



یادداشت تحقیقاتی:

مطالعه آزمایشگاهی و عددی فرآیند خشک شدن سرامیک‌ها و ایجاد ترک در آنها

خلیل خلیلی^۱، سید یوسف احمدی بروغنی^۲ و محسن باقریان^{۳*}

^۱ دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ استادیار گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۳ دانشجوی دکتری گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۴/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۳/۱۳

چکیده

اکثر عیوب خشک کردن محصولات سرامیکی به علت انقباضی است که در اثر حذف رطوبت از قطعه طی خشک شدن رخ می‌دهد. سرعت هوا، دمای محیط، درصد رطوبت قطعه و محیط پارامترهای تاثیر گذار بر خشک کردن سرامیک‌ها هستند. بررسی تجربی اثرات عوامل فوق بر روی خشک شدن قطعه، وقت گیر و هزینه بر است که مدل‌سازی فرآیند می‌تواند راه مناسبی برای مطالعه آن باشد. از مدل خشک شدن می‌توان به عنوان ابزاری مناسب جهت مهندسی معکوس در راستای طراحی و ساخت قالب‌های سرامیکی استفاده نمود. همچنین مدل‌سازی، توانایی شناسایی تمرکز تنش را دارا بوده و می‌توان پارامترها را در راستای کنترل و یا حذف تنش‌ها تغییر داد. در این تحقیق به طور تجربی فرآیند خشک شدن یک قطعه سرامیکی با حجم ۲۰×۵۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعب در سه دمای ۳۵C، ۵۵ و ۷۵ انجام شد و همزمان تغییرات درجه حرارت سطح قطعه طی فرآیند خشک شدن به کمک دوربین ترموگرافی بررسی گردید. تاثیرات دمای خشک‌کن بر توزیع تنش، انقباضات، ایجاد ترک و مدت زمان رسیدن به ترک مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از آزمایشات، ضرایب نفوذ رطوبت و انتقال جرم محاسبه و مدل سازی فرآیند انجام شد.

کلمات کلیدی: انقباض خشک شدن؛ اجزاء محدود؛ ترموگرافی سطح؛ تحلیل عددی.

Technical Note:

Experimental and numerical study of the ceramic drying process and cracking

Kh. Khalili¹, S.Y. Ahmadi Brooghani² and M. Bagherian^{3,*}

¹ Assoc. Prof., Mech. Eng., Birjand University, Birjand, Iran

² Assist. Prof., Mech. Eng., Birjand University, Birjand, Iran

³ Ph.D. Student, Mech. Eng., Birjand University, Birjand, Iran

Abstract

Drying is one of the main processes during manufacturing ceramic products. The part shrinks as the water content evaporates. Shrinkage phenomenon during the drying of ceramic materials can cause defects such as crack and deformation as a result. Since many parameters influence the ceramics drying & drying shrinkage, the experimental investigation of all of them is time consuming and expensive. Numerical simulation for drying process can be an appropriate method so as to control and improve the defects mentioned above, and it can also be as a tool for mold and ceramic parts design in reverse engineering. The objective of the current research is to study the drying of a ceramic material with known chemical composition and to analyses the process using Finite Element Analysis method. Deformation values were experimentally measured using machine vision and image processing techniques. Strain vectors were determined based on which a comparison could be performed between analytical and experimental model. The drying model developed was verified by experiments.

Keywords: Shrinkage modeling; Finite element; Thermography; Numerical analysis.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۸۵-۳۲۵۳۸۷۵

آدرس پست الکترونیک: m.bagheriaan@gmail.com

۱- مقدمه

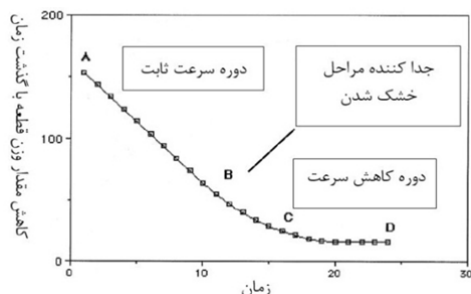
هدف این تحقیق بررسی رفتار خشک شدن به صورت تجربی است و در ادامه با استفاده از آزمایشات و پارامترهای تجربی حاصل شده، مدل‌سازی فرآیند خشک شدن یک قطعه سرامیکی انجام شده است. در این تحقیق مدل‌سازی به کمک آنالوژی رطوبت و دما با استفاده از خواص محاسبه شده از آزمایشات انجام شد، تا بتوان تنش‌های منجر به شکست قطعه و زمان رویداد ترک را محاسبه و شرایط بهینه خشک شدن قطعه را بدست آورد.

۲- مکانیزم خشک شدن سرامیک‌ها

خروج رطوبت از یک نمونه شکل داده شده به کمک فرآیندهای انتقال حرارت و انتقال رطوبت به صورت همزمان را خشک شدن گویند. در حین فرآیند خشک شدن نسبت بین رطوبت و ماده جامد درون سیستم تغییر می‌کند و مقدار آن به دو صورت مبنای خشک و مبنای تر بیان می‌شود [۹].

۲-۱- سرعت و مراحل خشک شدن

تغییر وزن رطوبت موجود در سرامیک بر واحد زمان، سرعت خشک شدن نامیده می‌شود، عبارتی دیگر سرعت خشک شدن برابر با شیب خط نمودار وزن- زمان است. سرعت خشک شدن شدیداً تحت تاثیر پارامترهای فرآیند نظیر درجه حرارت، رطوبت، سرعت نسبی هوا و فشار کل است. شکل ۱ کاهش وزن قطعه را در طی خشک شدن نشان می‌دهد.



