بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مکانیک
گروه تبدیل انرژی

حل عددی انتقال حرارت در محیط متخلخل در شرایط عدم تعادل حرارتی همراه با تولید گرما

دانشجو :
عطاءاله عباسی

استاد راهنما :
دکتر محمد حسن کیهانی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
شهریور 89

شماره :
تاریخ :
پیوست :

دانشکده :مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **عطاا... عباسی**

تحت عنوان:

حل عددی انتقال حرارت در یک محیط متخلخل در شرایط عدم تعادل حرارتی همراه با تولید گرما

در تاریخ **۱۳۸۹/۰۶/۲۹** توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد (رساله دکتری) مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : محمدحسن کیهانی		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی : محمدمحسن شاه‌مردان		نام و نام خانوادگی : مجتبی قطعی	
نام و نام خانوادگی : محمود چهارطاقی			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

* تقدیم اثر:

تقدیم به پدر، مادر و خانواده مهربانم

سنگ صبورانم

* تشکر و قدردانی:

خداوند منّان را شاکرم که برایم افرادی را وسیله قرار داد تا بسوی تعالی حرکت کنم و اگر لطف و رحمت بی دریغش نبود، گذر از این راه دشوار میسّر نبود.

از پدر و مادر دلسوز و مهربانم تشکر می کنم که تنها با دلگرمی ایشان توانستم در این مسیر پیشرفت کنم. در اینجا بر خود فرض می دانم از همه عزیزان در دانشکده مهندسی مکانیک خاصه استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر محمد حسن کیهانی که بنده را در پیشبرد این پروژه راهنمایی کردند، تشکر و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب ..عطای الله عباسی.. دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته ..مکانیک - تبدیل انرژی..

دانشکده ..مکانیک.....دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه / رساله ..بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه متخلخل تحت شرایط میدان مگنتیکی.. تحت راهنمایی ..دکتر کیهانی.. متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصلت 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 : ۱۹/۶/۲۹

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته 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

بحث پیرامون ویژگی فازهای سیال و جامد، در بسیاری از جریان های غیر هم دما در محیط های متخلخل بسیار ضروری است. در پایان نامه حاضر اثر تغییر ناگهانی دما در مرز x=0 و همچنین اثر ترم تولید گرما بر ایجاد شرایط عدم تعادل حرارتی در یک محیط متخلخلِ نیمه بینهایت مورد بررسی قرار می گیرد. در غیاب جریان سیال، معادلات انرژی در حالت گذرا و در وضعیت عدم تعادل حرارتی محلی در حضور ترم تولید گرما، به عنوان معادلات حاکم مورد استفاده قرار می گیرند. معادلات حاکم جزئی در هر فاز بی بعد شده و سپس با استفاده از روش های عددی حل شده اند. برای محاسبه مشتقات جزئی روش اختلاف محدود فشرده و برای پیشروی در زمان، روش رانج کوتای مرتبه چهار بکار گرفته شده است. همچنین برای تست و معتبر سازی نتایجِ نرخ انتقال حرارت در زمان های خیلی دور و نزدیک، روش تقریبی اغتشاشات استفاده شده است. در هنگام کار با روش اغتشاشات معادلاتی ظاهر می شوند که برای حل آن ها روش عددی پرتابی بکار گرفته شده است. نرخ انتقال حرارت بین فازها در وضعیت های مختلف در قالب گراف های متنوع نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند، اثر تغییر ناگهانی دما در مرز محیط و اثر ترم تولید گرما پس از گذشت زمان مهار شده و گرادیان های حرارتی هر دو فاز بر اثر ایجاد شرایط تعادل حرارتی محلی در یک مقدار ثابت بر هم منطبق خواهند شد. در این زمان گراف های گرادیان حرارتی با یک مقدار ثابت و شیب صفر به سمت بینهایت حرکت می کنند. همچنین با تعریف پارامترهای بی بعد و بررسی تغییرات آن ها، نتایج مختلفی در رفتار گرادیان های حرارتیِ فازها حاصل می شود، که به تفضیل آمده است.

