



بررسی تأثیر دوره تناوب تغییر دما در خشک شدن تناوبی خاک رس

محسن حیدری¹، خلیل خلیلی^{2*}، سید یوسف احمدی بروغنی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استاد تمام، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 9717431396، kkhali@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 خرداد 1396

پذیرش: 11 تیر 1396

ارائه در سایت: 14 مرداد 1396

کلید واژگان:

خشک کردن تناوبی

دوره تناوب

تنش‌های خشک شدن

سینتیک خشک شدن

چکیده

خشک شدن یکی از فرایندهای پرمصرف انرژی است که در صنایع بسیاری مانند سرامیک، چینی و ساختمان نقش پررنگی دارد. محصولات این صنایع اغلب دارای هندسه سه بعدی پیچیده است. تغییر شکل غیریکنواخت محصول در فرایند خشک شدن می‌تواند سبب ایجاد ترک و غیرقابل استفاده بودن محصولات خشک شده شود. خشک کردن تناوبی یک راه کار مؤثر برای بهبود سینتیک خشک شدن و کیفیت قطعات خشک شده است. تعیین زمان شروع تناوب، دوره و دامنه تناوب چالش‌های اصلی در فرایند خشک شدن تناوبی است. هدف این مقاله بررسی تأثیر دوره تناوب تغییر دما در خشک شدن تناوبی خمیر رسی بر سینتیک خشک شدن و تنش‌های خشک شدن است. فرایند خشک شدن در حالت پیوسته و تناوبی به صورت سه بعدی مدل سازی و به کمک روش المان محدود شبیه سازی شده است. تنش‌های حرارتی و رطوبتی مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابقت مناسب متغیرهای متعدد تجربی و شبیه سازی نشان دهنده صحت و درک کامل فرایند خشک شدن توسط مدل ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که فرکانس تناوب به شدت بر تنش‌های خشک شدن مؤثر است. تغییر دوره تناوب بسته به خواص ماده و ابعاد قطعه می‌تواند سبب افزایش/ کاهش تنش‌های خشک شدن شود. خشک شدن تناوبی اثر متفاوتی بر نقاط مختلف قطعه دارد. از این رو نقاط مستعد ترک برداشتن باید به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. تنش‌های حرارتی در مقایسه با تنش‌های رطوبتی بسیار ناچیز است و می‌توان از مدل سازی آن‌ها در فرایند خشک شدن صرف نظر کرد.

Investigation on the effect of period of temperature variation in intermittent drying of clay

Mohsen Heydari¹, Khalil Khalili^{1*}, Seyed Yousef Ahmadi Brooghani¹

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

* P.O.B. 9717431396 Birjand, Iran, kkhali@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 May 2017
Accepted 02 July 2017
Available Online 05 August 2017

Keywords:
Intermittent drying
Period
drying stress
drying kinetic

ABSTRACT

Drying process is one of the intensive energy operations in many industries such as tile and clay brick manufacturing industries. Cracking as a result of non-uniform deformation is one of the defects that may occur during drying making the dried products useless. Intermittent drying is an effective strategy for improving the drying kinetics and the quality of the dried parts. Proper selection of intermittent drying parameters including the period, amplitude and the start time of variation are the main challenge in the drying. The purpose of this paper is to examine the effect of the period of temperature variation on the drying kinetics and induced stresses in the intermittent drying of clay-like material. 3D modeling and simulation of continuous and intermittent drying has been done by using finite element method. Moisture and thermal stresses are compared with each other. Good agreement between experiments and the simulation results revealed that the model developed is valid and accurate. Simulation results show that the stresses induced by drying are heavily influenced by the frequency of variation. The change of the Frequency variations depending on the material properties and sample dimensions can decrease/increase the drying induced stresses. Intermittent drying has a different effect on the different points of the samples. Hence, the points susceptible to crack formation must be investigated simultaneously. The thermal stresses are negligible compared to the moisture stresses and can be neglected in modeling drying.

1- مقدمه

(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 [1]. از سوی دیگر در خشک شدن با نرخ پایین تنش‌های کوچکتری تولید می‌شود اما زمان خشک شدن افزایش می‌یابد. خشک کردن تناوبی یکی از روش‌های نوین در فرایند خشک کردن است

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 است. خشک کردن در حالت پیوسته هر چند که به لحاظ عملیاتی آسان است اما بازده پایینی دارد. خشک کردن در شرایط سخت

Please cite this article using:

M. Heydari, Kh. Khalili, S. Y. Ahmadi Brooghani, Investigation on the effect of period of temperature variation in intermittent drying of clay, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 17-28, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مؤثر است [16]. کرنش به همراه رطوبت محتوی و دما سه متغیر اصلی کوپل‌کننده دستگاه معادلات فرایند خشک شدن است. در این مطالعه برای افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی کرنش‌های رطوبتی، حرارتی و مکانیکی در نظر گرفته شده است. در ادامه به بررسی مطالعات انجام شده در روش خشک شدن تناوبی خاک رس پرداخته می‌شود.

کووالسکی و پاولوسکی [17] با صرف نظر از انقباض قطعه و تنش‌های خشک شدن به مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند 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 بر سینتیک خشک شدن مطالعه شده است. در خشک شدن تناوبی تا یک ساعت مانده به زمان خشک شدن بحرانی دما و رطوبت ثابت نگه داشته می‌شود و در ادامه دما یا رطوبت به صورت سینوسی با دوره تناوب دو ساعت تغییر می‌کند. کیفیت قطعه در خشک شدن تناوبی در هر دو حالت بدون افزایش قابل توجه زمان خشک شدن بهبود یافته است. کووالسکی و پاولوسکی [18] با انجام سه سری آزمایش به بررسی تجربی کیفیت محصولات خشک شده رسی در روش خشک شدن تناوبی پرداخته‌اند. کیفیت محصولات در فرایند خشک شدن هم به صورت مشاهده مستقیم و هم با استفاده از تست نشر آوایی 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 دما با دوره تناوب دو ساعت و خشک شدن تناوبی با تغییرات سینوسی رطوبت با دوره تناوب یک ساعت مورد بررسی قرار گرفته است. کیفیت محصولات خشک شده به ترتیب در روش خشک شدن پیوسته، خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما و خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت افزایش می‌یابد.

کووالسکی و پاولوسکی [19] با انجام آزمایشات متعدد به بررسی کیفیت محصولات خشک شده خاک رس در روش خشک شدن پیوسته و تناوبی با تغییرات سینوسی دما با دوره تناوب 2 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. بازده انرژی در روش خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت، خشک شدن پیوسته و خشک شدن با تغییرات دوره‌ای دما به ترتیب افزایش می‌یابد.

کوالسکی و سادزینسکا [20] به بررسی تجربی اثر فرکانس و دامنه گرمایش، سرمایش و رطوبت‌زنی بر کیفیت محصولات در روش خشک شدن تناوبی پرداخته‌اند. مدت انجام این آزمایشات 360 دقیقه است که در 120 دقیقه نخست فرایند خشک شدن به صورت پیوسته صورت می‌پذیرد. کوالسکی و سادزینسکا مشاهده کردند که با افزایش فرکانس گرمایش و رطوبت‌زنی کیفیت قطعات خشک شده بهبود می‌یابد. افزایش دامنه تناوب در خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما اثری بر نرخ خشک شدن و کیفیت قطعات خشک شده ندارد، اما در خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای رطوبت سبب بهبود قابل توجه کیفیت قطعات خشک شده می‌شود.

مانل و همکاران [21] با مدل‌سازی و شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما در حالت دوبعدی به بررسی اثر فرکانس و زمان شروع تغییرات بر مقدار تنش‌های برشی پرداخته‌اند. افزایش فرکانس و کاهش زمان شروع تغییرات سبب کاهش تنش برشی بیشینه می‌شود، اما از سوی

که امکان خشک کردن با نرخ بالا همراه با حفظ کیفیت محصول را فراهم می‌کند. در این روش با تغییر تناوب 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 سبب افزایش نرخ انتقال رطوبت از عمق به سطح می‌شود به عبارت دیگر باعث بهبود سینتیک خشک شدن می‌شود، اما از سوی دیگر با ایجاد غیریکنواختی شدید در توزیع رطوبت سبب افزایش تنش‌های خشک شدن می‌شود. از این رو به منظور پیشگیری از ترک برداشتن محصول پس 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 طرح‌ریزی مناسب در مقایسه با خشک شدن پیوسته (خشک شدن با نرخ بیشینه در کل فرایند خشک شدن) بدون افزایش قابل توجه زمان خشک شدن، تنش‌های خشک شدن کاهش قابل توجه‌ای می‌یابد، همچنین با توجه به کاهش دما در دوره استراحت مصرف انرژی کاهش می‌یابد [2]. تعیین دوره، دامنه و زمان شروع تناوب، چالش‌های اصلی در فرایند خشک شدن تناوبی است.

فرایند خشک شدن از سه جنبه حرارتی، رطوبتی و مکانیکی تشکیل شده که به شدت به یکدیگر وابسته است. تبخیر رطوبت از سطح سبب ایجاد گرادیان رطوبت و گرادیان دما در قطعه می‌شود. گرادیان رطوبت و دما با ایجاد تغییر شکل غیریکنواخت به ترتیب سبب ایجاد تنش‌های رطوبتی و حرارتی می‌شوند. تنش‌های خشک شدن سبب ایجاد کرنش‌های مکانیکی می‌شوند. تغییر رطوبت و دما سبب تغییر پیوسته خواص فیزیکی و مکانیکی ماده در طول فرایند خشک شدن می‌شود [3]. در بسیاری از مدل‌های خشک شدن از جنبه حرارتی [4]، مکانیکی [5] یا هر دوی آن‌ها به صورت جزئی یا کلی صرف نظر شده است.

