

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری مهندسی عمران گرایش هیدرولیک

شبیه‌سازی عددی جریانهای چگالی

افشین اقبالزاده

اساتید راهنما:

پرفسور سید علی اکبر صالحی نیشابوری

دکتر مسعود منتظری نمین

استاد مشاور:

دکتر بهار فیروزآبادی

خرداد ۱۳۸۷

۹۹۰۶۳

۱۳۸۷ / ۰۵ / ۲۲

کتابخانه تخصصی
مهندسی عمران



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای افشین اقبالزاده رسال ۲۴ واحدی خود را با عنوان: شبیه سازی عددی جریانهای چگالی در تاریخ ۸/۳/۸۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنها برای تکمیل درجه دکتری مهندسی عمران-مهندسی آب پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری	استاد	
استاد مشاور	دکتر بهار فیروز آبادی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مسعود قدسیان	استاد	
استاد ناظر	دکتر قاسم حیدری نژاد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سعید رضا صباغ یزدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر میر مصدق جمالی	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی شفیعی فر	دانشیار	
استاد راهنمای دوم	دکتر مسعود منتظری	استادیار	

این نسخه به عنوان سند رسمی در اختیار شما قرار می گیرد و تأیید است.

امضای استاد راهنما:

آیین نامه چاپ رساله های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار 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 می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ رساله ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی عمران - آب است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقایان پرفسور سید علی اکبر صالحی نیشابوری و دکتر مسعود منتظری نمین و مشاوره سرکار خانم دکتر بهار فیروزآبادی از آن دفاع شده است.»

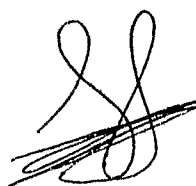
ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب افشین اقبالزاده دانشجوی رشته مهندسی عمران - آب مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: افشین اقبالزاده



تاریخ و امضا: ۸۷/۳/۱۲

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 پایان نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه ها و دستورالعمل های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- 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.

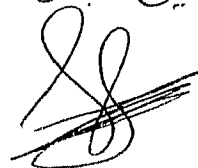
تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می شود باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- 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 می شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی 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 ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ 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 انگشیر اقبالزاده



امضاء

۸۷/۳/۱۲

تقدیم به همسر عزیز

و

پدر و مادر گرانقدرم

تشکر و قدردانی

در اینجا به منظور قدردانی از زحمات، الطاف و راهنمایی‌های تمام کسانی که در راستای انجام این رساله مرا یاری نموده اند، جملاتی چند خواهم آورد. امیدوارم بتوانم در قالب این جملات آنچنان که شایسته و بایسته است، از زحمات تمام این عزیزان سپاسگذاری نمایم.

انجام رساله حاضر بدون راهنمایی‌های علمی، خردمندانه و عالمانه آقایان دکتر مسعود منتظری نمین و دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری امکان پذیر نبود، لذا در اینجا از راهنمایی‌های این بزرگواران سپاسگذاری می‌نمایم. همچنین از راهنمایی‌های دقیق و ناشی از ذکاوت استاد ارجمند خانم دکتر فیروزآبادی که بعنوان استاد مشاور در خدمتشان بودم، سپاسگذارم. از زحمات بی شائبه و راهنمایی‌های بسیار ارزشمند آقای دکتر سوتراپلوس از دانشگاه مینه سوتا که در مدت یکساله فرصت مطالعاتی در خدمتشان بوده‌ام، تشکر و قدردانی می‌نمایم و در انتها از تمام اساتید و دوستانی که در سالهای انجام رساله به هر نوعی کمک نمودند و در اینجا نامی از ایشان برده نشد، قدردانی می‌کنم.

چکیده:

جریان چگالی، جریان یک سیال به داخل سیال دیگر در نتیجه وجود اختلاف در مقدار چگالی آنها می باشد. جریانهای چگالی در موقعیت های زیادی در طبیعت و همچنین محل های ساخته شده توسط بشر تشکیل می شوند که این مسئله اهمیت بسیار زیاد آشنایی محققین با دینامیک آنها را بیان می نماید. با توجه به هزینه بسیار بالا و همچنین مشکل بودن تحقیقات صحرایی و آزمایشگاهی، توسعه مدل های عددی گزینه مناسبی جهت بررسی این جریانها می باشد.

