سه بعدی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای سید هادی مشکانی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان توسعه مدل سه بعدی جریان آشفته در آبگیری قوس در تاریخ ۱۳۹۰/۲/۱۴ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه دکتری سازه های هیدرولیکی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر علی اکبر صالحی	استاد	
	نیشابوری		
استاد ناظر	دکتر مسعود قدسیان	استاد	
استاد ناظر	دکتر سید علی ایوب زاده	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سید محمد علی بنی هاشمی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر سعید رضا صباغ یزدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد تقی احمدی	استاد	

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 ۱- 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 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 پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز 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 می‌شود.

ماده ۴- 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 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.

سیدمحمدهادی مشکاتی

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

ماده ۲: 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 ۳: 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 ٤: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ٥: 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 ٤ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ٦: اینجانب سیدمحمدهادی مشکاتی دانشجوی رشته عمران - سازه‌های هیدرولیکی مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

سیدمحمدهادی مشکاتی

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

رساله دکتری مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی

توسعه مدل سه‌بعدی جریان در آبگیری از قوس با مدل آشفتگی تنش جبری

دانشجو:
سید محمد هادی مشکاتی

استاد راهنما:
سید علی اکبر صالحی نیشابوری

اردیبهشت ۱۳۹۰

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

زبان سپاس ندارم، غریق دریای شرمم زیرا شناخت مقام آسمانی مادر و شکوه خداوندی پدر، در گرو هیچ بنده‌ای نیست.

هرچه هستم و هرچه دارم از شماست و اینک که به پشتوانه پشتیبانی‌های شما چند پله‌ای از نردبان زندگانی را فراز آمده‌ام، این چند برگ را به نشان ناتوانی خویش در سپاس از شما یزدانیان، پای‌انداز می‌کنم.

تشکر و قدردانی:

ضمن سپاس بیکران خداوند، از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر صالحی نیشابوری که با ارائه راهنمائی‌های مدبرانه و دلسوزانه خود، نظارت و سرپرستی این رساله را برعهده داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمند جناب آقای دکتر منتظری نمین و آقایان دکتر افتخاری، دکتر بهلولی و دکتر صفرزاده که در راهبرد رساله به اینجانب کمک‌های شایانی نمودند، سپاسگزاری نمایم. همچنین از آقایان دکتر واقفی و دکتر پیرستانی که اطلاعات آزمایشگاهی خود را جهت صحت‌سنجی بخشی از این رساله در اختیار اینجانب قرار دادند، تشکر می‌نمایم.

همچنین از همسر عزیزم که در انتهای این مسیر با حمایت‌های بیکرانه خود هم از نظر علمی و هم از نظر روحی پیشتیبان من بود، سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده:

در این تحقیق الگوی جریان در آبگیری از کانال‌های مستقیم و قوسی‌شکل به کمک یک مدل آشفتگی غیرایزوتروپ، جهت بررسی دقیق‌تر فیزیک این فرآیند با استفاده از توسعه مدل عددی، شبیه‌سازی و به یک مدل سه‌بعدی موجود قابلیت های موردنظر در دو فاز افزوده شده است. این مدل، معادلات ناویراستوکس را در مختصات منحنی‌الخط غیرمتعامد براساس روش حجم محدود حل می‌نماید و برای کوپل میدان سرعت و فشار در شبکه جابجا نشده و درونیابی شارها بر روی وجوه در آن به ترتیب از الگوریتم سیمپل و روش رای و چاو استفاده شده است. همچنین سطح آزاد بصورت مرز تقارن فرض شده و از تغییرات آن صرف‌نظر می‌شود.

در فاز اول به کمک روش بلوک واحد و با آرایه‌های متغیر، امکان شبیه‌سازی آبگیر در کنار کانال اصلی به مدل اضافه گردید. در فاز دوم نیز با عنایت به ساختار جریان و همچنین مروری بر تحقیقات پیشین، مدل آشفتگی غیرایزوتروپ تنش‌های جبری به عنوان مدلی مناسب جهت شبیه‌سازی فرآیند آبگیری از جریان، در دو نسخه مختلف شامل مدل والین- جانسون (مرتبه چهارم) و مدل رانگ (مرتبه دوم) توسعه داده شد و به مدل اولیه اضافه گردید. نتایج کاربرد اولیه مدل توسعه‌یافته نشان داد که تاثیر شبیه‌سازی تنش‌های غیرایزوتروپ رینولدز در نتایج و مخصوصاً در برآورد جریان‌های ثانویه کاملاً مشهود می‌باشد، بطوریکه حتی با بکارگیری مدل مرتبه دوم (رانگ و همکاران) در مقایسه با مدل مرتبه چهارم (والین و جانسون)، از دقت نتایج کاسته می‌شود.

پس از کاربرد اولیه مدل به بررسی توانایی آن در شبیه‌سازی عددی الگوی جریان اصلی و ثانویه در قوس‌های ۹۰ و ۱۸۰ درجه پرداخته شد. در این خصوص پس از مقایسه نتایج بدست‌آمده از مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی و اطمینان از عملکرد مدل، جزئیات و فیزیک الگوی جریان، مخصوصاً ساختار گردابه‌ها و جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. همچنین در برخی موارد (بدلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی) نتایج بدست‌آمده با نتایج مدل تجاری فلوئنت مقایسه گردید.

پس از اطمینان از عملکرد مناسب مدل در آزمایش‌های اولیه، برای بررسی عملکرد آن در خصوص تقسیم جریان، الگوی جریان در آبگیری از کانال مستقیم مدل‌سازی شد. پروفیل‌های سرعت با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید و ساختار جریان از جمله الگوی جریان‌های ثانویه و عرضی در کانال اصلی و آبگیر در مقایسه با نتایج مدل فلوئنت، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در انتها نیز از مدل توسعه‌داده‌شده برای شبیه‌سازی الگوی جریان در فرآیند آبگیری از قوس استفاده گردید. بدین منظور

آزمایش آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه با زاویه ۴۵ درجه و در موقعیت استقرار ۴۰ درجه بوسیله مدل عددی شبیه‌سازی شد و نتایج بدست‌آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و تحلیل گردید.

