

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

بررسی عددی فرایند بیوشیمیایی غیر همدم در یک محیط متخلخل در حضور انتقال

حرارت جابجایی آزاد

دانشجو: اسماعیل شاکری نژاد

استاد راهنما

دکتر محمد حسن کیهانی

استاد مشاور

دکتر محسن نظری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

پائیز ۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای ...اسماعیل شاکری نژاد.

تحت عنوان: بررسی عددی فرایند بیوشیمیایی غیر همدمای در یک محیط متخلخل در حضور انتقال

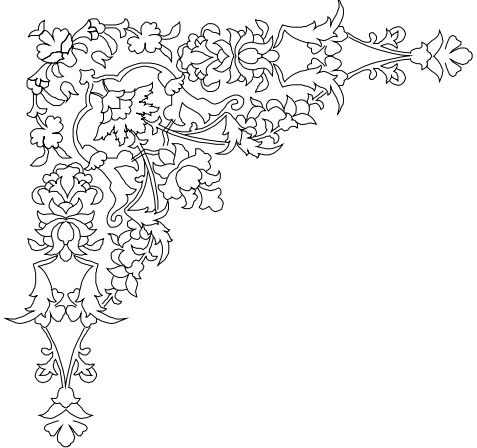
حرارت جابجایی آزاد

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر محسن نظری		دکتر محمد حسن کیهانی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور



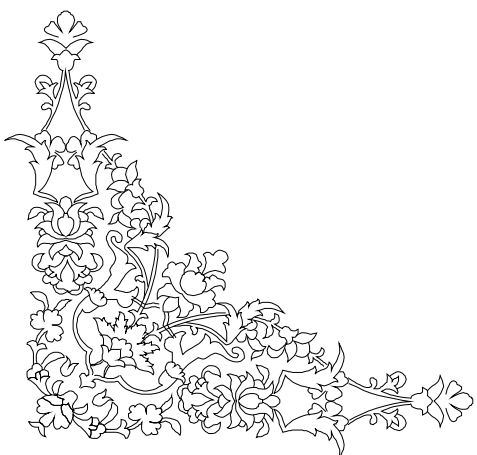
تقدیم بہ

پدرم: اسوہ صبر و استقامت

مادرم: اسوہ محبت و گذشت

خواہرم: کنینہ دکر می و مہربانی

وبرادراںم: دریای سرور و شادی



باشکر و سپاس فراوان از اساتید فریخته:

«آقای دکتر محمد حسن کیهانی و دکتر محسن نظری»

که با کمک های بی دریغشان، من را در انجام هر چه بهترین پژوهش

یاری نمودند.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

پائیز ۱۳۸۹

چکیده

در مطالعه حاضر، انتقال حرارت جابجایی آزاد در محیط متخلخل به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود مورد بررسی قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی، فرض بر آن است که یک فرایند بیوشیمیایی غیر هم‌دما در محیط صورت گرفته که منجر به تولید گرما در محفظه می‌گردد. این گرما تابعی از غلظت حل شده در محیط است. به منظور بیان نرخ رشد و مصرف غلظت‌ها از مدل مونود استفاده شده است. دیواره‌های عمودی محیط مورد نظر دما ثابت و دیواره‌های پایینی و بالایی، عایق می‌باشند. مساله در دو حالت متمایز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت اول به بررسی محیط متخلخل غیرهمگن در حالت تعادل حرارتی پرداخته شده و محیط متخلخل غیر همگن با تقسیم محیط به سه لایه با ضرایب تخلخل متفاوت مدل‌سازی می‌شود. در این حالت اثر تغییرات ضریب تخلخل بر روی انتقال حرارت، گرمای تولیدی، جریان سیال و انتقال جرم بررسی شده و نتایج با حالت ضریب تخلخل ثابت مقایسه می‌گردد. در حالت دوم محیط متخلخل همگن با فرض عدم تعادل حرارتی، با خصوصیات فیزیکی ثابت و گرمای تولیدی در فاز سیال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین خطوط جریان، دما و غلظت برای مقادیر مختلف اعداد بدون بعد رسم شده و دمای سیال و جامد در مرکز حفره و روی خط فرضی عمودی واقع در مرکز حفره محاسبه شده است. سیال درون محفظه تراکم‌ناپذیر و نیوتنی بوده، از مدل داری برای بیان معادله مومنتوم و از فرض بوزینسک برای بیان تغییرات دانسیته استفاده شده است. جریان سیال دوبعدی و غیرپایا می‌باشد.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت جابجایی آزاد، گرمای تولیدی، روش حجم محدود، واکنش بیوشیمیایی،

