



شبیه‌سازی عددی تاریخچه دمایی در قالب و قطعه ریخته‌گری طی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی لوله‌های چدن نشکن

احسان احمدی^۱، محمدرضا فروزان^{۲*}، منیژه آقایی^۳، مسعود شیرانی^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، cc.iut.ac.ir، forouzan@

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۸ بهمن ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۷ اسفند ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

ریخته‌گری گریز از مرکز افقی لوله

انتقال حرارت

شبیه‌سازی گذرای حرارت

تحلیل اجزاء محدود

چکیده

لوله‌های چدن نشکن کاربرد وسیعی در شبکه‌های مدرن آب آشامیدنی و فاضلاب دارند. این لوله‌ها اغلب به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی تولید می‌شوند. در تحقیق حاضر از بسته نرم‌افزاری آنسیس به منظور شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ریخته‌گری این لوله‌ها بر مبنای روش اجزاء محدود، استفاده شده است. این شبیه‌سازی شامل به‌دست آوردن تاریخچه توزیع دما در قالب و مذاب طی چرخه‌های دمایی مختلف می‌باشد. در این تحلیل تغییر فاز ناشی از انجماد، تابعیت خواص ترمو فیزیکی مواد با دما، ضریب انتقال حرارت در مرز مشترک مذاب- قالب ناشی از پوشش قالب و فاصله هوایی و شرایط مرزی حرارتی متناسب با شرایط عملی در نظر گرفته شده است. در این مقاله، فرآیند مذاب‌ریزی توسط ناودان متحرک نیز، شبیه‌سازی شده و توزیع گذرای دما در سرتاسر بدنه اصلی قالب و لوله به‌دست آمده است. نتایج حل حرارتی فرآیند ریخته‌گری با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق و نتایج تجربی ارائه شده توسط دیگر محققان مقایسه شده که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. این نتایج می‌تواند به‌عنوان ورودی برای مدلی که عمر خستگی حرارتی قالب‌های لوله‌ریزی را تخمین می‌زند به‌کار رود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقاومت حرارتی ناشی از فاصله هوایی و پوشش قالب نقش مؤثری در توزیع دما در قالب و لوله دارد. همچنین فرآیند مذاب‌ریزی باعث تشکیل گرادین‌های دمایی در جهت محوری در قالب و لوله می‌گردد.

Numerical simulation of thermal history in mold and casting during horizontal centrifugal casting of ductile iron pipes

Ehsan Ahmadi¹, Mohammad Reza Forouzan^{2*}, Manizheh Aghaei³, Masoud Shirani⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

4- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, forouzan@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 07 February 2014

Accepted 08 March 2014

Available Online 13 July 2014

Keywords:

Horizontal Centrifugal Pipe Casting

Heat Transfer

Transient Thermal Simulation

FE Analysis

ABSTRACT

Ductile iron pipes are widely used in modern drinking water and wastewater networks. They often produce by horizontal centrifugal casting process. In this research, the finite element base package ANSYS software has been used for thermal simulation of horizontal centrifugal casting process of ductile iron pipes. The simulation includes obtaining temperature distribution of mold and cast during different temperature cycles. In the simulation, latent heat due to solidification, temperature-dependent thermo-physical properties of material, heat transfer coefficient in metal-mold interface due to mold coating and air gap and thermal boundary conditions proportional to practical conditions, are considered. In this paper, pouring process to get transient thermal distribution in main body of mold and cast are also simulated. The results of the thermal simulation show good agreement with the experimental results conducted in this study and literature. The results can be used as input data for the numerical model to estimate thermal fatigue life of a permanent mold. The results of simulation have shown that, the thermal resistance of the air gap and mold coating has a significant effect on the temperature distribution in the pipe and the mold. Pouring process causes temperature gradients in the axial direction in the mold and the cast.

لنگرها و چرخ‌دنده‌ها به‌کار می‌رود [۱].

یکی از مهم‌ترین محصولات تولید شده با این روش، لوله‌های چدن نشکن^۲ است. این لوله‌ها سال‌هاست در شبکه‌های مدرن آب آشامیدنی و فاضلاب

۱- مقدمه

ریخته‌گری گریز از مرکز^۱ یکی از روش‌های ریخته‌گری به‌شمار می‌رود که به‌طور گسترده در ساخت پوش‌های استوانه‌ای، مخازن تحت فشار، چرخ

2- Ductile iron pipes

1- Centrifugal casting

Please cite this article using:

E. Ahmadi, M.R. Forouzan, M. Aghaei, M. Shirani, Numerical simulation of thermal history in mold and casting during horizontal centrifugal casting of ductile iron pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 185-193, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به‌عنوان لوله استاندارد در صنعت شناخته شده‌اند. عمده‌ترین روش تولید این لوله‌ها در جهان، ریخته‌گری گریز از مرکز افقی^۱ در ماشین لوله‌ریزی موسوم به دی‌لاوود^۲ است که در شکل ۱ همراه با جزئیات نشان داده شده است. در فرآیند دی‌لاوود، چدن نشکن غیرآلیاژی، درون قالب فلزی که معمولاً از جنس فولاد با ترکیب کروم و مولیبدن است، ریخته‌گری می‌شود.

یکی از زمینه‌های تحقیق در این فرآیند، تخمین و افزایش عمر قالب است. مسأله شناخته شده در مورد شکست قالب‌های لوله‌ریزی، پدیده خستگی حرارتی^۳ در قالب طی ریخته‌گری لوله می‌باشد. این پدیده ناشی از وقوع متناوب چرخه گرادیان حرارتی قالب تحت بارگذاری دمایی مکرر و در نتیجه ایجاد چرخه تنش و کرنش‌های حرارتی در آن است. از آنجایی که استفاده از روش‌های اندازه‌گیری تجربی برای مطالعه بیشتر روی تغییرات دما طی ریخته‌گری لوله پرهزینه و زمان‌بر هستند، با به‌کارگیری روش‌های عددی از جمله روش اجزاء محدود می‌توان توزیع دما در قالب و مذاب طی چرخه‌های دمایی^۴ مختلف ریخته‌گری گریز از مرکز لوله را به‌دست آورد. تحلیل حرارتی فرآیند در یافتن راه‌کارهایی برای افزایش عمر خستگی حرارتی قالب نیز مفید است.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادله گرما در مذاب و قالب

تحلیل حرارتی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز، یک تحلیل وابسته به زمان است. از این رو معادلات انتقال حرارت در حالت وابسته به زمان برای تحلیل این فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از قانون فوریه و اصل بقای انرژی می‌توان معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت را که به معادله گرما معروف است به‌صورت زیر بیان نمود [۱۶]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \dot{q} \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی (kgm^{-3})، C_p ظرفیت گرمایی ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)، K ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) و \dot{q} نرخ تولید انرژی بر واحد حجم ماده (Wm^{-3}) است.

برای تعیین دما در یک ماده، بایستی معادله گرمای مربوطه را حل کرد. از آنجایی که فرآیند انجماد مذاب با تغییر فاز همراه است، انرژی حاصل از تغییر فاز (گرمای نهان) نیز باید برای چنین تحلیلی در نظر گرفته شود. بنابراین در معادله گرما عبارت منبع (\dot{q}) معرف آهنگ آزاد شدن گرمای نهان انجماد می‌باشد. روش پیاده شده در این تحقیق برای در نظر گرفتن اثرات گرمای نهان، روش آنتالپی است که نرم‌افزار انسیس نیز براساس همین روش اثر گرمای نهان حاصل از تغییر فاز را به مدل اعمال می‌کند [۱۷]. خواص حرارتی که برای تحلیل گذرای فرآیند ریخته‌گری لوله مورد نیاز است شامل چگالی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمای ویژه و آنتالپی است. از آنجایی که در نرم‌افزار استفاده شده در این تحقیق امکان اعمال خواص حرارتی ماده برحسب دما وجود دارد، این خواص برای مواد مختلف وابسته به دما در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ خواص ترموفیزیکی فولاد $21\text{CrMo}10$ و در جدول ۲ خواص ترموفیزیکی چدن نشکن تابع دما آورده شده است.

