

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

رساله برای دریافت درجه دکتری  
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

مقایسه روش های محیط پیوسته و پیوسته متخلخل در بررسی پدیده انتقال در جابجایی طبیعی  
در محیط متخلخل و بررسی فاکتورهای موثر جهت بهینه نمودن روش پیوسته متخلخل

نام دانشجو

مهدی میانسری

استاد راهنما:

دکتر مفید گرچی

# کپی فرم صورت جلسه دفاع دانشگاه صنعتی نوشیروانی که مهمور به تحصیلات تکمیلی است

نام دانشکده: مهندسی مکانیک

نام دانشجو: مهدی میانسری

عنوان پایان نامه یا رساله: مقایسه مدل های محیط پیوسته و پیوسته متخلخل در بررسی پدیده انتقال در جابجایی طبیعی در

محیط متخلخل و بررسی فاکتورهای موثر جهت بهینه نمودن مدل پیوسته متخلخل

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی مکانیک

گرایش: تبدیل انرژی

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	آقای دکتر مفید گرجی	استاد	دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل	
۲	استاد مدعو خارجی	آقای دکتر کوثری	استاد	دانشگاه تهران	
۳	استاد مدعو داخلی	آقای دکتر رنجبر	استاد	دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل	
۴	استاد مدعو داخلی	آقای دکتر شفقت	دانشیار	دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل	

# تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج و مالکیت مادی و معنوی

## باسمه تعالی

اینجانب مهدی میانسری به شماره دانشجویی ۸۸۵۱۳۰۰۰۳ دانشجوی رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی مقطع تحصیلی دکتری تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه ارشد/رساله دکتری تحت عنوان مقایسه مدل‌های محیط پیوسته و پیوسته متخلخل در بررسی پدیده انتقال در جابجایی طبیعی در محیط متخلخل و بررسی فاکتورهای موثر جهت بهینه نمودن مدل پیوسته متخلخل به استاد راهنمایی دکتر مفید گرجی حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت. در ضمن تمام دستاوردهای مادی و معنوی حاصله از پایان‌نامه ارشد/رساله دکتری متعلق به دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد و اینجانب هیچ‌گونه ادعایی در قبال آن ندارم.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

## مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تقدیم به:

مادرم،

دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر، او که راستی قامت در شکستگی قامتش تجلی یافت.

و همسرم،

که سایه مهربانیش سایه سار زندگی می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

و دخترم،

النای عزیز که نگاهش همواره برای من آرامش بخش بوده

و روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.

## تشکر و قدردانی:

از استاد گرامیم جناب آقای پرفسور مفید گرجی بسیار سپاسگذارم چرا که بدون راهنماییهای ایشان انجام این پایان نامه بسیار مشکل می نمود.

از جناب آقای دکتر هومن کامل به دلیل یاریها و راهنماییهای بی چشمداشت ایشان که بسیاری از سختیها را برایم آسانتر نموده و همواره راهنما و راه گشای نگارنده در اتمام و اكمال پایان نامه بوده، کمال قدردانی و تشکر بعمل می آید.

