

# شبیه سازی فرآیند خشک شدن سرامیک ها به کمک اجزاء محدود و مقایسه آن با آزمایش های تجربی

خلیل خلیلی، سید یوسف احمدی بروغنی، محسن باقریان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

Khkhalili@birjand.ac.ir

**چکیده:** فرآیند خشک کردن مواد نوعا با پدیده انقباض همراه است و علت بنیادی بیشتر عیوب (ترک های) خشک کردن محصولات سرامیکی به علت انقباضی است که در اثر تبخیر و حذف رطوبت از قطعه در طی خشک شدن آن رخ می دهد. انقباض در حین خشک شدن مواد سرامیکی می تواند صدماتی چون اعوجاج، ترک و یا تغییر ابعاد را در قطعه خشک شده ایجاد نماید. از آنجا که پارامترهای زیادی بر خشک شدن سرامیک ها تاثیرگذار هستند، بررسی همه آنها به صورت تجربی بسیار وقت گیر و هزینه بر است. بنابراین مدل سازی فرآیند خشک شدن می تواند راه مناسبی برای مطالعه و کنترل عیوب مزبور باشد و همچنین از آن می توان به عنوان ابزاری مناسب برای مهندسی معکوس در طراحی قالبها و قطعات سرامیکی استفاده نمود. این تحقیق به طور تجربی پدیده خشک شدن قطعه سرامیکی با ابعاد  $20 \times 50 \times 100$  میلی متر در سه درجه حرارت  $35^\circ$ ،  $55^\circ$  و  $75^\circ$  سانتیگراد را انجام و تاثیر درجه حرارت را بر توزیع تنش، انقباضات و ایجاد ترک مورد مطالعه قرار داده است. در ادامه برخی مدل های خشک شدن را بررسی نموده و نهایتاً یک مدل جهت شبیه سازی قطعه پیشنهاد می نماید.

**کلمات کلیدی:** انقباض خشک شدن، اجزاء محدود، پردازش تصویر، شبیه سازی عددی.

## ۱- مقدمه

فرآیند خشک کردن محصولات سرامیکی منبع اصلی ایجاد عیوب در قطعه است. این عیوب شامل ترک های مرئی و یا عیوبی است که باعث تغییر خواص فیزیکی در قطعه شود. سرعت های زیاد خشک کردن و بیش از حد حرارت دادن می تواند منجر به شکستن ناشی از بخار در محصول گردد. ترک خوردن قطعه و تاب برداشتن آن نیز ممکن است بر اثر انقباض غیر یکنواخت در حین خشک شدن روی دهد که این انقباض غیر یکنواخت می تواند در نتیجه سرعت متفاوت خروج آب از نقاط مختلف قطعه، توزیع غیر یکسان رطوبت در آن، محدودیت مکانیکی در منطقه تماس قطعه با سطح پایه و یا گرادیان های رطوبت، در محصول ایجاد شود [۱-۳]. تفاوت در انقباض همچنین می تواند در نتیجه فاکتورهای عملیاتی نظیر عدم یکنواختی ایجاد شده در شکل دادن و جریان هوای غیر یکنواخت در طی خشک کردن بروز نماید. این پدیده منجر به ایجاد تنش کششی در سطح و تنش فشاری در مرکز سرامیک می شود. که می تواند با ایجاد ترک در محصول مقاومت آن را در مقابل نیروهای خمشی و یا کششی کاهش دهد [۴]. البته این حالت معمولا در شرایطی اتفاق می افتد که نوسانات رطوبتی در قطعه یعنی دفع رطوبت با سرعت انجام گیرد. به عبارتی چنانچه پدیده های جذب و یا دفع رطوبت به آرامی انجام شود، امکان ایجاد اعوجاج و ترک خوردگی کمتر خواهد بود [۵].

هدف این تحقیق مدل سازی فرآیند خشک شدن قطعه سرامیکی با ابعاد  $20 \times 50 \times 100$  میلی متر در سه درجه حرارت های  $35^\circ$ ،  $55^\circ$  و  $75^\circ$  سانتیگراد است تا با کمک آن بتوان تنش های منجر به شکست قطعه و نیز زمان رسیدن به آن را تخمین زد. همچنین شرایط بهینه خشک شدن قطعه را می توان با استفاده از مدل مناسب بدست آورد. علاوه بر آن انقباضات را نیز می توان برای قطعات پیچیده ای که رفتار خشک شدن غیر قابل پیش بینی دارند به کمک مدل ارزیابی کرده و با تغییر پارامترها این انقباضات را کنترل و به حداقل مقدار ممکن رسانید.

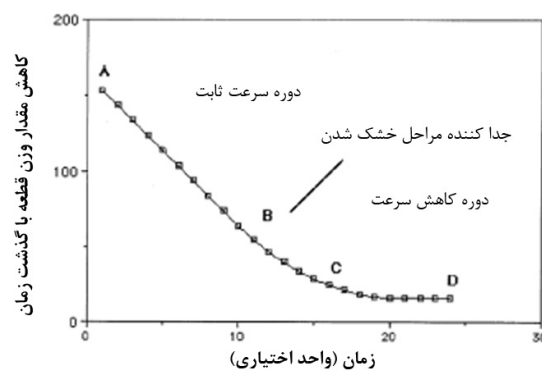
## ۲- مکانیزم خشک شدن سرامیک‌ها

خشک کردن عبارت از خروج آب از نمونه شکل داده شده به کمک فرآیندهای انتقال حرارت و انتقال رطوبت به صورت همزمان است. در حین فرآیند خشک شدن نسبت بین رطوبت و ماده جامد درون سیستم تغییر می‌کند و مقدار آن را می‌توان به دو صورت مبنای خشک و مبنای تر بیان کرد [۶].

هنگامیکه آب به یک پودر سرامیک افزوده می‌شود ابتدا آب سطح ذرات را پوشش می‌دهد. بعد از آن، آب روزه‌های مویین را پر می‌نماید. روزه‌های مویین حفره‌ها و تخلخل‌هایی با قطر کوچکتر از حدود  $1\mu\text{m}$  تعریف می‌شوند. در همین زمان، فیلم‌های نازک و پیوسته آب در اطراف ذرات تشکیل می‌شود که وجود آن باعث افزایش جاذبه بین ذرات توسط کشش سطح ناشی از هم پوشانی فیلم‌های آب بین ذرات می‌شود. مخلوط کردن شدیدتر با اعمال زمان‌های مخلوط کردن طولانی برای توزیع کامل آب، مورد نیاز است. بخشی از حجم آب که به داخل تخلخل‌های مویین کشیده شده و در آن می‌ماند را آب مویینی نامند. در ادامه آب باقی مانده فضای تخلخل‌های بزرگتر را فرا می‌گیرد و در نهایت سبب جدایش ذرات از یکدیگر می‌شود. در فرآیند شکل دادن پلاستیک، این جداسازی ذرات سبب افزایش رفتار سیلان در سیستم شده که باعث تسهیل در شکل دادن آن می‌شود. [۷].

### ۲-۱- سرعت و مراحل خشک شدن

تغییر وزن رطوبت موجود در سرامیک بر واحد زمان را سرعت خشک شدن نامیده می‌شود. می‌توان گفت سرعت خشک شدن برابر با شیب خط نمودار وزن- زمان است (شکل ۱). سرعت خشک شدن شدیداً تحت تاثیر پارامترهایی از فرآیند مانند درجه حرارت، رطوبت، سرعت نسبی هوا و فشار کل می‌باشد. در شکل ۱ در فاصله نقطه A تا B شیب خط ثابت بوده و به مرحله اول خشک شدن با سرعت ثابت معروف است. همانطور که خشک شدن بعد از نقطه B ادامه می‌یابد نرخ خشک شدن با سرعت ثابتی کم می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش زمان شیب منحنی خشک شدن از نقطه B به نقطه C با سرعت ثابتی کم می‌شود که مرحله اول کاهش سرعت نامیده می‌شود. در بازه بین نقطه C تا نقطه D سرعت خشک شدن با سرعت زیادتری، کم شده که مرحله دوم کاهش سرعت نامیده می‌شود.

