دانشگاه آزاد اسلامي

واحد شاهرود

دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی شیمی

پایان نامه براي دريافت درجه كارشناسي ارشد **"M.Sc."**

گرایش : مهندسی فرایند

عنوان :

تخمین شار حرارتی در پره حرارتی ساخته شده از ماده هدفمند با استفاده از حل معکوس

استاد راهنما :

دکتر محمد رضا گل بهار حقیقی

استاد مشاور :

دکتر مرتضی خوشوقت علی آبادی

نگارش :

احمد رضا گل بهار حقیقی

زمستان ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر بزرگوارم و مادر عزیزم که همیشه پشتیبان من در راه علم و دانش می‌باشند.

برادران گرانقدرم که همواره در تمام مراحل زندگی یار، همدم و همراه همیشگیم بوده اند.

و همسر فداکارم که همواره یار و پشتیبان من در امر تحصیل بوده اند

سپاسگزاری

بر عهده خود می دانم از تمام کسانی که در این راه پشتیبان، یار و یاور من بوده اند تقدیر و تشکر کنم.

استاد و برادر بزرگوارم جناب آقای دکتر محمدرضا گل بهار حقیقی که از ابتدای راه و با سعه صدر فراوان در کلیه مراحل پژوهش پایان نامه هدایتم نمودند.

استاد گرامی جناب آقای مرتضی خوشوقت علی آبادی که پشتیبانی و رهنمودهای ایشان باعث بارور شدن نتایج پژوهش ها و تلاشهایم گردید.

اساتید گرانقدرم جناب آقایان دکتر غضنفری، دکتر روحانی، دکتر رشیدی و دکتر پروینی به خاطر کمک ها و راهنمایی های ایشان در دوران تحصیلم.

چکیده

در این پایان نامه برای حل مسئله تخمین شار حرارتی در پایه پره شعاعی ساخته شده از ماده هدفمند از تحلیل معکوس براساس روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی استفاده شده است. اساس روش بر مبنای مینیمم کردن مجموع مربعات تفاضل دمای محاسبه شده و دمای اندازه گیری شده بر روی نوک پره می باشد. با توجه به این که روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی، با به کارگیری گرادیان، تابع و مسیر جستجو در قالب دو معادله حساسیت و الحاقی عمل می کند، می بایست این معادلات را به همراه معادله مستقیم حل نمود که در این پایان نامه از روش دیفرانسیلی کواردریچر استفاده شده است. به منظور نشان دادن قابلیت روش آنالیز معکوس به کار رفته چندین مثال برای پره هایی با اشکال مختلف و همچنین شار حرارتی متفاوت ارائه شده است. جهت شبیه سازی مقادیر درجه حرارت برای حل مسئله معکوس، از مقادیر میدان درجه حرارت محاسباتی با اضافه نمودن یک تابع توزیع نرمال استفاده شده است. نتایج بدست آمده و مقایسه مقادیر توابع تخمین زده شده با مقادیر واقعی همین توابع نشان می دهند که این روش می تواند با موفقیت شار حرارتی مجهول در یک پره ساخته شده از ماده هدفمند را بدون داشتن اطلاعاتی از نوع رفتار تابع در یک مسئله هدایت حرارتی غیر فوریه ای تخمین بزند.

واژه های کلیدی:تحلیل معکوس، اثرات غیر فوریه ای، معادلات هذلولی، پره های شعاعی، مواد هدفمند، روش دیفرانسیلی کواردریچر، روش گرادیان مزدوج

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

مقدمه..... ۳

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱-مقدمه..... ۸

۲-۲-مروری بر تحقیقات انجام شده در ارتباط با پره ها..... ۸

۲-۳-مروری بر تحقیقات انجام شده در ارتباط با تحلیل مستقیم مسائل حرارتی مواد هدفمند ۱۱

۲-۴-مروری بر تحقیقات انجام شده در ارتباط با مسائل معکوس حرارتی مواد هدفمند ۱۳

۲-۵-تحقیقات انجام شده در ارتباط با مسائل معکوس حرارتی ۱۳

۲-۶- تحقیقات انجام شده در ارتباط با حل مسائلی با معادلات حاکم غیر فوریه ای ۱۸

فصل سوم : معادلات حاکم

۳-۱-مقدمه..... ۲۰

۳-۲-مواد هدفمند ۲۱

۳-۳-روش دیفرانسیل کواردریچر ۲۵

۳-۴-روش ها و مفاهیم تحلیل معکوس..... ۲۷

۳-۴-۱-روش اول: روش لونبرگ- ماركاردت براي تخمين پارامترها ۲۸

۳-۴-۲-روش دوم: روش گرادیان مزدوج براي تخمين پارامترها..... ۴۱

۳-۴-۳-روش سوم: روش گرادیان مزدوج با مسأله الحاقي براي تخمين توابع ۴۹
۳-۵-مدل ریاضی مسئله ۶۹