انتقال جرم، مدل داری، مدل عدم تعادل حرارت.

مقالات

مقالات استخراج شده از رساله حاضر به شرح زیر می‌باشند:

- 1) Nazari, M., Kayhani, M.H., Shakeri E., “The effects of fluid to solid conductivity ratio, Rayleigh number and interstitial heat transfer coefficient on the N.T.E. free convection in a porous enclosure”. Journal in Transport porous media, accepted.
- 2) Nazari, M., Kayhani, M.H., Shakeri E., “Natural Convection Heat Transfer in the Porous Cavity in the Presence of Biochemical Heat Source which is Dependent on Solute Concentration Generation Rate: Comparison Between Constant and Variable Porosity”. Journal of porous media, accepted.
- 3) Nazari, M., Kayhani, M.H., Shakeri E., “Thermal Non-Equilibrium Heat Transfer in a Porous Cavity in the Presence of Bio-Chemical Heat Source”. International Journal of Heat and Mass Transfer, submitted.

فهرست مطالب

صفحه	موضوع
ا.....	بسم ا... الرحمن الرحيم.....
ب.....	صفحه عنوان.....
ج.....	تصویب نامه.....
د.....	اهدا نامه.....
ه.....	قدردانی.....
و.....	اقرارنامه و واگذاری حقوق.....
ز.....	چکیده پایان نامه به زبان فارسی.....
ح.....	لیست مقالات.....
ط.....	فهرست مطالب.....
ل.....	فهرست شکل ها و نمودارها.....
س.....	فهرست جدول ها.....
ع.....	فهرست علامت‌ها و اختصارها.....

فصل اول

مقدمه	۱
۱-۱ روش‌های خنک‌کاری قطعات	۴
۱-۱-۱ جابجایی طبیعی	۴
۲-۱-۱ جابجایی اجباری	۴
۲-۱ تعریف مسئله	۱۲
۳-۱ کاربرد تحقیق حاضر	۱۴

فصل دوم

معادلات حاکم و شرایط مرزی در محیط متخلخل	۱۶
۱-۲ معادلات بقای جرم	۲۰
۲-۲ معادلات اندازه حرکت: قانون داریسی	۲۲
۳-۲ گسترش قانون داریسی	۲۵
۱-۳-۲ شتاب و اثرات درونی دیگر	۲۵
۲-۳-۲ معادله فورچهمیر	۲۵
۳-۳-۲ معادله بریکمن	۲۶
۴-۲ معادلات انرژی	۲۷
۱-۴-۲ حالت عدم تعادل حرارتی بین فازهای سیال و جامد	۲۷
۲-۴-۲ حالت تعادل حرارتی بین فازهای سیال و جامد	۲۹
۵-۲ معادله غلظت	۳۲
۶-۲ شرایط مرزی	۳۲
۶-۲ شرایط در سطح مشترک دو محیط	۳۲

فصل سوم

گسسته‌سازی و روش حل معادلات	۳۳
۱-۳ گسسته‌سازی معادلات	۳۴
۱-۱-۳ جابجایی و نفوذ دو بعدی غیر دائم	۳۵
۲-۱-۳ گسسته‌سازی معادله مومنتوم	۳۷