مدل موئینگی [6] و مدل نفوذ [7] رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی فرایند خشک شدن است. تفاوت روش‌های مدل‌سازی فرایند خشک شدن اغلب در روش مدل‌سازی فرایند انتقال جرم است. نیروی محرک رطوبت در مدل نفوذ گرادیان رطوبت از عمق قطعه به سطوح تبادل است. مدل نفوذ به دلیل سادگی و دقت بالا یکی از کاربردی‌ترین روش‌های مدل‌سازی فرایند خشک شدن که مورد استقبال مهندسين قرار گرفته است [8,9].

در نظر گرفتن تغییرات خواص ماده و شناسایی روابط مناسب جهت بیان این تغییرات یکی از مشکلات اصلی در شبیه‌سازی فرایند خشک شدن است [10]. این موضوع سبب شده است که در بسیاری از مدل‌های خشک شدن برای بیان خواص ماده از مقادیر ثابت استفاده شود [11,12].

انقباض/انبساط قطعه در طول فرایند خشک شدن از مجموع کرنش‌های رطوبتی، حرارتی و مکانیکی حاصل می‌شود. در نظر نگرفتن انقباض [7] و یا در نظر گرفتن انقباض به صورت ایده‌آل [13] فرضیات ساده‌سازی رایج در مدل‌سازی فرایند خشک شدن است. 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 [14]. گرادیان انقباض/انبساط عامل ایجاد تنش در فرایند خشک شدن است. انقباض/انبساط با تغییر سطح قطعه [15] و خواص ماده مانند چگالی و ضریب نفوذ بر سینتیک خشک شدن

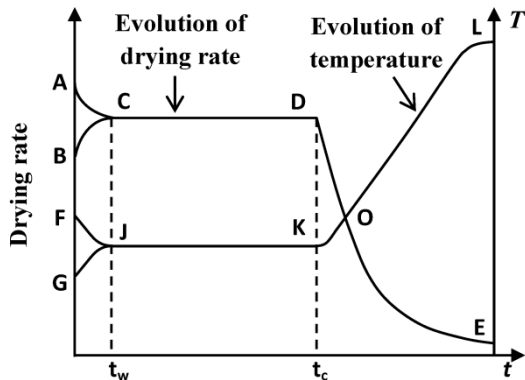


Fig. 1 Classical periods of drying process

شکل 1 دوره‌های کلاسیک فرایند خشک شدن

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 و معادله گرما بیان می‌شوند. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده معادلات انتقال جرم و انتقال حرارت به ترتیب به صورت روابط (2,1) است.

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

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

با توجه به شبه استاتیکی بودن فرایند خشک شدن و صرف نظر کردن از فاز گازی و اثر گرانش، معادله مومنوم به صورت رابطه (3) در نظر گرفته شده است [24].

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

کرنش رطوبتی (ϵ_w) و کرنش حرارتی (ϵ_T) به ترتیب متناسب با تغییر رطوبت و دما و به صورت روابط (5,4) است.

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

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

α و β به ترتیب ضریب انبساط حرارتی و رطوبتی است. با کم کردن کرنش حرارتی و کرنش رطوبتی از کرنش کل، کرنش مکانیکی به صورت رابطه (6) حاصل می‌شود.

$$\epsilon_M = \epsilon - \epsilon_w - \epsilon_T \quad (6)$$

رابطه تنش و کرنش به کمک قانون هوک تعمیم یافته و به صورت رابطه (7) بیان می‌شود.

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

در رابطه بالا K ، مدول بالک، μ و λ ضرایب لام است که برحسب مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (ν) به صورت روابط (9,8) بیان می‌شوند.

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

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

4- شرایط اولیه و شرایط مرزی

دما و رطوبت محتوی در ابتدا یکنواخت است و به صورت رابطه (10) بیان می‌شوند.

$$t = 0, \quad T = T_0, \quad w = w_0 \quad (10)$$

نرخ انتقال جرم و انتقال حرارت بر سطوح تبادل به ترتیب با روابط (12,11) بیان می‌شوند.

$$-D_{\text{eff}} \nabla w = F_m \quad (11)$$

$$-k \nabla T = h(T_s - T_{\text{inf}}) - h_v F_m \quad (12)$$

دیگر زمان خشک شدن و مقدار مصرف انرژی افزایش می‌یابد. صرف نظر کردن از انقباض، استفاده از پارامترهای ثابت و هندسه‌های ساده شده یک بعدی، دو بعدی و تقارن محور فرضیات ساده‌سازی رایج در مدل‌های خشک شدن است. ساده‌سازی معادلات خشک شدن دلیل اصلی استفاده از این فرضیات است.

در مطالعه حاضر هر سه جنبه رطوبتی، حرارتی و مکانیکی در فرایند خشک شدن به صورت هم‌زمان مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. کرنش‌های رطوبتی، حرارتی و مکانیکی و همچنین تغییر پارامترها نسبت به دما و رطوبت در مدل‌سازی لحاظ شده است. اعتبارسنجی نتایج به کمک مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده است. سینتیک خشک شدن و تنش‌های اصلی در نقاط مختلف قطعه ارزیابی شده است.

براساس مطالعات بررسی شده نوآوری مطالعه حاضر مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند خشک کردن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما در حالت سه‌بعدی و بررسی تأثیر دوره تناوب (t_c) بر مقدار تنش اصلی در نقاط مستعد ترک برداشتن است، همچنین تنش‌های رطوبتی (ناشی از کرنش رطوبتی) و تنش‌های حرارتی (ناشی از کرنش حرارتی) به صورت مجزا مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

2- دوره‌های خشک شدن

فرایند خشک شدن به طور کلاسیک از چهار دوره تشکیل شده است که عبارت از دوره پیشگرم، دوره اول، دوره گذار و دوره دوم (شکل 1) است. دوره اول و دوره دوم به ترتیب دوره خشک شدن با نرخ ثابت و دوره خشک شدن با نرخ نزولی نیز نامیده می‌شوند. در آغاز فرایند خشک شدن قطعه با دمای اولیه T_0 ، تا رسیدن به دمای حباب‌تر (T_w) گرم/سرد می‌شود (F-I/G-J). هم‌زمان با گرم/سرد شدن قطعه نرخ تبخیر از سطح قطعه نیز افزایش/کاهش می‌یابد (A-C/B-C). این دوره دوره پیشگرم نامیده می‌شود. با رسیدن دمای سطح قطعه به دمای حباب‌تر دوره اول شروع می‌شود. در دوره اول نرخ تبخیر ثابت (C-D) و دمای سطح برابر با دمای حباب‌تر است (J-K). در این دوره رطوبت از عمق قطعه به وسیله مکانیزم نفوذ به سطوح تبادل مهاجرت می‌کند و در آنجا تبخیر می‌شود [22]. رطوبت قطعه در پایان دوره اول رطوبت بحرانی (w_{cp}) نامیده می‌شود. در رطوبت بحرانی نرخ مهاجرت رطوبت از عمق قطعه به سطح قطعه کمتر از نرخ تبخیر رطوبت بر سطح قطعه می‌شود و لوله‌های موئین به ترتیب از بزرگ به کوچک شکسته می‌شوند [23]. با شکسته شدن نخستین لوله موئین دوره گذار آغاز و با شکسته شدن لوله موئین دوره گذار به اتمام می‌رسد (D-O) و دوره دوم فرایند خشک شدن شروع می‌شود و تا رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت تعادلی ادامه (w_{eq}) می‌یابد (O-E). در دوره گذار (K-O) و دوره دوم (O-L) دمای سطح به تدریج افزایش می‌یابد و به دمای خشک‌کن می‌رسد.

با تحلیل دقیق توزیع رطوبت و دما در فرایند خشک شدن مشاهده شده است که بیشترین غیریکنواختی در پایان دوره اول است [16]. از این رو احتمال ترک برداشتن قطعه در پایان دوره اول بسیار زیاد است [21,8].

3- مدل ریاضی

تهیه یک مدل ریاضی مناسب یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی عددی است. ویژگی مدل ریاضی ارائه شده در نظر گرفتن هر سه جنبه رطوبتی، حرارتی و مکانیکی فرایند خشک شدن به صورت هم‌زمان است. انقباض ماده از طریق رفتار مکانیکی ماده در نظر گرفته شده است.

است (شکل 3). براساس منحنی توزیع اندازه ذرات نمونه مطالعاتی از 19% رس، 69% لای و 10% لوم تشکیل شده است. رفتار خاک‌های ریزدانه به میزان آب داخل مجموعه بستگی دارد. خاک‌های ریزدانه برحسب درصد رطوبت محتوی می‌توانند در یکی از حالت‌های جامد، نیمه‌جامد، خمیری و مایع دسته‌بندی شوند. بر این اساس حد روانی مرز بین حالت خمیری و حالت روانی خاک، حد خمیری مرز بین حالت خمیری و نیمه‌جامد و حد انقباض مرز بین حالت نیمه‌جامد و جامد تعریف می‌شود. حد روانی و حد خمیری و حد انقباض حدود اتربرگ نامیده می‌شوند. حد روانی و حد خمیری نمونه مطالعاتی در اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان خراسان رضوی و حد انقباض (w_{sh}) در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان تهران اندازه‌گیری شد (جدول 3).