نتایج بدست آمده از مدل عددی توسعه‌داده شده در آزمایش‌های مختلف در اکثر موارد، همخوانی بسیار خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی در خصوص الگوی جریان اصلی نشان می‌دهد. مقایسه نتایج مدل‌های مختلف آشفتگی (تنش‌های جبری در مقابل دومعادله‌ای) نیز بیانگر تفاوت اندک میان ساختار اصلی جریان (همچون سرعت طولی) و تفاوت‌های جدی‌تر در خصوص ساختار فرعی آن (همچون جریان‌های ثانویه و گردابه‌های عرضی) می‌باشد. البته در برخی موارد در مدل‌های تنش‌های جبری حتی با وجود پیچیدگی‌هایی که دارد، بواسطه سرعت همگرایی بیشتر، از هزینه‌های محاسباتی نیز کاسته شده است. از سوی دیگر مقایسه جزئیات جریان‌های ثانویه با مدل‌های عددی مشابه (همچون فلوئنت با بکارگیری مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز)، حاکی از توانایی مدل تنش‌های جبری در بررسی الگوی جریان در فرآیندهای پیچیده می‌باشد. قابل ذکر است بیشترین خطا در نتایج مدل توسعه‌داده شده در آزمایش آبگیری از جریان در دو ناحیه شامل محدوده کانال اصلی بلافاصله پس از آبگیر و ورودی دهانه آبگیر در نزدیکی سطح آب، رخ داده که علت آن در گزارشات تحقیقات پیشین، عدم شبیه‌سازی سطح آزاد آب بیان شده است.