- ۳-۱-۳ گسسته سازی معادله انرژی ۴۰
- ۳-۱-۴ گسسته سازی معادله انتقال جرم ۴۲
- ۲-۳ مراحل حل عددی ۴۳

فصل چهارم

- جابجایی آزاد در یک محیط متخلخل با تعادل گرمایی ۴۴
- ۱-۴ محفظه پر شده با محیط متخلخل در حالت تعادل حرارتی ۴۵
- ۱-۱-۴ نتایج عددی محفظه متخلخل با تعادل گرمایی ۴۷
- ۲-۴ محفظه پر شده با محیط متخلخل در حالت عدم تعادل حرارتی ۴۸
- ۱-۲-۴ بحث و نتیجه‌گیری محیط متخلخل دارای عدم تعادل حرارتی ۵۱
- ۲-۲-۴ ارائه رابطه‌ای برای ناسلت سیال در حالت عدم تعادل حرارتی ۵۶

فصل پنجم

- جابجایی آزاد در حالت تعادل گرمایی با حضور فرایند بیو شیمیایی غیر همدم ۵۸
- ۱-۵ محفظه پر شده با محیط متخلخل با گرمای تولیدی ۵۹
- ۱-۱-۵ بحث و نتیجه‌گیری محفظه متخلخل با گرمای تولیدی ۶۳
- ۲-۵ بررسی جابجایی آزاد در حضور گرمای تولیدی و فرایند بیو شیمیایی ۷۰
- ۱-۲-۵ بحث و نتیجه‌گیری حضور گرمای تولیدی و فرایند بیو شیمیایی ۷۴
- ۳-۵ تاثیر تغییرات ضریب تخلخل بر فرایند بیو شیمیایی غیر هم دم ۸۰

فصل ششم

- جابجایی آزاد در حالت عدم تعادل گرمایی با حضور فرایند بیو شیمیایی غیر همدم ۸۷
- ۱-۶ جابجایی آزاد در حضور گرمای تولیدی و فرایند بیو شیمیایی بدون تعادل گرمایی ۸۸
- ۱-۱-۶ بحث و نتیجه‌گیری گرمای تولیدی و فرایند بیو شیمیایی بدون تعادل گرمایی ۹۳

فصل هفتم

- جمع‌بندی و پیشنهادات ۱۰۴
- ۱-۷ جمع‌بندی ۱۰۵
- ۲-۷ پیشنهادات ۱۰۷

فهرست شکل ها و نمودارها

- شکل ۱-۱: الف) خنک کاری وسایل الکتریکی، ب) نگهداری غلات در سیلوها، ج) ذخیره سازی سوخت هسته ای در استخر آب..... ۳
- شکل ۱-۲: ارتباط المان با اندازه ناحیه سیال و ناحیه متخلخل در المان حجم مشخص [۳]..... ۱۸
- شکل ۲-۲: معیار سرعت در محیط متخلخل..... ۱۹
- شکل ۳-۲: توزیع سرعت برای یک محیط متخلخل همگن [۳]..... ۲۰
- شکل ۴-۲: عبور از ناحیه دارسی به ناحیه فورچهمیر برای یک محیط متخلخل [۳]..... ۲۶
- شکل ۵-۲: المان یک بعدی برای قانون انرژی در محیط متخلخل همگن [۳]..... ۲۸
- شکل ۱-۳: قسمتی از حجم کنترل دو بعدی..... ۳۵
- شکل ۲-۳: تقسیم ناحیه محاسباتی به تعداد محدودی حجم کنترل [۳۴]..... ۳۶
- شکل ۳-۳: شبکه دو بعدی..... ۳۸
- شکل ۱-۴: محفظه دو بعدی متخلخل..... ۴۶
- شکل ۲-۴: کانتور دما و خطوط جریان (از راست به چپ) $Ra = 10^3$ ۴۸
- شکل ۳-۴: نمودار ناسلت برای سیال و جامد بر حسب تعداد گره برای $H = 10$, $\gamma = 10$, $Ra = 1000$ ۵۳
- شکل ۴-۴: نمودار ناسلت برای سیال و جامد برای $Ra = 10^3$ ۵۳
- شکل ۵-۴: نمودار ناسلت برای سیال و جامد برای $Ra = 10^3$ ۵۴
- شکل ۶-۴: نمودار ناسلت برای سیال و جامد برای $Ra = 500$ ۵۴
- شکل ۷-۴: نمودار ناسلت برای سیال و جامد برای $Ra = 1500$ ۵۵
- شکل ۸-۴: مقایسه بین ناسلت از حل عددی با رابطه ارائه شده الف) $Ra = 500$ ، ب) $Ra = 10^3$ ، ج) 0.0 ۵۸
- شکل ۱-۵: محفظه متخلخل بدون تعادل گرمایی..... ۶۱
- شکل ۲-۵: نمودار تابع جریان، جزء غلظت و خطوط هم دما به ترتیب از چپ به راست برای $Ra = 1000$ ۶۵

