بسم الله الرحمن الرحيم

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانس ها و یا سخنرانی ها، باید نام دانشگاه بوعلی (یا استاد یا اساتید راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر ماخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان:

شبیه سازی دوبعدی کامپیوتری فرآیند گرمای القایی

استاد راهنما:

دکتر محمد حسین توکلی

استاد مشاور:

دکتر فریدون سموات

پژوهشگر:

حسین کرباسچی

فروردین ۱۳۸۹

دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک
گرایش حالت جامد

عنوان:

شبیه سازی دوبعدی کامپیوتری فرآیند گرمای القایی

استاد راهنما:
دکتر محمد حسین توکلی

پژوهشگر:
حسین کرباسچی

کمیته ارزیابی پایان نامه

۱- استاد راهنما: **دکتر محمد حسین توکلی**.....استادیار فیزیک

۲- استاد مشاور: **دکتر فریدون سموات**.....استادیار فیزیک

۳- استاد مدعو: **دکتر صفدر حبیبی**.....استادیار فیزیک

۴- استاد مدعو: **دکتر داود رئوفی**..... استادیار فیزیک

دانشکده علوم

گروه فیزیک

جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

حسین کرباسچی در رشته فیزیک (گرایش حالت جامد)

تحت عنوان:
شبیه سازی دوبعدی کامپیوتری فرآیند گرمای القایی

به ارزش ۶ واحد در روز چهارشنبه مورخ ۱۳۸۹/۱/۲۵ ساعت۱۲-۱۰:۳۰ در محل آمفی تئاتر۱ و با حضور اعضای هیأت داوران زیر برگزار گردید و با نمره ۲۰ درجه عالی ارزیابی شد.

ترکیب اعضای هیأت داوران:

ردیف	سمت در هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی ـ گروه/ دانشکده/ دانشگاه	محل امضاء
۱.	استاد راهنما	دکتر محمد حسین توکلی	استادیار-فیزیک/ علوم/ بوعلی سینا	
۲.	استاد مشاور	دکتر فریدون سموات	استادیار-فیزیک/ علوم/ بوعلی سینا	
۳.	استاد مدعو	دکتر صفدر حبیبی	استادیار-فیزیک/ علوم/ بوعلی سینا	
۴.	استاد مدعو	دکتر داود رئوفی	استادیار-فیزیک/ علوم/ بوعلی سینا	

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان،

بـــه پـــاس عاطفـــه سرشـــار و گرمـــای امیـــدبخش وجودشـــان کـــه در ایـــن ســـردترین روزگـــاران بهتـــرین پشتیبان است،

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت‌می‌گراید،

و به پاس محبت های بی دریغ‌شان که هرگز فروکش نمی‌کند:

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

خداوندا همه ستایش ها از آن توست،

اکنون که با استعانت از درگاه ایزد منان گامی دیگر از زندگی‌ام را پشت سر نهاده‌ام با خضوع و افتادگی تمام، برخود لازم می‌دانم مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خویش را تقدیم به همه کسانی کنم که در این پژوهش مرا یاری نمودند.

نگارنده بر خود می‌داند که از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی جناب آقای دکترمحمد حسین توکلی و جناب آقای دکتر فریدون سموات در راستای انجام این پایان نامه تشکر و قدردانی نماید. بدون شک علم آموزی در محضر این دو استاد از ارزشمندترین تجارب من در طول زندگی‌ام خواهد بود.

همچنین از داوران ارجمند آقایان دکتر صفدر حبیبی و داود رئوفی که زحمت داوری پایان نامه را تقبل نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایم. از مساعدت و لطف نماینده محترم تحصیلات تکمیلی خانم دکتر ایزدی کیان نیز سپاسگزارم. از تمامی اساتید محترم گروه فیزیک به خاطر آموزش و راهنمایی‌های مفیدشان در طی دوران تحصیل اینجانب کمال تشکر را دارم.

از تمامی دوستان و همکلاسی‌های مهربانم به خاطر کمک در انجام پایان نامه و همدلی‌هایشان سپاسگزارم و برای تمامی این عزیزان و تمامی کسانی که در به ثمر نشاندن این اثر بنده را یاری نموده‌اند آرزوی سربلندی و موفقیت می‌کنم.

دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان:

شبیه سازی کامپیوتری دوبعدی فرآیند گرمای القایی

نام نویسنده: حسین کرباسچی

نام استاد/اساتید راهنما: دکتر محمد حسین توکلی

نام استاد/اساتید مشاور: دکتر فریدون سموات

دانشکده : علوم پایه	**گروه آموزشی: فیزیک**	
رشته تحصیلی: فیزیک	**گرایش تحصیلی: حالت جامد**	**مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد**
تاریخ تصویب:	**تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۱/۲۵**	**تعداد صفحات: ۱۵۰**

چکیده:

گرمای القایی یکی از پرکاربردترین فرآیندها در عملیات حرارتی است. این فرآیند دارای مزیت‌های زیادی است که از جمله می‌توان از: پاک، سریع، بازده بالا و کنترل خودکار نام برد. از این فرآیند در گرمادهی به طور مستقیم در گستره زیادی از مواد رسانا استفاده می‌شود که می‌توان به جامد رسانا (فلزات)، مایع رسانا(مذاب فلزات و الکترولیت‌ها) و گازهای رسانا (پلاسما) اشاره کرد. به علاوه در روش غیرمستقیم می‌توان گرما را در یک بوته رسانا ایجاد نمود و سپس گرما را به روشهای مختلف انتقال گرما به ماده مورد نظر انتقال داد. گرمای القایی ترکیب پیچیده‌ای از الکترومغناطیس، انتقال گرما و پدیده‌های متالوژیکی است. در این پایان نامه قسمت الکترومغناطیسی این فرآیند مطالعه شده است. بدین منظور در ابتدا یک مدل ریاضی برای این فرآیند شرح داده شده است. در مرحله بعد برای بررسی صحت این مدل، شرایط مرزی معادلات ماکسول روی سطوح پیکربندی سیستم محاسبه می‌گردد. در مراحل بعدی نیز پارامترهای مختلف سیستم از جمله چگالی جریان القایی و گرمای القایی، برای یک پیکربندی نمونه محاسبه می‌شود. در نهایت تاثیر تغییر برخی پارامترهای سیستم از جمله ضخامت و ارتفاع قطعه‌کار و فرکانس جریان ورودی در این فرآیند بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: گرمای القایی، چگالی جریان القایی، عملیات گرمایی، الکترومغناطیس.

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۴-۱، مقادیر رسانندگی الکتریکی در بخش ۴-۱. ..... ۸۷

جدول ۴-۲، پارامترهای مورد استفاده برای محاسبات در بخش ۴-۱. ..... ۸۷

جدول ۴-۳، اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در بخش ۴-۱. ..... ۹۴

جدول ۴-۴، پارامترهای مورد استفاده برای محاسبات در بخش ۴-۲. ..... ۹۷

جدول ۴-۵، اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در قطعه‌کارهای فرض شده در بخش ۴-۲. ..... ۱۰۷

جدول ۴-۶، پارامترهای مورد استفاده برای محاسبات در بخش ۴-۳. ..... ۱۱۰

جدول ۴-۷، اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در قطعه‌کارهای مختلف فرض شده در بخش ۴-۳. ..... ۱۲۰

جدول ۴-۸، پارامترهای مورد استفاده برای محاسبات در بخش ۴-۴. ..... ۱۲۴

جدول ۴-۹، مقادیر رسانندگی الکتریکی در بخش ۴-۵. ..... ۱۳۸

جدول ۴-۱۰، پارامترهای مورد استفاده برای محاسبات در بخش ۴-۵. ..... ۱۳۹

جدول ۴-۱۱، اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده و بازده در قسمت‌های مختلف سیستم رشد بلور فرض شده در بخش ۴-۵ برای فرکانس‌های مختلف. ۱۴۸

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱، عناصر اصلی در فرآیند گرمای القایی. ۶

شکل ۱-۲، مقایسه توزیع جریان بر حسب فرکانس در سطح مقطع یک رسانا. ۹

شکل ۱-۳، نمونه هایی از پیچه های القایی برای شکل های مختلف قطعه کار. ۱۲

شکل ۱-۴، نمونه هایی از پیچه های القایی مورد استفاده در سخت شدگی القایی. ۱۳

شکل ۱-۵، سطح مقطع های مختلف پیچه. ۱۳

شکل ۱-۶، مقایسه زمان مورد نیاز برای گرمادهی در کوره های القایی و کوره‌های سوخت گاز بر حسب تابعی از زمان ۱۵