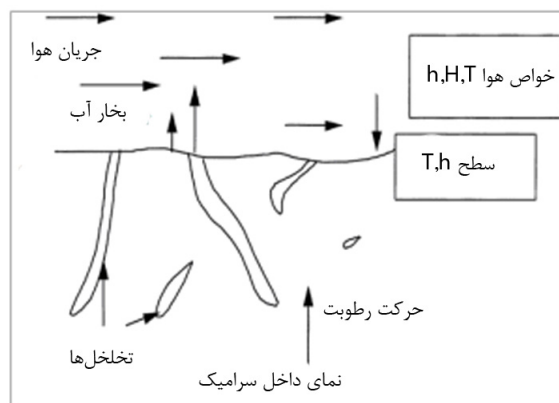


شکل ۱- مراحل مختلف خشک شدن یک قطعه سرامیکی [۶]

سرعت خشک کردن ایمن (بحرانی) حداکثر سرعت خشک کردن است بدون اینکه در مرحله اول خشک شدن ترکی ناشی از انقباض در قطعه ایجاد گردد. خشک شدن در مرحله اول مستلزم جمع شدن ذرات به طرف داخل می‌باشد. در فرآیندهای خشک کردن نسبتاً آهسته، ذرات دارای آزادی حرکت در حد مقیاس محدودی هستند و از خود حرکت و چرخش محدودی را نشان می‌دهند. اگر خشک شدن آهسته باشد، ذرات می‌توانند در حالتی حرکت نمایند که تنش‌های ایجاد شده توسط انقباض را کاهش دهند. در حالت خشک کردن سریع، ذرات در تماس کمتری با یکدیگر بوده و آزادی حرکت ندارند. در چنین مواردی احتمال ایجاد

ترک بیشتر است. میزان رطوبت مخلوط سرامیکی بر روی انقباض خشک، توسط فاصله جدایش متوسط بیشتر بین ذرات هنگامی که میزان آب افزایش می‌یابد تاثیر می‌گذارد. در سرامیک‌ها که توسط شکل‌دهی پلاستیک تولید شده‌اند، افزایش جزئی در میزان آب سبب افزایش قابل توجه در پلاستیسته شده که مواد نرم‌تر و با کارپذیری بهتری را همراه با انقباض خشک بیشتر ایجاد می‌نماید. سرعت‌های خشک شدن آهسته در مرحله اول، حرکت ذرات را مقذور ساخته و سبب کاهش تنش‌های ایجاد شده توسط انقباض می‌شود. توزیع اندازه ذرات نیز دارای تاثیر عمده بر روی انقباض خشک است. افزودن مواد ذره‌ای غیر پلاستیک که اصطلاحاً گراگ<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، سبب کاهش انقباض خشک می‌شود.

میزان رطوبت در نقطه B تحت عنوان میزان رطوبت بحرانی نامیده می‌شود و بیشتر انقباض در طی خشک شدن محصول تا این نقطه بروز می‌کند و می‌توان بعد از آن انقباض را ناچیز در نظر گرفت. فرض اصلی در مرحله اول خشک شدن این است که سطح قطعه سرامیکی خام به صورت ثابتی با یک فیلم پیوسته از آب پوشیده می‌شود. همانطور که تبخیر اتفاق می‌افتد، آب بر روی سطح به صورت پیوسته‌ای توسط مکش به سمت بالا در قسمت داخلی سرامیک، مجددا کشیده می‌شود. مکانیزم دوباره انباشته شدن آب بر روی سطح رفتار فتیله‌ای نامیده می‌شود. مکانیزم خشک شدن در مرحله اول، تبخیر سطحی و حرکت رطوبت به سمت بالا است. مدل مربوط به این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن سطح مقطع یک قسمت از سرامیک نشان داده شده است که جریان هوای موجود در خشک کن با سطح آن فعل و انفعال می‌نماید.



شکل ۲- نمای داخل سرامیک در طی مرحله اول خشک شدن

اگر انتقال حرارت از شرایط عادی خشک شدن در مرحله اول بالاتر رود، بخار اضافی در داخل بدنه ایجاد خواهد شد که سبب ترکیدن ناشی از بخار در قطعه می‌شود. از آنجایی که بیشتر انقباض در مرحله اول اتفاق می‌افتد، سرعت خشک شدن در مرحله اول جهت ممانعت از ایجاد ترک باید محدود گردد. به این دلیل هوای مورد استفاده در مرحله اول خشک کردن نباید حاوی گرمای محسوس بیش از حد باشد، یعنی دمای حباب خشک خیلی بالا نباشد. خشک شدن در مرحله اول توسط کاهش دمای حباب خشک و شرایط انتقال حرارت کنترل می‌شود که آنتالپی لازم برای تبخیر را تامین می‌نماید. ذکر این نکته مهم است که زمانیکه مرحله اول پایان می‌یابد (یعنی به نقطه B می‌رسیم) استراتژی خشک شدن تغییر می‌یابد زیرا انقباض دیگر یک پارامتر مورد ملاحظه بحرانی نمی‌باشد. هنگامیکه درصد رطوبت قطعه سرامیکی به نقطه B رسید، اولین دوره افت یا کاهش سرعت، آغاز می‌گردد. سطح با آب پوشیده نشده و تبخیر در زیر سطح قطعه سرامیکی آغاز می‌شود و فشار مکشی توسط تبخیر آب از سطح موثین ایجاد می‌شود. همانطور که آب از سطح تبخیر می‌شود، روزنه‌های موئین تلاش می‌نمایند آب درون قطعه خام را به خود کشیده تا آب را در خود نگه داشته و عمل مکش را ایجاد نمایند. در این مرحله درجه حرارت محیط و خواص سرامیک تاثیر زیادی بر خروج و انتقال رطوبت باقیمانده از

<sup>1</sup> geroge

قطعه دارند. افزایش درجه حرارت باعث افزایش نفوذ و افزایش سرعت خروج بخار آب از میان ساختار تخلخل می‌گردد. به این دلیل معمول است که دمای اضافی برای محصول در مرحله دوم تامین گردد تا خشک شدن شتاب یابد. در مرحله دوم کاهش سرعت، آب موجود در روزنه‌ها و آب سطح ذرات تبخیر می‌شوند.

## ۲-۲- عیوب و انقباض خشک شدن

زمانیکه آب در مرحله اول زوده می‌شود انقباضی در اثر خشک شدن ایجاد می‌گردد، زیرا خارج شدن آب به ذرات اجازه می‌دهد که در پاسخ به نیروهای موئینگی به طرف یکدیگر جمع شوند. این نیروها در نتیجه هم پوشانی فیلم‌های (لاپه‌های نازک) آب می‌باشند. سرعت خشک شدن در مکان‌های مختلف قطعه متفاوت است و سطح قطعه قبل از مرکز آن منقبض می‌شود که سبب بروز تفاوت در انقباض بین سطح و مغز قطعه می‌گردد به همین دلیل سطح قطعه در معرض کشش قرار می‌گیرد و به خاطر استحکام پایین قطعات قبل از پخت احتمال ایجاد ترک در قطعه وجود دارد.

شکسته شدن سطحی یا تورق پوسته‌ای عبارتست از شکستن یک گوشه یا سطح از محصول دارای رطوبت باقی مانده که در کوره یا خشک کن داغ قرار می‌گیرد. شوره زدن نیز در نتیجه گازهای اسیدی است که از گازهای کوره سرچشمه گرفته و به داخل خشک کن به همراه گرمای پس ماند (اضافی) وارد می‌گردد و سبب بد رنگ شدن محصول پخت شده می‌شود.

