

١٥٦٥

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٥٦٥

٤٦٢٧٦



## رساله دکتری رشته سازه‌های آبی

مدل ریاضی سه‌بعدی انتقال رسوب معلق با استفاده از مدل دوبعدی  
هیدرودینامیکی و روش تصویری در پیچ‌های سینوسی رودخانه‌ای

اساتید راهنما:

دکتر سید علی ایوب‌زاده

دکتر مسعود منتظری نمین

استاد مشاور:

دکتر جمال محمد ولی سامانی

نگارنده:

محمد مهدی احمدی

فرداد ۸۸

۱۳۸۷ / ۱۵ / ۲۵

۶۶۷۶



بسمه تعالی

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت های 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 پایان نامه (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 سازه های آبی است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی آقایان دکتر سید علی ایوبزاده و دکتر مسعود منتظری نمین و مشاوره جناب آقای دکتر جمال محمدولی سامانی 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 را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس تادیه 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 کتاب های عرضه شده نگارنده برای فروش تامین نماید.

**ماده ۶** اینجانب محمد مهدی احمدی دانشجوی رشته سازه های آبی مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محمد مهدی احمدی

تاریخ و امضاء : خرداد ۱۳۸۷

## 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 عملی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عنوان پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱ -** حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها و 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 پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشد.

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

**ماده ۳ -** انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه/رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

**ماده ۴ -** ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/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 ۱۳۸۳/۳/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی پیگیری خواهد شد.

تقدیرم بہ

روح بلند پدر

مادر گرانقدر

ہمسر مہربان

9

ترنم عزیزم

محمد مہدی احمدی

## تقدیر و تشکر

اکنون که به یاری ایزد منان مراحل تحقیق این رساله به اتمام رسیده با امید به قبول این زحمت ناچیز در پیشگاه الهی بر خود لازم می‌دانم از زحمات کسانی که مرا در رسیدن به این مهم یاری نمودند قدردانی نمایم.

در انجام این تحقیق بسیار مدیون زحمات، تلاش‌ها و راهنمای‌های اساتید راهنمای ارجمند **جناب آقای دکتر ایوب زاده و جناب آقای دکتر منتظری نمین** و استاد مشاور گرانقدر **جناب آقای دکتر سامانی** بوده و کمال تشکر و قدردانی را از این اساتید ارجمند دارم.

از اساتید گروه سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس که در طی دوران تحصیل افتخار شاگردی‌شان را داشته‌ام بویژه **جناب آقای دکتر منعم و جناب آقای دکتر باقری** که بعنوان اساتید ناظر در دفاع از رساله حضور داشته و دقت نظر و راهنمایی‌شان منجر به اصلاح و بهبود تحقیق گردید تشکر می‌کنم. از **جناب آقای دکتر دربندی و استاد محترم دکتر شفافی** که قبول زحمت کرده و بعنوان اساتید ناظر رساله را مطالعه و با یادآوری برخی کاستی‌ها و اشتباهات منجر به هرچه بهتر شدن رساله اینجانب گشت‌اند، کمال امتنان و قدردانی را دارم.

تشکر پاک و صادقانه‌ام را به همسر **م** به خاطر علاقه جدی و تاثیر خلاقش بر فعالیت‌های پژوهشی‌ام، صمیمیت و صبوری‌اش در طی تحصیل‌ام و بی‌دریغ بودنش در تنگناها و سختی‌های زندگی و تحصیلم تقدیم و از او سپاسگذاری می‌کنم.

در پایان از کسانی تشکر می‌کنم که از ابتدا یار و همراه بودند، از دوستانم که بیدریغ بودند در دردها و شادی‌هاشان، **آقایان دکتر کورش قادری، دکتر علیرضا عمادی** و سایر دوستانی که بطور مستقیم و غیرمستقیم اینجانب را در طول تحصیل و تحقیق یاری رسانده و نام بزرگشان در این اندک مجال نمی‌گنجد سپاسگذارم.

مایلم تشکر ویژه‌ام را به **جناب آقای دکتر محسن احمدی** که با انجام امور اداری لازم برای با انجام رسیدن دفاع زحمات زیادی را متحمل شده‌اند، ابراز دارم.