شکل ۱- مراحل مختلف خشک شدن یک قطعه سرامیک

کاهش وزن قطعه از نقطه A تا نقطه B شیب خط ثابت بوده و مرحله اول خشک شدن با سرعت ثابت نامیده می‌شود. با ادامه فرآیند (بعد از نقطه B) نرخ خشک شدن با سرعت

فرآیند خشک کردن محصولات سرامیکی عامل اصلی ایجاد عیوب در قطعه است. این عیوب شامل ترک‌های مرئی و یا عیوبی است که باعث تغییر خواص فیزیکی در قطعه می‌شود. ترک خوردن قطعه و تاب برداشتن آن بر اثر انقباض غیر یکنواخت در حین خشک شدن روی می‌دهد، که به دلیل تفاوت سرعت خروج آب از نقاط مختلف قطعه، توزیع غیر یکسان رطوبت و یا محدودیت مکانیکی در منطقه تماس است. تحقیقات گسترده‌ای برای مدل‌سازی ترک در طی خشک شدن صورت گرفته است. وگل^۱ و همکاران [۱] 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 نموده‌اند. پرون^۲ و همکاران [۲] انقباض و ترک خشک شدن خاک را به کمک المان‌های مجزا شبیه‌سازی نموده و توسط آن‌ها انقباض و ترک‌های قطعه را پیش بینی کرده‌اند. هالت^۳ [۳] به شکل‌گیری ترک و تحلیل آن به کمک مکانیک شکست پرداخته و با استفاده از مقدار زاویه باز شدگی ترک، مقدار مقاومت قطعه به ترک خوردگی را محاسبه نموده است. کدیکارا^۴ [۴] گسترش ترک در حین خشک شدن خاک را مدل کرده و در طی آن روابطی بین سرعت خشک شدن، میانگین سطح هر بخش و ضخامت قطعه را استخراج نموده است. لیانگو^۵ [۵] با استفاده از تئوری الاستیسیته خطی فرآیند خشک شدن خاک و انقباض‌های ناشی از خشک شدن را مدل کرده است. شی^۶ [۶] فاکتورهای تاثیر گذار بر ترک‌های انقباضی خشک شدن را مورد بررسی قرار داده است. کاسچیتر^۷ [۷] ایجاد ترک در خشک شدن خاک را به کمک معادلات انتقال جرم و معادلات استاتیکی بررسی و تنش‌های مکانیکی را توسط مدل الاستیک خطی بیان کرده است. کیوم^۸ [۸] فرآیند خشک شدن سرامیک‌ها را به کمک روش اجزاء محدود مطالعه کرده است.

¹ Vogel

² Peron

³ Hallet

⁴ Kodikara

⁵ Liango

⁶ Shi

⁷ Kasschieter

⁸ Keum

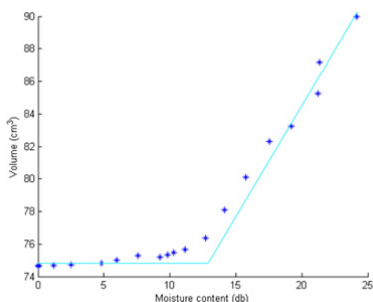
یک نمونه سریعاً سرد می‌شود، تنش سطحی توسط گرادیان دما ایجاد می‌شود. از تئوری شوک حرارتی می‌توان تنش سطحی (σ) را به گرادیان دمایی $T_{avg} - T_{surf}$ مرتبط نمود که در آن میانگین دمایی T_{avg} میانگین دمایی سطحی نمونه است [۹]. این امر ضرورت دارد که از پارامترهای ثابت مدول الاستیک (E)، ضریب انبساط حرارتی (α)، و ضریب پواسان (ν) استفاده شود. این ارتباط به صورت رابطه ۴ 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 ۳ به جای $T_{avg} - T_{surf}$ در رابطه ۴ و با مرتب کردن آن رابطه ۵ حاصل می‌شود:

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

که در آن ϕ ضریب انقباض است و مشابه با ضریب تغییرخطی در ضریب انبساط حرارتی α در معادله ۴ تغییر می‌کند. رابطه ۵ این امکان را می‌دهد که خشک کردن را با تنش‌های ناشی از آن مرتبط نمود. برای مثال در صورتی که سایر فاکتورها ثابت نگه داشته شوند افزایش سرعت خشک کردن (J) و یا کاهش ضریب نفوذ (D)، تنش سطحی (σ) افزایش می‌یابد. به طور نمونه طبق نتایج این تحقیق، مقدار کاهش حجم (انقباض) با استفاده از ترسیم نمودار حجم در برابر رطوبت برای یک نمونه در دمای ۳۵ درجه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار حجم - رطوبت در درجه حرارت ۳۵ درجه

۳- مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱- تهیه نمونه‌ها

نمونه خاک سرامیک از عمق ۳ متری زمین برداشت شد و بعد از تعیین مشخصات، آزمایش‌های عملی بر روی آن

ثابتی کم می‌شود که مرحله دوم خشک شدن نامند (نقطه B تا نقطه D). میزان رطوبت در نقطه B رطوبت بحرانی نامیده می‌شود و بیشتر انقباض در طی خشک شدن محصول تا این نقطه بروز می‌کند که 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. در نتیجه آن تبخیر انجام و رطوبت بر روی سطح به صورت پیوسته توسط مکش به سمت بالا حرکت می‌کند. مکانیزم خشک شدن در مرحله اول حرکت رطوبت به سمت بالا و تبخیر از سطح است.