شکل ۱-۷، نمایی از یک کوره القایی. ۱۸

شکل ۱-۸، لحیم کاری القایی. ۲۰

شکل ۱-۹، نمایی از یک سیستم پخت القایی. ۲۱

شکل ۱-۱۰، سیستم رشد بلور چکرالسکی. ۲۲

شکل ۱-۱۱، مقایسه بین زمان مورد نیاز برای به جوش آوردن یک لیتر آب توسط روش‌های مختلف. ۲۳

شکل ۱-۱۲، عدم آسیب رسانی به پوست در زمان تماس با اجاق القایی. ۲۴

شکل ۲-۱، مش بندی برای حل یک مسئله میدان مغناطیسی. مش در اطراف جسم مورد مطالعه دارای چگالی بیشتری است. ۴۱

شکل ۲-۲، حل دو بعدی مسئله میدان مغناطیسی به کمک روش عناصر متناهی با استفاده از مش بندی شکل ۲-۱. ..... ۴۲

شکل ۲-۳، نمایی از محیط نرم‌افزار FlexPDE ۵۰

شکل ۲-۴، نمونه‌هایی از خروجی‌های گرافیکی نرم‌افزار FlexPDE ۵۱

شکل ۳-۱، نمایی از سیستم مفروض در بخش ۳-۱ و مرزهایی که شرایط مرزی روی آنها بررسی شده است. ۵۸

شکل ۳-۲، مولفه عمودی E روی سطح ۱ در زمان $t = {T}/{4}$. ۵۹

شکل ۳-۳، مولفه عمودی E روی سطح ۱ در زمان $t = {3T}/{8}$. ۵۹

شکل ۳-۴، مولفه عمودی E روی سطح ۱ در زمان $t = {5T}/{8}$. ۶۰

شکل ۳-۵، مولفه عمودی E روی سطح ۱ در زمان $t = {3T}/{4}$. ۶۰

شکل ۳-۶، مولفه مماسی E روی سطح ۱ در تمام زمان‌ها ۶۱

شکل ۳-۷، مولفه عمودی B روی سطح ۱ در زمان $t = {T}/{2}$. ۶۱

شکل ۳-۸، مولفه عمودی B روی سطح ۱ در زمان $t = {3T}/{4}$. ۶۲

شکل ۳-۹، مولفه عمودی B روی سطح ۱ در زمان $t = {4T}/{5}$. ۶۲

شکل ۳-۱۰، مولفه عمودی B روی سطح ۱ در زمان $t = T$. ۶۳

شکل ۳-۱۱، مولفه مماسی B روی سطح ۱ در زمان $t = {3T}/{8}$. ۶۳
شکل ۳-۱۲، مولفه مماسی B روی سطح ۱ در زمان $t = {T}/{2}$. ۶۴
شکل ۳-۱۳، مولفه مماسی B روی سطح ۱ در زمان $t = {5T}/{8}$. ۶۴
شکل ۳-۱۴، مولفه مماسی B روی سطح ۱ در زمان $t = {3T}/{4}$. ۶۵
شکل ۳-۱۵، مولفه عمودی E روی سطح ۲ در زمان $t = {5T}/{8}$. ۶۵
شکل ۳-۱۶، مولفه عمودی E روی سطح ۲ در زمان $t = {3T}/{4}$. ۶۶
شکل ۳-۱۷، مولفه عمودی E روی سطح ۲ در زمان $t = {7T}/{8}$. ۶۶
شکل ۳-۱۵، مولفه عمودی E روی سطح ۲ در زمان $t = T$. ۶۷
شکل ۳-۱۹، مولفه مماسی E روی سطح ۲ در تمام زمان‌ها. ۶۷
شکل ۳-۲۰، مولفه عمودی B روی سطح ۲ در زمان $t = {T}/{2}$. ۶۸
شکل ۳-۲۱، مولفه عمودی B روی سطح ۲ در زمان $t = {5T}/{8}$. ۶۸
شکل ۳-۲۲، مولفه عمودی B روی سطح ۲ در زمان $t = {3T}/{4}$. ۶۹
شکل ۳-۲۳، مولفه عمودی B روی سطح ۲ در زمان $t = T$. ۶۹

