

ماهنامه علمى پژوهشى

دسی مکانیک مدرس



# بهبود مدلسازی و شبیهسازی تغییر شکل در فرآیند خشک شدن

محسن حيدرى<sup>1</sup>، خليل خليلى<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند \* بيرجند، صندوق پستى kkhalili@birjand.ac.ir ، 9717431396

چکیدہ	اطلاعات مقاله
فرایند خشک شدن نقش مهمی در تولید بسیاری از مواد صنعتی مانند کاشی، آجر و سفال دارد. کیفیت محصولات خشک شده به شدت تحت تاثیر فرآیند خشک شدن است. هدف کار حاضر شبیهسازی فرآیند خشک شدن جابجایی یک سرامیک با استفاده از مدل نفوذ و با در نظر گرفتن تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی ماده مانند مدول پانگ و ضریب انقباض نسبت به رطوبت است. در این مطالعه فرایند خشک شدن در حالت	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 14 خرداد 1394 پذیرش: 13 شهریور 1394 باله در با بت: 30 شد 1304
دو بعدی و سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل به صورت عددی و با روش المان محدود حل شده است. اختلاف زیادی بین مقادیر تنش های خشک شدن در حالت دو بعدی و سه بعدی مشاهده شده است. ارزیابی نتایج با مقایسه اطلاعات تجربی و عددی انجام شده است. اثر تشهیلت مدیل بانگ در مایل فرایند مدید بر بر قبل گفته است. مثاهده شده است. ارزیابی نتایج با مقایسه اطلاعات تجربی و	ارامه در سایت. 30 سهریور ۲۵۶۹ کلید واژگان: خشک شدن
تعییرات مدول یامت در طول فرایند مورد بررسی فرار کرفته است. مساهده سنه است که تعییرات مدول یامت به سدت بر مقدار کس های خست شدن موثر است. با توجه به نتایج حاصله نمی توان هیچ یک از روش های شبیه سازی با مدول یانگ ثابت و متغیر را به عنوان روش ایمن تر در پیش بینی ترک معرفی کرد. همچنین مشاهده شده است که در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ در مکان وقوع تنش ماکزیمم تاثیری ندارد اما باعث تاخیر در زمان وقوع آن می شود.	انتقال جرم و حرارت تحلیل تنش تحلیل کرنش

## Modeling Enhancement and Simulation of Distortion in Drying Process

## Mohsen Heydari, Khalil Khalili\*

مكانىك

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran \* P.O.B. 9717431396, Birjand, Iran. kkhalili@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 04 June 2015 Accepted 04 September 2015 Available Online 21 September 2015	Drying of porous materials is a critical step in the production of many products such as ceramics, brick and tile. Quality of dried product is significantly influenced by drying processes. The aim of the present work is modeling of convection drying of a ceramic by using diffusion model. Material properties changes such as Young's modulus and shrinkage factor to moisture content are
<i>Keywords:</i> Drying Simultaneous Heat and Mass Transfer Stress Analysis Strain Analysis	considered in simulation. Both two and three dimensional configurations have been investigated. The model is solved numerically by a finite element method. A significant difference was observed between the results obtained for the two different configurations, particularly in the intensity of the drying-induced stresses. Validation of results is achieved by comparing the numerical and experimental results. The effect of Young's modulus variation has been investigated. It was observed that drying-induced stresses are highly affected by Young's modulus variations. According to the results, none of the simulation methods, can be regarded as a safer method in crack prediction. The changes in Young's modulus has no effect on the location of maximum stress, however, its timing is delayed.

ماده به واسطه انقباض می شود. زمانی که تنش ها به ماکزیمم مقدار خود در

طول فرایند خشک شدن میرسند باعث تغییر شکل های بزرگ میشوند	خشک شدن خاک رس نقش مهمی در تولید بسیاری از مواد صنعتی مانند
[1]. اگر مقادیر این تنش ها بیشتر از حد معینی باشد منجر به ایجاد عیب و	کاشی، آجر، سفال و دارد. کیفیت محصولات خشک شده به شدت تحت
نقص مانند ظاهر شدن ترک میشود [2]. بیان فرآیند خشک شدن و	تاثیر فرآیند خشک شدن است. زمانی که خشک شدن گرادیان رطوبت در
جابجاییهای ماده به صورت یک مدل ریاضی با هدف بهینهسازی و کنترل	ماده به وجود میآورد، در یک محیط با قابلیت تغییر شکل، ذرات جامد به
کلیه مراحل فرآیند خشک شدن بسیار مورد توجه قرار گرفته است.	صورت غير يكنواخت جابجا مىشوند. اين جابجايى غير يكنواخت باعث ايجاد
می توان فرآیند خشک شدن یک ماده را به دو دوره تقسیم کرد. در دوره	تنش در ماده میشود. جهت جلوگیری از تغییر شکلهای نامطلوب و یا ایجاد
اول نرخ خشک شدن یا نرخ کاهش رطوبت تقریبا ثابت است و نرخ تبخیر	ترک، کنترل کردن این تنشها بسیار مهم است. دانستن پدیدههای مکانیکی
رطوبت از سطح عامل محدود کننده نرخ خشک شدن است اما در دوره دوم	که در طول فرآیند خشک شدن در داخل ماده رخ میدهند برای جلوگیری از
نرخ خشک شدن به سرعت کاهش مییابد و نفوذ رطوبت از عمق به سطح	تخریب ساختاری لازم و ضروری است. خارج شدن رطوبت باعث تغییر ابعاد

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: Please cite this article using: 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)

عامل محدود کننده نرخ خشک شدن است. مقدار رطوبت در نقطه انتقالی از دوره اول به دوره دوم به عنوان رطوبت بحرانی شناخته می شود [3].

مدل نفوذ [4] و موئینگی [5] متداولترین مدلهای ریاضی مورد استفاده برای بیان فرایندهای داخلی خشک شدن هستند. مدل نفوذ یک سادهسازی از مدل موئینگی است [6]. در این مدلها نحوه اتصال فضاهای تخلخل تاثیری در مدلسازی فرایند خشک شدن ندارند. به عبارت دیگر این مدلها محدود به محیطهای اشباع هستند. برای بررسی اثر مورفولوژی فضای تخلخل در فرایند خشک شدن از مدل شبکه منافذ استفاده می شود [7]. طالقانی با استفاده از مدل شبکه منافذ فرایند خشک شدن غیر هم دما را با در نظر گرفتن اثرات ویسکوزیته شبیهسازی کرده است [8]. مدلهای ریاضی از آنجایی که به شدت غیرخطی هستند، نیاز به روشهای حل عددی دارند که بسیار زمانبر هستند. از طرفی فرایندهای کنترلی نیازمند مدلهایی هستند که قادر به محاسبه سریع کارایی فرایند خشک شدن باشند، از این رو محققین بسیاری با استفاده از روشهای مدلسازی هوشمند، به مدلسازی فرایند خشک شدن پرداختهاند [9]. مرمرداس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رگرسیون خطی مدلهایی برای محاسبه کرنش انقباضی در فرایند خشک شدن ارائه كرد [10]. روش المان محدود [11] و روش تفاضل محدود [12] متداول ترین روش های حل عددی مورد استفاده در فرآیند خشک شدن