## چکیده

مطالعه پدیده انتقال حرارت و جریان سیال در یک محیط متخلخل مورد علاقه بسیاری از علوم مهندسی از قبیل مکانیک، شیمی و عمران می باشد. برخی از کاربردهای آنها شامل پروسه‌های خشک نمودن، اکتشاف و استخراج نفت، خنک کاری تجهیزات الکترونیک و... می باشد. جهت این مطالعات روشهای گوناگونی پیشنهاد گردید. از جمله این روشها، روش محیط پیوسته بوده که در آن فازهای جامد و مایع به طور جداگانه مدل شده، و البته نیاز به تعریف سطوح مشترک مایع-جامد داشته و در نتیجه برای محیط های متخلخل پیچیده، مدل سازی و همچنین انتخاب نوع و تعداد شبکه مناسب، اندکی دشوار خواهد بود. این مطلب ممکن است بر زمان اجرای برنامه‌ها نیز تاثیر گذاشته و آنها را طولانی تر نماید. اما روش دیگر، روش پیوسته متخلخل بوده که در آن فازهای جامد و مایع با انتگرال گیری از میدان حل، به طور پیوسته در نظر گرفته می شوند. لذا با توجه به در نظر گرفتن یک محیط یکنواخت در میدان حل، نیاز به مدل سازی دقیق سطوح مشترک جامد-مایع نداشته و امکان انتخاب شبکه درشت تر و در نتیجه زمان اجرای کمتر برنامه‌ها وجود دارد. اما در مطالعه جابجایی طبیعی در محیط متخلخل در محدوده اعداد رایلی بالا، نتایج روش پیوسته متخلخل با نتایج متناظرش در روش محیط پیوسته اختلاف داشته، لذا در اعداد رایلی بالا نیاز به بررسی بیشتر روش پیوسته متخلخل در مقایسه با روش محیط پیوسته و بررسی امکان بهبود آن وجود دارد. در این تحقیق روش محیط پیوسته در جابجایی طبیعی در یک محیط متخلخل شامل بلوک های هادی جامد با توزیع منظم و تصادفی، با روش پیوسته متخلخل در حالت دو بعدی و سه بعدی مورد مقایسه قرار گرفت. به جهت بهبود روش پیوسته متخلخل حاضر، دو حالت تک معادله ای و دو معادله ای انرژی (با در نظر گرفتن عبارات پراکندگی حرارتی و عدم تعادل دمایی موضعی) مورد بررسی قرار گرفت. عدد ناسلت متوسط محفظه، خطوط جریان و ایزوترم بدست آمده از روش محیط پیوسته در بازه وسیعی از اعداد رایلی، تخلخل و نسبت ضرایب هدایت حرارتی جامد-مایع با مقادیر متناظر آن در روش پیوسته متخلخل مورد مقایسه قرار گرفت. برای انجام آن، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم کنترل، گسسته شده و طرح توان پیرو جهت محاسبه ضرایب معادلات گسسته استفاده گردید. همچنین به منظور محاسبه میدان فشار و ارتباط آن با میدان سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده گردیده و در ادامه جهت تولید نتایج دو روش یک کد کامپیوتری فرترن نوشته شده است. در نهایت سعی گردید روش پیوسته متخلخل با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی تکاملی، بهینه گردد. نتایج نشان داد که در تخلخل های بالا نتایج دو روش به یکدیگر نزدیک می باشد. همچنین مشاهده گردید که در نظر گرفتن عبارات پراکندگی حرارتی و عدم تعادل دمایی موضعی می تواند باعث بهبود پروسه انتقال حرارت در اعداد رایلی بالا بخصوص در نسبت ضرایب هدایت حرارتی جامد-مایع پایین تر شده، و این اثر مثبت می تواند با افزایش اندازه بلوکهای جامد و عدد دارسی، بیشتر نیز گردد. همچنین مشاهده گردید که در اعداد رایلی پایین تاثیر عبارت پراکندگی حرارتی و عدم تعادل دمایی موضعی ناچیز بوده و در نتیجه می توان در مدل سازی روش پیوسته متخلخل از این عبارات صرف نظر نمود، و نیز نشان داده شد که با تغییر ضرایب عبارات پراکندگی حرارتی و عدم تعادل دمایی موضعی می توان به نتایج بهینه تری در روش پیوسته متخلخل در مقایسه با روش محیط پیوسته در اعداد رایلی بالا دست یافت. نتایج مدل سازیهای سه بعدی نشان داد دو روش مطابقت خوبی در میدان سه بعدی نیز با یکدیگر دارند.