شکل ۳-۲۴، مولفه مماسی B روی سطح ۲ در زمان $t = {}^{5T}/_{8}$. ۷۰
شکل ۳-۲۵، مولفه مماسی B روی سطح ۲ در زمان $t = {}^{3T}/_{4}$. ۷۰
شکل ۳-۲۶، مولفه مماسی B روی سطح ۲ در زمان $t = {}^{7T}/_{8}$. ۷۱
شکل ۳-۲۷، مولفه مماسی B روی سطح ۲ در زمان $t = T$. ۷۱
شکل ۳-۲۸، مولفه عمودی E روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{T}/_{4}$. ۷۲
شکل ۳-۲۹، مولفه عمودی E روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{3T}/_{8}$. ۷۲
شکل ۳-۳۰، مولفه عمودی E روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{5T}/_{8}$. ۷۳
شکل ۳-۳۱، مولفه عمودی E روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{3T}/_{4}$. ۷۳
شکل ۳-۳۲، مولفه مماسی E روی سطح ۳ در تمام زمان‌ها. ۷۴
شکل ۳-۳۳، مولفه عمودی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{3T}/_{8}$. ۷۴
شکل ۳-۳۴، مولفه عمودی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{T}/_{2}$. ۷۵
شکل ۳-۳۵، مولفه عمودی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{5T}/_{8}$. ۷۵
شکل ۳-۳۶، مولفه عمودی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{7T}/_{8}$. ۷۶

شکل ۳-۳۷، مولفه مماسی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{3T}/_{8}$. ۷۶
شکل ۳-۳۸، مولفه مماسی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{T}/_{2}$. ۷۷
شکل ۳-۳۹، مولفه مماسی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{5T}/_{8}$. ۷۷
شکل ۳-۴۰، مولفه مماسی B روی سطح ۳ در زمان $t = {}^{7T}/_{8}$. ۷۸
شکل ۳-۴۱، مولفه عمودی E روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{T}/_{4}$. ۷۸
شکل ۳-۴۲، مولفه عمودی E روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{5T}/_{8}$. ۷۹
شکل ۳-۴۳، مولفه عمودی E روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{3T}/_{4}$. ۷۹
شکل ۳-۴۳، مولفه عمودی E روی سطح ۴ در زمان $t = T$. ۸۰
شکل ۳-۴۵، مولفه مماسی E روی سطح ۴ درتمام زمان‌ها. ۸۰
شکل ۳-۴۶، مولفه عمودی B روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{T}/_{2}$. ۸۱
شکل ۳-۴۷، مولفه عمودی B روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{5T}/_{8}$. ۸۱
شکل ۳-۴۸، مولفه عمودی B روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{3T}/_{4}$. ۸۲
شکل ۳-۴۹، مولفه عمودی B روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{7T}/_{8}$. ۸۲

شکل ۳-۵۰، مولفه مماسی B روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{\mathrm{T}}/_{2}$. ۸۳

شکل ۳-۵۱، مولفه مماسی B روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{5\mathrm{T}}/_{8}$. ۸۳

شکل ۳-۵۲، مولفه مماسی B روی سطح ۴ در زمان $t = {}^{3\mathrm{T}}/_{4}$. ۸۴

شکل ۳-۵۳، مولفه مماسی B روی سطح ۴ در زمان $t = \mathrm{T}$. ۸۴

شکل ۴-۱، نمایی از سیستم گرمای القایی فرض شده در بخش۴-۱. ..... ۸۶

شکل ۴-۲، شبکه بکار رفته در روش عناصر متناهی در فضایی که محاسبات انجام شده است. ۸۸

شکل ۴-۳، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_{B}) محاسبه شده برای سیستم فرض شده در بخش ۴-۱، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۸۹

شکل ۴-۴، نمودار شعاعی از دو مولفه تابع جریان مغناطیسی در وسط قطعه‌کار فرض شده در بخش ۴-۱. ..... ۹۰