بیشتر مطالعات انجام شده در شبیه سازی فرآیند خشک شدن به بحث و بررسی پدیده های انتقال (جرم، حرارت و مومنتوم) و تغییر شکل های غیریکنواخت ماده پرداخته اند و کمتر به تنش ها و تغییر شکل های ایجاد شده در فرآیند خشک شدن پرداخته شده است [13]. در مطالعات انجام شده در این زمینه نیز به منظور سهولت در شبیه سازی فرآیند از تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی ماده مانند ضریب انقباض جرمی، مدول یانگ، گرمای ویژه و چگالی در محاسبه توزیع دما، رطوبت، تنش و کرنش صرف نظر شده است [14].

در این مطالعه با در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ در طی فرآیند خشک شدن شبیه سازی فرآیند خشک شدن در محیطهای با قابلیت تغییر شکل در دوره اول بهبود یافته است. همچنین با مقایسه مقادیر تنشها و سیر تکاملی تنشها با کارهای قبلی این نویسنده [15] اثر تغییرات مدول یانگ در مقادیر تنشها مشخص شده است. این کار در دو حالت خشک شدن دو بعدی و سه بعدی انجام شده است. در این تحقیق از مدل نفوذ و قانون فیک برای انتقال رطوبت به سطح و مکانیزم تبخیر از لایه نازک گسترش یافته به عنوان مکانیزم تبخیر از سطح ماده متخلخل استفاده شده است. به منظور درک بهتر تاثیر پارامترهای ماده و شرایط مرزی بر مقادیر تنش ها از یک نمونه خاک رس با آنالیز شیمیایی و حدود اتربرگ مشخص (جدول 1و2) در تمامی شبیه سازیها استفاده شده است.

یکسان خشک می شود اما در حالت دو بعدی، جرم و حرارت فقط از سطح بالایی و پایینی جابجا می شود.

برای سادهسازی مساله فرضیات زیر در نظر گرفته شدهاند:

- خاک رس یک ماده متخلخل ایزوتروپیک متشکل از ذرات جامد و مایع است.
- در بازه رطوبت 0-40% مخلوط آب و خاک رس رفتار کاملا الاستیک از خود نشان میدهد [16].
  - رطوبت ودمای اولیه یکنواخت است.
- انقباض ماده برابر با مقدار آب خارج شده از ماده است و از تولید
   هرگونه حباب هوا صرفنظر شده است.
  - تبخیر فقط در سطوح ماده انجام می شود.
  - شبیهسازی محدود به دوره خشک شدن با نرخ ثابت است.

با لحاظ کردن این فرضیات، معادلات ماکروسکوپی حاکم بر انتقال جرم و انتقال حرارت در خاک رس متخلخل به صورت بیان شده در قسمت بعدی خلاصه میشوند.

## 3- معادلات بقاي جرم

برای گسترش معادلات حاکم بر توزیع رطوبت در ماده به معادلات بقای جرم نیاز است. معادلات بقای جرم برای اسکلت جامد و مایع به صورت روابط (1-4) بیان می شود.

> جامد: (1)

 $\frac{d\rho_{\rm s}}{dt} + {\rm div}\left(\rho_{\rm s}\,\vec{v}_{\rm s}\right) = \mathbf{0}$ 

<b>جدول 1</b> آنالیز شیمیایی خاک			
درصد	عنصر		
59/5	Si		
7/83	Ca		
4/20	Mg		
4/50	Fe		
7/80	AI		
<1	Ti, Mn		
9/80	L.O.I		

<b>جدول 2</b> حدود اتربرگ خاک			
رطوبت	حدود اتربرگ		
23/48 %	حد روانی		
19/64 %	حد خمیری		
18 %	حد انقباض		

<b>↓</b> i  9	2-بررسی روابط حاکم و فرضیات مسئله
$\int \int (\mathbf{R},\mathbf{H}) d\mathbf{R}$	آنالیز تنش و تغییر شکل، وابسته به انتقال جرم وحرارت است. به عبارت دیگر
$  4_{i}^{\mathbf{q}}  $	میتوان گفت حرکت مایع از گرادیان رطوبت نتیجه میشود و ارتباطی به
	تعادل مکانیکی ندارد. در این مطالعه فرایند خشک شدن در یک استوانه تو
	خالی به ارتفاع mm 20 و قطر خارجی mm 200 در حالت دو بعدی و سه
<b>∀</b> j Iq	بعدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. قطر داخلی قطعه بین مقادیر
(الف)	mm 60، 90، 110 و 160 متغير است. هندسه مدل در شكل 1 (نماى جلو)
<b>شکل 1</b> نمای شماتیک از ه	نشان داده شده است. در حالت سه بعدی، نمونه از هر دو جهت به صورت



مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دوره 15، شماره 10

ضریب انقباض جرمی وابستگی شدیدی به رطوبت دارد. براساس حدود اتربرگ خشک شدن ماده تا رسیدن به رطوبت حد انقباض همراه با کاهش هم زمان حجم و رطوبت است اما در رطوبتهای زیر حد انقباض کاهش رطوبت همراه با تغییرات حجم نیست (شکل 2). در این مطالعه حدود اتربرگ ماده مورد مطالعه در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بیرجند اندازه گیری شد (جدول2). در شکل 3 منحنی تغییرات ضریب انقباض جرمی  $\beta$  نسبت به مولوبت نشان داده شده است. این نمودار با اندازه گیری تغییرات حجم مدل در طوبت نشان داده شده است. این نمودار با اندازه گیری تغییرات حجم مدل در ترطوبت نشان داده شده است. این نمودار با اندازه گیری تغییرات حجم مدل در تولوبت نشان داده شده است. این نمودار با اندازه گیری تغییرات حجم مدل در تولوبت نشان داده شده است. این نمودار با اندازه گیری تغییرات حجم مدل در تولول فرآیند خشک شدن در آزمایشگاه به دست آمده است.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = \mathbf{0}$$
(16)

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \mathbf{0}$$
(17)

$$\sigma_{xx} = \lambda (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 2\mu \varepsilon_{xx} - 3K\beta (w - w_0)$$
(18)  
- 3K\alpha (T - T\_0)

$$\sigma_{yy} = \lambda (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 2\mu \varepsilon_{yy} - 3K\beta (w - w_0) - 3K\alpha (T - T_0)$$
(19)

$$\sigma_{\rm xy} = 2\mu\varepsilon_{\rm xy} \tag{20}$$



$$\frac{d\rho_{\rm l}}{dt} + \operatorname{div}(\rho_{\rm l}\vec{v}_{\rm l}) = \mathbf{0}$$
<sup>(2)</sup>

$$\rho \vec{v} = \rho_{\rm s} \vec{v}_{\rm s} + \rho_{\rm l} \vec{v}_{\rm l} \tag{3}$$

$$= \rho_1 + \rho_s \tag{4}$$

ρ

با توجه به دو فازی فرض کردن محیط متخلخل رابطه (5) برقرار است.  
$$ho_s = (1 - \phi) 
ho_s^s$$
 (5)

علاوه بر این شار جرم می تواند به ترمهای نفوذ و جابجایی تجزیه شود (رابطه ()):

$$\rho_{\rm k}\vec{v}_{\rm k} = \vec{J}_{\rm D,K} + \rho_{\rm k}\vec{v} \qquad \mathbf{k} = \mathbf{I},\mathbf{s}$$
(6)

رطوبت w به صورت رابطه (7) تعریف می شود.