- شکل ۳-۵: نمودار تابع جریان، جزء غلظت و خطوط هم‌دما به ترتیب از چپ به راست برای $Le=10$,
 ۶۶ $Ra=1000$
- شکل ۴-۵: نمودار تابع جریان، جزء غلظت و خطوط هم‌دما به ترتیب از چپ به راست برای
 ۶۶ $Ra=1000$
- شکل ۵-۵: نمودار تابع جریان، جزء غلظت و خطوط هم‌دما به ترتیب از چپ به راست برای
 ۶۷ $Ra=1000$
- شکل ۶-۵: نمودار تابع جریان، جزء غلظت و خطوط هم‌دما به ترتیب از چپ به راست برای $Ra=10^5$ ۶۷
- شکل ۷-۵: نمودار تابع جریان، جزء غلظت و خطوط هم‌دما به ترتیب از چپ به راست برای $Ra=10^5$ ۶۸
- شکل ۸-۵: گرمای تولیدی محاسبه شده برای اعداد لویس مختلف برای $Ra=1000$ ۶۹
- شکل ۹-۵: گرمای تولیدی محاسبه شده برای اعداد لویس مختلف برای $Ra=10^4$ ۶۹
- شکل ۱۰-۵: مقایسه گرمای تولیدی محاسبه شده با مقدر جاسمین برای $Ra=10^5$ ۷۰
- شکل ۱۱-۵: گرمای تولیدی محاسبه شده برای اعداد لویس مختلف $Ra=0$ ۷۰
- شکل ۱۲-۵: شماتیک محفظه متخلخل ۷۱
- شکل ۱۳-۵: خطوط جریان و کانتورهای دما از راست به چپ، در حالت پایا برای مقادیر جدول ۱-۶ ۷۶
- شکل ۱۴-۵: نمودار دما و گرمای تولیدی در مرکز حفره برای مقادیر جدول ۱-۶ ۷۷
- شکل ۱۵-۵: غلظت توده زنده و جزء ۱ در مرکز حفره برای مقادیر جدول ۱-۶ ۷۷
- شکل ۱۶-۵: نرخ مصرف و تولید S_1 , S_2 در مرکز حفره برای مقادیر جدول ۱-۶ ۷۸
- شکل ۱۷-۵: شماتیک محفظه متخلخل ۷۹
- شکل ۱۸-۵: مقایسه بین غلظت جزء ۱ و ۲ برای مقادیر جدول ۱-۶ در مرکز حفره در حالت $Ra=0$ ۸۲
- شکل ۱۹-۵: گرمای تولیدی محاسبه شده برای مقادیر جدول ۱-۶ در مرکز حفره در حالت $Ra=10^5$
 ۸۲ $Ra=0$ و $Ra=10^5$
- شکل ۲۰-۵: خطوط جریان، کانتورهای دما، غلظت جزء ۱ و ۲ و حالت تعادل حرارتی ۷۹
- شکل ۲۱-۵: گرمای تولیدی محاسبه شده برای مقادیر جدول ۱-۶ در مرکز حفره در حالت پایا و
 ۸۰ $Ra=0$ و $Ra=10^5$
- شکل ۲۲-۵: خطوط جریان، کانتورهای دما، کانتورهای غلظت جزء ۱ و ۲ و ضریب تخلخل متغیر و
 ۸۳ $t=0/0.5$