**واژه‌های کلیدی:** روش محیط پیوسته، روش پیوسته متخلخل، عدم تعادل دمایی موضعی، پراکندگی حرارتی



## فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۱۱	فصل ۲: مروری بر مطالعات انجام گرفته
۱۲	۱-۲ مروری بر مطالعات روش <i>CM</i>
۱۵	۲-۲ مروری بر مطالعات روش <i>PCM</i>
۲۳	فصل ۳: معرفی معادلات حاکم و روش حل
۲۴	۱-۳ معادلات حاکم
۲۴	۱-۱-۳ معادلات حاکم در روش <i>CM</i>
۲۵	۱-۱-۳ معادلات حاکم در روش <i>PCM</i>
۲۸	۲-۳ هندسه مورد مطالعه
۳۰	۳-۳ شرایط مرزی
۳۰	۱-۳-۳ شرایط مرزی در روش <i>CM</i>
۳۱	۲-۳-۳ شرایط مرزی در روش <i>PCM</i>
۳۲	۴-۳ بی بعد سازی معادلات حاکم
۳۲	۱-۴-۳ بی بعد سازی معادلات حاکم در روش <i>CM</i>
۳۳	۲-۴-۳ بی بعد سازی معادلات حاکم در روش <i>PCM</i>
۳۵	۵-۳ بررسی مدل های مختلف عبارات <i>TD</i> و <i>LTNE</i>
۳۶	۶-۳ معرفی روش حل معادلات
۴۴	۷-۳ بهینه سازی روش <i>PCM</i>
۴۴	۱-۷-۳ الگوریتم بهینه سازی هوشمند ازدحام ذرات ( <i>PSO</i> )

۴۷	۲-۷-۳ مدل‌سازی توسط شبکه عصبی فازی (ANFIS)
۵۰	<b>فصل ۴: نتایج و بحث</b>
۵۱	۱-۴ نتایج محفظه متخلخل با توزیع منظم بلوک های جامد در آن
۵۱	۱-۱-۴ بررسی وابستگی نتایج به شبکه
۵۳	۲-۱-۴ اعتبار آزمایشی
۵۵	۳-۱-۴ انتخاب مدل های مناسب عبارات <i>TD</i> و <i>LTNE</i>
۵۹	۴-۱-۴ نتایج مربوط به مقایسه خطوط جریان و ایزوترم دو روش در شرایط مختلف
۶۹	۵-۱-۴ بررسی تاثیر عبارت <i>TD</i> و <i>LTNE</i> بر روی روش <i>PCM</i> در مقایسه با روش <i>CM</i>
۷۷	۲-۴ مقایسه زمان اجرای برنامه های روش های <i>CM</i> و <i>PCM</i>
۷۸	۳-۴ نتایج محفظه متخلخل با توزیع تصادفی بلوک های جامد در آن
۷۸	۱-۳-۴ بررسی وابستگی نتایج به شبکه
۸۰	۲-۳-۴ اعتبار آزمایشی
۸۱	۳-۳-۴ نتایج مربوط به مقایسه خطوط جریان و ایزوترم دو روش در شرایط مختلف
۸۹	۴-۳-۴ بررسی تاثیر عبارت <i>TD</i> و <i>LTNE</i> بر روی روش <i>PCM</i> در مقایسه با روش <i>CM</i>
۹۴	۴-۴ نتایج مربوط به مدل سازی سه بعدی ( <i>3D</i> )
۹۶	۱-۴-۴ نتایج مربوط به شرایط مرزی متقارن
۹۸	۲-۴-۴ نتایج مربوط به شرایط مرزی نامتقارن
۱۰۱	۵-۴ بهینه سازی روش <i>PCM</i>
۱۱۲	<b>فصل ۵: جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهادات</b>