## ۲-۳- عملیات تئوری انقباض خشک

فرآیند خشک شدن از سطوح جانبی و گوشه‌ها شروع شده که با گذشت زمان به سمت عمق و مرکز قطعه پیش خواهد رفت. طی آن انقباضی صورت می‌گیرد که این انقباض می‌تواند به شیوه تئوری توسط توسعه یک سری از معادلات مرتبط به پاسخ یک ماده به ایجاد یک گرادیان انقباضی مورد بررسی قرار گیرد. به صورت مشهود محدودیت‌هایی برای این شیوه وجود دارد زیرا بسیاری از پارامتری‌های ماده ناشناخته می‌باشند و این نکته می‌تواند استنتاج گردد که اگر میزان آب سرامیک به اندازه کافی بالا باشد قطعه یک واکنش و رفتار پلاستیک را از خود نشان می‌دهد. با این وجود این مدل به تصور و درک فرآیند خشک کردن، کمک می‌نماید. اگر یک جامد نیمه بی نهایت با طول  $2w$  خشک شدن را تنها از قسمت انتهایی خود تجربه نماید، گرادیان‌های رطوبت در طی خشک کردن توسعه خواهند یافت. فرض می‌شود که فرآیند حرکت رطوبت توسط قانون اول فیک بیان شود. در این قانون رابطه بین شارمولکول‌ها ( $J$ ) و گرادیان رطوبت ( $dm/dx$ ) به صورت رابطه ۱ بوده که در آن  $m$  میزان رطوبت،  $D$  ضریب نفوذ و  $x$  فاصله می‌باشد [۷].

$$J = - \frac{Ddm}{dx} \quad (1)$$

معادله ۱، شار رطوبت را در یک بعد اختیاری تشریح می‌نماید. به عنوان یک تقریب برای حرکت رطوبت در سه بعد، یک ضریب ۳ در رابطه گنجانده می‌شود [۷]. با تعریف  $m_{surf}$  و  $m_{avg}$  که به ترتیب به عنوان میزان رطوبت در سطح جسم در حال خشک شدن و میزان رطوبت متوسط قطعه خام تعریف می‌گردند، خواهیم داشت [۷]:

$$J = - \frac{3D(m_{surf} - m_{avg})}{w} \quad (2)$$

و با مرتب کردن رابطه ۲ داریم:

$$m_{surf} - m_{avg} = -1/3 \left( \frac{Jw}{D} \right) \quad (3)$$

به منظور تکمیل آنالیز، ضرورت دارد تشابهی بین فرایند خشک کردن و فرایند انتقال حرارت یا شوک حرارتی برای همان نوع نمونه قائل شویم. نکته اساسی برای انجام این امر این است که هر دو فرایند از یک گرادیان (شیب) حاصل می‌گردند. در مورد خشک کردن، تفاوت تنش توسط گرادیان انقباضی ایجاد می‌گردد. در مورد شوک حرارتی، زمانی که یک نمونه کوئنچ (سریعا سرد) می‌شود، تنش سطحی توسط گرادیان دما ایجاد می‌شود. از تئوری شوک حرارتی می‌توان فهمید که تنش سطحی ( $\sigma$ ) را به گرادیان دمایی  $T_{avg}-T_{surf}$  می‌توان مرتبط نمود که در آن  $T_{avg}$  میانگین دمای سطحی نمونه است [۷]. این امر ضرورت دارد که از ثوابت فیزیکی مدول الاستیک ( $E$ )، ضریب انبساط حرارتی ( $\alpha$ )، و ضریب پواسان ( $\nu$ ) استفاده گردد. این ارتباط به صورت زیر است:

$$T_{avg} - T_{surf} = \frac{\sigma}{3 \left( \frac{E\alpha}{1-\nu} \right)} \quad (4)$$

توسط تشابه سازی مقدار  $m_{surf}-m_{avg}$  در رابطه بالا به جای  $T_{avg}-T_{surf}$  در رابطه فوق و با مرتب کردن آن بدست می‌آید:

$$\frac{\sigma}{\left( \frac{E\alpha}{1-\nu} \right)} = \frac{1}{9} \left( \frac{J_w}{D} \right) \quad (5)$$

$\phi$  ضریب انقباض است که مشابه با ضریب تغییر خطی در ضریب انبساط حرارتی  $\alpha$  در معادله (۴) می‌باشد. نتیجه این تشابه ما را قادر می‌سازد که خشک کردن را با تنش مرتبط نمود. برای مثال در صورتیکه سایر فاکتورها ثابت نگه داشته شوند افزایش سرعت خشک کردن ( $J$ )، افزایش تنش در سطح ( $\sigma$ ) را در پی خواهد داشت. برای یک سرعت نفوذ ( $D$ ) آهسته‌تر، تنش سطحی ( $\sigma$ ) افزایش می‌یابد. برای مواد سرامیکی می‌توان فرض کرد که ضریب پواسان ثابت و تقریباً برابر  $0/3$  است. اگر معیاری انتخاب گردد که در آن شکست اتفاق نیفتد و همچنین تقریب ۶ صحیح باشد:

$$\frac{\sigma}{E} \leq 0.05 \quad (6)$$

می‌توان حداکثر سرعت خشک کردن ایمن  $J_{max}$  را با تغییر معادله ۵ تعریف نمود که نتیجه به صورت رابطه ۷ است: [۷]

$$J_{max} \cong \frac{D}{W} \quad (7)$$

معادله (۷) نشان می‌دهد که حداکثر سرعت خشک کردن ایمن مستقیماً متناسب با ضریب نفوذ رطوبت است، به علاوه مورد انتظار است که  $D$  تابعی از میزان رطوبت و دارای یک ارتباط نمایی با آن باشد، که منطقی می‌باشد. بنابر این حداکثر سرعت خشک کردن ایمن زمانی که در مقابل میزان رطوبت رسم شود، ثابت نخواهد بود و معمولاً به صورت یک سرعت ماکزیمم ثابت مورد انتظار است.

### ۳- بررسی کارهای پیشین

رایج‌ترین نقصی که در حین خشک کردن اتفاق می‌افتد، ترک‌های ناشی از انقباض می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای جهت بهینه کردن و شبیه سازی این نوع عیوب صورت گرفته است. کدیکارا [۸] گسترش ترک در حین خشک شدن خاک را با استفاده از حرکت پیکسل‌های تصویر مدل کرده و در طی آن روابطی بین سرعت خشک شدن، میانگین سطح هر بخش و ضخامت قطعه استخراج نموده است. در این تحقیق مشخص شد که انقباضات اولیه به دلیل وجود قیود انقباضی در جهت طولی ناهمسان هستند. گل [۹] به

مطالعه دینامیک ترک خاک پرداخته و جهت تعیین دینامیک ترک سطح خاک از مشخصه‌های هندسی اصلی استفاده کرده و آن را با یک مقدار کمی بیان نموده است. پرسون [۲] انقباض و ترک خشک شدن خاک را به کمک المان‌های مجزا شبیه سازی نمود و به کمک آنها انقباضات و ترک‌های ناشی از آن را پیش‌بینی کرد. حالت [۳] به شکل گیری ترک و تحلیل آن به کمک مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک پرداخته و با استفاده از مقدار زاویه باز شدگی ترک مقدار مقاومت به ترک خوردگی قطعه را محاسبه نموده است. لیانگو [۹] با استفاده از الاستیسیته خطی فرآیند خشک شدن خاک و انقباضات ناشی از خشک شدن را مدل کرده است. شی [۱۰] فاکتورهای تاثیر گذار بر ترک‌های انقباضی خشک شدن از جمله درجه حرارت، ضخامت لایه خاک، سیکل‌های تر - خشک کردن و نوع خاک و اثر این عوامل بر روی پارامترهای هندسی ترک را مورد بررسی قرار داده است. کاسچیتز [۱۱] خطر ایجاد ترک در خشک شدن خاک را بر اساس فرضیاتی که راجع به مواد متخلخل صورت گرفته است و نیز به کمک معادلات انتقال جرم و معادلات استاتیکی بررسی کرده است و تنش‌های مکانیکی که در طی کرنش‌های ناشی از خشک شدن ایجاد می‌شوند را توسط مدل الاستیک-خطی بیان کرده است. کیوم [۱۲] فرآیند خشک شدن سرامیک‌ها را به کمک روش اجزاء محدود انجام داده است. در این شبیه سازی، انتقال گرما و انتقال رطوبت در قطعه خام سرامیکی در نتیجه گرادیان دما، گرادیان رطوبت، هدایت و جابجایی گرما و تبخیر آب در فرض شده است. در طی این تحقیق مشخص گردید که خواص الاستیک مواد متخلخل تحت تاثیر شکل منافذ و تخلخل منافذ است. در این مقاله خواص الاستیک سرامیک‌های خام با توجه به شکل و تخلخل منافذ به کمک تئوری یکنواخت سازی محاسبه شد.

