

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

## شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی برای تولید لوله‌های چدنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

احسان احمدی

استاد راهنما

دکتر محمدرضا فروزان



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (گرایش طراحی کاربردی) آقای احسان احمدی

تحت عنوان

شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی برای تولید لوله‌های چدنی

در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۰ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر محمدرضا فروزان

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

دکتر بهزاد نیرومند

۲- استاد مشاور پایان‌نامه

دکتر محمود کدخدایی

۳- استاد داور

دکتر احسان فروزمهر

۴- استاد داور

دکتر محمدرضا سلیم پور

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

بارپاس از سه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ...  
مردمانی که پدید شدند تا ما روضه پدید شویم ...  
و عاشقانه روختند تا اگر بلایش وجود ما و روشنایی را همان باشند ...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است.

**تقدیم به**

**پدر و مادر عزیز و مهربانم**

**که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یآوری دلسوز و  
فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.**

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
یازده	فهرست اشکال
شانزده	فهرست جداول
۱	چکیده
	<b>فصل اول: مقدمه</b>
۲	۱-۱ کلیات
۴	۲-۱ مرور کارهای انجام شده و پژوهش‌های پیشین
۷	۳-۱ محتوای فصل‌های بعدی
	<b>فصل دوم: آشنایی با فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز</b>
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ انواع ریخته‌گری گریز از مرکز و کاربردها
۱۱	۳-۲ مزایا و معایب ریخته‌گری گریز از مرکز
۱۱	۴-۲ مشخصات ریخته‌گری گریز از مرکز
۱۲	۱-۴-۲ سرعت دورانی قالب
۱۴	۲-۴-۲ پوشش قالب
۱۵	۳-۴-۲ درجه حرارت ریخته‌گری مذاب
۱۶	۵-۲ مکانیزم انجماد در فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی
۱۶	۶-۲ فرآیند تولید لوله‌های چدن نشکن
۱۹	۷-۲ ماشین ریخته‌گری لوله‌های چدن نشکن
۲۰	۱-۷-۲ سیستم خنک‌کاری ماشین
۲۲	۲-۷-۲ قالب‌های مورد استفاده در ماشین‌های ریخته‌گری لوله‌های چدن نشکن
۲۳	۸-۲ مراحل مختلف لوله‌ریزی
۲۴	۹-۲ نتیجه‌گیری فصل

## فصل سوم: انتقال حرارت در فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی

- ۳-۱ مقدمه ..... ۲۵
- ۳-۲ شیوه‌های انتقال حرارت ..... ۲۶
- ۳-۳ شناخت معادلات حاکم بر مسئله ..... ۳۱
- ۳-۴ شرایط مرزی در فرآیند ریخته‌گری لوله ..... ۳۴
- ۳-۴-۱ انتقال حرارت جابجایی روی سطح ..... ۳۴
- ۳-۴-۲ انتقال حرارت تشعشی از سطح ..... ۳۶
- ۳-۵ ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک بین مذاب - قالب ..... ۳۸
- ۳-۶ نتیجه‌گیری فصل ..... ۴۱

## فصل چهارم: خواص ترموفیزیکی مواد و آزمایشات مربوط به تعیین خواص

- ۴-۱ مقدمه ..... ۴۲
- ۴-۲ مشخصات مواد ..... ۴۲
- ۴-۳ آزمایشات تعیین خواص ..... ۴۷
- ۴-۳-۱ تعیین ضریب گرمای ویژه پودر مخصوص و ماهیچه ..... ۴۷
- ۴-۳-۲ تعیین ضریب هدایت حرارتی پودر مخصوص ..... ۵۰
- ۴-۳-۳ تعیین ضریب هدایت حرارتی ماهیچه ..... ۵۴
- ۴-۴ نتیجه‌گیری فصل ..... ۵۶

## فصل پنجم: نحوه‌ی شبیه‌سازی حرارتی فرآیند

- ۵-۱ مقدمه ..... ۵۷
- ۵-۲ روش اجزاء محدود ..... ۵۷
- ۵-۳ خصوصیات برنامه ..... ۵۹
- ۵-۴ گام‌های حل در شبیه‌سازی حرارتی ..... ۶۰
- ۵-۴-۱ مدل عددی اجزا محدود ..... ۶۰
- ۵-۴-۲ حساسیت المان‌بندی ..... ۶۴
- ۵-۴-۳ اختصاص ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک مذاب - قالب ..... ۶۵



۴-۴-۵ تعیین نوع و زمان حل ..... ۶۶

۵-۵ تکنیک تولد و مرگ المانها ..... ۶۷

۶-۵ نتیجه گیری فصل ..... ۶۹

#### فصل ششم: نتایج شبیه سازی و اعتبارسنجی آنها

۱-۶ مقدمه ..... ۷۰

۲-۶ اعتبار سنجی و انجام آزمایشات عملی ..... ۷۰

۳-۶ تعیین پارامترهای ورودی حل و نتایج حل حرارتی ..... ۷۳

۱-۳-۶ نتایج حل سرکاسه قالب ..... ۷۴

۲-۳-۶ نتایج حل سرکاسه لوله ..... ۸۰

۳-۳-۶ نتایج حل بدنه‌ی اصلی لوله و قالب ..... ۸۴

۴-۶ بررسی اثر پارامترهای مختلف در شبیه سازی ..... ۹۱

۱-۴-۶ تاثیر پارامتر ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک مذاب-قالب ..... ۹۱