مطالعات انجام شده در تحقیق حاضر در سه قسمت اصلی انجام شده اند. ابتدا به منظور بررسی توانایی مدل عددی دو بعدی در جهت قائم در شبیه سازی جریانهای چگالی، یک مدل عددی بر اساس حل معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز (URANS) که برای بستن آنها از مدل آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ اصلاح شده برای در نظر گرفتن تأثیرات شناوری استفاده شده، تهیه شده است. برای حل معادلات روش گامهای جزئی بکار رفته و معادلات بر روی یک شبکه جابجا شده به کمک روش حجم محدود منفصل می شوند. از مدل توسعه یافته برای شبیه سازی جریانهای چگالی که در آنها مقدار مشخصی سیال غلیظ وجود دارد و همچنین حالتی که سیال غلیظ بطور دائمی از بالادست تأمین می شود، استفاده شده است. مقایسه نتایج عددی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که با استفاده از معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز در حالت غیردائمی و دو بعدی بر روی شبکه محاسباتی به اندازه کافی ریز، می توان خصوصیات کلی جریان چگالی شامل تشکیل ساختار های چرخشی کلوین هلمهولتز و پیشروی سر جریان را با دقت معقولی شبیه سازی نمود.

در مرحله بعدی تحقیق به منظور افزایش قابلیت و کاربردی تر نمودن، مدل عددی دو بعدی متوسط گیری شده در جهت عرضی توسعه داده شده است که می تواند برای بعضی از محیط های فیزیکی سه بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

در قسمت پایانی تحقیق حاضر به منظور کاهش هزینه محاسباتی، مدل عددی جهت استفاده از تکنیک شبکه های تو در تو توسعه یافته است. با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل های یکطرفه و دو طرفه، بطور کلی می توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل های دو طرفه در شبیه سازی جریان های چگالی که جریانهایی غیر دائمی و پیچیده می باشند بسیار مناسبتر هستند.

کلید واژه ها: شبیه سازی عددی، جریان چگالی، آشفتگی، روش گام جزئی، مدل دو بعدی متوسط گیری شده در جهت عرضی، شبکه های تو در تو.

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

۱- کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۱
- ۲-۱- آشنایی با جریانهای چگالی ۳
- ۳-۱- خصوصیات هیدرودینامیکی جریانهای چگالی ۶
- ۴-۱- جریانهای چگالی رها شده از مانع ۹
- ۵-۱- روش تحقیق ۱۳

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده و تبیین موضوع

- ۱-۲- مقدمه ۱۶
- ۲-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده در خصوص جریانهای چگالی ۱۶
- ۱-۲-۲- تحقیقات آزمایشگاهی ۱۶
- ۲-۲-۲- تحقیقات عددی ۱۷
- ۳-۲-۲- تحقیقات عددی دو بعدی متوسط‌گیری شده در عرض ۲۰
- ۳-۲- مروری بر تحقیقات عددی انجام شده با استفاده از شبکه‌های تو در تو ۲۳
- ۴-۲- اهداف تحقیق ۲۷
- ۱-۴-۲- شبیه سازی دو بعدی در جهت قائم جریانهای چگالی آشفته ۲۷
- ۲-۴-۲- شبیه سازی دو بعدی متوسط‌گیری شده در عرض ۲۸
- ۳-۴-۲- شبیه سازی با استفاده از شبکه‌های تو در تو ۲۹

۳- معادلات حاکم و روش عددی مورد استفاده

- ۱-۳- مقدمه ۳۰
- ۲-۳- معادلات حاکم بر جریان ۳۰
- ۱-۲-۳- معادلات پیوستگی و مومنتم (URANS) ۳۰
- ۲-۲-۳- معادلات انتقال آشفته ۳۲
- ۳-۲-۳- معادلات انتقال غلظت و حالت ۳۵
- ۳-۳- روش عددی ۳۶

