



دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

موضوع:

بهینه سازی طرح آزمایش و تخمین ضریب انتقال حرارت معکوس
در انجماد دوجبهتی فشاری با استفاده از الگوریتم MEGA

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر رنجبر

استاد مشاور:

مهندس مهدی فاموری

نگارش:

آتنا قادری

زمستان ۸۹

چکیده

آنالیز هدایت حرارتی معکوس به منظور تخمین ضرایب انتقال حرارت مرزهای فلز- قالب (IHTC)، در فرایند انجماد فشاری دو جهتی ارائه می‌شود. در این تحقیق، با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل مسئله معکوس، IHTC با دو پروفیل نمایی تخمین زده شده است، که در حالت اول IHTC فقط وابسته به زمان (شامل ۴ پارامتر مجهول) در نظر گرفته شده و در حالت دوم در دیواره عمودی سمت راست قالب وابستگی به زمان و ارتفاع، به طور همزمان لحاظ شده است (شامل ۶ پارامتر مجهول). دماهای تخمینی با حل عددی مساله مستقیم انجماد دوبعدی و با استفاده از پارامترهای تخمینی بدست می‌آیند. تغییر فاز در داخل فلز در طول انجماد توسط روش آنتالپی کنترل می‌شود. برای تایید آنالیز معکوس بکار رفته، شبیه‌سازی آزمایش با نويز افزودنی گوسی (۹۹٪ حد اطمینان) صورت گرفته است.

از دماهای بدون نويز برای تست الگوریتم معکوس استفاده شده است. دماهای شبیه سازی شده وارد الگوریتم شده و با استفاده از تابع هدف تعریف شده برای این الگوریتم بهترین تخمین برای تمامی پارامترهای نامعلوم به دست آمده و بالاترین برازندگی حاصل می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه پارامترهای تخمینی و پارامترهای از پیش انتخاب شده بیانگر کارایی و سرعت الگوریتم در حل مسائل مختلف بهینه سازی حتی با توابع غیر خطی چند پارامتری و مالتی مودال می باشد.

واژه‌های کلیدی:

انجماد فشاری، انتقال حرارت معکوس، ضریب انتقال حرارت مرزی، الگوریتم ژنتیک.

فهرست

فهرست جداول

فهرست اشکال

فهرست علائم

فصل ۱	مقدمه	۱
۱-۱	ضرورت و اهداف تحقیق	۱
۲-۱	پیشینه تحقیق	۸
فصل ۲	آنالیز انتقال حرارت معکوس	۱۰
۱-۲	مفهوم مساله انتقال حرارت معکوس	۱۰
۲-۲	شبیه‌سازی آزمایش	۱۵
۳-۲	حوزه کاربرد انتقال حرارت معکوس	۱۷
۴-۲	مشکلات حل مسائل انتقال حرارت معکوس	۱۸
۵-۲	مروری بر روشهای حل مساله انتقال حرارت معکوس	۱۹
۱-۵-۲	روش انتقال حرارت معکوس در تخمین پارامتر	۲۳
فصل ۳	الگوریتم‌های ژنتیک	۲۶
۱-۳	مقدمه ای بر الگوریتم ژنتیک	۲۶
۲-۳	مبانی الگوریتم ژنتیک	۲۸
۱-۲-۳	الگوریتم ژنتیک چیست؟	۲۸
۳-۳	عمگرهای اصلی الگوریتم ژنتیک	۳۰
۱-۳-۳	روشهای کدگذاری	۳۰
۲-۳-۳	جمعیت اولیه	۳۱
۳-۳-۳	تابع برازندگی	۳۲
۴-۳-۳	انتخاب	۳۲
۵-۳-۳	پیوند	۳۵
۶-۳-۳	جهش	۳۶
۷-۳-۳	روشهای جایگزینی	۳۷
۸-۳-۳	معیار همگرایی	۳۷