کلیدواژه‌ها: مدل عددی سه‌بعدی، آبگیر جانبی، قوس ۱۸۰ درجه، مدل آشفتگی غیرایزوتروپ

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- اصول و مبانی تحقیق ۳

۱-۲-۱- الگوی جریان در قوس ۴

۱-۲-۲- الگوی جریان در آبگیری از کانال مستقیم ۴

۱-۲-۳- الگوی جریان در آبگیری از کانال قوسی‌شکل ۵

۱-۳- چارچوب تحقیق حاضر ۷

۱-۳-۱- ضرورت مساله ۷

۱-۳-۲- اهمیت موضوع تحقیق ۷

۱-۳-۲-۱- دیدگاه هیدرودینامیکی ۷

۱-۳-۲-۲- دیدگاه مدل‌سازی آشفتگی ۸

۱-۳-۳- اهداف مورد انتظار و نوآوری‌های تحقیق ۸

۱-۳-۴- دامنه و وسعت کار: فرضیات و محدودیت‌ها ۹

۱-۳-۵- نمای کلی و چیدمان رساله ۱۰

فصل ۲- مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۱

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- الگوی جریان در قوس‌ها ۱۲

۲-۲-۱- مروری بر الگوی جریان با توجه به مطالعات آزمایشگاهی ۱۲

۲-۲-۲- مدل‌های عددی شبیه‌سازی جریان در قوس ۱۴

۲-۲-۲-۱- تحقیقات در خصوص توسعه مدل‌های عددی ۱۴

۲-۲-۲-۲- تحقیقات در زمینه بکارگیری مدل‌های عددی و تجاری موجود ۱۸

۲-۳- الگوی جریان در آبگیری از کانال مستقیم ۲۰

۲-۳-۱- مروری بر تحقیقات آزمایشگاهی در خصوص فرآیند آبگیری جریان ۲۰

۲-۳-۲- مدل‌های عددی شبیه‌سازی جریان در آبگیری از کانال مستقیم ۲۰

۲-۳-۲-۱- تحقیقات در خصوص توسعه مدل‌های عددی دوبعدی ۲۰

۲-۳-۲-۲- تحقیقات در خصوص توسعه مدل‌های عددی سه‌بعدی ۲۲

۲-۳-۲-۳- تحقیقات در خصوص بکارگیری مدل‌های تجاری موجود ۲۶

۲-۴- الگوی جریان در آبگیری از قوس ۲۸

۲-۴-۱- مروری بر الگوی جریان با توجه به نتایج آزمایشگاهی ۲۸

۲-۴-۲- مدل‌های عددی شبیه‌سازی جریان در آبگیری از قوس ۲۹

۲-۵- مروری بر تحقیقات انجام‌شده با توجه به اهداف این تحقیق ۳۴

۲-۵-۱- نحوه شبیه‌سازی عددی کانال انحرافی ۳۴
۲-۵-۱-۱- استفاده از شبکه و روش حل بی‌سازمان ۳۴
۲-۵-۱-۲- روش بلوک‌های چندگانه ۳۵
۲-۵-۱-۳- حل میدان جریان در بلوکی واحد ۳۷
۲-۵-۱-۴- مزایا و محدودیت‌های روش بکار رفته در تحقیق ۳۸
۲-۵-۱-۵- روش‌های بکار رفته در تحقیقات پیشین برای مدل‌سازی کانال انحرافی ۴۰
۲-۵-۲- نحوه شبیه‌سازی عددی تقسیم دبی میان کانال اصلی و انحرافی ۴۱
۲-۵-۳- انتخاب مدلی مناسب برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان ۴۲
۲-۵-۳-۱- آشفتگی جریان و انتخاب مدل مناسب از دیدگاه مهندسی ۴۲
۲-۵-۳-۲- مروری بر مدل‌های آشفتگی مختلف با دیدگاه متوسط‌گیری زمانی ۴۳
۲-۵-۳-۳- تاثیر نحوه مدل‌سازی آشفتگی بر ساختار جریان ۴۵
۲-۵-۳-۴- مروری بر تحقیقات پیشین در خصوص مدل‌های آشفتگی تنش‌های جبری ۴۶
۲-۶- جمع‌بندی مطالعات انجام شده ۵۰
فصل ۳- معادلات حاکم ٦١
۳-۱- معادلات بقاء جرم و ممنتوم ۶۲
۳-۲- معادلات مدل‌سازی آشفتگی ۶۳
۳-۲-۱- مدل‌های دومعادله‌ای ۶۳
۳-۲-۱-۱- مدل $k-\varepsilon$ استاندارد ۶۴
۳-۲-۱-۲- مدل $k-\omega$ استاندارد ۶۴
۳-۲-۲- مدل تنش‌های جبری ۶۶
۳-۲-۲-۱- روند توسعه مدل تنش‌های جبری ۶۶
۳-۲-۲-۲- مدل صریح والین و جانسون ۷۰
۳-۲-۲-۳- مدل صریح رانگ و همکاران ۷۴
۳-۳- خلاصه و جمع‌بندی ۷۶
فصل ٤- نحوه توسعه مدل عددی و جزئیات آن ۷۷
۴-۱- مقدمه ۷۸
۴-۲- توسعه مدل عددی اولیه ۸۰
۴-۲-۱- ساختار مدل عددی اولیه ۸۱
۴-۲-۲- بهبود مدل اولیه و رفع نواقص آن ۸۲
۴-۳- موارد توسعه مدل اولیه در این تحقیق ۸۳
۴-۳-۱- نحوه مدل‌سازی بلوک آبگیر ۸۴
۴-۳-۲- نحوه تقسیم دبی جریان میان آبگیر و کانال اصلی ۸۶
۴-۳-۳- شبیه‌سازی الگوی جریان بوسیله مدل تنش‌های جبری ۸۸

۴-۳-۳-۱- معادلات حاکم ۸۸
۴-۳-۳-۲- روند برنامه‌نویسی مدل تنش‌های جبری ۸۹
۴-۳-۳-۳- الگوریتم حل ۹۰
۴-۳-۴- سایر نکات جانبی در توسعه مدل حاضر ۹۲
۴-۳-۴-۱- الگوریتم SIMPLEC ۹۲
۴-۳-۴-۲- مدل‌سازی نیروهای کالبدی ۹۳
۴-۳-۴-۳- نحوه تعریف ترم‌های تانسوری در مدل ۹۴
۴-۴- خلاصه و جمع‌بندی ۹۵
فصل ۵- صحت‌سنجی و ارزیابی مدل عددی ۹۶
۵-۱- مقدمه ۹۷
۵-۲- شبیه‌سازی جریان در کانال مستقیم ۹۷
۵-۲-۱- مقایسه نتایج مدل حاضر با داده‌های آزمایشگاهی ۹۷
۵-۲-۲- مقایسه نتایج مدل حاضر با نتایج مدل عددی دیگر ۱۰۴
۵-۳- شبیه‌سازی جریان عبوری از روی پله معکوس ۱۰۹
۵-۳-۱- پارامترهای ورودی و مشخصات مدل محاسباتی ۱۰۹
۵-۳-۲- نتایج مدل عددی ۱۱۱
۵-۴- شبیه‌سازی جریان در قوس ۹۰ درجه ۱۱۴
۵-۴-۱- مشخصات میدان حل و شبکه‌بندی آن ۱۱۴
۵-۴-۲- شرایط مرزی ۱۱۶
۵-۴-۳- بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی ۱۱۶
۵-۴-۳-۱- پروفیل‌های سرعت طولی در امتداد کانال ۱۱۶
۵-۴-۳-۲- خطوط هم‌سرعت جریان طولی ۱۲۰
۵-۴-۳-۳- خطوط جریان‌های ثانویه و عرضی ۱۲۱
۵-۴-۳-۴- مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف ۱۲۴
۵-۵- شبیه‌سازی جریان در قوس ۱۸۰ درجه ۱۲۶
۵-۵-۱- پارامترهای ورودی مدل ۱۲۶
۵-۵-۱-۱- مشخصات میدان حل و هیدرولیک جریان ۱۲۶
۵-۵-۱-۲- شرایط مرزی میدان ۱۲۷
۵-۵-۱-۳- تنظیم شبکه‌بندی میدان حل ۱۲۸
۵-۵-۱-۴- بررسی تاثیر شبکه‌بندی میدان حل بر نتایج ۱۲۹
۵-۵-۲- بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی ۱۳۲
۵-۵-۲-۱- بررسی روند تغییرات سرعت طولی در امتداد کانال ۱۳۲
۵-۵-۲-۲- بررسی بردارهای سرعت و جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی مختلف ۱۳۶