فصل چهارم : نتایج

٤-١- مقدمه ۷۸
٤-٢-پره شعاعی هدفمند با ضخامت ثابت ۷۹
٤-٣-پره شعاعی ساخته شده از ماده هدفمند با پروفیل نمایی ۸٤
٤-۴-پره شعاعی ساخته شده از ماده هدفمند با پروفیل ذوزنقه ایی ۸۹
٤-٥-پره شعاعی هدفمند با پروفیل ذوزنقهای و با شاخص توانی متفاوت ۹٤
٤-٦-بحث و نتیجه گیری ۹۸
منابع غیر فارسی ۹۹

فهرست جدول‌ها

جدول(۴-۱): مقایسه بین در صد خطای محاسبه شده مثال اول برای مقادیر متفاوت انحراف معیار. ۸۲

جدول(۴-۲):اطلاعات مربوط به مواد هدفمند به کار برده شده در مثال ۱ ..... ۸۴

جدول(٤-۳):اطلاعات مربوط به مواد هدفمند به کار برده شده در مثال ۲ ..... ۸۵

جدول(۴-۴):مقایسه بین درصد خطای محاسبه شده مثال دوم برای مقادیر متفاوت انحراف معیار.... ۸۷

جدول(۴-۵):مقایسه بین درصد خطای محاسبه شده مثال سوم برای مقادیر متفاوت انحراف معیار.. ۹۲

جدول(۴-۶):اطلاعات مربوط به مواد هدفمند به کار برده شده در مثال ۳ و ۴ ..... ۹۴

جدول(۴-۷):مقایسه بین درصد خطای محاسبه شده مثال چهارم برای مقادیر متفاوت شاخص توانی. ۹۶

فهرست شکل‌ها

شکل (۳-۱):نحوه آرایش ساختار ذرات در مواد هدفمند در راستای ضخامت..... ۲۲

شکل (۳-۲): هندسه و شرایط مرزی پره ها..... ۶۹

شکل(٤-۱):پره هدفمند با ضخامت ثابت ۸۰

شکل(۴-۲):شار حرارتی تخمین زده شده در پره هدفمند با ضخامت ثابت ۸۱

شکل(۴-۳):مقایسه بین دمای محاسبه شده و دماهای اندازه گیری شده در نوک پره ۸۳

شکل(۴-۴):پره هدفمند با پروفیل نمایی..... ۸۵

شکل(۴- ۵):تخمین شار حرارتی در پایه پره شعاعی با پروفیل نمایی..... ۸۶

شکل(٤- ٦):مقایسه بین دماهای محاسبه شده و دماهای اندازه گیری شده در نوک پره..... ۸۸

شکل(٤-۷):پره هدفمند با پروفیل ذوزنقهایی ۹۰

شکل(٤-۸):شارحرارتی تخمین زده شده در پره شعاعی هدفمند با پروفیل ذوزنقهایی..... ۹۱

شکل(۴- ۹):مقایسه بین دماهای محاسبه شده و دماهای اندازه گیری شده در نوک پره..... ۹۳

شکل(٤- ۱۰):شارحرارتی تخمین زده شده در پره هدفمند با انحراف معیار ثابت$\sigma = 0.1$ و شاخص توانی متفاوت..... ۹۵

شکل(٤- ۱۱):مقایسه بین دماهای محاسبه شده ودماهای اندازه گیری شده در نوک پره..... ۹۷