۳۸	..... معیار عملکرد ۹-۳-۳
۳۹	..... مقایسه الگوریتم ژنتیک با روش های مرسوم بهینه سازی ۱۰-۳-۳
۴۰	..... نقاط قوت الگوریتم ژنتیک ۱۱-۳-۳
۴۰	..... نقاط ضعف الگوریتم ژنتیک ۱۱-۳-۳
۴۱	..... الگوریتم ژنتیک با نخبه سالاری ساده ۴-۳
۴۱	..... الگوریتم ژنتیک اصلاح شده ۵-۳
۴۵	..... بررسی عملکرد و همگرایی الگوریتم ژنتیک با توابع آزمایشی ۶-۳
۴۵	..... تابع آزمایشی f_2 ۱-۶-۳
۵۰	..... تابع آزمایشی f_6 ۲-۶-۳
۵۷	..... فصل ۴ روش تحقیق
۵۷	..... ۱-۴ الگوریتم کلی تحقیق
۶۱	..... ۲-۴ حدس اولیه
۶۲	..... ۳-۴ حل مستقیم
۶۲	..... ۱-۳-۴ بررسی محدوده محاسباتی، معادلات حاکمه و شرایط مرزی
۶۴	..... ۲-۳-۴ بررسی معادلات مربوط به فلز ریخته گری
۶۴	..... ۱-۲-۳-۴ مسایل تغییر فاز و روشهای حل آنها
۶۵	..... ۲-۲-۳-۴ روش آنتالپی برای حل مسایل تغییر فاز
۶۹	..... ۳-۳-۴ بررسی معادلات داخل ناحیه دوم قالب فلزی
۷۰	..... ۴-۳-۴ بررسی معادلات داخل ناحیه سوم قالب
۷۱	..... ۵-۳-۴ روش های حل معادلات هدایت
۷۳	..... ۴-۴ شبیه سازی آزمایش
۷۸	..... ۵-۴ استفاده از فیلتر جهت کاهش نویز
۸۱	..... فصل ۵ نتایج
۸۱	..... تخمین IHTC در مرزهای فلز مذاب و قالب
۸۲	..... ۱-۵ پروفیل نمایی وابسته به زمان (پروفیل ۱)
۹۲	..... ۲-۵ پروفیل نمایی وابسته به زمان و ارتفاع قالب (پروفیل ۲)
۱۰۵	..... فصل ۶ بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۵	..... ۱-۶ بحث و نتیجه گیری
۱۰۷	..... ۲-۶ پیشنهادات

فهرست جداول

جدول ۱-۳ بهینه سازی تابع f_2 چهار متغیره در ۳ اجرای متفاوت با به کارگیری عملگر کاهش دامنه..... ۴۷	
جدول ۲-۳ بهینه سازی تابع f_2 شش متغیره در ۳ اجرای متفاوت با به کارگیری عملگر کاهش دامنه..... ۴۷	
جدول ۳-۳ بهینه سازی تابع f_6 بدست آمده از MEGA در ۵ اجرای مختلف همراه با عملگر کاهش دامنه..... ۵۲	
جدول ۴-۳ بهترین و میانگین برازندگی تابع f_6 در ۵ اجرا..... ۵۴	
جدول ۱-۴ خواص حرارتی آلیاژ ریخته گری..... ۶۹	
جدول ۲-۴ خواص حرارتی قالبهای فلزی..... ۷۰	
جدول ۱-۵ تابع برازندگی و پارامترهای تخمینی از ۳ اجرای مختلف الگوریتم بر اساس اندازه گیری دقیق ($\sigma=0$)..... ۸۸	
جدول ۲-۵ بهترین تابع برازندگی و پارامترهای تخمینی حاصل از اجراهای مختلف الگوریتم MEGA در حالت نویزی ($\sigma=0.01T_{max}$)..... ۸۹	
جدول ۳-۵ درصد خطا بین IHTC های دقیق بدون نویز و تخمین زده شده..... ۹۱	
جدول ۴-۵ Cpu Tim لازم برای اجرا MEGA در حالت های نویزی و بی نویز ۴ و ۶ پارامتر مجهول... ۹۷	
جدول ۵-۵ تابع برازندگی و پارامترهای تخمینی از ۳ اجرای مختلف الگوریتم بر اساس اندازه گیری دقیق ($\sigma=0$)..... ۱۰۰	
جدول ۶-۵ بهترین تابع برازندگی و پارامترهای تخمینی حاصل از اجراهای مختلف الگوریتم MEGA در حالت نویزی ($\sigma=0.01T_{max}$)..... ۱۰۰	
جدول ۷-۵ درصد خطا بین h_{in} دقیق و تخمین زده شده پروفیل ۲..... ۱۰۴	
جدول ۸-۵ درصد خطا بین h_{in2} دقیق و تخمین زده شده در ارتفاع های ۰/۱۱۲ و $v=0$ پروفیل ۲..... ۱۰۴	

فهرست اشکال

۲	قالب ریخته گری فولادی [۵].....	شکل ۱-۱
۳	ریخته گری تبریدی [۶].....	شکل ۲-۱
۴	فرایند انجماد در مرز قالب-فلز [۳].....	شکل ۳-۱
۵	مدلسازی انتقال حرارت در مرز فلز- قالب [۱۳].....	شکل ۴-۱
۶	پروفیل تقریبی دما در مرز فلز مذاب و قالب [۱۴].....	شکل ۵-۱
۷	مساله انجماد دو بعدی.....	شکل ۶-۱
۱۱	انتقال حرارت مستقیم.....	شکل ۱-۲
۱۱	انتقال حرارت معکوس.....	شکل ۲-۲
۱۲	هدایت گذرای دوبعدی.....	شکل ۳-۲
۳۰	نمودار گردشی CGA و BEGA.....	شکل ۱-۳
۳۱	فرد a و چهار ژن مربوط به آن.....	شکل ۲-۳
۳۴	انتخاب چرخ گردان.....	شکل ۳-۳
۳۵	پیوند یک نقطه‌ای.....	شکل ۴-۳
۳۶	جهش فرد a	شکل ۵-۳
۴۳	نمودار گردشی الگوریتم ژنتیک اصلاح شده (MEGA).....	شکل ۶-۳
۴۶	تابع Rastrigrin.....	شکل ۷-۳
۴۶	تابع Rastrigrin یک بعدی و تابع f_2	شکل ۸-۳
۴۸	نمودار X_i های به دست آمده برای تابع برازندگی ۴ متغیره.....	شکل ۹-۳

