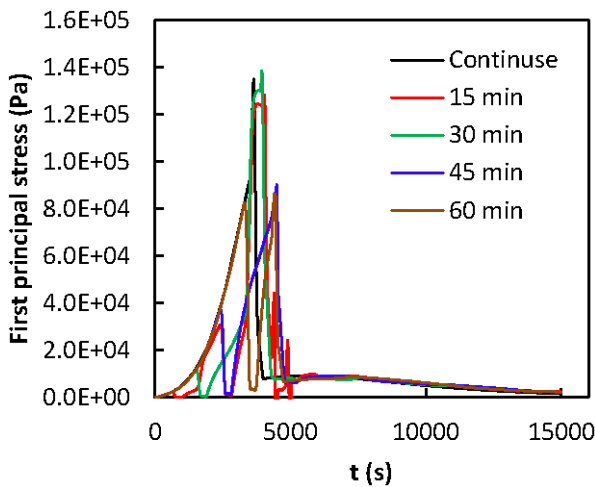
رطوبت و دما در نقطه ۱ در چهار حالت خشک شدن تناوبی با خشک شدن پیوسته به ترتیب در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ مقایسه شده است. در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۶۰ دقیقه تقطیر رطوبت بر روی سطح در پایان دوره اول فرآیند خشک باعث کاهش شدید گرادیان رطوبت، گرادیان انقباض و بیشینه تنش‌های خشک شدن گردیده است. در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۱۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه با توجه به دمای نقطه ۱ در زمان عبور از مرحله اول خشک شدن به مرحله دوم تقطیر رطوبت بر روی سطح قطعه صورت پذیرفته است و فقط نرخ تبخیر کاهش یافته است. از این رو کاهش گرادیان رطوبت، گرادیان انقباض و بیشینه تنش‌های خشک شدن نسبت به خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۶۰ دقیقه کمتر می‌باشد. در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۴۵ دقیقه مدت زمان نسبتاً طولانی قرار گرفتن نقطه ۱ در دمای ۷۱/۵ درجه سانتیگراد قبل از رسیدن به رطوبت بحرانی باعث ایجاد گرادیان رطوبت نسبتاً شدید در این نقطه شده است. به همین دلیل بیشینه تنش‌های خشک شدن، کاهش کمتری نسبت به سایر روش‌های تناوبی دارد.

حد معینی (رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت بحرانی) لوله‌های موئین شکسته می‌شوند. با شکسته شدن لوله‌های موئین دوره اول فرآیند خشک شدن به پایان می‌رسد و تنش‌های خشک شدن بیشینه می‌شود. افزایش رطوبت نسبی محیط در دوره استراحت با کاهش نرخ تبخیر و در شرایط خاص تقطیر رطوبت بر روی سطح باعث کاهش گرادیان رطوبت محتوی و گرادیان انقباض می‌شود. در نتیجه تنش‌های خشک شدن کاهش می‌یابد. با توجه به بیشینه شدن تنش‌های خشک شدن در پایان دوره اول، قبل از رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت بحرانی، قطعه باید وارد دوره استراحت شود. البته باید توجه داشت که با کاهش نرخ تبخیر رطوبت بحرانی کاهش می‌یابد [۳۳].

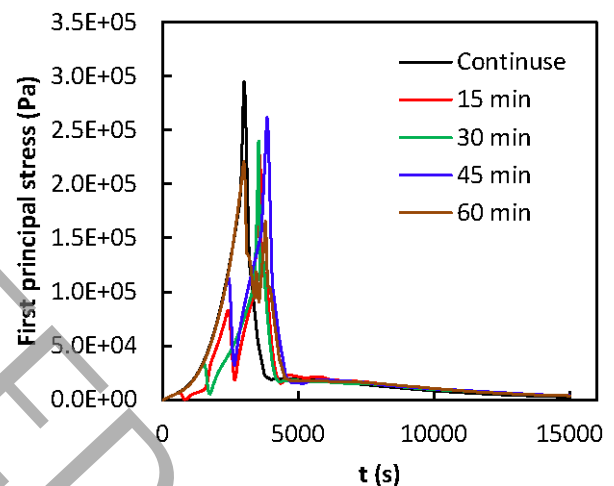
مقدار بیشینه تنش‌های خشک شدن به ترتیب در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۶۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و خشک شدن پیوسته افزایش می‌یابد. در روش خشک شدن تناوبی زمان وقوع تنش بیشینه به تأخیر می‌افتد. مقدار بیشینه تنش‌های خشک شدن به شرایط مهیا شده برای عبور محل تنش بیشینه (نقطه ۱) از دوره اول به دوره دوم بستگی دارد. منحنی تغییرات