۲-۴-۶ تاثیر مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی ..... ۹۴

۳-۴-۶ تاثیر سرعت دورانی قالب ..... ۹۵

۴-۴-۶ تاثیر دمای مذاب ریزی ..... ۹۷

۵-۴-۶ تاثیر ضخامت پوشش قالب ..... ۹۸

۵-۶ نتیجه گیری فصل ..... ۱۰۰

#### فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۷ مقدمه ..... ۱۰۱

۲-۷ نتیجه گیری ..... ۱۰۲

۳-۷ پیشنهادات ..... ۱۰۳

پیوست الف: مشخصات هندسی مدل قالب، لوله و ماهیچه

پیوست ب: روش رسانش گذرا - حل تقریبی

مراجع ..... ۱۱۲

## فهرست اشکال

<u>شماره شکل</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۱ شماتیکی از فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی با ناودان ثابت [۹]	۴
شکل ۲-۱ دستگاه تست آزمایشگاهی در تحقیق مادوسودان و همکاران [۱۵]	۶
شکل ۱-۲ ریخته‌گری گریز از مرکز حقیقی - (الف) عمودی، (ب) افقی، (ج) مایل [۱]	۱۰
شکل ۲-۲ (الف) ریخته‌گری نیمه گریز از مرکز و (ب) ریخته‌گری گریز از مرکز مجازی [۱]	۱۰
شکل ۳-۲ مقایسه خواص مکانیکی قطعات تولید شده از جنس آلیاژهای Al-Si به دو روش ریخته‌گری ثقلی و گریز از مرکز [۲۶]	۱۱
شکل ۴-۲ رابطه‌ی سرعت دورانی قالب بر حسب نیروی گریز از مرکز و قطر داخلی قطعه‌ی ریخته‌گی [۱]	۱۳
شکل ۵-۲ تغییرات نوعی سرعت دورانی قالب در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی [۱]	۱۳
شکل ۶-۲ پودر پاشی همزمان روی سطح قالب در حین ریخته‌گری لوله‌های چدن نشکن	۱۵
شکل ۷-۲ (الف) اثر ضخامت پوشش قالب بر زمان انجماد و (ب) اثر دمای مذاب بر زمان انجماد [۱]	۱۶
شکل ۸-۲ ریز ساختار چدن خاکستری و چدن نشکن [۲۸]	۱۷
شکل ۹-۲ لوله‌های چدن نشکن به طول حدوداً ۶ متر مورد استفاده در شبکه‌های آب رسانی و فاضلاب [۲۹]	۱۸
شکل ۱۰-۲ لوله‌های چدن نشکن، کاربرد در خطوط انتقال آب و شبکه‌های توزیع [۳۰]	۱۸
شکل ۱۱-۲ مراحل مختلف در خط تولید لوله‌های چدن نشکن [۲۹]	۱۹
شکل ۱۲-۲ جزئیات ماشین ریخته‌گری گریز از مرکز افقی موسوم به ماشین آبگرد یا دی لاوود [۳۱]	۲۰
شکل ۱۳-۲ سیستم خنک کاری ماشین - ورودی و خروجی آب در ماشین لوله‌ریزی	۲۰
شکل ۱۴-۲ تصویر از بالای ماشین لوله‌ریزی - نحوه‌ی توزیع آب در سرتاسر قالب	۲۱
شکل ۱۵-۲ قالب غوطه‌ور در آب	۲۱
شکل ۱۶-۲ قالب‌های فولادی مورد استفاده برای لوله‌ریزی و ترک‌های بوجود آمده در سرکاسه قالب در اثر لوله‌ریزی مداوم	۲۳
شکل ۱۷-۲ مرحله‌ی اول لوله‌ریزی - آماده‌سازی ماشین جهت لوله‌ریزی (شامل ماهیچه گذاری و پودر پاشی دستی در قسمت سرکاسه قالب) [۳۱]	۲۴
شکل ۱۸-۲ مرحله‌ی دوم لوله‌ریزی - مذاب‌ریزی، جوانه‌زایی، پاشش پودر پوشاننده قالب و حرکت محوری قالب [۳۱]	۲۴
شکل ۱۹-۲ مرحله‌ی سوم لوله‌ریزی - ماندن لوله درون قالب و سپس بیرون کشیدن لوله [۳۱]	۲۴
شکل ۱-۳ تبادل تشعشع: (الف) در سطح و (ب) بین سطح و اطراف بزرگ [۳۴]	۲۹
شکل ۲-۳ تصویر شماتیک از نواحی مرزی مختلف سیستم	۳۳
شکل ۳-۳ شار حرارتی خارج شده از سطح خارجی قالب	۳۵