9

$$w = \frac{\rho_{\rm l}}{\rho_{\rm s}} \tag{7}$$

فرض کنید شار مایع فقط بر اثر نفوذ است (بدون اثر گرانش). این شار می-تواند نسبت به مرجع فاز جامد با استفاده از معادلات (3)، (6) و (7) به صورت رابطه (8) بیان شود.

$$\rho_{l}(\vec{v}_{l} - \vec{v}_{s}) = -\frac{\rho}{1 + w} D_{ls} \overline{\text{grad}}(w)$$
(8)
$$(2) \quad (1) \quad \text{in Nale} \quad \text{in a state stat$$

با ترکیب و گسترش روابط قبلی با دو معادله بقای جرم (معادلات (۱) و (2)) معادله انتقال مایع به صورت رابطه (9) و (10) در می اید [17].

$$-\frac{\partial \rho_{\rm l}}{\partial t} - \operatorname{div}(\rho_{\rm l} \vec{v}_{\rm s}) = -\operatorname{div} \frac{\rho}{1+w} D_{\rm ls} \overline{\operatorname{grad}}(w) \tag{9}$$

$$\rho_{l} = w\rho_{s} \Rightarrow \rho_{s} \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \vec{v}_{s} \overline{\text{grad}}(w) \right)$$
$$= \operatorname{div} \left( \frac{\rho}{1 + w} D_{ls} \overline{\text{grad}}(w) \right)$$
(10)

#### 4-معادلات بقاى انرژى

با توجه به این فرضیه که تبخیر فقط در سطوح انجام می شود، انتقال حرارت داخلی از قانون فوریه با ضریب رسانایی مناسب که وابسته به رطوبت است تبعیت می کند. بنابراین، انتقال حرارت می تواند به صورت رابطه (11) بیان شود [17].

$$\frac{\partial(\rho C_{\rm p} T)}{\partial t} + \vec{v}_{\rm s} \overline{\text{grad}}(\rho C_{\rm p} T) - \frac{D}{\mathbf{1} + w} \overline{\text{grad}}(w) \overline{\text{grad}}(\rho C_{\rm p} T) = div \left(k \, \overline{\text{grad}}(T)\right)$$
(11)

#### 5-تنش های ناشی از خشک شدن

مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دورہ 15، شمارہ 10

فرض شده است که مواد خشک شده رفتار الاستیک دارند. معادلات حاکم

شامل معادلات تعادل مکانیکی است. معادله توصیف کننده رفتار تغییر شک
ماده (رابطه (12)) به دو قسمت تجزیه شده است، یکی به رفتار مکانیکی <sup>۸</sup>
و دیگری به گرادیان دما و رطوبت $arepsilon^{ m r}$ مربوط میشود [18].
$= \varepsilon^{M} + \varepsilon^{r} $ (12)
نانسور کرنش $arepsilon^{ ext{r}}$ به گرادیان رطوبت $arepsilon^{ ext{H}}$ و گرادیان دما $arepsilon^{ ext{T}}$ بستگی دارد. روابه
(15-13) این وابستگی را نشان می دهند.
$\mathbf{r} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{H}} \tag{13}$
$\Gamma = \alpha (T - T_0) $ (14)
$H = \beta (w - w_0) \tag{15}$

$$\varepsilon_{\rm xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{21}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{22}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$
(23)

استفاده از روابط (18-20) در معادلات (16) و (17) اجازه استنتاج توزیع فضایی جابجایی محصول هنگام خشک شدن را میدهد. فرض شده است که سرعت جامد و سرعت محصول در هر نقطه با هم برابراند. سرعت محصول (جامد و مایع) به کمک رابطه (24) و (25) محاسبه می گردد.

$$(v_s)_x = \frac{\partial u}{\partial t} \tag{24}$$

$$(v_s)_y = \frac{\partial v}{\partial t}$$
(25)

## 6-شرایط اولیه و شرایط مرزی

در ابتدا، دما و رطوبت یکنواخت هستند. رابطه (26) و رابطه (27) شرایط اولیه محصول را نشان می دهند.

$$T(z,\mathbf{0}) = T_0 \tag{26}$$

$$w(z,\mathbf{0}) = w_0 \tag{27}$$

شرایط مرزی حرارت و جرم در جدول 3 و 4 نشان داده شده است.  $mL_v$  مرزی حرارت منتقل شده به وسیله جابجایی،  $mL_v$  حرارت منتقل شده به واسطه تبخیر رطوبت و  $\frac{\partial T}{\partial x}$  حرارت منتقل شده در مدل به وسیله شده به واسطه تبخیر رطوبت و  $k \frac{\partial T}{\partial x}$  حرارت منتقل شده در مدل به وسیله با دانایی،  $Q_{wall}$  حرارت تشعشعی مبادله شده با دیوارهای احاطه کننده است. با خاکستری فرض کردن سطح و دیوارهای احاطه کننده، حرارت تشعشعی با رابطه (28) بیان می شود.

$$Q_{\text{wall}} = \frac{x(T_{\text{wall}}^4 - T_{\text{surf}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{products}}} + \frac{A_{\text{products}}}{A_{\text{wall}}(1/\varepsilon_{\text{wall}} - 1)}}$$
(28)

$$x = L: \sigma_{xx} = \mathbf{0}; \quad \sigma_{xy} = \mathbf{0}$$
(29)

 $x = \mathbf{0} : u = \mathbf{0} \tag{30}$ 

$$y = H: \sigma_{yy} = 0; \quad \sigma_{xy} = 0 \tag{31}$$

 $y = \mathbf{0} : v = \mathbf{0} \tag{32}$ 

## 7-مدول يانگ

در واقیعت رفتار خاک رس نسبتا پیچیده است. اولا به دلیل اثرات ویسکوزیته مقدار مدول یانگ و تنش تسلیم به نرخ تغییر شکل وابسته است. ثانیا رفتار