- شکل ۳-۱۰ نمودار X_i های به دست آمده برای تابع برازندگی ۶ متغیره ۴۸
- شکل ۳-۱۱ نمودار بهترین برازندگی بر حسب نسل برای ۳ اجرا مختلف در حالت (الف) ۴ متغیره (ب) ۴۹
- شکل ۳-۱۲ تابع آزمایشی $f6$ [۲۸] ۵۰
- شکل ۳-۱۳ تابع آزمایشی $f6$ با فرض (الف) $y=0$ ، (ب) $y=0.2$ ۵۱
- شکل ۳-۱۴ بهترین x و y بر حسب نسل در اجرای شماره ۲ ۵۲
- شکل ۳-۱۵ بهترین x و y بر حسب نسل در اجرای شماره ۳ ۵۳
- شکل ۳-۱۶ (الف) نمودار میانگین برازندگی بر حسب نسل برای ۲ اجرا مختلف ۵۵
- شکل ۳-۱۶ (ب) نمودار بهترین برازندگی و بر حسب نسل برای ۳ اجرا مختلف ۵۵
- شکل ۴-۱ نمودار گردشی الگوریتم کلی تحقیق ۶۰
- شکل ۴-۲ مساله انجماد دوبعدی ۶۲
- شکل ۴-۳ شرایط مرزی هر محدوده محاسباتی ۶۳
- شکل ۴-۴ رابطه آنتالپی - دما برای (الف) مواد کریستالی خالص و (ب) آلیاژها و مواد ناخالص ۶۶
- شکل ۴-۵ گره‌های بکار رفته برای جداسازی معادله حاکم ۷۲
- شکل ۴-۶ خطای اندازه‌گیری در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد با توزیع
احتمال نرمال ($\sigma = 1\%$ و حد اطمینان ۹۹٪) و یکنواخت ($\sigma = 1\%$) ۷۴
- شکل ۴-۷ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی
قرار گرفته در مذاب (دقیق و نویز دار با $\sigma=0.01$) ۷۵
- شکل ۴-۸ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی
قرار گرفته در منطقه دوم قالب (دقیق و نویز دار با $\sigma=0.01$) ۷۵
- شکل ۴-۹ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی

- ۷۶ قرار گرفته در منطقه سوم قالب (دقیق و نویز دار با $\sigma=0/01$)
- شکل ۱۰-۴ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی
- ۷۶ قرار گرفته در مذاب (دقیق و نویز دار با $\sigma=0/04$)
- شکل ۱۱-۴ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی
- ۷۷ قرار گرفته در ناحیه دوم قالب (دقیق و نویز دار با $\sigma=0/04$)
- شکل ۱۲-۴ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی
- ۷۷ قرار گرفته در ناحیه سوم قالب (دقیق و نویز دار با $\sigma=0/04$)
- شکل ۱۳-۴ فیلتر مرحله اول و دوم برای یک نقطه داخلی [۴۱].....
- شکل ۱۴-۴ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی اول
- ۸۰ قرار گرفته در مذاب (دقیق و نویز دار و فیلتر شده با $\sigma=0/01$ فیلتر ۴۰ مرحله ای)
- شکل ۱۵-۴ تاریخچه دمایی حسگرهای حرارتی ۵
- ۸۰ قرار گرفته در قالب (دقیق و نویز دار و فیلتر شده با $\sigma=0/01$ فیلتر ۴۰ مرحله ای)
- شکل ۱-۵ مساله انجاماد دو بعدی با حسگرهای موجود در قالب و مذاب برای پروفیل ۱.....
- شکل ۲-۵ تاریخچه دمایی دقیق بدون نویز، نویزدار و فیلتر شده برای سه حسگر حرارتی قرار گرفته در (الف) مذاب، (ب) قالب منطقه دوم و (ج) قالب منطقه سوم.....
- شکل ۳-۵ نمودار خطای اندازه گیری شده در حالت نویزی و فیلتری.....
- شکل ۴-۵ نمودار h_{in2} , h_{in} بر حسب زمان.....
- شکل ۵-۵ تغییرات تابع برازندگی بر حسب پارامترهای تخمینی برای حالات دقیق ($\sigma=0$) و نویزی ($\sigma=0.01T_{max}$) در اجراهای مختلف، (الف) $f(\beta_1 \equiv P_1)$ ، (ب) $f(\beta_2 \equiv P_2)$ ، (ج) $f(\beta_3 \equiv P_3)$ و (د) $f(\beta_4 \equiv P_4)$
- شکل ۶-۵ بهترین و میانگین تابع برازندگی بر حسب نسل (الف) بر پایه اندازه گیری دقیق ($\sigma=0$) (ب) بر پایه اندازه گیری نویزی ($\sigma=0.01T_{max}$).....
- شکل ۷-۵ نمودار h_{in} دقیق و شبیه سازی شده بر حسب زمان.....