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

برای اولین بار در طی سال های ۱۹۸۵-۱۹۸۴ میلادی در راستای ارتقاء خواص ترمودینامیکی اجزاء سازه ای، دسته ای از مواد با نام مواد هدفمند (Functionally garaded material) یا به اختصارFGM توسط گروهی از محققین ژاپنی پیشنهاد شدند. مهمترین ویژگی این مواد تغییرات پیوسته و تدریجی آن ها در ساختار و مواد تشکیل دهنده بر حسب متغیرهای مکانی (معمولاً در راستای ضخامت) می باشد و این امر باعث می شود خواص مکانیکی آن ها به صورت پیوسته و منظم تغییر کند. به طور عمده مواد هدفمند از ترکیب سرامیک و فلز تشکیل می شوند و برای ایجاد سازه هایی با مقاومت حرارتی بالا که تحت تاثیر تغییرات ناگهانی دما قرار می گیرند مانند سازه های هوا و فضا راکتورهای هسته ای و صنایع شیمیایی به کار گرفته می شوند. ناحیه سرامیک مواد هدفمند بدلیل ضریب حرارتی پایین، باعث ایجاد ناحیه مقاوم حرارتی می شود، در حالی که ناحیه فلزی به دلیل چقرمگی بالا باعث ایجاد ناحیه مقاوم مکانیکی شده و از شکستگی سازه جلوگیری می کند. بدین وسیله می توان دو خصوصیت را همزمان در این مواد مشاهده نمود. از آن جا که در این مواد با تغییر تدریجی ساختار مواد در راستای ضخامت مواجه هستیم مشکلات ناشی از ترک خوردگی و لایه لایه شدن که اغلب در مواد مرکب لایه ای در محیط های حرارتی ایجاد می شود در این موارد مشاهده نمی شود. از سطوح گسترش یافته یا پره ها برای افزایش نرخ انتقال حرارت بین یک جسم جامد و سیال مجاور آن استفاده می شود. مطالعه بر روی رفتارهای گرمایی پره ها به دلیل کاربردهای فراوان آن ها در خنک کاری سیستم های مختلف در صنعت امری مهم به شمار می رود. استفاده از پره های ساخته شده از مواد هدفمند رویکرد نوینی است که پژوهشگران اخیرا به آن توجه نموده اند. در کاربردهای مهندسی در اغلب مسائل برای انتقال حرارت هدایت در پره ها مدل هدایت فوریه در نظر گرفته می شود. قانون فوریه یک قانون پدیده شناسی است. یعنی از پدیده های تجربی و نه از مفاهیم اولیه استخراج می گردد. بر مبنای مدل فوریه حرارت در محیط های هادی با سرعت بی نهایت منتشر می شود. علیرغم اینکه مدل هدایت فوریه یک فیزیک غیر واقعی را در بردارد یعنی پخش ناگهانی انرژی حرارتی، اما تقریب بسیار خوبی برای اکثر کاربردهای مهندسی در زندگی روزمره است.

این قانون در مواردی شبیه انتقال حرارت گذرا در بازه های زمانی خیلی کوچک، انتقال گرما در دماهای پایین نزدیک صفر مطلق مانند کاربردهای کرایجنیک، در فرآیند پردازش مواد به کمک لیزر، تابش موجهای الکترومغناطیسی با شدت بالا، انتقال حرارت با نرخ زیاد در محیط های دقیق و انتقال حرارت در ساختارهایی در ابعاد میکرون نتایج غیر قابل قبولی را ارائه می نماید.علت این امر

ناسازگاری مدل هدایت فوریه با فیزیک واقعی انتشارحرارت می باشد. کاتانئو و ورونته[۱]در سال ۱۹۸۵ مدلی را ارائه دادند که بر محدود بدون سرعت انتشار حرارت استوار است. ساختار غیر همگن ماده باعث ایجاد یک تاخیر در پاسخ بین شار گرما و گرادیان دما می گردد. این تاخیر می تواند نمایانگر زمان لازم برای انبارش انرژی برای تبادل حرارت بین اجزاء ساختاری ماده باشد. در طی این تاخیر شار گرمایی به تدریج خود را با آنچه فوریه بیان می کند تطبیق می دهد. بنابراین جبهه موج در جایی قرار دارد که پاسخ به تحریک گرمایی شروع به آرام گرفتن می کند در حالیکه فوریه بر این باور است که شار حرارتی به طور خیلی ناگهانی و سریع خود را با تغییرات گرادیان دما منطبق می سازد.

همانگونه که قبلاً اشاره شد انتقال حرارت در محیط هایی که از مواد هدفمند ساخته شده اند با سرعت محدود انتشار می یابد و مدل انتقال حرارت فوریه در این محیط ها دیگر صادق نیست. از این رو استفاده از مدل هدایت غیر فوریه ای در مطالعه رفتار دمائی پره های ساخته شده از ماده هدفمند مهم به نظر می رسد. اغلب معادلات حاکم بر پره های غیر فوریه به یک معادله هذلولی ختم می شودکه به مسئله مستقیم برای پره های غیر فوریه معروف است. در واقع در یک مسئله مستقیم به تحلیل توزیع دما در یک پره با مشخص بودن شکل، شرایط اولیه وشرایط مرزی و خواص ترموفیزیکی پرداخته می شود. حال اگر یکی از معلومات در مسئله مستقیم مجهول باشد به منظور یافتن آن از روشی که به آنالیز معکوس معروف بوده و نیاز به اطلاعاتی همچون مقادیر اندازه گیری شده درجه حرارت و محاسبات اضافی دارد، استفاده می شود. در صورتیکه شرایط مرزی (شار حرارتی یا توزیع درجه حرارت) در سطوح یک جسم جامد به طور کامل و به صورت تابعی از زمان و مکان شناخته شده باشد، آنگاه با حل معادله هدایت حرارتی توزیع در داخل جسم تعیین خواهد شد. این یک مسئله مستقیم و خوش وضع است (well posed)در بسیاری از موارد عملی انتقال حرارت به دلیل نا مشخص بودن شرایط مرزی مسئله، معادله حرارت قابل حل نیست (ill-posed problem)در اینگونه ازموارد با استفاده از دماهای اندازه گیری در یک یا چند نقطه از جسم،مقدار شار حرارتی روی مرزجسم تخمین زده می شودکه این موارد را مسائل هدایت حرارتی معکوس(inverse heat conduction problems) یا به اختصارIHCP می نامند. مسائل معکوس به شدت به خطاهای اندازه گیری شده حساس می باشد، بنابراین از نظر ریاضی از نوع مسائل بد وضع هستند. بر این اساس برای حل معکوس دو ابزار نیاز است، یک روش گسسته سازی برای حل مسئله مستقیم و یک روش بهینه سازی و تنظیم برای حل مسئله معکوس. بطور کلی مسائل معکوس به مینیمم سازی یک تابع هدف ختم