- شکل ۳-۴ شار حرارتی خارج شده از سطح آزاد مذاب ..... ۳۶
- شکل ۳-۵ قرار گرفتن لوله در معرض هوای اطراف و اعمال شرط مرزی جابجایی روی سطح خارجی آن ..... ۳۶
- شکل ۳-۶ تبادل تشعشع از سطح داخلی مذاب با دهانه آزاد ..... ۳۷
- شکل ۳-۷ شماتیکی از نحوه محاسبه ضریب شکل F [۴۲] ..... ۳۷
- شکل ۳-۸ ضریب انتقال حرارت در ناحیه مشترک مذاب- قالب تابع دمای مذاب [۴۱] ..... ۳۸
- شکل ۳-۹ شماتیکی از مقاومت حرارتی و تماس بین مذاب و قالب به دلیل وجود پوشش ..... ۳۹
- شکل ۳-۱۰ شماتیکی از مقاومت حرارتی بین مذاب و قالب به دلیل تشکیل فاصله هوایی ..... ۴۰
- شکل ۳-۱۱ آج‌های ایجاد شده روی سطح داخلی قالب- عمق متوسط: ۱ میلی‌متر ..... ۴۱
- شکل ۳-۱۲ سه حالت مختلف برای تغییرات  $h_{interface}$  با دمای مذاب ..... ۴۱
- شکل ۴-۱ تغییرات نوعی آنتالپی با دما برای در نظر گرفتن گرمای نهان حاصل از انجماد در مسائل تغییر فاز در نرم افزار ANSYS [۳۶] ..... ۴۴
- شکل ۴-۲ تغییرات آنتالپی بر حسب دما برای چدن نشکن [۴۴] ..... ۴۴
- شکل ۴-۳ تغییرات ضریب هدایت حرارتی بر حسب دما برای چدن نشکن [۴۴] ..... ۴۵
- شکل ۴-۴ تغییرات چگالی بر حسب دما برای قالب فولادی از جنس 21CrMo10 [۳۲] ..... ۴۵
- شکل ۴-۵ تغییرات ضریب گرمای ویژه بر حسب دما برای قالب فولادی از جنس 21CrMo10 [۳۲] ..... ۴۶
- شکل ۴-۶ تغییرات ضریب هدایت حرارتی بر حسب دما برای قالب فولادی از جنس 21CrMo10 [۳۲] ..... ۴۶
- شکل ۴-۷ مواد مورد آزمایش برای تعیین ضریب گرمای ویژه: (الف) پودر مخصوص و (ب) پودر ماهیچه ..... ۴۸
- شکل ۴-۸ حمام بخار آب برای رساندن مواد به دمای اولیه معلوم ..... ۴۹
- شکل ۴-۹ (الف) محفظه عایق پر از آب و (ب) ترمومتر با دقت ۰/۱ درجه برای ثبت دمای تعادل مجموعه‌ی آب و پودر ..... ۴۹
- شکل ۴-۱۰ قرار دادن پودر مخصوص درون لوله‌ی جدار نازک آلومینیومی طویل ..... ۵۱
- شکل ۴-۱۱ قرار دادن لوله‌ی آلومینیومی حاوی پودر مخصوص درون ظرف پر از آب در حال جوشش ..... ۵۱
- شکل ۴-۱۲ مدل حرارتی مش ریزی شده از لوله آلومینیومی حاوی پودر مخصوص ..... ۵۲
- شکل ۴-۱۳ آزمایش ۱- تغییرات دمای ثبت شده برای مرکز پودر بر حسب زمان به ازای  $K=2.26 \text{ W/m.k}$  ..... ۵۳
- شکل ۴-۱۴ آزمایش ۲- تغییرات دمای ثبت شده برای مرکز پودر بر حسب زمان به ازای  $K=2.09 \text{ W/m.k}$  ..... ۵۳
- شکل ۴-۱۵ آزمایش ۳- تغییرات دمای ثبت شده برای مرکز پودر بر حسب زمان به ازای  $K=2.28 \text{ W/m.k}$  ..... ۵۴
- شکل ۴-۱۶ ماهیچه ماسه‌ای ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۷ دستگاه آزمایش انتقال حرارت هدایتی ..... ۵۵
- شکل ۵-۱ پنجره‌هایی جهت دریافت پارامترهای مهم ریخته‌گری لوله ..... ۵۹
- شکل ۵-۲ هندسه مدل تقارن محوری شامل قالب، مذاب و ماهیچه ..... ۶۱