- شکل ۵-۲۳: خطوط جریان، کانتورهای دما، کانتورهای غلظت جزء ۱ و ۲ و ضریب تخلخل متغیر و $0/1$
- ۸۳ $t =$
- شکل ۵-۲۴: خطوط جریان، کانتورهای دما، کانتورهای غلظت جزء ۱ و ۲ و ضریب تخلخل متغیر و
- ۸۴ $t = 0/15$
- شکل ۵-۲۵: کانتورهای غلظت جزء ۱ و ۲ در حالت ضریب تخلخل متغیر و حالت پایا
- ۸۴.....
- شکل ۵-۲۶: خطوط جریان و کانتورهای دما از راست به چپ در حالت ضریب تخلخل متغیر
- ۸۵.....
- شکل ۵-۲۷: مقایسه بین گرمای تولیدی در حالت ضریب تخلخل متغیر و ثابت در حالت پایا
- ۸۵.....
- شکل ۵-۲۸: غلظت‌های جزء ۱ و ۲ در حالت ضریب تخلخل متغیر و ثابت
- ۸۶.....
- شکل ۵-۲۹: مقایسه بین دما در حالت ضریب تخلخل متغیر و ثابت در مرکز حفره
- ۸۶.....
- شکل ۵-۳۰: گرمای تولیدی در حالت ضریب تخلخل متغیر و ثابت در مرکز حفره
- ۸۶.....
- شکل ۶-۱: محفظه متخلخل بدون تعادل گرمایی
- ۸۹.....
- شکل ۶-۲: گرمای تولیدی در حالت پایا در مرکز حفره برای $1/8$, $0/8 = \gamma$
- ۹۴.....
- شکل ۶-۳: غلظت‌های جزء ۱ و ۲ بر حسب زمان در مرکز حفره برای $1/8$, $0/8 = \gamma$
- ۹۴.....
- شکل ۶-۴: گرمای تولیدی بر حسب زمان در مرکز حفره
- ۹۵.....
- شکل ۶-۵: دمای فاز سیال و جامد بر حسب زمان در مرکز حفره
- ۹۶.....
- شکل ۶-۶: خطوط جریان، کانتور دمای سیال و جامد، غلظت جزء ۱ و ۲ و حالت عدم تعادل حرارتی و
- ۹۹..... $\gamma = 0/8$
- شکل ۶-۷: خطوط جریان، کانتور دمای سیال و جامد، غلظت جزء ۱ و ۲ و حالت عدم تعادل حرارتی و
- ۱۰۰..... $\gamma = 0/8$
- شکل ۶-۸: خطوط جریان، کانتور دمای سیال و جامد، غلظت جزء ۱ و ۲ و حالت عدم تعادل حرارتی و
- ۱۰۱..... $\gamma = 1/8$
- شکل ۶-۹: خطوط جریان، کانتور دمای سیال و جامد، غلظت جزء ۱ و ۲ و حالت عدم تعادل حرارتی و
- ۱۰۲..... $\gamma = 1/8$
- شکل ۶-۱۰: دما در خط عمودی فرضی واقع در مرکز حفره برای حالت عدم تعادل حرارتی
- ۱۰۳.....