کلمات کلیدی

تولید گرما، عدم تعادل حرارتی محلی، محیط متخلخل، نسبت رسانایی گرمایی ، نسبت ضریب پخش

* مقالات مستخرج از پایان نامه

1. Study of Local Thermal Non-equilibrium in Porous Media Due to Temperature Sudden Change and Heat Generation - SCIENTIFIC JOURNAL MECHANIKA (ISI) - Status: *In Review.*

2. Study of Local Thermal Non-equilibrium in the porous Media due to temperature Sudden Change - ICTE2010 - Netherlands - *Status: Accepted for Oral Presentation*

3. مطالعه عدم تعادل حرارتی ناشی از تغییر ناگهانی دما در مرز یک محیط متخلخل - ژورنال علمی - پژوهشی مهندسی مکانیک - انجمن مهندسان مکانیک ایران - *وضعیت: تحت بررسی*

4. Numerical Solution of Heat Transfer under LTNE in the Porous Media in Presence of Heat Generation - Asian Journal of Scientific Research - Status: *Accepted*

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

صفحه نخست ..... أ

صفحه عنوان ..... ب

تصویب نامه ..... ج

تقدیم اثر ..... د

تقدیر و تشکر ..... ه

اقرار نامه ..... و

چکیده فارسی پایان نامه ..... ز

مقالات مستخرج از پایان نامه ..... ح

فهرست مطالب ..... ط

فهرست جداول ..... ل

فهرست اشکال ..... م

فهرست علائم و اختصارات ..... ع

فصل اول * مقدمه ای بر انتقال حرارت 1

فصل دوم * انتقال حرارت در محیط های متخلخل 5

2-1 انتقال حرارت و جرم در محیط متخلخل 6

2-2 قوانین اصلی 7

2-2-1 قانون پیوستگی در محیط متخلخل 8

2-2-2 معادله انرژی در محیط متخلخل در حالت تعادل حرارتی محلی 10

2-2-3 معادلات انرژی در محیط متخلخل در حالت عدم تعادل حرارتی محلی 15

2-2-3-1 بررسی روابط تجربی ضریب انتقال حرارت بین فازی 18

2-2-4 معادله مومنتوم در محیط متخلخل (توسعه قانون دارسی) 20

2-2-4-1 مدل های غیر احتمالی (قطعی) 20

2-2-4-2 مدل های آماری 21
2-2-4-3 تعمیم قانون دارسی 22
فصل سوم * کاربردهای عملی محیط های متخلخل 25
3-1 مقدمه 26
3-2 کاربرد محیط های متخلخل به عنوان تیغه متخلخل در کانال مبدل های حرارتی 26
3-3 کاربرد محیط های متخلخل در مشعل متخلخل 32
فصل چهارم * مروری بر منابع 35
4-1 مقدمه 36
4-2 تحقیقات انجام شده پیرامون مسئله عدم تعادل حرارتی 36
4-3 اهداف پایان نامه 44
فصل پنجم * روش های حل مسئله 45
5-1 مقدمه 46
5-2 معرفی روش تفاضل محدود فشرده 46
5-2-1 روش تفاضل محدود فشرده در محاسبه مشتقات 48
5-3 روش رانج کوتای مرتبه چهار 50
5-4 بررسی دقت روش اختلاف محدود فشرده 51
5-5 روش پرتابی 55
5-5-1 حل معادله دیفرانسیل غیر خطی با استفاده از روش پرتابی 57
5-5-2 حل مسائل مقدار مرزی در متلب با استفاده از bvp4c 59
5-6 روش اغتشاشات 61
5-6-1 دقت تقریب اغتشاشات 62
فصل ششم * مطالعه عددی عدم تعادل حرارتی در محیط های متخلخل 66
6-1 مقدمه 67
6-2 معادلات حاکم در محیط های متخلخل 67
6-2-1 بی بعد سازی 69

3-6 روش حل 71
4-6 نتایج حل عددی 72
5-6 اعتبار سنجی نتایج حل عددی 78
1-5-6 تقریب اغتشاشات برای زمان های زود 79
2-5-6 تقریب اغتشاشات برای زمان های دیر 81
3-5-6 نتایج تقریب اغتشاشات 82
فصل هفتم * بررسی تغییرات نتایج فصل ششم در حضور ترم تولید گرما 86
1-7 مقدمه 87
2-7 مدلسازی 87
3-7 نتایج حل عددی 89
4-7 اعتبار سنجی نتایج حل عددی 96
1-4-7 تقریب اغتشاشات برای زمان های زود 96
2-4-7 تقریب اغتشاشات برای زمان های دیر 97
3-4-7 نتایج تقریب اغتشاشات 98
پیوست 101
مراجع 110

