



# بهبود مدل سازی و شبیه سازی تغییر شکل در فرآیند خشک شدن

محسن حیدری<sup>1</sup>، خلیل خلیلی<sup>2\*</sup>

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 9717431396، k Khalili@birjand.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 خرداد 1394

پذیرش: 13 شهریور 1394

ارائه در سایت: 30 شهریور 1394

کلید واژگان:

خشک شدن

مدل سازی

انتقال جرم و حرارت

تحلیل تنش

تحلیل کرنش

## چکیده

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 شبیه سازی فرآیند خشک شدن جابجایی یک سرامیک با استفاده از مدل نفوذ و با در نظر گرفتن تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی ماده مانند مدول یانگ و ضریب انقباض نسبت به رطوبت است. در این مطالعه فرایند خشک شدن در حالت 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 تغییرات مدول یانگ در طول فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شده است که تغییرات مدول یانگ به شدت بر مقدار تنش های خشک 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.

## Modeling Enhancement and Simulation of Distortion in Drying Process

Mohsen Heydari, Khalil Khalili\*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\* P.O.B. 9717431396, Birjand, Iran. k Khalili@birjand.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 04 June 2015  
Accepted 04 September 2015  
Available Online 21 September 2015

### Keywords:

Drying  
Simultaneous Heat and Mass Transfer  
Stress Analysis  
Strain Analysis

## ABSTRACT

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 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.

## 1- مقدمه

ماده به واسطه انقباض می شود. زمانی که تنش ها به ماکزیمم مقدار خود در طول فرآیند خشک شدن می رسند باعث تغییر شکل های بزرگ می شوند [1]. اگر مقادیر این تنش ها بیشتر از حد معینی باشد منجر به ایجاد عیب و نقص مانند ظاهر شدن ترک می شود [2]. بیان فرآیند خشک شدن و جابجایی های ماده به صورت یک مدل ریاضی با هدف بهینه سازی و کنترل کلیه مراحل فرآیند خشک شدن بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

می توان فرآیند خشک شدن یک ماده را به دو دوره تقسیم کرد. در دوره اول نرخ خشک شدن یا نرخ کاهش رطوبت تقریباً ثابت است و نرخ تبخیر رطوبت از سطح عامل محدود کننده نرخ خشک شدن است اما در دوره دوم نرخ خشک شدن به سرعت کاهش می یابد و نفوذ رطوبت از عمق به سطح

خشک شدن خاک رس نقش مهمی در تولید بسیاری از مواد صنعتی مانند کاشی، آجر، سفال و ... دارد. کیفیت محصولات خشک شده به شدت تحت تاثیر فرآیند خشک شدن است. زمانی که خشک شدن گرادیان رطوبت در ماده به وجود می آورد، در یک محیط با قابلیت تغییر شکل، ذرات جامد به صورت غیر یکنواخت جابجا می شوند. این جابجایی غیر یکنواخت باعث ایجاد تنش در ماده می شود. جهت جلوگیری از تغییر شکل های نامطلوب و یا ایجاد ترک، کنترل کردن این تنش ها بسیار مهم است. دانستن پدیده های مکانیکی که در طول فرآیند خشک شدن در داخل ماده رخ می دهند برای جلوگیری از تخریب ساختاری لازم و ضروری است. خارج شدن رطوبت باعث تغییر ابعاد

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

برای ساده سازی مساله فرضیات زیر در نظر گرفته شده اند:

- خاک رس یک ماده متخلخل ایزوتروپیک متشکل از ذرات جامد و مایع است.
- در بازه رطوبت 0-40% مخلوط آب و خاک رس رفتار کاملاً الاستیک از خود نشان می دهد [16].
- رطوبت و دمای اولیه یکنواخت است.
- انقباض ماده برابر با مقدار آب خارج شده از ماده است و از تولید هرگونه حباب هوا صرف نظر شده است.
- تبخیر فقط در سطوح ماده انجام می شود.
- شبیه سازی 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 می شوند.

### 3- معادلات بقای 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:

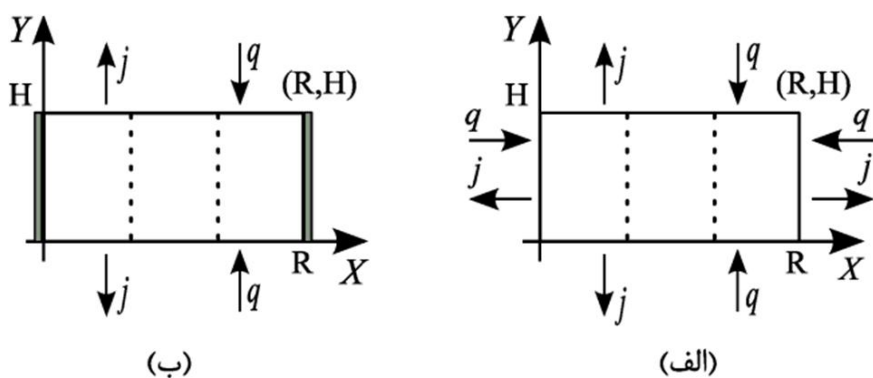
$$\frac{d\rho_s}{dt} + \text{div}(\rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (1)$$

جدول 1 آنالیز شیمیایی خاک

| عنصر   | درصد |
|--------|------|
| Si     | 59/5 |
| Ca     | 7/83 |
| Mg     | 4/20 |
| Fe     | 4/50 |
| Al     | 7/80 |
| Ti, Mn | <1   |
| L.O.I  | 9/80 |

جدول 2 حدود اتربرگ خاک

| حدود اتربرگ | رطوبت   |
|-------------|---------|
| حد روانی    | 23/48 % |
| حد خمیری    | 19/64 % |
| حد انقباض   | 18 %    |



شکل 1 نمای شماتیک از هندسه سیستم (الف) حالت سه بعدی (ب) حالت دو بعدی

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] متداول ترین مدل های ریاضی مورد استفاده برای بیان فرایندهای داخلی خشک شدن هستند. مدل نفوذ یک ساده سازی از مدل موئینگی است [6]. در این مدل ها نحوه اتصال فضاهای تخلخل تأثیری در مدل سازی فرایند خشک شدن ندارند. به عبارت دیگر این مدل ها محدود به محیط های 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 شبیه سازی کرده است [8]. مدل های ریاضی از آن جایی که به شدت غیرخطی هستند، نیاز به روش های حل عددی دارند که بسیار زمان بر هستند. از طرفی فرایندهای کنترلی نیازمند مدل هایی هستند که قادر به محاسبه سریع کارایی فرایند خشک شدن باشند، از این رو محققین بسیاری با استفاده از روش های مدل سازی هوشمند، به مدل سازی فرایند خشک شدن پرداخته اند [9]. مرمرداس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رگرسیون خطی مدل هایی برای محاسبه کرنش انقباضی در فرایند خشک شدن ارائه کرد [10]. روش المان محدود [11] و روش تفاضل محدود [12] متداول ترین روش های حل عددی مورد استفاده در فرایند خشک شدن هستند.

بیشتر مطالعات انجام شده در شبیه سازی فرایند 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 فرایند خشک شدن پرداخته شده است [13]. در مطالعات انجام شده در این زمینه نیز به منظور سهولت در شبیه سازی فرایند 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 فرایند خشک شدن شبیه سازی فرایند خشک شدن در محیط های با قابلیت تغییر شکل در دوره اول بهبود یافته است. همچنین با مقایسه مقادیر تنش ها و سیر تکاملی تنش ها با کارهای قبلی این نویسنده [15] اثر تغییرات مدول یانگ در مقادیر تنش ها 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 تأثیر پارامترهای ماده و شرایط مرزی بر مقادیر تنش ها از یک نمونه خاک رس با آنالیز شیمیایی و حدود اتربرگ مشخص (جدول 2 و 1) در تمامی شبیه سازی ها استفاده شده است.

### 2- بررسی روابط حاکم و فرضیات مسئله

آنالیز تنش و تغییر شکل، وابسته به انتقال جرم و حرارت است. به عبارت دیگر می توان گفت حرکت مایع از گرا دیان رطوبت نتیجه می شود و ارتباطی به تعادل مکانیکی ندارد. در این مطالعه فرایند خشک شدن در یک استوانه تو خالی به ارتفاع 20 mm و قطر خارجی 200 mm در حالت دو بعدی و سه بعدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. قطر داخلی قطعه بین مقادیر 60, 90, 110 و 160 متغیر است. هندسه مدل در شکل 1 (نمای جلو) نشان داده شده است. در حالت سه بعدی، نمونه از هر دو جهت به صورت

مایع:

$$\frac{d\rho_l}{dt} + \text{div}(\rho_l \vec{v}_l) = 0 \quad (2)$$

همچنین:

$$\rho \vec{v} = \rho_s \vec{v}_s + \rho_l \vec{v}_l \quad (3)$$

و

$$\rho = \rho_l + \rho_s \quad (4)$$

با توجه به دو فازی فرض کردن محیط متخلخل رابطه (5) برقرار است.

$$\rho_s = (1 - \phi)\rho_s^s \quad (5)$$

علاوه بر این شار جرم می تواند به ترم های نفوذ و جابجایی تجزیه شود (رابطه (6)):

$$\rho_k \vec{v}_k = \vec{J}_{D,K} + \rho_k \vec{v} \quad k = l, s \quad (6)$$

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

$$w = \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (7)$$

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.

$$\rho_l(\vec{v}_l - \vec{v}_s) = -\frac{\rho}{1+w} D_{ls} \overrightarrow{\text{grad}}(w) \quad (8)$$

با ترکیب و گسترش روابط قبلی با دو معادله بقای جرم (معادلات (1) و (2)) معادله انتقال مایع به صورت رابطه (9) و (10) در می آید [17].

$$-\frac{\partial \rho_l}{\partial t} - \text{div}(\rho_l \vec{v}_s) = -\text{div} \left( \frac{\rho}{1+w} D_{ls} \overrightarrow{\text{grad}}(w) \right) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho_l = w \rho_s \Rightarrow \rho_s \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \vec{v}_s \overrightarrow{\text{grad}}(w) \right) \\ = \text{div} \left( \frac{\rho}{1+w} D_{ls} \overrightarrow{\text{grad}}(w) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

#### 4- معادلات بقای انرژی

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].