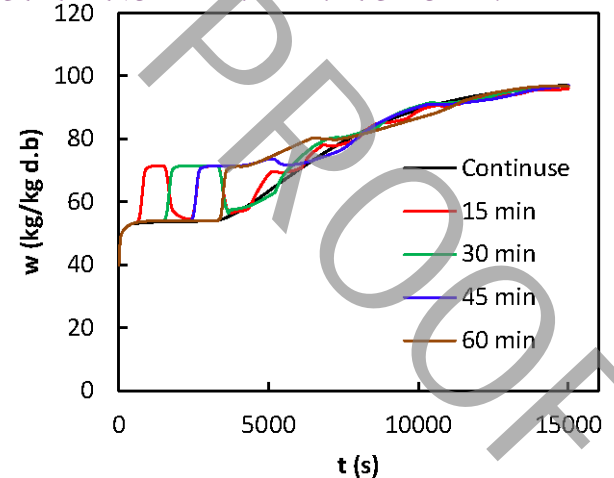
شکل ۲۳: تغییرات رطوبت میانگین قطعه در خشک شدن پیوسته و تناوبی



شکل ۲۴: تغییرات تنش اصلی اول در نقطه ۲ در روش‌های مختلف خشک کردن



شکل ۲۵: تغییرات تنش اصلی اول در نقطه ۱ در خشک شدن پیوسته و تناوبی



شکل ۲۶: تغییرات دمای میانگین قطعه در خشک شدن پیوسته و تناوبی

ترک برداشتن به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند زیرا امکان دارد کاهش تنش در یک نقطه همراه با افزایش تنش در نقطه دیگر باشد. این موضوع نشان دهنده اهمیت شبیه‌سازی و طراحی فرآیند خشک شدن می‌باشد.

خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۶۰ دقیقه نسبت به خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ نه تنها به لحاظ عملیاتی آسان‌تر می‌باشد، بلکه اثر کاهشی بیشتری نیز بر روی تنش‌های خشک شدن دارد.

در شکل ۲۵ منحنی تغییرات تنش اصلی اول در نقطه ۲ در چهار حالت خشک شدن تناوبی با حالت خشک شدن پیوسته مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۳۰ دقیقه تنش بیشینه افزایش یافته است. بیشینه تنش خشک شدن به ترتیب در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۳۰ دقیقه، خشک شدن پیوسته، خشک شدن تناوبی با دوره تناوب ۱۵، ۴۵ و ۶۰ دقیقه کاهش می‌یابد.

### ۱۰- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر اساس مدل ریاضی ارائه شده، میدان رطوبت، میدان دما و تنش‌های خشک شدن در یک هندسه سه‌بعدی در فرآیند خشک شدن پیوسته و تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت نسبی محفظه خشک کن پیش‌بینی شده است. بر اساس مطالعه انجام شده نتایج زیر گزارش می‌گردد.

- مطابقت مناسب متغیرهای متعدد تجربی و شبیه‌سازی از قبیل رطوبت، دما، نرخ تبخیر، چگالی و کرنش حجمی در طول فرآیند خشک شدن نشان دهنده صحت و دقت مدل ریاضی بسط داده شده در مدل‌سازی هر سه جنبه حرارتی، رطوبتی و مکانیکی فرآیند خشک شدن می‌باشد.
- تنش‌های خشک شدن در پایان دوره اول با شکسته شدن لوله‌های موئین به مقدار بیشینه خود می‌رسند.
- تنش‌های حرارتی ناشی از توزیع غیر یکنواخت دما در مقایسه با تنش‌های رطوبتی ناشی از توزیع غیر یکنواخت رطوبت بسیار ناچیز هستند و می‌توان از مدل‌سازی آن‌ها در فرآیند خشک شدن صرف نظر کرد.
- فرآیند خشک کردن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت در صورت طراحی مناسب یک راهکار مؤثر برای بهبود سینتیک خشک شدن، کاهش تنش‌های خشک شدن و افزایش کیفیت محصولات خشک شده بدون افزایش قابل توجه زمان خشک شدن می‌باشد.
- اثر فرآیند خشک شدن تناوبی بر روی مقادیر تنش در هر نقطه، تا حد زیادی به طرح فرآیند خشک کردن تناوبی و شرایط مهیا شده برای عبور آن نقطه از دوره اول خشک شدن به دوره دوم بستگی دارد. با توجه به آن که سینتیک خشک شدن به خواص ماده و ابعاد هندسی آن بستگی دارد نمی‌توان قانونی کلی برای انتخاب دوره تناوب مناسب بیان کرد.
- فرآیند خشک شدن تناوبی می‌تواند بر روی نقاط متفاوت، اثر متفاوتی داشته باشد. از این رو، نیاز به طرح‌های متفاوتی برای کاهش تنش بیشینه در نقاط متفاوت می‌باشد. بنابراین، در طرح‌ریزی فرآیند خشک شدن تناوبی باید نقطه هدف مشخص باشد و نقاط مستعد