از آنجایی که معادله گرما نسبت به مختصات مکانی از درجه دوم و از نظر زمانی از درجه اول است، برای توصیف سیستم دو شرط مرزی و یک شرط اولیه لازم است. در قالب‌های لوله‌ریزی، تنش‌های حرارتی منجر به خستگی کم چرخه در قالب شده و در نتیجه باعث کاهش عمر آن‌ها می‌گردد. بنابراین بارگذاری حرارتی مهم‌ترین بارگذاری در تخمین عمر قالب است. هر چه توزیع دما در قالب دقیق‌تر باشد، تنش‌های حرارتی به‌وجود آمده در آن با دقت بیشتری به‌دست می‌آیند. لذا لازم است تا در نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس شرایط مرزی حرارتی به‌طور دقیق به مدل حرارتی اعمال شود تا توزیع دما دقیق‌تر به‌دست آید.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی فولاد $21\text{CrMo}10$ تابع دما [۱۸]

دما (°C)	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	چگالی (kgm^{-3})
۲۰	۴۸	۴۴۰	۷۷۸۰
۲۵۰	۴۴	۴۴۶	۷۷۸۰
۵۰۰	۳۸	۴۵۴	۷۷۸۰

8- Pouring process

9- Element birth and death

تاکنون محققان زیادی به مطالعه و تحلیل فرآیند انتقال حرارت طی ریخته‌گری گریز از مرکز افقی پرداخته‌اند [۲-۸]. با این وجود مقالات نسبتاً کمی در زمینه فرآیند انتقال حرارت و انجماد طی ریخته‌گری گریز از مرکز افقی لوله منتشر شده است. کونیگر و لیمن در سال ۱۹۵۹ میلادی [۹] توانستند تغییرات دما در موقعیت‌های مختلفی در بدنه قالب ریخته‌گری لوله‌های چدن معمولی را به‌صورت تجربی به‌دست آورند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش آن‌ها هم‌اکنون نیز مبنایی برای مقایسه نتایج حل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی به‌شمار می‌رود. مینوسیان و همکاران در سال ۱۹۸۳ [۱۰] به روش تفاضل محدود^۵، توزیع دما در قالب را به‌دست آوردند. در سال ۱۹۸۴ ویسور و همکاران [۱۱] به‌صورت آزمایشگاهی و با ارائه مدل ریاضی به مطالعه فرآیند انتقال حرارت و شناخت آن دسته از پارامترهایی که بر روی تاریخچه دمایی در حین فرآیند انجماد تأثیرگذارند، پرداختند. فانگ و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۱۲]، با هدف یافتن پارامترهای موثر بر رفتار حرارتی قالب‌های ریخته‌گری گریز از مرکز افقی و مطالعه برروی میدان دما و تنش در قالب، به شبیه‌سازی و انجام تست آزمایشگاهی پرداختند. تلیانگ و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۱۳] با استفاده از یک مدل اجزاء محدود، توزیع دما در سرکاسه قالب‌های ریخته‌گری لوله‌های چدن نشکن را به‌دست آوردند. واکا و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ [۱۴] با استفاده از آزمایش توانستند منحنی سرد شدن قالب و مذاب را به‌منظور تعیین ضریب انتقال حرارت بین مذاب و قالب به‌دست آورند. کاشنتیز در سال ۲۰۱۲ میلادی [۱۵] با توسعه یک مدل عددی به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف ریخته‌گری بر ضخامت لوله ریخته شده پرداخت.

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز لوله‌های چدن نشکن، یک مدل تقارن محوری اجزاء محدود به‌صورت برنامه‌نویسی پارامتری^۶ در نرم‌افزار انسیس^۷ تهیه شده است. این شبیه‌سازی شامل به‌دست آوردن توزیع دما در زمان‌های مختلف یا به عبارت دیگر تاریخچه دمایی، در قالب و مذاب طی چرخه‌های دمایی مختلف می‌باشد. در این تحلیل، تغییر فاز و گرمای نهان حاصل از انجماد براساس روش آنتالپی،

1- Horizontal centrifugal casting

2- De lavaud

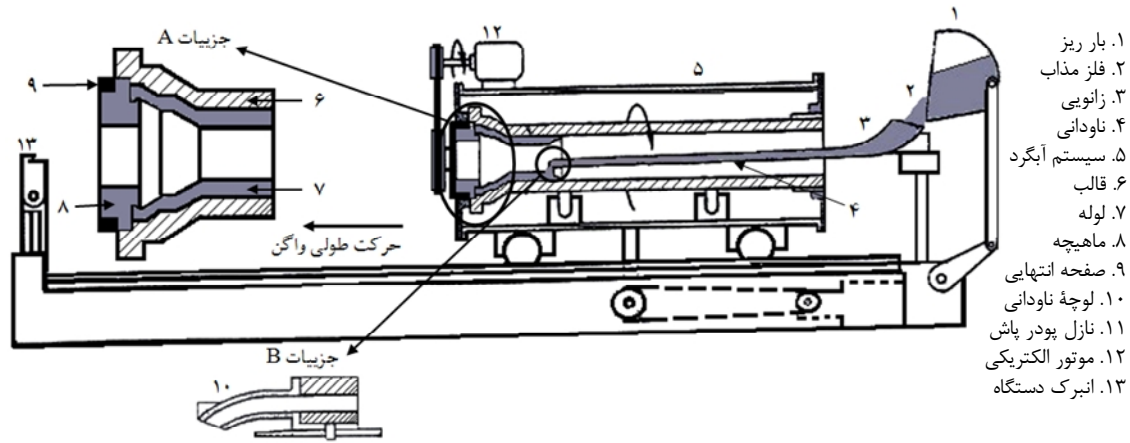
3- Thermal fatigue

4- Thermal cycles

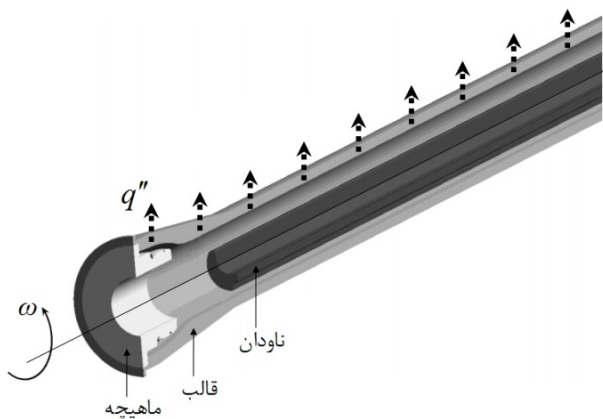
5- Finite difference method

6- APDL

7- ANSYS



شکل ۱۱ تصویر شماتیک از فرآیند ریخته‌گری لوله در ماشین دی لاوود [۹]



شکل ۱۲ شار حرارتی خارج شده از سطح خارجی قالب

در تحقیق حاضر تمامی شرایط مرزی متناسب با شرایط مرزی حرارتی که در فرآیند ریخته‌گری عملی روی سطوح مختلف وجود دارد به مدل اعمال شده است. از لحظه مذاب‌ریزی تا لحظه توقف قالب، به دلیل سرعت دورانی بالای قالب غوطه‌ور در آب، روی سطح خارجی قالب جریان جابه‌جایی وجود دارد. در این صورت مطابق شکل ۳ شار حرارتی که از سطح خارجی قالب خارج می‌شود q'' (Wm⁻²)، به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد.

$$q'' = h_w(T_M - T_\infty) \quad (2)$$

در این رابطه T_M دمای سطح خارجی قالب T_∞ و دمای آب است. h_w نیز ضریب انتقال حرارت در سطح خارجی قالب بوده و به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۶، ۱۰]:

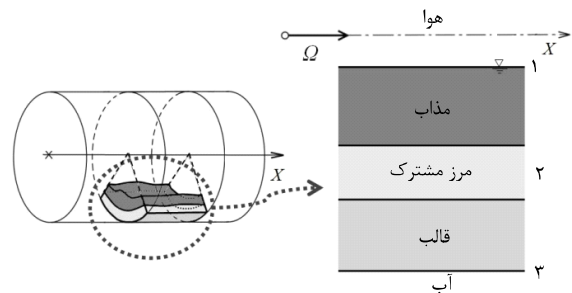
$$h_w = \begin{cases} \frac{Q K_w [(2Re_r^2 + Gr) Pr]^{0.33}}{d} & \omega \neq 0 \\ \frac{0.125 K_w Ra^{0.333}}{d} & \omega = 0 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن K_w ضریب هدایت حرارتی آب (Wm⁻¹K⁻¹)، d قطر خارجی قالب برحسب متر و Q پارامتر ریخته‌گری است. Re_r ، Gr ، Pr و Ra نیز به ترتیب اعداد بی‌بعد رینولدز دورانی، گرافش، پرانتل و ریلی می‌باشند.