۵-۵-۲-۳- تغییرات خطوط هم‌سرعت طولی در مقاطع عرضی مختلف ۱۳۸
۵-۵-۲-۴- خطوط جریان در طول کانال برای ترازهای مختلف ۱۴۰
۵-۵-۲-۵- مقایسه نتایج مربوط به مدل‌های آشفتگی مختلف ۱۴۲
۵-۵-۲-۶- مطالعه پارامتریک: بررسی تاثیر زبری بستر و دیواره‌های کانال ۱۵۲
۵-۶- خلاصه و جمع‌بندی ۱۵۴
فصل ٦- شبیه‌سازی عددی فرآیند آبگیری از جریان ۱۵۵
۶-۱- شبیه‌سازی جریان در آبگیری از کانال مستقیم ۱۵۶
۶-۱-۱- پارامترهای ورودی مدل عددی ۱۵۶
۶-۱-۱-۱- مشخصات میدان محاسباتی و هیدرولیک جریان ۱۵۶
۶-۱-۱-۲- شبکه‌بندی میدان حل ۱۵۷
۶-۱-۱-۳- شرایط مرزی میدان ۱۶۰
۶-۱-۲- بررسی الگوی جریان و نتایج شبیه‌سازی عددی ۱۶۱
۶-۱-۲-۱- پروفیل‌های طولی سرعت ۱۶۱
۶-۱-۲-۲- خطوط هم‌سرعت طولی در مقاطع عرضی مختلف ۱۶۷
۶-۱-۲-۳- خطوط جریان‌های عرضی و ثانویه در مقاطع مختلف ۱۷۰
۶-۱-۲-۴- خطوط جریان در ترازهای مختلف ۱۷۴
۶-۱-۲-۵- الگوی تغییرات فشار ۱۷۸
۶-۲- شبیه‌سازی جریان در آبگیری از قوس ۱۸۱
۶-۲-۱- پارامترهای ورودی مدل عددی ۱۸۲
۶-۲-۱-۱- مشخصات میدان محاسباتی و هیدرولیک جریان ۱۸۲
۶-۲-۱-۲- شرایط مرزی میدان حل و جزئیات مدل عددی ۱۸۴
۶-۲-۱-۳- شبکه‌بندی میدان حل ۱۸۵
۶-۲-۲- نتایج بدست آمده از مدل‌سازی جریان ۱۸۷
۶-۲-۲-۱- بررسی تغییرات سرعت طولی در میدان ۱۸۷
۶-۲-۲-۲- بررسی منحنی‌های هم‌تراز سرعت طولی جریان ۱۹۶
۶-۲-۲-۳- بررسی تغییرات جریان‌های ثانویه و عرضی ۲۰۲
۶-۲-۲-۴- بررسی خطوط جریان در ترازهای مختلف ۲۰۵
۶-۳- خلاصه و جمع‌بندی ۲۰۸
فصل ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۲۰۹
۷-۱- مقدمه ۲۱۰
۷-۲- جمع‌بندی نتایج بدست‌آمده از تحقیق ۲۱۰
۷-۲-۱- نتایج مدل در شبیه‌سازی آزمایش‌های ساده ۲۱۰
۷-۲-۲- نتایج مدل در شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس ۲۱۱

۷-۲-۳- نتایج مدل در شبیه‌سازی الگوی آبگیری از جریان ۲۱۲
۷-۲-۳-۱- الگوی جریان در آبگیری از کانال مستقیم ۲۱۲
۷-۲-۳-۲- الگوی جریان در آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه ۲۱۲
۷-۳- پیشنهادات برای انجام مطالعات آتی ۲۱۴
فهرست منابع و مراجع ۲۱۵
پیوست الف - مروری بر فرآیند آبگیری جریان با توجه به نتایج آزمایشگاهی پ۱
الف-۱- فرآیند آبگیری از کانال مستقیم پ۲
الف-۱-۲- تغییرات تراز سطح آب پ۳
الف-۱-۳- تقسیم دبی جریان پ۶
الف-۱-۴- الگوی انتقال رسوب پ۷
الف-۲- فرآیند آبگیری از کانال منحنی‌شکل پ۸
پیوست ب - روش‌های عددی بکاررفته در مدل حاضر پ۱۱
ب-۱- انفصال معادلات حاکم پ۱۲
ب-۱-۱- پارامترهای هندسی در مختصات منحنی‌الخط پ۱۲
ب-۱-۲- تبدیل معادلات حاکم به یک معادله عمومی پ۱۴
ب-۱-۳- گسسته‌سازی ترم‌های انتقال و پخش پ۱۷
ب-۱-۳-۱- گسسته‌سازی ترم‌های پخش پ۱۷
ب-۱-۳-۲-گسسته‌سازی ترم‌های جابجایی با الگوی قاعده توانی.....پ۱۹
ب-۱-۴- معادله نهایی منفصل‌شده.....پ۲۰
ب-۱-۵- محاسبه شارهای عمود بر وجوه حجم کنترل پ۲۱
ب-۱-۶- کوپل‌نمودن سرعت و فشار پ۲۳
ب-۱-۶-۱- الگوریتم SIMPLE پ۲۳
ب-۲- شرایط مرزی و نحوه اعمال آنها در مدل.....پ۲۵
ب-۲-۱- مرز ورودی پ۲۶
ب-۲-۲- مرز خروجی پ۲۷
ب-۲-۳- مرز دیوار پ۲۷
ب-۲-۴- مرز تقارن پ۳۰
ب-۳- حل دستگاه معادلات جبری میدان جریان پ۳۰
ب-۳-۱- حل دستگاه با بکارگیری ضرایب زیرتخفیف پ۳۰
ب-۳-۲- ضابطه همگرایی معادلات پ۳۰
ب-۳-۳- الگوریتم حل پ۳۲