۱۱۳

۱-۵ جمع بندی

۱۱۶

۲-۵ ارائه پیشنهادات

۱۱۷

مراجع

## فهرست شکل ها

- شکل (۱-۱) نوسان سرعت نقطه ای اندازه گیری شده ..... ۳
- شکل (۲-۱) سیر تکاملی از روش مولکولی به روش *PCM* ..... ۵
- شکل (۳-۱) نمایی از یک المان حجم نمونه ..... ۶
- شکل (۴-۱) پراکندگی ناشی از جریان و موانع هندسی ..... ۸
- شکل (۱-۲) مقایسه نتایج مدل داریسی ، تجربی و مدل پیوسته متخلخل با در نظر گرفتن پراکندگی ..... ۱۷
- شکل (۲-۲) مقایسه عدد ناسلت دیواره گرم در دو روش *CM* و *PCM* در اعداد رایلی مختلف ..... ۲۰
- شکل (۳-۲) مقایسه عدد ناسلت دیواره گرم در دو روش *CM* و *PCM* در اعداد رایلی مختلف ..... ۲۱
- شکل (۱-۳) نمایی از یک محفظه متخلخل با توزیع منظم بلوک های جامد و شرایط مرزی آن ..... ۲۹
- شکل (۲-۳) نمایی از یک محفظه متخلخل با توزیع تصادفی بلوک های جامد و شرایط مرزی آن ..... ۳۰
- شکل (۳-۳) نمایی از حجم کنترل های نمونه *u* و *v* در صفحه *xy* ..... ۳۷
- شکل (۴-۳) نمایی از حجم کنترل های نمونه *u* و *w* در صفحه *xz* ..... ۳۷
- شکل (۵-۳) نمایی از حجم کنترل های نمونه *v* و *w* در صفحه *yz* ..... ۳۸
- شکل (۶-۳) الگوریتم سیمپل ..... ۴۳
- شکل (۷-۳) سرعت و موقعیت ذرات در یک فضای تابعی نمونه ..... ۴۶
- شکل (۱-۴) نمایی از شبکه یکنواخت دو بعدی با تعداد گره های ..... ۵۲
- شکل (۲-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش *CM* در تخلخل 0.64 و نسبت ضرایب هدایت حرارتی مختلف ..... ۵۴
- شکل (۳-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش *PCM* به همراه *TD* در حالت  $\epsilon=0.36$ ،  $D=0.1$ ،  $\kappa=1$ ،  $Pr=5$  و  $A=1$  ..... ۵۵
- شکل (۴-۴) مقایسه مدل های مختلف عبارات *TD* ..... ۵۸
- شکل (۵-۴) خطوط جریان در  $Ra=10^8$  : (الف) *CM* (ب) *PCM* به همراه عبارات *TD* و *LTNE* ..... ۶۰
- شکل (۶-۴) مقایسه مولفه عمودی سرعت بی بعد (الف) و دمای بی بعد (ب) ..... ۶۲
- شکل (۷-۴) خطوط ایزوترم در  $Ra=10^8$  : (الف) *CM* (ب) *PCM* به همراه عبارات *TD* و *LTNE* ..... ۶۴
- شکل (۸-۴) خطوط جریان در  $\epsilon=0.64$  و  $\kappa=1$  : (الف) *CM* (ب) *PCM* به همراه عبارات *TD* و *LTNE* ..... ۶۵
- شکل (۹-۴) خطوط ایزوترم در  $\epsilon=0.64$  و  $\kappa=1$  : (الف) *CM* (ب) *PCM* به همراه عبارات *TD* و *LTNE* ..... ۶۶
- شکل (۱۰-۴) مقایسه مولفه عمودی سرعت بی بعد در صفحه میانی محفظه بین روشهای *CM* و *PCM* ..... ۶۶
- شکل (۱۱-۴) خطوط جریان در  $Ra=10^5$  : (الف) *CM* (ب) *PCM* به همراه عبارات *TD* و *LTNE* ..... ۶۷
- شکل (۱۲-۴) خطوط ایزوترم در  $Ra=10^5$  : (الف) *CM* (ب) *PCM* به همراه عبارات *TD* و *LTNE* ..... ۶۸
- شکل (۱۳-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش *CM* و مدل های مختلف *PCM* ..... ۷۰
- شکل (۱۴-۴) درصد اختلاف درجه حرارت موضعی بین فازهای جامد و مایع (الف)  $Ra=10^8$  (ب)  $Ra=10^5$  ..... ۷۳