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: ضریب تخلخل و نفوذپذیری برای برخی از مواد متخلخل [۳]. ۲۳
- جدول ۱-۳: ضرایب مدل آپویند [۳۳]. ۳۷
- جدول ۲-۳: خلاصه گسسته سازی معادله مومنتوم. ۳۹
- جدول ۳-۳: خلاصه گسسته سازی معادله انرژی. ۴۲
- جدول ۴-۳: خلاصه گسسته سازی معادله انتقال جرم. ۴۳
- جدول ۱-۴: مقایسه مقادیر ناسلت در یک محفظه با تعادل حرارتی. ۴۹
- جدول ۲-۴: مقایسه مقادیر ناسلت در یک محفظه با عدم تعادل حرارتی برای $Ra=500$. ۵۱
- جدول ۳-۴: مقایسه مقادیر ناسلت در یک محفظه با عدم تعادل حرارتی برای $Ra=1000$. ۵۶
- جدول ۴-۴: مقایسه مقادیر ناسلت در یک محفظه با عدم تعادل حرارتی برای $Ra=1500$. ۵۶
- جدول ۱-۵: تست مستقل بودن شبکه از تعداد گره. ۶۴
- جدول ۲-۵: مقادیر اعداد بدون بعد. ۷۶
- جدول ۳-۵: تست مستقل بودن شبکه از تعداد گره. ۷۶
- جدول ۴-۵: مقادیر اعداد بدون بعد برای دو حالت B, C. ۸۱
- جدول ۱-۶: دمای سیال در مرکز حفره در حالت پایا و عدم تعادل حرارتی. ۹۷
- جدول ۲-۶: دمای جامد در مرکز حفره در حالت پایا و عدم تعادل حرارتی. ۹۷
- جدول ۳-۶: جزء غلظت ۱ در مرکز حفره در حالت پایا و عدم تعادل حرارتی. ۹۷
- جدول ۴-۶: جزء غلظت ۲ در مرکز حفره در حالت پایا و عدم تعادل حرارتی. ۹۷

فهرست علامتها و اختصارها

A	مساحت یا ضرایب ثابت معادله
C_E	ثابت بدون بعد درگ
C_P	ضریب گرمای ویژه
d	قطر ذرات در محیط متخلخل
D	ارتفاع محفظه یا قابلیت نفوذپذیری در سطوح سیال یا ضریب هدایت در معادله
D_p	قطر هیدرولیکی
E	نمایش گره در گسسته‌سازی
e	نمایش سطوح حجم کنترل در گسسته‌سازی
F	قدرت جابجایی
g	شتاب جاذبه
g_s	تابعی برای شرط مرزی
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی با بعد بین دو فاز سیال و جامد
H	ضریب انتقال حرارت جابجایی در حالت بدون بعد یا ارتفاع حفره
k	ضریب هدایت حرارتی
k_D	ثابت مرگ و میر
k_s	نصف ثابت اشباع
K	ضریب نفوذ پذیری
L_e	عدد لوئیس
m	تکرار برای حل
M_s	وزن ملکولی
\dot{m}	دبی جرمی
N	نمایش گره در گسسته‌سازی
n	نمایش سطوح حجم کنترل در گسسته‌سازی
Nu	عدد ناسلت
p	فشار
q'''	نرخ حرارت تولیدی داخلی بر واحد حجم
q	گرمای تولیدی با بعد
Q	گرمای تولیدی بدون بعد
Ra	عدد رایلی
S	عبارت چشمه یا غلظت یا نمایش گره در گسسته‌سازی