- ۳-۳-۱- مقدمه ۳۶
- ۳-۳-۲- حل معادله انتقال در فضای دو بعدی با تجزیه آن به معادلات یک بعدی ۳۷
- ۳-۳-۲-۱- حل معادله جابجایی ۳۹
- ۳-۳-۲-۱- ساختار کلی طرح عددی نیمه لاگرانژی ۳۹
- ۳-۳-۲-۲- طرح مرتبه دوم (Fromm (۱۹۶۸) ۴۲
- ۳-۳-۲-۳- ملاحظات ویژه برای حل معادله جابجایی در شبکه مختصات سیگما ۴۴
- ۳-۳-۲-۲- حل معادله پخش ۴۵
- ۳-۳-۲-۲- مقدمه ۴۵
- ۳-۳-۲-۲- حل عددی معادله پخش به روش نیمه‌ضمنی کرانک نیکلسون ۴۵
- ۳-۳-۲-۳- حل دستگاه معادلات ۴۷
- ۳-۳-۲-۴- ملاحظات ویژه برای حل معادله پخش در شبکه مختصات سیگما ۴۸
- ۳-۳-۳- شبیه‌سازی میدان جریان ۴۸
- ۳-۳-۳-۱- شرایط مرزی ۴۸
- ۳-۳-۳-۲- سیستم شبکه ۵۲
- ۳-۳-۳-۳- مختصات سیگما ۵۲
- ۳-۳-۳-۲- شبکه‌های جابجاشده ۵۳
- ۳-۳-۳-۳- تقریب مشتقها ۵۴
- ۳-۳-۳-۳- مشتق در جهت x ۵۴
- ۳-۳-۳-۳- مشتق در جهت z ۵۷
- ۳-۳-۳-۳- مشتق زمانی ۵۷
- ۳-۳-۳-۴- تکنیک عددی مورد استفاده ۵۷
- ۳-۳-۳-۱- الگوریتم حل ۵۷
- ۳-۳-۴-۲- سیستم معادلات ۶۰
- ۳-۳-۴-۳- الگوریتم حل معادلات انفصال یافته ۶۰
- ۳-۴-۳- طرح محدودکننده ۶۳
- ۳-۴-۴- محدودیت‌های مدل تهیه شده در تحقیق حاضر ۶۵

۴- شبیه‌سازی دو بعدی در جهت قائم جریانهای چگالی آشفته

- ۴-۱- مقدمه ۶۷
- ۴-۲- نتایج مدل عددی برای جریانهای لایه‌بندی نشده ۶۷

- ۶۷.....۱-۲-۴- جریان عبوری از روی پله در حالت آرام
- ۷۱.....۲-۲-۴- جریان عبوری از حفره در حالت آشفته
- ۷۴.....۳-۴- نتایج مدل برای جریانهای چگالی آشفته
- ۷۴.....۱-۳-۴- جریانهای چگالی ناپیوسته
- ۷۵.....۱-۱-۳-۴- بستر افقی
- ۸۵.....۲-۱-۳-۴- بستر شیبدار
- ۹۳.....۲-۳-۴- جریانهای چگالی پیوسته

۵- شبیه‌سازی عددی دو بعدی متوسط‌گیری شده در جهت عرضی

- ۱۰۸.....۱-۵- مقدمه
- ۱۰۹.....۲-۵- معادلات حاکم
- ۱۰۹.....۱-۲-۵- معادلات پیوستگی و مومنتم (URANS)
- ۱۱۰.....۲-۲-۵- معادلات انتقال آشفته
- ۱۱۱.....۳-۲-۵- معادلات انتقال غلظت و حالت
- ۱۱۲.....۳-۵- روش عددی
- ۱۱۳.....۴-۵- نتایج مدل عددی برای جریان آشفته در یک کانال دارای تغییر عرض
- ۱۱۵.....۵-۵- نتایج مدل عددی برای جریان چگالی آشفته
- ۱۱۵.....۱-۵-۵- مقایسه با نتایج عددی Bournet و همکاران (۱۹۹۹)
- ۱۱۸.....۲-۵-۵- مقایسه با نتایج آزمایشگاهی Johnson و Stefan (۱۹۸۸)

۶- شبکه‌های تو در تو

- ۱۲۶.....۱-۶- مقدمه
- ۱۲۷.....۲-۶- روش شبکه‌های تو در تو
- ۱۲۷.....۱-۲-۶- تولید شبکه‌های مختلف و تعیین آدرس گره‌ها
- ۱۲۸.....۲-۲-۶- تعیین محل گره‌های تحت درونیابی
- ۱۳۰.....۳-۲-۶- ارتباط شبکه‌ها
- ۱۳۱.....۴-۲-۶- شبکه‌های جابجاشده
- ۱۳۲.....۳-۶- نتایج مدل عددی برای جریانهای مختلف
- ۱۳۳.....۱-۳-۶- جریان عبوری از روی پله در حالت آرام
- ۱۳۵.....۲-۳-۶- جریان عبوری از حفره در حالت آشفته