سطح آزاد مذاب نیز با هوا در تماس بوده و به دلیل سرعت دورانی بالای قالب، انتقال حرارت جابه‌جایی در این سطح نیز قابل ملاحظه‌است. شرط مرزی جابه‌جایی روی سطح آزاد مذاب به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = h_{int}(T_c - T_\infty) \quad (4)$$

که در آن T_c دمای سطح داخلی مذاب و T_∞ دمای هوای داخل بوده که برابر متوسط دمای سطح مذاب و دمای هوای بیرون ماشین فرض می‌شود [۱۴].



شکل ۱۳ تصویر شماتیک از نواحی مرزی مختلف سیستم

جدول ۲ خواص ترمو فیزیکی چدن نشکن تابع دما [۱۸]

دما (°C)	ضریب هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	انتالپی (MJm ⁻³)
۲۵	۳۸	۰
۱۰۰	۳۹	۲۶۹/۳۶
۲۰۰	۴۱	۶۵۲/۵
۳۰۰	۴۲	۱۰۶۸/۷۰۸
۴۰۰	۳۹	۱۵۱۰/۳۲
۵۰۰	۳۹	۱۹۹۸/۴۷۷
۶۰۰	۳۵	۲۵۳۹/۷۰۴
۷۰۰	۳۱	۳۱۷۶/۳۸۲
۷۴۰	۲۴	۳۴۸۳/۶۴۵
۸۰۰	۱۸/۸	۳۷۶۵/۴۹۶
۹۰۰	۲۵/۶	۴۵۴۲/۵۶
۱۰۰	۲۹/۶	۵۰۴۸/۰۸
۱۱۰۰	۳۱	۵۵۷۷/۴
۱۱۷۸	۲۸	۷۱۰۳/۲۶
۱۳۰۰	۲۸	۷۷۳۸/۵۵
۱۴۰۰	۲۹	۸۲۲۱/۰۳
۱۵۰۰	۳۰	۸۶۹۵/۰۴۴

۲-۲- شرایط مرزی حرارتی

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سطح آزاد مذاب در مرز ۱ با هوا در تماس است. در مرز ۲ که مرز مشترک مذاب-قالب نامیده می‌شود. در ابتدای ریخته‌گری پوشش قالب وجود دارد و به تدریج با تشکیل لایه جامد روی سطح مذاب یک فاصله هوایی به دلیل انقباض حرارتی در این ناحیه ایجاد می‌شود. همچنین قالب در مرز ۳ با آب در تماس بوده و کاملاً درون آب غوطه‌ور است.

که در آن δ ضخامت پوشش قالب برحسب متر و K_c ضریب هدایت حرارتی پوشش $(Wm^{-1}K^{-1})$ می‌باشد.

مرحله دوم زمانی است که پوشش بین مذاب و قالب کاملاً ذوب شده و با تشکیل اولین لایه جامد روی سطح خارجی مذاب، فاصله هوایی شکل می‌گیرد. در صورتی که از انبساط حرارتی قالب صرف نظر شود، مقدار انقباض حرارتی مذاب Δx به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۴]:

$$\Delta x = R_{ext} \alpha (T_{Sol} - T) \quad (11)$$

در این رابطه T_{Sol} دمای انجماد^۲ مذاب (۱۱۴۰ درجه سانتیگراد) [۱۸]، R_{ext} شعاع خارجی لوله و α ضریب انبساط حرارتی لایه جامد بوده که برابر $16 \times 10^{-6} K^{-1}$ در نظر گرفته شده است [۱۴].

در این مرحله ضریب انتقال حرارت، ناشی از دو عامل رسانش و تشعشع در فاصله هوایی است. اثر این دو عامل به نحوی است که دو مقاومت حرارت به صورت موازی تشکیل می‌دهند. بنابراین در این مرحله ضریب انتقال حرارت h_g طبق رابطه (۱۲) قابل محاسبه است [۱۴].

$$h_g = (h_{cg} + h_{rg})$$

$$h_{cg} = \frac{K_{gap}}{\delta_{gap}} = \frac{K_{gap}}{\Delta x + \Delta x_0}$$

$$h_{rg} = \left[\frac{\sigma \cdot (T_{melt}^2 + T_{mold}^2)(T_{melt} + T_{mold})}{\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1} \right] \quad (12)$$

در روابط بالا T_{melt} دمای لایه جامد، T_{mold} دمای سطح داخلی قالب، K_{gap} ضریب هدایت حرارتی هوای موجود در فاصله هوایی $(0.1 Wm^{-1}K^{-1})$ [۱۴]، ε_1 و ε_2 به ترتیب ضریب صدور لوله و قالب و Δx_0 عمق متوسط آج‌های موجود روی سطح داخلی قالب برحسب متر می‌باشد.

۲-۳- شرایط اولیه حرارتی

در تحلیل‌های گذرا با زمان، برای تعیین شرط اولیه حرارتی باید توزیع دمای اولیه تمام نقاط مشخص باشد. دمای پیش‌گرم و دمای مذاب در فرآیندهای ریخته‌گری معمولاً دو شرط اولیه به حساب می‌آیند [۱۷]. در این تحقیق دمای مذاب و دمای پیش‌گرم قالب مطابق با شرایط عملی و به ترتیب برابر ۱۳۶۷ درجه سانتیگراد و ۳۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای شبیه‌سازی نیز در جدول ۳ آورده شده است.

۳- شبیه‌سازی حرارتی فرآیند

در مقاله حاضر با استفاده از کد نویسی در نرم‌افزار آنسیس یک مدل حرارتی دوبعدی تقارن محوری شامل قالب، مذاب و ماهیچه، مطابق شکل ۴ تهیه شده است.

جدول ۳ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی حرارتی

پارامتر	مقدار
قطر اسمی قالب	۶۰۰ میلی‌متر
طول لوله	۶۱۵۰ میلی‌متر
ضخامت لوله	۹/۹ میلی‌متر
سرعت دورانی قالب	۲۸۰ دور بر دقیقه
سرعت حرکت طولی قالب	۲۷ سانتی‌متر بر دقیقه
زمان کل ریخته‌گری تا لحظه بیرون کشیدن لوله	۱۶۵ ثانیه
دمای آب	۳۸ درجه سانتیگراد
دمای انجماد چدن نشکن	۱۱۴۰ درجه سانتیگراد
دمای ذوب چدن نشکن	۱۱۷۸ درجه سانتیگراد
ضخامت پوشش قالب	۰/۰۷ میلی‌متر

h_{int} نیز ضریب انتقال حرارت در سطح داخلی مذاب بوده که به کمک رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۴].

$$h_{int} = \frac{K_{air} (8.5101 \times 10^{-6} Re_f^{1.4513})}{d_i} \quad (5)$$

در این رابطه d_i و K_{air} به ترتیب قطر داخلی مذاب برحسب متر و ضریب هدایت حرارتی هوا $(Wm^{-1}K^{-1})$ است.