- شکل (۱۵-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش CM و مدل های مختلف PCM ..... ۷۵
- شکل (۱۶-۴) نمایی از شبکه یکنواخت دو بعدی ..... ۷۸
- شکل (۱۷-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش CM در تخلخل 0.96 ..... ۸۰
- شکل (۱۸-۴) خطوط جریان در  $Ra=10^8$ : (الف) CM (ب) PCM به همراه عبارات TD و LTNE ..... ۸۲
- شکل (۱۹-۴) مقایسه مولفه عمودی سرعت بی بعد (الف) و دمای بی بعد (ب) ..... ۸۳
- شکل (۲۰-۴) خطوط ایزوترم در  $Ra=10^8$ : (الف) CM (ب) PCM به همراه عبارات TD و LTNE ..... ۸۶
- شکل (۲۱-۴) خطوط جریان در  $Ra=10^5$ : (الف) CM (ب) PCM به همراه عبارات TD و LTNE ..... ۸۷
- شکل (۲۲-۴) خطوط ایزوترم در  $Ra=10^5$ : (الف) CM (ب) PCM به همراه عبارات TD و LTNE ..... ۸۸
- شکل (۲۳-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش CM و مدل های مختلف PCM در  $\varepsilon=0.64$  ..... ۸۹
- شکل (۲۴-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش CM و مدل های مختلف PCM در  $\varepsilon=0.84$  ..... ۹۰
- شکل (۲۵-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از روش CM و مدل های مختلف PCM در  $\varepsilon=0.96$  ..... ۹۱
- شکل (۲۶-۴) مقایسه مولفه عمودی سرعت بی بعد در صفحه میانی در روشهای CM و PCM ..... ۹۳
- شکل (۲۷-۴) نمایی از یک محفظه متخلخل سه بعدی با توزیع منظم بلوک های جامد در آن ..... ۹۵
- شکل (۲۸-۴) خطوط ایزوترم روش PCM: (الف)  $Ra=10^7$  (ب)  $Ra=10^8$  ..... ۹۶
- شکل (۲۹-۴) خطوط ایزوترم در  $Ra=10^5$ : (الف) CM (ب) PCM ..... ۹۶
- شکل (۳۰-۴) الگوی جریان در  $Ra=10^7$  روش PCM: (الف) 3D (ب) 2D ..... ۹۷
- شکل (۳۱-۴) خطوط ایزوترم در  $Ra=10^7$  روش PCM: (الف) 3D (ب) 2D ..... ۹۷
- شکل (۳۲-۴) خطوط ایزوترم در  $Ra=10^5$ : (الف) CM (ب) PCM ..... ۹۸
- شکل (۳۳-۴) الگوی جریان در  $Ra=10^5$ : (الف) CM (ب) PCM ..... ۹۹
- شکل (۳۴-۴) خطوط ایزوترم روش PCM در  $Ra=10^7$  ..... ۱۰۰
- شکل (۳۵-۴) خطوط ایزوترم روش PCM در  $Ra=10^8$  ..... ۱۰۰
- شکل (۳۶-۴) الگوی جریان روش PCM: (الف)  $Ra=10^7$  (ب)  $Ra=10^8$  ..... ۱۰۰
- شکل (۳۷-۴) نمودار توابع عضویت ورودی نمونه، الف: ورودی یک (TD)، ب: ورودی دو (LTNE) ..... ۱۰۴
- شکل (۳۸-۴) ساختار ANFIS هم ارز با سیستم فازی تاکاگی-سوگنو ..... ۱۰۵
- شکل (۳۹-۴) مقایسه نتایج مدل PCM و مدل های عصبی-فازی (ANFIS) ساخته شده ..... ۱۰۶
- شکل (۴۰-۴) باقیمانده توابع هزینه الگوریتم PSO ..... ۱۰۸
- شکل (۴۱-۴) مقایسه عدد ناسلت متوسط حاصل از روش PCM بهبود یافته با روشهای CM و PCM اولیه ..... ۱۱۰