۳-۳-۶- جریان چگالی آشفته بر روی بستر مسطح..... ۱۳۹

۴-۳-۶- جریان چگالی آشفته بر روی بستر دارای برآمدگی موضعی..... ۱۵۳

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۷- نتیجه‌گیری..... ۱۶۰

۲-۷- پیشنهادات..... ۱۶۳

مراجع..... ۱۶۴

لیست جداول

جدول (۱-۴) جزئیات محاسباتی مربوط به حل‌های عددی جریانهای چگالی ناپیوسته بر روی بسترهای افقی که آزمایشات آنها توسط Huppert و Simpson (۱۹۸۰) و Patterson و همکاران (۲۰۰۵) انجام شده‌اند. ۷۷

جدول (۲-۴) جزئیات محاسباتی مربوط به حل‌های عددی جریان چگالی ناپیوسته بر روی بستر شیبدار با استفاده از مدل آشفستگی LRN که آزمایشات آن توسط Garcia (۱۹۸۶)، نتایج آن منتشر نشده)* انجام شده‌اند. ۸۸

جدول (۳-۴) جزئیات محاسباتی مربوط به حل‌های عددی جریان چگالی ناپیوسته بر روی بستر شیبدار با استفاده از مدل آشفستگی استاندارد با تابع جداره ۹۰

جدول (۴-۴) جزئیات محاسباتی مربوط به حل‌های عددی جریان چگالی پیوسته بر روی بستر شیبدار منتهی به بستر افقی که آزمایشات آن توسط Garcia (۱۹۹۳) انجام شده‌اند. ۹۴

جدول (۱-۶) زمان کل اجرای برنامه مربوط به محاسبات یک شبکه‌ای CG_fg، دو شبکه‌ای یکطرفه و دو شبکه‌ای دوطرفه مربوط به حل‌های عددی جریان چگالی پیوسته که آزمایشات آن توسط Garcia (۱۹۹۳) انجام شده‌اند. ۱۴۴

لیست اشکال

- شکل (۱-۱) جریان چگالی ناشی از ورود آب شور به داخل مخزن حاوی آب شیرین ۲
- شکل (۲-۱) جریان چگالی ناشی از وقوع بهمین ۲
- شکل (۳-۱) جریان چگالی ناشی از گرد و غبار در نتیجه فروریختن برجهای دو قلوی مرکز تجارت جهانی شهر نیویورک ۳
- شکل (۴-۱) تصویر سر و بدنه جریان چگالی ناشی از شوری (Simpson (۱۹۶۹))، شکل کناری ساختارهای Lobe و Cleft را از زیر نشان می‌دهد ۵
- شکل (۵-۱) شمای کلی سر و بدنه جریان چگالی و نمونه‌ای از پروفیل سرعت در جهت جریان (Buckee و Kneller (۲۰۰۰)) ۶
- شکل (۶-۱) سریهای زمانی سرعتهای طولی و قائم اندازه‌گیری شده برای جریان چگالی رها شده از مانع ناشی از شوری (Kneller و همکاران (۱۹۹۷)) ۷
- شکل (۷-۱) نمونه‌ای از پروفیل سرعت و غلظت جریان چگالی (Buckee و Kneller (۲۰۰۰)) ۸
- شکل (۸-۱) تشکیل جریان چگالی رها شده از مانع در حالت اولیه ۹
- شکل (۹-۱) نحوه تشکیل جریان چگالی رها شده از مانع در حالت $0 < h_0/H \leq 0.7$ (شکل‌های a, b و c مرحله افت و شکل d شروع مرحله اینرسی) (Simpson و Rottman (۱۹۸۰)) ۱۰
- شکل (۱۰-۱) تصاویر آزمایشگاهی مربوط به جریان چگالی ناشی از آب شور با مشخصات $h_0 = 7 \text{ cm}$ ، $x_0 = 50 \text{ cm}$ ، $H = 49 \text{ cm}$ و $g' = 47 \text{ cm s}^{-2}$ در زمانهای $۲/۲$ ، $۳/۸$ و ۶ ثانیه پس از برداشتن دریچه (Simpson و Rottman (۱۹۸۰)) ۱۱
- شکل (۱۱-۱) نحوه تشکیل جریان چگالی رها شده از مانع در حالت $h_0/H = 1$ (شکل‌های a, b و c مرحله افت و شکل d شروع مرحله اینرسی) (Simpson و Rottman (۱۹۸۰)) ۱۲
- شکل (۱۲-۱) تصاویر آزمایشگاهی مربوط به جریان چگالی ناشی از آب شور با مشخصات $h_0 = H = 7 \text{ cm}$ ، $x_0 = 50 \text{ cm}$ و $g' = 47 \text{ cm s}^{-2}$ در زمانهای $۴/۷$ ، $۷/۷$ و $۱۰/۷$ ثانیه پس از برداشتن دریچه (Simpson و Rottman (۱۹۸۰)) ۱۳