فهرست جداول

عنوان ..... صفحه

جدول (2-1): ویژگی های مواد متخلخل 8

جدول (3-1): مشخصات سیال 28

جدول (3-2): مشخصات کانال 28

جدول (3-3): مشخصات هوای بیرون 28

جدول (3-4): مشخصات تیغه های متخلخل 29

جدول (5-1): خطای حاصل از بکارگیری روش تفاضل محدود فشرده برای مثال اول 52

جدول (5-2): خطای حاصل از بکارگیری روش تفاضل محدود فشرده برای مثال دوم 52

جدول (6-1): مقایسه خطای حاصل از حل عددی و تقریبی 85

جدول (7-1): مقایسه خطای حاصل از حل عددی و تقریبی 100

فهرست اشکال

عنوان ..... صفحه

شکل (2-1): حجم کنترل که با ساختار دانه ای نامنظم پر شده است 9

شکل (2-2): حجم کنترل و سیستم در زمان های t و $t+\Delta t$ 10

شکل (2-3): بردار شار حرارتی 12

شکل (2-4): سیال عبوری از منفذ محیط متخلخل 13

شکل (3-1): تیغه های متخلخل نصب شده در سطح داخلی کانال 29

شکل (3-2): نمای برشی شکل (3-1) 29

شکل (3-3): نحوه کاهش دمای سیال در حین عبور از کانال با تیغه های متخلخل 30

شکل (3-4): نحوه کاهش دمای سیال در حین عبور از کانال با تیغه های صلب 30

شکل (3-5): نحوه افزایش افت فشار سیال در حین عبور از کانال با تیغه های متخلخل 30

شکل (3-6): نحوه افزایش افت فشار سیال در حین عبور از کانال با تیغه های صلب 30

شکل (3-7): تشکیل گردابه در کانال با تیغه های متخلخل 31

شکل (3-8): تشکیل گردابه در کانال با تیغه های صلب 31

شکل (3-9): جریان 3 بعدی سیال از کانال با تیغه های صلب 31

شکل (3-10): جریان 3 بعدی سیال از کانال با تیغه های متخلخل 31

شکل (3-11): نمونه ای از مشعل های متخلخل 33

شکل (3-12): گرمایش لوله های پلاستیکی توسط مشعل متخلخل 33

شکل (3-13): پیش گرمایش قالب های ریخته گری توسط مشعل متخلخل 34

شکل (4-1): شکاف پر شده با محیط متخلخل 39

شکل (5-1): نقاط پیوسته در یک شبکه برای میان یابی مرتبه چهار در مشتق مرتبه دو 47

شکل (5-2): مسیرهای ایجاد شده در اثر انتگرال گیری 56

شکل (5-3): انطباق نتایج روش تفاضل محدود و روش پرتابی 59

شکل (6-1): محیط یک بعدی مفروض 69

شکل (6-2): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 2$ و $\gamma = 1$ 73
شکل (6-3): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 0.2$ و $\gamma = 1$ 73
شکل (6-4): گراف های گرادیان حرارتی برای $\gamma = 1$ و α متفاوت 74
شکل (6-5): بزرگنمایی شکل (6-4) 74
شکل (6-6): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 4$ و γ متفاوت 75
شکل (6-7): بزرگنمایی شکل (6-6) 76
شکل (6-8): مقادیر اختلاف گرادیان حرارتی برای $\alpha = 4$ و γ متفاوت 76
شکل (6-9): مقادیر اختلاف گرادیان حرارتی برای $\gamma = 1$ و α متفاوت 77
شکل (6-10): خطای میان روش های عددی و تقریبی برای حالت $\gamma = 1$ و $\alpha = 2$ 83
شکل (6-11): بزرگنمایی شکل (6-10) در زمان های زود 84
شکل (6-12): بزرگنمایی شکل (6-10) در زمان های دیر 84
شکل (6-13): بزرگنمایی شکل (6-12) 84
شکل (6-14): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 2$ و $\gamma = 1$ در زمان های t 85
شکل (6-15): بزرگنمایی شکل (6-14) 85
شکل (7-1): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 0.2$ و $\gamma = 1$ 91
شکل (7-2): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 2$ و $\gamma = 1$ 91
شکل (7-3): گراف های گرادیان حرارتی برای $\gamma = 1$ و α متفاوت 92
شکل (7-4): بزرگنمایی شکل (7-3) 92
شکل (7-5): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 4$ و $\gamma = 0.6$ 93
شکل (7-6): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 4$ و $\gamma = 6$ 93
شکل (7-7): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 4$ و γ متفاوت 94
شکل (7-8): مقادیر اختلاف گرادیان حرارتی برای $\gamma = 1$ و α متفاوت 95
شکل (7-9): مقادیر اختلاف گرادیان حرارتی برای $\alpha = 4$ و γ متفاوت 96
شکل (7-10): خطای میان روش های عددی و تقریبی برای حالت $\gamma = 1$ و $\alpha = 4$ در زمان های زود 99
شکل (7-11): خطای میان روش های عددی و تقریبی برای حالت $\gamma = 1$ و $\alpha = 4$ در زمان های دیر 99
شکل (7-12): گراف های گرادیان حرارتی برای $\alpha = 4$ و $\gamma = 1$ در زمان های t 100