## فهرست جدول ها

- جدول (۱-۲) مقایسه عدد ناسلت میانگین برای موانع با مقاطع مربعی و دایره ای ..... ۱۴
- جدول (۲-۲) مقایسه عدد ناسلت بدست آمده در مدل پیوسته متخلخل با عبارت پراکندگی و بدون آن ..... ۱۶
- جدول (۱-۳) مدل های مختلف ضریب انتقال حرارت جابجایی مربوط به عبارت  $LTNE$  ..... ۳۵
- جدول (۲-۳) مدل های مختلف ضریب پراکندگی مربوط به عبارت  $TD$  ..... ۳۶
- جدول (۱-۴) تاثیر اندازه شبکه بر روی  $Nu_{av}$  در حالت  $\varepsilon=0.64$ ،  $D=0.1$ ،  $Ra=10^7$ ،  $\kappa=1$  ..... ۵۱
- جدول (۲-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از مدل های مختلف عبارت  $TD$  در  $\varepsilon=0.64$  و  $\kappa=1$  ..... ۵۷
- جدول (۳-۴) مقایسه  $Nu_{av}$  حاصل از مدل های مختلف عبارت  $LTNE$  در  $\varepsilon=0.64$  و  $\kappa=1$  ..... ۵۹
- جدول (۴-۴) خلاصه ای از پارامترهای مورد استفاده در مطالعه محفظه متخلخل با توزیع منظم بلوک ها ..... ۵۹
- جدول (۵-۴) مقایسه زمان اجرای برنامه های روش  $CM$  و  $PCM$  ..... ۷۷
- جدول (۶-۴) تاثیر اندازه شبکه بر روی  $Nu_{av}$  در حالت  $\varepsilon=0.84$ ،  $Ra=10^8$ ،  $\kappa=1$  و  $K_{pc}=1.778$  ..... ۷۹
- جدول (۷-۴) خلاصه ای از پارامترهای مورد استفاده در مطالعه محفظه متخلخل با توزیع تصادفی بلوک ها ..... ۸۱
- جدول (۸-۴) ترکیب حالت های مختلف ضرایب عبارات  $TD$  و  $LTNE$  در روش  $PCM$  ..... ۱۰۳
- جدول (۹-۴) اطلاعات مربوط به ساختار مدل  $ANFIS$  ساخته شده ..... ۱۰۳
- جدول (۱۰-۴) پارامترهای توابع عضویت گوسی ورودی نمونه ..... ۱۰۴
- جدول (۱۱-۴) پارامترهای توابع عضویت خروجی نمونه ..... ۱۰۴
- جدول (۱۲-۴) پارامترهای مورد استفاده در مدل های ساخته شده  $ANFIS$  ..... ۱۰۶
- جدول (۱۳-۴) پارامترهای مورد استفاده در مدل های ساخته شده  $ANFIS$  ..... ۱۰۶
- جدول (۱۴-۴) ضرایب بهینه  $TD$  و  $LTNE$  حاصل از الگوریتم بهینه سازی  $PSO$  ..... ۱۰۹
- جدول (۱۵-۴) عبارات بهینه  $TD$  و  $LTNE$  در روش  $PCM$  ..... ۱۰۹

## فهرست نمادها

$A$ .....	نسبت ابعاد محفظه.....
$\bar{B}$ (N/m <sup>3</sup> ).....	نیروی درگ کلی به واحد حجم.....
$Bi$ .....	عدد Biot اصلاح شده.....
$a_{sf}$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ).....	مساحت سطح ویژه.....
$c_{pf}$ (J/kg K).....	گرمای ویژه در فشار ثابت سیال.....
$D$ (m).....	اندازه طول بلوک جامد.....
$Da$ .....	عدد دارسی.....
$F$ .....	ضریب درگ شکلی.....
$g$ (m/s <sup>2</sup> ).....	شتاب ثقل.....
$H$ (m).....	ارتفاع محفظه.....
$h$ (W/m <sup>3</sup> K).....	ضریب انتقال حرارت جابجایی حجمی.....
$h_{sf}$ (W/m <sup>2</sup> K).....	ضریب انتقال حرارت جابجایی.....
$\bar{j}$ .....	بردار واحد در جهت $y$ .....
$K$ (m <sup>2</sup> ).....	نشت پذیری.....
$k$ (W/m K).....	ضریب هدایت حرارتی.....
$k_d$ (W/m K).....	ضریب پراکندگی حرارتی.....
$L$ (m).....	طول محفظه.....
$N$ .....	تعداد بلوک های جامد در محفظه.....
$Nu$ .....	عدد ناسلت.....
$Pr$ .....	عدد پراند.....
$P$ (Pa).....	فشار.....
$q''$ (W/m <sup>2</sup> ).....	شارحرارتی هدایتی.....
$Ra$ .....	عدد رایلی.....
$Re$ .....	عدد رینولدز.....
$T$ (K).....	دما.....
$u$ (m/s).....	مولفه سرعت در جهت $x$ .....
$v$ (m/s).....	مولفه سرعت در جهت $y$ .....
$\vec{V}$ (m/s).....	بردار سرعت.....
$V$ (m <sup>3</sup> ).....	حجم.....
$x', y'$ .....	مختصات ماکروسکوپیک کارتزین.....
$x, y$ .....	مختصات میکروسکوپیک کارتزین.....

## حروف یونانی

$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s).....	ضریب نفوذ گرما.....
$\beta$ (1/K).....	ضریب انبساط حجمی گرمایی فشار ثابت.....
$\varepsilon$ .....	تخلخل.....
$\xi, \eta$ .....	مختصات بی بعد.....
$\kappa$ .....	نسبت ضرایب هدایت حرارتی جامد-مایع.....
$\mu$ (Pa.s).....	ویسکوزیته دینامیکی.....
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s).....	ویسکوزیته سینماتیکی.....
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ).....	چگالی.....
$\theta$ .....	دمای بی بعد.....