به دلیل اختلاف دمای زیاد بین سطح داخلی مذاب و هوای اطراف، تبادل حرارت از طریق تشعشع نیز بین این سطح با محیط اطراف وجود دارد. از آنجایی که در بسیاری از کاربردهای مهندسی ساده‌تر است که انتقال حرارت تشعشعی در سطح، به صورت انتقال حرارت جابه‌جایی بیان شود [۱۶]، شرط مرزی تشعشع در سطح داخلی مذاب نیز به صورت رابطه (۶) قابل بیان است.

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = h_r (T_c - T_{sur}) \quad (6)$$

در این رابطه T_{sur} دمای محیط اطراف است. h_r ضریب انتقال حرارت معادل تشعشع است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$h_r = F \sigma (T_c^2 + T_{sur}^2)(T_c + T_{sur}) \quad (7)$$

که در آن σ ثابت استفان بولتزمن $(5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4})$ و F ضریب دید^۱ معادل بوده که برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است [۳].

هنگامی که لوله از دستگاه بیرون کشیده شد، در معرض هوای اطراف قرار می‌گیرد. در این صورت علاوه بر جریان جابه‌جایی طبیعی روی سطح، انتقال حرارتی تشعشع نیز در سطح حاکم است. در این حالت میزان شار حرارتی که در سطح خارجی لوله تبادل می‌شود به صورت رابطه (۸) بیان می‌گردد.

$$q'' = h_a (T_m - T_{sur}) \quad (8)$$

در این رابطه T_m دمای سطح خارجی لوله است و h_a ضریب انتقال حرارت ترکیبی بوده که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$h_a = \frac{0.125 K_{air} Ra^{0.333}}{d_o} + \sigma \varepsilon (T_m^2 + T_{sur}^2)(T_m + T_{sur}) \quad (9)$$

که در آن d_o قطر خارجی لوله برحسب متر و ε ضریب صدور سطح خارجی لوله بوده که مقدار آن برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است [۱۴].

۲-۳- ضریب انتقال حرارت در مرز مشترک مذاب-قالب

مقاومت حرارتی که معکوس ضریب انتقال حرارت در مرز مشترک است می‌تواند باعث افت دما در ناحیه مشترک گردد. بنابراین لازم است این ضریب به طور دقیق به مرز مشترک مذاب-قالب اعمال شود تا توزیع دما در قالب و مذاب دقیق‌تر به دست آید. مقاومت حرارتی بین مذاب و قالب حین ریخته‌گری لوله‌های چدن نشکن دارای پیچیدگی خاصی است. چرا که این مقاومت از تلفیق دو عامل ناشی می‌شود، که عبارت‌اند از: پوشش قالب و فاصله هوایی به وجود آمده به دلیل انقباض حرارتی مذاب. در اکثر مقالات، تنها عامل اول در نظر گرفته شده و از اثر مقاومت حرارتی ناشی از فاصله هوایی ایجاد شده بین لوله و قالب به دلیل نیروی گریز از مرکز بالا صرف نظر شده است [۱۰، ۲]. در تحقیق حاضر با استفاده از یک مدل ریاضی و با در نظر گرفتن اثرات مقاومت حرارتی ناشی از پوشش قالب و فاصله هوایی، این ضریب تابع دمای مذاب تعیین شده است. بدین منظور دو مرحله در نظر گرفته شده که نهایتاً از ترکیب هر دو، ضریب انتقال حرارت با تقریب مهندسی مناسبی تعیین می‌گردد. مرحله اول زمانی است که ریخته‌گری شروع شده و بین مذاب و قالب پوشش مخصوص ریخته می‌شود. در این مرحله ضریب انتقال حرارت h_c ، به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۱۴]:

$$h_c = \frac{K_c}{\delta} \quad (10)$$

2- Solidus

1- Veiw factor

تقسیم شده و در هر مرحله گروه جدیدی از المان‌ها فعال (متولد) می‌شوند. بازه زمانی هر مرحله برابر $t_i = x_i/v$ بوده که در آن طول گروهی از المان‌ها است، که باید در آن مرحله فعال شوند. v نیز سرعت حرکت ناودان مذاب، یا همان سرعت حرکت طولی قالب می‌باشد.

در این تحقیق با توجه به ابعاد هندسی قالب و لوله، از طول مشخصه 0.02 برای هر المان استفاده شده است تا امکان بهره‌مندی از چندین‌لایه المان در راستای ضخامت لوله فراهم گردد.

۴- نتایج و بحث

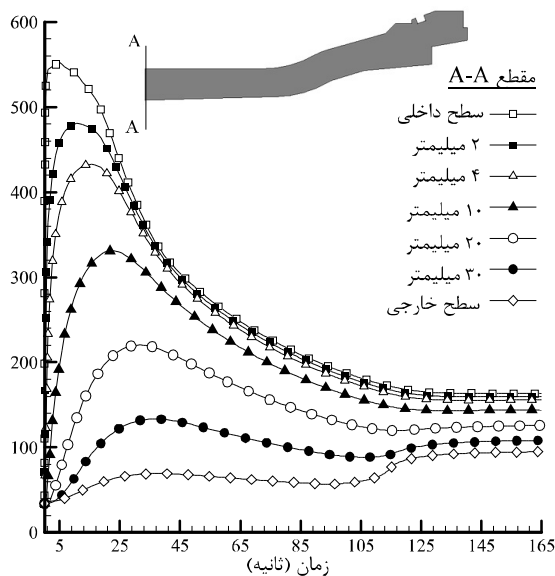
۴-۱- نتایج تحلیل سرکاسه

پس از وارد کردن پارامترهای مختلف ریخته‌گری، توزیع گذرای دما در قالب به‌دست آمده است. شرایط شبیه‌سازی شامل یک چرخه حرارتی از لحظه مذاب‌ریزی تا لحظه بیرون کشیدن لوله از قالب می‌باشد.

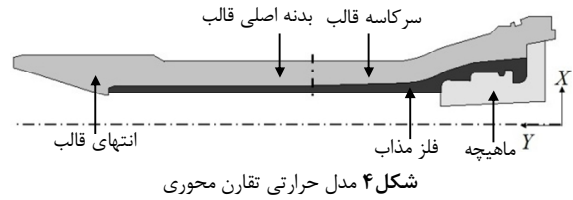
در شکل ۶ منحنی تغییرات دما در ناحیه A-A در راستای ضخامت قالب نشان داده شده است. این ناحیه، مقطع گذار از سرکاسه قالب به بدنه اصلی است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به‌دلیل اینکه مذاب به‌طور ناگهانی با قالب تماس می‌یابد، دما در فواصل مختلف از سطح داخلی قالب نیز به‌طور ناگهانی افزایش یافته است.

نکته قابل توجه در منحنی نشان داده شده در شکل ۶ این است که در زمان $t=116s$ که لحظه توقف سرعت دورانی قالب است، دما در سطح خارجی و سطوح نزدیک به آن افزایش می‌یابد. علت این افزایش دما، کاهش ضریب انتقال حرارت روی سطح خارجی قالب است. چرا که در هنگام توقف قالب، شرط مرزی جابه‌جایی اجباری روی سطح خارجی قالب به شرط مرزی جابه‌جایی طبیعی تبدیل می‌شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افت می‌کند.

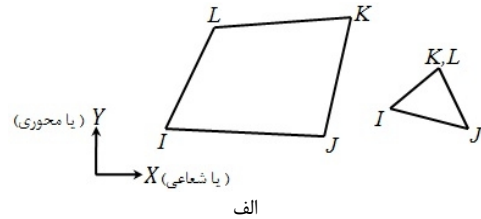
رونسکی و هژوسکی [۹] الگوهای ممکن در گرمایش ماشین‌های صنعتی را مطابق شکل ۷ ارائه داده‌اند. با مقایسه توزیع دمایی به‌دست آمده در قالب با یکی از چهار الگوی نمایش داده شده در این شکل، می‌توان به این نکته پی برد که بارگذاری حرارتی در قالب‌های ریخته‌گری لوله از الگوی شماره ۱ تبعیت می‌کند و در هر بار لوله‌ریزی، قالب با چنین تاریخچه دمایی همراه بوده که باعث پدیده خستگی حرارتی در قالب می‌گردد.