با آرزوی موفقیت و توفیق الهی برای همه این عزیزان

محمد مهدی احمدی

تابستان ۱۳۸۷

## چکیده

رودخانه‌ها نقش مهمی در عمران جمعیتی، صنعتی، تجارت و بازرگانی و حمل و نقل و دیگر مسایل ایفا می‌کنند. در تاریخ تمدن جوامع انسانی، حاشیه رودخانه‌ها مکان‌های رشد و توسعه جوامع بوده‌اند. امروزه نیز رودخانه‌ها به منزله شاه‌رگ جوامع قلمداد می‌شوند. رودخانه‌های طبیعی یکی از اصلی‌ترین منابع فراهم‌کننده آب و انرژی برای انسان بشمار می‌روند که در این میان تامین آب مهم‌ترین نقش اقتصادی رودخانه می‌باشد. بازه‌های پیچان‌رودی (مآندری) رودخانه‌ها بدلیل خصوصیات منحصر بفرد هیدرولیکی و رسوبی مورد توجه و استفاده بیشتری قرار دارند. اجرای عملیات حفاظتی دیواره‌ها، جانمایی آبگیرها و برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها بنا به همین خصوصیات در خم‌ها بیشتر اتفاق می‌افتد. شکل سطحی پیچان‌رودها توسط منحنی‌های مختلفی توسط محققین در بررسی‌ها تخمین زده می‌شود. منحنی گسترش‌سینوسی (sine-generated) بهترین تطابق هم‌ترازی را با الگوی هندسی و شکل سطحی پیچان‌رودها در طبیعت دارد و در نظر گرفتن این هندسه در مطالعات پیچان‌رودها باعث افزایش دقت محاسبات خواهد شد. هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی مولفه‌های سه‌بعدی جریان در خم‌های گسترش‌سینوسی با توسعه یک مدل شبه‌سه‌بعدی هیدرودینامیکی مبتنی بر مدل دوبعدی متوسط عمقی و سپس شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیندهای انتقال بارمعلق، بار بستر و تغییرات تراز بستر در خم‌ها می‌باشد. بنابراین در این تحقیق ابتدا یک مدل دوبعدی متوسط عمقی در مختصات کارتزین توسعه داده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات از روش حجم محدود و شبکه staggered استفاده شده و معادلات اصلی با روش تصویری (projection method) حل شده است. با شبیه‌سازی الگوی جریان اطراف آبشکن و حرکت موج منفی بالادست دقت و کارایی مدل دوبعدی ارزیابی شده و دقت مدل به اثبات رسیده است. سپس مدل دوبعدی به مختصات منحنی‌الخط متعامد تبدیل شده و عبارات تنش پراکندگی حاصل از تفاوت سرعت واقعی و سرعت متوسط به معادلات مومنتم افزوده شده است. با استفاده از نتایج مدل دوبعدی و انتخاب روابط دقیق برای توزیع سرعت در جهات عرض و جهت جریان و حل مجدد معادله پیوستگی سه‌بعدی یک مدل هیدرودینامیکی شبه سه‌بعدی ایجاد شده است. در مدل سه‌بعدی رسوبی، معادلات انتقال-پخش سه‌بعدی رسوب برای شبیه‌سازی انتقال بار معلق، معادله انتقال بار بستر غیرتعادلی برای محاسبه نرخ انتقال بار بستر و معادله تعادل جرم رسوب بمنظور محاسبه تغییرات تراز بستر، گسسته‌سازی و حل شده است. دو کانال آزمایشگاهی با هندسه قوسی با خم‌ها تند و ملایم و یک کانال با هندسه گسترش‌سینوسی با استفاده از مدل دوبعدی شبیه‌سازی شده است. مقایسه تراز سطح آب و سرعت‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در خم ملایم دقت بسیار خوب مدل توسعه داده شده را نشان داد. در خم تند نیز مقایسات حاکی از توانایی مدل دوبعدی در شبیه‌سازی جریان در خم‌ها بود. بررسی بر روی تاثیر عبارات تنش پراکندگی نیز حاکی از تاثیر مثبت استفاده از این عبارات در شبیه‌سازی جریان در خم‌ها بوده است. سه کانال آزمایشگاهی مختلف برای بررسی و صحت‌سنجی مدل جریان و رسوب شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مدل توسعه داده شده در شبیه‌سازی توزیع عمقی رسوب معلق دارای دقت بالایی می‌باشد. همچنین بررسی و مقایسات نشان داد که مدل توسعه داده شده می‌تواند تغییرات تراز بستر در خم‌ها را با دقت مطلوبی شبیه‌سازی کند.