s	نمایش سطوح حجم کنترل در گسسته‌سازی
\dot{s}	نرخ تولید یا مصرف غلظت
T	دما
T^*	پیچش محیط
t	زمان
u	مولفه سرعت افقی
U	مولفه سرعت افقی بدون بعد
v	مولفه سرعت عمودی
V	مولفه سرعت عمودی بدون بعد یا حجم
\vec{V}	برداری سرعت
W	عمق المان یا نمایش گره در گسسته‌سازی
w	نمایش سطوح حجم کنترل در گسسته‌سازی یا ثابت تناسب
x	برداری مختصات افقی با بعد
X	برداری مختصات افقی بدون بعد
y	برداری مختصات عمودی با بعد
Y	برداری مختصات عمودی بدون بعد
	علائیم یونانی
α	ضریب نفوذ حرارتی
β	ضریب انبساط حجمی
Γ	نسبت ضرایب پخش تصحیح شده محیط متخلخل
ΔH_s	آنتالپی واکنش
ε	میزان خطا یا ضریب تخلخل تغییر یافته
Φ	متغیر کلی
φ	ضریب تخلخل
γ	نسبت ضریب حرارتی هدایتی تصحیح شده در محیط متخلخل
μ	ویسکوزیته دینامیکی یا حداکثر نرخ رشد مخصوص
$\tilde{\mu}$	ویسکوزیته معادل
ν	ویسکوزیته سینماتیکی
θ	دمای بدون بعد
ρ	چگالی
σ	نسبت ظرفیت

τ	زمان بدون بعد
ψ	تابع جریان
A_v	زیر نویس ها
c	متوسط
eff	سرد
f	مقدار موثر
h	سیال
max	گرم
o	ماکزیمم
S	مقدار اولیه
w	جامد
x	دیوار
y	جهت افقی
n	جهت عمودی
t	بالا نویس ها
$-$	عمود
$*$	مماس
$''$	مقدار متوسط
$'''$	پارامتر بعددار
	بر واحد مساحت
	بر واحد حجم

فصل اول

مقدمه

ماده متخلخل، محیط غیرهمگنی است که بین ذرات تشکیل دهنده آن فضای خالی وجود دارد. در صورت وجود تنها یک سیال بین ذرات جامد، محیط را اصطلاحاً محیط متخلخل اشباع می‌نامند. در محیط‌های متخلخل طبیعی، شکل و نحوه قرار گرفتن ذرات نسبت به هم کاملاً تصادفی بوده و هیچ قانون خاصی بر نحوه پراکندگی آن‌ها حاکم نیست. به عنوان مثال می‌توان به ذرات ماسه در یک بستر شنی اشاره کرد. واضح است که در این محیط مشخصات سیال مانند سرعت، فشار و دما از دیدگاه میکروسکوپی^۱ کاملاً تصادفی می‌باشند. البته نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقادیر ماکروسکوپی^۲ این متغیرها کاملاً قانونمند و قابل پیش‌بینی می‌باشد، این متغیرها را اصطلاحاً متغیرهای میانگین فضایی^۳ می‌نامند.

انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محیط متخلخل، در دو دهه اخیر به دلیل کاربردهای فراوان به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از کاربردهای محیط‌های متخلخل مربوط به خنک کردن وسایل الکتریکی (شکل ۱-۱ الف)، نگهداری از دانه‌ها، غلات، محصولات کشاورزی و جلوگیری از رشد آفات (مثل قارچ‌ها، کپک‌ها، جوانه‌زنی دانه‌ها) در انبارها و سیلوها (شکل ۱-۱ ب)، محکم‌کاری و استحکام ساحل‌ها، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی، ساختن عایق‌های حرارتی، افزایش بازیافت مواد نفتی، استخرهای ذخیره سوخت، ذخیره‌سازی ضایعات هسته‌ای، طراحی راکتورهای هسته‌ای و شیمیایی و گرمادایی از آن‌ها (شکل ۱-۱ ج) و ... می‌باشند.

یکی از وسایل الکتریکی پیشرفته امروزی کامپیوتر است. در دنیای مدرن امروز از کامپیوترهای شخصی گرفته تا کامپیوترهای غول‌پیکر به صورت‌های مختلف در کارهای روزمره و نیز پژوهش‌های علمی استفاده می‌شود. به این ترتیب از کار افتادن هر یک از سیستم‌های کامپیوتر می‌تواند زیان‌های جبران ناپذیری را به بخش‌های مختلف وارد کند.

-
- 1-Microscopic
 - 2- Macroscopic
 - 3- Space average quantitie