**جدول 3** شرایط مرزی انتقال حرارت و انتقال جرم در حالت دو بعدی

انتقال جرم	انتقال حرارت	سطح		
<i>ṁ</i> <b>= 0</b>	<b>q̇ = 0</b>	O-H		
$\dot{m} = -\rho_{\rm s} D \frac{\partial w}{\partial y}$	$h(T_{a} - T_{surf}) + Q_{wall} = \dot{m}l_{v}(T_{surf}) + k\frac{\partial T}{\partial y}$	к-н H-R O-R		
جدول 4 شرایط مرزی انتقال حرارت و انتقال جرم در حالت سه بعدی				
انتقال جرم	انتقال حرارت	سطح		
$\dot{m} = -\rho_{\rm s} D \frac{\partial w}{\partial y}$	$h(T_{a} - T_{surf}) + Q_{wall} = m l_{v}(T_{surf}) + k \frac{\partial T}{\partial y}$	O-H R-H		
$\dot{m} = -\rho_{\rm s} D \frac{\partial w}{\partial y}$	$h(T_{a} - T_{surf}) + Q_{wall} = \dot{m} l_{v} (\tilde{T}_{surf}) + k \frac{\partial T}{\partial y}$	H-R O-R		

خاک رس در فشار و کشش متفاوت است. جهت رسیدن به یک مدل الاستیک کامل از هر دو این اثرات صرفنظر شده است. در این تحقیق از نمودار تغییرات مدول یانگ نسبت به رطوبت (شکل 4) که در گزارش کتلارز [19] آمده است، استفاده شده است.

مدول یانگ شدیدا به مقدار رطوبت وابسته است به طوری که در رطوبت صفر 100 برابر بیشتر از رطوبت اولیه است. در رطوبتهای بالا مدول یانگ به سرعت با کاهش رطوبت افزایش مییابد در حالی که برای رطوبتهای زیر 25% مدول یانگ، کم و بیش ثابت است. توجه داشته باشید که حد انقباض برای خاک مورد مطالعه 18% است.

## 8- تاثیر انقباض بر رفتار خشک شدن

خروج رطوبت و تنشهای خشک شدن مهمترین دلایل انقباض در فرایند خشک شدن هستند [20]. برای محاسبه تغییر شکل ناشی از تنشهای خشک شدن معادلات تعادل مومنتوم علاوه بر معادلات نفوذ باید حل شوند که منجر به یک سری دستگاه معادلات دیفرانسیلی می شود.

در انقباض همسان مهمترین تاثیر تغییر شکل بر رفتار خشک شدن کاهش سطح خشک شدن است که منجر به کاهش نرخ خشک شدن می شود. کاهش نرخ خشک شدن باعث کاهش تنشهای خشک شدن می شود. از این رو در نظر گرفتن تغییرات سطح در شبیه سازی تنشهای خشک شدن باعث افزایش دقت شبیه سازی می شود. در شکل 5 تاثیر در نظر گرفتن و نگرفتن انقباض در فرآیند خشک شدن نشان داده شده است [19].

مشاهده می شود که در دوره خشک شدن با نرخ ثابت (دوره اول) لحاظ کردن انقباض در شبیه سازی فرآیند باعث کاهش نرخ خشک شدن می شود. اما اختلاف در دو منحنی با شروع دوره دوم خشک شدن به سرعت از بین می رود. زیرا در دوره دوم با شکسته شدن لوله های موئین، سطح تبخیر به داخل محصول پرش می کند. در دوره دوم انقباض سطح تقریبا به پایان رسیده و انتقال رطوبت از عمق به سطح، در فاز گازی صورت می گیرد. در بیشتر مطالعات انجام شده بر روی شبیه سازی تنش هاش خشک شدن از تغییرات سطح خشک شدن صرفنظر شده است [21]. در این تحقیق با در نظر گرفتن تغییرات سطح در محاسبه نرخ خشک شدن اثر انقباض در نرخ خشک شدن لحاظ شده است. تغییرات سطح با استفاده از ضریب انقباض محاسبه می شود.

## 9- تبخیر در سطوح مواد متخلخل

برخلاف این پنداشت عمومی که خشک شدن با نرخ ثابت (دوره اول) فقط تا زمانی که سطح کاملا خیس است اتفاق میافتد، در مواد متخلخل آزمایشات فراوانی نشان دادهاند که تا زمانی که سطح نسبتا نمدار است نرخ خشک شدن میتواند ثابت باشد [9]. جهت سادهسازی مسئله فرض شده است که ماده

متخلخل تشکیل شده است از کرههایی با شعاع یکسان و مایع میتواند کاملا
سطح ذرات را خیس کند.
شکل 6 نمای بالای یک المان از سطح ماده متخلخل را نشان میدهد. در
شروع فرآیند کل سطح ماده متخلخل از آب پوشیده شده است. با ادامه
فرآیند خشک شدن سطح تبخیر با عقبنشینی به قسمت داخلی ماده
متخلخل نیروی مکش برای انتقال آب به سطح را فراهم میکند.
جهت تحلیل مکانیزم تبخیر، سطح متخلخل با مدل نشان داده شده در
شکل 7 سادەسازى شدە است.
مکانیزم تبخیر در سطوح مواد متخلخل مکانیزم از تبخیر لولههای موئین

294

مہندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دورہ 15، شما*ر*ہ 10

یا همان تبخیر از لایه نازک گسترش یافته است. لایه نازک گسترش یافته به صورت لایهای از مایع که در آن فشار جداسازی بر میدان جریان سیال حکومت می کند و عامل حرکت جریان به سمت ناحیه لایه نازک است تعریف مى شود (شكل 8) [19].



شکل 6 الف- ماده متخلخل در شروع فرآیند ب- ماده متخلخل در طول فرآیند





شکل 8 مکانیزم تبخیر از سطوح مواد متخلخل [22]

تبخیر از لایه نازک گسترش یافته به همراه مقاومت در برابر نفوذ بخار به محیط عامل خشک شدن با نرخ ثابت در دوره اول است. تبخیر از لایه نازک گسترش یافته کاهش نرخ خشک شدن به دلیل افزایش نقاط خشک را جبران می کند و نرخ خشک شدن را تقریبا ثابت نگه می دارد. نرخ تبخیر از سطوح نم دار از طريق رابطه (33) محاسبه مي شود [23].  $m_{\rm e} = \frac{(0.7581 + 0.42572v) \times (P_{\rm w} - \phi P_{\rm a})^{0.7}}{(0.7581 + 0.42572v) \times (P_{\rm w} - \phi P_{\rm a})^{0.7}}$ (33)