کلمات کلیدی: مدل عددی - شبیه‌سازی - مآندر - خم سینوسی - رسوبات معلق - رودخانه

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۹	فهرست جداول
ز	فهرست اشکال
ل	فهرست نشانه‌ها
	<b>فصل اول : کلیات</b>
۱	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- طبقه‌بندی رودخانه‌ها
۲	۳-۱- دامنه و محدوده تحقیق
۳	۱-۳-۱- مطالعات قبلی
۴	۲-۳-۱- مدل حاضر
۴	۴-۱- طرح کلی رساله
	<b>فصل دوم : مروری بر مطالعات انجام شده</b>
۶	۱-۲- مقدمه
۶	۲-۲- طبقه‌بندی شکل رودخانه‌های آبرفتی
۷	۳-۲- هیدرولیک جریان و رسوب و وضعیت توپوگرافی رودخانه‌های پیچان‌رودی
۷	۱-۳-۲- جریان ثانویه
۸	۲-۳-۲- جریان در ناحیه میانی
۸	۳-۳-۲- ناحیه دیواره خارجی (Concave or Outer Bank)
۹	۴-۳-۲- ناحیه دیوار داخلی (Inner Bank)
۱۰	۴-۲- هندسه مسیر پیچان‌رود
۱۷	۵-۲- مهاجرت و توسعه حلقه‌های پیچان‌رود (Migration and Expansion)
۱۸	۶-۲- طبیعت همرفتی (Convective) جریانات پیچان‌رودی
۲۲	۷-۲- دینامیک محاسباتی رودخانه‌ای
۲۲	۱-۷-۲- روش‌های پیش‌بینی
۲۲	۲-۷-۲- روش‌های شبیه‌سازی
۲۴	۱-۲-۷-۲- شبکه بندی



۲۷	۲-۲-۲-۲- مفهوم گسسته‌سازی
۲۸	۲-۲-۳- روش‌های عددی
۲۹	۲-۲-۴- روش حجم محدود
۲۹	۲-۲-۴-۱- پروسه گسسته‌سازی
۳۰	۲-۲-۴-۲- برآورد شارها در روش حجم محدود
۳۱	۲-۲-۴-۱- شمای مرکزی مرتبه اول
۳۲	۲-۲-۴-۲- شمای بالادستی (Upwind Scheme)
۳۳	۲-۲-۵- حل دستگاه معادلات جبری
۳۴	۲-۲-۶- تحلیل خطی و دقت ون نیومن
۳۴	۲-۲-۷- خطای فاز
۳۵	۲-۲-۸- مدل‌سازی جریان و رسوب در رودخانه‌ها
۳۵	۲-۲-۸-۱- معادلات مدل یک‌بعدی
۳۷	۲-۲-۸-۲- معادلات مدل دوبعدی
۴۰	۲-۲-۸-۳- معادلات مدل سه‌بعدی
۴۱	۲-۲-۹- بستن مدل و روابط جانبی
۴۱	۲-۲-۹-۱- مدل تلاطم
۴۲	۲-۲-۹-۲- زبری کانال
۴۲	۲-۲-۹-۳- طول انطباق غیرتعادلی
۴۳	۲-۲-۹-۴- روابط تخمین ظرفیت حمل رسوب غیرچسبنده
۴۴	۲-۲-۱۰- روش‌های حل جریان با سطح آزاد
۴۴	۲-۲-۱۰-۱- جریانات یک‌بعدی
۴۴	۲-۲-۱۰-۲- حل عددی معادلات ناویر-استوکس
۴۴	۲-۲-۱۰-۱- روش staggered در شبکه
۴۶	۲-۲-۱۰-۲- روش Projection در شبکه staggered
۴۷	۲-۲-۱۰-۳- الگوریتم SIMPLE در شبکه staggered
۴۷	۲-۱۱- برخی مدل‌های مهم توسعه یافته برای مطالعات هیدرودینامیک و رسوب
۴۸	۲-۱۲- توزیع سرعت در خم
۴۹	۲-۱۲-۱- توزیع سرعت در جهت جریان

۵۰	۲-۱۲-۲- توزیع سرعت در جهت عرضی
۵۰	۲-۱۲-۱-۲- بستر صاف (Smooth)
۵۳	۲-۱۲-۲-۲- بستر زبر (Rough)
۵۶	۲-۱۳- تحقیقات انجام شده در رابطه با شبیه‌سازی جریان و رسوب در خم‌ها