#### ۴- شرایط آزمایش و انجام کارهای تجربی

آزمایش‌های عملی بر روی نمونه خاک سرامیکی که از عمق ۳ متری زمین حاصل شده است انجام گردید که خواص شیمیایی و فیزیکی ماده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی و خواص فیزیکی و مکانیکی خاک

درصد	عنصر	مشخصات ماده
۵۹/۵	Si	ضریب انبساط دمایی $1 \times 10^{-5} (1/k)$
۷/۸۳	Ca	ضریب پواسون ۰/۴
۴/۲۰	Mg	چگالی خشک $1800 (kg/m^3)$
۴/۵۰	Fe	رسانایی $1/5 (w/mk)$
۷/۸۰	Al	گرمای ویژه خاک $0.840 (kj/kg)$
۱ <	Ti, Mn	مدول الاستیک $6/9 \times 10^{10} (pa)$

جهت انجام عملیات خشک کردن از یک خشک کن دوجداره استفاده شد. خشک کن دارای یک المنت حرارتی با بازدهی ۲۰۰۰ وات و بدون دمنده خارجی بوده و از دمش هرگونه جریان سیال به دور است. جنس جداره خارجی از استیل و جداره داخلی از چدن می‌باشد و هوا فضای بین دو جداره را اشغال کرده است. دو جداره بودن محفظه باعث آن می‌گردد تا از اعمال حرارت مستقیم به قطعه جلوگیری نموده و حرارت نیز به طور یکنواخت بر همه سطوح وارد شود. در زیر قطعه‌ای که در حال خشک شدن است، از دو تکیه گاه استفاده شد تا علاوه بر مقید کردن حرکت قطعه در جهت عمودی، فاصله‌ای جهت انتقال حرارت به سطح زیرین قطعه نیز ایجاد شود. تمام سطوح این تکیه‌گاه‌ها از صافی نسبتاً بالایی برخوردار است تا مانع حرکت قطعه در دو جهت صفحه‌ای نگردد. تکیه‌گاه‌ها بر روی یک سطح شیشه‌ای قرار داده شده‌اند و سطح زیرین تکیه‌گاه‌ها

و سطوح شیشه‌ای روغن کاری شده تا اصطکاک بین سطح زیرین تکیه‌گاه‌ها و سطوح شیشه‌ای کاهش یابد. بدین ترتیب تکیه‌گاه‌ها به صورت غلتکی عمل نموده و می‌توانند آزادانه در صفحه حرکت کنند. طول این تکیه‌گاه‌ها و محل آنها طوری انتخاب شده است تا علاوه بر برقراری تقارن در قطعه سرامیکی تغییرات جابجایی در انتهای قطعه نیز با هم برابر باشند شکل ۳:



شکل ۳- شرایط تکیه‌گاهی

خشک کردن در سه دمای ۳۵، ۵۵، ۷۵°C انجام گردید و در طی فرآیند دما ثابت نگه داشته شد.

#### ۴-۱- روند انجام آزمایشات

##### ۴-۱-۱- بررسی رفتار خشک شدن قطعه

جهت انجام آزمایشات ابتدا خاک سرامیک را کوبیده و الک کرده تا از یکنواختی دانه‌ها اطمینان حاصل شود. در ادامه به آن آب اضافه نموده و هم زده تا مخلوطی همگن ایجاد شود. نسبت بین آب و پودر سرامیک بایستی رعایت شده باشد یعنی آب آنقدر کم نباشد که ذرات از چسبندگی کافی برخوردار نبوده و در طی شکل‌دهی، پلاستیسته لازم را نداشته و یا آنقدر آب زیاد باشد که موجب آگلومره شدن گردد. بعد از آنکه مخلوطی همگن ایجاد شد آن را به خوبی ورز داده تا حباب‌های محبوس در آن آزاد شوند. وجود حباب باعث عدم یکنواختی مخلوط شده که این خود می‌تواند ابتدای شروع ترک در حین خشک شدن باشد. بعد از آنکه از خروج هوای داخل مخلوط اطمینان حاصل شد، آن را مقداری استراحت می‌دهیم تا آب به خوبی ذرات سرامیک را در بر گرفته و مخلوطی کاملاً همگن ایجاد شود. بهتر است گل را داخل محفظه‌ای بسته قرار داده که از هوای بیرون محفوظ بوده و یکنواختی رطوبت در نقاط سطح و مرکز حفظ شود. حال گل آماده قالب‌گیری می‌باشد. قالب مورد استفاده چوبی بوده و ابعاد محفظه داخلی آن برابر ۲×۵×۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. از آنجا که گل تر خاصیت چسبندگی دارد به قالب را دارا است لازم است قبل از قالب‌گیری دیواره‌های قالب چوبی با یک ماده جدایش (پودر تالک، خاکستر و...) و یا ماده چرب مناسب (روغن، گریس و...) آغشته شود تا قطعه قالب‌گیری خروج راحت‌تری داشته و نیز سالم بماند. بعد از آنکه گل درون قالب قرار داده شد به کمک یک صفحه مسطح گل درون قالب پرس می‌شود. در اینجا بایستی دقت شود که گل به تمام سطوح قالب مخصوصاً گوشه‌های آن رانده شود. بعد از حصول اطمینان از اینکه تمام قالب از گل پر شده، اضافات گل را از روی قالب زدوده و با کمک لوزام جانبی صافی مطلوب به قطعه داده می‌شود. عملیات قالب‌گیری در اینجا به اتمام می‌رسد و بایستی قطعه از داخل قالب بیرون آید. برای سهولت انجام این کار لازم است چند ضربه به قالب زده تا قطعه آزاد شود. با آزاد شدن قطعه به آرامی قطعه را از قالب خارج می‌سازیم. بایستی مراقب بود در حین ضربه زدن هیچ فشاری بر قطعه اعمال نشود که باعث ایجاد تنش‌های اولیه و یا تغییر شکل در آن گردد. در ضمن عملیات انتقال قطعه به خشک کن بایستی زمان انجام کار را نیز در نظر گرفت چرا که در حین خروج قطعه رطوبت قطعه نیز تبخیر شده و جسم، تحت فشار منقبض می‌شود. بعد از آن بایستی قطعه خام را به درون خشک کن منتقل نمود. ذکر این نکته ضروری است که خشک کن بایستی به دمایی که بر روی آن تنظیم شده بود رسیده باشد، جهت حصول اطمینان از این مورد خشک کن را مدتی قبل از آنکه قطعه از قالب بیرون آورده شود، روشن کرده تا به دمای مطلوب برسد. در ادامه نوبت به بررسی رفتار خشک شدن قطعه می‌رسد. در این مرحله در بازه‌های زمانی مختلف قطعه

سرامیکی که در حال خشک شدن است را از خشک کن خارج و آن را توزین نموده تا بتوان تغییرات وزن را در طی خشک شدن قطعه محاسبه نمود. همانطور که در ابتدا گفته شد سرعت خشک شدن در مرحله اول زیادتر است و علت آن بالا بودن سرعت تبخیر رطوبت از سطوح قطعه در مراحل ابتدایی می‌باشد، به همین دلیل بایستی ابتدا بازه‌های زمانی کوتاهتر (مثلاً هر ۵ دقیقه) را در نظر گرفت تا آزمایشات از دقت کافی برخوردار باشد. اما با گذشت زمان سرعت خشک شدن آهسته‌تر شده و این به وضوح با توزین نمودن مشخص است. در مراحل ابتدایی سرعت خشک کردن بیشتر بوده و هرچه به ساعات انتهایی خشک شدن پیش بریم، مقدار رطوبت خیلی کمتر در بازه‌های زمان طولانی تر ( $0.2$  گرم در هر ساعت) تبخیر می‌شود. توزین قطعه تا وقتی پیش می‌رود که وزن سرامیک با گذشت زمان تغییر نکند، این بدین معنا است که قطعه سرامیکی خشک شده و رطوبت آن با رطوبت محیط متعادل شده است. تمامی مراحل فوق را برای هر سه درجه حرارت  $35$ ،  $55$  و  $75$  °C انجام و نتایج ثبت شد تا به کمک آنها به رفتار تجربی خشک شدن قطعه سرامیکی پی برد. نتایج حاصل در بخش بعدی آورده شده است.