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \vec{v}_s \overrightarrow{\text{grad}}(\rho C_p T) \\ - \frac{D}{1+w} \overrightarrow{\text{grad}}(w) \overrightarrow{\text{grad}}(\rho C_p T) \\ = \text{div}(k \overrightarrow{\text{grad}}(T)) \end{aligned} \quad (11)$$

#### 5- تنش های ناشی از خشک شدن

فرض شده است که مواد خشک شده رفتار الاستیک دارند. معادلات حاکم شامل معادلات تعادل مکانیکی است. معادله توصیف کننده رفتار تغییر شکل ماده (رابطه (12)) به دو قسمت تجزیه شده است، یکی به رفتار مکانیکی  $\epsilon^M$ ، و دیگری به گرادیان دما و رطوبت  $\epsilon^r$  مربوط می شود [18].

$$\epsilon = \epsilon^M + \epsilon^r \quad (12)$$

تانسور کرنش  $\epsilon^r$  به گرادیان رطوبت  $\epsilon^H$  و گرادیان دما  $\epsilon^T$  بستگی دارد. روابط (13-15) این وابستگی را نشان می دهند.

$$\epsilon^r = \epsilon^T + \epsilon^H \quad (13)$$

$$\epsilon^T = \alpha(T - T_0) \quad (14)$$

$$\epsilon^H = \beta(w - w_0) \quad (15)$$

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 رطوبت های 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 (جدول 2). در شکل 3 منحنی تغییرات ضریب انقباض جرمی  $\beta$  نسبت به رطوبت نشان داده شده است. این نمودار با اندازه گیری تغییرات حجم مدل در طول فرآیند خشک شدن در آزمایشگاه به دست آمده است. تنش ها معادلات تعادل (16) و (17) را ارضا می کنند.

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

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

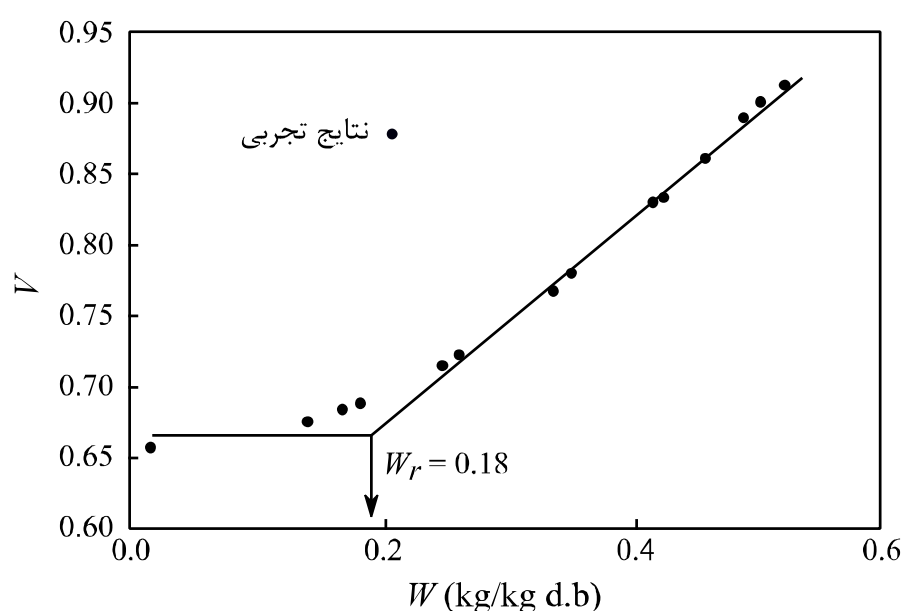
تنش ها به کمک روابط (18-20) به کرنش ها وابسته هستند.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} = \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + 2\mu\epsilon_{xx} - 3K\beta(w - w_0) \\ - 3K\alpha(T - T_0) \end{aligned} \quad (18)$$

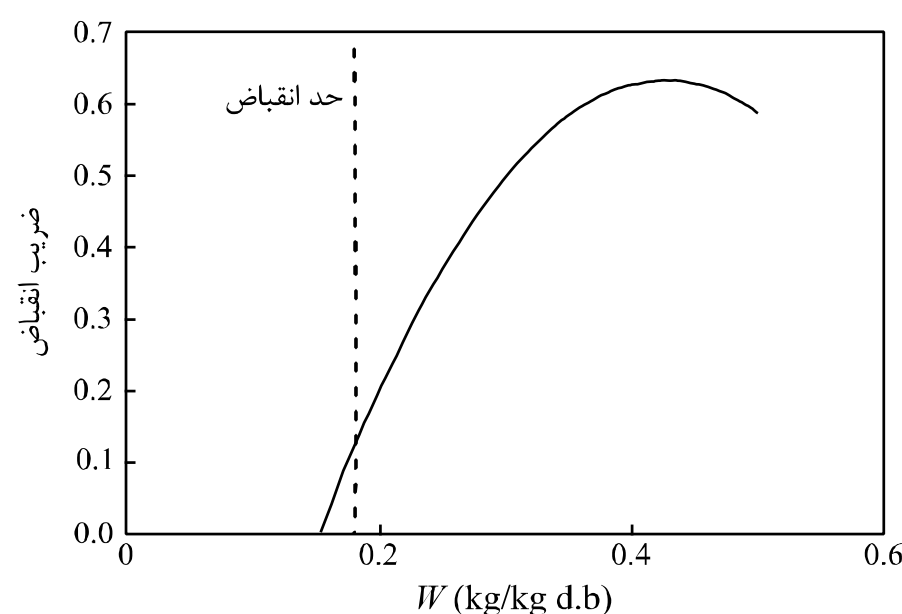
$$\begin{aligned} \sigma_{yy} = \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + 2\mu\epsilon_{yy} - 3K\beta(w - w_0) \\ - 3K\alpha(T - T_0) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\sigma_{xy} = 2\mu\epsilon_{xy} \quad (20)$$

کرنش ها با جابجایی جامد از طریق روابط (21-23) وابسته اند:



شکل 2 تغییرات حجم مدل نسبت به تغییرات رطوبت



شکل 3 تغییرات ضریب انقباض نسبت به رطوبت

خاک رس در فشار و کشش متفاوت است. جهت رسیدن به یک مدل الاستیک کامل از هر دو این اثرات صرف نظر 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 شدیداً به مقدار رطوبت وابسته است به طوری که در رطوبت صفر 100 برابر بیشتر از رطوبت اولیه است. در رطوبت های بالا مدول یانگ به سرعت با کاهش رطوبت افزایش می یابد در حالی که برای رطوبت های 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 تنش های خشک شدن مهمترین دلایل انقباض در فرایند خشک شدن هستند [20]. برای محاسبه تغییر شکل ناشی از تنش های 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 تنش های خشک شدن می شود. از این رو در نظر گرفتن تغییرات سطح در شبیه سازی تنش های 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 تقریباً 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 صرف نظر 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 کاملاً خیس است اتفاق می افتد، در مواد متخلخل آزمایشات فراوانی نشان داده اند که تا زمانی که سطح نسبتاً نمدار است نرخ خشک شدن می تواند ثابت باشد [9]. جهت ساده سازی مسئله فرض شده است که ماده متخلخل تشکیل شده است از کره هایی با شعاع یکسان و مایع می تواند کاملاً سطح ذرات را خیس کند.

شکل 6 نمای بالای یک المان از سطح ماده متخلخل را نشان می دهد. در شروع فرآیند کل سطح ماده متخلخل از آب پوشیده شده است. با ادامه فرآیند خشک شدن سطح تبخیر با عقب نشینی به قسمت داخلی ماده متخلخل نیروی مکش برای انتقال آب به سطح را فراهم می کند.

جهت تحلیل مکانیزم تبخیر، سطح متخلخل با مدل نشان داده شده در شکل 7 ساده سازی شده است.

مکانیزم تبخیر در سطوح مواد متخلخل مکانیزم از تبخیر لوله های موئین

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (22)$$

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

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

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

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

### 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.

$$T(z, 0) = T_0 \quad (26)$$

$$w(z, 0) = w_0 \quad (27)$$

شرایط مرزی حرارت و جرم در جدول 3 و 4 نشان داده شده است.  $h(T_a - T_{surf})$  حرارت منتقل شده به وسیله جابجایی،  $\dot{m}L_v$  حرارت منتقل شده به وسیله تبخیر رطوبت و  $k \frac{\partial T}{\partial x}$  حرارت منتقل شده در مدل به وسیله رسانایی،  $Q_{wall}$  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.

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

شرایط مرزی تنش ها به صورت روابط (29-32) هستند.