می شوند. تابع هدف شامل بردارهای مقادیر دمای اندازه گیری شده و دمای محاسبه شده (تخمین زده شده) می باشد. مقادیر محاسبه شده از حل مستقیم با تخمین مقادیر مجهول بدست می آید. روش های مختلفی برای حل مسائل معکوس وجود دارد. روش گرادیان مزدوج همراه با مسئله الحاقی(Conjugate Gradient Method with adjoint problem)یک روش مینیمم سازی قوی است که می تواند هم برای مسائل خطی و هم غیر خطی برای تخمین شرط مرزی مجهول (که می تواند به صورت پارامتر و یا تابع باشد) به کار رود. روش گرادیان مزدوج الحاقی همراه با معیار همگرایی مناسب در رده روش های تنظیم تکرار پذیر قرار دارد که این قابلیت حل در مسائل بد وضع امتیاز ویژه به شمار آمده و از نوسانات شدید و واگرائی مقادیر جلوگیری می کند. این الگوریتم جهت کمینه کردن تابع هدف از دو مسئله کمکی، مسئله حساسیت به منظور محاسبه اندازه گام جستجو و مسئله الحاقی جهت محاسبه گرادیان تابع استفاده می کند. بنابراین حل یک مسئله حرارتی معکوس مستلزم حل سه مسئله مستقیم، حساسیت و الحاقی می باشد. بحث در رابطه با مسائل هایپربولیک معکوس مربوط به پره های ساخته شده از ماده هدفمند به چند مقاله محدود می شود، بنابراین در این پایان نامه انتقال حرارت گذرای معکوس پره های ساخته شده از ماده هدفمند باپروفیل های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته که جهت هدایت حرارتی دورن پره ها از مدل هدایت غیر فوریه ای استفاده شده است. در این مدل بین شار حرارتی و گرادیان دما یک تاخیر زمانی وجود دارد که این امر باعث می شود تا معادله حاکم از نوع هذلولی بدست آید. تابع هدف تعریف شده در آنالیز معکوس با بهره گیری از نسخه تخمین تابع الگوریتم گرادیان مزدوج الحاقی بهینه و مینیمم شده است. با توجه به اینکه این روش با به کارگیری گرادیان تابع و مسیر جستجو در قالب دو مساله حساسیت و الحاقی عمل می کند، می تواند پارامتر تابع مجهول در مسئله هدایت حرارتی گذرای غیر فوریه را که دارای ناپیوستگی در جواب می باشد را تخمین بزند، که این معادلات به همراه معادله مستقیم با استفاده از روش دیفرانسیلی کواردریچر(Differential Quardrature Method)حل شده است. جهت داشتن مقادیر درجه حرارت تجربی برای حل مسئله معکوس از مقادیر میدان درجه حرارت محاسباتی با اضافه نمودن یک تابع توزیع نرمال استفاده شده است. نتایج بدست آمده و مقایسه مقادیر توابع تخمین زده شده با مقادیر واقعی همین توابع نشان می دهند که این روش می تواند با موفقیت شار حرارتی مجهول در پایه یک پره ساخته شده از ماده هدفمند را بدون داشتن اطلاعاتی از نوع رفتار تابع در یک مسئله هدایت حرارتی غیر فوریه تخمین بزند.

مراحل انجام این پایان نامه بدین ترتیب است که در فصل دوم به اختصار مروری بر کارهای سایر محققان که در این زمینه انجام شده است می‌پردازیم و حتی الامکان به بیان تئوری‌ها و روش‌های

حل عددی مورد استفاده آن‌ها می‌پردازیم. در فصل سوم معادلات حاکم بر مسئله با توجه به روابط و قوانین مربوط به مواد هدفمند به دست آمده و سپس با روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی مورد تحلیل قرار می گیرند. هر یک از روش ها و قوانین به کار گرفته شده در حل این مسئله به طور کامل در این فصل توضیح داده می شود. درفصل چهارم، با استفاده از نتايج عددي بدست آمده از برنامه کامپيوتري تهيه شده توسط نرم افزار متلب بر اساس فرمول‌هاي فصل سوم،همگرايي روش مورد مطالعه و مقايسه آن‌ها در حالت‌هاييازپره ها با اشکال مختلف با شار حرارتی متفاوت، صورت گرفته تا صحت معادلات بدست آمده و حل آن‌ها اثبات گردد.