#### ۴-۱-۲- بررسی تغییر شکل‌ها در حین خشک شدن

بعد از آنکه عمل توزین قطعات سرامیکی در سه دمای مختلف به اتمام رسید، مرحله دوم آزمایشات را که بررسی تغییر شکل‌های ناشی از خشک شدن قطعه سرامیکی است را انجام داده تا به کمک آن بتوان مقدار و جهت جابجایی (بردارهای کرنش) نقاط مختلف قطعه را با استفاده از پردازش تصویر بدست آورد. مطابق آزمایشات اولیه قطعه خام سرامیکی را به کمک قالب‌های چوبی فرم داده تا شکل اولیه آن حاصل گردد. در این آزمایشات بر خلاف حالت قبلی توزین صورت نمی‌گیرد، اما قبل از آنکه قطعه را درون خشک کن قرار داد بایستی سطح قطعه خام قالبگیری شده را با استفاده از یک شابلون علامت گذاری (مش بندی) نموده تا بتوان مقدار جابجایی نقاط و جهت حرکت آنها را در مراحل مختلف خشک شدن بدست آورد. بعد از علامت‌گذاری روی سطح قطعه خام، آن را مطابق حالت قبل روی تکیه‌گاه‌های خود داخل خشک کن که قبلاً در دمایی مشخص تنظیم شده قرار داده و جهت ثبت تصویر از قطعه‌ای که در دمای معین در حال خشک شدن است، دوربینی را به طور عمود بر قطعه نصب نموده تا به کمک آن از مراحل مختلف خشک شدن قطعه تصویرگیری انجام گردد. بایستی دقت نمود که در بازه‌های مختلف، قطعه و دوربین جابجا نشوند. دوربین را به گونه‌ای بر روی خشک کن مقید نموده تا در طی عملیات تصویرگیری هیچ گونه حرکتی نداشته باشد و نیز تصاویر حاصله از کیفیت یکنواختی بهره مند شوند. عملیات تصویرگیری از همان ابتدای شروع فرآیند تا انتهای خشک شدن در بازه‌های زمانی مختلف انجام می‌شود. در انتهای فرآیند عکس‌ها را از دوربین به کامپیوتر منتقل کرده تا بردارهای کرنش و مقدار آن محاسبه شود. جهت محاسبه مقدار جابجایی‌ها در یک زمان مشخص از ابتدای خشک شدن، بایستی تصویر مربوط را روی تصویر اولیه قرار داده به طوریکه که مرکز هر دو تصویر بر هم منطبق باشد، سپس به کمک عملیات پردازش تصویر محل جدید نقاطی که در ابتدا توسط شابلون مشخص گردید با استفاده از ترسیم بردارهایی بر محل قدیمی مشخص نمود این عملیات بایستی برای همه نقاط انجام شود و هرچه تعداد نقاط که در ابتدا بر روی قطعه خام مشخص شد بیشتر باشد دقت آن نیز بیشتر می‌شود. تمام این عملیات برای هر سه درجه حرارت انجام گردید. در زیر دو تصویر مربوط به مرحله ابتدا و انتهای خشک شدن قطعه را در دمای  $35$  درجه مشاهده می‌گردد. بعد از آنکه دو تصویر بر هم منطبق شد، بردارهای کرنش را ترسیم نموده و بعد از آن مقدار طول ماکزیمم این بردارها محاسبه گردید. در انتها مشخص شد که مقدار حداکثر جابجایی‌ها مربوط به گوشه‌ها و عامل تاثیر گذار بر آن درصد رطوبت قطعه تر است.

#### ۵- مدل اجزاء محدود و شبیه سازی عددی

تقسیم مسئله به قسمت‌های کوچکتر، بطوریکه قوانین علمی به سادگی برای آن قسمت‌ها قابل بیان باشد را



مدل اجزاء محدود گویند. در این تحقیق از معادله نفوذ رطوبت به شرح زیر استفاده شده است [۱۲]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (۸)$$

که معادله فوق را می‌توان به معادلات توزیع حرارت در یک جسم مرتبط نمود.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} \right) \quad (۹)$$

با استفاده از قانون تعمیم یافته فیک ضریب نفوذ رطوبت را می‌توان به صورت رابطه ۱۰ بدست آورد [۱۴].

$$\frac{M - M_s}{M_s - M_e} = 1 - \left( \frac{8}{\pi^2} \exp \right) \pi^2 \frac{Dt}{L^2} \quad (۱۰)$$

که در آن  $M_s$  و  $M_e$  به ترتیب رطوبت اولیه و نهایی و  $L$  مقدار ضخامت قطعه است. در ادامه حل عددی معادله توزیع رطوبت با استفاده از روش اجزاء محدود و روش حل گلوکین به صورت زیر انجام می‌شود [۱۳]:

$$\int_a^b N_i(x) R(x, a_1, a_2, \dots, a_n) dx = 0 \quad (۱۱)$$

در این روش به جای استفاده از یک تابع تقریب کلی توابع تقریب با پیوستگی تکه‌ای استفاده کرده و دامنه به چندین قسمت تقسیم می‌گردد.

$$T_e = N_i(x) T_i + N_j(x) T_j \quad (۱۲)$$

می‌توان انتگرال روی دامنه را به  $M$  انتگرال روی المان تقسیم کرد که مجموع آنها هم همان انتگرال خواهد بود. یعنی:

$$\sum_{e=1}^M \int N_i(x) R^e(x, T_i, T_j) dx = 0 \quad (۱۳)$$

$$\sum_{e=1}^M \int N_i(x) R^e(x, T_i, T_j) dx = 0 \quad (۱۴)$$

با توجه به تعریف ماتریس توابع شکل دو معادله ۹ و ۱۰ را می‌توان به شکل زیر نیز نوشت: [۱۳]

$$\sum_e^M N^T = \int N^T(x) [R^e(x, T_i, T_j)] dx = 0, N^T = \begin{pmatrix} N_i \\ N_j \end{pmatrix}$$

شبیه سازی عددی فرآیند خشک شدن با این فرض انجام شد که توزیع رطوبت و توزیع حرارت در قسمت‌های مختلف قطعه یکنواخت می‌باشند.

$$\int_{\gamma} [N]^T \left( D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial M}{\partial t} \right) d\gamma = 0 \quad (۱۵)$$

$$\int_{\gamma} [N]^T D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \right) d\gamma = \int_{\gamma} \partial / \partial x ([N]^T D * \frac{\partial M}{\partial x}) d\gamma - \int_{\gamma} D (\partial [N]^T / \partial x * \partial x) d\gamma \quad (۱۶)$$

$$\int_{\gamma} \partial / \partial x ([N]^T D * \frac{\partial M}{\partial x}) d\gamma = \int_1 D [N]^T \left( \frac{\partial M}{\partial x} \right) n_x d \quad (۱۷)$$

$$\int_{\gamma} D \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} * \frac{\partial M}{\partial x} + \partial [N]^T / \partial y * \partial M / \partial y \right) d\gamma = \int_1 D [N]^T \left( \left( \frac{\partial M}{\partial x} \right) n_x + \left( \frac{\partial M}{\partial y} \right) n_y \right) dl \quad (۱۸)$$

$$\int_{\gamma} D \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} * \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} * \frac{\partial M}{\partial y} \right) d\gamma = \int_1 D [N]^T \frac{\partial M}{\partial y} dl \quad (19)$$

$$\int_{\gamma} D \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} * \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} * \frac{\partial M}{\partial y} \right) d\gamma = \int_1 D [B]^T [B] \{M\} d\gamma \quad (20)$$

$$\int_{\gamma} [N]^T \left( \frac{\partial M}{\partial t} \right) d\gamma = \int_{\gamma} [N]^T [N] \left( \frac{\partial \{M\}}{\partial t} \right) d\gamma \quad (21)$$