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

$$x = 0 : u = 0 \quad (30)$$

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

$$y = 0 : v = 0 \quad (32)$$

### 7- مدول یانگ

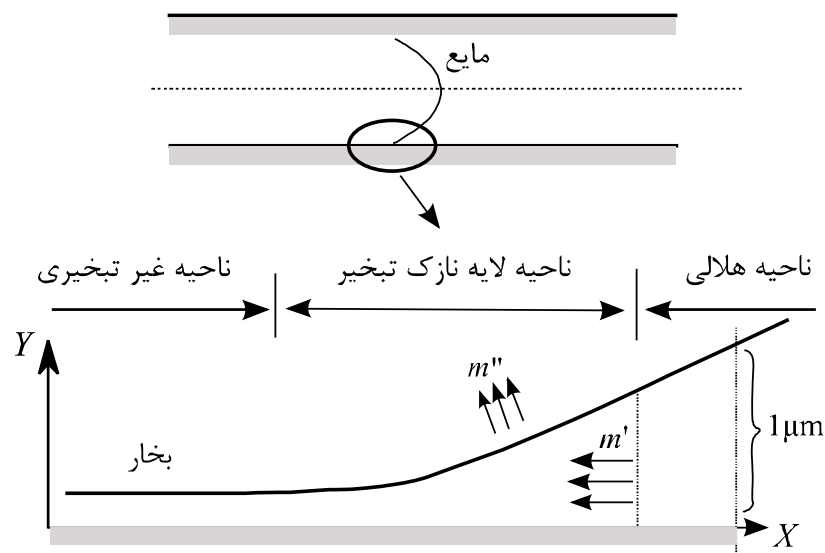
در واقعیت رفتار خاک رس نسبتاً پیچیده است. اولاً به دلیل اثرات ویسکوزیته مقدار مدول یانگ و تنش تسلیم به نرخ تغییر شکل وابسته است. ثانیاً رفتار

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

| سطح        | انتقال حرارت                                                                            | انتقال جرم                                          |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| O-H<br>R-H | $\dot{q} = 0$                                                                           | $\dot{m} = 0$                                       |
| H-R<br>O-R | $h(T_a - T_{surf}) + Q_{wall} = \dot{m}L_v(T_{surf}) + k \frac{\partial T}{\partial y}$ | $\dot{m} = -\rho_s D \frac{\partial w}{\partial y}$ |

جدول 4 شرایط مرزی انتقال حرارت و انتقال جرم در حالت سه بعدی

| سطح        | انتقال حرارت                                                                            | انتقال جرم                                          |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| O-H<br>R-H | $h(T_a - T_{surf}) + Q_{wall} = \dot{m}L_v(T_{surf}) + k \frac{\partial T}{\partial y}$ | $\dot{m} = -\rho_s D \frac{\partial w}{\partial y}$ |
| H-R<br>O-R | $h(T_a - T_{surf}) + Q_{wall} = \dot{m}L_v(T_{surf}) + k \frac{\partial T}{\partial y}$ | $\dot{m} = -\rho_s D \frac{\partial w}{\partial y}$ |



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 تقریباً ثابت نگه می دارد. نرخ تبخیر از سطوح نم دار از طریق رابطه (33) محاسبه می شود [23].

$$m_e = \frac{(0.7581 + 0.42572v) \times (P_w - \phi P_a)^{0.7}}{h_{fg}} \quad (33)$$

در رابطه بالا  $m_e$  (kg/m<sup>2</sup>s) نرخ تبخیر رطوبت،  $v$  (m/s) سرعت هوا بر روی سطح،  $P_w$  (Pa) فشار بخار اشباع در روی آب،  $P_a$  (Pa) فشار بخار اشباع در هوای محیط است. در دوره پیش گرم دمای سطح قطعه به دمای حباب تر در شرایط داخل محفظه می رسد. 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- ضریب 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 آرنهیموس (روابط (34-37)) محاسبه می شود [25].

$$D = D_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{a_T} \left( \frac{X}{X_0} \right)^{a_X} \quad (34)$$

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

$$T_0 = 273 \text{ K} \quad a_T = 9.5 \quad (36)$$

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

#### 11- ضریب نفوذ بخار به محیط اطراف

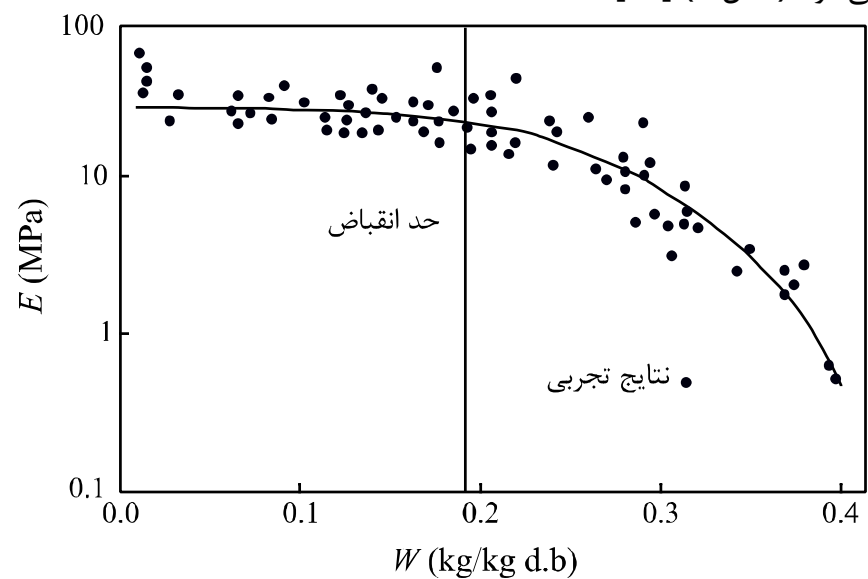
ضریب انتقال رطوبت در هوا که به دما وابسته است از طریق معادله (38) و (39) محاسبه می شود [26].

$$D = 0.001 \frac{T^{1.75} M_r^{0.5}}{P(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \quad (38)$$

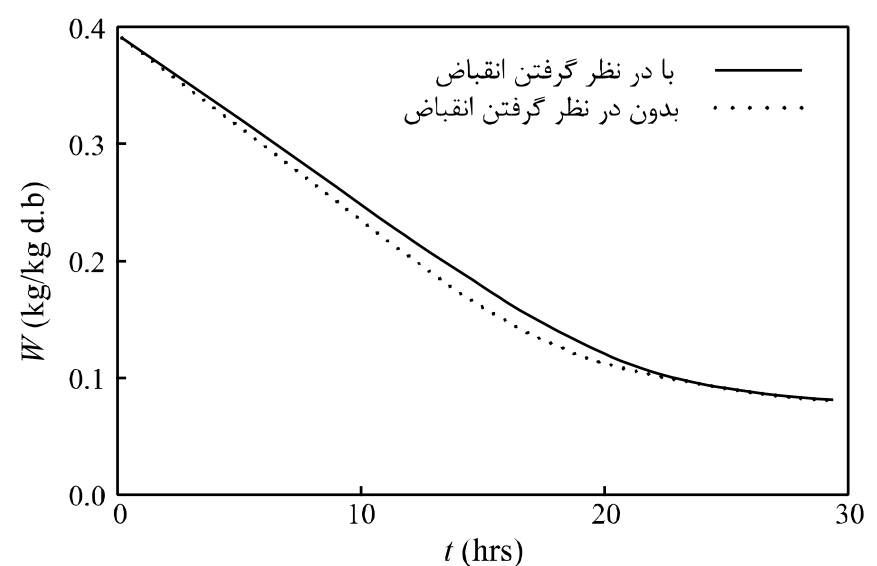
$$M_r = \frac{M_A + M_B}{M_A M_B} \quad (39)$$

در معادله بالا  $D$  (cm<sup>2</sup>/sec) ضریب نفوذ رطوبت در هوا،  $T$  (K) دمای محیط،  $M_r$  تابعی از متغیرهای جرم مولی است. در معادلات بالا  $M_A$  و  $M_B$  به ترتیب جرم مولی هوا و رطوبت برحسب g/mol،  $V_A$  و  $V_B$  به ترتیب حجم مولی هوا و رطوبت برحسب cm<sup>3</sup>/mol، و  $P$  فشار محیط برحسب atm است.

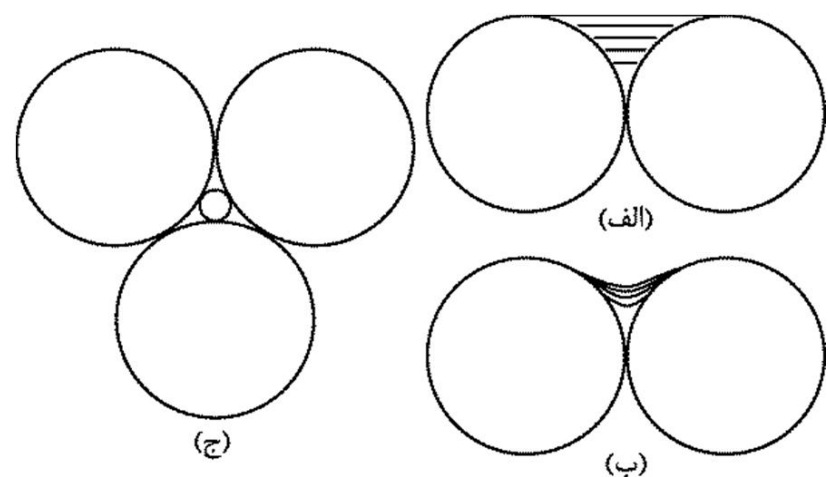
یا همان تبخیر از لایه نازک گسترش یافته است. لایه نازک گسترش یافته به صورت لایه ای از مایع که در آن فشار جداسازی بر میدان جریان سیال حکومت می کند و عامل حرکت جریان به سمت ناحیه لایه نازک است تعریف می شود (شکل 8) [19].



