دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی (PhD)
رشته مهندسی عمران گرایش هیدرولیک

شبیه سازی عددی انتقال بار بستر با استفاده از جریانهای دو فازی اولری-لاگرانژی

علی نصرالهی

اساتید راهنما
دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری
دکتر گودرز احمدی

تابستان ۱۳۸۹

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی (PhD)
رشته مهندسی عمران گرایش هیدرولیک

شبیه سازی عددی انتقال بار بستر با استفاده از جریانهای دو فازی اولری-لاگرانژی

علی نصرالهی

اساتید راهنما
دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری
دکتر گودرز احمدی

استاد مشاور
دکتر مسعود منتظری نمین

تابستان ۱۳۸۹

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده 1- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده 2- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده 3- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده 4- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده 5- این دستورالعمل در 5 ماده و یک تبصره در تاریخ 1384/4/25 در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده 1: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده 2: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده 3: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده 4: در صورت عدم رعایت ماده 3، 50% بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده 5: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده 4 را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده 6: اینجانب دانشجوی رشته مقطع

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

تقدیم به:

پدر و مادرم

تشکر و قدردانی

پس از حمد و سپاس خداوند متعال، بر خود لازم می دانم که مراتب تشکر و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر صالحی نیشابوری که در تمامی مراحل انجام این رساله، نگارنده را مرهون راهنماییهای عالمانه و ارزنده خود قرار داده اند، ابراز دارم. از استاد فرزانه و گرانقدر جناب آقای دکتر گودرز احمدی از دانشگاه کلارکسون آمریکا که با راهنمایی ها و نظرات ارزشمندشان، نقش چشمگیری در به ثمر رسیدن این تحقیق داشته اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می کنم. از جناب آقای دکتر منتظری نمین که با مشاوره و همیاری ارزنده شان مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم. بی تردید انجام این تحقیق بدون کمک فکری، مساعدت و همدلی این اساتید اندیشمند میسر نمی گردید.

همچنین جا دارد که به رسم ادب و احترام از تمامی کسانی که در مراحل مختلف این تحقیق با تشویق ها و حمایتهای خود مایه دلگرمی اینجانب بوده اند سپاسگزاری نمایم.

و در پایان از زحمات بی دریغ پدر و مادرم تشکر و قدردانی می کنم.

چکیده

بار بستر بعنوان یکی از مدهای انتقال رسوب از موضوعات پیچیده مرتبط با رودخانه ها، دریاها، خورها و سازه های مربوطه بوده که علت آن نبود معادله حاکم بر حرکت آن می باشد. به تازگی مطالعات مختلفی با اهداف متفاوت در زمینه شبیه سازی این فرآیند صورت گرفته است. تمامی مطالعات صورت گرفته در زمینه آستانه حرکت ذره آزمایشگاهی بوده و تا کنون بصورت عددی شبیه سازی نشده است. همچنین در مورد غلتش ذره نیز فقط یک مطالعه انجام شده است. با توجه به محاسبه نیروهای بین ذره ای با بهره گیری از مدل برخورد نرم می توان این فرآیندها را با دقت مناسبی شبیه سازی نمود. با استفاده از این روش جهش های متوالی ذره را نیز با دقت مناسب تری می توان محاسبه کرد. این موارد ضرورت تحقیق حاضر را بروشنی تبیین می نماید. بنابراین در این مطالعه با استفاده از مدل برخورد نرم (روش المان مجزا) برای محاسبه برخورد بین ذرات، مدهای مختلف حرکتی بار بستر از آستانه حرکت تا جهش پیوسته بصورت یک ذره و گروهی از ذرات شبیه سازی شده است. در تمامی این مراحل نتایج بدست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی و یا تحلیلی بصورت جداگانه مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پارامترهای مختلف واسنجی شده اند. در هرکدام از این مدها تغییرات نیروهای مختلف در شرایط متفاوتی تجزیه و تحلیل شده و اتمام هر مرحله و وارد شدن ذره به مد حرکتی بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

در ابتدا نتایج بدست آمده از شبیه سازی آستانه حرکت ذره با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی بخصوص دیاگرام شیلدز مقایسه شده که روند این منحنی را بطرز مناسبی شبیه سازی نموده است.