- شکل ۵-۸ نمودار h_{in2} دقیق و شبیه سازی شده بر حسب زمان ۹۱
- شکل ۵-۹ مساله انجماد دو بعدی با حسگرهای موجود در قالب برای پروفیل ۲ ۹۳
- شکل ۵-۱۰ تاریخچه دمایی دقیق بدون نویز، نویزدار و فیلتر شده برای حسگرهای حرارتی قرار گرفته در
 (الف) قالب منطقه دوم و (ب) قالب منطقه سوم ۹۴
- شکل ۵-۱۱ نمودار خطای اندازه گیری شده در حالت نویزی و فیلتری ۹۴
- شکل ۵-۱۲ نمودار h_{in} بر حسب زمان ۹۵
- شکل ۵-۱۳ نمودار h_{in2} بر حسب زمان به ازای $y=0$ و $0/112$ ۹۵
- شکل ۵-۱۴ نمودار h_{in2} بر حسب y به ازای $t=180$ و 200 ۹۶
- شکل ۵-۱۵ تغییرات تابع برازندگی بر حسب پارامترهای تخمینی برای حالات دقیق ($\sigma=0$)
 و نویزی ($\sigma=0.01T_{max}$) در اجرا های مختلف، (الف) $f(\beta_1 \equiv P_1)$ ، (ب) $f(\beta_2 \equiv P_2)$ (پ)
 (ت) $f(\beta_3 \equiv P_3)$ (ج) $f(\beta_4 \equiv P_4)$ (د) $f(\beta_5 \equiv P_5)$ (ه) $f(\beta_6 \equiv P_6)$ ۹۹
- شکل ۵-۱۶ بهترین و میانگین تابع برازندگی بر حسب نسل (الف) بر پایه اندازه گیری دقیق ($\sigma=0$)
 (ب) بر پایه اندازه گیری نویزی ($\sigma=0.01T_{max}$) ۱۰۲
- شکل ۵-۱۷ نمودار h_{in} دقیق و شبیه سازی شده پروفیل ۲ ۱۰۲
- شکل ۵-۱۸ نمودار h_{in2} دقیق و شبیه سازی شده در $y=0$ پروفیل ۲ ۱۰۳
- شکل ۵-۱۹ نمودار h_{in2} دقیق و شبیه سازی شده در $y=0/112$ پروفیل ۲ ۱۰۳

فهرست علائم

فرد نمونه از یک نسل	a
ظرفیت حرارتی ویژه (J/Kg.K) / فردی در جمعیت ژنتیک	C, C_p
تابع برازندگی	$f(\beta)$
تعداد احضار تابع برازندگی	f_{eval}
تابع آزمایشی	f_6
آنتالپی (J/kg)	H
آنتالپی فلز مایع (J/kg)	H_L
آنتالپی فلز جامد (J/kg)	H_S
ضریب انتقال حرارت مرز قالب- محیط (W/m ² K)	h_{air}
ضریب انتقال حرارت مرز قالب- محیط (W/m ² K)	h_{water}
ضریب انتقال حرارت مرز فلز- قالب (W/m ² K)	h_{in}
ضریب انتقال حرارت مرز فلز- قالب (W/m ² K)	h_{in2}
تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده از یک حسگر	I
ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	K
ضخامت (mm) / گرمای نهان ذوب (J/Kg)	L
حد پایین جدید	L_{new}
تعداد حسگرهای حرارتی	M
تعداد پارامترهای مجهول	N
تعداد کل دماهای اندازه‌گیری شده	N_t
تعداد پارامترهای مجهول	N_p
تعداد ژن‌ها	n_p
اندازه جمعیت	n_s
تعداد حداکثر نسل	n_g
بردار پارامترهای مجهول	P
احتمال پیوند	p_c
احتمال جهش	p_m
احتمال جایگزینی	p_r
شار حرارتی ثابت (kW/m ²)	q_c
عدد تصادفی	R
ضریب انقباض دامنه	r_c