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ : جزئیات و پارامترهای مدل برای تصاویر ارائه شده در شکل ۲-۴ ..... ۲۵
جدول ۲-۲ : میزان بهبود خطا در روش کسر حجمی سیال نسبت به روش درپوش صلب [۸] ۳۳
جدول ۲-۳ : روش مورد استفاده در تحقیقات مختلف در خصوص شبیه‌سازی آبگیری از کانال مستقیم ۴۰
جدول ۲-۴ : روش مورد استفاده در تحقیقات مختلف در خصوص شبیه‌سازی آبگیری از قوس ۴۱
جدول ۲-۵ : پارامتر انتخاب شده در برخی از مدل‌های دومعادله‌ای آشفتگی ۴۴
جدول ۲-۶ : مطالعات انجام شده در خصوص الگوی جریان و رسوب در قوس ۵۲
جدول ۲-۷ : مطالعات انجام شده در خصوص الگوی جریان و رسوب در پیچانرود ۵۴
جدول ۲-۸ : مطالعات عددی انجام شده در خصوص آبگیری ۵۵
جدول ۲-۹ : مطالعات انجام شده در خصوص مدل آشفتگی تنش‌های جبری رینولدز ۵۶
جدول ۴-۱ : تعریف ترم چشمه در تبدیل معادلات حاکم به یک قالب کلی ۸۹
جدول ۵-۱ : مشخصات شبکه‌های مختلف جهت حساسیت‌سنجی نتایج نسبت به شبکه محاسباتی ۹۹
جدول ۵-۲ : مقدار خطای محاسباتی در نتایج بدست‌آمده از مدل‌های آشفتگی مختلف ۱۰۳
جدول ۵-۳ : مقایسه طول جریان برگشتی برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی ۱۱۱
جدول ۵-۴ : مقدار خطای محاسباتی در مقاطع مختلف از آزمون پله معکوس ۱۱۳
جدول ۵-۵ : مقدار خطای محاسباتی در مقاطع مختلف از قوس ۹۰ درجه (درصد) ۱۱۹
جدول ۵-۶ : مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف در آزمون قوس ۹۰ درجه ۱۲۵
جدول ۵-۷ : مقادیر پارامترهای آشفتگی در مرز ورودی میدان ۱۲۷
جدول ۵-۸ : مشخصات شبکه‌های مختلف جهت حساسیت‌سنجی نتایج نسبت به شبکه محاسباتی ۱۲۹
جدول ۵-۹ : مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف در آزمون قوس ۹۰ درجه ۱۳۱
جدول ۵-۱۰ : مقایسه درصد خطای نتایج مدل‌های آشفتگی مختلف در آزمون قوس ۱۸۰ درجه برای مقاطع مختلف . ۱۳۴
جدول ۵-۱۱ : مقایسه نتایج مدل‌های آشفتگی مختلف برای مقطع ورودی، رأس و خروجی قوس ۱۸۰ درجه ۱۴۴
جدول ۶-۱ : مشخصات هیدرولیکی جریان [۶۷] ۱۵۶
جدول ۶-۲ : موقعیت مقاطع موردنظر جهت برداشت اطلاعات آزمایشگاهی ۱۵۷
جدول ۶-۳ : مقایسه جزئیات دو شبکه با شرایط مختلف کلاستربندی طولی ۱۵۸
جدول ۶-۴ : مقادیر پارامترهای آشفتگی در مرز ورودی میدان ۱۶۰
جدول ۶-۵ : مقادیر خطای محاسباتی در مقاطع مختلف از کانال اصلی در نزدیکی سطح آزاد (درصد) ۱۶۳
جدول ۶-۶ : مقادیر درصد خطای محاسباتی در مقاطع مختلف از کانال انحرافی ۱۶۴
جدول ۶-۷ : مقاطع انتخاب شده در کانال قوسی‌شکل جهت اندازه‌گیری سرعت (درجه) [۳] ۱۸۳
جدول ۶-۸ : مشخصات هیدرولیکی جریان [۳] ۱۸۴
جدول ۶-۹ : مقادیر درصد خطای محاسباتی در آزمون آبگیری از قوس برای مقاطع و ترازهای مختلف از کانال اصلی ۱۹۱

جدول ۶-۱۰ : مقادیر خطای محاسباتی در مقاطع مختلف کانال انحرافی در آبگیری از قوس (درصد) ۱۹۶
جدول ب-۱ : تعریف پارامترهای مختلف در تبدیل معادلات حاکم به یک قالب کلی پ۱۵
جدول ب-۲ : تعریف پارامتر کمکی در طرح‌های گسسته‌سازی ترم انتقال پ۱۹
جدول ب-۳ : نحوه تفکیک نمودن ترم چشمه در مدل آشفتگی $k-\varepsilon$.....پ۲۰
جدول ب-۴ : معادلات مربوط به تخمین پارامترهای آشفتگی در مرز ورودی جریان پ۲۶
جدول ب-۵ : ترم چشمه تفکیک‌شده برای شرط مرزی دیوار در معادلات آشفتگی مختلف پ۲۹

