مکانیک دانشکده مهندسی

گروه مکانیک سیالات

کنترل سطح مشترک جامد–مایع در فرآیندهای انجماد با استفاده از روشهای انتقال حرارت معکوس

دانشجو : علی عباس نژاد

اساتید راهنما :

دکتر محمد جواد مغربی

دکتر حسن بصیرت تبریزی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

تیر ۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه رسساله دکتری آقای علی عباس نژاد

تحت عنوان: کنترل سطح مشترک جامد-مایع در فرآیندهای انجماد با استفاده از روشهای انتقال حرارت معکوس

در تاریخ **۸۹/۰۴/۲۸** توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک دکتری مورد ارزیابی و با درجه **عالی** مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : محمدجواد مغربی		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی : حسن بصیرت تبریزی		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی : داوود دومیری گنجی		نام و نام خانوادگی : سید مجید هاشمیان	
نام و نام خانوادگی : فرهاد طالبی			
نام و نام خانوادگی : محمدحسن کیهانی			
نام و نام خانوادگی : محمدمحسن شاه‌مردان			

تقدیم به

روان پاک پدرم، که به من درس زندگی آموخت

و

مادر مهربان و همسر فداکارم به پاس تمامی زحماتشان

و

دختر عزیزم به امید فردایی روشن

تقدیر و تشکر

پس از حمد، سپاس و ستایش خداوند لازم می دانم تقدیر و تشکر ویژه خود را از زحمات بی دریغ، تلاشهای بی وقفه و راهنمایی های ارزشمند اساتید گرامی جناب آقای دکتر مغربی و جناب آقای دکتر بصیرت تبریزی در راستای انجام این رساله ابراز دارم. همچنین بجاست از راهنمایی ها و همکاری های جناب آقای پروفسور ولفگانگ مارکوارت ریاست محترم انستیتوی تحقیقاتی مهندسی سیستمهای فرایندی دانشگاه RWTH آخن آلمان که امکان تحقیق و پژوهش اینجانب در انستیتوی مذکور را فراهم نمودند قدردانی نمایم. از اساتید بزرگوار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که افتخار شاگردی ایشان را داشته ام نیز صمیمانه سپاسگزارم. در انتها نیز از زحمات و حمایتهای پدر، مادر و همسر عزیزم که در طی دوران تحصیل، همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **علی عباس نژاد** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی** دانشکده **مکانیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله **کنترل سطح مشترک جامد-مایع در فرآیندهای انجماد با استفاده از روشهای انتقال حرارت معکوس** تحت راهنمایی **دکتر محمد جواد مغربی و دکتر حسن بصیرت تبریزی** متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه/رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچگونه مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه/رساله رعایت می‌گردد .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه/رساله ،در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه/رساله ،در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا از آن استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات شاخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و این مطلب باشد به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد .
- متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیرشده پایان نامه/رساله وجود داشته باشد .

چکیده

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی مانند ریخته گری و جوشکاری ، پدیـده انجمـاد رخ مـی دهـد. خـواص فیزیکی ماده منجمد شده در درشت مقیاس[1] به ساختار ماده در ریز مقیاس[2] وابسته است. ریز ساختارهای تشکیل شده در حین انجماد به عوامل متعددی از جمله نرخ سرد کردن ، گرادیان دمادر سـطح مـشترک جامد ـ مایع، تنش سطحی و سرعت سطح مشترک بستگی دارد.

برای اطمینان از کیفیت و قابلیت اطمینان ماده منجمد شده و برای دست یابی بـه مـاده ای بـا کیفیـت مورد نظر نیازمند به کنترل فرآیندهای انجماد هستیم . یکی از مهمترین پارامترهایی که بـر ریـز سـاختار ماده تشکیل شده تأثیر گذار است، سرعت سطح مشترک جامد ـ مایع در انجماد مواد خـالص و ضـخامت ناحیه دوفازی میانی[3] در انجماد آلیاژهاست. لذا کنترل دو پارامتر مذکور برای حصول قطعه ای با کیفیـت مورد نیاز در فرایندهای انجماد فلزات خالص و آلیاژها، هدف اصلی تحقیق حاضـر خواهـد بـود . بنـابراین محاسبه شرایط مرزی در سطوح قالب به گونه ای که منجر به دست یابی به سـرعت مطلـوب و همچنـین ضخامت ناحیه میانی شود امری ضروری خواهد بود که این مسأله در دسته مسائل معکوس حرارتی طبقه بندی می شود.