با توجه به کاربرد گسترده پره های مورد بررسي در اينپايان‌نامه، درتجهيزات پيشرفته مهندسي و از طرف ديگر اهميت موضوع مورد بحث و نبود منابعي در اين زمينه، نتايج اين پايان‌نامه، علاوه بر اينکه مي‌تواند براي مهندسان در محيط‌هاي صنعتي مورد استفاده قرار گيرد، مي‌تواند به عنوان يك منبع مناسب براي تحقيقات آينده‌ی ديگر محققان در محيط‌هاي علمي نيز مورد استفاده قرار گيرد.

فصل دوم

مروری بر ادبیات تحقیق و مطالعات گذشته

۲ـ۱ـ مقدمه

استفاده روز افزون از سطوح گسترش یافته در تجهیزات صنعتی، صنایع نظامی، صنایع هوا فضا، صنعت هسته‌ایی و .... لزوم انجام تحقیقات زیادی که تا کنون انجام شده است را آشکار می سازد. پره ها بر حسب نوع کاربرد در صنایع مختلف دارای شرایط مرزی، بارگذاری، و ابعاد و اشکال مختلفی می باشند. با توجه به اینکه پره های ساخته شده از ماده هدفمند سابقه طولانی ندارند، تا کنون رفتار دمایی این پره ها تحت شرایط مرزی متفاوت، نسبت به پره های ساخته شده از مواد همگن و مواد مرکب کمترمورد مطالعه قرار گرفته است. در این فصل با توجه به پراکندگی تحقیقات انجام شده در زمینه هایی که به این پایان نامه مرتبط می باشند، این مطالعات در چهار بخش مطالعات مربوط به پره ها در زمینه های مختلف، مطالعات مربوط به مسائل حرارتی مواد هدفمند در دو بخش تحلیل مسقیم

و تحلیل معکوس، مطالعات مربوط به مسائل معکوس حرارتی و همچنین تاریخچه ای در زمینه حل معادلات هدایت حرارتی غیر فوریه ای مورد بررسی قرار گفته است.

۲-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده در ارتباط با پره ها

لین تسای یو و همکارانش در سال ۱۹۹۸ طول بهینه پره های مستطیلی بلند که تحت انتقال حرارت جابجایی تشعشعی می‌باشند را محاسبه کردند. در این مطالعه، در یک سطح مقطع ثابت و حجم مشخص، شرایط مرزی جابجایی و همچنین ضریب انتقال حرارت هدایتی متغیر در نظر گرفته شده است.همچنین معادلات انتقال حرارت غیر خطی و شرایط مرزی با استفاده از بسط تیلورمورد محاسبه قرار گرفتند[۲]. لالوت و همکارانش در سال ۱۹۹۹ با تغییر یک پارامتر از روشی که گراندر برای بدست آوردن بازه پره های حلقوی ساخته شده از یک ماده مورد استفاده قرار داده بود، موفق به محاسبه بازه پره های حلقوی ساخته شده از دو ماده شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که نسبت بازده پره پوشش دار به پره بدون پوشش افزایش می یابد، به خصوص در مورد پره های باریک با شعاع زیاد نسبت به شعاع اصلی تا دو برابر افزایش می یابد[۳].تشائوشوچو و همکارانش در سال ۲۰۰۲ با استفاده از ترکیب دو روش عددی لاپلاس و تفاضل محدود موفق به محاسبه مسئله انتقال حرارت دو بعدی گذرا در پره های سوزنی با ضرائب انتقال حرارت متغیر شدند. در این مطالعه برای ضلع جانبی و نوک پره عدد بایوت، متفاوت در نظر گرفته شده است. حل معادلات حاکم به این صورت انجام پذیرفت که ابتدا از فاکتورهای زمانی تبدیل لاپلاس گرفته شد، سپس معادلات بدون بعد در دامنه جدید با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه شدند. در آخر از نتایج بدست آمده معکوس لاپلاس گرفته شد تا نتایج واقعی مشخص گردد[۴]. اسماعیل مخیم در سال ۲۰۰۲ موفق به ارائه نمودارهایی تحت عنوان پره-کارائی شد. وی توانست کارائی پره ها با اشکال مختلف در محیط های متفاوت که تحت ضرائب انتقال حرارت موضعی متغیر می باشند را محاسبه نماید. در این مطالعه پره ها تحت انتقال حرارت جابه جایی متغیر بررسی شدند. همچنین ضرائب انتقال حرارت موضعی تابعی از تغییرات موضعی دما و بر اساس ضریب همبستگی جابجایی طبیعی برای ورقه ها محاسبه شده است[۵]. چینگ هائونگ چیو و چائوکائونگ چن در سال ۲۰۰۳ با استفاده از تحلیل عددی ADM موفق شدند توزیع دمائی در پره هایی که تحت انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی می باشند و ضریب هدایت حرارتی متغیری دارند را محاسبه نمایند. آن ها در این مطالعه رویه پره را تحت تاثیر انتقال حرارت جابه جایی با سیالی با دمای T_fکه باعث اتلاف حرارت از نوک پره به محیط می شود مورد بررسی قرار دادند[۶]. یوچینگ یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از ترکیب روش تبدیل لاپلاس و تفاضل محدود،