## فصل سوم: روش انجام تحقیق

۸۶	۳-۱- مقدمه
۸۶	۳-۲- توسعه مدل ریاضی
۸۶	۳-۲-۱- روابط مدل دوبعدی هیدرودینامیکی
۸۸	۳-۲-۱-۲- مدل تلاطم
۸۸	۳-۲-۱-۳- عبارات تنش پراکندگی (Dispersion Terms)
۹۰	۳-۲-۲- مدل سه‌بعدی حمل رسوب
۹۰	۳-۲-۲-۱- روابط انتقال رسوب معلق
۹۱	۳-۲-۲-۲- روابط انتقال بار بستر
۹۱	۳-۲-۲-۳- روابط تغییرات تراز بستر
۹۲	۳-۲-۳- روابط تجربی
۹۲	۳-۲-۳-۱- غلظت تعادلی نزدیک بستر در تراز مبنا
۹۳	۳-۲-۳-۲- نرخ انتقال رسوب بستر تعادلی
۹۳	۳-۲-۳-۳- طول انطباق غیرتعادلی
۹۳	۳-۲-۳-۴- سرعت سقوط ذره (Fall velocity)
۹۴	۳-۲-۳-۵- شارهای ته‌نشینی و ورود
۹۴	۳-۲-۳-۶- کسینوس‌های جهت حرکت ذرات بستر
۹۵	۳-۳- روش time splitting
۹۶	۳-۴- حل معادله انتقال-پخش
۹۶	۳-۴-۱- حل معادله انتقال
۹۸	۳-۴-۱-۱- روش Backward
۹۸	۳-۴-۱-۲- روش Lax-Wendroff
۹۹	۳-۴-۱-۳- روش Fromm

۱۰۰	۳-۴-۱-۴- محاسبه Amplification Factor روش‌های حل معادله انتقال
۱۰۰	۳-۴-۱-۵- بررسی عملی روش‌های حل معادله انتقال
۱۰۱	۳-۴-۱-۶- تعیین شرایط اولیه حل
۱۰۱	۳-۴-۱-۷- روش حل مسئله
۱۰۶	۳-۴-۱-۸- انتخاب روش مناسب برای حل ترم انتقال
۱۱۰	۳-۴-۲- حل معادله پخش
۱۱۰	۳-۴-۲-۱- شرایط مرزی برای حل ترم پخش
۱۱۱	۳-۴-۲-۲- حل پخش بصورت ضمنی
۱۱۳	۳-۵- توسعه مدل دوبعدی متوسط عمقی در مختصات کارتزین
۱۱۴	۳-۵-۱- مرحله اول
۱۱۴	۳-۵-۱-۱- ترم‌های انتقال-پخش
۱۱۴	۳-۵-۱-۲- ترم زبری
۱۱۵	۳-۵-۱-۳- ترم‌های پراکندگی
۱۱۶	۳-۵-۱-۴- ترم مربوط به تاثیر نیروی کورلیوس
۱۱۶	۳-۵-۲- مرحله دوم
۱۱۷	۳-۵-۲-۱- الگوریتم عددی حل معادلات (۳-۹۱) تا (۳-۹۳)
۱۱۷	۳-۵-۲-۲- محاسبه $Z_s^{n+1/2}$
۱۱۹	۳-۵-۲-۳- محاسبه $Z_s^{n+1}$
۱۲۰	۳-۵-۲-۴- محاسبه مقادیر $p^{n+1}, q^{n+1}$
۱۲۰	۳-۵-۳- بررسی کارایی مدل دوبعدی متوسط عمقی
۱۲۰	۳-۵-۳-۱- شبیه‌سازی الگوی جریان اطراف آبشکن
۱۲۴	۳-۵-۳-۲- شبیه‌سازی حرکت موج منفی بالادست
۱۲۵	۳-۶- توسعه مدل دوبعدی متوسط عمقی در مختصات منحنی‌الخط متعامد
۱۲۵	۳-۶-۱- سیستم مختصات منحنی‌الخط متعامد
۱۲۵	۳-۶-۲- ضرایب متریک
۱۲۷	۳-۶-۳- تبدیل معادلات به سیستم $(s, n, z)$
۱۲۹	۳-۶-۴- حل معادلات جریان در سیستم منحنی‌الخط متعامد
۱۲۹	۳-۷- توسعه مدل شبه سه‌بعدی

۱۳۰	۳-۸- توسعه مدل انتقال رسوب
۱۳۰	۳-۸-۱- انتقال بار معلق
۱۳۰	۳-۸-۱-۱- شرایط مرزی حل معادله انتقال-پخش رسوب معلق
۱۳۱	۳-۸-۱-۲- ضریب پخشیدگی رسوب
۱۳۲	۳-۸-۲- انتقال بار بستر
۱۳۳	۳-۸-۳- محاسبه تغییرات تراز بستر
۱۳۴	۳-۹- مراتب محاسبات
۱۳۴	۳-۱۰- الگوریتم و نحوه عملکرد کد برنامه
۱۳۹	۳-۱۱- نتیجه گیری