در اکثـر پژوهـشهای قبلـی کـه در زمینـه انتقـال حـرارت معکـوس و کـاربرد آن در مـساله انجمـاد آلیاژها(جوشکاری و ریخته گری) انجام شده، اثر ناحیه میانی لحاظ نشده است.

این ناحیه یک ناحیه دو فازی با خواص ترموفیزیکی متغیر بوده و وابسته به کسری از مـاده اسـت کـه بـه جامد تبدیل می شود. لذا در این رساله تلاش بر آن است که کنترل حرکت سـطح مـشترک جامـد-مـایع تحت حضور ناحیه میانی توسط روشهای انتقال حرارت معکوس صورت گیرد. در ایـن تحقیـق ابتـدا تـابع

[1] Macro scale
[2] Micro scale
[3] Mushy Zone

هدف بر مبنای اختلاف دمای بین دمای مطلوب و محاسبه شده در موقعیت مطلوب سطح مشترک تعریف شده و با استفاده از روش گرادیان مزدوج بهینه می شود.

جهت جلوگیری از حل معکوس در سه ناحیه موجود، از فرمول بندی آنتالپی استفاده شده است. صحت روش و کد کامپیوتری نوشته شده ابتدا توسط اعمال شار حرارتی معلوم و ثبت دما در نقاط مشخصی از دامنه محاسباتی تایید و سپس کد تایید شده برای کنترل سرعت و شکل سطح مشترک در مختصات یک و دو بعدی استفاده شده است.

نتایج به دست آمده نشانگر این مطلب است که با اعمال شار کنترلی به صورت همزمان در دو مرز، به راحتی می توان ضخامت و حتی شکل ناحیه میانی را کنترل نمود. شار حرارتی بدست آمده برای کنترل ضخامتهای ثابت و متغیر ناحیه میانی نشان داد که در سمت جامد همیشه سرمایش و در سمت مایع بسته به ضخامت ناحیه نیاز به گرمایش نیز وجود دارد. از آنجا که کیفیت آلیاژ تشکیل شده در حین فرآیند انجماد به شدت به ضخامت ناحیه میانی وابسته است، نتیجه می شود که می توان با استفاده از روش پیشنهادی در این رساله به آلیاژهایی با کیفیت و خواص مکانیکی مطلوب برای کاربردهای مشخص دست پیدا کرد.

بنا بر این رساله حاضر به عنوان یک کار تحقیقاتی دانشگاهی از اهمیت ویژه ای برخوردار است به نحوی که نتایج حاصل از آن می تواند در راستای رفع نیازهای صنایع مرتبط و بهبود کیفیت قطعات تولید شده مفید واقع شود.

مقالات مستخرج از رساله

1- "Optimal Operation of Alloy Material in Solidification Processes with Inverse Heat Transfer", International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 2010, 711-716.

2- "Effect of Sensor Locations on the Solution of Inverse Stefan Problems", Mechanika, 83(3), July 2010, 51-57.

3- "A High Order Time Advancement Scheme for Prediction of Solidification Processes", Defect and Diffusion Forum, Trans Tech Publications, Switzerland, 297-301, 2010, 779-784.

4- "Control of Interface Acceleration During Solidification Processes using Inverse Heat Transfer Methods", International Journal of Nonlinear Dynamics in Engineering and Science, In Press.

5- "Reconstruction of Time and Spatial dependent Boundary Heat Flux in 2D Solidification Problems", Presented at International Symposium on Computing in Science and Engineering, 3-5 June 2010, Kusadasi, Turkey.

فهرست مطالب **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مسائل معکوس حرارتی ۲