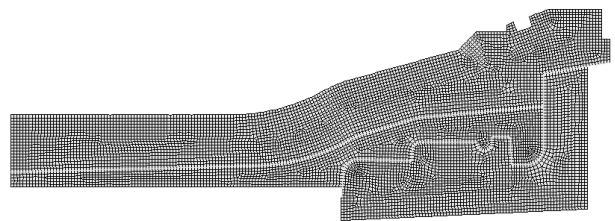
شکل ۶ منحنی تغییرات دما در راستای ضخامت قالب در ناحیه A-A



شکل ۴ مدل حرارتی تقارن محوری



الف



ب



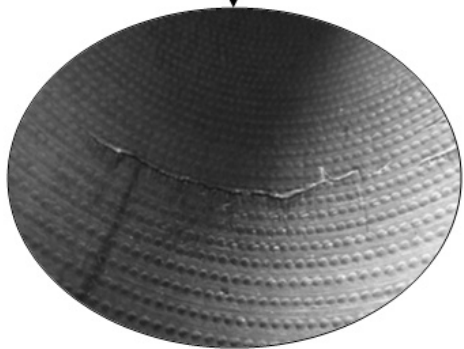
ج

شکل ۵ الف) المان‌های Plane55، ب) مدل اجزاء محدود سرکاسه، ج) مدل اجزاء محدود بدنه اصلی

از آنجایی که در شروع مذاب‌ریزی، قسمت سرکاسه قالب به یکباره از مذاب پر می‌شود و فرآیند توزیع مذاب توسط ناودان، تنها روی بدنه اصلی قالب صورت می‌گیرد، قسمت سرکاسه و بدنه اصلی مدل حرارتی از یکدیگر جدا شده و به‌طور مستقل حل می‌گردند. در این حالت لازم است شرط عدم تبادل حرارت در ناحیه‌ای که سرکاسه و بدنه از یکدیگر جدا می‌شوند اعمال گردد.

مدل اجزاء محدود به همراه نوع المان مورد استفاده در تحلیل حرارتی در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل نوع المانی که برای حل‌حرارتی استفاده شده المان plane55 است. این المان یک المان چهار گره‌ای با درجه آزادی دما در هر گره است که برای مسائل گذرا و پایای دوبعدی و تقارن محوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی دیگر از ویژگی‌های این المان دارا بودن خاصیت تولد و مرگ است [۱۷]. در این پژوهش از این خاصیت برای مدل کردن فرآیند ریختن مذاب توسط ناودان بهره برده شده است.

با توجه به این که فرآیند ریختن مذاب همراه با اضافه شدن ماده به مدل حرارتی است و در طی زمان حل امکان تولید یا حذف المان‌ها وجود ندارد، تمامی المان‌ها از ابتدا تولید می‌شوند. به‌جای حذف المان‌هایی که هنوز ناودان مذاب از روی آن‌ها عبور نکرده، از قابلیت مرگ المان‌ها استفاده می‌شود. برای مرگ المان‌ها، ضریبی کاهنده در سختی این المان‌ها ضرب می‌شود [۱۷]. اگر چه بردار نیروی المان مرده صفر می‌گردد ولی هنوز در بردار نیروی المان‌ها ظاهر می‌شود. همچنین جرم، ظرفیت گرمایی و سایر اثرات نیز در حد، به صفر نزدیک می‌شوند. بدین ترتیب جرم و انرژی المان‌های مرده در جمع جرم و انرژی کل مدل محاسبه نمی‌گردند [۱۷]. به‌طور مشابه به‌جای اضافه کردن المان‌هایی که ناودان مذاب از روی آن‌ها عبور می‌کند، از قابلیت تولد المان در این روش استفاده می‌شود. برای تولد المان‌ها، ضرایب سختی، جرم، نیروی المان و غیره به مقدار اولیه خود بر می‌گردند [۱۷]. بنابراین حل به چندین مرحله



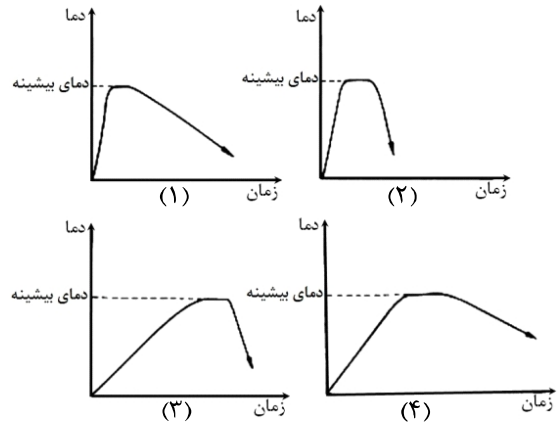
شکل ۹ نمونه‌ای از ترک‌های مشاهده شده روی سطح داخلی قالب‌های لوله‌ریزی

تغییرات دمایی نشان داده شده در شکل ۶ را می‌توان با نتایج تجربی کونیگر و لیمن [۹] مقایسه نمود. بدیهی است که به علت تفاوت در هندسه و جنس قالب مورد مطالعه در تحقیق کونیگر و لیمن، با هندسه و جنس قالب در شبیه‌سازی پیش‌رو، پارامترهای ورودی در هر دو مسأله یکسان نباشند. لیکن نتایج از نظر کیفی تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

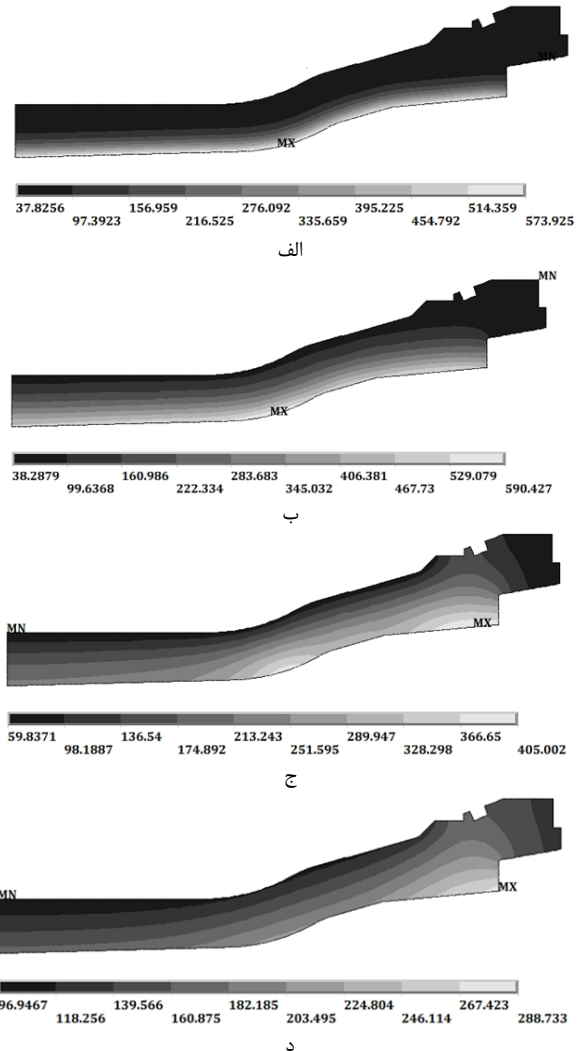
در شکل ۸ توزیع دما در قالب در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تمرکز حرارت بیشتر در سطح داخلی قالب و در ناحیه انحنا دار است. ترک‌هایی که روی سطح داخلی قالب مشاهده شده، اکثراً در این نواحی هستند. در شکل ۹ نمونه‌ای از این ترک‌ها نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی حاضر، منحنی سرد شدن سطح خارجی سرکاسه لوله هنگامی که لوله از قالب بیرون کشیده شده و در معرض هوای اطراف قرار می‌گیرد به دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق مقایسه شده است. این منحنی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این منحنی محور عمودی، میانگین دمایی نقاط مختلف روی سطح خارجی سرکاسه لوله بلافاصله پس از بیرون کشیدن لوله از قالب و محور افقی، زمان سرد شدن لوله را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که شروع اندازه‌گیری زمان سرد شدن لوله، از لحظه بیرون کشیدن آن از قالب در نظر گرفته شده است. در صورتی که از اختلاف دمایی به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش سرکاسه لوله هنگامی که در معرض هوای اطراف قرار می‌گیرد را $1/0.5$ درجه سانتیگراد بر ثانیه پیش‌بینی کرده که بر نتیجه آزمایش نیز منطبق است.