- شکل ۳-۵ فرآیند لوله‌ریزی: (الف) لحظه‌ی پر شدن سرکاسه از مذاب (ماشین بدون حرکت محوری) و (ب) مذاب ریزی در  
 ۶۲..... سرتاسر قالب (ماشین در حال حرکت محوری).....
- شکل ۴-۵ مدل‌های حرارتی مستقل بدنه و سرکاسه‌ی و اعمال شرط عدم تبادل حرارت در مرز جداسازی..... ۶۲.....
- شکل ۵-۵ المان Plane55 با درجه آزادی دما در هر گره [۳۶]..... ۶۳.....
- شکل ۶-۵ انتخاب گزینه‌ی تقارن محوری و ارزیابی خواص سیال در دمای فیلم برای المان Plane55..... ۶۳.....
- شکل ۷-۵ المان بندی مدل سرکاسه..... ۶۴.....
- شکل ۸-۵ المان بندی مدل بدنه اصلی..... ۶۴.....
- شکل ۹-۵ المان‌های تماس تعریف شده در مرز مشترک بین مذاب و قالب [۳۶]..... ۶۵.....
- شکل ۱۰-۵ تعیین حل گذرا (Transient) در نرم افزار ANSYS APDL..... ۶۶.....
- شکل ۱۱-۵ تکنیک تولد و مرگ المان‌ها در ANSYS..... ۶۸.....
- شکل ۱۲-۵ مقید کردن گره‌های المان‌های kill شده به دمای مذاب ریزی..... ۶۹.....
- شکل ۱-۶ (الف) دستگاه اندازه‌گیری دما در لوله - محدوده دمایی قابل اندازه‌گیری: ۵۵۰ تا ۳۰۰۰ درجه سانتیگراد و (ب)  
 ۷۲..... دستگاه اندازه‌گیری دما در قالب - محدوده دمایی قابل اندازه‌گیری: ۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد.....
- شکل ۲-۶ نحوه‌ی انجام تست و داده‌برداری در خط تولید..... ۷۲.....
- شکل ۳-۶ تغییرات دمای قالب در ناحیه‌ی A-A طی ریخته‌گری لوله..... ۷۴.....
- شکل ۴-۶ تغییرات دمای قالب در ناحیه‌ی A (شکل ۶-۶) طی ریخته‌گری لوله [۱۱]..... ۷۵.....
- شکل ۵-۶ تغییرات دمای قالب در ناحیه‌ی A (شکل ۶-۶) طی دو سیکل حرارتی [۶]..... ۷۵.....
- شکل ۶-۶ قالب‌های لوله‌ریزی مورد استفاده در تحقیق تیلانگ و کونینگر [۶]..... ۷۶.....
- شکل ۷-۶ موقعیت اندازه‌گیری دمای میانگین روی سطح داخلی سرکاسه قالب (آزمایش و شبیه‌سازی)..... ۷۶.....
- شکل ۸-۶ پروفیل دمای در دیواره قالب در زمان‌های مختلف..... ۷۷.....
- شکل ۹-۶ منطقه بندی قسمت سرکاسه قالب..... ۷۷.....
- شکل ۱۰-۶ توزیع دما در سرکاسه قالب به ترتیب از بالا به پایین: ۵، ۲۰، ۸۰ و ۱۶۵ ثانیه پس از ریخته‌گری..... ۷۸.....
- شکل ۱۱-۶ گرادیان دما در سرکاسه قالب به ترتیب از بالا به پایین: ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه پس از ریخته‌گری..... ۷۹.....
- شکل ۱۲-۶ توزیع دما در سرکاسه لوله: ۵ و ۲۰ ثانیه پس از ریخته‌گری..... ۸۰.....
- شکل ۱۳-۶ توزیع دما در سرکاسه لوله: ۸۰ و ۱۶۵ ثانیه پس از ریخته‌گری..... ۸۱.....
- شکل ۱۴-۶ موقعیت اندازه‌گیری دمای میانگین روی سطح خارجی سرکاسه لوله (آزمایش و شبیه‌سازی)..... ۸۱.....
- شکل ۱۵-۶ منحنی سرد شدن سطح خارجی سرکاسه لوله به شماره ۳۲۵۶۰ پس از بیرون آمدن از قالب..... ۸۲.....
- شکل ۱۶-۶ منحنی سرد شدن سطح خارجی سرکاسه لوله به شماره ۳۲۵۶۸ پس از بیرون آمدن از قالب..... ۸۳.....
- شکل ۱۷-۶ پروفیل دما در دیواره‌ی لوله در زمان‌های مختلف..... ۸۴.....

- شکل ۶-۱۸ تاثیر فرآیند ریختن مذاب در ایجاد گرادیان‌های دمایی در طول بدنه اصلی لوله ( ۵ و ۱۰ ثانیه پس از مذاب‌ریزی )  
 ۸۵.....
- شکل ۶-۱۹ تاثیر فرآیند ریختن مذاب در ایجاد گرادیان‌های دمایی در طول بدنه اصلی لوله ( ۱۵ و ۲۱ ثانیه پس از مذاب‌ریزی )  
 ۸۶.....
- شکل ۶-۲۰ دما در نقاط مختلف سطح داخلی لوله، پس از اتمام مذاب‌ریزی (time=22 s).....  
 ۸۷.....
- شکل ۶-۲۱ تاثیر فرآیند ریختن مذاب در ایجاد گرادیان‌های دمایی در طول بدنه اصلی قالب ( ۵ و ۱۰ ثانیه پس از مذاب‌ریزی )  
 ۸۸.....
- شکل ۶-۲۲ تاثیر فرآیند ریختن مذاب در ایجاد گرادیان‌های دمایی در طول بدنه اصلی قالب ( ۱۵ و ۲۱ ثانیه پس از مذاب  
 ریزی ).....  
 ۸۹.....
- شکل ۶-۲۳ دما در نقاط مختلف سطح داخلی قالب، پس از اتمام مذاب‌ریزی (time=22 s).....  
 ۹۰.....
- شکل ۶-۲۴ دما در نقاط مختلف سطح خارجی قالب، پس از اتمام مذاب‌ریزی (time=22 s).....  
 ۹۱.....
- شکل ۶-۲۵ حالت ۱: تغییرات  $h$  بر حسب دمای مذاب به صورت خطی.....  
 ۹۲.....
- شکل ۶-۲۶ حالت ۲: تغییرات  $h$  بر حسب دمای مذاب به صورت نمایی.....  
 ۹۲.....
- شکل ۶-۲۷ حالت ۳: تغییرات  $h$  بر حسب دمای مذاب به صورت منحنی صعودی-نزولی خطی.....  
 ۹۳.....
- شکل ۶-۲۸ تغییرات دما روی سطح داخلی قالب در ناحیه A-A بر حسب زمان، به ازای نمودارهای مختلف  $h-T_{melt}$ .....  
 ۹۳.....
- شکل ۶-۲۹ تاثیر مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی بین مذاب و قالب بر روی توزیع دما در قالب: (الف) با فرض وجود  
 مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی و (ب) با فرض عدم وجود مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی.....  
 ۹۴.....
- شکل ۶-۳۰ تاثیر مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی بین مذاب و قالب بر روی توزیع دما در لوله به شماره‌ی ۳۲۵۶۰:  
 (الف) با فرض وجود مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی و (ب) با فرض عدم وجود مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی  
 ۹۵.....
- شکل ۶-۳۱ تاثیر سرعت دورانی قالب بر تغییرات دما روی سطح داخلی قالب در منطقه‌ی ۲.....  
 ۹۶.....
- شکل ۶-۳۲ تاثیر سرعت دورانی قالب بر گرادیان دما روی سطح داخلی قالب در منطقه‌ی ۲.....  
 ۹۶.....
- شکل ۶-۳۳ تاثیر دمای مذاب‌ریزی بر تغییرات دما روی سطح داخلی قالب در منطقه‌ی ۲.....  
 ۹۷.....
- شکل ۶-۳۴ تاثیر دمای مذاب‌ریزی بر گرادیان دما روی سطح داخلی قالب در منطقه‌ی ۲.....  
 ۹۸.....
- شکل ۶-۳۵ تاثیر ضخامت پوشش قالب بر تغییرات دما روی سطح داخلی قالب در منطقه‌ی ۲.....  
 ۹۹.....
- شکل ۶-۳۶ تاثیر ضخامت پوشش قالب بر گرادیان دما روی سطح داخلی قالب در منطقه‌ی ۲.....  
 ۹۹.....
- شکل الف-۱ نقشه لوله با قطر اسمی ۶۰۰ میلی‌متر.....  
 ۱۰۴.....
- شکل الف-۲ نقشه سرکاسه قالب با قطر اسمی ۶۰۰ میلی‌متر.....  
 ۱۰۵.....
- شکل الف-۳ نقشه بدنه اصلی و انتهای قالب با قطر اسمی ۶۰۰ میلی‌متر.....  
 ۱۰۶.....