در رابطه بالا ( $m_{\rm e}$  (kg/m<sup>2</sup>s) در رطوبت، v (m/s) در رابطه بالا ( $m_{\rm e}$  (kg/m<sup>2</sup>s) در رابطه بالا سطح، Pw (Pa) فشار بخار اشباع در روی آب، Pa (Pa) فشار بخار اشباع در هوای محیط است. در دوره پیش گرم دمای سطح قطعه به دمای حباب تر در شرایط داخل محفظه میرسد. در طول دوره اول برابر با دمای حباب تر می باشد و در دوره دوم خشک شدن به تدریج برابر با دمای محفظه می شود .[24]

## 10- ضريب نفوذ رطوبت در داخل مدل

با توجه به تغییرات رطوبت در زمان و مکان در داخل مدل و وابسته بودن ضریب نفوذ رطوبت به مقدار رطوبت و دما، در هر لحظه ضریب نفوذ رطوبت با استفاده از معادله آرهنیوس (روابط (34-37)) محاسبه می شود [25].

$$D = D_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{a_{\mathrm{T}}} \left( \frac{X}{X_0} \right)^{a_{\mathrm{X}}}$$
(34)

$$D_0 = 7.36 \times 10^{-9} \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$
(35)

$$T_0 = 273 \text{ K}$$
  $a_{\rm T} = 9.5$  (36)

$$X_0 = 0.40 \, \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \, \text{d. b} \quad a_{\text{X}} = 0.5$$
 (37)

## 11- ضريب نفوذ بخار به محيط اطراف

(38)

(39)

ضريب انتقال رطوبت در هوا كه به دما وابسته است از طريق معادله (38) و (39) محاسبه می شود [26].

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.7.1 ]









در معادله بالا (**cm<sup>2</sup>/sec)** صریب نفوذ رطوبت در هوا، (**T (K)** دمای محیط، تابعی از متغیرهای جرم مولی است. در معادلات بالا  $M_{
m A}$  و  $M_{
m B}$  به ترتیب  $M_{
m r}$ جرم مولی هوا و رطوبت برحسب V<sub>A</sub> ، **g/mol** و V<sub>B</sub> به ترتیب حجم مولی هوا و رطوبت برحسب cm<sup>3</sup>/mol، و P فشار محيط برحسب atm است.

## 12- چگالی و گرمای ویژه

با تبخیر شدن رطوبت از سطح و کاهش یافتن رطوبت گرمای ویژه ماده کاهش مییابد همچنین با خارج شدن رطوبت ماده منقبض میشود و کاهش حجم پیدا می کند و این باعث تغییر چگالی مایع و جامد در طول فرآیند می-شود. تغییرات گرمای ویژه، چگالی جامد و چگالی مایع نسبت به تغییرات رطوبت از طریق روابط (40)، (41) و (42) محاسبه می شود.

$$C_p = \frac{1.1 + 4.2w}{1 + w} \tag{40}$$

$$\rho_{\rm s} = \frac{\rho_{\rm s}^0}{\mathbf{1} + \delta w} \tag{41}$$

$$\rho_1 = \frac{w\rho_s^0}{1+\delta w} \tag{42}$$

در روابط بالا  $\frac{\overline{v_1}}{\overline{v_s}} = \delta$  است. چگالی کل به کمک رابطه (43) محاسبه می شود.  $\rho = \frac{1}{\overline{V_s}} \frac{1+w}{1+\delta w}$ (43)

## 13-تنشهای حرارتی در فرایند خشک شدن

در شروع فرآیند دما و رطوبت در کل مدل یکسان است و مدل هم دما با دمای خشک کن است. اما با ادامه فرآیند خشک شدن و تبخیر رطوبت از سطح، دمای سطح به تدریج کاهش مییابد و به دمای حباب تر میرسد. با گذشت زمان کاهش دما به عمق مدل نفوذ می کند.

تبخیر و انتقال حرارت از محیط با عث ایجاد گرادیان دما در ماده و تنش های حرارتی میشود. مقدار گرادیان دما و تنشهای حرارتی در مقایسه با گرادیان رطوبت و تنشهای ناشی از گرادیان رطوبت ناچیز هستند [27] و در این تحقیق با هدف سادهسازی شبیهسازی فرآیند خشک شدن از محاسبه آنها صرفنظر شده است.

گرادیان دما همچنین باعث ایجاد گرادیان فشار بخار بین سطح و عمق و انتقال بخش ناچیزی از رطوبت در فاز گازی از عمق به سطح می شود. با توجه به این که این مطالعه محدود به دوره اول فرایند خشک شدن می شود، انتقال رطوبت در فاز گازی در مقایسه با انتقال رطوبت در فاز مایع و به وسیله مکانیزم نفوذ بسیار ناچیز است.

## 14-مدلسازی و شبیهسازی فر آیند

فرآیند خشک شدن خاک رس براساس مدل ریاضی بیان شده با پارامترهای متغیر ذکر شده در بخشهای قبل و پارامترهای ثابت ارائه شده در جدول 5 شبیه سازی شد. برای این منظور، به کمک حلگر عددی فنیکس که یک حل گر با ساختار باز است و برمبنای زبان برنامه نویسی پایتون می باشد، معادلات دیفرانسیل به روش المان محدود حل شده است. برای شبیه سازی فرایند خشک شدن به روش المان محدود از 3500 – 7500 المان مکعبی 8 گره ای با درون یابی خطی و المان چهار وجهی 4 گره ای با درون یابی خطی بسته به

جدول 5 خواص فیزیکی و مکانیکی مدل پارامتر مقدار فریب انبساط دمایی  $1e^{-5} \frac{1}{K^0}$  مقدار 0/4 مریب پواسون 0/4چگالی خشک  $\frac{kg}{m^3}$  2645  $\delta kg$  مای ویژه خاک  $0/840 \frac{kJ}{kg}$ رسانایی  $\frac{W}{mK^0}$  (سانایی

مدل 60 با هندسه دو بعدی در رسم نمودار انقباض برحسب زمان استفاده شد (شکل 13). در رسم نمودار تغییرات رطوبت برحسب زمان 6 نقطه مورد مطالعه قرار گرفت که در شکل 9 نشان داده شده است. نمودار تغییرات تنش برحسب زمان برای هر چهار مدل 60 – 90 – 100 – 100 هم در حالت دو بعدی و هم در حالت سه بعدی رسم شده است.

## 15-خشك نمودن قطعه و مشاهدات تجربي

به منظور بررسی و دقت معادلات ارائه شده به کمک مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی، فرایند خشک شدن مدل 110 در یک خشک کن آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای خشک شدن مانند دمای هوا، رطوبت نسبی و تغییرات هندسه در طول فرایند خشک شدن اندازه گیری و به کامپیوتر ارسال گردیده است. دمای هوا و رطوبت نسبی به استفاده از سنسور ترکیبی SHT25، که در کنار نمونه قرار داده شده است، اندازه گیری شد. دقت اندازه گیری سنسور برای دما ۵۰ 2/0و برای رطوبت 8/1% است.