۲-۲- تئوری انقباض خشک شدن

در طی فرآیند خشک شدن انقباضی صورت می‌گیرد که می‌توان آن را به صورت تئوری توسط مجموعه‌ای از معادلات مورد بررسی قرار داد هر چند محدودیت‌هایی برای این شیوه وجود دارد؛ چرا که بسیاری از پارامترهای ماده ناشناخته است. اگر یک جامد نیمه بی نهایت با طول w خشک شدن را تنها از قسمت انتهایی خود تجربه نماید، گرادیان‌های رطوبت در طی خشک کردن توسعه خواهند یافت. فرض بر آن است که حرکت رطوبت توسط قانون اول فیک بیان شود. در این قانون رابطه بین شار رطوبت (J) و گرادیان رطوبت به صورت رابطه ۱ بوده که در آن m میزان رطوبت، D ضریب نفوذ و x فاصله است [۹].

$$J = - \frac{D \frac{dm}{dx}}{w} \quad (1)$$

با تعریف m_{avg} و m_{surf} که به ترتیب به عنوان میزان رطوبت در سطح جسم در حال خشک شدن و میزان رطوبت متوسط قطعه خام تعریف می‌گردند رابطه ۱ را به صورت دیگر نیز می‌توان نوشت [۹]:

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

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 فرآیند خشک کردن و فرآیند انتقال حرارت یا شوک حرارتی برای همان نوع نمونه در نظر گرفته شود. نکته اساسی برای انجام این امر این است که هر دو فرآیند از یک گرادیان (شیب) حاصل می‌شود. در مورد خشک کردن، تنش توسط گرادیان انقباضی ایجاد خواهد شد. در مورد شوک حرارتی، زمانی که

نشان می‌دهد. خشک‌کن استفاده شده دو جداره و مکانیزم انتقال حرارت در آن از نوع جابجایی است.

۲-۳- نتایج آزمایشگاهی

جهت بررسی رفتار خشک شدن، بایستی قطعه سرامیکی که در حال خشک شدن است را در بازه‌های زمانی مختلف (هر ۵ دقیقه در ابتدا و هر ۱۵ دقیقه در انتها) از خشک‌کن خارج و آن را وزن نموده تا بتوان نرخ خشک شدن را در طی مراحل اول و دوم محاسبه نمود. سرعت خشک شدن در مرحله اول ثابت است و آب با نرخی مشخص از سطوح قطعه تبخیر می‌شود. به همین دلیل بایستی ابتدا بازه‌های زمانی توزین را کوتاه‌تر در نظر گرفت تا آزمایشات از دقت کافی برخوردار باشد.



شکل ۳- قالب چوبی و قطعه خام داخل آن

اما با گذشت زمان سرعت خشک شدن آهسته‌تر شده و بازه‌های نسبتاً طولانی‌تر انتخاب شد. شکل ۴ نمودار سرعت خشک شدن (تبخیر) را نشان می‌دهد. این نمودار به صورت تجربی و در دمای ۳۵ درجه حاصل شد. توزین قطعه تا وقتی پیش می‌رود که وزن سرامیک با گذشت زمان تغییر نکند، این بدین معناست که قطعه سرامیکی خشک شده و رطوبت آن با رطوبت محیط به تعادل رسیده است.

مراحل فوق برای هر سه درجه حرارت ۳۵، ۵۵ و ۷۵ انجام و نتایج ثبت شد. در شکل ۵ نمونه‌های خشک شده در سه دما و در شکل ۶ نمودار مربوط به کاهش رطوبت برای آنها آورده شده است.

صورت گرفت. خواص شیمیایی و فیزیکی ماده در جدول ۱ آمده است. هنگامی که آب به خاک رس افزوده می‌شود، ابتدا آب سطح ذرات را پوشش می‌دهد. بعد از آن، آب روزنه‌های مویین را پر می‌کند. 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 باقی می‌ماند را آب مویینگی نامند. در ادامه آب اضافی فضای تخلخل‌های بزرگ‌تر را فرا گرفته که در نهایت سبب جدایش ذرات از یکدیگر می‌شود. در فرایند شکل‌دادن پلاستیک، این جداسازی ذرات، سبب افزایش رفتار سیلان در سیستم شده و باعث تسهیل در شکل‌دادن قطعه می‌شود. نسبت بین آب و پودر سرامیک بایستی رعایت شده باشد؛ یعنی آب آنقدر کم نباشد که ذرات خاک چسبندگی لازم را نداشته باشند و یا آنکه آب آنقدر زیاد باشد که موجب کلوخه شدن گردد. در این تحقیق از نسبت آب ۲۸-۳۲٪ بر مبنای خشک استفاده شده است.

جدول ۱: خواص شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده

عنصر	درصد	مشخصات ماده
Si	۵۹.۵	ضریب انبساط ۰.۰۰۰۵
Ca	۷.۸۳	ضریب پواسون ۰.۴
Mg	۴.۲۰	چگالی خشک ۱۸۰۰
Fe	۴.۵۰	رسانایی حرارتی ۱.۵
Al	۷.۸۰	گرمای ویژه خاک ۰.۸۴۰
Ti, Mn	< ۱	مدول الاستیک ۶۹×۱۰^۹

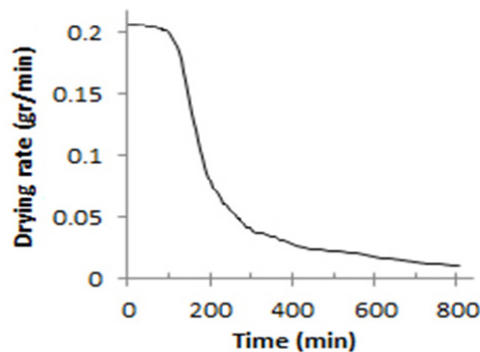
بعد آنکه از خروج هوای داخل مخلوط اطمینان حاصل شد، آن را ۲۴ ساعت استراحت داده تا رطوبت همه ذرات سرامیک، یکنواخت و مخلوط همگنی ایجاد شود. سپس با استفاده از قالب چوبی، نمونه‌های مکعب مستطیلی با ابعاد $۱۰ \times ۵ \times ۲$ سانتی‌متر مکعب تهیه شد و در سه دمای ۳۵، ۵۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد فرایند خشک شدن مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۳ تصویر قالب استفاده شده و قطعه درون آن را