## زیر نویس

$av$ .....	متوسط.....
$c$ .....	سرد.....
$d$ .....	پراکندگی.....
$eff$ .....	موثر.....
$f$ .....	مایع.....
$h$ .....	گرم.....
$s$ .....	جامد.....
$sf$ .....	جامد-مایع.....
$m$ .....	میانگین.....
$pc$ .....	پیوسته متخلخل.....

## بالا نویس

$f$ .....	مایع.....
$s$ .....	جامد.....



# فصل ۱

## مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

یک محیط متخلخل محیطی است که به صورت جزئی با مواد جامد که به آن ماتریس جامد<sup>۱</sup> گفته می‌شود، پر شده باشد. بخشی از فضا که با مواد جامد پر نشده، غالباً به هم پیوسته بوده و خلل و فرج<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

به دلیل ذات هندسی پیچیده و ناشناخته محیط متخلخل، بررسی پدیده انتقال در آن مشکل و پیچیده می‌باشد. از طرف دیگر کاربرد روزافزون محیط‌های متخلخل در صنایع و فرآیندها، لزوم استفاده از روش‌های بهتر و مؤثرتر جهت مطالعه پدیده انتقال سیال را کاملاً ضروری نموده است. مطالعه پدیده انتقال حرارت و جریان سیال در یک محیط متخلخل مورد علاقه بسیاری از علوم مهندسی از قبیل مکانیک، شیمی و عمران می‌باشد. برخی از کاربردهای آنها شامل پروسه‌های خشک نمودن در فرآوری مواد غذایی، اکتشاف و استخراج نفت، خنک کاری تجهیزات الکترونیک و... می‌باشد. جهت این مطالعات روش‌های گوناگونی پیشنهاد گردید. یک روش کلاسیک که فازهای جامد و مایع را به طور جداگانه بررسی نموده و معادلات ناویر استوکس را در فاز مایع و معادلات انرژی موضعی را در فازهای جامد و مایع حل می‌نماید، روش محیط پیوسته<sup>۳</sup> (CM) نام گرفته که البته نیاز به تعریف سطوح مشترک مایع- جامد داشته و در نتیجه برای محیط‌های پیچیده متخلخل اندکی دشوار خواهد شد [۱]. این مطلب در انتخاب نوع و اندازه شبکه و در نتیجه زمان اجرای برنامه‌ها نیز تاثیر گذار می‌باشد. موانع جامد در داخل محیط متخلخل با اعمال شرط عدم لغزش در سطوح مشترک جامد- مایع بطور غیرمستقیم در انتقال ممنوم با مایع مشارکت داشته که البته این نقش در انتقال انرژی در عرض محفظه با توجه به هادی بودن بلوک‌های جامد، بسیار مؤثرتر می‌باشد.

---

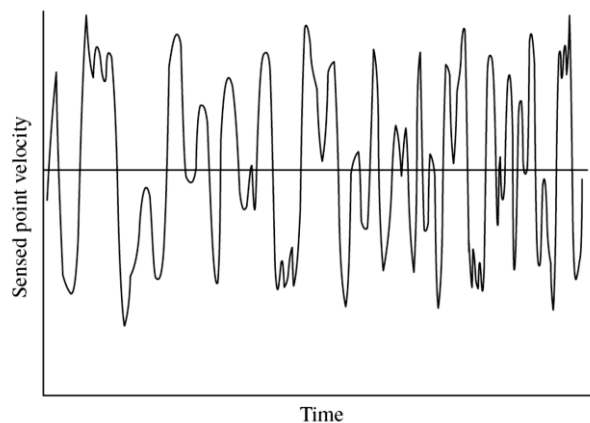
1- Solid matrix

2 - Pore

3 Continuum Model

روش دیگری که مشکلات مربوط به اطلاعات مدل سازی در سطح خلل و فرج را نداشته و از طریق متوسط گیری بر روی المان حجم نمونه انجام می گیرد، روش پیوسته متخلخل<sup>۱</sup> (PCM) نامیده می شود. مفهوم متوسط گیری حجمی که در این روش استفاده می شود را می توان دنبال رو فرضیه پیوستگی (محیط پیوسته) دانسته و در واقع همانطور که فرضیه محیط پیوسته یک سطح بالاتر از فرضیه مولکولی می باشد، این مفهوم (فرضیه پیوسته متخلخل) نیز یک سطح بالاتر از فرضیه محیط پیوسته بوده که در ادامه به سیر تکاملی این سه سطح اشاره می شود.