کائولین مورد استفاده برای انجام آزمایشات تجربی بعد از ترکیب شدن با آب تا رسیدن به رطوبت تقریبی 40% (برمبنای خشک) به منظور همگن سازی به مدت 48 ساعت در یک محفظه در بسته قرار داده شد. نمونههای آماده شده با قالب مدل 110 در دمای 30 درجه سانتی گراد با رطوبت نسبی 25% خشک شد.

انقباض محصول مهمترین عامل ایجاد تنشهای خشک شدن است. کاهش شعاع خارجی و درصد انقباض حجمی مدل با استفاده از روش پردازش تصویر محاسبه شد. در جدول 6 نتایج حاصل از پردازش تصویر و شبیهسازی نشان داده شده است. در شکل 10 خروجی نرمافزار پردازش تصویر نشان داده شده است.

از مهمترین عوامل خطا میتوان به لحاظ نکردن اصطکاک در شبیهسازی اشاره کرد. اصطکاک سطح زیرین قطعه با سینی باعث کاهش نرخ تغییر شکل محصول در این قسمت میشود. دو فازی فرض کردن ماده، یکی دیگر از عوامل خطا در شبیهسازی میباشد زیرا نادیده گرفتن حضور و ظهور حباب-های هوا باعث ایجاد خطا در محاسبه نرخ انتقال جرم و ضریب انقباض می شود. در نهایت میتوان به خطای پردازش تصویر در محاسبه ابعاد هندسی محصول خشک شده اشاره کرد.

ابعاد مدل و نوع آنالیز در مشبندی مدل استفاده شده است.

در شبیه سازی فرآیند، زمان کافی برای رسیدن ماده از رطوبت اولیه 40% به محدوده رطوبت هایگراسکوپی (2%- 5%) داده می شود. در بررسی های انجام شده از چهار مدل مدور با قطر خارجی یکسان 200 میلی متر و قطرهای داخلی 60 – 90 – 100 – 160 میلی متر و ضخامت 20 میلی متر استفاده شده است. نام گذاری مدل ها براساس تنها پارامتر متفاوت آن ها یعنی قطر داخلی انجام شده است. برای نمونه مدل 60 به معنای قطعهای مدور از خاک رس به قطر خارجی 200 میلی متر و قطر داخلی 60 میلی متر و ضخامت 20 میلی متر است.

16-نتایج و بررسی آن فرآیند خشک شدن در حالت سه بعدی از سطوح جانبی (با شدت بیشتر در لبه ها) شروع می شود و با گذشت زمان در عمق نفوذ می کند اما در حالت دو بعدی فرآیند خشک شدن از مرکز سطوح بالا و پایین مدل شروع می شود و گسترش مییابد. در ابتدا رطوبت در سرتاسر مدل یکنواخت است و در ادامه فرآیند خشک شدن گرادیان رطوبت در مدل به وجود میآید. شکل 11 نمودار تغییرات رطوبت مدل 60 را که حاصل از شبیه سازی سینتیک خشک شدن در دمای

مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دورہ 15، شمارہ 10





**شکل 1**0 مقایسه مدل 110 با ابعاد واقعی

30 درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی 25 درصد با رطوبت اولیه 40% برمبنای خشک، برای 6 نقطه در حالت سه بعدی نشان میدهد.

در شکل 12 نمودار تغییرات رطوبت برای همان 6 نقطه در حالت دو بعدی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در حالت سه بعدی گره 4 که در لبه بیرونی مدل قرار دارد اولین و گره 2 که در عمق مدل قرار دارد آخرین گره در فرآیند خشک شدن است. اما در حالت دو بعدی گرههای 4، 5، 6 اولین گرهها و گرههای 1، 2، 3 آخرین گرهها در فرآیند خشک شدن هستند.

در گرههای که رطوبت خود را زودتر از بقیه گرهها ازدست میدهند به دلیل داشتن میل به جابجایی بیشتر نسبت به گرههای مجاور انتظار میرود که مقادیر تنش بیشتر باشد. خشک شدن تا رطوبت بحرانی w<sub>r</sub> همراه با کاهش هم زمان حجم و رطوبت میباشد و بعد از آن خشک شدن فقط با کاهش رطوبت ادامه مییابد و تغییرات حجم صفر میشود به عبارت دیگر ضریب انقباض صفر میشود.

در دوره اول خشک شدن گرادیان انقباض بین سطح و عمق باعث ایجاد تنشهای خشک شدن میشود. در پایان دوره اول با شکسته شدن تمامی لولههای موئین انقباض سطح تقریبا به حداکثر مقدار خود میرسد. در شروع دوره دوم خشک شدن با انتقال رطوبت در فاز گازی از عمق به سطح و کاهش گرادیان رطوبت، تنشهای خشک شدن به تدریج کاهش مییابند. در دوره اول خشک شدن، نرخ خشک شدن با نرخ تبخیر رطوبت از سطح محصول کنترل میشود. در حالی که در دوره دوم نرخ خشک شدن با نرخ نفوذ رطوبت در فاز گازی از عمق به سطح ماده متخلخل کنترل میشود. شکل 13 انقباض محصول برای دو گره را در حالت سه بعدی نشان میدهد. در هر دو حالت شدت کرنش در سطوح تبادل بیشتر از داخل محصول است. زیرا در سطح، تنشها ماکزیمم است و ذرات جامد به خاطر پر کردن فضای خالی ناشی از خروج آب حرکت میکنند.

گرادیان رطوبت در مدل باعث تغییر شکل ناهمگن مدل و به دنبال آن ظاهر شدن و ناپدید شدن تنشهای کششی و فشاری و در شرایط خاصی تنشهای پس ماند در مدل میشود. این سری از وقایع سبب تغییر انرژی کرنشی در مدل میشود. انرژی کرنشی معیار خوبی برای پیشبینی زمان رخ داد ترک است. در شکل 14 تغییرات انرژی کرنش برای مدل 60 در حالت دو بعدی نشان داده شده است.