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$C_p$	مساحت (J/kg.K)
$D_{eff}$	ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2/s$ )
$E$	مدول یانگ (Pa)
$F_m$	نرخ تبخیر ( $kg/m^2s$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W/m^2K$ )
$h_v$	گرمای نهان تبخیر (J/kg)
$k$	ضریب انتقال حرارت رسانشی ( $W/m.K$ )
$K$	مدول بالک
$P$	فشار (Pa)
$RH$	رطوبت نسبی
$t$	زمان (s)
$T$	دما ( $^{\circ}C$ )
$w$	رطوبت محتوی (kg/kg d.b)

#### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب انبساط حرارتی
$\beta$	ضریب انقباض
$\varepsilon$	کرنش
$\lambda, \mu$	ضرایب لام
$\nu$	ضریب پواسون
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	تنش (Pa)

#### زیرنویس

$\theta$	شرایط اولیه
$cr$	بحرانی
$eq$	تعادلی
$inf$	محیط
$l$	مایع
$s$	جامد
$sh$	حد انقباض
$surf$	سطح قطعه
$vs$	بخار اشباع

#### بالانویس

$l$	خاصیت ذاتی مربوط به آب
$s$	خاصیت ذاتی مربوط به خاک رس

- [14] Islam, Md Raisul, J. C. Ho, and A. S. Mujumdar. "Convective drying with time-varying heat input: simulation results." *Drying technology* 21.7 (2003): 1333-1356.
- [15] Kowalski, S. J., and A. Pawłowski. "Modeling of kinetics in stationary and intermittent drying." *Drying Technology* 28.8 (2010): 1023-1031.
- [16] Kowalski, S. J., and A. Pawłowski. "Drying of wet materials in intermittent conditions." *Drying Technology* 28.5 (2010): 636-643.
- [17] Kowalski, S. J., and A. Pawłowski. "Intermittent drying of initially saturated porous materials." *Chemical engineering science* 66.9 (2011): 1893-1905.
- [18] Kowalski, Stefan Jan, and Justyna Szadzińska. "Non-stationary drying of ceramic-like materials controlled through acoustic emission method." *Heat and Mass Transfer* 48.12 (2012): 2023-2032.
- [19] Manel, Ben Abdelhamid, et al. "Strain–Stress Formation During Stationary and Intermittent Drying of Deformable Media." *Drying Technology* 32.10 (2014): 1245-1255.
- [20] M. Heydari and Kh. Khalili. "Investigation on the effect of period of temperature variation in intermittent drying of clay." *Modares Mechanical Engineering* 17.8 (2017) 17–28. (in Persian فارسی)
- [21] Chemkhi, Saber, and Féthi Zagrouba. "Water diffusion coefficient in clay material from drying data." *Desalination* 185.1-3 (2005): 491-498.
- [22] Shokri, N., and D. Or. "What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage-2 evaporation from porous media?." *Water Resources Research* 47.9 (2011).
- [23] Hammouda, Imen, Kamel Jlassi, and Daoued Mihoubi. "Studying the effect of material initial conditions on drying induced stresses." *Heat and Mass Transfer* 54.2 (2018): 341-352.
- [24] Heydari, Mohsen., Khalili, Khalil. and Ahmadi-Brooghani, Seyed.Yousef. "Changes in the physicochemical characteristics of a ceramic paste during drying." *Comptes Rendus Mécanique* 343.7 (2015): 419-428.
- [25] Heydari, Mohsen., Khalili, Khalil. and Ahmadi-Brooghani, Seyed.Yousef. "More Comprehensive 3D Modeling of Clay-like Material Drying." *AICHE Journal* 10.1002/aic.16027 (2017).
- [26] Kowalski, S. J., *Thermomechanics of drying processes*. Springer Science & Business Media, Vol. 8, pp. 37-40, 2012.
- [27] Banaszak, Jacek, and Stefan J. Kowalski. "Drying induced stresses estimated on the base of elastic and viscoelastic models." *Chemical Engineering Journal* 86.1 (2002): 139-143.
- [28] Chemkhi, Saber, Wahbi Jomaa, and Fethi Zagrouba. "Application of a coupled thermo-hydro-mechanical