شکل 4 تغییرات مدول یانگ نسبت به رطوبت [16]

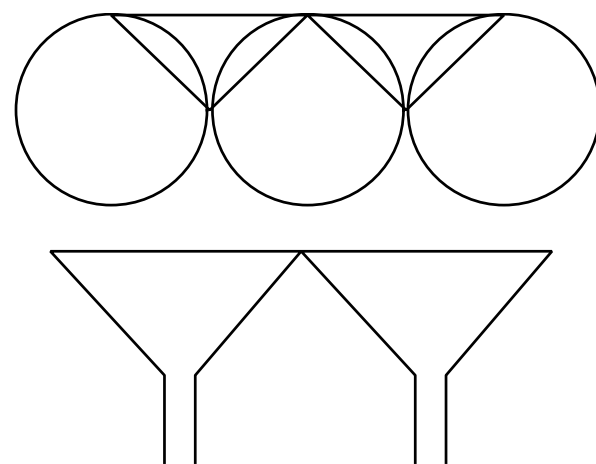


شکل 5 تأثیر انقباض همسان در رفتار خشک شدن [19]



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

ج - یک المان از ماده متخلخل



شکل 7 مدل سطوح متخلخل

## 12- چگالی و گرمای ویژه

با تبخیر شدن رطوبت از سطح و کاهش یافتن رطوبت گرمای ویژه ماده کاهش می یابد همچنین با خارج شدن رطوبت ماده منقبض می شود 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.

$$C_p = \frac{1.1 + 4.2w}{1 + w} \quad (40)$$

$$\rho_s = \frac{\rho_s^0}{1 + \delta w} \quad (41)$$

$$\rho_l = \frac{w\rho_s^0}{1 + \delta w} \quad (42)$$

در روابط بالا  $\delta = \frac{\bar{V}_l}{V_s}$  است. چگالی کل به کمک رابطه (43) محاسبه می شود.

$$\rho = \frac{1}{\bar{V}_s} \frac{1 + w}{1 + \delta w} \quad (43)$$

## 13- تنش های 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 می یابد و به دمای حباب تر می رسد. با گذشت زمان کاهش دما به عمق مدل نفوذ می کند.

تبخیر و انتقال حرارت از محیط باعث ایجاد گرادیان دما در ماده و تنش های حرارتی می شود. مقدار گرادیان دما و تنش های حرارتی در مقایسه با گرادیان رطوبت و تنش های ناشی از گرادیان رطوبت ناچیز هستند [27] و در این تحقیق با هدف ساده سازی شبیه سازی فرآیند خشک شدن از محاسبه آن ها صرف نظر 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- مدل سازی و شبیه سازی فرآیند

فرآیند خشک شدن رس براساس مدل ریاضی بیان شده با پارامترهای متغیر ذکر شده در بخش های قبل و پارامترهای ثابت ارائه شده در جدول 5 شبیه سازی شد. برای این منظور، به کمک حلگر عددی فنی کس که یک حل گر با ساختار باز است و بر مبنای 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 ابعاد مدل و نوع آنالیز در مش بندی مدل استفاده شده است.

در شبیه سازی فرآیند، زمان کافی برای رسیدن ماده از رطوبت اولیه 40% به محدوده رطوبت هایگراسکوپ (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 – 110 – 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 قطعه ای مدور از خاک رس به قطر خارجی 200 میلی متر و قطر داخلی 60 میلی متر و ضخامت 20 میلی متر است.

جدول 5 خواص فیزیکی و مکانیکی مدل

| پارامتر           | مقدار                   |
|-------------------|-------------------------|
| ضریب انبساط دمایی | $1e^{-5} \frac{1}{K^0}$ |
| ضریب پواسون       | 0/4                     |
| چگالی خشک         | $2645 \frac{kg}{m^3}$   |
| گرمای ویژه خاک    | $0/840 \frac{kJ}{kg}$   |
| رسانایی           | $1/3 \frac{W}{mK^0}$    |

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 – 110 – 160 هم در حالت دو بعدی و هم در حالت سه بعدی رسم شده است.

## 15- خشک نمودن قطعه و مشاهدات تجربی

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 0/2 °C و برای رطوبت 1/8% است.

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

انقباض محصول مهمترین عامل ایجاد تنش های 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 شبیه سازی نشان داده شده است. در شکل 10 خروجی نرم افزار پردازش تصویر نشان داده شده است.

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

## 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 می یابد.

در ابتدا رطوبت در سرتاسر مدل یکنواخت است و در ادامه فرآیند خشک شدن گرادیان رطوبت در مدل به وجود می آید. شکل 11 نمودار تغییرات رطوبت مدل 60 را که حاصل از شبیه سازی سینتیک خشک شدن در دمای

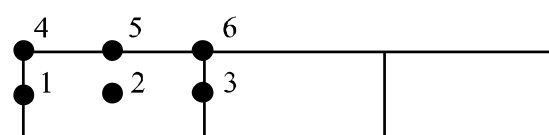
گرادیان رطوبت در مدل باعث تغییر شکل ناهمگن مدل و به دنبال آن ظاهر شدن و ناپدید شدن تنش های کششی و فشاری و در شرایط خاصی تنش های پس ماند در مدل می شود. این سری از وقایع سبب تغییر انرژی کرنشی در مدل می شود. انرژی کرنشی معیار خوبی برای پیش بینی زمان رخ داد ترک است. در شکل 14 تغییرات انرژی کرنش برای مدل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

تفاوت تمایل در کوچک شدن سطح و عمق باعث ایجاد تنش های کششی بزرگ در لبه ها و سطح (در صورت زیاد بودن ارتفاع مدل تنش های فشاری در عمق) می شود. شدت تنش ها 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 0/116 مگاپاسکال 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 بعدی نشان داده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش ضخامت به دلیل افزایش گرادیان رطوبت، تنش ماکزیمم افزایش می یابد. مقدار افزایش تنش ماکزیمم به نسبت افزایش ضخامت در حالت سه بعدی بسیار بیشتر از حالت دو بعدی است. در پایان دوره اول خشک شدن، تنش های خشک شدن به ماکزیمم مقدار خود می رسند. در ادامه فرایند خشک شدن با نفوذ تدریجی رطوبت در فاز گازی از عمق به سطح، توزیع رطوبت یکنواخت تر می شود و تنش های خشک شدن کاهش می یابند.

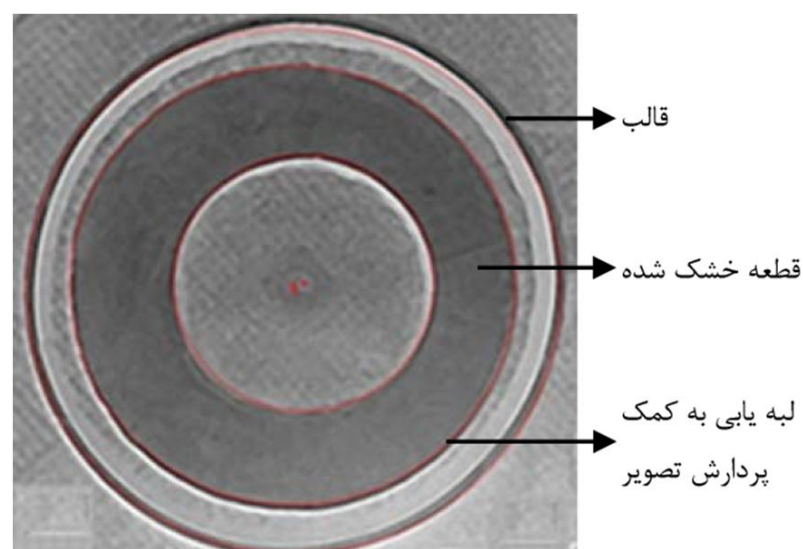
جهت مشاهده تأثیر در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ، نسبت به رطوبت در مقادیر تنش ها، نمودار تغییرات تنش ماکزیمم در شبیه سازی با مدول یانگ ثابت و در شبیه سازی با مدول یانگ متغیر برای هر چهار مدل در حالت های سه بعدی و دو بعدی به ترتیب در شکل 17 و شکل 18 نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود مقدار تنش 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 شبیه سازی به ترتیب باعث کاهش 39% و 22% تنش ماکزیمم می شود. در حالت سه بعدی با توجه به این که در ضخامت های پایین، تنش ماکزیمم، در شبیه سازی با مدول یانگ ثابت بیشتر از شبیه سازی با مدول یانگ متغیر است و به تدریج با افزایش ضخامت، تنش ماکزیمم با مدول یانگ متغیر از تنش ماکزیمم با مدول یانگ ثابت بیشتر می شود، در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ در شبیه سازی الزامی است و نمی توان هیچ یک از روش های شبیه سازی را در پیش بینی مقادیر تنش و وقوع ترک در فرایند خشک شدن ایمن تر دانست.

ماکزیمم مقدار تنش میزز و مکان یا گره وقوع تنش ماکزیمم در هر دو حالت دو بعدی و سه بعدی، در شبیه سازی 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 رطوبت های 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 شبیه سازی با مدول یانگ ثابت و شبیه سازی با مدول یانگ متغیر، ضخامت مدل و مکان یا گره وقوع تنش ماکزیمم در هر دو حالت دو بعدی و سه بعدی نشان داده شده است.



شکل 9 نمایش مکان هندسی نقاط مورد مطالعه در آنالیز تنش



شکل 10 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 می دهد. 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 گره های 4، 5، 6 اولین گره ها و گره های 1، 2، 3 آخرین گره ها در فرآیند خشک شدن هستند.

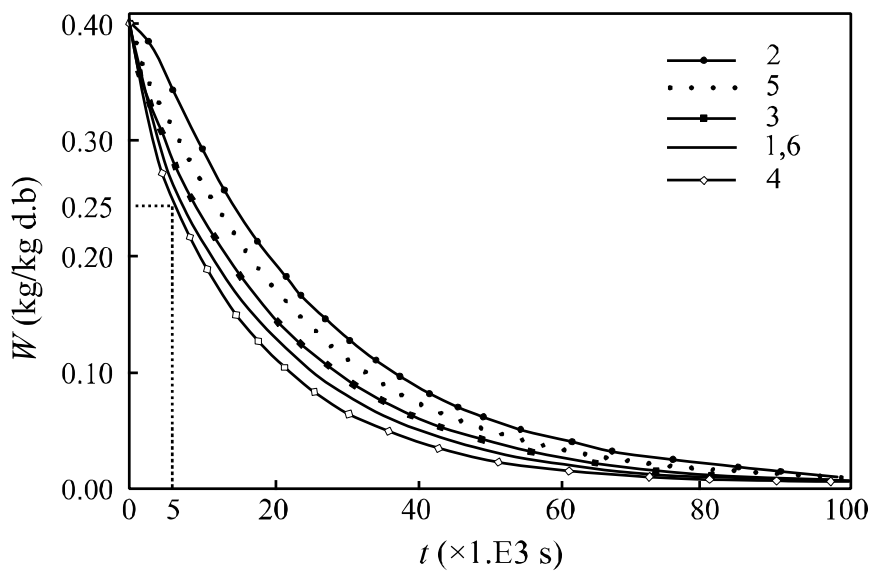
در گره های که رطوبت خود را زودتر از بقیه گره ها از دست می دهند به دلیل داشتن میل به جابجایی بیشتر نسبت به گره های مجاور انتظار می رود که مقادیر تنش بیشتر باشد. خشک شدن تا رطوبت بحرانی  $w_r$  همراه با کاهش هم زمان حجم و رطوبت می باشد و بعد از آن خشک شدن فقط با کاهش رطوبت ادامه می یابد و تغییرات حجم صفر می شود به عبارت دیگر ضریب انقباض صفر می شود.