غلتش ذره پس از شبیه سازی و مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی آن مورد حساسیت سنجی قرار گرفت است.

پس از آن یک جهش ذره مورد شبیه سازی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته و دقت مقادیر محاسبه شده برآورد شده است. در شبیه سازی جهش پیوسته ذره

تأثیر پارامترهای مختلف بر روی جهش ذره مورد ارزیابی قرار گرفته و تغییرات ضریب ارتجاعی در شرایط مختلف هیدرولیکی و مدهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این بخش این نتیجه بدست آمده که این ضریب تابعی از شراط هیدرولیکی جریان، مد حرکتی ذره می باشد. همچنین سرعتهای ذره و جریان با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است.

در ادامه این روند حرکت گروهی ذرات و تصادفی بودن این فرآیند شبیه سازی شده است.

از نوآوریهای عمده این تحقیق شبیه سازی آستانه حرکت ذره و غلتش آن می باشد که در نوع خود بی نظیر می باشد.

فهرست **صفحه**

فصل اول- مروری بر مدلسازی بار بستر ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ تعاریف ۲

۱-۲-۱ جریانهای تک فازی ۲

۱-۲-۲ جریانهای چند فازی ۶

۱-۲-۲-۱ کاربردهای جریان چند فازی ۱۰

۱-۲-۲-۲ خواص جریان دو فازی ۱۴

۱-۲-۳ انتقال رسوب ۲۳

۱-۳ مدلسازی بار بستر ۲۵

۱-۳-۱ استفاده از جریانهای تک فازی ۲۶

۱-۳-۲ استفاده از جریانهای چند فازی ۲۷

۱-۳-۲-۱ ساختار فرآیند انتقال رسوب ۲۸

۱-۳-۲-۲ مدل انتقال بار بستر ۳۰

۱-۳-۲-۳ مدل اندرکنش جریان- رسوب ۳۱

۱-۳-۲-۴ مدل برخورد بین ذرات ۳۲

۱-۴ خلاصه فصول آینده ۳۳

۱-۵ جمع بندی ۳۵

فصل دوم- مروری بر تحقیقات انجام شده ۳۷

۲-۱ مقدمه ۳۷

۲-۲ جریانهای ذره ای ۳۷

۲-۳ انتقال رسوب ۴۸

۲-۴ جمع بندی ۵۷

فصل سوم- معادلات حاکم ۶۱

۳-۱ مقدمه ۶۱

۳-۲ معادلات حاکم بر جریانهای دو فازی ۶۱

۳-۲-۱ کوپلینگ اویلری-اویلری ۶۲

۳-۲-۲ کوپلینگ اویلری-لاگرانژی ۶۴

۳-۳ روشهای تحلیل محیط های پیوسته و ناپیوسته ۶۵

۳-۴ اندرکنش سیال-ذره ۶۸

۳-۴-۱ معادلات حاکم بر حرکت ذره درون سیال ۶۹

۳-۴-۲ نیروهای وارده بر ذره ۷۱
۳-۴-۲-۱ نیروی درگ ۷۲
۳-۴-۲-۲ گرادیان فشار و نیروی شناوری ۷۵
۳-۴-۲-۳ جرم اضافه شده و نیروی تاریخی بست ۷۵
۳-۴-۲-۴ نیروی لیفت برشی ۷۷
۳-۴-۲-۵ نیروی لیفت چرخشی ۷۹
۳-۴-۲-۶ گشتاور ۸۱
۳-۵ اندرکنش ذره-ذره ۸۲
۳-۵-۱ برخورد ذرات با دیواره ۸۳
۳-۵-۱-۱- تغییر سرعت در حین برخورد با دیواره ۸۴
۳-۵-۱-۲ تأثیرات زبری دیواره ۸۶
۳-۵-۲ برخورد بین ذرات ۸۷
۳-۵-۲-۱ برخورد سخت یا صلب ۸۸
۳-۵-۲-۲ برخورد نرم ۹۲
۳-۵ کوپل فازهای سیال و ذره ۹۷
۳-۵-۱ مکانیزمهای کوپل فازهای سیال و ذره ۹۸
۳-۶ روش حل معادلات ۱۰۰
۳-۷ جمع بندی ۱۰۲