جدول 2 پارامترهای متغیر مورد استفاده در مدل سازی

Table 2 Employed variable parameters in modeling

مقدار / رابطه	پارامتر
$\phi_1 = \frac{\rho_s^s w}{\rho_l^1 + \rho_s^s w}$	کسر حجمی آب
$C_{ps} = 2000 \text{ (J/kg)}$	گرمای ویژه خاک
$C_{pl} = 4220 \text{ (J/kg)}$	گرمای ویژه آب
$C_p = \frac{w C_{pl} + C_{ps}}{w + 1} \text{ (J/kg)}$	گرمای ویژه کل
$\rho = \rho_s^s + \frac{w \rho_s^s}{\rho_l^1 + w \rho_s^s} (\rho_l^1 - \rho_s^s) \text{ (kg / m}^3\text{)}$	چگالی کل در دوره پیشگرم و دوره اول
$\rho = \rho_s^s + \frac{w_{cr} \rho_s^s}{\rho_l^1 + w_{cr} \rho_s^s} (\rho_l^1 - \rho_s^s) + (w - w_{cr}) \cdot (1 - \phi_1) \rho_s^s \text{ (kg / m}^3\text{)}$	چگالی کل در دوره گذار و دوره دوم
$E = 0.96 \exp\left(\frac{1}{0.061 + 1.735w^{4.818}}\right) \text{ (Pa)}$ $w_{eq} = 0.12 \text{ (kg/kg d. b)}$	مدول یانگ [27]
$D_{eff} = 5.61e^{-9} \left(7.5 + \exp\left(\frac{44w}{1.6 + w}\right) \times \exp\left(-\frac{510}{T}\right)\right) \left(\frac{m^2}{s}\right)$	ضریب نفوذ مؤثر [28]
$F_m = \begin{cases} \dot{m} & \text{for } w > w_{cr} \\ \dot{m} * \frac{w - w_{eq}}{w_{cr} - w_{eq}} & \text{for } w < w_{cr} \end{cases}$	نرخ تبخیر رطوبت [29,17]
$\dot{m} = 13 * 10^{-3} * (C_{inf} - C_{surf}) \left(\frac{kg}{m^2 s}\right)$ $C_{inf} = \frac{0.622RH \cdot P_{vs,inf}}{P_{atm} - RH \cdot P_{vs,inf}}$ $C_{surf} = \frac{0.622a_w \cdot P_{vs,surf}}{P_{atm} - a_w \cdot P_{vs,surf}}$ $P_{vs,inf} = \exp\left(23.3265 - \frac{3802.7}{T_{inf}} - \left(\frac{472.68}{T_{inf}}\right)^2\right)$ $P_{vs,surf} = \exp\left(23.3265 - \frac{3802.7}{T_{surf}} - \left(\frac{472.68}{T_{surf}}\right)^2\right)$	

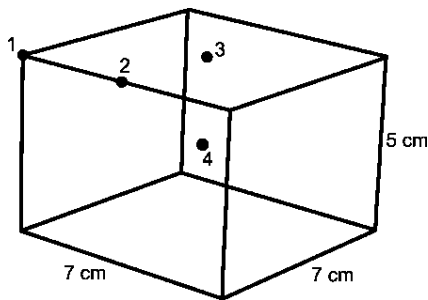


Fig. 2 Employed geometry in simulation

شکل 2 هندسه مورد استفاده در شبیه‌سازی

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 است. در فرایند خشک شدن تغییر شکل ماده به دلیل خارج شدن رطوبت از ماده است و هیچ‌گونه نیروی خارجی به ماده اعمال نمی‌شود؛ بنابراین در سطوح تبادل رابطه (13) برقرار است.

$$\sigma \times n = 0 \quad (13)$$

مقادیر پارامترهای ثابت مورد استفاده در مدل سازی در جدول 1 و مقادیر پارامترهای متغیر در جدول 2 ارائه شده است.

5- شبیه‌سازی

دستگاه معادلات دیفرانسیل فرایند خشک شدن به کمک روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار کامسول حل شده است. روش گالرکین به عنوان یک روش باقی‌مانده وزنی در گسسته‌سازی مدل ریاضی فرایند خشک شدن استفاده شده است. فرایند خشک شدن خاک رس در یک قطعه مکعبی به ابعاد 7.5 × 7.5 × 7.0 cm شبیه‌سازی شده است (شکل 2). در مش‌بندی قطعه از تکنیک مش‌زنی آزاد و 11342 المان هرمی چهار وجهی استفاده شده است. در شبیه‌سازی فرایند خشک شدن به دلیل رفتار انقباض فرایند خشک شدن و تغییر ابعاد و مکان سطوح تبادل از دیدگاه ALE¹ استفاده شده است. رطوبت اولیه و دمای اولیه قطعه در شبیه‌سازی برابر با مقادیر مورد استفاده در آزمایش تجربی در نظر گرفته شده است ($w_0 = 0.33, T_0 = 26^\circ\text{C}$). نتایج شبیه‌سازی با گام زمانی 50 ثانیه استخراج شده است.

6- اعتبارسنجی مدل و نتایج شبیه‌سازی

6-1- 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 در فرایند خشک شدن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بر سینتیک خشک شدن و رفتار مهندسی مواد متخلخل تأثیرگذار است [23].

توزیع اندازه ذرات نمونه مطالعاتی به کمک آزمایش دانه‌بندی در اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان خراسان رضوی اندازه‌گیری شده

جدول 1 پارامترهای ثابت مورد استفاده در مدل سازی

Table 1 Employed constant parameters in modeling

مقدار	پارامتر
$w_0 = 0.33$	رطوبت محتوی اولیه
$w_{cr} = 0.12$	رطوبت بحرانی
$w_{eq} = 0.01$	رطوبت تعادلی
$T_0 = 26^\circ\text{C}$	دمای اولیه قطعه
$T_w = 52^\circ\text{C}$	دمای حباب تر
$\rho_s^s = 2600 \text{ (kg / m}^3\text{)}$	چگالی ذاتی خاک
$\rho_l^1 = 1000 \text{ (kg / m}^3\text{)}$	چگالی ذاتی آب
$k_s = 1 \text{ (W/m K)}$	ضریب رسانایی حرارتی خاک
$k_l = 0.597 \text{ (W/m K)}$	ضریب رسانایی حرارتی آب
$\alpha = 3 \cdot 10^{-8}$	ضریب انبساط حرارتی [25]
$\beta = 0.3$	ضریب انبساط رطوبتی [26]
$\nu = 0.4$	ضریب پواسون

¹ Arbitrary Lagrangian Eulerian

3-6- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل به کمک مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی فرایند خشک شدن پیوسته انجام شده است. خاک رس با مقدار مشخص آب برای انجام آزمایش تجربی مخلوط شد تا خمیر رسی با قابلیت شکل‌پذیری و رطوبت اولیه 0.33% ساخته شود. خمیر رسی برای همگن شدن به مدت 48 ساعت درون یک محفظه آب‌بندی نگهداری می‌شود. برای تهیه نمونه آزمایش از یک قالب به فرم مکعب مستطیل با ابعاد 7.07×5 cm استفاده شد. پس از قالب‌گیری و خارج کردن نمونه از داخل قالب نمونه روی نگه‌دارنده در داخل محفظه خشک‌کن که دمای آن 100°C و رطوبت نسبی آن 10% است، قرار داده شد. دمای اولیه نمونه در هنگام خروج از قالب 26°C است. دما و رطوبت نسبی را در داخل محفظه خشک‌کن در مدت زمان فرایند خشک شدن سیستم کنترلی ثابت نگه می‌دارد. تبخیر شدن رطوبت از سطح قطعه سبب افزایش رطوبت نسبی در داخل محفظه خشک‌کن می‌شود. رطوبت نسبی در داخل محفظه خشک‌کن به وسیله وزش هوای محیط به داخل محفظه خشک‌کن ثابت نگه داشته می‌شود. تغییرات وزن قطعه در طول فرایند خشک شدن توسط ترازوی دیجیتال هر 10s یکبار ثبت گردید، همچنین به منظور اندازه‌گیری تغییرات سطح نمونه هر 15 دقیقه یکبار از نمونه عکس برداری شد.

تغییرات جرم و تغییرات سطح قطعه، داده‌های خروجی از آزمایش خشک شدن است. با تحلیل داده‌های بالا، رطوبت محتوی، نرخ تبخیر، کرنش حجمی و چگالی قطعه محاسبه می‌شود. در شکل‌های 5-8 به ترتیب منحنی‌های تغییرات میانگین رطوبت محتوی، نرخ تبخیر سطحی، کرنش حجمی و چگالی قطعه، حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. زمان خشک شدن قطعه در حدود 12hr و کرنش حجمی قطعه در حدود 17% است.

دمای نقطه شبنم و دمای حباب تر در شرایط آزمایش خشک شدن به ترتیب 46°C و 52°C است. با توجه به کمتر بودن دمای اولیه قطعه (26°C) از دمای نقطه شبنم، در شروع فرایند خشک شدن بخار آب موجود در محفظه خشک‌کن بر سطح قطعه تقطیر می‌شود (شار منفی تبخیر). تقطیر بخار آب با دمای بالا و اختلاف دمای سطح قطعه با محیط خشک‌کن سبب افزایش

جدول 3 حدود اتربرگ

Table 3 Atterberg limits

حدود اتربرگ	رطوبت محتوی
حد روانی	26%
حد خمیری	19%
حد انقباض	12%

جدول 4 آنالیز شیمیایی خاک رس

Table 4 Chemical analysis of the clay

عنصر	%
Si	59.5
Ca	7.83
Mg	4.20
Fe	4.50
Al	7.80
Ti, Mn	<1
L.O.I	9.80

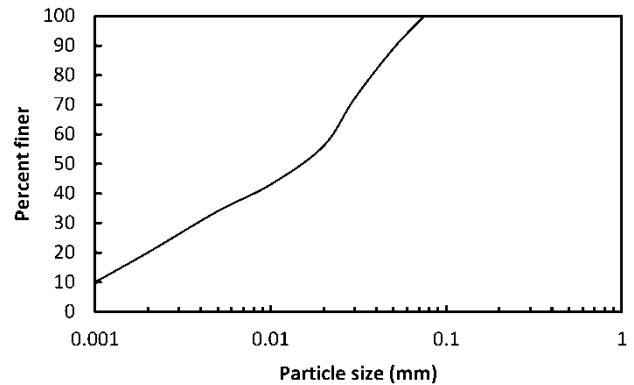


Fig. 3 Particle size distribution curve

شکل 3 منحنی توزیع اندازه ذرات

کاهش حجم قطعه با رسیدن رطوبت قطعه به رطوبت حد انقباض متوقف می‌شود. در این مطالعه رطوبت بحرانی برابر با رطوبت حد انقباض در نظر گرفته شده است ($w_{sl} = w_{cf} = 0.12 \text{ kg/kg, d. b}$). این فرض در مطالعات دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته [5] و آنالیز شیمیایی خاک رس مورد مطالعه در جدول 4 ارائه شده است.