تفاوت تمایل در کوچک شدن سطح و عمق باعث ایجاد تنشهای کششی بزرگ در لبهها و سطح (در صورت زیاد بودن ارتفاع مدل تنشهای فشاری در عمق) می شود. شدت تنشها در حالت سه بعدی بیشتر از حالت دو بعدی است. برای مثال، بیشترین مقدار تنش در مدل 60 برای حالت سه بعدی حدود 0/472 مگاپاسکال و در حالت دو بعدی حدود 10/0مگاپاسکال است. تنش میزز در 6 نقطه که در شکل 9 نشان داده شده است برای هر چهار مدل محاسبه شد. شکل 15 تغییرات تنش میزز در این 6 نقطه را در طول فرآیند خشک شدن برای حالت سه بعدی و شکل 16 برای حالت دو تنش ماکزیمم افزایش ضخامت به حالت دو بعدی است. مقدار افزایش می اید. مقدار افزایش تنش ماکزیمم به نسبت افزایش ضخامت در حالت سه بعدی بسیار بیشتر از تنش ماکزیمم مقدار خود می سند. در ادامه فرایند خشک شدن با نفوذ تدریجی مالت دو بعدی است. در پایان دوره اول خشک شدن، تنشهای خشک شدن به ماکزیمم مقدار خود می سند. در ادامه فرایند خشک شدن با نفوذ تدریجی رطوبت در فاز گازی از عمق به سطح، توزیع رطوبت یکنواخت تر می شود و

جهت مشاهده تأثیر در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ، نسبت به رطوبت در مقادیر تنشها، نمودار تغییرات تنش ماکزیمم در شبیهسازی با مدول یانگ ثابت و در شبیهسازی با مدول یانگ متغیر برای هر چهار مدل در حالتهای سه بعدی و دو بعدی به ترتیب در شکل 17 و شکل 18 نشان داده شدهاند. همانطور که مشاهده میشود مقدار تنش ماکزیمم به شدت به تغییرات مدول یانگ وابسته است به طوری که در مدل 60 در حالت دو بعدی و مدل 160 در حالت سه بعدی در نظر تغییرات مدول یانگ در شبیهسازی به ترتیب باعث کاهش 95% و 22% تنش ماکزیمم میشود. در حالت سه بعدی با توجه به این که در ضخامتهای پایین، تنش ماکزیمم، در شبیهسازی با مدول یانگ ثابت بیشتر از شبیهسازی با مدول یانگ متغیر است و به تدریج با افزایش ضخامت، تنش ماکزیمم با مدول یانگ متغیر است و به تدریج بیدی با افزایش مخامت، تنش ماکزیمم با مدول یانگ منیر است و به تدریج با افزایش ضخامت. تنش ماکزیمم با مدول یانگ متغیر از تنش ماکزیمم با با افزایش ضخامت. تنش ماکزیمم با مدول یانگ متغیر از تنش ماکزیمم با

ماکزیمم مقدار تنش میزز و مکان یا گره وقوع تنش ماکزیمم در هر دو حالت دو بعدی و سه بعدی، در شبیهسازی با مدول یانگ ثابت و متغیر برحسب مگاپاسکال در جدول 7 نشان داده شده است. مقدار مدول یانگ در

حالت ثابت با توجه به تغییرات کم مدول یانگ در رطوبتهای زیر 25% همان	
طور که در شکل 4 نشان داده شده است برابر با مدول یانگ ماده در رطوبت	
22% در نظر گرفته شده است (13 MPa). مقادیر مدول یانگ در حالت متغیر	
از شکل 4 استخراج شده است.	
در جدول 8 مقدار اختلاف بین تنش ماکزیمم در شبیهسازی با مدول	_
یانگ ثابت و شبیهسازی با مدول یانگ متغییر، ضخامت مدل و مکان یا گره	
وقوع تنش ماکزیمم در هر دو حالت دو بعدی و سه بعدی نشان داده شده	-
است.	

شبیه سازی	تصوير و	پردازش	نتايج	مقايسه	جدول 6
-----------	---------	--------	-------	--------	--------

خطا	شبیه سازی	پردازش تصویر	سطح
1/38 %	<b>16/415</b> mm	<b>16/646</b> mm	كاهش شعاع خارجي
12/21 %	30/136	34/329	در صد انقباض حجمی

مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دورہ 15، شمارہ 10



<b>جدول 7</b> مقدار و مکان تنش ماکزیمم							
گرہ	مدول يانگ متغير	گرہ	مدول يانگ ثابت	مدل	حالت		
3	<b>0/4723</b> Pa	3	<b>0/4657</b> Pa	60	<b>3</b> D		
3	<b>0/4078</b> Pa	3	<b>0/4240</b> Pa	90	<b>3</b> D		
3	<b>0/3511</b> Pa	3	<b>0/3840</b> Pa	110	<b>3</b> D		
3	<b>0/1639</b> Pa	3	<b>0/2095</b> Pa	160	<b>3</b> D		
4	<b>0/1167</b> Pa	4	<b>0/1914</b> Pa	60	<b>2</b> D		
4	<b>0/1154</b> Pa	4	<b>0/1886</b> Pa	90	<b>2</b> D		
4	<b>0/1147</b> Pa	4	<b>0/1874</b> Pa	110	<b>2</b> D		
4	<b>0/1143</b> Pa	4	<b>0/1859</b> Pa	160	<b>2</b> D		

	متلاف در تنش ماکزیمم	<b>جدول 8</b> مقدار اخ		
گرہ	مقدار اختلاف در تنش ماکزیمم	ضخامت مدل	مدل	حالت
3	<b>-0/0066</b> Pa	70	60	<b>3</b> D
3	<b>0/0162</b> Pa	55	90	<b>3</b> D
3	<b>0/0329</b> Pa	45	110	<b>3</b> D
3	<b>0/0456</b> Pa	20	160	<b>3</b> D
4	<b>0/0747</b> Pa	70	60	<b>2</b> D
4	<b>0/0732</b> Pa	55	90	<b>2</b> D
4	<b>0/0727</b> Pa	45	110	<b>2</b> D
4	<b>0/0716</b> Pa	20	160	<b>2</b> D

با توجه به جدول 7 و جدول 8، شکل 17 و شکل 18 به طور خلاصه نتایج زیر حاصل می شود.

- در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ به شدت در مقدار تنش میزز ماکزیمم و دقت شبیهسازی اثر گذار است.
- در حالت خشک شدن سه بعدی با توجه به این که در قطعات نازک مقدار تنش ماکزیمم در شبیه سازی با مدول یانگ متغیر بیشتر است و در قطعات ضخیم مقدار تنش ماکزیمم در شبیه سازی با مدول یانگ ثابت بیشتر است نمی توان هیچ یک از روش های شبیه سازی را به عنوان روش ایمن تر معرفی کرد.
- 3. در نظر گرفتن و یا در نظر نگرفتن تغییرات مدول یانگ تاثیری در مکان وقوع تنش ماکزیمم ندارد و این مکان فقط تابعی از هندسه خشک شدن است. همان طور که مشاهده می شود در حالت دو بعدی در گره 3 و در حالت سه بعدی در گره 4 تنش ماکزیمم است.
- 4. میانگین اختلاف در مقدار تنش ماکزیمم، در حالت دو بعدی



مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دورہ 15، شمارہ 10



مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دوره 15، شماره 10



مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دورہ 15، شما*ر*ہ 10

- [3] A.B. Denis, C.R. Gilbert, pp. 63-65, *Introduction to Drying of Ceramics*. The American Ceramic Society, United States, 2003.
- [4] T. Ketelaars, L. Pel, W.J. Coumans, P.J.A.M. Kerkhof, Drying kinetics: a comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves, *Chemical engineering science*, Vol. 50, No. 7, pp. 1187–1191, 1995.
- [5] S. Whitaker, Flow in porous media I: a theoretical derivation of Darcy's law, *Transport Porous Media*, Vol. 1, No.1, pp. 3–25, 1986.
- [6] S. hitaker, Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media, Advanced Heat Transfer, Vol. 13, pp. 119–203, 1977.
- S.C. Nowicki, H.T. Davis, L.E. Scriven, Microscopic determination of transport parameters in drying porous media, *Drying Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 925–946, 1992.
- [8] T.S. Taleghani, M. Dadvar, Two dimensional pore network modeling and simulation of non-isothermal drying by the inclusion of viscous effects, *Journal of Multiphase Flow*, Vol. 62, pp. 37-44, 2014.
- [9] M.R. Islam, S.S. Sablani, A.S. Mujumdar, An Artificial Neural Network Model for Prediction of Drying Rates, *Drying Technology*, Vol. 21, No. 9, pp. 1867–1884, 2007.
- [10] K. Mermerdas, E. Güneyisi, M. Gesog, T. Özturan, Experimental evaluation and modeling of drying shrinkage behavior of metakaolin and calcined kaolin blended concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 43, pp. 337-347, 2013.
- [11] J. Irudayarajt, K. Haghighi, Stress analysis of Viscoelastic materials during Drying: Theory and Finite Element Formulation, *Drying Technology*, Vol. 11, No. 5, pp. 901-927, 1993.
- [12] A. Erriguible, P. Bbernada, F. Couture, M. Roques, Simulation of Convective Drying of a porous medium with boundary condition provided by CFD, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 84, No. 2, pp. 113–123, 2006.
- [13] A.J.J. Van der zanden, A.M.E. Schoenmakers, P.J.A.M. Kerkhof, Isothermal Vapour and Liquid Transport inside Clay During Drying, Drying Technology, Vol. 14, No. 3&4, pp. 647-676, 1996.
- [14] J. Banaszak, S.J. Kowalski, Drying induced stresses estimated on the base of elastic and viscoelastic models, *Chemical Engineering*, Vol. 86 No. 1&2, pp. 139–143, 2002.
- [15] Kh. 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.
- [16] F. Augier, W.J. Coumans, A. Hugget, E.F. Kaasschieter, On the Risk of Cracking in Clay Drying, *Chemical Engineering*, Vol. 86, No. 1&2, pp. 133–138, 2002.
- [17] D. Mihoubi, F. Zagrouba, J. Vaxelaire, A. Bellagi, M. Roques, Transfer Phenomena During the Drying of a Shrinkable Product: Modeling and Simulation, *Drying Technology*, Vol. 22, No. 1&2, pp. 91-109, 2004.
- [18] D. Mihoubi, A. Bellagi, Stress generated during drying of saturated porous media, *Transport in Porous Media*, Vol. 80, No. 3, pp. 519-536, 2009.
- [19] A.A.J. Ketelaars, *Drying Deformable Media, Kinetics, Shrinkage and Stress*, PhD Thesis, Eindhoven, University of Eindhoven, 1993.
- [20] S.J. Kowalski, J. Banaszak, A. Rybicki, Plasticity in materials exposed to drying, *Drying Technology*, Vol. 65, No. 15, pp. 5105–5116, 2010.
- [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] H. Wang, S.V. Garimella, J.Y. Murthy, (2007) Characteristics of an evaporating thin film in a microchannel, *heat and mass transfer*, Vol. 50, No. 19&20, pp. 3933-3942, 2007.
- [23] R. Tang, Y. Etzion, Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface, *building and environment*, Vol. 39, No. 1, pp. 77-86, 2004.
- [24] M.V. Belleghem, M. Steeman, H. Janssen, A. Janssens, M.D. Paepe, Validation of a coupled heat, vapor and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD, *Building and Environment*, Vol. 81, pp. 340-353, 2014.
- [25] A.S. Mujumdar, *handbook of industrial drying*, pp. 83-88, Taylor & Francis Group, 2006.
- [26] E.N. Fuller, P.D. Schettler, J.S. Giddings, New Method for Prediction of Binary Gas-Phase Diffusion Coefficients, *Industrial & Engineering chemistry*, Vol. 58, No. 5, pp. 18-27, 1966.
  [27] G. Caceres, D. Bruneau, W. Jomaa, Two-Phase Shrinking Porous Media Drying: A Modeling Approach Including Liquid Pressure Gradients Effects, *Drying Technology*, Vol. 25, No. 12, pp. 1927–1934, 2007.

## 17-نتيجه گيري

در این مطالعه فرآیند خشک شدن خاک رس براساس مدل ریاضی بیان شده شبیه سازی شد. مشاهده شد که گرادیان رطوبت در مدل، باعث تغییر شکل نا همگن مدل و به دنبال آن ظاهر شدن و ناپدید شدن تنشهای کششی و فشاری و در شرایط خاصی تنش های پس ماند در مدل می شود. شدت تنش ها در حالت سه بعدی بشتر از حالت دو بعدی است. در این مطالعه همچنین تاثیر تغییرات مدول یانگ، نسبت به رطوبت مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده گردید که در نظر گرفتن و یا در نظر نگرفتن تغییرات مدول یانگ در شبیه-سازی تاثیری در مکان وقوع تنش ماکزیمم ندارد و این مکان فقط تابعی از هندسه خشک شدن است. اما در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ در شبیه سازی به شدت در مقدار تنش ماکزیمم موثر است و باعث به تاخیر افتادن زمان وقوع تنش ماکزیمم موثر است و باعث به تاخیر افتادن

## 18-فهرست علائم

$$rac{J}{kg.K}$$
 گرمای ویژه،  $C_P$   
 $rac{m^2}{s}$  ضریب نفوذ،  $D$   
انرژی، L

$$rac{J}{kg}$$
 گرمای نهان تبخیر اب،  $h_{\mathrm{fg}}$   $h_{\mathrm{fg}}$   $rac{W}{m.K}$  رسانایی حرارتی،  $k$ 

$$rac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^2\mathrm{s}}$$
نرخ تبخير رطوبت،  $m_\mathrm{e}$   
فشار، **Pa**

$$\frac{m^3}{kg}$$
 حجم مخصوص،  $\overline{V}$ 

W

#### علائم يونانى

$$_{\mathrm{m}^2}$$
 رطوبت نسبی هوا  $\phi$ 

## زير نويس

- s جامد
- / مايع
- w سطح ماده مرطوب
  - a هوای محیط

## 19-مراجع

[1] Kh. Khalili, S.Y. Ahmadi Brooghani, M. Bagherian, Experimental and

.ac.ir on 2024-05-19

- numerical study of the ceramic drying process and cracking, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 4, No. 1, pp. 119-129, 2014. (In Persian).
- [2] Kh. 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).