در فرضیه مولکولی مطالعه جریان سیال با استفاده از حرکت تصادفی یک مولکول مجزا صورت می گیرد. در این روش اگر یک حسگر سرعت با اندازه کوچکتر و یا حداکثر قابل قیاس با اندازه مولکول موجود باشد آنگاه سرعت اندازه گیری شده و یا حس شده در یک نقطه واقع در میدان جریان، با زمان دارای نوسان خواهد بود (شکل ۱-۱). این سرعت نقطه ای حس شده می تواند ارائه گر حرکت انفرادی مولکول ها باشد. گرچه این روش با مقیاس مولکولی، از نظر فرمولی اساسی به نظر می رسد، اما از نظر کاربردی غیرعملی است. که این به خاطر تعداد زیاد برهم کنش بین مولکول ها به لحاظ تعداد بسیار زیاد مولکول های گاز یا مایع می باشد.



شکل ۱-۱: نوسان سرعت نقطه ای اندازه گیری شده [۱۱]

<sup>1</sup> Porous Continuum Model

بهر حال در مطالعات، بهتر می باشد مطالعه رفتار جریان در یک مقیاس بزرگتر یا ماکروسکوپیک که چند مرتبه بزرگتر از مقیاس مولکولی و یا فاصله بین مولکولی باشد صورت گیرد. در مقیاس ماکروسکوپیک، مطالعه سیالات و حرکتشان از طریق مقادیر فیزیکی مانند چگالی، گرمای ویژه و سرعت بدست آمده از طریق متوسط گیری بر روی سیال موجود در حجم ماکروسکوپیک، امکان پذیر می باشد. از نظر فیزیکی حجم ماکروسکوپیک می تواند خیلی کوچک، در حد  $O(10^3 \text{ nm}^3)$  باشد. اما حتی در این مقیاس کوچک تعداد مولکول های موجود در آن بسیار زیاد است. به عنوان مثال اگر در این حجم یک گاز تحت فشار اتمسفر و دمای اتاق را در نظر بگیریم، تعداد مولکول های آن از مرتبه  $10^4$  می باشد.

در این جا با پیروی از فرضیه پیوستگی، مقادیری از قبیل چگالی سیال، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و ... از طریق متوسط گیری بر روی حجم ماکروسکوپیک که شامل تعداد زیادی از مولکول های سیال می باشد، بدست آمده و معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی توسعه پیدا کرده و با استفاده از این فرضیه حرکت سیال توصیف می شود.

جریان سیال در محیط متخلخل را می توان با حل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی، مورد مطالعه قرار داد. اما همانطور که در معرفی این روش ( $CM$ ) در بالا اشاره شد، مشکل از این جا نشأت می گیرد که معادلات حاکم می بایستی براساس شرایط مرزی متداول حل شوند که از جمله آن می توان به شرط عدم لغزش در سطح جامد موجود در ماتریس محیط متخلخل اشاره نمود. اما با توجه به اینکه هندسه کانال های محیط متخلخل نسبتاً پیچیده و روی هم رفته ناشناخته هستند، لذا حل این جریانات با ابر کامپیوترهای امروزی هم با مشکل و صرف زمان زیاد انجام پذیر می باشد.

برای رفع این مشکل نیاز می باشد فرضیه پیوستگی در مقیاس خیلی بزرگتر بررسی گردیده که در آن متوسط گیری بر روی حجم به اندازه کافی بزرگ، که بسیاری از خلل و فرج ها و سطوح را در بر دارد، انجام گیرد. در این فرضیه که آن را می توان فرضیه پیوستگی مرتبه دوم نامید، مقیاس ماکروسکوپیک به کار رفته در این حالت از مرتبه  $O(10^2)$  ابعاد خلل و فرج بوده و در صورتی که در روش  $CM$ ، مقیاس ماکروسکوپیک خیلی کوچک، و از مرتبه  $O(10^2)$  ابعاد مولکولی می باشد.