در دوره اول خشک شدن گرادیان انقباض بین سطح و عمق باعث ایجاد تنش های خشک شدن می شود. در پایان دوره اول با شکسته شدن تمامی لوله های موئین انقباض سطح تقریباً به حداکثر مقدار خود می رسد. در شروع دوره دوم خشک شدن با انتقال رطوبت در فاز گازی از عمق به سطح و کاهش گرادیان رطوبت، تنش های خشک شدن به تدریج کاهش می یابند. در دوره اول خشک شدن، نرخ خشک شدن با نرخ تبخیر رطوبت از سطح محصول کنترل می شود. در حالی که در دوره دوم نرخ خشک شدن با نرخ نفوذ رطوبت در فاز گازی از عمق به سطح ماده متخلخل کنترل می شود.

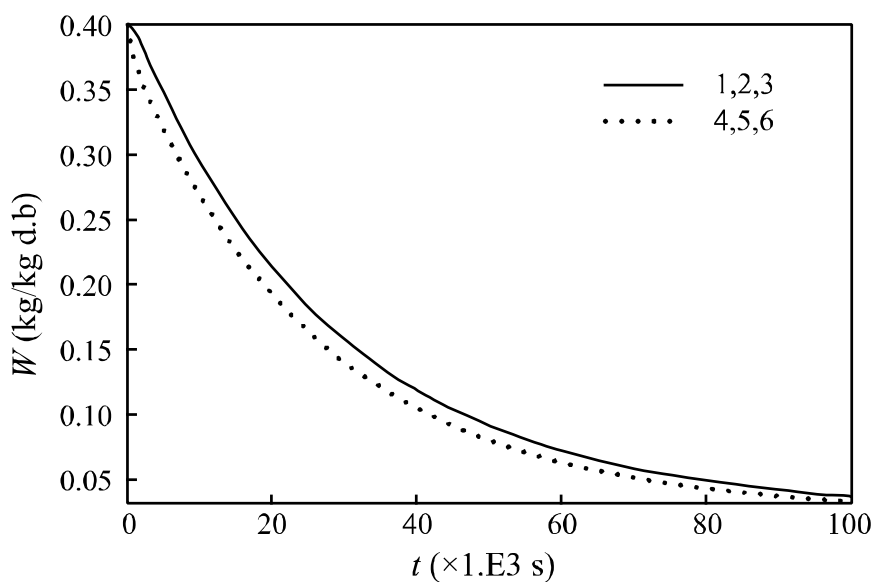
شکل 13 انقباض محصول برای دو گره را در حالت سه بعدی نشان می دهد. در هر دو حالت شدت کرنش در سطوح تبادل بیشتر از داخل محصول است. زیرا در سطح، تنش ها ماکزیمم است و ذرات جامد به خاطر پر کردن فضای خالی ناشی از خروج آب حرکت می کنند.

جدول 6 مقایسه نتایج پردازش تصویر و شبیه سازی

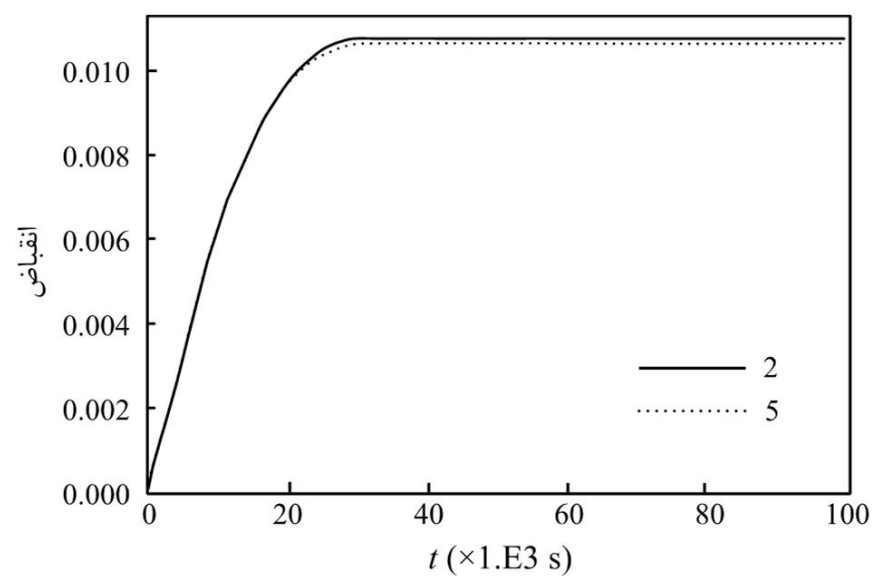
| خطا     | شبیه سازی | پردازش تصویر | سطح               |
|---------|-----------|--------------|-------------------|
| 1/38 %  | 16/415 mm | 16/646 mm    | کاهش شعاع خارجی   |
| 12/21 % | 30/136    | 34/329       | در صد انقباض حجمی |



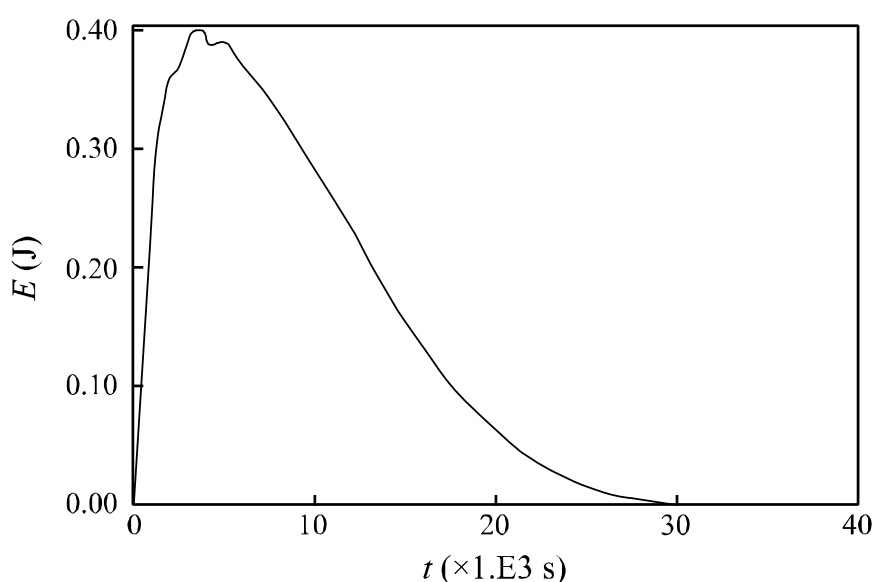
شکل 11 تغییرات رطوبت مدل 60 در حالت سه بعدی



شکل 12 تغییرات رطوبت مدل 60 در حالت دو بعدی



شکل 13 انقباض مدل 60 در حالت سه بعدی



شکل 14 تغییرات انرژی کرنشی

جدول 7 مقدار و مکان تنش ماکزیمم

| حالت | مدل | مدول یانگ ثابت | گره | مدول یانگ متغیر | گره |
|------|-----|----------------|-----|-----------------|-----|
| 3D   | 60  | 0/4657 Pa      | 3   | 0/4723 Pa       | 3   |
| 3D   | 90  | 0/4240 Pa      | 3   | 0/4078 Pa       | 3   |
| 3D   | 110 | 0/3840 Pa      | 3   | 0/3511 Pa       | 3   |
| 3D   | 160 | 0/2095 Pa      | 3   | 0/1639 Pa       | 3   |
| 2D   | 60  | 0/1914 Pa      | 4   | 0/1167 Pa       | 4   |
| 2D   | 90  | 0/1886 Pa      | 4   | 0/1154 Pa       | 4   |
| 2D   | 110 | 0/1874 Pa      | 4   | 0/1147 Pa       | 4   |
| 2D   | 160 | 0/1859 Pa      | 4   | 0/1143 Pa       | 4   |

جدول 8 مقدار اختلاف در تنش ماکزیمم

| حالت | مدل | ضخامت مدل | مقدار اختلاف در تنش ماکزیمم | گره |
|------|-----|-----------|-----------------------------|-----|
| 3D   | 60  | 70        | -0/0066 Pa                  | 3   |
| 3D   | 90  | 55        | 0/0162 Pa                   | 3   |
| 3D   | 110 | 45        | 0/0329 Pa                   | 3   |
| 3D   | 160 | 20        | 0/0456 Pa                   | 3   |
| 2D   | 60  | 70        | 0/0747 Pa                   | 4   |
| 2D   | 90  | 55        | 0/0732 Pa                   | 4   |
| 2D   | 110 | 45        | 0/0727 Pa                   | 4   |
| 2D   | 160 | 20        | 0/0716 Pa                   | 4   |

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

1. در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ به شدت در مقدار تنش میزز ماکزیمم و دقت شبیه سازی اثر گذار است.