- شکل (۱-۲) رابطه رژیم جریان با مقدار نصف زاویه واگرایی مجرا (δ) و عدد فرود جریان چگالی ورودی (F_0) بر اساس نتایج Stefan و Johnson (۱۹۸۹)..... ۲۱
- شکل (۲-۲) رژیمهای جریان چگالی، جریان کاملا متصل به جدارها در سمت چپ، جت دیواره‌ای در وسط و جت آزاد در سمت راست (Stefan و Johnson (۱۹۸۹))..... ۲۲
- شکل (۱-۳) تقریب تابع شکل (گام ۱)..... ۴۰
- شکل (۲-۳) جابجایی تابع شکل به سمت پایین دست (گام لاگرانژی)..... ۴۱
- شکل (۳-۳) ایجاد تابع شکل جدید (گام ۴)..... ۴۲
- شکل (۴-۳) تعیین تابع شکل مربوط به طرح مرتبه دوم Fromm (Namin (۲۰۰۳))..... ۴۲
- شکل (۵-۳) نمایش قسمتهای جابجاشده و باقیمانده در هر سلول..... ۴۳
- شکل (۶-۳) حرکت عرضی عددی در جاروب طولی در سیستم مختصات سیگما..... ۴۴
- شکل (۷-۳) ارائه شماتیک مرزهای دامنه محاسباتی برای جریان چگالی رها شده از مانع..... ۵۲
- شکل (۸-۳) شکلهای مختلف سیستم مختصات سیگما..... ۵۳
- شکل (۹-۳) نمایش شبکه‌های جابجاشده و موقعیت متغیرها..... ۵۴
- شکل (۱۰-۳) نمایش شبکه‌های اطراف (a) شبکه‌های زوج (b) شبکه‌های فرد برای محاسبات مشتق در جهت x ۵۵
- شکل (۱۱-۳) نمایش طرح محدود کننده MUSCL..... ۶۴
- شکل (۱-۴) مجرای مورد استفاده در آزمایش جریان بر روی پله (Kim و Moin (۱۹۸۵))..... ۶۸
- شکل (۲-۴) مقایسه پروفیل‌های سرعت مربوط به $Re = 100$ بین نتایج عددی حاضر و آزمایشگاهی Armaly و همکاران (۱۹۸۳)..... ۶۹

- شکل (۳-۴) مقایسه پروفیل‌های سرعت مربوط به $Re = 389$ بین نتایج عددی حاضر و آزمایشگاهی Armaly و همکاران (۱۹۸۳)..... ۶۹
- شکل (۴-۴) مقایسه طول اتصال مجدد در پایین‌دست پله نتایج عددی حاضر با نتایج عددی Kim و Moin (۱۹۸۵) و نتایج آزمایشگاهی Armaly و همکاران (۱۹۸۳)..... ۷۰
- شکل (۵-۴) ابعاد میدان جریان و نحوه شبکه‌بندی جریان آشفته در حفره..... ۷۲
- شکل (۶-۴) محل مقاطعی که نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است..... ۷۲
- شکل (۷-۴) مقایسه مولفه افقی سرعت (a) و انرژی جنبشی آشفتگی (b) برای نتایج عددی حاضر (خط پررنگ) با نتایج عددی و آزمایشگاهی Alfrink و Van Rijn (۱۹۸۳) (عددی (خط چین)، آزمایشگاهی (نقاط))..... ۷۳
- شکل (۸-۴) سرعت برشی در طول کف در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی Alfrink و Van Rijn (۱۹۸۳)..... ۷۳
- شکل (۹-۴) تشکیل جریان چگالی رها شده از مانع در حالت اولیه و تعاریف مربوطه..... ۷۵
- شکل (۱۰-۴) مقایسه موقعیت محاسبه شده دماغه جریان چگالی بین نتایج عددی حاضر (خط توپر) و اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی (نقاط دایره‌ای) Huppert و Simpson (۱۹۸۰)..... ۷۸
- شکل (۱۱-۴) تصاویر آزمایشگاهی Huppert و Simpson (۱۹۸۰) (تصویر بالایی) و نتایج عددی حاضر (تصاویر پایین‌تر) مربوط به توزیع چگالی که توسعه جریان چگالی را نمایش می‌دهند: (a) $t = 4.4 \text{ sec}$ (b, $t = 6.8 \text{ sec}$ (c, $t = 9.7 \text{ sec}$ (d و $t = 17.5 \text{ sec}$ پس از برداشتن دریچه..... ۷۹
- شکل (۱۲-۴) تصاویر لحظه‌ای چگالی مربوط به چهار زمان مختلف مربوط به بررسی حساسیت حل‌های عددی حاضر به ضریب مدل $C_{\epsilon 3}$ (a : $t = 4.4 \text{ sec}$ (b, $t = 6.8 \text{ sec}$ (c, $t = 9.7 \text{ sec}$ (d و $t = 17.5 \text{ sec}$ پس از برداشتن دریچه..... ۸۲
- شکل (۱۳-۴) تغییرات سرعت پیشروی دماغه جریان چگالی بر اساس نتایج عددی حاضر..... ۸۳
- شکل (۱۴-۴) تصاویر آزمایشگاهی Patterson و همکاران (۲۰۰۵) (تصویر بالایی) و نتایج عددی حاضر (تصاویر پایین‌تر) مربوط به توزیع چگالی که توسعه جریان چگالی را نمایش می‌دهند: (a) $t = 3.13 \text{ sec}$ (b, $t = 5.67 \text{ sec}$ (c, $t = 8.14 \text{ sec}$ (d و $t = 15.45 \text{ sec}$ پس از برداشتن دریچه..... ۸۴