۱-۲- مسائل معکوس حرارتی همراه با تغییر فاز ۴

۱-۳- مروری بر پژوهشهای گذشته ۵

۱-۴- اهداف پایان نامه ۱۹

۱-۵- نوآوری های رساله ۲۰

فصل دوم: مقدمه ای بر انجماد

۲-۱- مقدمه ۲۳

۲-۲- بیان ریاضی معادلات حاکم ۲۴

۲-۲-۱-روش آنتالپی ۳۰

۲-۲-۲-بی بعدسازی معادلات حاکم به شکل آنتالپی ۳۳

۲-۲-۳-نحوه پیداکردن سطح مشترک ۳۵

فصل سوم: مسائل معکوس حرارتی

۳-۱- مقدمه ۳۹

۳-۲- تاریخچه مسائل معکوس حرارتی ۴۰

۳-۳- دسته بندی مسائل معکوس حرارتی ۴۲

۳-۴- حل مسائل معکوس حرارتی ۴۴

۳-۵- طبقه بندی روش ها ۴۴

۳-۶- ارزیابی روش های مسائل معکوس هدایت ۴۶

۳-۷- کاربرد روش های معکوس در مهندسی ۴۸

فصل چهارم: روشهای بهینه سازی توابع

۴-۱ مسائل بهینه سازی ۵۲

۴-۲ دسته بندی روش های بهینه سازی ۵۳

۴-۳ راه حل کلی ۵۴

۴-۴ نرخ همگرائی ۵۵

۴-۵ گرادیان تابع ۵۶

۴-۵-۱ محاسبه گرادیان ۵۸

۴-۵-۲ تعیین طول گام بهینه در جهت کاهش تابع ۵۹

۴-۶ معیار همگرائی ۶۰

۴-۷ روش کاهش سریع ۶۰

۴-۸ روش گرادیان مزدوج ۶۱

۴-۸-۱ جهت های مزدوج ۶۱

۴-۸-۲ شرح روش گرادیان مزدوج ۶۲

۴-۸-۳ الگوریتم روش گرادیان مزدوج ۶۳

۴-۸-۴ دسته بندی روش های گرادیان مزدوج ۶۵

۴-۹ روش نیوتن ۶۸

۴-۱۰ روش مارکارت- لونبرگ ۷۱

۴-۱۱ روش شبه نیوتن ۷۲

فصل پنجم: کنترل فرآیندهای انجماد با روش گرادیان مزدوج

۵-۱-معادلات حاکم بر مسأله مستقیم ۷۵

۵-۲-مسأله معکوس ۷۷

۵-۳-روش گرادیان مزدوج ۷۹

۵-۳-۱-معیار توقف ۸۱

۵-۳-۲-مسأله حساسیت ۸۲

۵-۳-۳-مسأله الحاقی ۸۳
۵-۳-۴-الگوریتم روش گرادیان مزدوج ۸۴
۵-۴-مطالعه معادلات حاکم در مختصات دو بعدی ۸۵
۵-۴-۱- مساله مستقیم ۸۶
۵-۴-۲- مساله حساسیت ۸۷
۵-۴-۳- مساله الحاقی ۸۷
۵-۴-۴-روش گرادیان مزدوج ۸۸
۵-۵-محاسبات عددی حل معادلات ۹۰
۵-۵-۱-محاسبه مشتقات مکانی ۹۱
۵-۵-۲-الگوی پیشروی در زمان ۹۷
۵-۵-۳- طرح ضمنی برای حل مساله معکوس انجماد آلیاژها ۹۸

فصل ششم: نتایج عددی

۶-۱- مقدمه ۱۰۲
۶-۲-انجماد موادخالص در حالت یک بعدی ۱۰۲
۶-۲-۱-اعمال شار مرزی معلوم و بازسازی آن ۱۰۲
۶-۲-۱-۱-بررسی استقلال از شبکه محاسباتی ۱۰۵
۶-۲-۱-۲-بررسی اثر حدس اولیه ۱۰۸
۶-۲-۱-۳-اثر موقعیت قرارگیری حسگرها ۱۱۱
۶-۲-۱-۴-بررسی اثر عدد استفان ۱۱۵
۶-۲-۱-۵-اثر میزان خطا در داده های ورودی ۱۱۷
۶-۲-۱-۶-اثر دمای اولیه مذاب ۱۲۲
۶-۲-۲-کنترل سرعت وشتاب سطح مشترک ۱۲۵
۶-۳-انجماد یک بعدی آلیاژها ۱۳۴
۶-۲-۱-۱-بررسی استقلال از شبکه محاسباتی ۱۳۶

۶-۲-۱-۳-اثر موقعیت قرارگیری حسگرها ۱۳۸
۶-۲-۱-۵-اثر میزان خطا در داده های ورودی ۱۴۱
۶-۲-۱-۵-اثر ترکیب و نوع آلیاژ ۱۴۵
۶-۲-۲-کنترل سرعت سطح مشترک ۱۴۷
۶-۴-انجماد مواد خالص و آلیاژها در حالت دو بعدی ۱۵۳