علت وجود اختلاف بین نتایج آزمایش و شبیه‌سازی را می‌توان در عواملی همچون خطای انسانی در اندازه‌گیری دما توسط دستگاه پیرومتر^۴، دقت



شکل ۷ الگوی بارگذاری حرارتی برای قطعات گرم ماشین‌های صنعتی (۱) گرمایشی سریع (شوک حرارتی)، بازپخت کوتاه مدت^۲ و سرمایشی ملایم^۳، (۲) گرمایشی سریع، بازپخت کوتاه مدت و سرمایشی سریع، (۳) گرمایشی ملایم، بازپخت کوتاه مدت و سرمایشی سریع، (۴) گرمایشی ملایم، بازپخت کوتاه مدت و سرمایشی ملایم [۹]



دما (درجه سانتیگراد)

شکل ۸ توزیع دما برحسب درجه سانتیگراد در سرکاسه قالب در زمان‌های مختلف طی ریخته‌گری، (الف) پس از ۵ ثانیه، (ب) پس از ۲۰ ثانیه (پس از ۸۰ ثانیه، د) پس از ۱۶۵ ثانیه

- 1- Shock heating
- 2- Short-duration annealing
- 3- Slow cooling

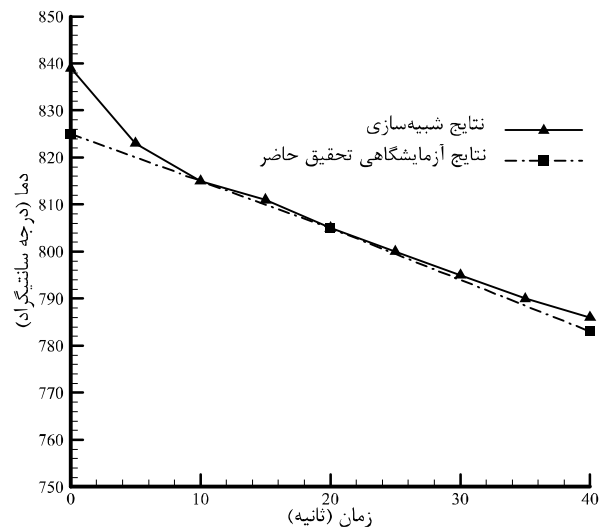
4- Pyrometer

پارامترهای مختلف لوله‌ریزی و شرایط محیطی از جمله میزان طوبت، گرد و غبار و تغییر در ضریب صدور جسم جستجو کرد.

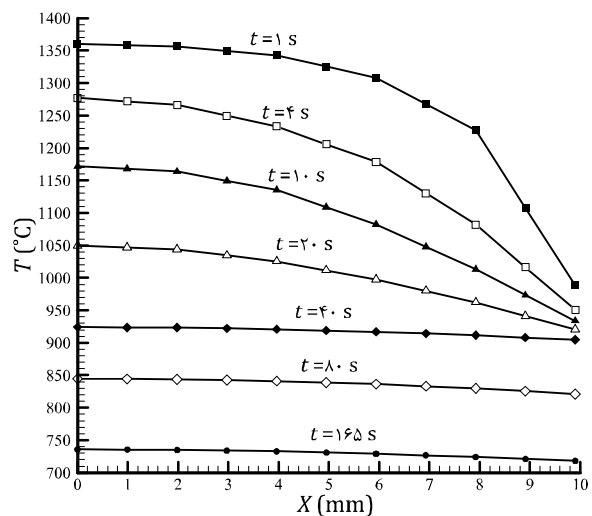
یکی از خواسته‌های اصلی در بحث ریخته‌گری لوله به روش گریز از مرکز، انجماد یک طرفه از سطح خارجی به سطح داخلی مذاب می‌باشد. چرا که انجماد دو طرفه در مذاب سبب بروز خطرات انقباضی در آن، به دام افتادن ناخالصی‌ها و ایجاد ترک در لوله می‌گردد. در شکل ۱۱ توزیع دمایی گذرا در جهت شعاعی برای مذاب نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی، دما و محور افقی، فاصله از سطح داخلی مذاب است. با توجه به اینکه دمایی انجماد چدن نشکن برابر ۱۱۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، توزیع دمایی گذرا در مذاب نشان می‌دهد که انجماد همواره از سطح خارجی شروع شده و به سمت سطح داخلی ادامه می‌یابد.

۲-۴- نتایج تحلیل بدنه اصلی

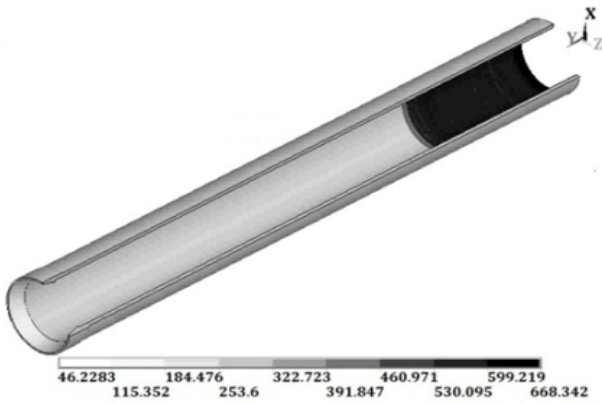
در این تحقیق فرآیند مذاب‌ریزی روی قسمت بدنه اصلی قالب، توسط تکنیک تولد و مرگ المان‌ها شبیه‌سازی شده است. جهت نمایش بهتر نتایج حل بدنه اصلی، مدل تقارن محوری قالب که حول محور Y به اندازه $\frac{1}{4}$ دوران یافته و در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل توزیع دما در اثر فرآیند مذاب‌ریزی در سطح داخلی قالب به خوبی قابل مشاهده است.



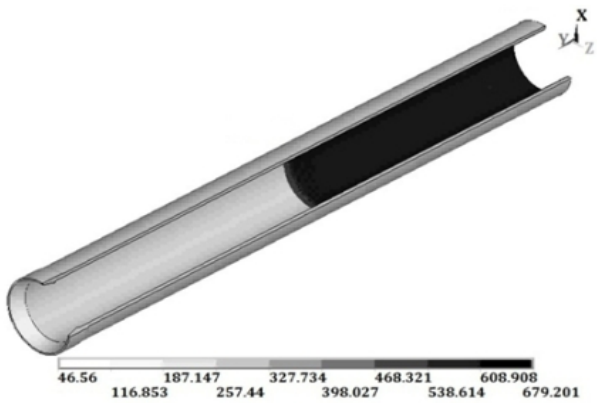
شکل ۱۰- منحنی سرد شدن سطح خارجی لوله پس از بیرون آمدن از قالب



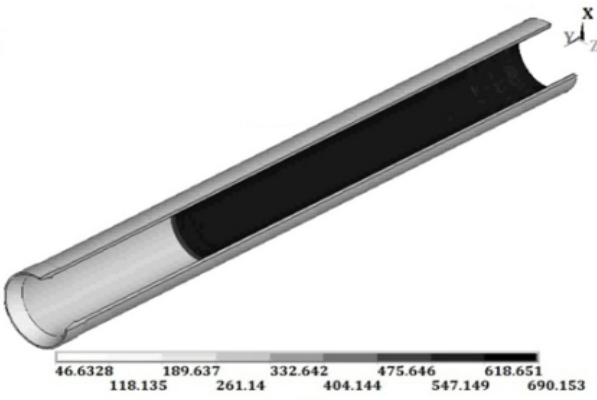
شکل ۱۱- توزیع دمایی گذرا در مذاب در زمان‌های مختلف