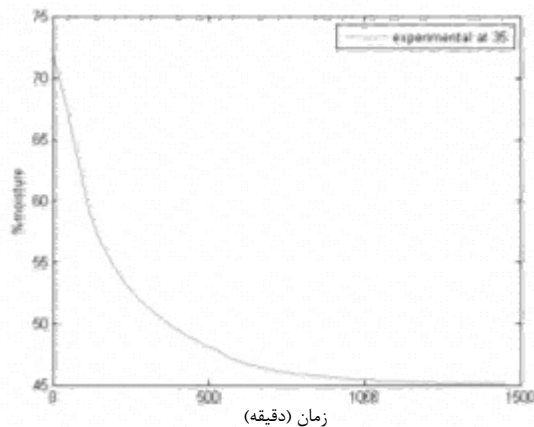
$$\int_{\gamma} [N]^T [N] \left( \frac{\partial \{M\}}{\partial t} \right) d\gamma = \left( \int_{\gamma} [N]^T [N] d\gamma \right) * \left( \frac{\partial M}{\partial t} \right) \quad (22)$$

با استفاده از مدل فوق شبیه سازی نیز در سه دما انجام و نتایج آن با رفتار تجربی خشک شدن مقایسه شده است. فرآیند شبیه سازی در نرم افزار انسیس با استفاده از المان کوپل حرارتی-مکانیکی SOLID226 و تحلیل به صورت گذرا انجام شد. شکل ۱۳ مش بندی قطعه را نشان می‌دهد. در ابتدا دما و رطوبت بکنواخت هستند به عبارت دیگر:

$$T(x, y, 0) = T_0; w(x, y, 0) = w_0 \quad (23)$$

## ۶- نتایج

آزمایشات تجربی جهت بررسی رفتار تجربی خشک شدن قطعه انجام شد تا به کمک آنها بتوان پارامترهای مورد نیاز مدل سازی نظیر ضریب نفوذ رطوبت را محاسبه نمود. همچنین این آزمایشات این امکان را می‌دهد تا مقایسه‌ای بین نتایج شبیه سازی و نتایج مشابه در رفتار تجربی ماده انجام داد و راجع به مقادیر خطا، عدم تطابق مدل و یا حتی منشا خطا در بازه‌های زمانی مختلف بحث نمود. شکل‌های ۴ رفتار تجربی خشک شدن خاک را نشان می‌دهند.

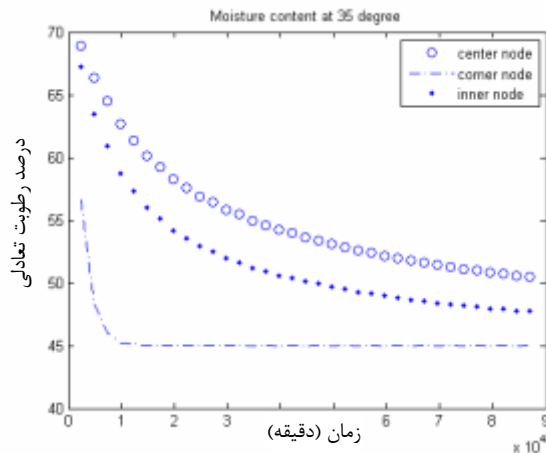


شکل ۴- نمودار تجربی میانگین کاهش درصد رطوبت میانگین قطعه در درجه حرارت ۳۵ در کل زمان خشک شدن

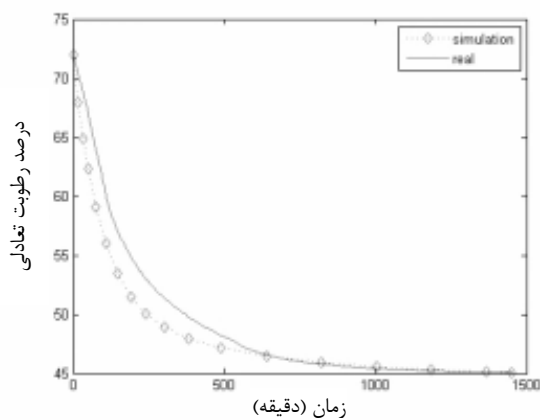
با مراجعه به این نمودارها می‌توان مراحل اول و دوم خشک شدن و نیز نقطه بحرانی را ملاحظه نمود. شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن سرامیک با فرض رطوبت نسبی ۴۵٪ برای محیط و رطوبت مطلق ۲۸٪ (بر مبنای خشک) برای ۳۵ درجه و رطوبت مطلق ۳۱٪ (بر مبنای خشک) برای ۷۵ درجه انجام شد. رفتار سه نقطه قطعه (گوشه قطعه، مرکز قطعه و نقطه بین این دو نقطه) در طی زمان خشک شدن برای درجه حرارت ۳۵ در شکل ۵ آورده شده است.

در شکل ۶ مقایسه‌ای بین نتایج مدل و نتایج آزمایشات آورده شده است. در تحلیل شکل ۶ می‌توان گفت که

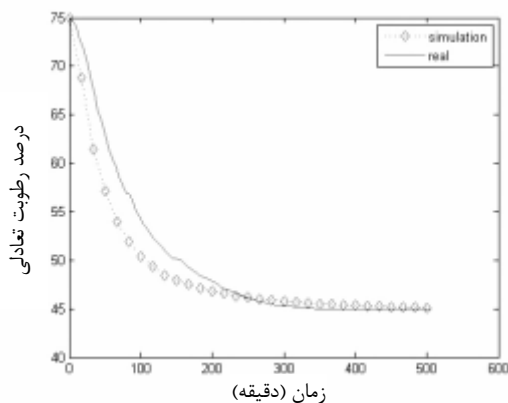
در مرحله اول خشک شدن منحنی حاصل از نتایج شبیه سازی به اندازه تقریباً ثابتی پایین تر از منحنی تجربی است. مقدار درصد رطوبت بحرانی را می توان در انتهای مرحله اول مشخص نمود. زمان ۴۰۰ دقیقه پایان انقباض خشک بوده و بعد از این زمان، قطعه انقباض قابل توجهی از خود نشان نمی دهد و مقدار تنش بعد از آن نیز روندی نزولی به خود می گیرند. در مرحله دوم خشک شدن، بر خلاف حالت قبل مقدار عدم تطابق منحنی در بازه ۶۰۰ - ۳۵۰ دقیقه مقدار ثابتی نداشته و مقدار خطا بصورت خطی کاهش می یابد. در بازه زمان های میانی خشک شدن تا زمان های انتهایی، رفتار خشک شدن هر دو حالت عملی و شبیه سازی تقریباً یکسان می باشد. مشابه تحلیل فوق را می توان برای شکل ۷ نیز انجام داد.