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱-نتیجه گیری ۱۷۴
۷-۲-پیشنهادات برای پژوهشهای آینده ۱۷۸

ضمیمه: ارزیابی دقت روش تفاضلات محدود فشرده

الف-۱- ارزیابی دقت روش رانگ کوتای مرتبه سوم فشرده ۱۸۱
الف-۲- مقایسه دقت روشهای تفاضلات محدود فشرده زمانی و مکانی ۱۸۲

مراجع ۱۸۴

فهرست شکل ها **صفحه**

شکل (۱-۱): ساختارهای مختلف سطح مشترک در گرادیان های مختلف دما ۵

شکل (۱-۲): انجماد تک جهتی به همراه جابجایی طبیعی ۱۰

شکل (۱-۳): هندسه مسأله و نواحی جامد و مایع به همراه شرایط مرزی ۱۴

شکل (۱-۴): هندسه و شماتیک دستگاه مورد استفاده ۱۵

شکل (۱-۵): اشکال سطح مشترک برای حالت ۱ (تخت) و حالت ۲ (سینوسی) ۱۷

شکل (۲-۱): نمایش هندسه و مختصات برای مساله الف)انجماد و ب)ذوب ۲۵

شکل (۲-۲): رابطه آنتالپی-دما برای (الف)موادخالص و (ب) آلیاژها ۳۱

شکل (۲-۳): روش مشخص کردن موقعیت مرز مشترک ۳۵

شکل (۴-۱): نمودار روند بهینه سازی تابع هدف ۵۵

شکل (۴-۲): جهت های سریع ترین افزایش ۵۷

شکل (۴-۳): مینیمم یک تابع درجه دوم در یک مرحله با روش نیوتن ۷۰

شکل (۵-۱): نمایش شماتیک مساله انجماد برای الف)ماد خالص و ب)آلیاژها ۷۶

شکل (۵-۲): نمایش شماتیک مساله انجماد در مختصات دو بعدی ۸۶

شکل (۵-۳): تقریب مشتق اول تابع $y = 2x + \cos(3x)$ ۹۳

شکل (۵-۴): مرتبه دقت برای مشتق مرتبه اول ۹۴

شکل (۵-۵): تقریب مشتق دوم تابع $y = 2x + \cos(3x)$ ۹۶

شکل (۵-۶): مرتبه دقت برای مشتق مرتبه دوم ۹۶

شکل (۶-۱): مقایسه شار حرارتی مطلوب و محاسبه شده ۱۰۴

شکل (۶-۲): الف) نرخ کاهش تابع هدف و ب) نرخ کاهش نرم گرادیان ۱۰۵

شکل (۶-۳): الف) شار حرارتی و ب) نرخ کاهش تابع هدف برای شبکه های متفاوت با شار مثلثی ۱۰۷

شکل (۶-۴): شار حرارتی و نرخ کاهش تابع هدف برای شبکه های متفاوت با شار پله ای ۱۰۸

شکل (۶-۵): نرخ کاهش تابع هدف برای شبکه های متفاوت با الف) شار مثلثی و ب)شار پله ای ۱۱۰

شکل (۶-۶): شار حرارتی برای حدسهای اولیه متفاوت با الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۱۱

شکل (۶-۷): دماهای ثبت شده در موقعیتهای متفاوت سنسور برای الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۱۳

شکل (۶-۸): شار حرارتی برای حسگرهای متفاوت با الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۱۴