مسئله دو بعدی گذرا در پره های سوزنی که نوک آن ها تحت تاثیر انتقال حرارت جابه جایی است و پایه پره تحت تاثیر متغیرهای زمانی و مکانی می باشد را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند.در این مطالعه معادلات ابتدا در دامنه تغییر یافته محاسبه گردیده، سپس تغییرات افزایش دما با استفاده از ماتریس تشابه و بسط فوریه در دامنه واقعی بدست آمد[۷]. بیسرنی و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به بررسی شکل بهینه یک حفره در یک دیواره صلب هدایت حرارتی پرداختند. شکل این حفره به صورت مستطیلی می باشد و می توان از این حفره به عنوان یک پره معکوس نام برد. هدف آن ها از این مطالعه کاهش مقاومت حرارتی به کمترین میزان ممکن بود. در این مطالعه شکل حفره برای دو نوع شرط مرزی دمائی دیواره بهینه گردید، یکی با تولید حرارت همسان و یکنواخت و دیگری شار حرارتی ثابت در سطح بیرونی دیواره آن ها همچنین شکل انواع مختلف حفره های که به صورت T شکل ایجاد می شوند را بهینه نمودند[۸]. آنتونیوکمپو و بیاجیومورونه در سال ۲۰۰۴ برای محاسبه حرارت آزاد شده از پره هایی با سطح مقطع قلمی از یک روش بسیار ساده و با استفاده از ترکیب روش تفاضل محدود و تخمین بدون مش استفاده نمودند. در این مطالعه شکل پره هذلولی در نظر گرفته شده است که توسط یک سیال خنک می گردید. معادلات انتقال حرارت با ضرائب متغیر حل گردیده که این ضرائب متغیر بواسطه تغییرات دمائی در پره های حلقوی در نظر گرفته شده بودند[۹]. سیهات ارسلانتورک و همکاران در سال ۲۰۰۴ موفق به آنالیز کارائی و همچنین بهینه کردن شکل پره های حلقوی نامتقارن شدند. آن ها برای تحلیل این مسئله شرایط مرزی جابجایی در نظر گرفتند. همچنین سطح مقطع پره های مورد مطالعه مستطیلی در نظر گرفته شده بود. برای محاسبه توزیع دمائی، معادله دوبعدی نفوذ حرارتی به صورت تحلیلی حل گردید. در این مطالعه حجم پره برای بدست آوردن پارامترهای بدون بعد هندسی پره با بیشترین مقدار انتقال حرارت، ثابت فرض شده است[۱۰]. هاولانگ لی و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از تحلیل معکوس و براساس روش گرادیان مزدوج مسئله دو بعدی تخمین شار حرارتی مجهول در پره های سوزنی را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه هیچ گونه اطلاعات قبلی از تابع پارامتر مجهول در دسترس نبوده و صحت نتایج بدست آمده با شبیه سازی مسئله از طریق حل مستقیم مقایسه شده است[۱۱]. فلورین بوبارو و سرینیواس را شاکندا در سال ۲۰۰۴ یک روش عددی برای بدست آوردن وابستگی شکل بهینه پره ها به متغیرهای هدایت حرارتی ارائه دادند. این مطالعه در سه بعد مورد بررسی قرار گرفت که دو بعد مربوط به سطح مقطع و یک بعد مربوط به لایه مرزی حرارتی می باشد. آن ها برای تحلیل تغییرات شکلی عمده از حالت حدس اولیه کلی ساده، به یک شکل بهینه از ترکیب روش بدون مش و یک الگوریتم بهینه سازی استفاده نمودند. شکل بدست آمده ترکیبی از پره های نوک تیز و همچنین پره هایی با نوک پخ می باشد.