S	تابع حداقل مربعات معمولی خطا/ حسگر حرارتی
T_f	زمان پایان اندازه‌گیری (s)
T	برداری دمای تخمینی ($^{\circ}K$)
T_0, T_{init}	دمای اولیه ($^{\circ}K$)
T_L	نقطه ذوب آلیاژ فلزی ($^{\circ}C$)
T_{melt}	نقطه ذوب فلز خالص ($^{\circ}C$)
T_s	نقطه انجماد آلیاژ فلزی ($^{\circ}C$)
t	زمان (s)
t_p	زمان پایداری IHTC در پروفیل خطی (s)
x	موقعیت در جهت محور x
U_{new}	حد بالای جدید
y	موقعیت در جهت محور y
Y	دمای اندازه‌گیری یا شبیه‌سازی شده ($^{\circ}K$)
ΔT	میزان سوپر هیت فلز ریخته‌گری ($^{\circ}K$)

علائم یونانی

α^*	پارامتر منظم‌سازی تیخونوف
β	برداری پارامترهای تخمینی
ρ	چگالی (kg/m^3)
ε	نویز افزودنی گوسی
σ	انحراف معیار استاندارد خطای اندازه‌گیری
λ	مقدار ویژه ماتریس
θ	فاکتور وزنی در حل مستقیم عددی به روش تفاضل محدود / زاویه قطاع هر فرد
ω	متغیر تصادفی / فرکانس شار حرارتی

بالانویس

-	برداری
+	بی‌بعد
~	آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی شده
n	اندیس زمانی
P	تکرار

زیر نویس

c	محدوده فلز ریخته گری
$interface$	مرز فلز- قالب
i	شماره زمان اندازه گیری حسگر
j	شماره پارامتر مجهول
m	محدوده قالب / شماره حسگر
max	بیشینه
min	کمینه
S	فاز جامد فلز
L	فاز مایع فلز

علام اختصاری

IHCP	مساله انتقال هدایت معکوس (Inverse Heat Conduction Problem)
CGM	روش گرادیان ترکیبی (Conjugate Gradient Method)
IHTC	ضریب انتقال حرارت مرز مذاب (Interfacial Heat Transfer Coefficient)
OLS	حداقل مربعات معمولی (Ordinary least squares)
GA	الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)
RMS	ریشه دوم میانگین خطاها (Root Mean Square)
MEGA	الگوریتم ژنتیک اصلاح شده نخبه گرا (Modified Elitist Genetic Algorithm)
RWS	چرخ گردان رولت (Roulette Wheel Selection)
FDM	روش تفاضلات محدود (Finite Difference Method)

فصل اول

مقدمه

در این فصل ضرورت، اهداف و پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱ ضرورت و اهداف تحقیق

انجماد^۱، یک فرآیند تغییر فاز می‌باشد تشکیل قالب یخ مثالی ساده از این فرآیند می‌باشد. تقریباً هر ساخته دست بشر فرآیند انجماد را در حداقل یکی از مراحل ساخت خود به همراه دارد [۱]. انجماد فلزات عاملی مهم در فرآیندهای مواد^۲، متالوژی^۳، خالص‌سازی فلزات^۴ و ... است [۲ و ۳]. در طول انجماد یک فلز در یک قالب فلزی، انتقال حرارت بین فلز و قالب یکی از مهمترین فاکتورهای موثر در بهبود بخشیدن خواص مکانیکی محصول منجمد شده می‌باشد [۴]. سرعت زیاد سرمایش در انجماد فلز، به دلیل ایجاد ساختار ریزدانه^۵ در فلز، خواص مکانیکی آن، مانند قابلیت شکل پذیری را به شدت بهبود می‌بخشد [۲ و ۱]. بسیاری از نتایج تجربی نشان می‌دهند که