قطعه درون خشک‌کن قرار داده شود، بایستی سطح قطعه خام را با استفاده از یک شابلون علامت گذاری (مش بندی) نمود تا به کمک آن بتوان مقدار جابجایی نقاط و جهت حرکت آنها را در مراحل مختلف خشک شدن بدست آورد. بعد از علامت گذاری روی سطح قطعه آن را مطابق حالت قبل داخل خشک‌کن قرار داده و جهت ثبت تصویر از قطعه، دوربین به طور عمود (شکل ۷) بر قطعه نصب گردید. دوربین باید طوری روی خشک‌کن قرار داده شود که در طی عملیات عکس‌برداری حرکت نداشته باشد. عکس‌برداری از ابتدای فرآیند تا انتهای خشک شدن انجام می‌شود. سرانجام عکس‌ها را از دوربین به کامپیوتر منتقل کرده تا بردارهای کرنش ترسیم و مقدار آن محاسبه شود.



شکل ۷- تصویر گیری از قطعه داخل خشک‌کن

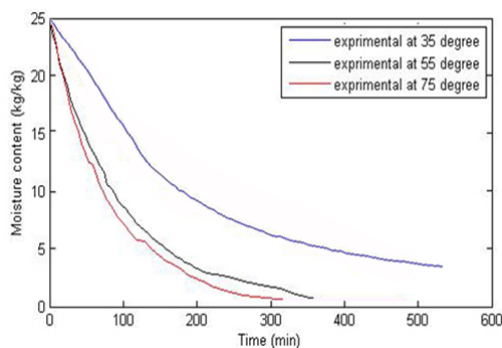
جهت محاسبه مقدار جابجایی‌ها در یک زمان مشخص از ابتدای فرآیند، بایستی تصویر مربوط را روی تصویر اولیه قرار داده به طوری که مرکز هر دو تصویر بر هم منطبق باشد؛ سپس به کمک عملیات پردازش تصویر بردارهای کرنش ترسیم می‌شوند. این عملیات بایستی برای همه نقاط انجام شود و هرچه تعداد نقاط روی قطعه خام بیشتر باشد، دقت افزایش می‌یابد. شکل ۸ تصویر مربوط به مراحل ابتدا و انتهای فرآیند خشک شدن در دمای ۵۵ درجه را به همراه مش بندی صورت گرفته بر روی آن را نشان می‌دهد. با استفاده از تصویر ۸ می‌توان بردارهای کرنش را مطابق شکل ۹ ترسیم نمود. گوشه‌های قطعه بیشترین جابجایی و مرکز قطعه دارای جابجایی صفر است.



شکل ۴- تغییرات سرعت خشک شدن در دمای ۳۵ درجه



شکل ۵- تصاویر قطعات خشک شده در دماهای مختلف



شکل ۶- نمودار کاهش درصد رطوبت قطعه حین خشک شدن در دماهای مختلف

علاوه بر رفتار خشک شدن ماده، تغییر شکل‌های ناشی از فرآیند به منظور بررسی مقدار و جهت جابجایی (بردارهای کرنش) نقاط مختلف قطعه انجام شد. در این آزمایشات بر خلاف حالت قبلی توزین صورت نمی‌گیرد، اما قبل از آنکه

که در آن M_e و M_s به ترتیب رطوبت اولیه و نهایی و L مقدار ضخامت قطعه است. معادله توزیع رطوبت با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ANSYS حل شد [۱۲].
در این روش به جای استفاده از یک تابع تقریب کلی از توابع تقریب با پیوستگی تک‌های استفاده کرده و دامنه به چندین قسمت تقسیم می‌گردد.

$$T_e = N_i(x)T_i + N_j(x)T_j \quad (9)$$

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

$$\sum_{e=1}^M \int N_i(x)R^e(x, T_i, T_j)dx = 0 \quad (10)$$

با توجه به تعریف ماتریس توابع شکل دو معادله ۹ و ۱۰ را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت [۱۲]:

$$\sum_{e=1}^M \int N^T(x)[R^e(x, T_i, T_j)]dx = 0 \quad (11)$$

$$\int_{\gamma} [N]^T \left(D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial M}{\partial t} \right) d\gamma = 0 \quad (12)$$

$$\int_{\gamma} [N]^T D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \right) d\gamma = \int_{\gamma} \partial / \partial x ([N]^T D * \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right) d\gamma - \int_{\gamma} D (\partial [N]^T / \partial x * \partial M / \partial x) d\gamma \quad (13)$$

با ساده کردن قسمت دوم معادله ۱۳ می‌توان نوشت:

$$\int_{\gamma} \partial / \partial x ([N]^T D * \frac{\partial M}{\partial x}) d\gamma = \int_l D [N]^T \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right) n_x dl \quad (14)$$

$$\int_{\gamma} D \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} * \frac{\partial M}{\partial x} + \partial [N]^T / \partial y * \partial M / \partial y \right) d\gamma = \int_l D [N]^T \left(\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right) n_x + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right) n_y \right) dl \quad (15)$$