شکل (7-13): بزرگنمایی شکل (7-12) 100

فهرست علائم و اختصارات

v : بردار سرعت

T_0 : دمای اولیه محیط متخلخل

T_s : دمای فاز جامد

T_f : دمای فاز سیال

k : رسانایی گرمایی

h : ضریب انتقال حرارت بین فازی

$LTNE$: عدم تعادل حرارتی محلی

H : فرم بی بعد h

c : ظرفیت گرمایی ویژه

L : مقیاس طول

علائم یونانی

ε : تخلخل محیط

ρ : چگالی

α : ضریب پخش حرارتی

ϕ : فرم بی بعد دمای فاز جامد

θ : فرم بی بعد دمای فاز سیال

μ : لزجت سینماتیکی

γ : نسبت رسانایی در مقیاس تخلخل

زیرنویس ها

g : جامد

f : سیال

* فصل اول ـ مقدمه ای بر انتقال حرارت

انرژی از طریق برهم کنش های سیستم با اطرافش انتقال می یابد. این برهم کنش ها را کار و گرما می گویند. امروزه انتقال گرما در حقیقت موضوعی است مرتبط با سایر علوم و صرفاً بخش جالبی از علوم مهندسی نیست. پدیده های انتقال گرما در بسیاری از مسائل صنعتی و محیطی نقش مهمی را ایفا می کنند. هیچ کاربرد ساده ای در زمینه مسائل صنعتی و محیطی نیست که به طریقی با انتقال گرما سر و کار نداشته باشد. در تولید انرژی الکتریکی ناشی از شکافت یا جوش هسته ای، احتراق سوخت های فسیلی و در استفاده از منابع زمین گرمایی[1]، انتقال گرما نقش اصلی را ایفا می کند. مسائلی در این زمینه شامل فرآیندهای رسانش، جابجایی و تشعشع هستند و به طراحی وسایلی از قبیل بویلرها، کندانسرها و توربین ها مربوط می شوند. دغدغه اصلی در اینگونه مسائل این است که آهنگ انتقال گرما به ماکزیمم برسد و ضمناً مواد در دماهای بالا به صورت مواد اولیه باقی بمانند.

در ارتباط با طراحی سیستم هایی که از تبدیل انرژی خورشیدی برای گرمایش و تولید انرژی استفاده می کنند، مسائل انتقال گرمایِ بسیاری پیش روی محققین قرار دارد. فرآیندهای انتقال گرما بر عملکرد سیستم های پیشران، مانند موتورهای احتراق داخلی، توربین های گاز و موتور جت تاثیر می گذارند. طراحی سیستم های گرمایش هوا و آب در طراحی کوره های زباله سوز و وسایل ذخیره کریورژنیک[2]، خنک کردن وسایل الکترونی، طراحی سیستم های سرمایشی و تهویه مطبوع و بسیاری از فرآیندهای ساخت و تولید، مسائل انتقال گرما نقش عمده ای دارند. انتقال گرما با آلودگی آب و هوا نیز ارتباط دارد و بر آب و هوای محلی و جهانی تاثیر می گذارد.

انتقال حرارت رسانشی به انتقال انرژی ناشی از شیب دما در یک محیط گفته می شود و مکانیزم فیزیکی آن از نوع فعالیت های اتمی یا مولکولی است. این نوع انتقال گرما با قانون معروف فوریه بیان می شود و برای استفاده از این قانون در تعیین شار گرما باید تغییرات دما در محیط معلوم باشد. قانون فوریه اساس انتقال گرمای رسانشی است، با این مشخصه مهم که نمی توان آن را از اصول اولیه بدست آورد، بلکه تعمیمی مبتنی بر گواه آزمایشی است و همچنین عبارتی است که یکی از خواص

1 Geothermal
2 Cryogenic

مهم ماده یعنی رسانندگی گرمایی را تعریف می کند. این قانون یک عبارت برداری است که نشان می دهد شار گرما بر سطح تک دما عمود بوده و در جهت کاهش دما است.