شکل ۵- کاهش درصد رطوبت در سه نقطه قطعه خشک شده در درجه حرارت ۳۵



شکل ۶- مقایسه رفتار شبیه سازی و رفتار تجربی خشک شدن



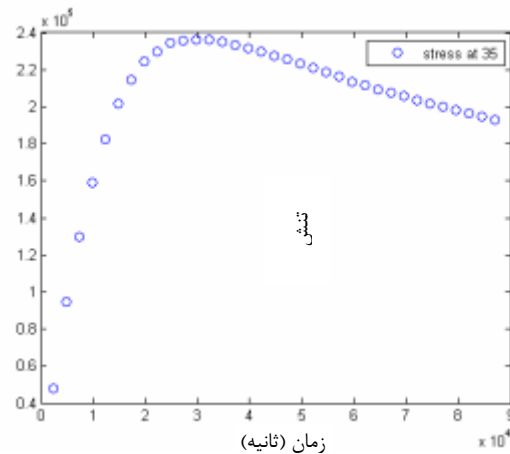
شکل ۷- مقایسه سرعت خشک شدن عملی و شبیه سازی در دمای ۷۵ درجه

## ۶-۱- عوامل عدم تطابق منحنی‌های عملی و شبیه سازی

که خشک کن مورد استفاده از نوع جابجایی بوده و در این نوع خشک‌کن‌ها فرض بر آن است که تنها عامل انتقال حرارت و تبخیر رطوبت قطعه سرامیکی به کمک هوای گرم می‌باشد. اما در عمل ممکن است دیگر روش‌های انتقال حرارت مثل هدایت و تشعشع نیز کمک به زدودن رطوبت از قطعه خام سرامیکی بنمایند. اما تنها عامل غالب که همان انتقال حرارت به کمک جابجایی می‌باشد در محاسبات و شبیه سازی آورده شده است. روند ایجاد داده: داده‌هایی که در نمودار تجربی استفاده شده است حاصل توزین قطعه در بازه‌های زمانی مشخص می‌باشد. به عبارتی دیگر درصد رطوبت و نرخ کاهش آن میانگین رطوبت کل قطعه می‌باشد. یعنی درصد رطوبت در بازه‌های زمانی در قسمت‌های مختلف قطعه متغیر می‌باشد (رطوبت مرکز زیاد و رطوبت سطح کم می‌باشد). اما نموداری که توسط داده‌های شبیه سازی شده ترسیم گردید، از میانگین چند نقطه بدست آمده است که توسط محقق از محل‌های مختلف قطعه انتخاب شده است. ناهمگنی در ساختار یکی دیگر از عوامل تاثیر گذار بر عدم تطابق کامل است. مخلوطی که مورد شبیه سازی قرار گرفته است مخلوطی یکنواخت در نظر گرفته شده است. اما در واقع ممکن است اینطور نباشد. ضریب نفوذ رطوبت: ضریب نفوذ رطوبت را بایستی از طریق آزمایشات عملی محاسبه نمود تا مقدار آن مشخص و در معادلات اجزاء محدود وارد نمود. در این تحقیق نیز ضریب نفوذ در درجه حرارت و زمان‌های مختلف به کمک معادله و و قانون تعمیم یافته فیک محاسبه گردید.

## ۶-۲- بررسی تنش‌ها

اختلاف فاز موجود بین سطح و عمق قطعه در حال خشک شدن، باعث انقباض بیشتر سطح نسبت به عمق شده و سطح قطعه به خاطر از دست دادن رطوبت بیشتر نسبت به عمق تمایل به کاهش اندازه بیشتری دارد و جابجایی در سطوح و گوشه‌ها بیشتر از سایر نقاط و مرکز است (شکل ۸).



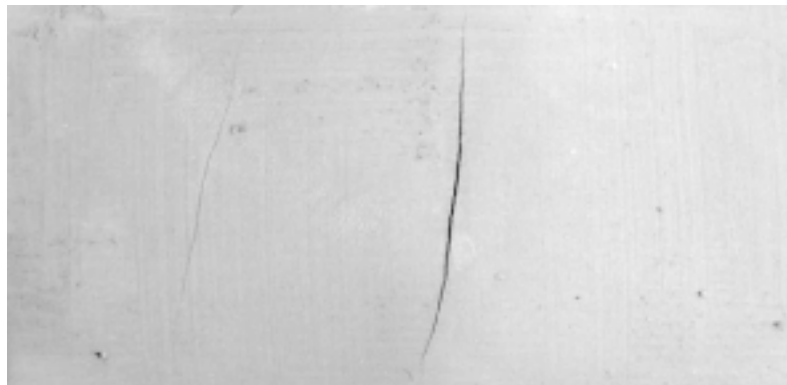
شکل ۸- نمودار تغییر تنش بر اساس معیار ون مسیز در ۳۵ درجه

در نتیجه این ناهمسانی تغییر شکل‌ها، گرادیان‌های رطوبت و جابجایی در جسم ایجاد شده که در نهایت تنش در قطعه ایجاد می‌شود. وجود گرادیان‌های جابجایی بین سطح و مرکز نیز باعث ایجاد تنش‌های کششی بزرگی در لبه‌ها و سطح خواهد شد. به عبارتی دیگر تنش‌ها همزمان با توزیع غیر یکنواخت رطوبت روندی افزایشی داشته و در زمانی از خشک شدن به ماکزیمم مقدار خود رسیده و بعد از آن به موازات توزیع یکنواخت رطوبت روندی نزولی داشته و در زمان‌های انتهایی به حالت پایدار خود می‌رسند. کنترل این تنش‌ها حائز اهمیت است چراکه اگر مقدار آنها از استحکام تسلیم قطعه فراتر رود، ایجاد ترک و شکست قطعه محتمل می‌باشد (شکل ۹). زمان پیدایش ترک زمانی است که تنش‌ها به حداکثر مقدار خود برسند، بعد از مقایسه مدت زمان حاصل از شبیه سازی و زمان ایجاد ترک در آزمایشات و مقایسه آنها دریافت گردید که اختلاف آنها اندک است.

تنش‌هایی که بر روی قطعات حاصل می‌شوند، متأثر از قیود خارجی و وجود گرادیان رطوبت است. هنگامی که هیچ قید مرزی اعمال نشده باشد، انقباض در تمام جهات یکسان است و در نتیجه هیچ تنش ایجاد نمی‌گردد هر چند تفاوت رطوبت در بخش‌های مختلف قطعه در طی فرآیند خشک شدن باعث تغییر شکل‌های مختلف از ابتدا تا انتهای خشک شدن می‌گردد. این تغییر شکل‌ها می‌توانند حتی در صورتیکه قید خارجی وجود نداشته باشد باعث ایجاد تنش‌هایی در درون قطعه گردد و این تنش‌ها برای هر نقطه در طی فرآیند خشک شدن متغیر است. می‌توان گفت منبع ایجاد عیوب در قطعات سرامیکی ناشی از انقباض غیر یکنواخت قطعه می‌باشد که باعث تغییر حجم و القای تنش‌های گرمایی- رطوبتی در قطعه می‌شوند.

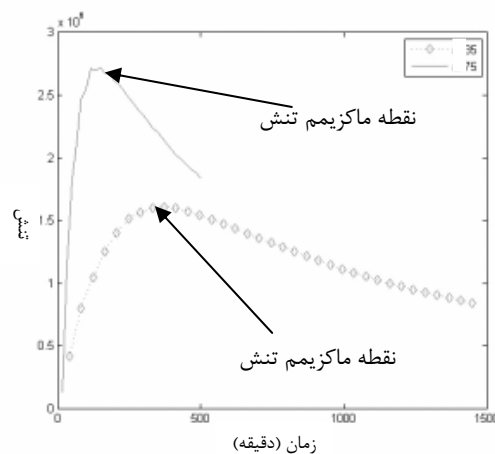
### ۶-۳- مقایسه تغییر شکل‌ها

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است که تغییر مکان در گوشه‌ها بالاتر از نقاط دیگر قطعه می‌باشد و این امری طبیعی است چراکه نقاط گوشه از دو طرف تحت تاثیر حرارت می‌باشد و زودتر رطوبت خود را از دست می‌دهد. لازم به ذکر است که با مقایسه مقدار جابجایی تجربی گوشه‌ها مقدار جابجایی شبیه سازی مقداری خطا نیز نتیجه گردید. این خطا از آنجا ناشی می‌شود که در شبیه سازی مجموع جابجایی‌ها در هر سه جهت  $x, y, z$  می‌باشد، اما در آزمایشات عملی اندازه‌گیری جابجایی‌ها تنها در دو جهت  $x, y$  انجام شد و به خاطر استفاده از یک دوربین نمی‌توان مقدار جابجایی در جهت  $z$  اندازه‌گیری نمود.