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ : الگوی جریان سه‌بعدی در آبگیری از کانال مستقیم [۶۸] ۵
شکل ۱-۲ : الگوی سه‌بعدی جریان در آبگیری جانبی از قوس [۵] ۶
شکل ۲-۱ : مقایسه سطح آب برآورد شده بوسیله مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی در ۴ مقطع مختلف [۵۳] ۱۷
شکل ۲-۲ : مسیر حرکت ذرات رها شده در صفحه افقی نزدیک بستر (الف) و تراز میانی (ب) [۶۸] ۲۴
شکل ۲-۳ : پروفیل‌های سرعت طولی در تراز نزدیک بستر (الف) و سطح آب (ب) [۶۸] ۲۵
شکل ۲-۴ : مسیر حرکت ذرات منتشرشده در بالادست آبگیر در دو صفحه افقی [۶۸] ۲۶
شکل ۲-۵ : مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی در تراز نزدیک سطح آب [۱۰] ۳۰
شکل ۲-۶ : پروفیل‌های سرعت بدست‌آمده از مدل فلوئنت با استفاده از دو روش مختلف برای سطح آزاد [۸] ۳۲
شکل ۲-۷ : خطوط هم‌سرعت بدست‌آمده از مدل فلوئنت با استفاده از دو روش مختلف برای سطح آزاد [۸] ۳۳
شکل ۲-۸ : سلول‌های هاله در مجاورت یک بلوک محاسباتی [۱۶] ۳۶
شکل ۲-۹ : نتایج شبیه‌سازی عددی خطوط جریان در تراز سطح آب با استفاده از مدل Flow3D ۴۰
شکل ۲-۱۰ : توزیع چرخش طولی حداکثر درطول یک مقطع عرضی در آبگیری از کانال مستقیم [۶۷] ۴۵
شکل ۴-۱ : فلوچارت حل میدان جریان ۹۲
شکل ۵-۱ : نمای نمادین محورهای مختصاتی جریان در داخل کانال مربعی‌شکل [۴] ۹۸
شکل ۵-۲ : پروفیل سرعت طولی در مقطع خروجی کانال برای چند حالت مختلف شبکه‌بندی ۱۰۰
شکل ۵-۳ : تقارن خطوط هم‌سرعت طولی در مقطع خروجی کانال در مدل توسعه‌داده شده (الف) و مدل اولیه (ب) .. ۱۰۱
شکل ۵-۴ : تقارن خطوط هم‌سرعت عرضی (v : الف ، w : ب) در مقطع خروجی کانال ۱۰۱
شکل ۵-۵ : تقارن پارامترهای آشفتگی (k : الف ، ε : ب ، ν : ج) در مقطع خروجی کانال ۱۰۱
شکل ۵-۶ : تغییرات مولفه طولی سرعت در نزدیکی دیواره (مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف) ۱۰۲
شکل ۵-۷ : تغییرات مولفه طولی سرعت (مقایسه نسخه‌های مختلف مدل تنش‌های جبری رینولدز) ۱۰۳
شکل ۵-۸ : تغییرات مولفه طولی سرعت در مدل تجاری فلوئنت (مقایسه مدل‌های مختلف آشفتگی) ۱۰۴
شکل ۵-۹ : شبکه محاسباتی بکار رفته در شبیه‌سازی عددی ۱۰۵
شکل ۵-۱۰ : شبکه محاسباتی بکار رفته در مدل عددی توسعه داده شده ۱۰۶
شکل ۵-۱۱ : مقایسه نتایج مدل آشفتگی دومعادله‌ای در مدل عددی حاضر (سمت راست) با فلوئنت (سمت چپ) ۱۰۷
شکل ۵-۱۲ : مقایسه نتایج مدل آشفتگی غیرایزوتروپ در مدل عددی حاضر (سمت راست) با فلوئنت (سمت چپ) .. ۱۰۷
شکل ۵-۱۳ : مقایسه خطوط جریان بدست آمده از مدل آشفتگی ایزوتروپ (سمت راست) و غیرایزوتروپ (سمت چپ) ۱۰۸
شکل ۵-۱۴ : دامنه محاسباتی و مقاطع موردنظر جهت مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ۱۰۹
شکل ۵-۱۵ : میدان حل و دامنه محاسباتی ۱۱۰
شکل ۵-۱۶ : مقادیر پارامترهای جریان در محل ورودی با توجه به داده‌های آزمایشگاهی ۱۱۰
شکل ۵-۱۷ : شبکه‌بندی و شرایط مرزی انتخاب‌شده برای میدان محاسباتی ۱۱۰

شکل ۵-۱۸ : مقایسه پروفیل سرعت طولی در مقاطع مختلف با داده‌های آزمایشگاهی ۱۱۲
شکل ۵-۱۹ : مقایسه مولفه طولی سرعت برای نتایج مدل عددی حاضر در دو مدل آشفتگی مختلف (شبکه ریز) ۱۱۲
شکل ۵-۲۰ : مقایسه پروفیل سرعت بدست‌آمده از مدل حاضر در دو مدل آشفتگی مختلف با داده‌های آزمایشگاهی .. ۱۱۳
شکل ۵-۲۱ : تصویر فلوم آزمایشگاهی قوس ۹۰ درجه دانشگاه تربیت مدرس [۱۵]..... ۱۱۴
شکل ۵-۲۲ : موقعیت نقاط برداشت اطلاعات در فلوم آزمایشگاهی برحسب متر [۱۵]..... ۱۱۵
شکل ۵-۲۳ : مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی قوس ۹۰ درجه ۱۱۵
شکل ۵-۲۴ : مقایسه پروفیل‌های طولی بدست‌آمده از مدل عددی در نزدیکی بستر با نتایج آزمایشگاهی ۱۱۷
شکل ۵-۲۵ : مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت پیش‌بینی شده در عمق میانه کانال با نتایج آزمایشگاهی..... ۱۱۸
شکل ۵-۲۶ : مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت پیش‌بینی شده در نزدیکی سطح آب با نتایج آزمایشگاهی ۱۱۸
شکل ۵-۲۷ : تغییرات مقدار حداکثر سرعت طولی در مقاطع مختلف..... ۱۲۰
شکل ۵-۲۸ : خطوط هم‌سرعت طولی در مقاطع عرضی قوس و پایین‌دست آن..... ۱۲۱
شکل ۵-۲۹ : خطوط جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی قوس و پایین‌دست آن ۱۲۲
شکل ۵-۳۰ : فاصله مرکز گردابه جریان‌های ثانویه از دیواره داخلی قوس و کف کانال در مقاطع عرضی مختلف ۱۲۳
شکل ۵-۳۱ : مقایسه پروفیل‌های سرعت بدست آمده از مدل‌های مختلف آشفتگی در مقاطع مختلف ۱۲۵
شکل ۵-۳۲ : مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی قوس ۱۸۰ درجه [۳] ۱۲۷
شکل ۵-۳۳ : شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی..... ۱۲۸
شکل ۵-۳۴ : نمای سه‌بعدی و پلان شبکه‌بندی منطبق بر مرزها برای میدان حل ۱۲۹
شکل ۵-۳۵ : پروفیل سرعت طولی در مقاطع مختلف برای چند حالت مختلف شبکه‌بندی ۱۳۰
شکل ۵-۳۶ : روند بهبود میانگین خطای محاسباتی در شبکه های مختلف ۱۳۲
شکل ۵-۳۷ : مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت پیش‌بینی شده در نزدیکی سطح آب با نتایج آزمایشگاهی ۱۳۳
شکل ۵-۳۸ : مقایسه موقعیت حداکثر سرعت طولی با داده‌های آزمایشگاهی در مقاطع مختلف (نزدیک سطح آب) ... ۱۳۵
شکل ۵-۳۹ : مقایسه موقعیت حداکثر سرعت طولی در ترازهای نزدیک بستر و سطح آب ۱۳۶
شکل ۵-۴۰ : بردارهای سرعت و جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی مختلف ۱۳۷
شکل ۵-۴۱ : خطوط هم‌سرعت طولی در مقاطع عرضی مختلف ۱۳۹
شکل ۵-۴۲ : خطوط جریان در تراز نزدیک به بستر..... ۱۴۰
شکل ۵-۴۳ : خطوط جریان در تراز میانی عمق کانال ۱۴۱
شکل ۵-۴۴ : خطوط جریان در تراز نزدیک به سطح آب ۱۴۲
شکل ۵-۴۵ : مقایسه پروفیل‌های سرعت طولی بدست آمده از مدل‌های مختلف آشفتگی در مقاطع مختلف..... ۱۴۳
شکل ۵-۴۶ : مقایسه پروفیل‌های طولی بدست‌آمده از مدل‌های مختلف آشفتگی در سه مقطع مختلف ۱۴۵
شکل ۵-۴۷ : مقایسه پروفیل‌های سرعت عرضی بدست‌آمده از مدل‌های مختلف آشفتگی در خروجی قوس ۱۴۵
شکل ۵-۴۸ : مقایسه خطوط هم‌سرعت طولی بدست‌آمده از مدل‌های مختلف آشفتگی در مقاطع مختلف..... ۱۴۶
شکل ۵-۴۹ : مقایسه خطوط جریان‌های عرضی و گردابه‌های بدست‌آمده از مدل‌های مختلف آشفتگی در مقاطع مختلف
..... ۱۴۷