حال با جایگذاری معادلات ۱۴ و ۱۵ در معادله اصلی ۱۲ خواهیم داشت:

$$\int_{\gamma} D \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} * \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} * \frac{\partial M}{\partial y} \right) d\gamma = \int_l D [N]^T \left(\frac{\partial M}{\partial n} \right) dl \quad (16)$$

با قرار دادن تعریف تابع شکل در معادله ۱۶:

$$\int_{\gamma} D \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} * \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} * \frac{\partial M}{\partial y} \right) d\gamma = \int_{\gamma} D [B]^T [B] \{M\} d\gamma \quad (17)$$

$$\int_{\gamma} [N]^T \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right) d\gamma = \int_{\gamma} [N]^T [N] \left(\frac{\partial \{M\}}{\partial t} \right) d\gamma \quad (18)$$

$$\int_{\gamma} [N]^T [N] \left(\frac{\partial \{M\}}{\partial t} \right) d\gamma = \left(\int_{\gamma} [N]^T [N] d\gamma \right) * \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right) \quad (19)$$

تصویر نهایی

تصویر اولیه



شکل ۸- تغییر شکل قطعه در انتهای فرایند خشک شدن نمونه در دمای ۵۵ درجه



شکل ۹- بردارهای کرنش ناشی از آزمایشات در انتهای زمان خشک شدن بر روی قطعه خام در دمای ۵۵ درجه

۴- مدل اجزاء محدود و حل آن

در این تحقیق جهت تعیین توزیع رطوبت قطعه از معادله سه بعدی نفوذ رطوبت به شرح زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

که در آن D ضریب نفوذ رطوبت، M رطوبت و t زمان است. با استفاده از آنالوژی می‌توان معادله ۶ را با معادله توزیع حرارت (معادله ۷) یکسان فرض کرد. برای این معادله حل‌های متفاوتی گزارش شده است [۱۰]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

با استفاده از قانون تعمیم یافته فیک (Fick equation)

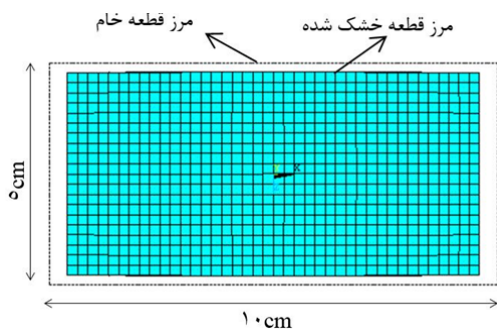
ضریب نفوذ رطوبت را می‌توان به صورت رابطه ۸ بدست آورد [۱۱].

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

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مقایسه تغییر شکل‌ها

زمانی که آب در مرحله اول تبخیر می‌شود، انقباضی در اثر خشک شدن ایجاد می‌گردد؛ چرا که خارج شدن آب به ذرات این اجازه را می‌دهد که بر اثر نیروهای موینگی به طرف یکدیگر جمع شوند. این نیروها در نتیجه هم پوشانی لایه‌های نازک آب می‌باشند. با استفاده از تصاویری که در مراحل مختلف فرآیند گرفته شد، می‌توان مقدار و جهت این انقباض‌ها را در نقاط مختلف قطعه و در بازه‌های زمانی مختلف مشاهده نمود. به کمک مدل‌سازی نیز این کار امکان پذیر است. در شکل ۱۱ مقدار تغییر شکل نهایی قطعه در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن آورده شده است.



شکل ۱۱- تغییر شکل قطعه در مدل‌سازی فرآیند

در این تصویر حداکثر جابجایی مربوط به گوشه‌ها و حداقل جابجایی را مرکز قطعه به خود اختصاص داده است. چنانچه تصویر ۱۱ با تصویر ۸ (حاصل از آزمایشات تجربی) مقایسه گردد، می‌توان تا حدودی از تطابق نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی اطمینان حاصل نمود.

جهت اعتبار بیشتر به مدل، قطعه شکل ۱۲ نیز مورد مطالعه قرار گرفت و مقدار تغییر شکل‌های مدل و آزمایش گزارش شد. این قطعه یک آجر ساختمانی سوراخ دار است که به روش اکستروژن ایجاد شده و در مرحله بعدی به قطعات کوچک‌تر برش می‌خورد. شرایط واقعی این قطعه را در نرم افزار مدل و سپس مقدار انقباضات قطعه مدل شده با انقباضات قطعه واقعی مقایسه شد که نتایج مطلوب و قابل قبولی را به همراه داشت [۱۳].

شبیه‌سازی با تعریف دو مرحله خشک شدن انجام شد. در مرحله اول نرخ تبخیر ثابت و در مرحله دوم رطوبت سطح قطعه برابر با رطوبت محیط (با تعریف شرایط مرزی) تعریف گردید. با استفاده از مقادیر تجربی و معادله ۸، مقدار ضریب نفوذ برای هر درجه حرارت حاصل و در جدول ۲ آورده شده است. مشخص است که هر چقدر درجه حرارت افزایش یابد ضریب نفوذ رطوبت نیز بیشتر خواهد شد.