شکل (۴-۱۵) تصاویر آزمایشگاهی (تصویر بالایی) و نتایج عددی (تصویر پایینی) مربوط به توزیع چگالی که توسعه جریان چگالی را نمایش می‌دهند: (a) $t = 3.13 \text{ sec}$ (b) $t = 5.67 \text{ sec}$ (c) $t = 8.14 \text{ sec}$ و (d) $t = 15.45 \text{ sec}$ پس از برداشتن دریچه (Patterson و همکاران (۲۰۰۵)). ۸۶

شکل (۴-۱۶) نمای جانبی کانال با عرض $0/3$ متر (تمام ابعاد بر حسب متر هستند). ۸۶

شکل (۴-۱۷) مقایسه موقعیت دماغه جریان چگالی در تحقیق حاضر با استفاده از مدل آشفتگی LRN (خط توپر) و اندازه‌گیریهای García (۱۹۸۶) (نقاط دایره‌ای) که در مقاله Cantero و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است. ۸۸

شکل (۴-۱۸) تصاویر متوالی توزیع چگالی محاسبه شده بر روی سه شبکه (DG_cg, DG_mg و DG_fg) در زمانهای انتخاب شده. ۸۹

شکل (۴-۱۹) مقایسه موقعیت دماغه جریان چگالی در تحقیق حاضر با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد با تابع جداره (خط توپر) و اندازه‌گیریهای García (۱۹۸۶) (نقاط دایره‌ای) که در مقاله Cantero و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است. ۹۱

شکل (۴-۲۰) تصاویر متوالی توزیع چگالی محاسبه شده بر روی سه شبکه (DG_cg, DG_mgw و DG_fg) در زمانهای انتخاب شده. ۹۲

شکل (۴-۲۱) تغییرات زمانی باقیمانده مؤلفه سرعت طولی محاسبه شده بر روی شبکه‌های درشت و ریز برای حالت CG. ۹۵

شکل (۴-۲۲) مقایسه پروفیل‌های قائم مؤلفه سرعت طولی محاسبه شده (خط‌چینها برای CG_cg و خطوط جامد برای CG_fg) با اندازه‌گیری‌های (نقاط) García (۱۹۹۳) در موقعیتهای انتخاب شده. ۹۶

شکل (۴-۲۳) مقایسه کانتورهای چگالی بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها (García (۱۹۹۳)) و محاسبات در امتداد جهت طولی ($1001, 1002 \text{ kg/m}^3$). ۹۷

شکل (۴-۲۴) تصاویر متوالی توزیع چگالی بدست آمده از محاسبات CG_cg (چپ) و CG_fg (راست) در زمانهای مشخص. ۹۹

شکل (۴-۲۵) تصاویر توزیع چگالی مربوط به محاسبات CG_cg و CG_fg در زمانهای ۵، ۲۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ ثانیه. ۱۰۰