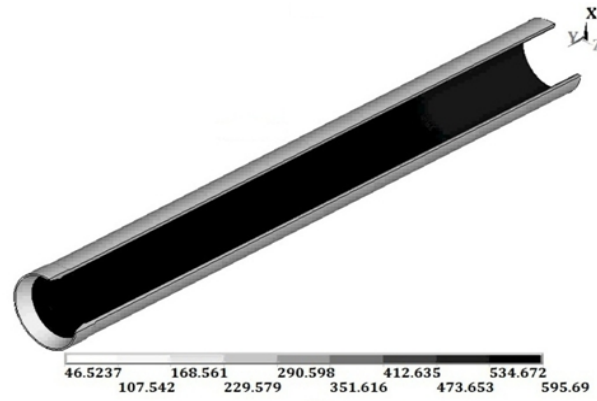
الف



ب



ج



د

شکل ۱۲- توزیع دما برحسب درجه سانتیگراد در سطح داخلی قالب به طول ۶ متر در اثر فرآیند مذاب‌ریزی در زمان‌های مختلف ریخته‌گری، پس از الف (۵ ثانیه، ب) ۱۰ ثانیه، ج) ۱۵ ثانیه، د) ۲۲ ثانیه

ابتدای بدنه اصلی لوله (L) پس از اتمام مذاب‌ریزی را نشان می‌دهد. با حرکت محوری قالب و انتقال جرم (مذاب) در جهت محوری، دمای نقاط ابتدایی لوله نسبت به دمای نقاط انتهایی کمتر بوده و گرادیان دما در جهت طولی ایجاد خواهد شد.

۵- بررسی تأثیر چند پارامتر در ریخته‌گری

۵-۱- فاصله هوایی بین قالب و لوله

در حین انجماد مذاب ریخته شده درون قالب، انقباض حرارتی باعث ایجاد فاصله هوایی بین لایه جامد و قالب می‌گردد. از آنجایی که مقاومت حرارتی ناشی از فاصله هوایی می‌تواند نقش مؤثری بر توزیع دما در قالب و لوله ایفا کند، در این تحقیق اثرات آن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مطابق جدول ۴، دمای سطح داخلی سرکاسه قالب و همچنین دمای سطح خارجی سرکاسه لوله بلافاصله پس از بیرون کشیدن لوله، برای دو حالت مختلف (وجود فاصله هوایی و عدم وجود آن) با دماهای اندازه‌گیری شده از طریق آزمایش، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با صرف نظر کردن از مقاومت حرارتی ناشی از فاصله هوایی، دماهای به‌دست آمده از شبیه‌سازی نسبت به دماهای حاصل از نتایج آزمایش، خطای زیادی دارند. بنابراین فاصله هوایی به‌وجود آمده طی ریخته‌گری، مقاومت حرارتی قابل ملاحظه‌ای بین مدل حرارتی مذاب و قالب اعمال می‌کند که فرض عدم وجود آن، با خطای زیادی همراه است.

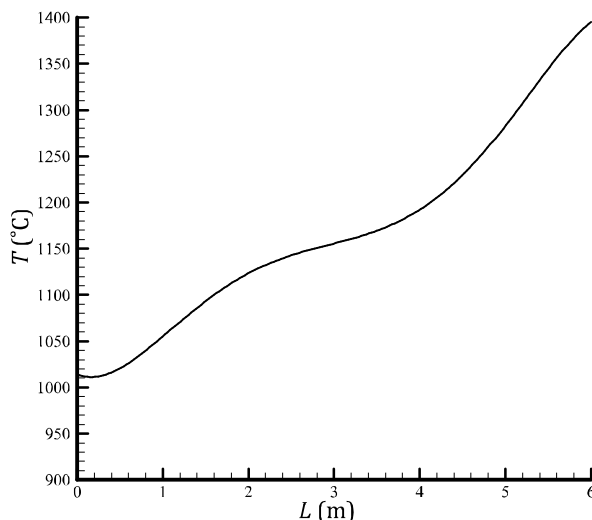
۵-۲- ضخامت پوشش قالب

از آنجایی که در فرآیند ریخته‌گری لوله، میزان پوشش مخصوص قالب در لوله‌ریزی‌های مختلف تغییر می‌کند، لازم است اثرات آن نیز مورد بررسی قرار گیرد. شایان ذکر است که در این تحقیق برای اعمال اثر پوشش و کنترل ضخامت آن، ضریب انتقال حرارت از رابطه (۱۰) به‌دست آمده و به مرز مشترک مدل حرارتی مذاب و قالب اعمال شده است.

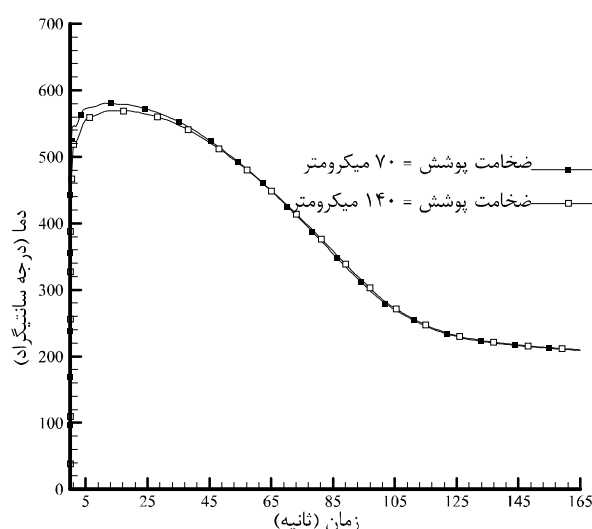
به‌منظور بررسی اثر ضخامت پوشش، تغییرات دما و گرادیان دما برحسب زمان در یک نقطه روی سطح داخلی قالب و در ناحیه انحنای به‌ازای ضخامت ترتیب در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است. از آنجایی که با افزایش ضخامت پوشش، ضریب انتقال حرارت در مرز مشترک بین مذاب و قالب، کاهش و مقاومت حرارتی در این ناحیه افزایش می‌یابد، مطابق شکل ۱۴ بیشینه دما در سطح داخلی قالب نیز کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۵ در لحظات اولیه ریخته‌گری که انتظار می‌رود قالب با گرادیان دمای بالایی همراه باشد، با به‌کار بردن پوشش با ضخامت ۱۴۰ میکرومتر به جای ۷۰ میکرومتر می‌توان گرادیان دما در قالب را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

جدول ۴: نتایج بررسی اثر فاصله هوایی ناشی از انجماد مذاب

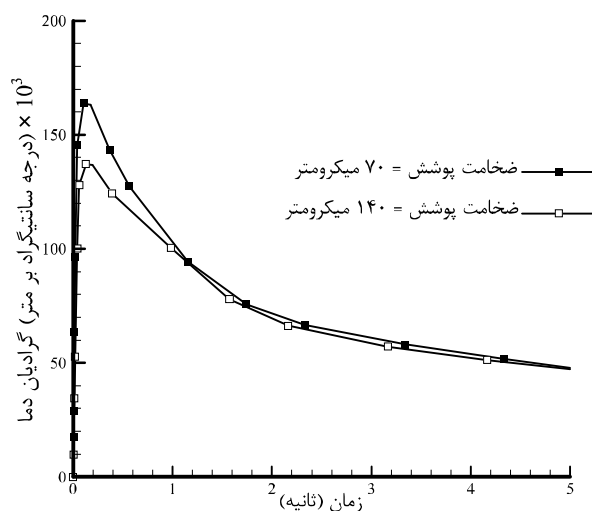
نتایج	دمای سطح خارجی سرکاسه لوله (درجه سانتیگراد)	دمای سطح داخلی سرکاسه قالب (درجه سانتیگراد)
شبیه‌سازی (با فرض صرف نظر کردن از فاصله هوایی)	۵۵۷	۵۸۷
شبیه‌سازی (با وجود فاصله هوایی)	۸۹۴	۳۴۸
آزمایش	۹۱۰	۳۳۲