فصل چهارم- شبیه سازی دو بعدی انتقال بار بستر و تحلیل نتایج ۱۰۳
۴-۱ مقدمه ۱۰۳
۴-۲ فرمولاسیون مدل دو بعدی ۱۰۳
۴-۲-۱ نیروی درگ ۱۰۵
۴-۲-۲ نیروی لیفت برشی ۱۰۵
۴-۲-۳ نیروی لیفت چرخشی یا اثر مگنوس ۱۰۶
۴-۲-۴ جرم اضافه شده ۱۰۷
۴-۲-۵ نیروی شناوری ۱۰۸
۴-۲-۶ گشتاور ۱۰۸
۴-۲-۷ نیروی ناشی از برخورد بین ذرات ۱۰۹
۴-۲-۸ سرعت جریان ۱۰۹
۴-۲-۹ بررسی تغییرات شدت آشفتگی در کانالهای باز ۱۱۳
۴-۲-۱۰ تولید سری زمانی سرعتهای آشفته تصادفی ۱۱۴
۴-۲-۱۱ محاسبه غلظت ذرات ۱۱۵

۴-۲-۱۲ شرایط اولیه و مرزی ۱۱۶
۴-۲-۱۳ روش حل معادلات ۱۱۷
۴-۲-۱۴ روش شبیه سازی ۱۱۸
۴-۲-۱۵ قابلیت های مدل حاضر ۱۱۸
۴-۳ شبیه سازی عددی آستانه حرکت ذره ۱۲۰
۴-۳-۱ نتایج مدل ۱۲۳
۴-۳-۲ تأثیر محل تئوری تراز بستر ۱۲۵
۴-۳-۳ محاسبه آستانه حرکت برای ذرات یکنواخت ۱۲۶
۴-۳-۴ محاسبه آستانه حرکت برای ذرات غیر یکنواخت ۱۳۳
۴-۳-۵ مکانیزم آستانه حرکت ذرات ۱۳۵
۴-۴ شبیه سازی عددی غلتش ذره ۱۳۸
۴-۴-۱ واسنجی و صحت سنجی مدل ۱۳۹
۴-۴-۲ تأثیر زبری بستر ۱۴۵
۴-۴-۳ تأثیر چگالی ذرات ۱۴۹
۴-۴-۴ مکانیزم غلتش ذره ۱۵۲
۴-۴-۵ بررسی مرحله اتمام غلتش خالص ذره ۱۵۸
۴-۵ شبیه سازی عددی یک جهش ذره ۱۶۲
۴-۵-۱ نتایج ۱۶۲
۴-۵-۲ تأثیر سرعتها و زوایای بلندشدگی یا برخاست ۱۶۳
۴-۵-۳ تأثیر ارتفاع زبری ۱۶۶
۴-۵-۴ تأثیر نیروی لیفت ۱۶۷
۴-۵-۵ محاسبه مشخصات جهش ذره ۱۷۰
۴-۵-۶ محاسبه مشخصات جهش برای شرایط مختلف جریان و ذره ۱۷۳
۴-۶ شبیه سازی عددی جهش های متوالی ذره ۱۷۸
۴-۶-۱ نتایج شبیه سازی ۱۷۹
۴-۶-۲ تأثیر زبری بستر ۱۸۳
۴-۶-۳ تأثیر چگالی ذره ۱۸۴
۴-۶-۴ مکانیزم جهش ذره ۱۸۶
۴-۶-۵ تحلیل سرعتهای ذره و جریان ۲۰۰
۴-۷ شبیه سازی عددی حرکت گروهی ذرات ۲۰۷
۴-۷-۱ نتایج حرکت ذرات بر روی یک بستر زبر ۲۰۸
۴-۷-۲ حرکت ذرات بر روی یک بستر زبر متحرک ۲۰۸