جدول ۲- ضریب نفوذ رطوبت در دماهای مختلف

درجه حرارت (سانتی‌گراد)	ضریب نفوذ (m^2/s)
۳۵	۱.۵۵۴۶×۱۰^{-۷}
۵۵	۲.۱۲۶۶×۱۰^{-۷}
۷۵	۲.۸۶۶۷×۱۰^{-۷}

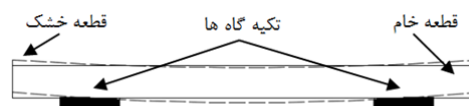
با استفاده از معادلات فوق و ضریب نفوذ، مدل‌سازی در سه دما در نرم افزار ANSYS انجام و نتایج با رفتار تجربی خشک شدن قطعه مقایسه شده است. فرآیند شبیه‌سازی در نرم افزار با استفاده از المان مکعبی کوپل حرارتی- مکانیکی SOLID226 و تعداد ۸۰۰۰ المان انجام و تحلیل به صورت گذرا صورت گرفت. شرایط اولیه به صورت زیر اعمال شد:

$$T(x, y, 0) = T_0 ; M(x, y, 0) = M_0 \quad (20)$$

که M_0 و T_0 به ترتیب رطوبت اولیه و درجه حرارت اولیه انتخاب شدند. شرایط مرزی نیز در دو مرحله خشک شدن عبارت است از:

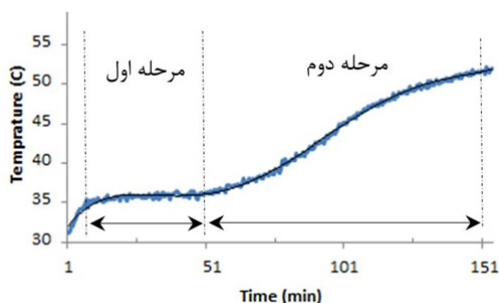
$$\text{stage I drying:} \\ \text{at } x, y, z : J = f_0 \quad (21)$$

stage II drying:
 $\text{at } x, y, z : M_s = M_a$
 که x, y, z مختصات سطوح قطعه، f_0 مقدار نرخ ثابت تبخیر از سطح (kg/m^2s) (با استفاده از داده های تجربی بدست آمد)، M_s و M_a به ترتیب رطوبت محیط و رطوبت سطح است و بسته به شرایط برای حالات مختلف خشک شدن متفاوت می باشد. شرایط تکیه گاهی به صورت شکل ۱۰ مدل شده است.



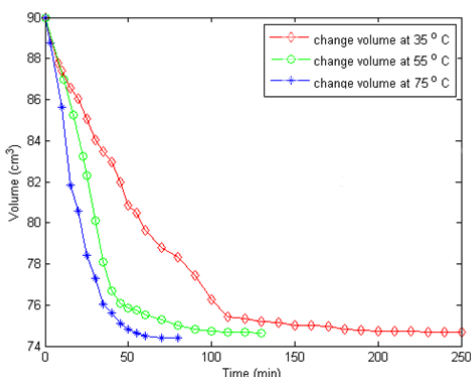
شکل ۱۰- شرایط تکیه گاهی در حالت تجربی و مدل‌سازی

شکل ۲ به ترتیب ۱۴٪، ۱۱٪ و ۱۰٪ برای سه دمای ۵۵، ۷۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید و زمان رسیدن به این نقطه نیز به ترتیب ۱۲۰، ۸۰ و ۵۰ دقیقه برای سه دمای ۳۵، ۵۵ و ۷۵ درجه حاصل شد.

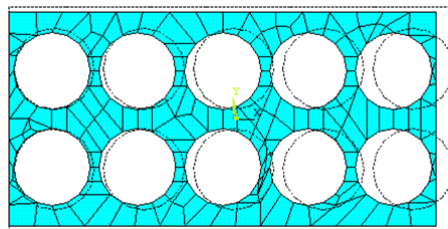


شکل ۱۲- نمودار ترموگرافی سطح قطعه در حال خشک شدن در ۵۵ درجه سانتی‌گراد

بایست به این نکته توجه نمود که خشک شدن در مرحله اول توسط کاهش دمای حباب خشک و شرایط انتقال حرارت کنترل می‌شود و آنتالپی لازم برای تبخیر را تامین می‌نماید. در انتهای مرحله اول، استراتژی خشک شدن تغییر کرده چراکه انقباض دیگر یک پارامتر مورد ملاحظه بحرانی نیست. شکل ۱۴ حاصل بررسی کاهش حجم قطعه در سه دماست، که در آن تغییرات حجم برای هر درجه حرارت بررسی شده است. در این شکل مشخص است که بعد از نقطه بحرانی، در قطعه کاهش حجم زیادی رخ نمی‌دهد؛ چرا که در مرحله دوم خشک شدن، آب موجود در روزنه‌ها و آب سطحی ذرات سرامیک تبخیر می‌شوند.



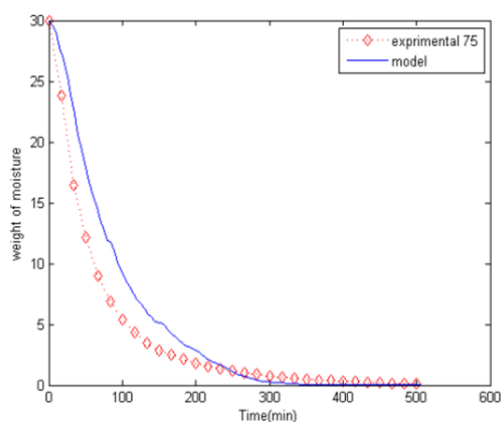
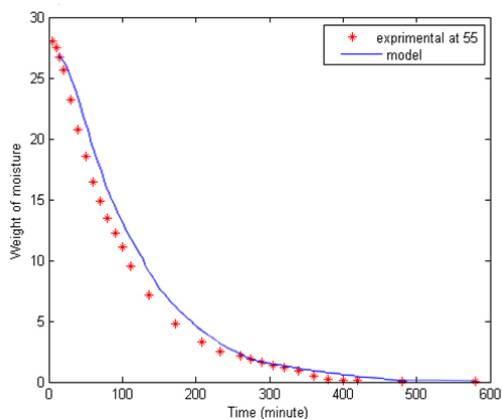
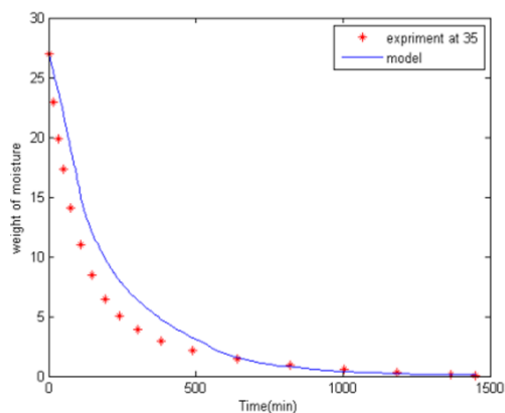
شکل ۱۴- کاهش حجم قطعه در سه درجه حرارت