- شکل الف- ۴ نقشه ماهیچه برای ریخته‌گری لوله با قطر اسمی ۶۰۰ میلیمتر ..... ۱۰۶
- شکل ب- ۱- استوانه‌ی نامتناهی با دمای یکنواخت اولیه که بطور ناگهانی در شرایط جابجایی قرار می‌گیرد [۳۹]. ..... ۱۰۹
- شکل ب- ۲- تغییرات دمای بی بعد پودر برحسب زمان ..... ۱۱۰

## فهرست جداول

<u>شماره جدول</u>	<u>صفحه</u>
جدول ۱-۲ تنظیم پارامتر سرعت در ریخته‌گری لوله‌های چدنی [۶]	۱۴
جدول ۲-۲ مقایسه خواص فیزیکی و مکانیکی چدن خاکستری با چدن نشکن [۲۸]	۱۷
جدول ۳-۲ درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده فولاد 21CrMo10	۲۲
جدول ۴-۲ درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده فولاد 35CrMo	۲۲
جدول ۱-۳ مقادیر نوعی ضریب انتقال حرارت جابجایی [۳۴]	۲۷
جدول ۲-۳ ضرایب ثابت در معادله‌ی (۱۱-۳) [۳۴]	۲۸
جدول ۳-۳ معرفی پارامترهای معادله (۲۳-۳)	۳۲
جدول ۱-۴ درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده‌ی چدن نشکن [۲۹]	۴۳
جدول ۲-۴ درصد وزنی فازهای تشکیل دهنده‌ی ماهیچه ماسه‌ای [۲۹]	۴۳
جدول ۳-۴ درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده‌ی پودر مخصوص پوشش قالب [۲۹]	۴۳
جدول ۴-۴ نتایج آزمایش تعیین ضریب گرمای ویژه پودر مخصوص	۵۰
جدول ۵-۴ نتایج آزمایش تعیین ضریب گرمای ویژه ماهیچه	۵۰
جدول ۶-۴ نتایج آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی پودر مخصوص	۵۴
جدول ۷-۴ نتایج آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی ماهیچه	۵۶
جدول ۱-۵ مراحل مختلف و پردازشگرهای مهم موجود در ANSYS [۴۷]	۶۰
جدول ۲-۵ حساسیت المان‌بندی برای مدل سرکاسه	۶۵
جدول ۳-۵ شرایط مرزی اعمال شده به مدل حرارتی در گام‌های مختلف حل	۶۷
جدول ۱-۶ جداول آماده شده برای ثبت نتایج آزمایشات عملی	۷۱
جدول ۲-۶ مقدار پودر مصرفی و ضخامت آن در هنگام پودر پاشی توسط نازل پودر پاش روی سطح قالب برای سایزهای مختلف لوله‌ریزی	۷۳
جدول ۳-۶ سرعت محوری قالب برای سایز مختلف لوله‌ریزی	۷۳
جدول ۴-۶ مدت زمان ریخته‌گری هر لوله	۷۳
جدول ۵-۶ میانگین دمای نقاط مختلف روی سطح داخلی سرکاسه قالب در ناحیه A-B، بلافاصله پس از بیرون کشیدن لوله از قالب	۷۶
جدول ۶-۶ میانگین دمای نقاط مختلف روی سطح خارجی سرکاسه لوله در ناحیه A-B، بلافاصله پس از بیرون کشیدن لوله از قالب	۸۲
جدول ب-۱ ضرایبی که در تقریب یک جمله‌ای حل سری گونه رسانش یک بعدی گذرا بکار می‌روند [۵۰]	۱۰۹
جدول ب-۲ کمیت‌های مورد استفاده برای تعیین ضریب هدایت حرارتی پودر مخصوص در آزمایش اول	۱۱۱