۴-۸ جمع بندی ۲۱۲

فصل پنجم- نتیجه گیری و پیشنهادات ۲۱۴
۵-۱ مقدمه ۲۱۴
۵-۲ محدودیت ها و فرضیات مدل حاضر ۲۱۵
۵-۳ نتیجه گیری ۲۱۶
۵-۳ پیشنهادات ۲۱۹

فهرست مراجع ۲۲۱

فصل اول- مروری بر مدلسازی بار بستر

۱-۱ مقدمه

جریان سیالات تک فازی در طول سالیان زیادی توجه دانشمندان و مهندسان را به خود معطوف کرده است. معادلات حاکم برای حرکت و مشخصات گرمایی سیالات تک فازی (معادلات ناویر استوکس) بخوبی پذیرفته شده و راه حل های موجود برای حالات مشخص بخوبی تدوین شده است. فقط مشکل اصلی مدلسازی آشفتگی و تأثیر آن روی انتقال جرم، مومنتوم و انرژی است. اما در فرمولاسیون صحیح معادلات حاکم بررسی جریانهای چند فازی هنوز بحث و تبادل نظر وجود دارد.

دینامیک دو فازی با امکان تغییر فاز شامل پدیده های خیلی پیچیده ای است. این پدیده ها شامل تمامی مشکلات موجود در جریانهای تک فازی همراه با جنبه های منحصر بفرد جریان دو فازی نظیر شرایط دیواره پیچیده، مومنتوم بین فازی، انتقال جرم و گرما و اندرکنش بین فازی (مانند برخورد ذره – ذره جامد یا اندرکنش های قطره – قطره) می باشد. بنابراین یکی از بزرگترین چالش ها در علوم کلاسیک، آنالیز و مدلسازی جریان دو فازی است (Kleinstreuer, C., 2003).

در این فصل در ابتدا تعاریف جریانهای تک فازی، چند فازی و انتقال رسوب ارائه شده، با این تفاوت که جریانهای چند فازی با تفصیل بیشتری نسبت به جریانهای تک فازی و انتقال رسوب مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه مدلسازی انتقال بار بستر با استفاده از جریانهای تک فازی و چند فازی معرفی و نحوه مدلسازی این پدیده توسط این جریانها ارائه شده است. در انتها نیز خلاصه ای از فصول آینده بیان گردیده است.

۱-۲ تعاریف

۱-۲-۱ جریانهای تک فازی

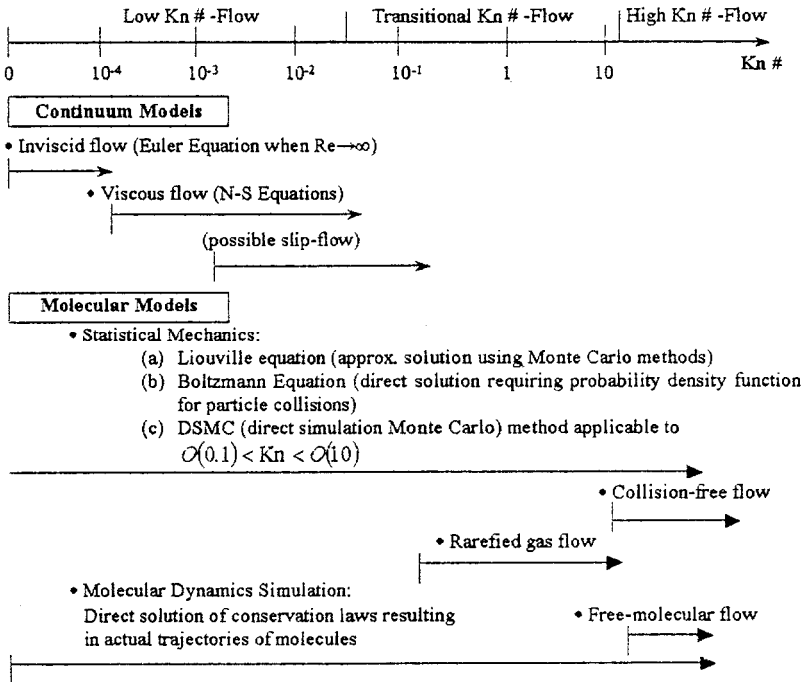
طبق تعریف، سیالات تحت تنش برشی بصورت پیوسته تغییر شکل می دهند. در فرضیه محیط پیوسته المانهای سیال یا نقاط مادی حقیقی بصورت پیوسته توزیع شده اند که این باعث می شود که مسیر آزاد متوسط[1]، l، بین مولکولهای سیال (گاز) خیلی کوچک تر از یک حداقل مقیاس طولی از سیستم جریان باشد. برای بیان این پارامتر از عدد کنادسن[2] استفاده می شود که بصورت زیر قابل بیان می باشد (Kleinstreuer, C., 2003):