شکل ۵-۵۰ : مقایسه روند همگرایی در مدل حاضر (سمت راست) و مدل تجاری فلوئنت (سمت چپ) ۱۴۸
شکل ۵-۵۱ : مقایسه خطوط جریان‌های عرضی بدست‌آمده از مدل‌های حاضر با مدل فلوئنت در مقاطع مختلف ۱۴۹
شکل ۵-۵۲ : مقایسه خطوط هم‌تراز انرژی جنبشی آشفتگی در مدل‌های مختلف (مقاطع شاخص از قوس ۱۸۰ درجه). ۱۵۱
شکل ۵-۵۳ : پروفیل سرعت طولی در مقاطع مختلف برای چند زبری متفاوت ۱۵۲
شکل ۶-۱ : ابعاد مدل و شبکه محاسباتی آن ۱۵۸
شکل ۶-۲ : شبکه‌های تولید شده با کلاستربندی طولی (شبکه ۱) و بدون آن (شبکه ۲) ۱۵۹
شکل ۶-۳ : مقایسه پروفیل سرعت بی‌بعد شده با نتایج آزمایشگاهی برکدل در تراز عمق میانه برای دو شبکه مختلف .. ۱۵۹
شکل ۶-۴ : شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی ۱۶۰
شکل ۶-۵ : مقایسه پروفیل سرعت بی‌بعد شده طولی در کانال اصلی با نتایج آزمایشگاهی (تراز عمق میانه)..... ۱۶۱
شکل ۶-۶ : مقایسه پروفیل سرعت بی‌بعد شده طولی در کانال آبگیر با نتایج آزمایشگاهی (تراز عمق میانه) ۱۶۳
شکل ۶-۷ : مقایسه پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی در تراز نزدیک بستر ۱۶۶
شکل ۶-۸ : مقایسه پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی در تراز سطح آب ۱۶۶
شکل ۶-۹ : خطوط هم‌سرعت طولی در مقاطع مختلف از کانال اصلی ۱۶۷
شکل ۶-۱۰ : خطوط هم‌سرعت طولی در مقاطع مختلف از کانال انحرافی ۱۶۹
شکل ۶-۱۱ : خطوط جریان‌های عرضی و ثانویه در مقاطع مختلف از کانال اصلی ۱۷۰
شکل ۶-۱۲ : خطوط جریان‌های عرضی و ثانویه در مقاطع مختلف از کانال انحرافی ۱۷۲
شکل ۶-۱۳ : شبکه بکاررفته در یک مقطع عرضی آبگیر در مدل فلوئنت (الف) و مدل عددی حاضر (ب)..... ۱۷۳
شکل ۶-۱۴ : خطوط جریان‌های عرضی و ثانویه در مقاطع مختلف از کانال انحرافی (نتایج مدل فلوئنت) ۱۷۳
شکل ۶-۱۵ : خطوط جریان و تغییرات عرض ناحیه تقسیم جریان در ترازهای مختلف ۱۷۴
شکل ۶-۱۶ : شکل‌گیری نواحی جدایی جریان در نتایج بدست‌آمده از مدل عددی ۱۷۶
شکل ۶-۱۷ : نمای سه‌بعدی از ناحیه جدایی جریان در محدوده دیواره داخلی آبگیر ۱۷۷
شکل ۶-۱۸ : شکل‌گیری نواحی جدایی جریان در نتایج بدست‌آمده از مدل عددی ۱۷۸
شکل ۶-۱۹ : توزیع فشار هیدرودینامیک در محدوده ورودی آبگیر ۱۷۹
شکل ۶-۲۰ : مقایسه نتایج مربوط به مدل عددی حاضر با داده‌های آزمایشگاهی و سایر مدل‌های عددی ۱۸۰
شکل ۶-۲۱ : نمای پرسپکتیو از قوس ۱۸۰ درجه و آبگیر آن [۵] ۱۸۱
شکل ۶-۲۲ : مشخصات هندسی فلوم مورد نظر [۳] ۱۸۲
شکل ۶-۲۳ : طرح سه بعدی از میدان مورد نظر و شرایط مرزی اعمالی به آن [۳] ۱۸۳
شکل ۶-۲۴ : شبکه‌بندی انجام شده در هر مقطع از کانال اصلی برای اندازه‌گیری سرعت [۳] ۱۸۳
شکل ۶-۲۵ : شبکه‌بندی در نظر گرفته شده در کانال انحرافی برای اندازه‌گیری سرعت [۳]..... ۱۸۴
شکل ۶-۲۶ : طرح سه بعدی از میدان مورد نظر و شرایط مرزی اعمالی به آن ۱۸۵
شکل ۶-۲۷ : شبکه‌بندی میدان حل با کلاستربندی‌های مختلف در جهات متفاوت..... ۱۸۶
شکل ۶-۲۸ : مقایسه پروفیل سرعت‌های طولی بدست‌آمده از مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در نزدیکی بستر۱۸۷
شکل ۶-۲۹ : پروفیل سرعت‌های طولی در نزدیکی بستر و در محدوده آبگیری ۱۸۸