رسانش گرمایی در محیط های متخلخل یکی از مباحث مهم در زمینه علوم انتقال حرارت است. مطالعه انتقال حرارت در این زمینه میدان تحقیقاتی جدایی را در سه دهه قبل بوجود آورد. در نیم قرن گذشته افراد زیادی بر روی اصول محیط های متخلخل کار کرده اند. بطور کلی انتقال حرارت و جابجایی جرم توسط یک سیال در یک محیط متخلخل شاخه ای از علوم مکانیک سیالات است که کاربردهای صنعتی فراوانی دارد. سیال در لایه های متخلخل زیر زمینی جریان یافته و باعث انتقال جرم و انرژی در بین این مواد می گردد. این انتقال انرژی در محیط متخلخل در صنایع زمین گرمایی و نفت بسیار پر اهمیت است. انتقال حرارت در محیط های متخلخل نسبت به انتقال جرم از مباحث نسبتاً جدیدتر به حساب می آید. بررسی انتقال حرارت در محیط های متخلخل برای تحلیل و طراحی انواع کاتالیزورها و عایق های حرارتی اهمیت بیشتری پیدا کرد. در سیستم های عایق کاری، مواد با رسانندگی کم با هم ترکیب شده و مواد با رسانندگی گرمایی کمتر را بوجود می آورند. این سیستم های متخلخل با رسانندگی گرمایی موثر مشخص می شوند. رسانندگی گرمایی موثر به رسانندگی گرمایی و خواص تشعشعی سطح ماده جامد و همچنین به ماهیت و کسر حجمی فضای حفره ای بستگی دارد. بحث پیرامون انتقال حرارت در محیط های متخلخل و کاربرد فراوان آن نیاز به ذکر جزئیات دقیق تر دارد که در فصل های این پایان نامه به آن اشاره می شود.

هدف این پایان نامه بررسی انتقال حرارت هدایتی در محیط های متخلخل است، هنگامی که بطور همزمان تولید گرما نیز در این محیط رخ می دهد. در این فصل مقدمه ای کوتاهی پیرامون اهمیت انتقال حرارت، مخصوصاً در محیط های متخلخل بیان شد. فصل دوم اختصاص به اساس محیط های متخلخل دارد و در آن به تشریح اصول و قوانین حاکم در این محیط ها پرداخته شده است. در فصل سوم دو نمونه از کاربردهای مهم محیط های متخلخل همراه با توضیح کامل ارائه شده است. در فصل چهارم منابع مرتبط و تحقیقات انجام شده توسط محققین مرور شده و در حد توان مقالات مرتبط با

موضوع پایان نامه بررسی شده اند. در فصل پنجم روش های مورد استفاده در حل عددی و تقریبی تشریح شده اند. این روش ها برای حل معادلات حاکم در محیط متخلخل مورد نظر ارائه شده است. در فصل ششم این پایان نامه مراحل بی بعد سازی، ساده سازی و حل عددی معادلات انرژی در حالت عدم تعادل حرارتی آمده است. در این فصل عدم تعادل حرارتی، تنها ناشی از تغییر ناگهانی دما در مرز یک محیط متخلخل می باشد. همچنین کلیه نتایج حل عددی در قالب گراف های متنوع ارائه شده است. اعتبارسنجی نتایج حل عددی در زمان های زود و دیر نیز در این فصل ارائه شده است. فصل هفتم به بررسی تغییرات نتایج عددی فصل ششم اختصاص داده شده است، زمانی که عدم تعادل حرارتی ناشی از تغییر ناگهانی دما در مرز یک محیط متخلخل در حضور ترم تولید گرما باشد. همچنین در دو فصل ششم و هفتم سعی شده تا تفسیری کامل پیرامون رفتار گراف های گرادیان حرارتی ارائه گردد. کد عددی مورد استفاده برای حل معادلات حاکم در قسمت پیوست ارائه شده است. منابع و مراجع مورد استفاده در بخش انتهایی پایان نامه گنجانده شده است.