$$Kn = l/L \qquad (۱-۱)$$

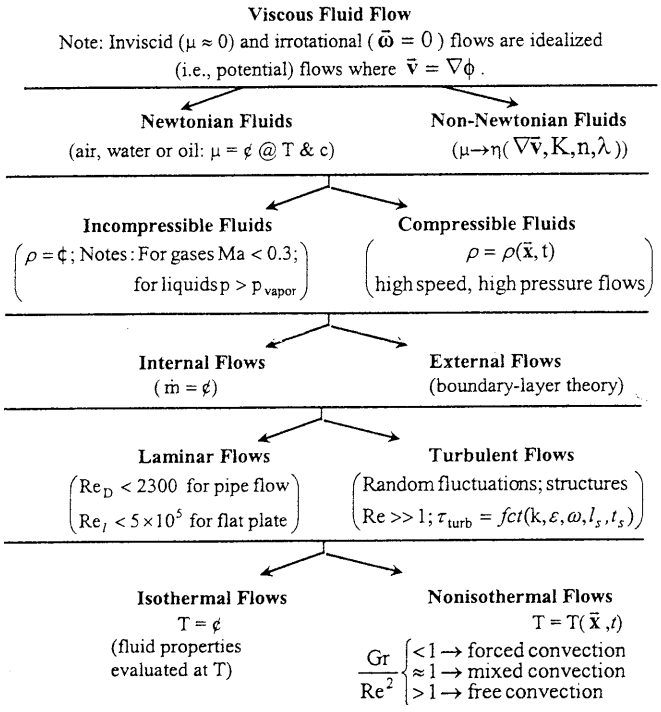
با استفاده از این عدد می توان اعتبار فرضیه محیط پیوسته را در محیط های مختلف ارزیابی کرد. در هر حالتی، فرض محیط پیوسته برای $Kn < 0.1$ دارای اعتبار می باشد. در اعداد بزرگتر از این مقدار نمی توان از فرض محیط پیوسته استفاده نمود (Kleinstreuer, C., 2003). در شکل ۱-۱ محدوده های اعتبار هر کدام از مدلهای پیوسته و ناپیوسته نشان داده شده است.

برای تمامی فرآیندهای عملی، جریان تک فازی تحت فرض مکانیک محیط پیوسته می تواند بصورت شکل ۱-۲ طبقه بندی شود. همانگونه که مشاهده می شود حالتهایی که در سمت چپ این شکل وجود دارد مسائل ساده تر جریان سیال را بیان می کنند.

[1] mean free path
[2] Knudsen number



شکل ۱-۱ رژیم های عدد کنادسن و روشهای مدلسازی جریانهای گازها (Kleinstreuer, C., 2003)



شکل ۱-۲ حالتهای خاص جریان سیال لزج (Kleinstreuer, C., 2003)

هدف کلی پیدا کردن و تحلیل اندرکنش بین نیروهای سیال مانند فشار، ثقل، شناوری، درگ، اینرسی، ... و حرکت سیال می باشد که میدان بردار سرعت می تواند بدست آید:

نیروهای نامتوازن سطحی و جسمی ⟷ حرکت شامل انتقال، چرخش و تغییر شکل

و معادلات انتقال اسکالر می تواند بر مبنای میدان سرعت برای بدست آوردن مقادیر و گرادیانهای جرم و انرژی حل شوند. در ادامه به توصیف میدان جریان پرداخته می شود.