¹-solidification

²-materials processing

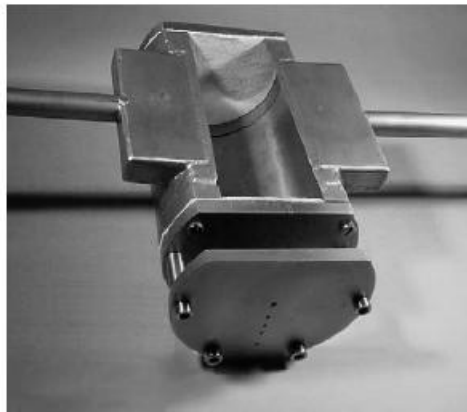
³-metallurgy

⁴-purification of metals

⁵-fine grained

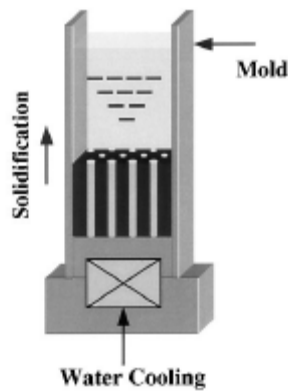
رسانايي حرارتي در مرز به طور كاملاً محسوسي بر سرعت انجماد تأثير دارد [۱ تا ۴]. به دليل عدم انطباق كامل و پايدار بين فلز و قالب، يك مقاومت تماسي حرارتي^۱ در مرز فلز- قالب ايجاد مي‌شود كه ميزان انتقال حرارت و سرعت انجماد^۲ را کاهش مي‌دهد. در نتيجه مدل‌سازي تئوريكي- تجربي انتقال حرارت در مرز فلز- قالب اطلاعات مناسبي در خصوص شرايط ريخته‌گري از قبيل تركيبهاي مختلف فلز- قالب، ابعاد و جنس قالب و نيز ميزان پيش گرمائش^۳ فلز خصوصاً در سيستم‌هاي ريخته‌گري تبريدي با ضريب پخش حرارتي^۴ بالا در اختيار ما قرار مي‌دهند [۵].

شكل (۱-۱) يك قالب ريخته‌گري فولادي و شكل (۲-۱) شماتيک يك ريخته‌گري تبريدي را نشان مي‌دهند كه در اين نمونه قالب توسط يك سيال خنك كننده (آب) خنك مي‌شود.



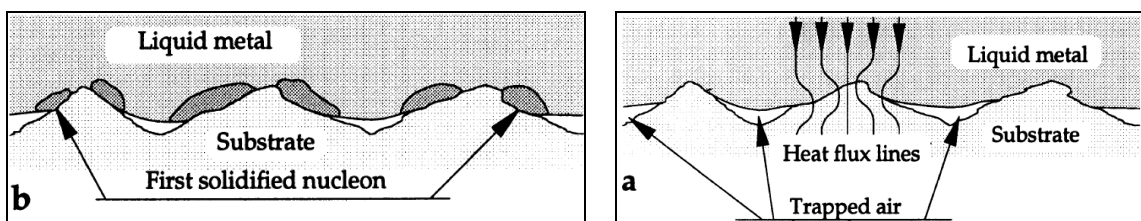
شكل ۱-۱ قالب ريخته‌گري فولادي [۵]

¹-thermal contact resistance
²-solidification rate
³-superheat
⁴-thermal diffusivity



شکل ۲-۱ ریخته گری تبریدی [۴]

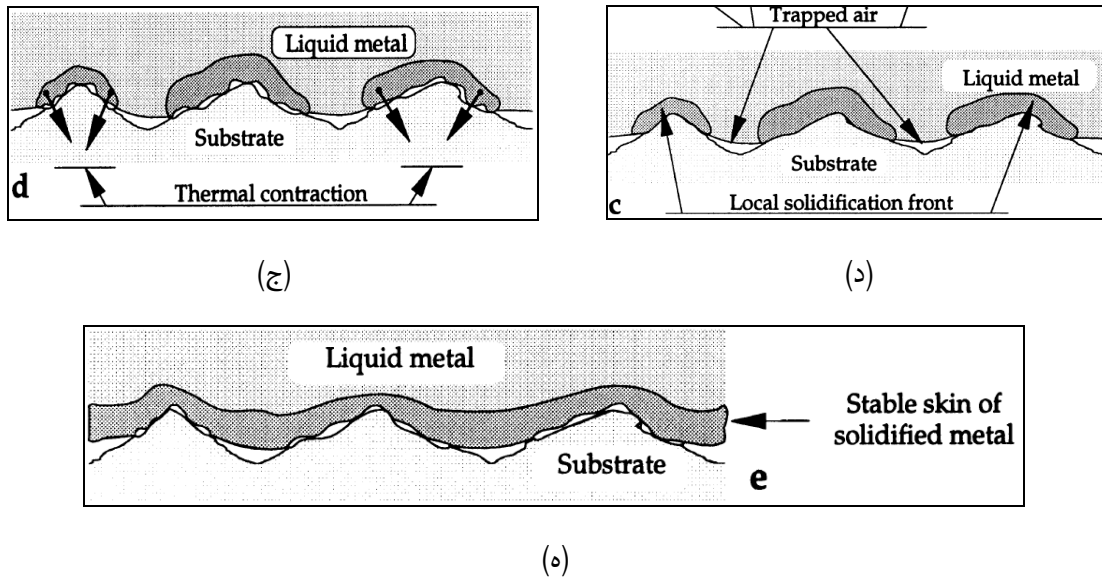
عموماً " جریان حرارتی در مرز فلز- قالب توسط ضریب انتقال حرارت مرزی^۱ IHTC تعریف و مشخص می شود که به دلیل انطباق مناسب قالب و فلز در مراحل اولیه انجماد، عدد بزرگی است. با پیشرفت انجماد و انبساط نسبی قالب (در اثر جذب انرژی گرمایی) و انقباض قابل توجه فلز منجمد شده در سطح مرزی قالب (در اثر دفع انرژی گرمایی)، چون فشار مرزی برای یک انطباق پایدار، کافی نیست، مطابق شکل (۳-۱) شکافی^۲ شامل هوا و احتمالاً گازهای فلزی در مرز تماس فلز- قالب تشکیل می شود. با تشکیل این حفره، IHTC به شدت کاهش می یابد [۳].