شکل ۴-۵، توزیع مولفه های چگالی جریان القایی در قطعه‌کار رسانای الکتریکی فرض شده در بخش ۴-۱. مولفه همفاز J_{C} در سمت راست و مولفه ناهمفاز J_{S} در سمت چپ قابل مشاهده است. ۹۱

شکل ۴-۶، نمودار شعاعی از دو مولفه چگالی جریان القایی در وسط قطعه‌کار فرض شده در بخش ۴-۱. ..... ۹۲

شکل ۴-۷، توزیع گرما در داخل قطعه‌کار و پیچه فرض شده در بخش ۴-۱. ..... ۹۳

شکل ۴-۸، توزیع گرما روی سطح خارجی قطعه‌کار فرض شده در بخش ۴-۱. ..... ۹۴

شکل ۴-۹، نمایی از سیستم گرمای القایی فرض شده در بخش۴-۲. ..... ۹۶

شکل ۴-۱۰، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای قطعه‌کار ۲ میلی متری و سیستم فرض شده در بخش ۴-۲، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۹۹

شکل ۴-۱۱، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای قطعه‌کار ۵ میلی متری و سیستم فرض شده در بخش ۴-۲، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۰۰

شکل ۴-۱۲، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای قطعه‌کار ۱۰ میلی متری و سیستم فرض شده در بخش ۴-۲، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۰۰

شکل ۴-۱۳، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای قطعه‌کار ۵۵ میلی متری و سیستم فرض شده در بخش ۴-۲، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۰۱

شکل ۴-۱۴، مولفه همفاز چگالی جریان القایی در داخل قطعه‌کارهای فرض شده در بخش ۴-۲ با ضخامت‌های (a) ۲میلی متر، (b) ۵ میلی متر، (c) ۱۰ میلی متر و (d) ۵۵ میلی متر. ۱۰۲

شکل ۴-۱۵، مولفه ناهمفاز چگالی جریان القایی در داخل قطعه‌کارهای فرض شده در بخش ۴-۲ با ضخامت‌های (a) ۲ میلی متر، (b) ۵ میلی متر، (c) ۱۰ میلی متر و (d) ۵۵ میلی متر. ۱۰۳

شکل ۴-۱۶، نموداری شعاعی از دو مولفه چگالی جریان القایی در وسط قطعه‌کار ۵۵ میلی متری فرض شده در بخش ۴-۲. ..... ۱۰۴

شکل ۴-۱۷، توزیع گرما در داخل قطعه‌کارهای فرض شده در بخش ۴-۲ با ضخامت-های (a) ۲ میلی متر، (b) ۵ میلی متر، (c) ۱۰ میلی متر و (d) ۵۵ میلی متر. ۱۰۶

شکل ۴-۱۸، نمودار توزیع گرما روی سطح خارجی قطعه‌کارهای فرض شده در بخش ۴-۲. ..... ۱۰۷

شکل ۴-۱۹، نمایی از سیستم گرمای القایی فرض شده در بخش۴-۳. ..... ۱۰۹

شکل ۴-۲۰، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای سیستم فرض شده در بخش ۴-۳ با قطعه‌کاری به ارتفاع نصف ارتفاع پیچه، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۱۱

شکل ۴-۲۱، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای سیستم فرض شده در بخش ۴-۳ با قطعه‌کار به ارتفاع ۱/۱۷ برابر ارتفاع پیچه، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۱۲

شکل ۴-۲۲، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای سیستم فرض شده در بخش ۴-۳ با قطعه‌کاری به ارتفاع ۲ برابر ارتفاع پیچه، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۱۳

شکل ۴-۲۳، توزیع مولفه های چگالی جریان القایی در قطعه‌کارهای رسانای الکتریکی فرض شده در بخش ۴-۳ با ارتفاع های (a) نصف ارتفاع پیچه، (b) ۱/۱۷ برابر ارتفاع پیچه و (c) ۲ برابر ارتفاع پیچه. مولفه همفاز J_C در سمت راست و مولفه ناهمفاز J_S در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۱۵

شکل ۴-۲۴، نموداری شعاعی از دو مولفه چگالی جریان القایی در وسط قطعه‌کار فرض شده در بخش ۴-۳. ..... ۱۱۶