توصیف میدان جریان

هر میدان جریانی می تواند هم در سطوح میکروسکوپی بیان شود و هم ماکروسکوپی. مدلهای میکروسکوپی یا مولکولی، موقعیت، سرعت و حالت هر مولکول یک سیال یا چند سیال را در هر زمان بررسی می کند. در جریان گاز، مدلهای دینامیکی مولکولی احتمالاتی یا قطعی (سه قانون بقا یا معادله بولتزمن، بعلاوه توابع چگالی احتمالاتی مناسب) برای شبیه سازی عددی مستقیم بکار میرود. هدف روش آماری محاسبه احتمال یافتن یک مولکول در یک موقعیت، سرعت و حالت خاص می باشد. بعضی اوقات هر دو روش برای حل مسائل جریان دو فازی مورد استفاده قرار می گیرد. متوسط گیری اطلاعات ذره مجزا (مانند مکان، سرعت و حالت) روی یک حجم محلی سیال مقادیر ماکروسکوپی را نتیجه می دهد، یعنی $\mathbf{r}\vec{v}(\mathbf{r}\vec{x},t)$ در هر محل سیال بدست می آید. مزیت روش مولکولی شامل کاربردهای کلی (تمامی اعداد کنادسن) عدم نیاز به زیرمدلها (تانسور تنش، فلاکس گرمایی، آشفتگی، توابع دیواره، ...) و نبود ناپایداریهای عددی (بعلت شیب تند گرادیانهای میدان جریان) می باشد. با توجه به آنکه بررسی هزاران مولکول، اتم و نانوذرات نیاز به ابر کامپیوترها دارد، در حال حاضر فقط جریانهای ساده با تعداد محدود ذرات جامد ارزیابی و مدل می شوند.

دیدگاه لاگرانژی

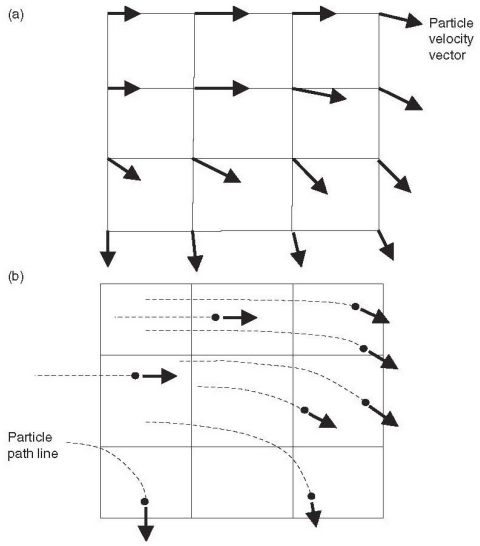
برای توصیف این روش در ابتدا ذره ای را در میدان جریان در نظر گرفته که در لحظه ابتدایی در موقعیت مشخصی قرار دارد. بنابراین بردار موقعیت آن بصورت $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_0(\mathbf{x}_0, t_0)$ بوده و در لحظه ای دیگر در موقعیت $\mathbf{r}_A = \mathbf{r}_A(\mathbf{r}_0, t_0 + \Delta t)$ مستقر شود. در این رابطه $\mathbf{r}_A = \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r}$ می باشد. بررسی تمامی ذرات مجزا و دنبال کردن حرکت آنها در تمامی زمانی مورد نظر را می توان بصورت $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t_0)$ بیان کرد. با مشتق گیری از این رابطه می توان سرعت و شتاب ذره را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v} \qquad (۲-۱)$$