آرایش این پره ها در ترکیب با یکدیگر به صورت تکراری و شبیه کنگره های پشت دایناسور می باشد[۱۲]. سیهات ارسلانتورک در سال ۲۰۰۵ با استفاده از روش ADMبازه پره های مستقیم با ضرائب انتقال حرارت وابسته به دما را محاسبه کرد. در این تحقیق بازه پره تابعی از پارامترهای مکانی و دمایی و همچنین ضریب انتقال حرارت تابعی از دما در نظر گرفته شده است. روش ADMیک حل عددی به فرم سری های توانی نامحدود می باشد. روش ADMیک تحلیل عددی مناسب، برای حل معادلات غیر خطی نفوذ حرارتی که شرایط مرزی حرارتی متغیر دارند بسیار مناسب است[۱۳]. سیهات ارسلانتورک در سال ۲۰۰۵ با ارتباط ساده معادلات شکل بهینه پره های حلقوی با ضخامت ثابت را بدست آورد. در این مطالعه نسبت بهینه شعاع پره های حلقوی که دارای بیشترین انتقال حرارت می باشند، تابعی از عدد بایوت و حجم پره در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن پارامترهای هندسی بدون بعد حجم پره ثابت فرض شده است[۱۴]. آرائوزو و همکارانش در سال ۲۰۰۵ با استفاده از تحلیل عددی سری های توانی موفق به تخمین سریع خواص انتقال حرارت در پره های شعاعی هذلولی که از لحاظ شکل به پره های محدب سهموی با خواص حرارتی بسیار مناسب شبیه می باشند، شدند. در واقع این روش یک تحلیل عددی بسیار مناسب برای حل معادلات عمومی می باشد[۱۵]. رهیده و ملک زاده در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش دیفرانسیل کواردریچر مسئله حرارت دو بعدی گذرا، برای پره های حلقوی با سطح مقطع متغیر را حل نمودند. در این مطالعه دامنه فضایی به چند زیر دامنه تقسیم شده و هر یک توسط روش دیفرانسیلی کواردریچر مش بندی شده است. در تمام سطح خارجی پره وجود انتقال حرارت جابجایی تشعشعی فرض شده است. همچنین تاثیرات زمان و دما به روی شرایط مرزی مورد بررسی قرار گرفت[۱۶]. در سال ۲۰۰۹ دورائو موفق به شبیه سازی توزیع دما با در نظر گرفتن موج های حرارتی با سرعت ثابت گردید. در این تحقیق معادلات هایپربولیکی مسئله که براساس مدل کاتانر جهت تطبیق تدریجی با گرادیان دما وضع شده اند، از روش عددی آسایش حل شده است. همچنین برای حل معادلات هایپربولیکی که علاوه بر تغییر دما شار حرارتی را نیز متغیر در نظر می گیرد، از روش SEMاستفاده شده است. روش های عددی فوق بر اساس کاهش تفاضل مربعات می باشند[۱۷]. در سال ۲۰۱۲ هائولانگ لی و همکارانش شار حرارتی و همچنین توزیع دمائی در پره های ساخته شده از مواد هدفمند را با استفاده از تحلیل معکوس به روش گرادیان مزدوج محاسبه کردند. در این مطالعه برای بدست آوردن اطلاعات دمائی در این مسئله از حل مستقیم معادلات گذرا به روش ترکیبی تبدیل لاپلاس و تفاضل محدود استفاده شده است[۱۸]. در سال ۲۰۱۳ هائولانگ لی و همکارانش شار حرارتی و توزیع دمائی در پره های ساخته شده از ماده ساده

را با استفاده از تحلیل معکوس به روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی را محاسبه کردند. در این تحلیل معادلات حاکم هایپربولیکی و گذرا در نظر گرفته شده است[۱۹].

۲-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده در ارتباط با تحلیل مستقیم مسائل حرارتی مواد هدفمند