شکل ۴-۲۵، توزیع گرما در قطعه‌کارهای رسانای الکتریکی فرض شده در بخش ۴-۳ با ارتفاع های (a) نصف ارتفاع پیچه، (b) ۱/۱۷ برابر ارتفاع پیچه و (c) ۲ برابر ارتفاع پیچه. ۱۱۷

شکل ۴-۲۶، توزیع گرما در پیچه القایی فرض شده در بخش ۴-۳. ..... ۱۱۸

شکل ۴-۲۷، توزیع گرما روی سطح خارجی دیواره قطعه‌کارهای رسانای الکتریکی فرض شده در بخش ۴-۳ با ارتفاع های (a) نصف ارتفاع پیچه، (b) ۱/۱۷ برابر ارتفاع پیچه و (c) ۲ برابر ارتفاع پیچه. ۱۱۹

شکل ۴-۲۸، نمایی از سیستم گرمای القایی فرض شده در بخش۴-۴. ..... ۱۲۵

شکل ۴-۲۹، توزیع گرما در داخل یک قطعه‌کار در سه فرکانس نمونه، فرض شده در بخش ۴-۴. ..... ۱۲۶

شکل ۴-۳۰ تغییرات شدت گرما در قطعه‌کارهایی با ضخامت مختلف فرض شده در بخش ۴-۴ بر حسب فرکانس جریان اعمالی. ۱۲۷

شکل ۴-۳۱، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای قطعه‌کار ۱ میلی متری با فرکانس ۱ کیلو هرتز و سیستم فرض شده در بخش ۴-۴، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۲۸

شکل ۴-۳۲، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای قطعه‌کار ۱ میلی متری با فرکانس۱۰ کیلو هرتز و سیستم فرض شده در بخش ۴-۴، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۲۸

شکل ۴-۳۳، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای قطعه‌کار ۱ میلی متری با فرکانس۱۰۰ کیلو هرتز و سیستم فرض شده در بخش ۴-۴، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۲۹

شکل ۴-۳۴، تغییرات شدت گرما در پیچه فرض شده در بخش ۴-۴ بر حسب فرکانس جریان اعمالی. ۱۳۰

شکل ۴-۳۵، تغییرات بازده فرآیند برحسب فرکانس جریان اعمالی در قطعه‌کارهایی با ضخامت مختلف، فرض شده در بخش ۴-۴. ..... ۱۳۱

شکل ۴-۳۶، تغییرات پروفایل گرمایی روی دیواره خارجی قطعه‌کار ۱ میلی متری فرض شده در بخش ۴-۴ بر حسب فرکانس جریان اعمالی. ۱۳۳

شکل ۴-۳۷، تغییرات پروفایل گرمایی روی دیواره خارجی قطعه‌کار ۲ میلی متری فرض شده در بخش ۴-۴ بر حسب فرکانس جریان اعمالی. ۱۳۴

شکل ۴-۳۸، تغییرات پروفایل گرمایی روی دیواره خارجی قطعه‌کار ۵ میلی متری فرض شده در بخش ۴-۴ بر حسب فرکانس جریان اعمالی. ۱۳۴

شکل ۴-۳۹، تغییرات پروفایل گرمایی روی دیواره خارجی قطعه‌کار ۲۵ میلی متری فرض شده در بخش ۴-۴ بر حسب فرکانس جریان اعمالی. ۱۳۵

شکل ۴-۴۰، نمایی از سیستم گرمای القایی فرض شده در بخش۴-۵. ..... ۱۳۸

شکل ۴-۴۱، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای سیستم فرض شده در بخش ۴-۵ در فرکانس ۱ کیلو هرتز، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۴۰

شکل ۴-۴۲، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای سیستم فرض شده در بخش ۴-۵ در فرکانس ۱۰ کیلو هرتز، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۴۱

شکل ۴-۴۳، توزیع مولفه‌های تابع جریان مغناطیسی (Ψ_B) محاسبه شده برای سیستم فرض شده در بخش ۴-۵ در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز، مولفه همفاز (C) در سمت راست و مولفه ناهمفاز (S) در سمت چپ قابل مشاهده است. ۱۴۲