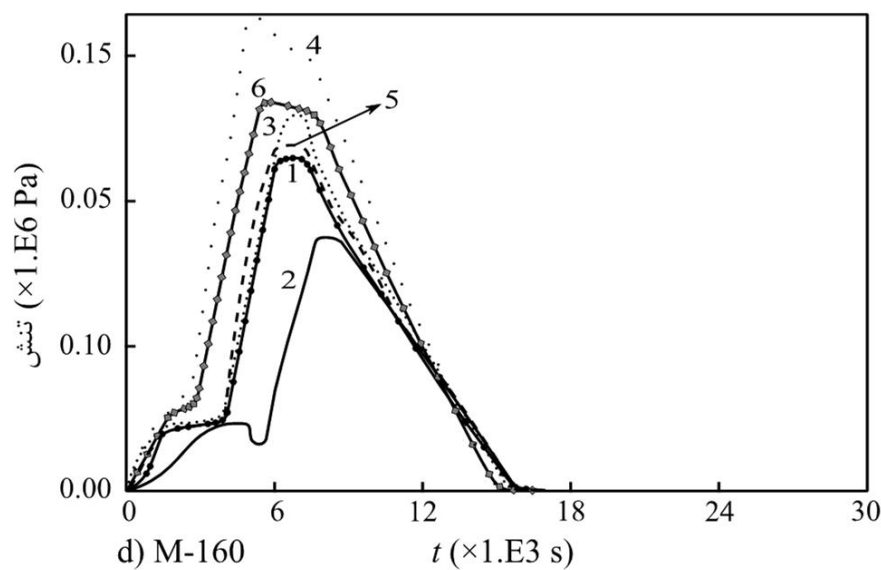
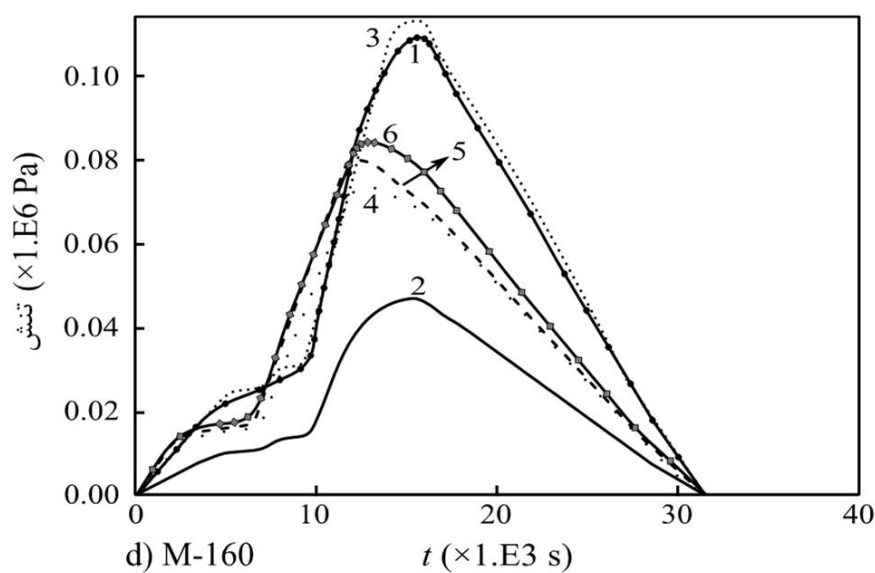
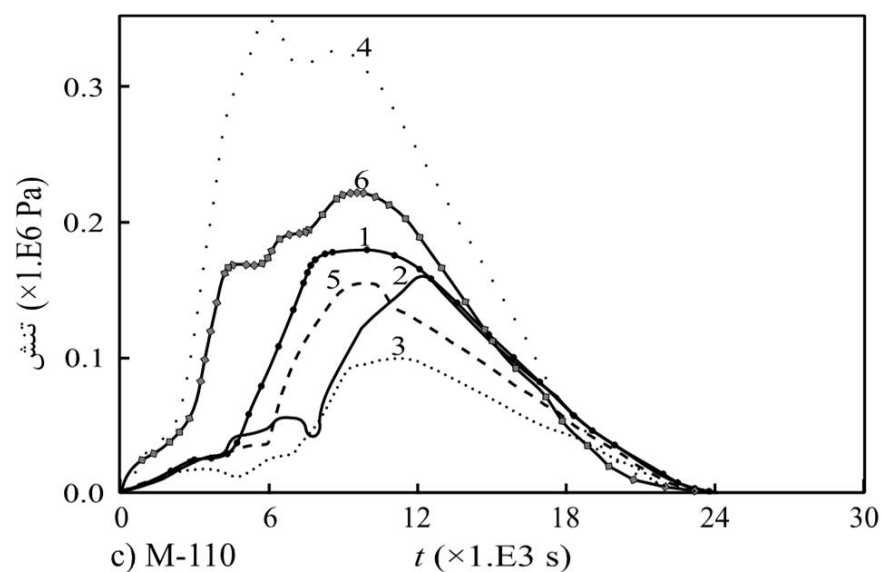
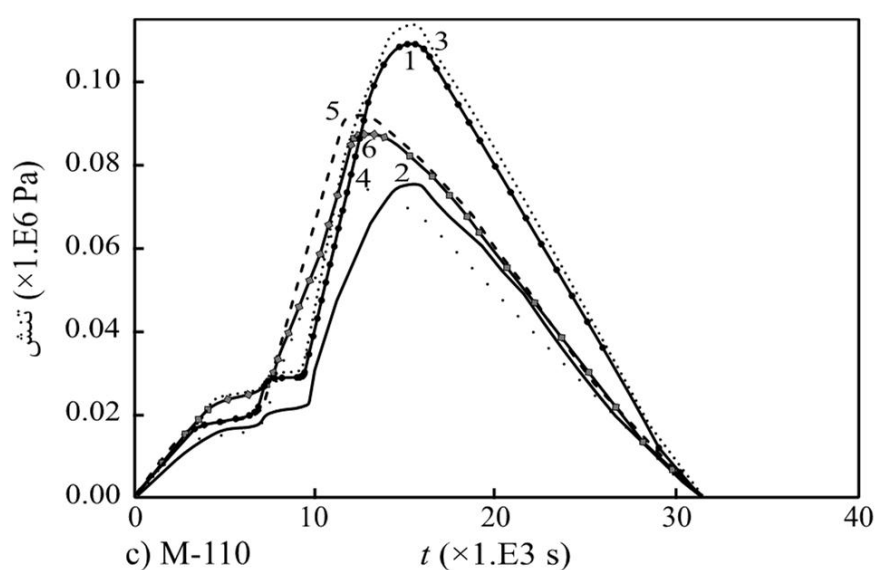
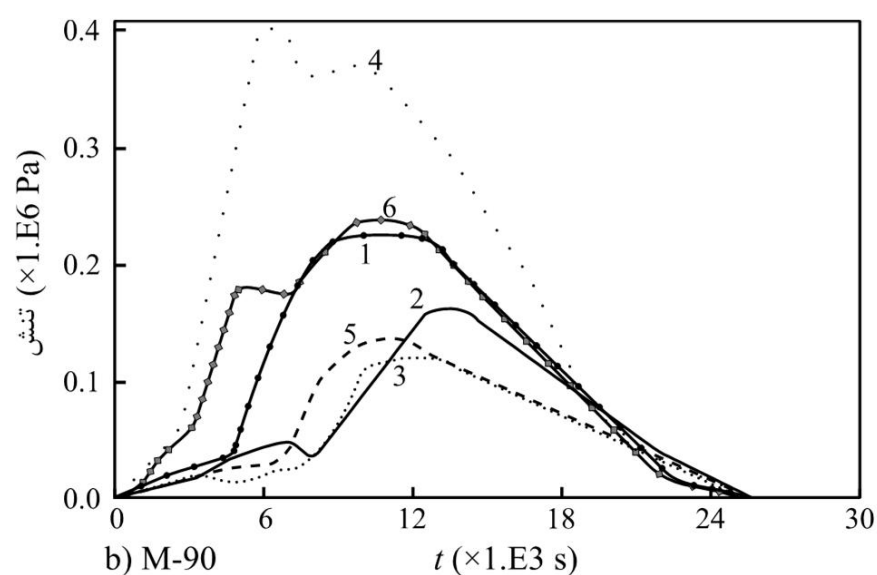
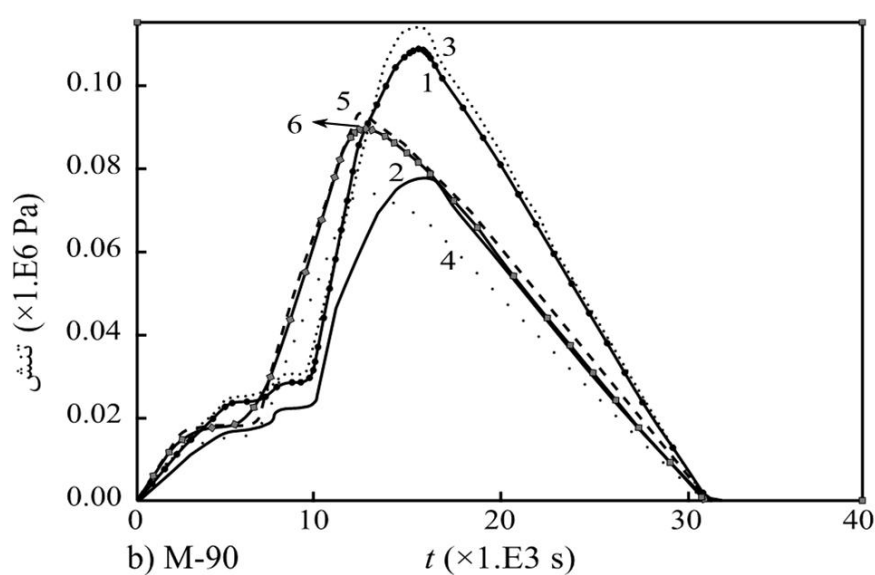
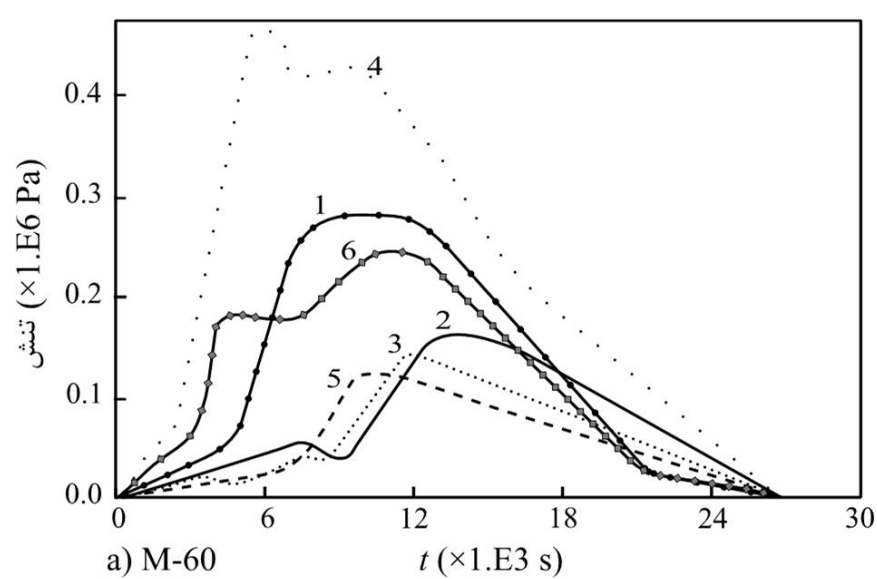
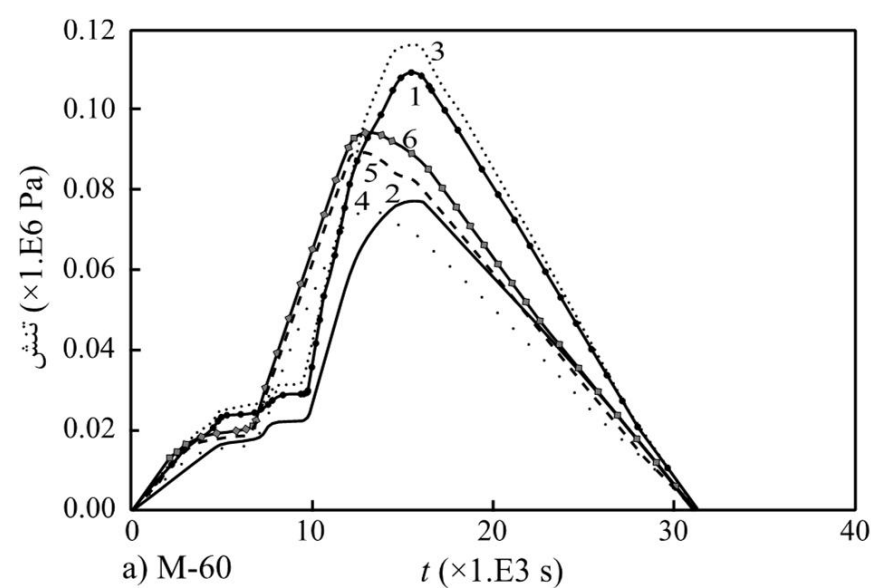
2. در حالت خشک شدن سه بعدی با توجه به این که در قطعات نازک مقدار تنش ماکزیمم در شبیه سازی با مدول یانگ متغیر بیشتر است و در قطعات ضخیم مقدار تنش ماکزیمم در شبیه سازی با مدول یانگ ثابت بیشتر است نمی توان هیچ یک از روش های شبیه سازی را به عنوان روش ایمن تر معرفی کرد.