(الف)

(ب)

^۱-interfacial Heat Transfer Coefficient^۲-gap



شکل ۳-۱ فرآیند انجماد در مرز فلز- قالب [۳]

انتقال حرارت بین فلز و قالب در این مرحله به سه طریق صورت می گیرد،

- رسانایی از طریق نقاط تماس فلز و قالب
- رسانایی از طریق گاز های موجود در حفره
- تابش بین سطوح مرزی فلز و قالب

در مراحل پایانی انجماد با تشکیل لایه فلزی یکنواخت بر روی سطح قالب، به دلیل کاهش گرادیان دمایی در مرز، IHTC به مقدار پایدار و تقریباً ثابتی می رسد. این تغییرات IHTC با دما در تمام سیستم های ریخته گری قابل مشاهده است.

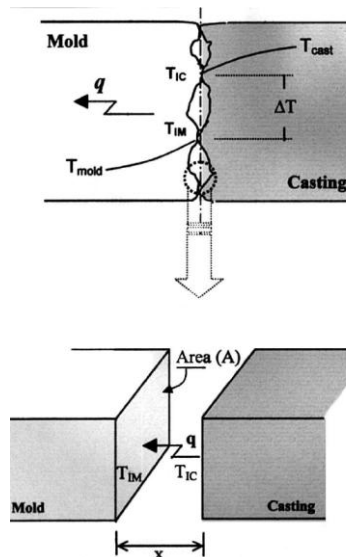
امروزه دقت ریخته گری به کمک بسیاری از نوآوری ها بهبود یافته است. یکی از روش هایی که با دقت قابل قبولی در ریخته گری به کار می رود فرآیند ریخته گری تحت فشار^۱ است که توسط فرانک و داس^۲ [۷ و ۸] گزارش شده است. ریخته گری فشاری یکی از روش های ریخته گری بهبود یافته است که در تولید تجهیزات مهندسی به خصوص فلزات غیر آهنی کاربرد دارد. در این نوع ریخته گری قالب اغلب از جنس فولاد و فلز مورد نظر از جنس آلیاژ های آلومینیوم می باشد. با استفاده از این روش فلز مذاب ریخته گری در داخل محفظه قالب متراکم می شود که با

¹ - squeeze casting

² - Frank and Das

اعمال فشار عیوب حاصل از ایجاد حفره های انقباضی و منافذ گازی به میزان قابل قبولی حذف می شود [۹، ۱۰، ۱۱].
 اعمال ریخته گری فشاری با به کارگیری سرعت پایین پر شدن قالب، همراه با کمترین آشفتگی و فشار بالا، در تولید محصولات با کیفیت بالا به کار می رود. فشار اعمال شده نقش بسیار زیادی در کیفیت محصولات حاصل از این نوع ریخته گری دارد و در طول ریخته گری تا زمانی که فلز منجمد شود، اعمال می شود. بسیاری از محققین برتری ریخته گری فشاری را نسبت به ریخته گری های مرسوم دیگر به دلیل امکان اعمال تغییر در پارامترها گزارش داده اند. از جمله این پارامترها که به طور چشمگیری بر روی فرآورده های حاصل از ریخته گری فشاری تاثیر دارند عبارتند از: فشار اعمال شده، دمای ذوب و دمای قالب های پیش گرم شده [۱۲].

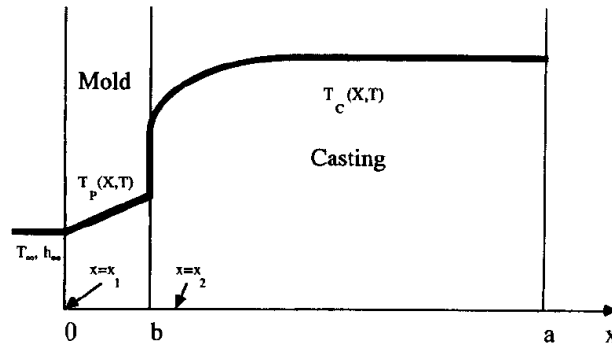
در اکثر پژوهش های انجام شده [۲، ۳ و ۵]، انتقال حرارت در مرز فلز مذاب و قالب را به صورت انتقال حرارت همرفت ($h_{interface}$) مدل کرده اند که سطح مشترک قالب و مذاب را با یک ضریب همرفت معادل کرده اند. شکل (۱-۴) این موضوع را به خوبی نشان می دهد [۱۳].