## چکیده

پیشرفت‌های مداوم در روش‌های ریخته‌گری در نیمه نخست قرن بیستم باعث ابداع روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی برای تولید لوله گردید که به مرور جایگزین روش ریخته‌گری در ماسه شد. لوله‌های چدن نشکن که سال‌هاست در شبکه‌های مدرن آب آشامیدنی و فاضلاب به عنوان لوله‌ی استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرند، توسط همین روش در ماشین‌های لوله‌ریزی موسوم به ماشین دی‌لاوود ریخته‌گری می‌شوند. هدف این پروژه استفاده از روش اجزا محدود برای شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی لوله‌های چدن نشکن در ماشین‌های لوله‌ریزی می‌باشد. در شبیه‌سازی انجام شده از کد (ماکرو) تهیه شده در نرم‌افزار ANSYS استفاده شده و با ارائه یک مدل عددی تقارن محوری شامل لوله و قالب، تاریخچه‌ی توزیع دما در لوله و قالب طی فرآیند انجماد مذاب و سیکل‌های دمایی مختلف لوله‌ریزی بدست آمده است. در این تحلیل تغییر فاز ناشی از انجماد، مقاومت حرارتی در مرز مشترک مذاب و قالب ناشی از پوشش قالب و فاصله‌ی هوایی، شرایط مرزی و اولیه‌ی متناسب با شرایط عملی و همچنین تابعیت خواص ترموفیزیکی مواد با دما در نظر گرفته شده است. نتایج حل حرارتی فرآیند ریخته‌گری با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق و تحلیل‌های عددی ارائه شده توسط محققان دیگر مقایسه شده که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. این نتایج می‌تواند به عنوان ورودی برای مدلی که عمر خستگی حرارتی قالب‌های لوله‌ریزی را تخمین می‌زند، بکار رود. شبیه‌سازی انجام گرفته نشان می‌دهد که مقاومت حرارتی ناشی از فاصله‌ی هوایی و پوشش قالب نقش موثری در توزیع دما در قالب و لوله دارد. همچنین فرآیند ریختن مذاب علاوه بر ایجاد گرادیان‌های دمایی در جهت شعاعی در قالب و لوله، باعث تشکیل گرادیان‌های دمایی در جهت محوری نیز می‌گردد.

کلمات کلیدی: ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، انتقال حرارت، شبیه‌سازی حرارتی، تحلیل اجزا محدود



## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱ کلیات

ریخته‌گری یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تولید است، بطوری که مثلاً در ایالات متحده آمریکا که یک کشور توسعه یافته صنعتی می‌باشد، ریخته‌گری از نظر حجم در مقام ششم صنایع اساسی قرار دارد. ریخته‌گری اساساً به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن ماده‌ی مذاب (معمولاً یک فلز مذاب) در فضای خالی قالبی که قبلاً تهیه شده ریخته می‌شود تا پس از انجماد شکل نهایی قالب را به خود بگیرد. فلزاتی که خاصیت پلاستیک کمی دارند، قطعات دارای اشکال پیچیده، قطعات با سطوح نامنظم، قطعات خیلی بزرگ و قطعاتی که امکان ماشینکاری آن‌ها دشوار است، به روش ریخته‌گری تولید می‌شوند. در فرآیند ریخته‌گری اگر قطعه حاصل از تولید به شکل نهایی باشد آن را قطعه ریخته‌گری<sup>۱</sup> و اگر به شکل واسطه باشد، که بعداً به شکل‌ها و مقاطع مختلف تبدیل شود آن را شمش<sup>۲</sup> می‌نامند. امروزه تقریباً تمام فلزات را می‌توان ریخته‌گری کرد، اما این نکته باید مدنظر قرار گیرد که از هر فرآیند شکل‌دهی زمانی استفاده می‌شود که در مقایسه با روش‌های دیگر مقرون به صرفه بوده و دسترسی به تجهیزات و لوازم آن آسان باشد. برخی روش‌های ریخته‌گری فلزات عبارتست از [۱]:

۱- ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای

۲- ریخته‌گری در قالب دائمی بدون فشار

۳- ریخته‌گری در قالب دائمی تحت فشار (دایکاست)

۴- ریخته‌گری گریز از مرکز

---

<sup>۱</sup> Casting

<sup>۲</sup> Ingot

۵- ریخته‌گری با مدل‌های ذوب‌شدنی<sup>۱</sup>

۶- ریخته‌گری پوسته‌ای<sup>۲</sup>

۷- ریخته‌گری در قالب گچی<sup>۳</sup>

از بین روش‌های ذکر شده در بالا، در این تحقیق روش چهارم یعنی ریخته‌گری گریز از مرکز مورد مطالعه قرار گرفته است. این روش ریخته‌گری بطور گسترده در ساخت لوله‌های چدنی، بوش‌های استوانه‌ای، لوله‌های تانگ و تفنگ، مخازن تحت فشار، کاسه چرخ، چرخنده‌ها و چرخ لنگر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در این پروژه فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز به منظور تولید لوله‌های چدن نشکن<sup>۴</sup> مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