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 بیشتر از حالت سه بعدی است.

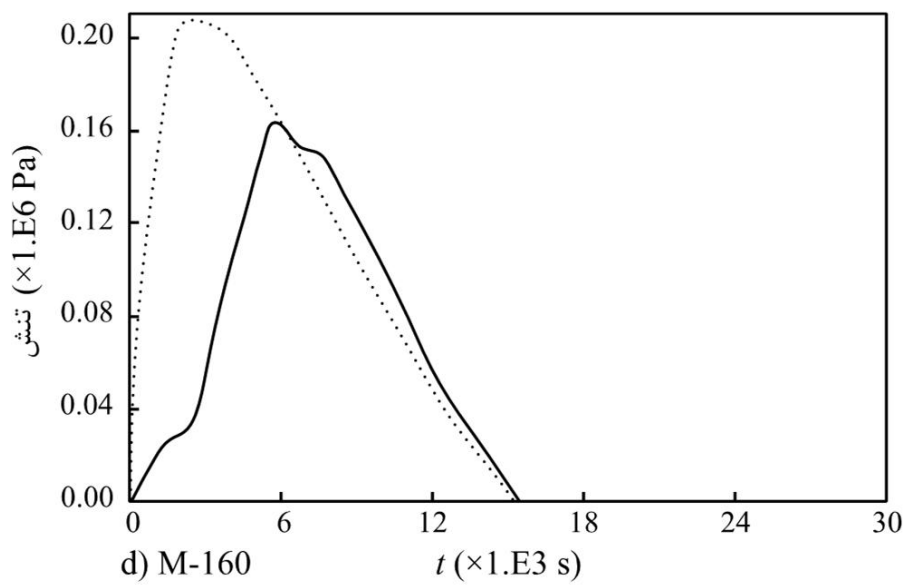
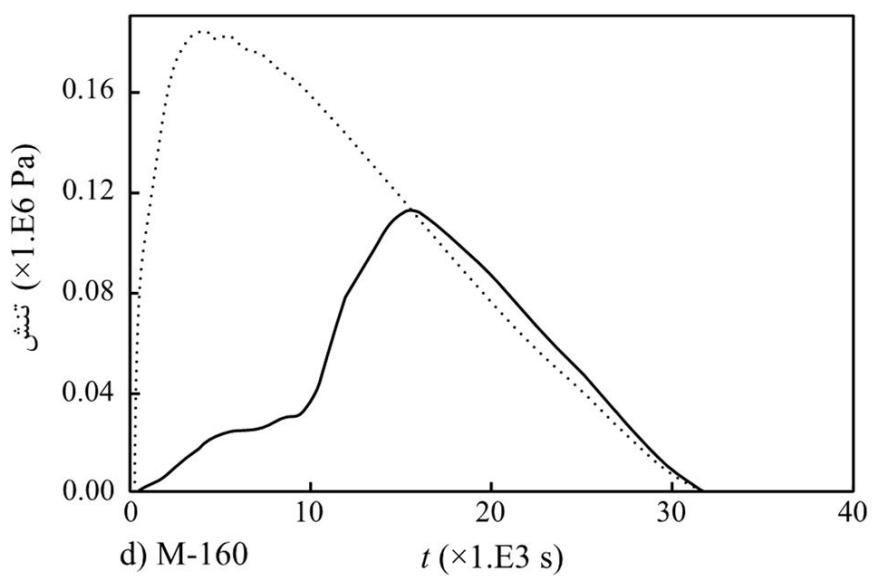
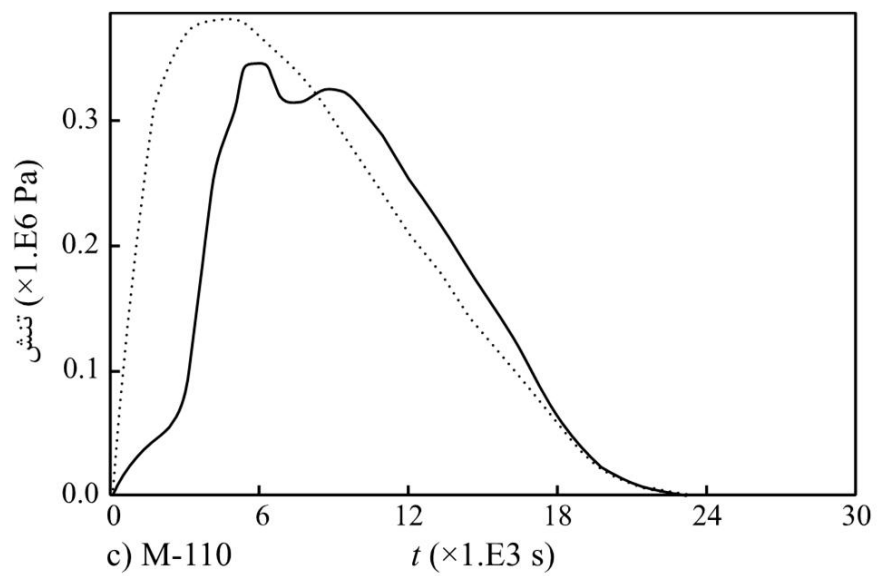
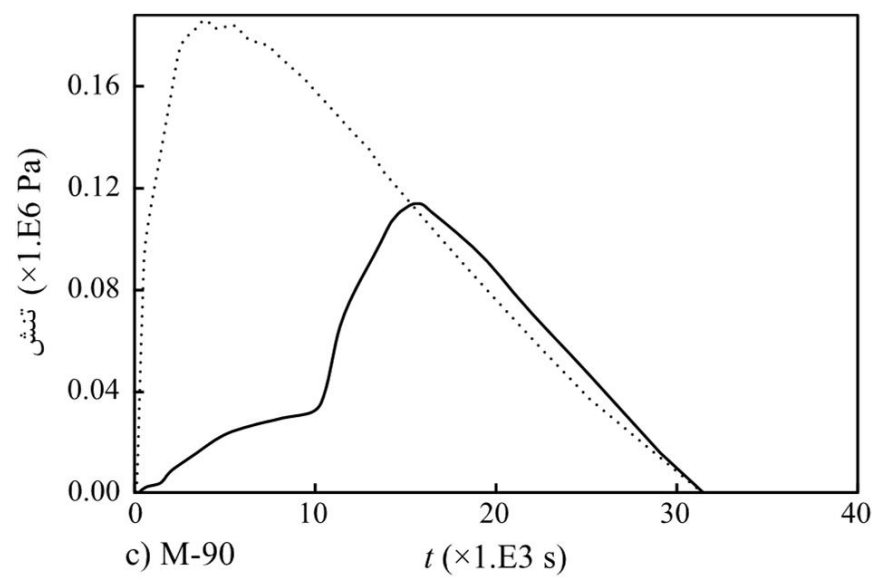
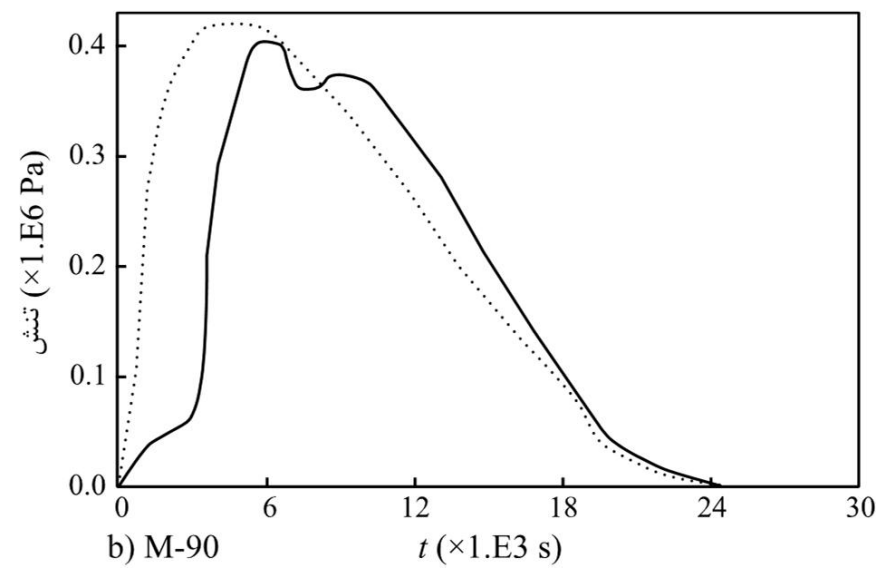
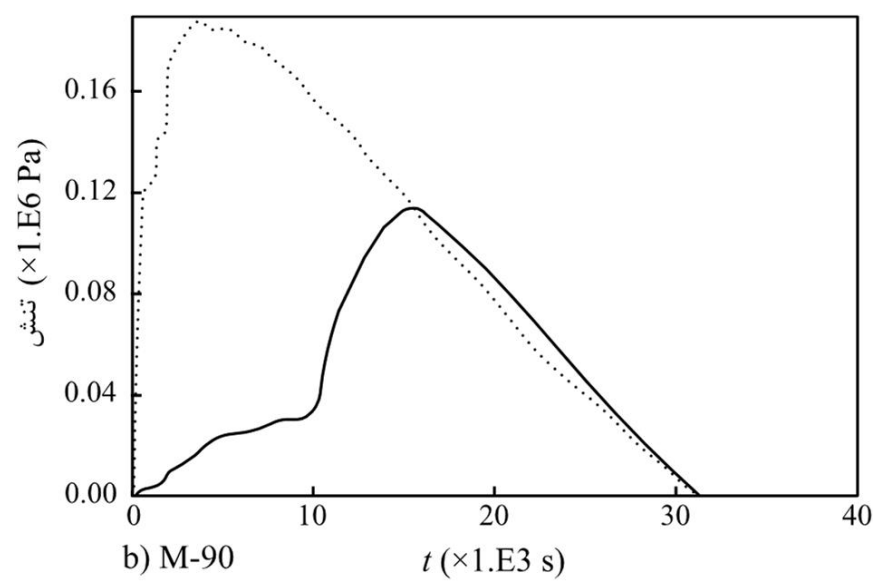
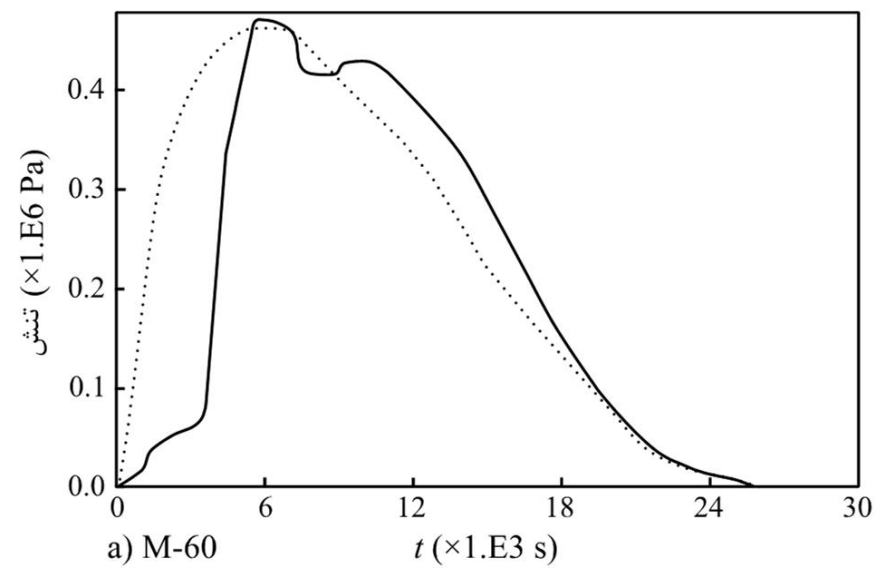
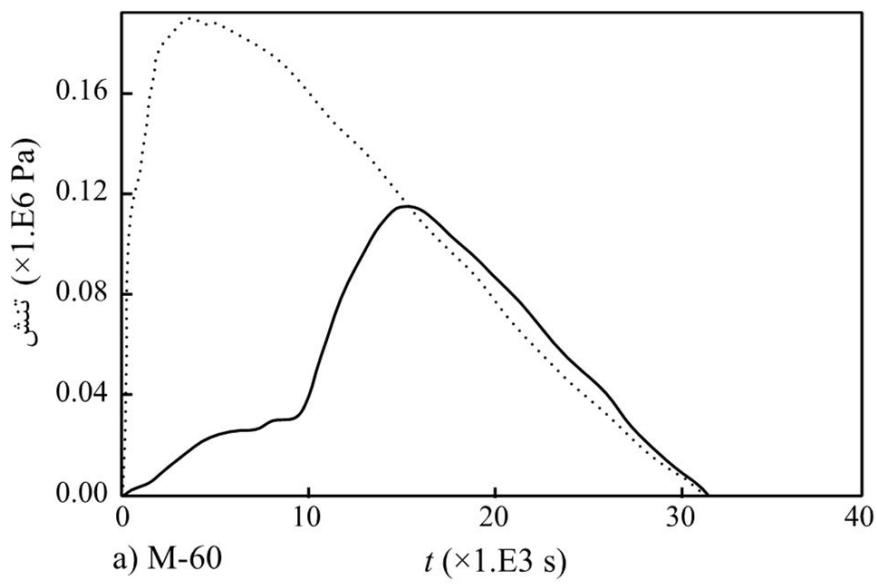
5. در حالت سه بعدی با افزایش ضخامت مدل مقدار اختلاف در تنش ماکزیمم کاهش پیدا می کند به طوری که در مدل 60 تنش ماکزیمم در شبیه سازی با مدول یانگ متغیر بیشتر از تنش ماکزیمم در شبیه سازی با مدول یانگ ثابت است، اما در حالت دو بعدی افزایش ضخامت مدل اختلاف افزایش پیدا می کند.

6. در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ باعث به تاخیر افتادن زمان وقوع تنش ماکزیمم می شود.



شکل 16 تغییرات تنش برای هر چهار مدل در حالت دو بعدی با مدول الاستیک متغیر

شکل 15 تغییرات تنش برای هر چهار مدل در حالت سه بعدی با مدول الاستیک متغیر



شکل 17 مقایسه تنش ماکزیمم در حالت سه بعدی

-----) در نظر نگرفتن تغییرات مدول یانگ

————) در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ

شکل 18 مقایسه تنش ماکزیمم در حالت دو بعدی

-----) در نظر نگرفتن تغییرات مدول یانگ

————) در نظر گرفتن تغییرات مدول یانگ

## 17- نتیجه گیری

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 تنش های کششی و فشاری و در شرایط خاصی تنش های پس ماند در مدل می شود. شدت تنش ها در حالت سه بعدی بیشتر 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 می شود.