شکل (۴-۲۶) مقایسه موقعیت دماغه جریان چگالی بدست آمده از محاسبات (خط چینها برای CG_cg و خط جامد برای CG_fg) ۱۰۲

شکل (۴-۲۷) اختلاف موقعیت دماغه جریان چگالی بدست آمده از محاسبات CG_cg و CG_fg ۱۰۲

شکل (۴-۲۸) اختلاف نسبی موقعیت دماغه جریان چگالی بدست آمده از محاسبات CG_cg و CG_fg ۱۰۳

شکل (۴-۲۹) مقایسه سرعت پیشروی جریان چگالی بدست آمده از محاسبات (خط چینها برای CG_cg و خط پر برای CG_fg) ۱۰۴

شکل (۴-۳۰) مقایسه مرز جریان چگالی بدست آمده از محاسبات بر اساس کانتور چگالی معادل ۵ درصد اختلاف چگالی سیال سبک و سنگین ورودی بعلاوه چگالی سیال سبکتر (خط چینها برای CG_cg و خط پر برای CG_fg) ۱۰۵

شکل (۴-۳۱) کانتور سرعت افقی در زمان ۶۰ ثانیه بدست آمده از حل CG_fg ۱۰۶

شکل (۵-۱) شکل پلان و ابعاد طولی و عرضی کانال دارای بازشدگی و تنگ‌شدگی (Van Rijn (۱۹۸۵)) ۱۱۴

شکل (۵-۲) مقایسه مولفه افقی سرعت بین نتایج عددی حاضر (خط پرننگ) و نتایج عددی Van Rijn (۱۹۸۵) (نقاط) ۱۱۴

شکل (۵-۳) توصیف شکل هندسی دامنه محاسباتی (a) شکل پلان و (b) مقطع طولی ۱۱۶

شکل (۵-۴) میدان سرعت در حالت دائمی (a) Bournet و همکاران (۱۹۹۹) و (b) تحقیق حاضر ۱۱۷

شکل (۵-۵) کانتورهای درجه حرارت بدست آمده از نتایج عددی Bournet و همکاران (۱۹۹۹) (خط-چین و نقطه) و نتایج عددی حاضر (خط پر) در حالت دائمی ۱۱۸

شکل (۵-۶) تصاویر متوالی توزیع چگالی بدست آمده از محاسبات در زمانهای مشخص ۱۱۹

شکل (۵-۷) توصیف شکل هندسی دامنه محاسباتی (a) شکل پلان و (b) مقطع طولی ۱۲۲

- شکل (۵-۸) کانتورهای درجه حرارت بدون بعد اندازه‌گیری شده توسط Stefan و Johnson (۱۹۸۸) در دو مقطع (a) $x = 4.2 \text{ m}$ و (b) $x = 6.0 \text{ m}$ ۱۲۳
- شکل (۵-۹) کانتورهای درجه حرارت بدون بعد محاسبه شده در تحقیق حاضر ۱۲۴
- شکل (۵-۱۰) مقایسه درجه حرارت بدون بعد در مقطع $x = 4.2 \text{ m}$ بین نتایج عددی حاضر (خط پر) و نتایج آزمایشگاهی Stefan و Johnson (۱۹۸۸) ۱۲۴
- شکل (۵-۱۱) مقایسه درجه حرارت بدون بعد در مقطع $x = 6.0 \text{ m}$ بین نتایج عددی حاضر (خط پر) و نتایج آزمایشگاهی Stefan و Johnson (۱۹۸۸) ۱۲۵
- شکل (۶-۱) دو شبکه رویهم افتاده ۱۲۹
- شکل (۶-۲) گره مرز مشترک واقع در سلول میزبان ۱۳۱
- شکل (۶-۳) شمای کلی دو شبکه ریز و درشت در حالت شبکه جابجاشده ۱۳۲
- شکل (۶-۴) نحوه شبکه‌بندی با استفاده از دو شبکه ریز و درشت ۱۳۳
- شکل (۶-۵) الگوی خطوط جریان در شبیه‌سازیهای تک شبکه‌ای درشت، ریز و مدلهای یکطرفه و دوطرفه ۱۳۵
- شکل (۶-۶) الگوی خطوط جریان در شبیه‌سازیهای تک شبکه‌ای ریز و مدل دوطرفه (نتایج مربوط به شبکه درشت) ۱۳۶
- شکل (۶-۷) نحوه شبکه‌بندی با استفاده از دو شبکه ریز و درشت ۱۳۷
- شکل (۶-۸) الگوی خطوط جریان در شبیه‌سازیهای تک شبکه‌ای درشت، ریز و مدلهای یکطرفه و دوطرفه ۱۳۸
- شکل (۶-۹) مقایسه نتایج عددی پروفیل سرعت طولی بدست آمده از مدل یک شبکه‌ای ریز (خط پر-رنگ) با نتایج عددی مدل یک شبکه‌ای درشت (خط‌چین) و آزمایشگاهی (نقاط) Alfrink و Van Rijn (۱۹۸۳) ۱۳۹
- شکل (۶-۱۰) نتایج عددی پروفیل سرعت طولی بدست آمده از مدل یک شبکه‌ای ریز (خط پرننگ) با نتایج عددی مدل دوطرفه (خط‌چین) و آزمایشگاهی (نقاط) Alfrink و Van Rijn (۱۹۸۳) ۱۳۹