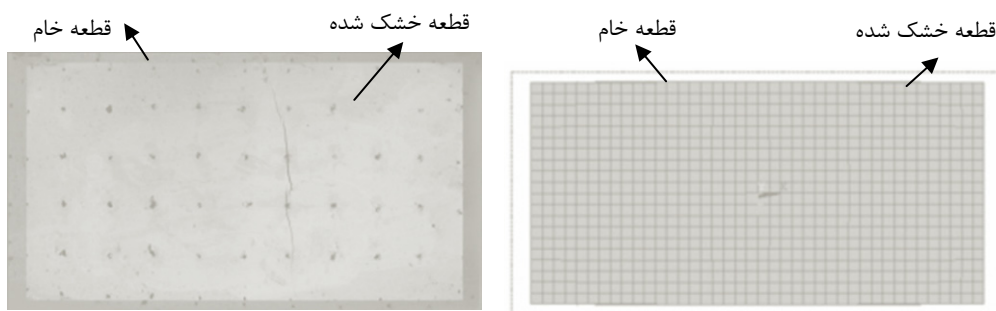


شکل ۹- پیدایش ترک در محل تمرکز تنش

شکل ۱۰ نشان دهنده تغییرات تنش در طی گذشت زمان خشک شدن می‌باشد که از نتایج شبیه سازی استخراج گردیده است. این نمودار تغییرات تنش در یک نقطه واقع در مرکز قطعه نشان می‌دهد. مقادیر تنش ماکزیمم در هر درجه حرارت برای هر قطعه متفاوت بوده و مقدار ماکزیمم تنش برای درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی گراد بیشتر است.

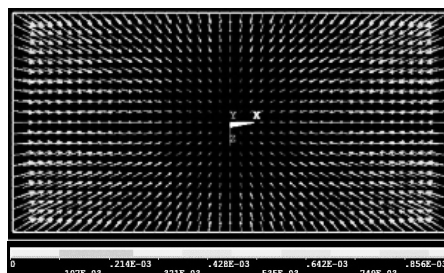
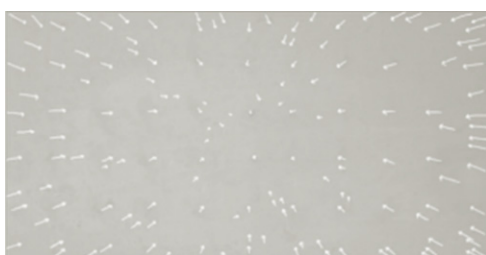


شکل ۱۰- مقایسه تنش‌ها در دماهای ۳۵ و ۷۵ درجه



شکل ۱۱- مقدار تغییر شکل قطعه شبیه سازی در انتهای زمان خشک شدن

شکل ۱۲- مقدار تغییر شکل تجربی قطعه در انتهای زمان خشک شدن



شکل ۱۳- بردارهای کرنش شبیه سازی شده در انتهای زمان خشک شدن

شکل ۱۴- بردارهای کرنش تجربی در انتهای زمان خشک شدن

## ۷- نتیجه گیری

با توجه به نتایج تجربی و شبیه سازی می توان دریافت که حداکثر جابجایی ها را گوشه های قطعه سرامیکی به خود اختصاص داده است و هرچه از گوشه ها به سمت مرکز قطعه نزدیک شویم این مقدار کمتر شده تا اینکه در مرکز قطعه برابر صفر می شود. در اثر این تغییر شکل، کشش سطحی بین گوشه و مرکز ایجاد می شود که نتیجه آن ایجاد ترک و تنش بر روی قطعه به دلیل سرعت غیر یکنواخت خروج رطوبت است. دانستن چگونگی توزیع این تنش ها کمک زیادی به کنترل فرآیند خشک شدن می نماید که نتیجه آن ایجاد قطعه ای با کمترین عیب است. درجه حرارت و درصد رطوبت و شرایط تکیه گاهی تأثیر مستقیم بر روند خشک شدن و تولید محصول عاری از عیب دارد. در فرآیند خشک کردن بایستی فرآیند تا قبل از رسیدن رطوبت قطعه به مقدار بحرانی، تحت کنترل باشد و از دمای پایین و رطوبت بالای محیط جهت خشک کردن محصول در مرحله اول خشک کردن استفاده شود تا قطعه ای عاری از عیب و با کیفیت تولید شود. مقایسه زمان پیدایش ترک بین داده های تجربی و مدل سازی شده نیز حاکی از قابلیت اعتماد مدل سازی می باشد که به کمک این مدل سازی می توان پارامترهای خشک شدن را بهینه و همچنین اثر آن ها را بر روی اشکال هندسی مختلف بررسی نمود و نتایج را مشاهده نمود و به این ترتیب می توان گامی نو در طراحی محصول به صورت معکوس برداشت. با استفاده از نتایج تجربی فرآیند خشک کردن قطعه سرامیکی، مقدار ضریب نفوذ را برای هر سه دما بدست آورده و در انتها مشخص شد که درجه حرارت تأثیر مستقیم بر ضریب نفوذ رطوبت داشته و هرچه دما افزایش یابد مقدار ضریب نفوذ نیز بیشتر می شود.

## مراجع

- [1] H. J. Vogel, H. Hoffman, K. Roth, *Study of crack dynamics in clay soil*, *Geodema*, 125, 2005, 203-211.

- [2] H. peron, JY delenne, M. S. El. Youssofi, *Discret element modeling of drying shrinkage and cracking of soils*, computer and geotechnics, 36, 2009, 61-69.
- [3] P. D. Hallet and T. A. Newoson, *Describing soil crack formation using elastic-plastic fracture mechanics*, European journal of soil science, 2005, 56, 31-38.
- [4] Bin Shi, Chun Liu, Lizheng Zhaho, Baojun Wang, *Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayed soils*, chaosheng tang, , Engineering Geology, 101, 2008, 204-217.
- [۵] Ford, R.W, خشک کردن سرامیک‌ها، سید حسین میرحسینی، لیلا شریفی، محسن نوری، علی امیرارجمند، انتشارات جهاد دانشگاهی، چاپ اول، ۱۳۸۸
- [6] *Introduction to Drying of ceramic*, Denis A. Brosnan Clemson, South Carolina, 2002.
- [7] Susang Costa, J ayontha Kodikara, *Modeling of desiccation crack development in clay soils*, International Association for Computer Methods and Advanced in Geomechanics (IAMCMAG), 2008, 141-152
- [8] Liango Bo Hu, Herve' Pe'ron, Tomasz Hueokel, Lyesse laloui, *Numerical and phenomenological study of desiccation of soil*, In N.Lu, L.R. Hoyos and L. Reddi (eds), ASCE Geotechnical Special Publication, Advances in Unsaturated Soil, Seepage ,and, Environmental Geotechnics, 2006 ,148, 166-177.
- [9] Bin Shi, Chun Liu, Lizheng Zhaho, Baojun Wang, *Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayed soils*, chaosheng tang, , Engineering Geology, 101, 2008, 204-217.
- [10] E. F. Kasschieter, *chemical Engineering, On the risk of cracking in clay drying*, F. Augeir, W.J. coumans, A. Hugget, 88, 2002, 133-138.
- [11] The finite element method and application in engineering using, Erdogan Madenci, Ibrahim Guven, The University of Arizona, 2006
- [12] Y T Keum, J H Jeong and K H Auh, *Finite-element simulation of ceramic drying process*, ceramic processing research enter(CPRC), Hanyang university, 2000, 112- 126
- [13] Biosystems Engineering, *Finite element simulation of drying of mango*, 99, 2008, 523 – 531.
- [۱۴] Denis A. Brosnan Clemson، مقدمه‌ای بر خشک کردن سرامیک‌ها، محمد ابراهیم ابراهیمی، دانش پویان جوان، چاپ اول، ۱۳۸۶.
- [۱۵] آموزش انتقال حرارت به کمک نرم افزار انسیس، نیما جمشیدی، مهدی طالبی، بصیر خدارحمی، انتشارات سیمین دخت، ۱۳۸۴.