سوترادهار و پائولینو و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش المان مرزی موفق به تحلیل مسئله انتقال حرارت هدایتی گذرا در مواد هدفمند شدند که منجر به فرمول بندی شرایط مرزی بدون جزء بندی دامنه شد[۲۰]. مارین در سال ۲۰۰۵ موفق به کاربرد روش های حل معادلات کوشی در مسائل انتقال حرارت پایدار دو بعدی مواد هدفمند گردید[۲۱]. فنگ و هو در سال ۲۰۰۷ موفق شدند که آشفتگی موج های دمائی در چند جهت و همچنین توزیع دمائی در لایه های زیرین یک کره نیمه بی نهایت ساخته شده از ماده هدفمند را محاسبه کنند. آن ها همچنین تحلیل روابط ریاضی مربوط به دمای سطح ماده هدفمند را بدست آوردند. در این مطالعه از حل معادلات حاکم غیر فوریه ای، مقادیر دما در سطح کره ساخته از ماده هدفمند محاسبه گردیده است[۲۲]. فنگ و هو در سال ۲۰۰۷ موفق شدند که آشفتگی موج های دمائی در چند جهت و همچنین توزیع دمائی در لایه های زیرین یک کره ساخته شده از ماده هدفمند را با استفاده از حل معادلات غیر فوریه ای به روش های عددی محاسبه نمایند. آن ها همچنین تاثیر پارامترهای متفاوت فیزیکی را بر توزیع دمائی در سطح کره ساخته شده از ماده هدفمند را بررسی نمودند[۲۳]. فنگ و هو در سال ۲۰۰۸ یک مدل ترمودینامیکی برای پیش بینی توزیع اثرات دینامیکی خواص دمایی در مواد هدفمند که در اثر موج های دمائی ایجاد می گردد، پیشنهاد کردند[۲۴]. گل بهارحقیقی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با ترکیب دو روش عددی المان محدود و روش دیفرانسیل کواردیچر موفق به تحلیل مسئله سه بعدی انتقال حرارت گذرا در صفحه ضخیم ساخته شده از ماده هدفمند شدند. در این مطالعه مدل سازی میادین نا منظم توسط روش المان محدود و حل معادلات حاکم با ضرائب مختلف و همچنین مقادیر متفاوت شرایط اولیه توسط روش دیفرانسیلی کواردریچر حل شده است[۲۵]. گل بهار حقیقی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با ترکیب دو روش عددی المان محدود و دیفرانسیل کواردریچر موفق به تحلیل مسئله دو بعدی انتقال حرارت گذرا در صفحه نازک ساخته شده از ماده هدفمند شدند. مزیت این تحلیل عددی ارتباط دادن مزیت های روش دیفرانسیل که شامل همگرائی سریع و محاسبات کوتاه با مزایای روش المان محدود که برای اشکال مختلف و شرایط متفاوت کاربرد دارند، می باشد[۲۶]. سادوفسکی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ رفتار دمائی ورقه دایره ایی ساخته شده از ماده هدفمند را که دارای پنج لایه از ترکیبات مختلف می باشد،

تحت شوک های حرارتی ناگهانی (فرآیند سرد شدن ناگهانی)، بررسی کردند. در این مطالعه معادلات انتقال حرارت با ترکیب دو تحلیل عددی تفاضل محدود و المان محدود حل شده است[۲۷]. آناستاسیا مولیانا در سال ۲۰۰۹ یک مدل میکرومکانیکی برای توصیف اثر رفتار ترموپیکوالاستیک در مواد هدفمند ارائه نمود. در این مطالعه ماده هدفمند متشکل از دو ترکیب متفاوت در ضخامت خود است.همچنین خواص هر جزء تشکیل دهنده با زمان و دما متغیر در نظر گرفته شده است[۲۸]. تنهانی و میرزابابایی درسال ۲۰۰۹ با استفاده از تئوری لایروایز موفق به آنالیز محاسبه تنش و جابجایی استوانه های خمیده ساخته شده از ماده هدفمند در اثر بارهای حرارتی شدند[۲۹]. فنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ یک مدل تئوری برای توصیف آشفتگی موج های دمائی که در چندین جهت بوجود می آید را برای یک کره نیمه بی نهایت ناهمگن ساخته شده از ماده هدفمند ارائه نمودند. آن ها همچنین توزیع دمائی در سطح کره را محاسبه نمودند. در این مطالعه برای تحلیل معادلات از روش موج حرارتی استفاده شده است[۳۰].

۲-۴- مروری بر تحقیقات انجام شده در ارتباط با مسائل معکوس حرارتی مواد هدفمند

گل بهارحقیقی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با استفاده از تحلیل معکوس براساس روش گرادیان مزدوج توانستند شار حرارتی مجهول در مواد هدفمند را در مسئله انتقال حرارت دو بعدی گذرا تخمین بزنند. برای حل مستقیم این مسئله از ترکیب دو روش و المان محدود و روش دیفرانسیلی کواردریچر استفاده شده است[۳۱]. گل بهارحقیقی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ با استفاده از تحلیل معکوس براساس روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی توانستند شار حرارتی مجهول در مواد هدفمند، در مسئله انتقال حرارت سه بعدی گذرا در صفحه های ساخته شده از ماده هدفمند را تخمین بزنند. برای حل مستقیم این مسئله از ترکیب دو روش المان محدود دو روش دیفرانسیلی کواردریچر استفاده شده است[۳۲]. گل بهار حقیقی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش معکوس و ترکیب آن با یک کنترلر تناسبی مشتقی به کنترل درجه حرارت در یک ورق سه بعدی ساخته شده از ماده هدفمند پرداختند[۳۳]. گل بهار حقیقی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ شار حرارتی بهینه و توزیع دمائی مطلوب را در مسئله انتقال حرارت سه بعدی گذرا برای صفحات ساخته شده از مواد هدفمند محاسبه کردند. در این مطالعه از تحلیل معکوس براساس روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی و همچنین از ترکیب دو روش المان محدود و دیفرانسیلی کواردیچر برای حل مستقیم این مسئله استفاده شده است[۳۴].