## 18- فهرست علائم

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| $C_p$     | گرمای ویژه، $\frac{J}{kg \cdot K}$    |
| $D$       | ضریب نفوذ، $\frac{m^2}{s}$            |
| $E$       | انرژی، $J$                            |
| $h_{fg}$  | گرمای نهان تبخیر آب، $\frac{J}{kg}$   |
| $k$       | رسانایی حرارتی، $\frac{W}{m \cdot K}$ |
| $m_e$     | نرخ تبخیر رطوبت، $\frac{kg}{m^2 s}$   |
| $P$       | فشار، Pa                              |
| $t$       | زمان، s                               |
| $T$       | دما، K                                |
| $v$       | سرعت سیال، $\frac{m}{s}$              |
| $\bar{V}$ | حجم مخصوص، $\frac{m^3}{kg}$           |
| $w$       | رطوبت، d. b، $\frac{kg}{kg}$          |

## علائم یونانی

|           |                                  |
|-----------|----------------------------------|
| $\lambda$ | مدول الاستیسیته، $\frac{N}{m^2}$ |
| $\rho$    | چگالی، $\frac{kg}{m^3}$          |
| $\mu$     | مدول صلابت، $\frac{N}{m^2}$      |
| $\phi$    | رطوبت نسبی هوا                   |

## زیر نویس

|     |                |
|-----|----------------|
| $s$ | جامد           |
| $l$ | مایع           |
| $w$ | سطح ماده مرطوب |
| $a$ | هوای محیط      |

## 19- مراجع

- [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.
- [7] 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. Irudayaraj, 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.

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