- شکل (۶-۱۱) نحوه شبکه‌بندی با استفاده از دو شبکه ریز و درشت ۱۴۰
- شکل (۶-۱۲) مرز شبکه‌های ریز و درشت ۱۴۱
- شکل (۶-۱۳) جزئیات مربوط به نحوه شبکه‌بندی (a) مربع شماره ۱ و (b) مربع شماره ۲ را در شکل ۶-۱۲ نمایش می‌دهند. ۱۴۱
- شکل (۶-۱۴) تصاویر توزیع چگالی بدست آمده از محاسبات یک شبکه‌ای CG_fg، دو شبکه‌ای یکطرفه (بر روی شبکه ریز) و دو شبکه‌ای دوطرفه (بر روی شبکه ریز) در زمانهای مشخص ۱۴۲
- شکل (۶-۱۵) تصاویر توزیع چگالی بدست آمده از محاسبات یک شبکه‌ای CG_fg، دو شبکه‌ای یکطرفه (بر روی شبکه درشت) و دو شبکه‌ای دوطرفه (بر روی شبکه درشت) در زمانهای مشخص ۱۴۵
- شکل (۶-۱۶) تصاویر توزیع چگالی بدست آمده از محاسبات یک شبکه‌ای CG_fg، دو شبکه‌ای یکطرفه (بر روی شبکه درشت) و دو شبکه‌ای دوطرفه (بر روی شبکه درشت) در زمانهای مشخص ۱۴۶
- شکل (۶-۱۷) تصاویر توزیع چگالی بدست آمده از محاسبات یک شبکه‌ای CG_fg، دو شبکه‌ای یکطرفه (بر روی شبکه درشت) و دو شبکه‌ای دوطرفه (بر روی شبکه درشت) در زمانهای مشخص ۱۴۸
- شکل (۶-۱۸) تصاویر توزیع چگالی بدست آمده از محاسبات یک شبکه‌ای CG_fg، دو شبکه‌ای یکطرفه (بر روی شبکه‌های درشت و ریز) و دو شبکه‌ای دوطرفه (بر روی شبکه‌های درشت و ریز) در زمانهای مشخص ۱۴۹
- شکل (۶-۱۹) مقایسه پروفیل‌های قائم مؤلفه سرعت طولی محاسبه شده (خط‌چینها برای مدل یکطرفه و خطوط جامد برای CG_fg) با اندازه‌گیری‌های (نقاط) García (۱۹۹۳) در موقعیتهای انتخاب شده ۱۵۰
- شکل (۶-۲۰) مقایسه پروفیل‌های قائم مؤلفه سرعت طولی محاسبه شده (خط‌چینها برای مدل دوطرفه و خطوط جامد برای CG_fg) با اندازه‌گیری‌های (نقاط) García (۱۹۹۳) در موقعیتهای انتخاب شده ۱۵۱
- شکل (۶-۲۱) مقایسه مقدار حجم سیال غلیظ در محدوده شبکه ریز در حل دو شبکه‌ای دوطرفه (خط-چین) و همچنین در همین محدوده برای حل یک شبکه‌ای ریز CG_fg (خط پر) برای زمانهای مختلف ۱۵۲
- شکل (۶-۲۲) مقایسه مقدار خطای نسبی حجم سیال غلیظ در محدوده شبکه ریز در حل دو شبکه‌ای دوطرفه نسبت به حل یک شبکه‌ای ریز CG_fg در برای زمانهای مختلف ۱۵۲