2-6- چیدمان تجهیزات آزمایشات تجربی

آزمایشات تجربی در محفظه یک خشک‌کن انجام شد. طرح‌واره از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در آزمایشات تجربی در شکل 4 نشان داده شده است. نمونه مکعبی بر نگه‌دارنده مشبک که در وسط خشک‌کن قرار دارد گذاشته می‌شود. نگه‌دارنده مشبک امکان تبخیر رطوبت از سطح پایینی قطعه را فراهم می‌کند و به کمک چهار میله رابط بر ترازوی دیجیتال A&D GF3000 با دقت 0.01g قرار گرفته است. جریان هوای تولید شده توسط دمنده پس از عبور از روی گرمکن وارد محفظه خشک‌کن می‌شود. برای 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 وجوه جانبی خشک‌کن قرار دارد خارج می‌شود.

دما و رطوبت نسبی محفظه خشک به کمک سنسور دما رطوبت (SHT25) اندازه‌گیری می‌شود و از طریق کارت داده‌برداری (DAQ¹) مدل USB-6009 ساخت شرکت شرکت نشنال اینسترومنت به رایانه ارسال می‌شود. دقت اندازه‌گیری SHT25 به ترتیب 0.2°C و 1.8% در اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی است.

کارت DAQ اطلاعات دریافتی از سنسور دما و رطوبت را به نرم‌افزار لب‌ویو 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 رایانه به خروجی‌های کارت DAQ ارسال می‌شود.

دوربین قرار گرفته در بالای قطعه امکان عکس‌برداری از قطعه در فاصله‌های زمانی مشخص شده و انتقال عکس‌ها به رایانه را فراهم می‌کند. به کمک تکنیک‌های پردازش تصویر، تغییرات ابعاد قطعه اندازه‌گیری می‌شود. جهت عکس برداری از دوربین ایسوس فون پد 7 با رزولوشن 5 مگا پیکسل استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری به کیفیت عکس‌های گرفته شده وابسته است. جهت افزایش کیفیت عکس‌های گرفته شده از دو عدد لامپ استفاده شده است.

¹ Data acquisition

اول جبهه تبخیر بر سطح قطعه قرار دارد. جبهه تبخیر با قطع شدن اتصال هیدرولیکی به داخل قطعه عقب‌نشینی می‌کند.

با توجه به آن که خشک شدن با شدت بیشتری در گوشه‌ها و لبه‌ها انجام می‌شود، رطوبت این نقاط زودتر از نقاط دیگر به رطوبت حد انقباض می‌رسد. با رسیدن رطوبت نخستین نقطه از سطح به رطوبت حد انقباض و شکسته شدن لوله موئین دوره گذار (دوره انتقال از دوره اول فرایند خشک شدن به دوره دوم) شروع می‌شود (نقطه B در شکل‌های 9-5) و با شکسته شدن آخرین لوله موئین دوره گذار به اتمام می‌رسد و دوره دوم فرایند خشک شدن شروع می‌شود (نقطه C در شکل‌های 9-5). با شکسته شدن تمامی لوله‌های موئین انقباض قطعه عملاً متوقف می‌شود (نقطه C در شکل 7)، 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 اول فرایند خشک شدن خروج آب از قطعه و کاهش حجم قطعه که تقریباً برابر با مقدار آب خارج شده از قطعه است به صورت هم‌زمان صورت می‌گیرد. با توجه به بیشتر بودن چگالی خاک از آب چگالی کل قطعه در این دوره افزایش می‌یابد (A-B در شکل 8). در دوره گذار با توجه به شکسته شدن تدریجی لوله‌های موئین و کاهش نسبی حجم قطعه، چگالی کل قطعه در این دوره تقریباً ثابت باقی می‌ماند. (B-C در شکل 8). در دوره دوم فرایند خشک شدن کاهش حجم قطعه متوقف می‌شود، اما خروج رطوبت از قطعه با شدت کمتر از دوره اول ادامه می‌یابد. از این‌رو چگالی کل قطعه در این دوره کاهش می‌یابد (C-D در شکل 8).

در شکل 10 عکس‌های گرفته شده از سطح قطعه در زمان‌های مختلف خشک شدن نشان داده شده است. شکل 10-a مطابق با شروع دوره گذار در

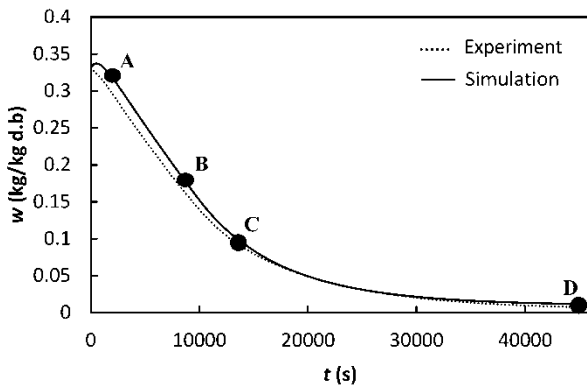


Fig. 5 Average moisture content changes

شکل 5 تغییرات میانگین رطوبت محتوی

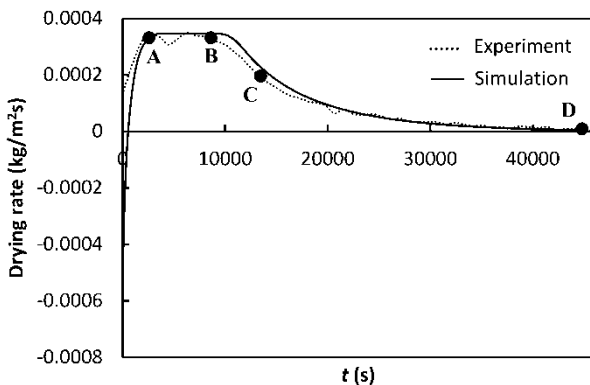


Fig. 6 Drying rate changes

شکل 6 تغییرات نرخ خشک شدن

سریع دمای سطح قطعه می‌شود. در شکل 9 منحنی شبیه‌سازی تغییرات دمای میانگین سطح قطعه نشان داده شده است. با رسیدن دمای سطح قطعه به دمای نقطه شبنم تقطیر بخار بر سطح قطعه متوقف می‌شود. در ادامه و با افزایش بیشتر دمای سطح شار تبخیر از سطح مثبت می‌شود. در این حالت شار مثبت تبخیر سبب انتقال حرارت از قطعه به محیط و از سوی دیگر کمتر بودن دمای سطح قطعه از محیط خشک‌کن سبب انتقال حرارت از محیط اطراف به سطح قطعه می‌شود. تا رسیدن دمای سطح قطعه به دمای حباب تر، شار حرارت منفی ناشی از گرادیان دما بیش از شار حرارت مثبت ناشی از تبخیر رطوبت است و دمای سطح افزایش می‌یابد. با رسیدن دمای سطح به دمای حباب تر (نقطه A در شکل 9) و پایان یافتن دوره پیشگرم، تعادل بین دو شار حرارت برقرار می‌شود و دوره اول فرایند خشک شدن شروع می‌شود. با توجه به ثابت بودن نرخ تبخیر در دوره اول فرایند خشک شدن (A-B در شکل 6)، دمای سطح قطعه در این دوره برابر با دمای حباب تر است (A-B در شکل 9). در دوره گذار و دوره دوم فرایند خشک شدن، با کاهش نرخ تبخیر (B-D در شکل 6)، دمای سطح قطعه افزایش می‌یابد و به دمای محیط می‌رسد (B-D در شکل 9).

نقطه A در شکل‌های 9-5 نشان‌دهنده زمان شروع دوره اول فرایند خشک شدن است. در دوره اول (A-B در شکل‌های 9-5)، انقباض قطعه برابر با مقدار آب خارج شده از قطعه است. در این دوره قطعه همواره 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 است. 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 حد انقباض، انقباض قطعه در این نقاط متوقف می‌شود. از این‌رو امکان کاهش بیشتر قطر لوله‌های موئین فراهم نیست. با ادامه فرایند 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

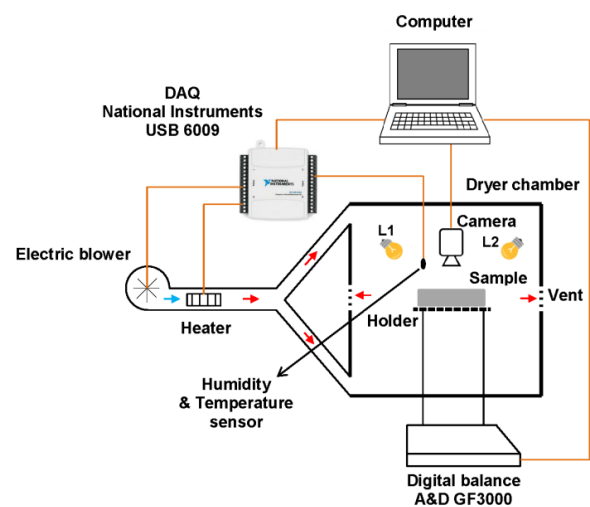


Fig. 4 Schematic of experimental setup

شکل 4 طرح‌واره تجهیزات آزمایشگاهی

حد انقباض است و جبهه تبخیر در این نقاط بر سطح قطعه قرار گرفته است. همین موضوع سبب رنگ تیره تر نقاط داخلی نسبت به نقاط خارجی شده است. در شکل 10-c تصویر گرفته شده از قطعه پس از گذشت زمان 13500s از شروع آزمایش که مطابق با پایان دوره گذار است نشان داده شده است. در این لحظه از فرایند خشک شدن تمامی لوله‌های موئین شکسته شده است، انقباض قطعه متوقف و قطعه وارد دوره دوم فرایند خشک شدن شده است. شکل 10-c مطابق با نقطه C در شکل‌های 5-9 است.