شکل ۱۳- انقباض آجر سوراخ دار در مدل‌سازی

۲-۵- بررسی رفتار خشک شدن

هنگامی که درصد رطوبت قطعه سرامیکی به نقطه بحرانی رسید، اولین دوره افت یا کاهش سرعت آغاز می‌گردد. در این مرحله سطح با آب پوشیده نشده و تبخیر در زیر سطوح قطعه سرامیکی رخ داده و فشار مکشی توسط تبخیر آب از سطح موئین ایجاد می‌شود. تا قبل از نقطه بحرانی، آب از سطح تبخیر می‌شود و روزنه‌های موئین تلاش می‌نمایند آب درون قطعه خام را به خود کشیده و عمل مکش را ایجاد نمایند. در این مرحله درجه حرارت محیط و خواص سرامیک تاثیر زیادی بر خروج و انتقال رطوبت باقیمانده از قطعه دارند. در مرحله اول خشک‌شدن، افزایش درجه حرارت صرفاً باعث افزایش نفوذ و افزایش سرعت خروج بخار آب از میان ساختار متخلخل شده و ممکن است قطعه ترک بردارد. افزایش دما در این مرحله تاثیری بر دمای قطعه نداشته و دمای قطعه در مرحله اول همان دمای حباب تر باقی خواهد ماند. بعد از اتمام مرحله اول دمای قطعه شروع به افزایش می‌کند تا آنکه به دمای خشک‌کن (دمای حباب خشک) برسد. شکل ۱۳ نمودار ترموگرافی سطح قطعه در حال خشک شدن در درجه حرارت ۵۰ را نشان می‌دهد که در ابتدای دوره اول درجه حرارت ثابت (دمای حباب تر) و در مرحله دوم خشک شدن درجه حرارت افزایش می‌یابد. این نمودار به صورت تجربی و با استفاده از دوربین ترموگرافی در آزمایشگاه حاصل شده است. رطوبت بحرانی با توجه به نرخ خشک شدن تغییر می‌کند. مقدار رطوبت بحرانی و زمان رسیدن به این نقطه را می‌توان به روش‌های متفاوتی بدست آورد. به عنوان مثال می‌توان آن را از دیگرگرم‌های شکل ۲، شکل ۶ و یا شکل ۱۳ بدست آورد. رسیدن به رطوبت بحرانی به منزله انتهای مرحله اول، کاهش چشم‌گیر انقباض و نیز افزایش دمای سطح قطعه است. مقدار رطوبت در نقطه بحرانی با استفاده از دیگرگرم



شکل ۱۵- مقایسه رفتار تجربی و شبیه سازی خشک شدن قطعه سرامیکی در شرایط ۳۵، ۵۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد

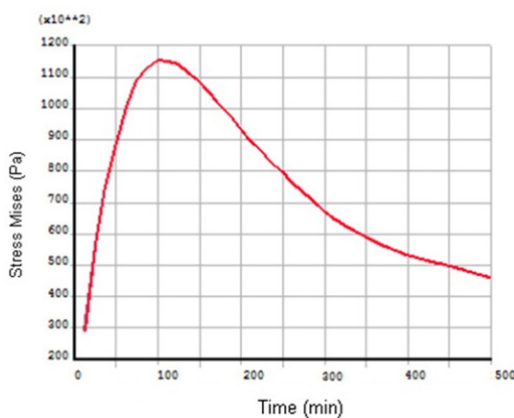
شکل ۱۵ مقایسه رفتار تجربی ماده خشک شده و مدل‌سازی را نشان می‌دهد. که در آن مراحل اول و دوم خشک شدن و نقطه بحرانی مشخص است. در این شکل، دو نمودار خشک شدن واقعی و مدل‌سازی به صورت کامل بر یکدیگر منطبق نیستند، اما هر دو نمودار رفتاری مشابه داشته و تنها با یکدیگر اختلاف فازی جزئی دارند. علت اصلی این اختلاف به این جهت است که نمودار تجربی، حاصل متوسط کاهش رطوبت در تمامی قسمت‌های قطعه است؛ اما نمودار مدل حاصله متوسط چند نقطه است که توسط محقق بصورت اتفاقی انتخاب شده است و انتخاب همه نقاط از قسمت‌های مدل و میانگین‌گیری در آنها عملاً مقدور نیست.

۳-۵- بررسی تنش‌ها

سرعت خشک شدن در مکان‌های مختلف قطعه متفاوت بوده و سطح قطعه قبل از مرکز آن منقبض می‌شود که این عامل سبب بروز تفاوت در انقباض بین سطح و داخل 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. گرادیان‌های رطوبت 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. در نتیجه این ناسازگاری تغییر شکل‌ها، گرادیان‌های رطوبت و جابجایی در جسم ایجاد شده که در نهایت تنش‌هایی را در قطعه ایجاد می‌نمایند. 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 چرا که اگر مقدار آنها از استحکام تسلیم قطعه فراتر رود، ایجاد ترک و شکست قطعه محتمل می‌باشد. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ توزیع تنش‌ها را در انتهای فرآیند نشان می‌دهند.