شکل ۱-۴ مدل سازی انتقال حرارت در مرز فلز- قالب [۱۳]

پروفیل تقریبی دما در فلز مذاب و قالب در شکل (۱-۵) نشان داده شده است [۱۴]. همانگونه که در شکل مشخص است، در مرز

قالب یک پرش دمایی وجود دارد که ناشی از ضریب انتقال حرارت همرفت می باشد و نکته دیگر نحوه توزیع دما در مذاب که تابعی غیر خطی (هدایت^۱ غیر خطی) از دما می باشد.

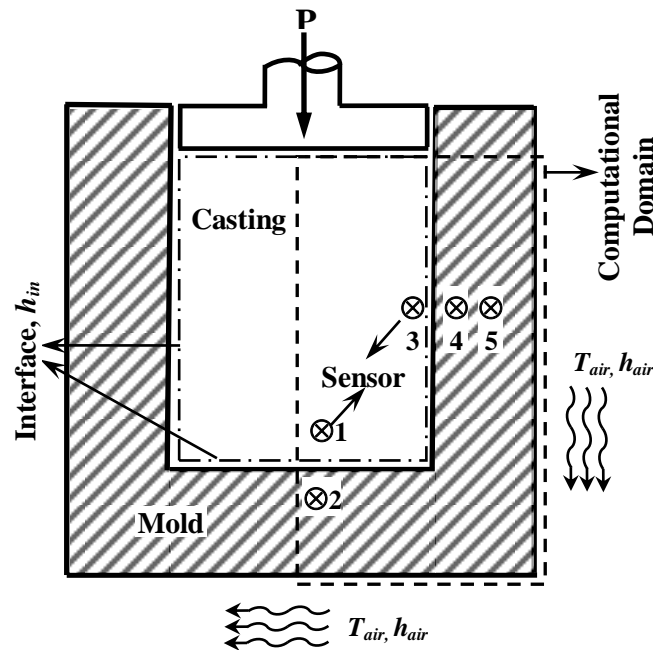


شکل (۵-۱) پروفیل تقریبی دما در فلز مذاب و قالب [۱۴]

در تحقیق حاضر، IHTC و تغییرات آن با زمان و ارتفاع قالب، در انجماد فشاری دو بعدی آلیاژ Al-4.5wt%Cu در قالب های فلزی، با فرض خواص حرارتی ثابت وابسته به دما، تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که مس و آلیاژهای آن به دلیل مقاومت نسبت به زنگ زدگی در بسیاری از صنایع ساختمانی، هواپیمایی، صنایع دریایی، صنایع نظامی و قطعات و ملخ هواپیما به کار می رود. در حل این مساله انتقال حرارت معکوس از تاریخچه دمایی شبیه سازی شده در نقاط داخلی فلز و قالب استفاده شده است. این مساله به دلیل وابستگی کلیه خواص حرارتی به دما، غیر خطی بودن شرایط مرزی و نیز تغییر فاز در داخل فلز ریخته گری، کاملاً^۲ غیر خطی است و از گروه مسائل بد خیم^۲ محسوب می شود. در شکل (۶-۱) مدل هندسی مسئله مورد بررسی در این تحقیق نشان داده شده است که در آن مذاب از سمت پایین و راست با قالب انتقال حرارت انجام می دهد، بنابراین فرآیند انجماد، دو بعدی در نظر گرفته می شود. در حالیکه قالب با محیط اطراف خود، دارای مرز جابجایی آزاد می باشد، فلز ریخته گری که در ابتدا دمایی بالاتر یا برابر با دمایی ذوب دارد از کانال مربوطه به داخل قالب که

¹-conduction
²-ill-posed

دمایی کمتر از دمایی ذوب فلز دارد، ریخته می‌شود و با اعمال فشار عیوب حاصل از ایجاد حفره‌های انقباضی و منافذ گازی به میزان قابل قبولی حذف می‌شود و قالب فلزی از سمت پایین با آب خنک می‌شود. تاریخچه دمایی با اندازه‌گیری توسط حسگرهای حرارتی در نقاط داخلی فلز و قالب بدست می‌آید.



شکل ۱-۶ مساله انجماد دو بعدی

برای کاهش زمان محاسبات و همچنین با توجه به تقارن مدل مورد بررسی، محیط محاسباتی نصف کل مدل در نظر گرفته شده است به صورتی که شامل هر دو بخش مذاب و قالب می‌باشد. هدف از این پژوهش تخمین ضرایب انتقال حرارت در هر دو مرز قالب-فلز می‌باشد. به این ترتیب که در ابتدا ضریب انتقال حرارت در هر دو مرز با چهار پارامتر مجهول و بار دیگر با شش پارامتر مجهول تخمین زده می‌شود. ضرایب انتقال حرارت مرزی یک بار به صورت تنها وابسته به زمان و بار دیگر به فرم وابسته به زمان و ارتفاع قالب تخمین زده می‌شود.