- [1] Liu, Xiang, and Duu-Jong Lee. "Some recent research and development in drying technologies: product perspective." *Drying Technology* 33.11 (2015): 1339-1349.
- [2] Khalili, Kh, and M. Heydari. "Numerical modeling of shrinkage of a ceramic material in drying process." *Modares Mechanical Engineering* 12.2 (2012): 58-71. (in Persian)
- [3] Musielak, G., and T. Śliwa. "Modeling and Numerical Simulation of Clays Cracking During Drying." *Drying Technology* 33.14 (2015): 1758-1767.
- [4] da Silva, Wilton Pereira, et al. "Water migration in clay slabs during drying: A three-dimensional numerical approach." *Ceramics International* 39.4 (2013): 4017-4030.
- [5] da Silva, Wilton Pereira, et al. "Drying of clay slabs: experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models." *Ceramics International* 39.7 (2013): 7911-7919.
- [6] Islam, Md Raisul, and A. S. Mujumdar. "Role of product shrinkage in drying rate predictions using a liquid diffusion model." *International communications in heat and mass transfer* 30.3 (2003): 391-400.
- [7] Couture, Frédéric, Stéphane Laurent, and Michel A. Roques. "Drying of two-phase media: Simulation with liquid pressure as driven force." *AICHE journal* 53.7 (2007): 1703-1717.
- [8] M. Heydari and Kh. Khalili. "Modeling Enhancement and Simulation of Distortion in Drying Process." *Modares Mechanical Engineering* 15.10 (2015) 291–301. (in Persian)
- [9] Ketelaars, A. A. J. *Drying Deformable Media, Kinetics, Shrinkage and Stress*. Ph.D. Thesis, University of Eindhoven, Eindhoven, 1993.
- [10] Hammouda, Imen, and Daoued Mihoubi. "Modeling of thermo-hydro-viscoelastic behavior of a partially saturated ceramic material during drying." *Drying Technology* 32.10 (2014): 1219–1230.
- [11] Vasić, Miloš, Željko Grbavčić, and Zagorka Radojević. "Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 76 (2014): 33-44.
- [12] Khalili, K., M. Heydari, and M. S. Khalili. "Drying Clay Bricks with Variable Young's Modulus." *Procedia Technology* 12 (2014): 382-387.
- [13] Khalili, K. and M. Heydari. "Studying the effect of part thickness on cracking during drying process." *Modares Mechanical Engineering* 12.3 (2012): 103-116. (in Persian)

- [31] Kowalski, S. J., G. Musielak, and J. Banaszak. "Experimental validation of the heat and mass transfer model for convective drying." *Drying Technology* 25.1 (2007): 107-121.
- [32] Kowalski, Stefan Jan, Jacek Banaszak, and Andrzej Rybicki. "Plasticity in materials exposed to drying." *Chemical Engineering Science* 65.18 (2010): 5105-5116.
- [33] Mujumdar, A.S. and Devahaġtin, S. Fundamental principles of drying. *Exergex, Brossard, Canada*, 2000.
- model to simulate the drying of nonsaturated porous media." *Drying technology* 27.7-8 (2009): 842-850.
- [29] Hammouda, I., and D. Mihoubi. "Modelling of drying induced stress of clay: elastic and viscoelastic behaviours." *Mechanics of Time-Dependent Materials* 18.1 (2014): 97-111.
- [30] Khalfaoui, K., S. Chemkhi, and F. Zagrouba. "Modeling and stress analysis during drying of a deformable and saturated porous medium." *Drying Technology* 31.10 (2013): 1124-1137.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

M. Heydari, K. Khalili, S. Y. Ahmadi-Brooghani, Relative Humidity Period Influence on Drying Induced Stresses in Intermittent Drying of Clay, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-16.

DOI:

UNCORRECTED PROOF