شکل (۶-۹): شار حرارتی برای اعداد استفان متفاوت با الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۱۶
شکل (۶-۱۰): دماهای ثبت شده و اغتشاش یافته برای الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۱۸
شکل (۶-۱۱): شار حرارتی بدست آمده و مطلوب برای مقادیر متفاوت نوسانات ورودی الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۲۰
شکل (۶-۱۲): روند همگرایی تابع هدف برای مقادیر متفاوت نوسانات ورودی الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۲۱
شکل (۶-۱۳): شار حرارتی محاسبه شده و مطلوب برای مقادیر متفاوت توزیع دمای اولیه مذاب، الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۲۳
شکل (۶-۱۴): روند همگرایی تابع هدف برای مقادیر متفاوت توزیع دمای اولیه مذاب، الف) شار مثلثی و ب) شار پله ای ۱۲۴
شکل (۶-۱۵): روند همگرایی تابع هدف برای کنترل سرعت سطح مشترک ۱۲۶
شکل (۶-۱۶): کنترل سرعت سطح مشترک برای مواد خالص الف)مقایسه شار بدست آمده با سایر پژوهشها ب)مقایسه مکان سطح مشترک در دو حالت مطلوب و محاسبه شده ۱۲۷
شکل (۶-۱۷): موقعیت سطح مشترک برای مقادیر مختلف سرعت مرز مشترک ۱۲۸
شکل (۶-۱۸): مقایسه شار حرارتی تحلیلی و عددی برای $V=1$. ۱۲۹
شکل (۶-۱۹): مقایسه شار حرارتی تحلیلی و عددی برای مواد با خواص فیزیکی (عدد استفان) متفاوت ۱۳۰
شکل (۶-۲۰): مقایسه موقعیت مطلوب و کنترل شده سطح مشترک برای مواد خالص با خواص فیزیکی (عدد استفان) متفاوت ۱۳۰
شکل (۶-۲۱): مقایسه مکانهای مطلوب و محاسبه شده سطح مشترک برای مقادیر مختلف شتاب سطح مشترک ۱۳۲
شکل (۶-۲۲): مقایسه شار حرارتی بدست آمده برای مقادیر مختلف شتاب سطح مشترک ۱۳۳
شکل (۶-۲۳): مقایسه نرخ همگرایی تابع هدف برای مقادیر مختلف شتاب سطح مشترک ۱۳۳
شکل (۶-۲۴): مقایسه شار حرارتی مثلثی برای اندازه های مختلف شبکه محاسباتی ۱۳۷
شکل (۶-۲۵): نرخ همگرایی تابع هدف برای مقادیر مختلف اندازه شبکه محاسباتی ۱۳۷
شکل (۶-۲۶): مقایسه شار حرارتی بدست آمده و مطلوب برای موقعیتهای مختلف حسگر، الف)شار مثلثی ب)شار پله ای ۱۳۹
شکل (۶-۲۷): مقایسه روند همگرایی تابع هدف برای موقعیتهای مختلف حسگر، الف)شار مثلثی ب)شار ۱۴۰

پله ای
شکل (۶-۲۸): نمونه ای از دماهای اندازه گیری شده و اغتشاش یافته، الف)شار مثلثی ب)شار پله ای ۱۴۲
شکل (۶-۲۹): شار حرارتی مطلوب و محاسبه شده برای مقادیر مختلف اغتشاش در داده های ورودی، الف)شار مثلثی ب)شار پله ای ۱۴۳
شکل (۶-۳۰): نرخ کاهش تابع هدف برای مقادیر مختلف اغتشاش در داده های ورودی، الف)شار مثلثی ب)شار پله ای ۱۴۴
شکل (۶-۳۱): مکان مطلوب و محاسبه شده سطوح مشترک برای مقادیر متفاوت اغتشاشات ورودی و شار حرارتی پله ای ۱۴۵
شکل (۶-۳۲): مقایسه شار حرارتی مطلوب و محاسبه شده برای آلیاژ Al-Cu ۱۴۶
شکل (۶-۳۳): مقایسه مکان مطلوب و محاسبه شده سطوح مشترک برای Al-Cu ۱۴۷
شکل (۶-۳۴): مقایسه الف) شار حرارتی در دو مرز، ب) مکانهای مطلوب و کنترل شده سطوح مشترک و ج) نرخ کاهش تابع هدف برای $V_l = 2, V_s = 0.5$ ۱۴۹
شکل (۶-۳۵): مقایسه الف) شار حرارتی در دو مرز، ب) مکانهای مطلوب و کنترل شده سطوح مشترک و ج) نرخ کاهش تابع هدف برای $V_l = 2, V_s = 1$ ۱۵۰
شکل (۶-۳۶): مقایسه الف) شار حرارتی در دو مرز، ب) مکانهای مطلوب و کنترل شده سطوح مشترک و ج) نرخ کاهش تابع هدف برای $V_l = 2, V_s = 1.25$ ۱۵۱
شکل (۶-۳۷): مقایسه الف) شار حرارتی در دو مرز، ب) مکانهای مطلوب و کنترل شده سطوح مشترک و ج) نرخ کاهش تابع هدف برای $V_l = 2, V_s = 2$ ۱۵۲
شکل (۶-۳۸): مقایسه شار حرارتی در مرزهای پایینی و بالایی برای ضخامتهای مختلف ناحیه میانی ۱۵۳
شکل (۶-۳۹): مقایسه بین الف)شار حرارتی اعمال شده برای تولید داده ها و ب) شار محاسبه شده از حل معکوس ۱۵۵
شکل (۶-۴۰): مقایسه شار حرارتی محاسبه شده و مطلوب در زمانها و مکانهای مختلف ۱۵۶
شکل (۶-۴۱): مقایسه بین کانتورهای شار حرارتی الف) مطلوب، ب) محاسبه شده ۱۵۶
شکل (۶-۴۲): مکانهای مطلوب و محاسبه شده سطح مشترک در مختصات دو بعدی ۱۵۶
شکل (۶-۴۳): نرخ کاهش تابع هدف برای مختصات دو بعدی و شار حرارتی رابطه (۶-۱۰) ۱۵۷
شکل (۶-۴۴): مقایسه بین شار حرارتی محاسبه شده الف) $Ste = 1$ ب) $Ste = 1.5$ ۱۵۷
شکل (۶-۴۵): مکانهای مطلوب و محاسبه شده سطح مشترک برای $Ste = 1$ ۱۵۸