شکل ۶-۳۰: مقایسه پروفیل سرعت‌های طولی حاصل از مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در نزدیکی عمق میانه ۱۹۰
شکل ۶-۳۱: مقایسه پروفیل سرعت های طولی حاصل از مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در نزدیکی سطح آب ۱۹۰
شکل ۶-۳۲: پروفیل سرعت‌های طولی در کانال انحرافی در نزدیکی بستر ($z = 0.005$ m) ۱۹۲
شکل ۶-۳۳: مقایسه پروفیل سرعت‌های طولی در کانال انحرافی با داده‌های آزمایشگاهی ۱۹۴
شکل ۶-۳۴: بررسی دستیابی به شرط توسعه‌یافتگی جریان با مقایسه پروفیل سرعت‌های طولی در دو مقطع ۱۹۵
شکل ۶-۳۵: خطوط هم‌سرعت طولی در کانال اصلی (مقاطع قبل از دهانه آبگیر) ۱۹۷
شکل ۶-۳۶: مقایسه خطوط هم‌سرعت طولی در کانال با آبگیر و بدون آن (مقاطع قبل از دهانه آبگیر) ۱۹۷
شکل ۶-۳۷: خطوط هم‌سرعت طولی در کانال اصلی (مقاطع روبروی دهانه آبگیر) ۱۹۸
شکل ۶-۳۸: مقایسه خطوط هم‌سرعت طولی در کانال با آبگیر و بدون آن (مقطع مقابل دهانه آبگیر) ۱۹۸
شکل ۶-۳۹: خطوط هم‌سرعت طولی در کانال اصلی (مقاطع بعد از دهانه آبگیر) ۱۹۹
شکل ۶-۴۰: مقایسه خطوط هم‌سرعت طولی در کانال با آبگیر و بدون آن (مقاطع بعد از دهانه آبگیر) ۲۰۰
شکل ۶-۴۱: خطوط هم‌سرعت طولی در مقاطع مختلف از کانال انحرافی ۲۰۱
شکل ۶-۴۲: خطوط جریان‌های عرضی و بردارهای سرعت در مقاطع قبل از دهانه آبگیر ۲۰۲
شکل ۶-۴۳: خطوط جریان‌های عرضی و بردارهای سرعت در مقاطع نزدیک به دهانه آبگیر ۲۰۳
شکل ۶-۴۴: خطوط جریان‌های عرضی و بردارهای سرعت در مقاطع بعد از محدوده دهانه آبگیر ۲۰۴
شکل ۶-۴۵: مقایسه خطوط جریان‌های عرضی در کانال با آبگیر و بدون آن (مقاطع بعد از دهانه آبگیر) ۲۰۵
شکل ۶-۴۶: خطوط جریان در ترازهای مختلف ۲۰۷
شکل الف-۱: تغییرات ابعاد ناحیه جداشدگی در ابتدای آبگیر [۶۷] پ۲
شکل الف-۲: نتایج آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در مقاطع مختلف کانال اصلی [۸۴] . پ۳
شکل الف-۳: پروفیل سطح آب در طول کانال اصلی در محدوده آبگیری بر روی دیواره‌های داخلی و خارجی [۸۴] . پ۴
شکل الف-۴: تراز سطح آب در سه مقطع عرضی کانال اصلی [۸۴] پ۴
شکل الف-۵: پروفیل سطح آب در طول کانال آبگیر [۸۴] پ۵
شکل الف-۶: سطح آب در کانال اصلی برای جریان بالادست زیربحرانی (الف) و فوق بحرانی (ب) [۸۴] پ۵
شکل الف-۷: شبیه‌سازی پروفیل سطح آب یک پرش هیدرولیکی در آبگیر جانبی [۸۴] پ۶
شکل الف-۸: خطوط جریان در سه عمق متفاوت در آبگیر جانبی [۶۸] پ۷
شکل الف-۹: بردارهای سرعت در نزدیکی بستر (الف) و در نزدیکی سطح آب (ب) [۲۰] پ۸
شکل الف-۱۰: خطوط جریان در نزدیکی بستر (الف) و در نزدیکی سطح آب (ب) [۲۰] پ۸
شکل الف-۱۱: خطوط جریان سطحی درکانال قوسی با سرریز جانبی [۱۹] پ۹
شکل الف-۱۲: خطوط جریان سطحی درکانال قوسی با سرریز جانبی (فرود بالادست بزرگتر از ۰/۳) [۱۹] پ۱۰
شکل ب-۱: نمونه‌ای شماتیک از یک حجم کنترل در سیستم مختصات منحنی‌الخط [۶۰] پ۱۳
شکل ب-۲: بردارهای پایه عمودی و مماسی در حالت دوبعدی [۶۰] پ۱۳