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{a} \qquad (۳-۱)$$

دیدگاه اویلری

در این روش یک موقعیت ثابت را در میدان جریان در نظر گرفته و مشخصات ذراتی که در زمانهای مختلف از این نقطه عبور می کنند بر حسب زمان تعیین می کنند. بطور کلی در دیدگاه اویلری ناظر در یک موقعیت ثابت قرار گرفته و تغییرات زمانی و مکانی میدان جریان را در تمامی نقاط ثبت می کند، در حالیکه در دیدگاه لاگرانژی ناظر با یک المان سیال یا حجم مادی همراه بوده و تغییرات اساسی آن را در حین حرکت ثبت می کند. در شکل ۱-۳ دو دیدگاه مزبور نشان داده شده تا استنباط مناسب تری از این دو دیدگاه حاصل گردد. همانگونه که مشاهده می شود در دیدگاه اویلری یک شبکه بر روی میدان جریان تعریف شده و در نقاط تقاطع آن مشخصات ذرات عبوری از آنها مورد سنجش قرار می گیرد، در حالیکه در دیداگاه لاگرانژی ذرات بصورت جداگانه دنبال شده و تغییرات میدان جریان با استفاده از دنبال کردن آنها حاصل می گردد.



شکل ۱-۳ مقایسه میدان سرعت از دیدگاههای a) اویلری و b) لاگرانژی

با استفاده از روشهای مختلفی می توان قوانین بقا را در سیستم های مختلف استخراج کرده و با حل آنها مشخصات مورد نظر در میدان حل را بدست آورد. برای اطلاعات بیشتر و مفصل تر می توان به کتب مرجع مکانیک سیالات که در این زمینه وجود دارد، مراجعه کرد.

جریانهای تک فازی استفاده وسیعی در پدیده های مختلف سیالاتی داشته و دارد، اما در بعضی شرایط فرضیات بکار رفته در این روش دچار انحراف شده و قابل کاربرد نیستند. در این حالات بایستی از روندهای دیگری برای نائل شدن به هدف استفاده نمود. یکی از این مسیرها استفاده از جریانهای چند فازی است که در ادامه به آن پرداخته می شود.

۱-۲-۲ جریانهای چند فازی

جریان چند فازی به بیش از دو سیال اتلاق می شود که با همدیگر حرکت می کنند. هر گاه در داخل سیال املاح معدنی، ذرات جامد ناشی از رسوبات و دیگر ناخالصیها موجود باشند، معادلات حاکم بر جریان سیال خالص را نمی توان بصورت مستقیم در این نوع جریان ها اعمال نمود. زیرا وجود ذرات معلق باعث

تغییر الگوی جریان نسبت به حالتی که این ذرات وجود ندارند، خواهد شد. این تغییر می تواند بدلیل داشتن اینرسی ذرات، اندرکنش آنها با گردابه ها و اغتشاشات، سقوط ذرات و تشکیل بستر، نیروی لیفت و نیروی درگ، ... باشد. به این نوع جریانها که همراه سیال مواد جامد یا سیال دیگری در حرکت باشد، جریانهای چند فازی گفته می شود (Sommerfeld, M., 2000).

جریان ذرات و قطرات درون سیالات زیر مجموعه ای از جریانهای چند مؤلفه ای[1]، چند فازی[2] می باشند. جریانهای مخلوط چند مؤلفه ای، چند فازی طیف وسیعی از شرایط جریان و کاربردهای مختلف را پوشش می دهند. مؤلفه، یک گونه شیمیایی مانند نیتروژن، اکسیژن، آب دریا و یا فرئون است. در حالیکه فاز به حالتی از جامد، مایع و یا بخار اتلاق می شود. مثالهایی از جریانهای تک و چند مؤلفه ای، چند فازی در جدول ۱-۱ ارائه شده است.

جدول ۱-۱ مثالهایی از جریانهای تک و چند مؤلفه ای، چند فازی

	تک مؤلفه ای	**چند مؤلفه ای**
تک فــازی	جریان آب جریان نیتروژن	جریان هوا جریان امولسیون
چند فــازی	جریان آب – بخار جریان فرئون – بخار فرئون	جریان آب – هوا Slurry flow

جریان هوا که مخلوطی از گازها (نیتروژن، اکسیژن و ...) می باشد، بهترین مثال برای جریان تک فازی چند مؤلفه ای است. نحوه برخورد با اینگونه جریانها به صورت یک جریان یک مؤلفه ای با یک لزجت و ضریب هدایت گرمایی مخلوط مورد نظر می باشد.

[1] Multicomponent
[2] Multiphase