شکل (۶-۴۶): مقایسه بین کانتورهای دما در حالت مطلوب و محاسبه شده برای $Ste = 0.5$ ۱۵۹
شکل (۶-۴۷): مقایسه بین کانتورهای دما در حالت مطلوب و محاسبه شده برای $Ste = 1$ ۱۶۰
شکل (۶-۴۸): شار حرارتی محاسبه شده در مختصات دو بعدی برای سرعت ثابت سطح مشترک
الف) $Ste = 0.5$ ب) $Ste = 1.5$ ۱۶۱
شکل (۶-۴۹): مکانهای مطلوب و محاسبه شده در مختصات دو بعدی برای سرعت ثابت سطح مشترک
الف) $Ste = 0.5$ ب) $Ste = 1.5$ ۱۶۱
شکل (۶-۵۰): مقایسه کانتورهای دما برای سرعت ثابت سطح مشترک و اعداد استفان مختلف ۱۶۲
شکل (۶-۵۱): شار حرارتی محاسبه شده در مختصات دو بعدی و سرعت سطح مشترک طبق رابطه
(۶-۱۳) ۱۶۳
شکل (۶-۵۲): مکانهای مطلوب و محاسبه شده سطح مشترک در مختصات دو بعدی و سرعت سطح
مشترک سینوسی ۱۶۳
شکل (۶-۵۳): کانتورهای دما برای شکل سینوسی سطوح مشترک مواد خالص ۱۶۴
شکل (۶-۵۴): نرخ کاهش تابع هدف در مختصات دو بعدی و سرعت سطح مشترک طبق رابطه(۶-۱۳) ۱۶۵
شکل (۶-۵۵): شار حرارتی محاسبه شده برای آلیاژها در مختصات دو بعدی و سرعت ثابت سطوح
مشترک الف) شار در مرز پایینی ب) شار در مرز بالایی ۱۶۶
شکل (۶-۵۶): مکانهای مطلوب و محاسبه شده سطوح مشترک برای آلیاژها در مختصات دو بعدی و
سرعت ثابت سطوح مشترک ۱۶۷
شکل (۶-۵۷): کانتورهای دما برای سرعت ثابت سطوح مشترک آلیاژها ۱۶۸
شکل (۶-۵۸): نرخ کاهش تابع هدف برای آلیاژها در مختصات دو بعدی و سرعت ثابت سطوح مشترک ۱۶۹
شکل (۶-۵۹): شار حرارتی محاسبه شده برای آلیاژها در مختصات دو بعدی و شکل سینوسی سطوح
مشترک الف) شار در مرز پایینی ب) شار در مرز بالایی ۱۷۰
شکل (۶-۶۰): مکانهای مطلوب و محاسبه شده سطوح مشترک برای آلیاژها در مختصات دو بعدی و
شکل سینوسی سطوح مشترک ۱۷۱
شکل (۶-۶۱): کانتورهای دما برای شکل سینوسی سطوح مشترک آلیاژها ۱۷۲
شکل (الف-۱): مقایسه بین نتایج عددی حاصل از روش رانج کوتا و حل دقیق تابع مدل ۱۸۲
شکل (الف-۲): مرتبه دقت طرح پیشروی زمانی برای معادله مدل ۱۸۲
شکل (الف-۳): مقایسه خطای حاصل از روش تفاضل محدود فشرده و روش FTCS برای معادله مدل ۱۸۳