در شکل 11 تأثیر تعداد المان مورد استفاده در گسسته‌سازی نمونه مکعبی بر سینتیک خشک شدن مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی خشک شدن مربوط به گسسته‌سازی با 11342 و 22680 عدد المان با دقت بسیار بالایی بر یکدیگر منطبق است، اما منحنی خشک شدن مربوط به گسسته‌سازی با 3406 عدد المان اندکی تفاوت دارد. با توجه به تأثیر شدید منحنی خشک شدن بر تنش‌های خشک شدن و از طرفی افزایش زمان حل با افزایش تعداد المان در این مطالعه برای گسسته‌سازی از 11342 عدد المان استفاده شده است.

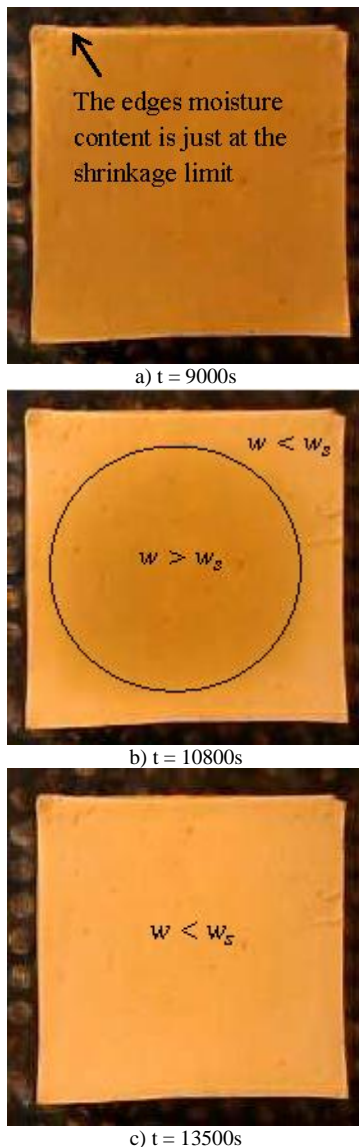


Figure 10 Picture taken from the sample at different time
 شکل 10 عکس‌های گرفته شده از قطعه در زمان‌های مختلف

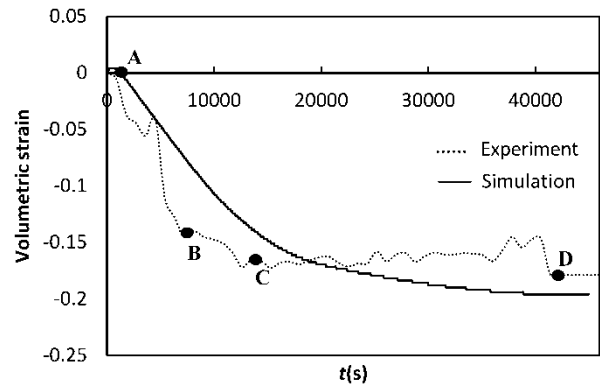


Figure 7 Volumetric strain changes

شکل 7 تغییرات کرنش حجمی

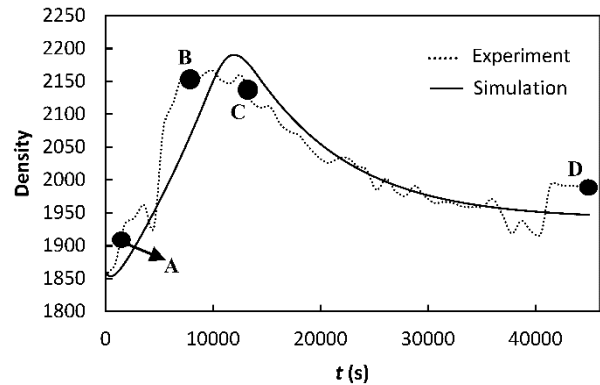


Figure 8 Total density changes

شکل 8 تغییرات چگالی کل

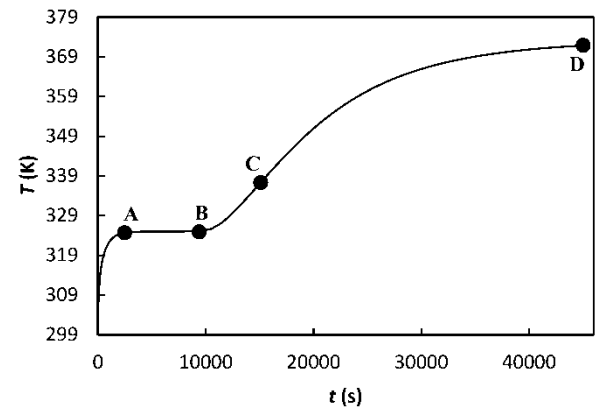


Figure 9 Average temperature changes

شکل 9 تغییرات دمای میانگین

فرایند خشک شدن است. لوله‌های موئین در نقاط قرار گرفته بر لبه، با رسیدن رطوبت محتوی این نقاط به رطوبت حد انقباض، شکسته شده است و این نقاط وارد دوره دوم فرایند خشک شدن شده‌اند. روشن شدن رنگ تصویر در این نقاط نشان‌دهنده پرش جبهه تبخیر در این نقاط به داخل قطعه است. شکل 10-a مطابق با نقطه B در شکل‌های 5-9 است. در شکل 10-b تصویر گرفته شده از قطعه در دوره گذار (در شکل‌های 5-9) 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 گشته‌اند، رطوبت محتوی به زیر حد انقباض کاهش یافته است و این نقاط وارد دوره دوم فرایند خشک شدن شده‌اند. رطوبت محتوی در نقاط قرار گرفته در قسمت داخلی بیشتر از

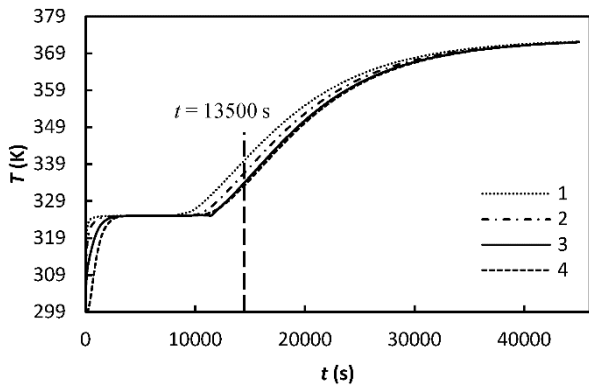


Fig. 13 Temperature changes at four points of the sample

شکل 13 تغییرات دما در چهار نقطه قطعه

منحنی تغییرات تنش اصلی اول، دوم و سوم به ترتیب در شکل‌های 14-16 نشان داده شده است. لایه‌های نزدیک به سطح قطعه در دوره پیشگرم و دوره اول فرایند خشک شدن به دلیل از دست دادن رطوبت بیشتر نسبت به عمق قطعه تمایل بیشتری به انقباض دارند. این اختلاف تمایل سبب ایجاد تنش‌های کششی بر سطح قطعه و تنش‌های فشاری در عمق قطعه می‌شود. تنش‌های خشک شدن در پایان دوره اول به بیشترین مقدار خود می‌رسد که مطابق با نتایج سایر مطالعات است [18]. انقباض در این نقاط با رسیدن تدریجی نقاط قرار گرفته بر سطح قطعه به رطوبت حد انقباض و شروع دوره دوم متوقف می‌شود. این موضوع سبب کاهش تدریجی گرادیان انقباض و تنش‌های خشک شدن در ادامه فرایند خشک شدن می‌شود. نقاط موجود در قسمت‌های داخلی قطعه که هنوز به رطوبت حد انقباض نرسیده‌اند در دوره دوم فرایند خشک شدن 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 سبب عکس شدن جهت تنش‌ها (تنش‌های فشاری در سطح و تنش‌های کششی در عمق) در دوره دوم می‌شود.

8- مقایسه تنش‌های حرارتی و رطوبتی در خشک شدن پیوسته

پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت در فرایند خشک شدن به صورت هم‌زمان رشد می‌کنند و سبب ایجاد گرادیان رطوبت و دما می‌شوند. گرادیان رطوبت و دما به ترتیب سبب ایجاد تنش‌های رطوبتی و تنش‌های حرارتی می‌شود. به عبارت دیگر تنش‌های خشک شدن از دو قسمت تنش‌های رطوبتی و تنش‌های حرارتی تشکیل شده‌اند. در شکل 17 تنش‌های ون- میزز

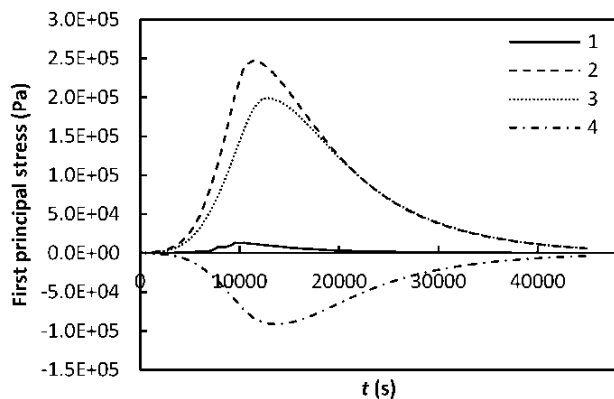


Fig. 14 First principal stress at four points of the sample

شکل 14 تغییرات تنش اصلی اول در چهار نقطه قطعه

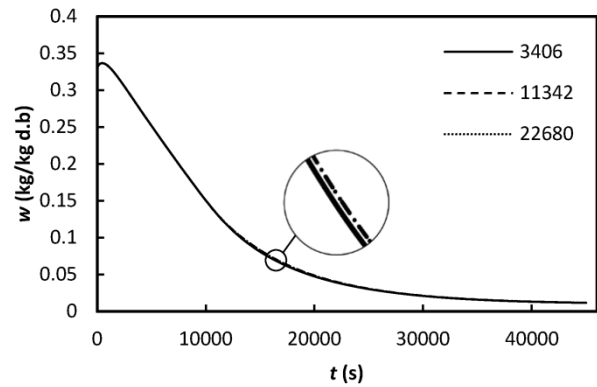


Fig. 11 the effect of element number on the drying kinetic

شکل 11 تأثیر تعداد المان بر سینتیک خشک شدن

منحنی‌های سینتیک خشک شدن، تغییرات نرخ میانگین تبخیر سطحی، کرنش حجمی و تغییرات چگالی کل قطعه، حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی مطابقت مناسبی با یکدیگر در طول فرایند خشک شدن دارند. این موضوع نشان‌دهنده صحت و قابل اعتماد بودن مدل ریاضی بسط داده شده است؛ بنابراین شبیه‌سازی می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای پیش‌بینی تنش‌های خشک شدن و کیفیت قطعه خشک شده مورد استفاده قرار گیرد.