یکی از زمینه‌های تحقیق در این فرآیند، تخمین و افزایش عمر قالب است. سطح داخلی قالب در حین کار تحت تاثیر عواملی همچون سیکل تغییرات دمایی، نیروی گریز از مرکز بالا در اثر چرخش قالب، تنش‌های بالا در نواحی نزدیک سطح داخلی و ترک‌های خراشی در هنگام بیرون کشیدن لوله‌ها از قالب در جهت محور قالب قرار می‌گیرد که بر طول عمر قالب تاثیر دارند. از طرف دیگر عیوبی که در قالب ظاهر می‌شوند، می‌تواند بطور مستقیم بر روی قطعه‌ی ریخته‌گری اثر گذار باشد. با این وجود کاملاً واضح است که برای مطالعه‌ی بیشتر بر روی سیکل تغییرات دمایی طی ریخته‌گری، افزایش عمر قالب‌های ریخته‌گری لوله و تولید محصول سالم، استفاده از روش‌های اندازه‌گیری تجربی پرهزینه و زمان‌بر هستند. در چند دهه اخیر محققان تلاش‌های زیادی برای تعیین نحوه‌ی توزیع دما و تنش در قالب و قطعه ریخته‌گری به منظور افزایش کارکرد قالب و تولید محصول سالم، به کمک روش‌های تحلیلی و عددی از جمله روش اجزاء محدود، نموده‌اند. بطوری‌که در بازه‌ی سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۲ حداقل ۲۵ مقاله علمی در رابطه با شبیه‌سازی عددی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز ارائه شده است. از طرفی در سال‌های اخیر قابلیت‌های بسته‌های نرم‌افزاری اجزاء محدود در تحلیل مسائل کاربردی نظیر ریخته‌گری افزایش یافته است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز لوله‌های چدن نشکن از نرم‌افزار ANSYS استفاده و برنامه شبیه‌سازی به صورت ماکرو در این نرم‌افزار تهیه شده است. این شبیه‌سازی شامل بدست آوردن تاریخچه توزیع دما در لوله‌ی ریخته‌گری می‌باشد. اما از آنجایی که قالب به عنوان یک چاه حرارتی در این مسئله به شدت منشا اثر است لذا مدل شامل قالب نیز بوده و تاریخچه توزیع دما در آن نیز بدست می‌آید. روند شبیه‌سازی شامل دو مرحله خواهد بود. به این ترتیب که در مرحله اول مدل حرارتی قالب و مذاب در تماس با آن، حل شده و طی فرآیند انجماد مذاب، تاریخچه توزیع دما بدست می‌آید. در این حل تغییر فاز و گرمای نهان حاصل از انجماد، مقاومت حرارتی در مرز مشترک مذاب-قالب، شرایط مرزی و اولیه‌ی متناسب با شرایط عملی و همچنین تابعیت خواص فیزیکی و حرارتی مواد با دما در نظر گرفته می‌شود. پس از این مرحله با خارج شدن لوله از قالب، شرایط مرزی و اولیه‌ی جدیدی به مدل حرارتی لوله‌ی ریخته‌گری شده اعمال شده که پس از شبیه‌سازی، تاریخچه دمایی نقاط مختلف آن محاسبه می‌شود. در این تحقیق همچنین یکی از فرآیندهای اصلی در لوله‌ریزی یعنی فرآیند ریختن مذاب<sup>۵</sup> که اصطلاحاً توسط ناودان متحرک انجام می‌گیرد نیز شبیه‌سازی شده و توزیع گذرای حرارت در سرتاسر قالب و لوله بدست

<sup>۱</sup> Lost Foam casting-Lost Wax casting

<sup>۲</sup> Shell casting

<sup>۳</sup> Plaster casting

<sup>۴</sup> Ductile cast iron pipe

<sup>۵</sup> Pouring

می‌آید. به منظور بررسی صحت نتایج برنامه شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ریخته‌گری لوله، نتایج حاصل شده با نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته توسط محققان دیگر مقایسه شده است. توزیع دمای حاصل شده از این شبیه‌سازی، می‌تواند به عنوان ورودی در مدلی که عمر قالب‌های ریخته‌گری گریز از مرکز لوله را تخمین می‌زند مورد استفاده قرار گیرد.

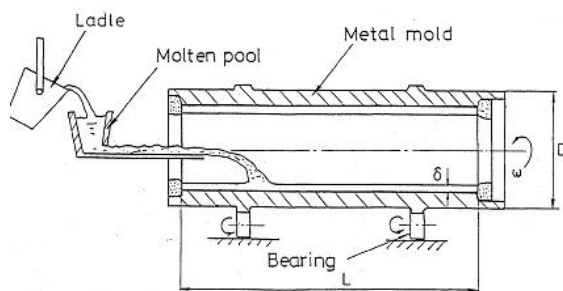
## ۱-۲ مرور کارهای انجام شده و پژوهش‌های پیشین

پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه ریخته‌گری گریز از مرکز را می‌توان به دو دسته‌ی عمده شامل پژوهش‌هایی که به بررسی و تحلیل رفتار جریان مذاب و انجماد در طی فرآیند ریخته‌گری، و نیز پژوهش‌هایی که به بررسی رفتار حرارتی - مکانیکی قالب می‌پردازند تقسیم‌بندی نمود. با توجه به اهداف این پروژه، در این بخش پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه‌ی رفتار مذاب و تحلیل حرارتی فرآیند مرور می‌گردد.

شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی تا به حال با چالش‌های زیادی همراه بوده [۲] و در اکثر تحقیقات فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۵]. اولین مطالعات آزمایشگاهی بر روی فرآیند ریخته‌گری گریز از افقی در سال ۱۹۵۹ توسط کونیگر و لیمن [۶]، انجام گرفته است که هدف آن بررسی رفتار حرارتی - مکانیکی قالب‌های ریخته‌گری لوله‌های چدن معمولی بوده است. آزمایشات آن‌ها منجر به تعیین توزیع دما و تنش در قالب گردید که هم اکنون نیز مورد توجه دیگر محققان می‌باشد.

دیگر مطالعات در زمینه ریخته‌گری گریز از مرکز توسط مینوسیان و همکارانش در سال ۱۹۸۳ [۷]، به ارائه‌ی یک مدل ریاضی از فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز به منظور تولید لوله‌های طویل از جنس فولاد منجر گردید. آن‌ها با استفاده از روش عددی تفاضل محدود به بررسی تاثیر نرخ مذاب‌ریزی بر فرآیند انجماد مذاب پرداخته و نشان دادند که نتایج بدست آمده با نتایج آزمایش کمتر از ۱۰ درصد با خطا همراه است.

در سال ۱۹۸۴ ویسور و همکارانش [۸]، نیز به صورت آزمایشگاهی و با ارائه مدل ریاضی به مطالعه‌ی فرآیند انتقال حرارت طی ریخته‌گری گریز از مرکز برای تولید لوله و شناخت آن دسته از پارامترهایی که بر روی تاریخچه‌ی دمایی در حین فرآیند انجماد تاثیر گذارند، پرداختند. در سال ۱۹۹۰ دونگک یینگ و همکارانش [۹]، با استفاده از معادلات گالرکین و بر پایه روش المان محدود، به تحلیل فرآیند انجماد و نحوه توزیع دما در قالب و مذاب در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی با ناودان ثابت پرداختند. شکل ۱-۱ شماتیکی از چنین فرآیندی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ شماتیکی از فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی با ناودان ثابت [۹]

در سال ۲۰۰۰ فانگ و همکارانش [۱۰]، با هدف یافتن پارامترهای موثر بر رفتار حرارتی قالب‌های ریخته‌گری گریز از مرکز افقی و مطالعه بر روی میدان دما و تنش در قالب، به شبیه‌سازی و انجام تست آزمایشگاهی پرداختند.

در سال ۲۰۰۱ تلیانگ و همکارانش [۱۱]، با ارائه یک مدل تقارن محوری به شبیه‌سازی اجزا محدود و تحلیل حرارتی - مکانیکی فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز افقی برای تولید لوله‌های چدن نشکن در نرم افزار ANSYS پرداختند. این مدل تنها شامل قسمت سرکاسه قالب بوده و در آن فرآیند ریختن مذاب مورد تحلیل قرار نگرفته است.

در سال ۲۰۰۴ میلادی زینگ‌وانگ و همکارانش [۱۲]، مدلی ریاضی بر پایه‌ی معادلات ناویر-استوکس<sup>۱</sup>، پیوستگی و انرژی، به منظور بررسی جریان مذاب و انتقال حرارت در فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز برای تولید بوش‌های فولادی ارائه کردند.

رئی در سال ۲۰۰۵ [۱۳]، در تر کارشناسی ارشد خود، به منظور تخمین عمر قالب‌های چند لایه از جنس مس و فولاد، با صرف نظر کردن از اثرات ابتدایی و انتهایی قالب، مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای المان محدود ارائه کرده و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و اعمال بار حرارتی ساده به سطح داخلی قالب به تحلیل حرارتی - مکانیکی اینگونه قالب‌ها پرداخته است.

نانان و همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۱۴]، مدل ریاضی با در نظر گرفتن معادلات ناویر-استوکس، پیوستگی و معادله‌ی انرژی، به منظور تحلیل فرآیند پر کردن قالب<sup>۲</sup> و انجماد در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی ارائه کردند. بر پایه‌ی چنین مدلی، توزیع دما و میدان سرعت در فرآیند ریخته‌گری به روش کدنویسی شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایش مقایسه شده است.

در سال ۲۰۱۰ مادوسودان و همکارانش [۱۵، ۱۶]، به صورت آزمایشگاهی به بررسی نقش سرعت دورانی و ضخامت قالب ریخته‌گری گریز از مرکز بر روی فرآیند انجماد و نرخ سرد شدن مذاب پرداختند. دستگاه تست آزمایشگاهی آن‌ها در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که برای هر آلیاژ ریخته‌گری شده، به منظور افزایش نرخ انجماد، یک سرعت دورانی بهینه‌ای وجود دارد. همچنین آن‌ها نشان دادند با افزایش ضخامت قالب، فرآیند انجماد نیز سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

<sup>1</sup> Navier-Stokes equation

<sup>2</sup> Mold filling process