فهرست جداول

صفحه

جدول (۱-۱): خلاصه پژوهشهای گذشته و مقایسه با رساله حاضر ۲۱

جدول (۴-۱): دسته بندی روشهای بهینه سازی ۵۴

جدول (۵-۱): طرح پیشروی زمانی رانج کوتای مرتبه سوم ۹۷

جدول (۶-۱): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز برای شبکه های مختلف ۱۰۶

جدول (۶-۲): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز برای حدسهای اولیه متفاوت ۱۰۹

جدول (۶-۳): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز برای مکانهای حسگر متفاوت ۱۱۲

جدول (۶-۴): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز برای اعداد استفان مختلف ۱۱۵

جدول (۶-۵): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز در حالت اغتشاش داده های ورودی ۱۱۹

جدول (۶-۶): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز برای دماهای اولیه متفاوت ۱۲۲

جدول (۶-۷): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز در کنترل سرعت برای اعداد استفان متفاوت ۱۳۱

جدول (۶-۸): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز در کنترل سرعت برای سرعتهای مختلف ۱۳۱

جدول (۶-۹): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز در کنترل شتابهای مختلف ۱۳۲

جدول (۶-۱۰): خواص ترموفیزیکی آلیاژهای استفاده شده ۱۳۵

جدول (۶-۱۱): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای لازم در انجماد آلیاژها برای شبکه های مختلف ۱۳۸

جدول (۶-۱۲): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای لازم در انجماد آلیاژها برای موقعیتهای مختلف حسگرها ۱۳۸

جدول (۶-۱۳): مقادیر تابع هدف، متوسط خطا و تکرارهای مورد نیاز در انجماد آلیاژها در حضور اغتشاش در دادهای ورودی ۱۴۵

جدول (۶-۱۴): مقادیر تابع هدف و متوسط خطا در انجماد آلیاژ آلومینیوم و برای موقعیتهای مختلف قرارگیری حسگرها ۱۴۶

جدول (۶-۱۵): مقادیر تابع هدف و متوسط خطا در کنترل سرعت سطح مشترک آلیاژها و برای سرعتهای مختلف ۱۵۳

جدول (الف-۱): طرح پیشروی زمانی رانج کوتای مرتبه سوم در یک گام زمانی ۱۸۱

فهرست علائم

a	شتاب سطح مشترک
b	طول قالب در جهت y
c	ظرفیت گرمایی ویژه
d	طول قالب در جهت x
d^k	جهت کاهش
e_{RMS}	خطای RMS
f_s	نسبت جامد
G	گرادیان دمای سطح مشترک
H	آنتالپی
k	ضریب هدایت حرارتی
L	گرمای نهان
M	تعداد بازه های زمانی
N	تعداد بازه های زمانی
q	شار حرارتی
q_s	شار حرارتی سمت جامد
q_l	شار حرارتی سمت مایع
$S[q]$	تابع هدف
$s(t)$	موقعیت سطح مشترک
Ste	عدد استفان
T	دما
T_f	دمای ذوب
T_{sol}	دمای سالیدوس
T_{liq}	دمای لیکیدوس
T_i	دمای اولیه
T_0	دمای مرجع

t	زمان
t_f	زمان نهایی
V	سرعت سطح مشترک
V_s	سرعت سطح مشترک سالیدوس
V_l	سرعت سطح مشترک لیکیدوس
Y	دمای اندازه گیری شده

علائم یونانی

ρ	چگالی
ε	مقدار کوچک
α	ضریب نفوذ حرارتی
$\nabla S[q]$	گرادیان تابع هدف
γ	ضریب مزدوج
β	گام جستجو
ΔT	متغیر حساسیت
λ	ضریب لاگرانژ (متغیر الحاقی)
σ	انحراف معیار داده های اندازه گیری شده
$\delta(.)$	تابع دیراک دلتا
Γ_s	سطح مشترک سالیدوس
Γ_l	سطح مشترک لیکیدوس
ω	خطای اندازه گیری