7- تنش‌های اصلی در خشک شدن پیوسته

توزیع غیریکنواخت رطوبت و دما در فرایند خشک شدن سبب ایجاد تغییر شکل غیریکنواخت و تنش می‌شود. تنش‌های خشک شدن در چهار نقطه نشان داده در شکل 2 مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 12 منحنی تغییرات رطوبت محتوی و در شکل 13 منحنی تغییرات دما در این چهار نقطه ترسیم شده است. رطوبت محتوی در نقطه 1 که بیشتر از نقاط دیگر در معرض جریان هوا قرار دارد، به سرعت کاهش می‌یابد. تغییرات سریع رطوبت محتوی در این نقطه و اختلاف دمای اولیه قطعه با محیط خشک‌کن سبب افزایش سریع دما در این نقطه می‌شود. نقاط 2-4 به ترتیب پس از نقطه 1 خشک می‌شوند.

گرادیان رطوبت محتوی و دما در بین چهار نقطه با افزایش زمان خشک شدن افزایش می‌یابد و در پایان دوره اول فرایند خشک شدن ($t=13500$ s) به بیشینه مقدار خود می‌رسند. گرادیان رطوبت محتوی و دما با شروع دوره دوم فرایند خشک شدن به تدریج کاهش یافته و در پایان فرایند خشک شدن در هر چهار نقطه رطوبت محتوی به رطوبت تعادلی و دما به دمای محفظه خشک‌کن می‌رسد.

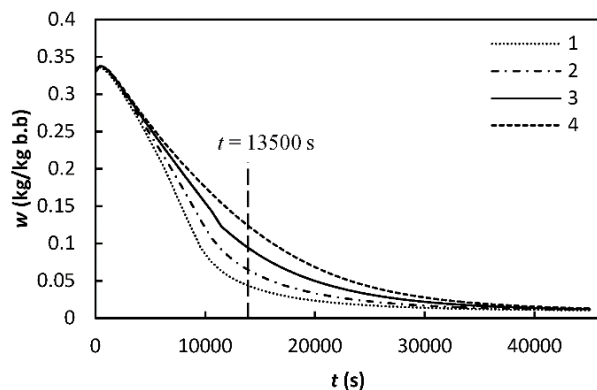


Fig. 12 Moisture content changes at four points of the sample

شکل 12 تغییرات رطوبت محتوی در چهار نقطه قطعه

پیوسته ناچیز است. منحنی تغییرات رطوبت محتوی در چهار نقطه نشان داده شده در شکل 2 در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 0.5hr, 1.5hr, 2hr و 2.77hr به ترتیب در شکل‌های 22-a, 22-b, 22-c و 22-d نشان داده شده است.

در دوره استراحت با نرخ تبخیر کمینه که بعد از دوره شوک حرارتی با نرخ تبخیر بیشینه قرار دارد، از افزایش گرادیان رطوبت جلوگیری می‌شود. در دوره استراحت در صورتی که نرخ انتقال رطوبت از عمق به سطح از نرخ تبخیر کاهش یافته بیشتر باشد، گرادیان رطوبت کاهش می‌یابد. این حالت برای نمونه در شکل 22-b که مربوط به فرایند خشک کردن تناوبی با دوره تناوب 1.5hr نشان داده شده است. به عبارت دیگر در 1.5hr ساعت چهارم فرایند خشک شدن، رطوبت محتوی در نقاط 1 و 2 نه تنها کاهش نمی‌یابد که افزایش می‌یابد.

همان طور که در شکل‌های 14-16 نشان داده شده در فرایند خشک شدن پیوسته، بیشینه تنش کششی متعلق به تنش اصلی اول در نقطه 2 است. پس از نقطه 2 تنش اصلی اول در نقطه 3 بیشینه است. منحنی تغییرات تنش اصلی اول در نقطه 2 در فرایند خشک شدن پیوسته و حالت‌های مختلف خشک شدن تناوبی در شکل 23 نشان داده شده است. تنش بیشینه در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 0.5hr و خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 2.77hr نسبت به حالت پیوسته کاهش قابل توجهی داشته است، اما همان طور که مشاهده می‌شود مقدار تنش بیشینه در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 1.5hr نسبت به حالت پیوسته نه تنها کاهش نیافته بلکه افزایش یافته است. مقدار تنش بیشینه در خشک شدن تناوبی با

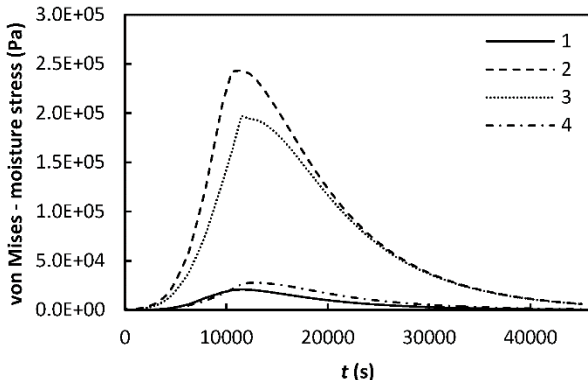


Fig. 17 Von-Mises stress induced by moisture transfer
شکل 17 تنش‌های ون-میز ناشی از انتقال رطوبت

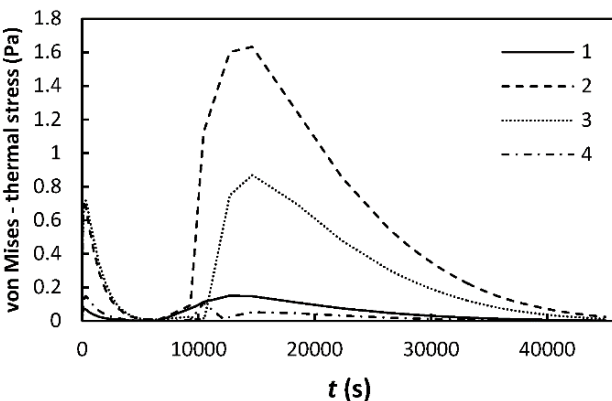


Fig. 18 Von-Mises stress induced by heat transfer
شکل 18 تنش‌های ون-میز ناشی از انتقال حرارت

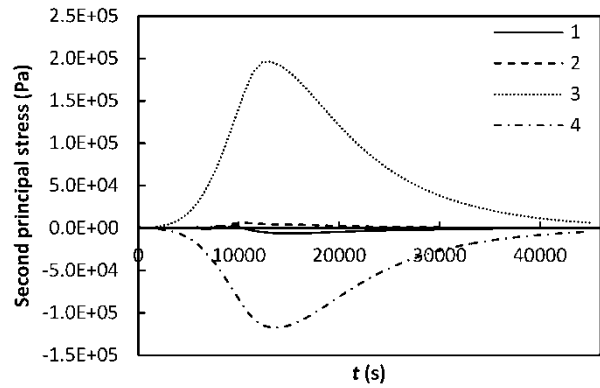


Fig. 15 Second principal stress at four points of the sample
شکل 15 تغییرات تنش اصلی دوم در چهار نقطه قطعه

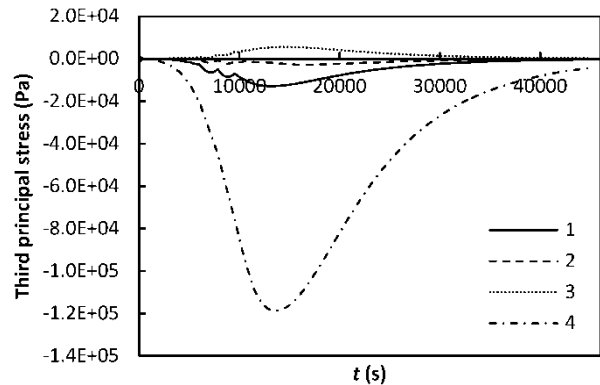


Fig. 16 Third principal stress at four points of the sample
شکل 16 تغییرات تنش اصلی سوم در چهار نقطه قطعه

ناشی از توزیع غیریکنواخت رطوبت و در شکل 18 تنش‌های ون-میز 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 1)، تنش‌های ناشی از انتقال حرارت بسیار کوچک‌تر از تنش‌های ناشی از انتقال رطوبت است. تنش‌های رطوبتی در حدود $1.5E5$ برابر تنش‌های حرارتی است و می‌توان از مدل‌سازی تنش‌های ناشی از حرارت در شبیه‌سازی فرایند خشک شدن صرف نظر کرد. باید توجه کرد که پدیده انتقال حرارت در فرایند خشک شدن نقش بسیار پررنگی دارد و به شدت بر پدیده انتقال جرم اثر گذار است و به هیچ عنوان نمی‌توان از مدل‌سازی انتقال حرارت در فرایند خشک شدن صرف نظر کرد.

9- خشک شدن تناوبی

در این مطالعه فرایند خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما بین مقادیر 100°C و 65°C با دوره تناوب 0.5hr, 1.5hr, 2hr و 2.77hr مورد بررسی قرار گرفته است. با تغییر دمای محفظه خشک‌کن، بین دمای 100°C و 65°C ، رطوبت نسبی به ترتیب بین 10% و 40% و دمای حباب تر بین دمای 52°C و 48°C تغییر می‌کند. در سرمایش / گرمایش نسبت رطوبت و دمای نقطه شبنم ثابت می‌ماند. مدت زمان 30 دقیقه جهت کاهش / افزایش تدریجی دمای محفظه خشک‌کن در نظر گرفته شده است. منحنی تغییرات دوره‌ای دمای محفظه خشک‌کن با دوره تناوب 1.5hr در شکل 19 نشان داده شده است.