شکل ۱۳: دما در نقاط مختلف سطح داخلی لوله پس از اتمام مذاب‌ریزی (در زمان $t=22$ s)



شکل ۱۴: تغییرات دما با زمان در یک نقطه روی سطح داخلی قالب به‌ازای ضخامت‌های مختلف پوشش



شکل ۱۵: تغییرات گرادیان دما با زمان در یک نقطه روی سطح داخلی قالب به‌ازای ضخامت‌های مختلف پوشش

شکل ۱۳: منحنی دمای نقاط داخلی لوله ریخته شده برحسب فاصله از

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز لوله‌های چدن نشکن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور با ارائه یک مدل تقارن محوری شامل قالب، لوله و ماهیچه و با استفاده کد نویسی در نرم‌افزار انسیس، برنامه‌ای برای شبیه‌سازی حرارتی فرآیند لوله‌ریزی در ماشین دی لاوود تهیه شد. نهایتاً از حل حرارتی تاریخچه دمایی در نقاط مختلف قالب و لوله به دست آمد. حل حرارتی فرآیند ریخته‌گری برای لوله‌ریزی با اندازه قطر اسمی ۶۰۰ میلی‌متر انجام گرفت و مقایسه‌ای بین نتایج حرارتی حاصل شده و نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت که گویای دقت بالای برنامه است. با توجه به نمودارهای به دست آمده از تحلیل حرارتی می‌توان نتایج زیر را استنباط نمود:

- ۱- نتایج حل حرارتی نشان می‌دهد که تمرکز حرارت و گرادیان‌های دمایی در سطح داخلی قالب و در ناحیه انحنا دار بیشتر است. ترک‌هایی که در قالب مشاهده شده است اکثراً در همین منطقه است.
- ۲- در این تحقیق اثر به وجود آمدن یا عدم به وجود آمدن فاصله هوایی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در صورت صرف نظر کردن از مقاومت حرارتی ناشی از فاصله هوایی، میانگین دمای نقاط روی سطح داخلی سراسه قالب، ۷۰ درصد افزایش می‌یابد که در این صورت درصد خطای بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین فرض عدم تشکیل فاصله هوایی فرض صحیحی نخواهد بود.
- ۳- با بررسی اثر ضخامت پوشش بر توزیع دما در قالب، مشاهده شد که با افزایش دو برابری ضخامت پوشش، بیشینه دما در نقطه‌ای واقع بر سطح داخلی قالب و در ناحیه انحنا دار، ۱۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد.
- ۴- یکی از دلایل ایجاد ترک روی سطح داخلی قالب در ناحیه انحنا دار، گرادیان دمایی بالایی است که در اثر مذاب‌ریزی به وجود آمده است. در این تحقیق مشخص شد که با افزایش دو برابری ضخامت پوشش می‌توان بیشینه گرادیان دما که در لحظات اولیه مذاب‌ریزی در سطح داخلی قالب اتفاق می‌افتد را حدود ۱۶ درصد کاهش داد.
- ۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند ریختن مذاب توسط تکنیک تولد و مرگ المان‌ها نشان می‌دهد که بر اثر فرآیند ریختن مذاب، اختلاف دما بین نقاط واقع بر سطح داخلی لوله در ابتدا و انتهای آن، پس از اتمام مذاب‌ریزی حدود ۲۷۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. همچنین بر اثر فرآیند مذاب‌ریزی، اختلاف دما بین نقاط واقع بر سطح خارجی قالب در ابتدا و انتهای آن پس از اتمام مذاب‌ریزی حدود ۲۲ درجه سانتیگراد است. این در حالی است که همین اختلاف دما بین نقاط ابتدایی و انتهایی واقع بر سطح داخلی قالب حدود ۷۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

۷- فهرست علائم

ظرفیت گرمایی ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	C_p
عدد گراشف	$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)d^3}{\nu^2}$
ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	K
عدد پرانتل	$Pr = \frac{C_p\mu}{K}$
عدد رینولدز دورانی	$Re_r = \frac{\omega d^2}{2\nu}$
عدد ریلی	$Ra = Gr Pr$
دما ($^\circ\text{C}$)	T
زمان (s)	t

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
μ	لزجت دینامیکی (Nsm^{-2})
ω	سرعت دورانی قالب (Rads^{-1})
β	ضریب انبساط گرمایی حجمی (K^{-1})
air	هوا
melt	مذاب
mold	قالب
w	آب

زیر نویس‌ها

۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان از پشتیبانی و همکاری مجدانه شرکت محترم هامون نایزه صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۹- مراجع

- [1] H. S. Bawa, *Manufacturing processes II*: Tata McGraw-Hill, 2006.
- [2] J. Boháček, A. Kharicha, A. Ludwig, M. Wu, Shallow water model for horizontal centrifugal casting, in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Schladming, Austria, 2012.
- [3] G. Enyu, Z. Qiwei, J. Tao, Numerical simulation of solidification of thick-wall stainless steel pipe in horizontal centrifugal casting process, *Materials Science Forum*, Vol. 706-709, pp. 1427-1432, 2012.
- [4] A. K Roy, *Finite element analysis and life estimation of a permanent cylindrical mold with Ansys and Coffin-manson approach*, MSc Thesis, Industrial and Systems Engineering, Auburn University, 2005.
- [5] S. Nannan, L. Yikun, B. Yunlong, Z. A. Xu, K. Xiuhong, L. Dianzhong, Numerical simulation of solidification of workroll in centrifugal casting process, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 28, No. 2, pp. 147-154, 2012.
- [6] Z. Xing-wang, C. Li-liang, L. Rui-xiang, Numerical filling simulation in centrifugal casting process of cast steel sleeves, *Hot working technology*, Vol. 5, pp. 26-27, 2004.
- [7] X. Zhian, S. Nannan, T. Robval, L. Yikun, L. Dianzhong, Modelling of horizontal centrifugal casting of work roll, in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Schladming, Austria, 2012.
- [8] D. Y. Ju, Y. Oshika, T. Inoue, Simulation of solidification and temperature in centrifugal casting process, *Material*, Vol. 40, No. 449, pp. 144-150, 1990. (in Japanese)
- [9] A. Weronki, T. Hejwowski, *Thermal fatigue of metal*, New York: Marchel Deker, 1991.
- [10] Y. P. Minosyan, A. A. Ryadno, Y.G. Solov'yev, V. G. Gerasimov, Mathematical simulation of centrifugal casting of pipes, *Heat transfer-Soviet Research*, Vol. 15, pp. 134-140, 1983.
- [11] M. J. Vasseur, G. Pompidor, C. Frantz, Mathematical and experimental analysis of heat transfer during the horizontal centrifugal solidification of low alloy steels, *Journal of Metallurgy*, Vol. 23, pp. 294-296, 1984. (In France)
- [12] X. Fang, Z. Rujia, Research on temperature behavior of water cooled centrifugal pipe mould, *Heavy Machinery*, Vol. 6, pp. 16-18, 2000.
- [13] L. Tieliang, W. Lihui, Z. Jianxun, Numerical simulation of temperature field and thermal stress field of metallic mold for ductile iron pipes in centrifugal casting, *Journal of Special Casting and Nonferrous Alloys*, Vol. 6, pp. 20-22, 2001. (In Chinese)
- [14] S. Vacca, M. A. Martorano, R. Heringer, M. Boccalini, *Mathematical Model of Heat Transfer during Centrifugal Casting*, MSc Thesis, Sao Paulo University, 2011.
- [15] E. Kaschnitz, Numerical simulation of centrifugal casting of pipes, in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Schladming, Austria, 2012.
- [16] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, *Fundamental of heat and mass transfer*, 5th ed.: John Wiley, 2001.
- [17] P. Canonsburg, Ansys Rev 14.0, *Ansys Inc.*
- [18] K. Mills, Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys, *ASM Int*, 2002.