با مقایسه شکل‌های ۱۷ و ۱۸ می‌توان به این حقیقت پی برد که ترک در میانه‌های قطعه رخ می‌دهد. شکل ۱۹ تغییرات تنش در یک نقطه واقع در مرکز قطعه مدل شده را نشان می‌دهد. با استفاده از نمودار ۱۹ می‌توان زمان وقوع و یا عدم وقوع ترک را پیش بینی نمود. ترک در قطعه هنگامی رخ می‌دهد که تنش ناشی از گرادیان دما و رطوبت از استحکام تسلیم قطعه فراتر رود. در این شکل حداکثر تنش در زمان ۱۰۰ دقیقه اتفاق می‌افتد و می‌توان استنباط نمود که چنانچه در بازه ابتدایی ۱۰۰ دقیقه، تنش قطعه بیشتر از تنش تسلیم نشود، بعد از آن نیز شکستی در قطعه رخ نخواهد داد [۱۵].

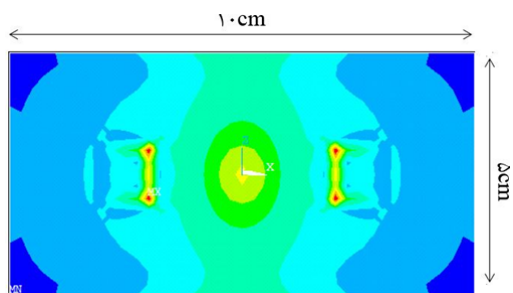
مقادیر تنش ماکزیمم در هر درجه حرارت برای هر قطعه متفاوت بوده و مقدار ماکزیمم تنش برای درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی گراد بیشتر است.



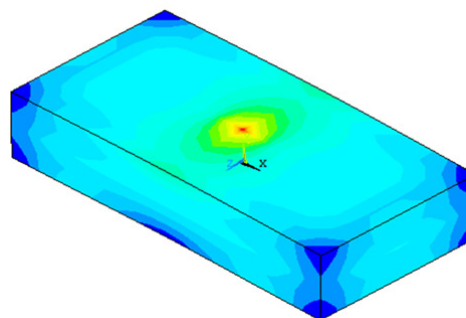
شکل ۱۹- نمودار تغییرات تنش با گذشت زمان برای خشک شدن در ۷۵ درجه سانتی گراد

۷- نتیجه‌گیری

رفتار خشک شدن ماده، ضریب نفوذ رطوبت، حداکثر انقباضات، توزیع تنش و زمان وقوع ترک دستاوردهای انجام آزمایشات است. قطعه سرامیکی تر بایست در مدت زمان مناسب و با حداقل عیوب خشک گردد که مناسب‌ترین راه، مدل‌سازی فرآیند خشک شدن است. به کمک مدل‌سازی می‌توان پارامترهای خشک شدن را بهینه و اثر آن‌ها را بر روی اشکال هندسی پیچیده بررسی و نتایج را با حداقل هزینه مشاهده کرد. به این ترتیب می‌توان در طراحی محصول به صورت معکوس گامی نو برداشت.



شکل ۱۶- توزیع تنش‌ها با معیار ون مایز (نمای پایین)



شکل ۱۷- توزیع تنش‌ها با معیار ون مایز (ایزومتریک)

چنانچه 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. شکل ۱۸ نمونه ای از ترک‌هایی که حین خشک شدن روی قطعه اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- پیدایش ترک در محل تمرکز تنش (نمای بالا)

- مراجع**
- [8] Keum YT, Jeong JH, Auh KH (2000) Finite-element simulation of ceramic drying process. *ceramic process research* 10: 112–126
- [9] Denis A (2002) Introduction to drying of ceramic. Brosnan Clemson. South Carolina.
- [10] Guven I (2006) The finite element method and application in engineering using, Erdogan Madenci. The University of Arizona.
- [11]. Janjai S (2008) Finite element simulation of drying of mango. *Biosys Eng* 99: 523–531.
- [۱۲] باقریان م (۱۳۸۹) کنترل کیفیت محصولات تولیدی به کمک ماشین بینایی و تحلیل محصو، پایان‌نامه فوق لیسانس، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند.
- [۱۳] باقریان م، خلیلی خ (۱۳۹۰) بررسی تاثیرات ضخامت قطعه بر انقباضات خشک شدن. اولین کنفرانس بین المللی خاور میانه.
- [14] Bagherian M, Khalilia K, Khisheh S (2013) Numerical simulation of drying ceramic using finite element and machine vision. *procedia technology* 8: 386–391.
- [1] Vogel HJ, Hoffman H, Roth K (2005) Study of crack dynamics in clay soil. *Geodema* 125: 203–211.
- [2] Peron H, Delenne JY, El Yousoufi MS (2009) Discret element modeling of drying shrinkage and cracking of soils. *Comput. Geotech* 36: 61–69.
- [3] Hallet PD, Newoson TA (2005) Describing soil crack formation using elastic-plastic fracture mechanics. *Eur J Soil Sci* 56: 31–38.
- [4] Costa S, Kodikara JA (2008) Modeling of desiccation crack development in clay soils. *IAMCMAG* 12: 141–152.
- [5] Hu LB, Pe'ron H (2006) Numerical and phenomenological study of desiccation of soil. *Geotech Geol Eng* 148: 166–177.
- [6] Shi B, Liu C, Zhaho L, Wang B (2008) Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayed soils. *Environ Geol* 101: 204–217.
- [7] Kasschieter EF (2002) On the risk of cracking in clay drying. *Chem Eng* 88: 133–138.