منحنی تغییرات رطوبت و دمای میانگین قطعه در چهار حالت خشک شدن تناوبی با خشک شدن پیوسته به ترتیب در شکل‌های 20, 21 مقایسه شده است. افزایش زمان خشک شدن در حالت‌های تناوبی نسبت به حالت

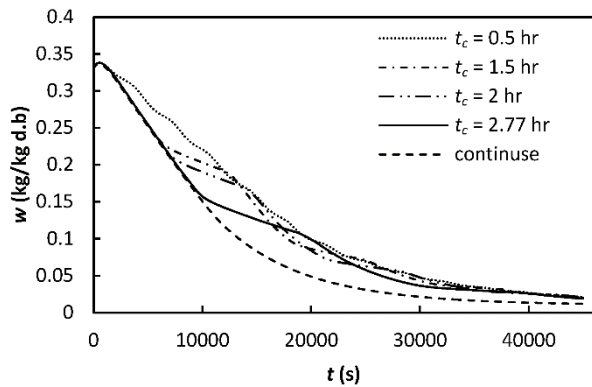


Fig. 20 mean moisture content changes in intermittent and continuous drying

شکل 20 تغییرات رطوبت میانگین قطعه در خشک شدن تناوبی و پیوسته

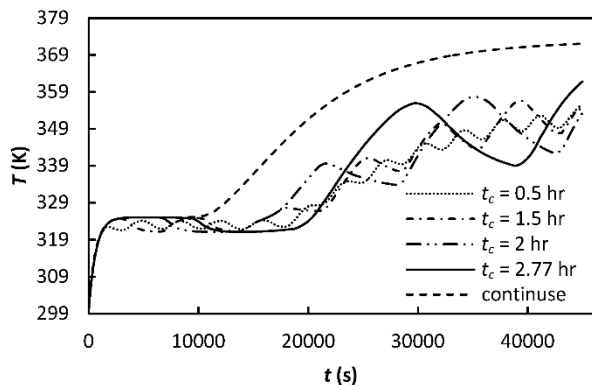


Fig. 21 Mean temperature changes in intermittent and continuous drying

شکل 21 تغییرات دمای میانگین قطعه در خشک شدن تناوبی و پیوسته

دارد کاهش تنش در یک نقطه همراه با افزایش تنش در نقطه دیگر باشد.

10- نتیجه گیری

در این مطالعه سینتیک خشک شدن و تنش‌های خشک شدن در یک هندسه سه‌بعدی در حالت پیوسته و تناوبی پیش‌بینی شده است. دستگاه معادلات کوپله ارائه شده در مدل‌سازی فرایند خشک شدن، با ارائه درک کاملی از فرایند خشک شدن، ابزار مناسبی جهت درک پدیده‌های خشک شدن است. نتایج شبیه‌سازی و تجربی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند که نشان‌دهنده صحت و قابل اعتماد بودن، مدل ارائه شده جهت پیش‌بینی سینتیک خشک شدن در طی فرایند خشک شدن است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تنش‌های حرارتی در مقایسه با تنش‌های رطوبتی بسیار ناچیز هستند و می‌توان از مدل‌سازی آن‌ها در فرایند خشک شدن صرف‌نظر کرد. فرایند خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما در صورت طراحی مناسب یک راه‌کار مؤثر برای بهبود سینتیک خشک شدن، کاهش تنش‌های خشک شدن و افزایش کیفیت محصولات خشک شده است. دوره تناوب بر مقدار تنش‌های خشک شدن مؤثر است. نحوه اثرگذاری دوره تناوب بر مقدار تنش‌های خشک شدن به سینتیک خشک شدن بستگی دارد. با توجه به آن‌که سینتیک خشک شدن به خواص و ابعاد قطعه بستگی دارد، از این‌رو هیچ قانون کلی برای تعیین دوره تناوب مناسب نمی‌توان بیان کرد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت شبیه‌سازی و طراحی فرایند خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دماست. فرایند خشک شدن تناوبی با تغییرات دوره‌ای دما بر نقاط مختلف قطعه اثر متفاوت می‌گذارد و کاهش تنش در یک نقطه می‌تواند همراه با

دوره تناوب 2hr نسبت به حالت پیوسته کاهش ناچیزی داشته است. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت طرح‌ریزی و شبیه‌سازی فرایند خشک شدن تناوبی است.

سطح قطعه در پایان دوره اول با شکسته شدن لوله‌ها به شدت منقبض و تنش‌های خشک شدن بیشینه می‌شود. از این‌رو بهتر است پیش از پایان دوره اول نرخ خشک شدن کاهش یابد، به عبارت دیگر قطعه در حالت استراحت قرار داشته باشد [17].

در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 1.5hr (شکل 22-b) و 2hr (شکل 22-c) زمان رسیدن رطوبت محتوی هر چهار نقطه به رطوبت بحرانی یا رطوبت حد انقباض (12%) در دوره شوک حرارتی دوم قرار دارد.

در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 0.5hr فرکانس بالایی تغییرات بین حالت شوک و استراحت تا حدودی شرایط مطلوب جهت عبور نقطه 2 از دوره اول خشک شدن به دوره دوم را فراهم کرده است، شکل 22-a، در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 2.77hr همان طور که در شکل 22-d مشاهده می‌شود در زمان عبور نقطه 2 (محل تنش کششی بیشینه) از دوره اول خشک شدن به دوره دوم قطعه در حالت استراحت قرار دارد و همین امر سبب کاهش محسوس مقدار تنش بیشینه در این نقطه شده است (شکل 23). خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 2.77hr نسبت به خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 0.5hr و 2hr نه تنها به لحاظ عملیاتی آسان‌تر است، بلکه اثر کاهشی بیشتری نیز بر تنش‌های خشک شدن دارد.

اثر فرایند خشک شدن تناوبی بر مقادیر تنش در هر نقطه تا حد زیادی به طرح فرایند خشک شدن تناوبی و شرایط محیا شده برای عبور آن نقطه از دوره اول خشک شدن به دوره دوم بستگی دارد. با توجه به آن‌که سینتیک خشک شدن به خواص ماده و ابعاد هندسی آن بستگی دارد نمی‌توان قانونی کلی برای انتخاب دوره تناوب مناسب مشخص کرد. در شکل‌های 24,23 به ترتیب منحنی تغییرات تنش اصلی اول و دوم در نقاط 2 و 3، در حالت خشک شدن پیوسته و تناوبی با دوره تناوب 2.77hr نشان داده شده است. بیشینه تنش اصلی اول در نقطه 2 در خشک شدن تناوبی نسبت به حالت پیوسته کاهش اندکی داشته، اما بیشینه تنش اصلی اول و دوم در نقطه 3 افزایش ناچیزی یافته است. به عبارت دیگر فرایند خشک شدن تناوبی می‌تواند بر نقاط متفاوت اثر متفاوتی داشته باشد. از این‌رو نیاز به طرح‌های متفاوتی برای کاهش تنش بیشینه در نقاط متفاوت است؛ بنابراین در طرح‌ریزی فرایند خشک شدن تناوبی باید نقطه هدف مشخص باشد و نقاط مستعد ترک برداشتن به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند، زیرا امکان

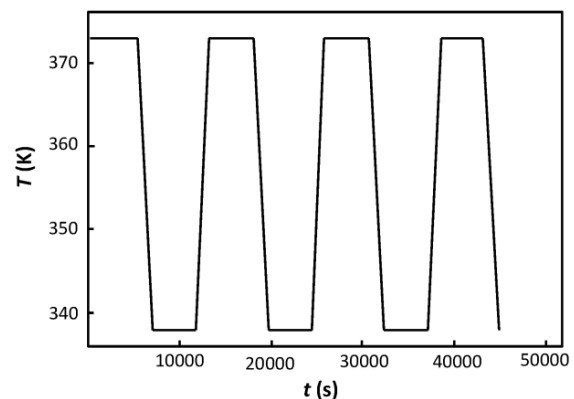


Fig. 19 Temperature variation of dryer chamber in intermittent drying

شکل 19 تغییرات دمای محفظه خشک‌کن در خشک شدن تناوبی

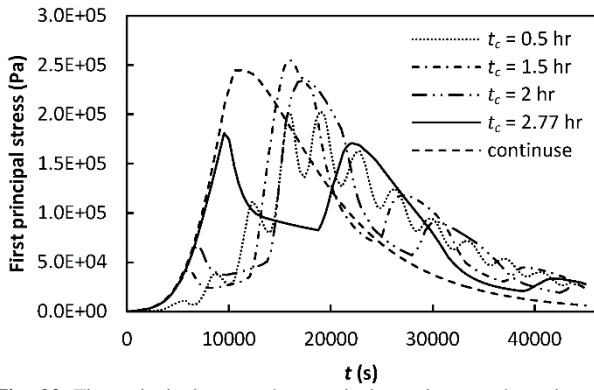


Fig. 23 First principal stress changes in intermittent and continuous drying at point 2

شکل 23 تغییرات تنش اصلی اول در نقطه 2 در روش‌های مختلف خشک شدن

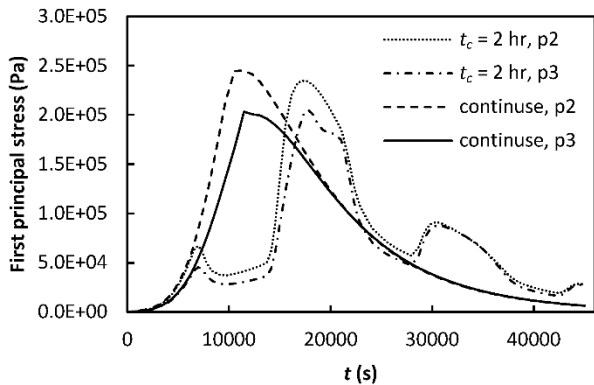


Fig. 24 First principal stress changes at point 2 and 3 in intermittent drying at period of 2.77hr and continuous drying

شکل 24 منحنی تغییرات تنش اصلی اول در نقطه 2,3 در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 2.77hr و خشک شدن پیوسته

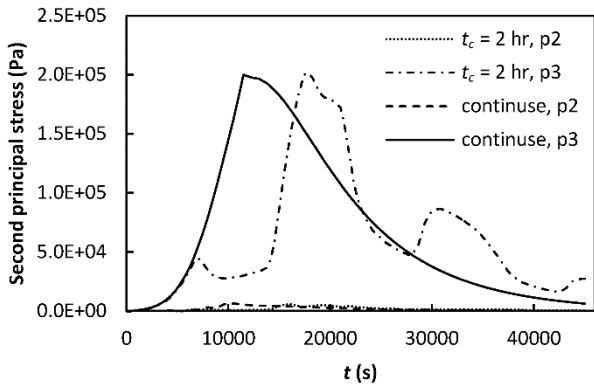


Fig. 25 second principal stress changes at point 2 and 3 in intermittent drying at period of 2.77hr and continuous drying

شکل 25 منحنی تغییرات تنش اصلی دوم در نقطه 2 و 3 در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب 2.77hr و خشک شدن پیوسته

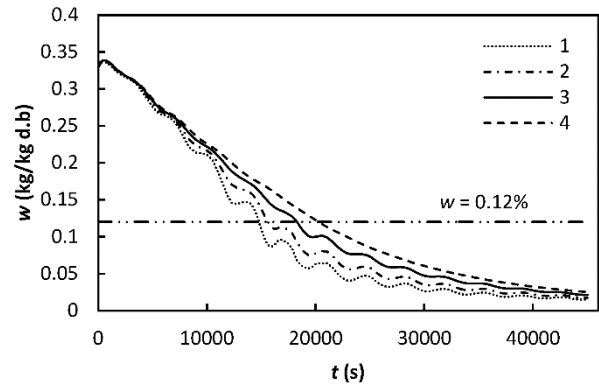
11- مراجع

[1] K. Khalili, M. Heydari, Studying the effect of part thickness on cracking during drying process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 103-116, 2012. (in Persian فارسی)

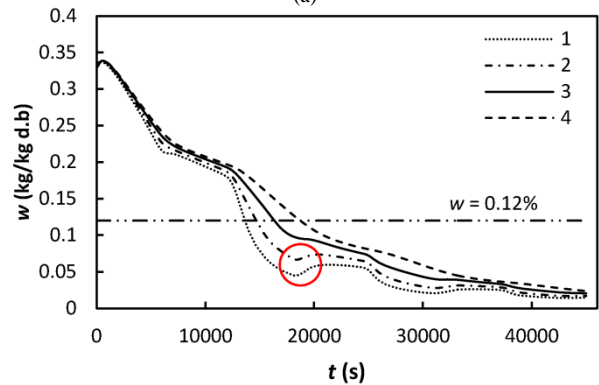
[2] M. R. Islam, J. C. Ho, A. S. Mujumdar, Convective drying with time-varying heat input: simulation results, *Drying Technology*, Vol. 21, No. 7, pp. 1333-1356, 2003.

[3] K. Khalili, M. Heydari, Numerical modeling of shrinkage of a ceramic material in drying process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 58-71, 2012. (in Persian فارسی)

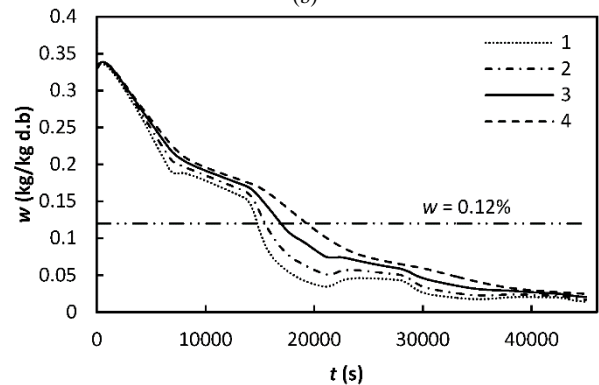
افزایش تنش در نقطه دیگر باشد؛ بنابراین اثر فرایند خشک شدن تناوبی بر تمام نقاط مستعد ترک برداشتن باید مورد بررسی قرار گیرد.



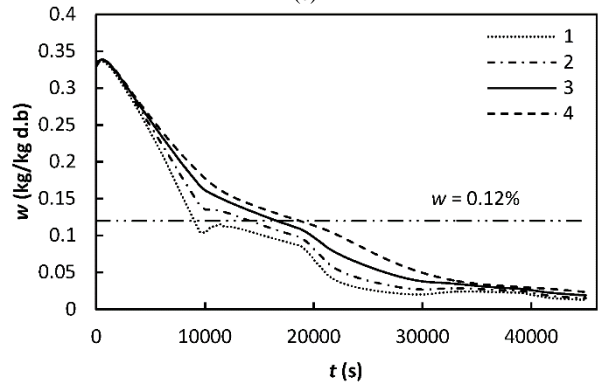
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 22 moisture content changes at four points in intermittent drying at time period of a- 0.5hr, b- 1.5hr, c- 2hr, d- 2.77hr

شکل 22 تغییرات رطوبت محتوی در چهار نقطه در خشک شدن تناوبی با دوره تناوب الف- 0.5hr، ب- 1.5hr، ج- 2hr، د- 2.77hr

- and Stress, PhD Thesis, University of Eindhoven, Eindhoven, 1993.
- [17] S. J. Kowalski, A. Pawlowski, Modeling of kinetics in stationary and intermittent drying, *Drying Technology*, Vol. 28, No. 8, pp. 1023-1031, 2010.
- [18] S. J. Kowalski, A. Pawlowski, Drying of wet materials in intermittent conditions, *Drying Technology*, Vol. 28, No. 5, pp. 636-643, 2010.
- [19] S. J. Kowalski, A. Pawlowski, Intermittent drying of initially saturated porous materials, *Chemical Engineering Scienc*, Vol. 66, No. 9, pp. 1893-1905, 2011.
- [20] S. J. Kowalski, J. Szadzińska, Non-stationary drying of ceramic-like materials controlled through acoustic emission method, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 12, pp. 2023-2032, 2012.
- [21] B. A. Manel, D. Mihoubi, S. Jalila, B. Ahmed, Strain-Stress formation during stationary and intermittent drying of deformable media, *Drying Technology*, Vol. 32, No. 10, pp. 1245-1255, 2014.
- [22] S. Chemkhi, F. Zagrouba, Water diffusion coefficient in clay material from drying data, *Desalination*, Vol. 185, No. 1-3, pp. 491-498, 2005.
- [23] N. Shokri, D. Or, What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage-2 evaporation from porous media?, *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 9, pp. 1-8, 2011.
- [24] S. J. Kowalski, *Thermomechanics of Drying Processes*, Springer Science & Business Media, Vol. 8, pp. 37-40, 2012.
- [25] J. Banaszak, S. J. Kowalski, Drying induced stresses estimated on the base of elastic and viscoelastic models, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 86, No. 1, pp. 139-143, 2002.
- [26] D. Mihoubi, A. Bellagi, Modeling of heat and moisture transfers with stress-strain formation during convective air drying of deformable media, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 10, pp. 1697-1705, 2012.
- [27] S. Chemkhi, W. Jomaa, F. Zagrouba, Application of a coupled thermo-hydro-mechanical model to simulate the drying of non-saturated porous media, *Drying Technology*, Vol. 27, No. 7-8, pp. 842-850, 2009.
- [28] I. Hammouda, D. Mihoubi, Modelling of drying induced stress of clay: elastic and viscoelastic behaviours, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 18, No. 1, pp. 97-111, 2014.
- [29] K. Khalfaoui, S. Chemkhi, F. Zagrouba, Modeling and stress analysis during drying of a deformable and saturated porous medium, *Drying Technology*, Vol. 31, No. 10, pp. 1124-1137, 2013.
- [4] G. Musielak, T. Śliwa, Modeling and numerical simulation of clays cracking during drying, *Drying Technology*, Vol. 33, No. 14, pp. 1758-1767, 2015
- [5] W. P. da Silva, L. D. da Silva, V. S. de Oliveira Farias, C. M. D. P. da Silva, Water migration in clay slabs during drying: A three-dimensional numerical approach, *Ceramics International*, Vol. 39, No. 4, pp. 4017-4030, 2013.
- [6] I. Hammouda, D. Mihoubi, Modeling of thermo-hydro-viscoelastic behavior of a partially saturated ceramic material during drying, *Drying Technology*, Vol. 32, No. 10, pp. 1219-1230, 2014.
- [7] W. P. da Silva, C. M. D. P. da Silva, L. D. da Silva, V. S. de Oliveira Farias, Drying of clay slabs: Experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models, *Ceramics International*, Vol. 39, No. 7, pp. 7911-7919, 2013.
- [8] M. Vasić, Z. Grbavčić, Z. Radojević, Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 76, No. 1, pp. 33-44, 2014.
- [9] K. Khalili, M. Heydari, Drying clay bricks with variable young's modulus, *Procedia Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 382-387, 2014.
- [10] M. Heydari, K. Khalili, Investigation on the effect of young's modulus variation on drying-induced stresses, *Transport in Porous Media*, Vol. 12, No. 2, pp. 519-540, 2016.
- [11] K. Murugesan, H. N. Suresh, K. N. Seetharamu, P. A. Narayana, T. Sundararajan, A theoretical model of brick drying as a conjugate problem, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 21, pp. 4075-4086, 2001.
- [12] H. F. Oztop, E. K. Akpınar, Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 2, pp. 169-177, 2008.
- [13] M. R. Islam, A. S. Mujumdar, Role of product shrinkage in drying rate predictions using a liquid diffusion model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 3, pp. 391-400, 2003.
- [14] F. Couture, S. Laurent, M. A. Roques, Drying of two-phase media: Simulation with liquid pressure as driven force, *AIChE Journal*, Vol. 53, No. 7, pp. 1703-1717, 2007.
- [15] M. Heydari, Kh. Khalili, modeling enhancement and simulation of distortion in drying process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 291-301, 2015. (in Persian فارسی)
- [16] A. A. J. Ketelaars, *Drying Deformable Media, Kinetics, Shrinkage*