### فصل چهارم : نتایج و بحث

۱۴۲	۴-۱- مقدمه
۱۴۲	۴-۲- شبیه سازی دوبعدی جریان در خم
۱۴۳	۴-۲-۱- شبیه سازی جریان در خم ملایم
۱۵۱	۴-۲-۲- شبیه سازی جریان در خم تند
۱۵۹	۴-۲-۳- بررسی عبارات پراکندگی
۱۶۰	۴-۲-۴- شبیه سازی جریان در کانال گسترش سینوسی
۱۶۵	۴-۴- شبیه سازی سه بعدی جریان در خم
۱۷۵	۴-۵- شبیه سازی انتقال غلظت معلق
۱۷۵	۴-۵-۱- ورود خالص از بستر سست
۱۷۷	۴-۵-۲- آزمایش انتقال رسوب معلق با شار ته نشینی خالص
۱۷۹	۴-۶- شبیه سازی تغییرات تراز بستر

### فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۸۷	۵-۱- بحث
۱۹۰	۵-۲- پیشنهادات

۱۹۱	فهرست منابع
-----	-------------

## فهرست نشانه‌ها

- $a$ : تراز مرجع بالای بستر میانگین  
 $B$ : عرض رودخانه  
 $C_{ch}$ : ضریب شزی  
 $\bar{C}$ : غلظت رسوب متوسط عمقی  
 $D_{uv}, D_{uu}, D_{vv}, D_{vu}$ : عبارات تنش پراکندگی  
 $D_b$ : نرخ ته‌نشینی رسوب  
 $D_s$ : پارامتر اندازه ذره  
 $d_{90}$ : قطر ذره رسوبی  
 $d_{50}$ : قطر متوسط ذرات رسوبی  
 $E_b$ : نرخ ورود رسوب  
 $g$ : شتاب ثقل  
 $h$ : عمق  
 $L_s$ : طول انطباق غیرتعادلی  
 $n$ : معرف گام زمان  
 $n_m$ : ضریب زبری مانینگ  
 $p'$ : تخلخل مواد بستر  
 $q_b$ : بار رسوب بستر واقعی  
 $q_{b^*}$ : بار رسوب بستر تعادلی  
 $q_s$ : بار رسوب معلق  
 $q_T$ : بار کل رسوب  
 $R_b$ : شعاع هیدرولیکی  
 $R_c$ : شعاع انحنا خم  
 $R_i$ : شعاع انحنا دیواره داخلی خم  
 $R_o$ : شعاع انحنا دیواره خارجی خم  
 $T$ : تنش برشی مازاد بدون بعد بستر  
 $t$ : زمان  
 $U$ : سرعت جریان  
 $u$ : جزء سرعت در جهت جریان  
 $v$ : جزء سرعت در جهت عرضی  
 $w$ : جزء سرعت در جهت عمودی  
 $\bar{u}$ : سرعت متوسط عمقی در جهت جریان  
 $\bar{v}$ : سرعت متوسط عمقی در جهت عرضی  
 $U_m$ : سرعت متوسط جریان  
 $X$ : محور افقی مختصات دستگاه کارترین

- $Y$ : محور عمودی مختصات دستگاه کارترین  
 $z_s$ : تراز سطح آب  
 $z_b$ : تراز بستر  
 $\alpha_{bx}, \alpha_{by}$ : کسینوس‌های جهت جریان  
 $\Omega$ : ضریب کورلیوس  
 $\nu_t$ : ضریب ویسکوزیته ادی  
 $\zeta$ : فاصله بدون بعد از بستر کانال  
 $\delta_b$ : ضخامت لایه بار بستر  
 $\delta_{ij}$ : دلتای کرونگر  
 $\lambda$ : طول فرم بستر  
 $\Delta$ : ارتفاع فرم بستر  
 $\psi$ : نسبت ارتفاع به طول فرم بستر  
 $\beta$ : زاویه تنش برشی بستر  
 $S_F$ : فاکتور شکل ذرات رسوبی  
 $k_s$ : ارتفاع زبری معادل بستر رودخانه  
 $z'$ : فاصله نرمال از بستر  
 $\sigma_c$ : عدد تلاطم اشمیت  
 $\omega_s$ : سرعت سقوط ذره  
 $K$ : ثابت ون کارمن  
 $\xi$ : محور مختصات دستگاه منحنی‌الخط متعامد  
 $\eta$ : محور مختصات دستگاه منحنی‌الخط متعامد  
 $\sigma_g$ : انحراف معیار رسوبات

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۲۲	جدول (۱-۲) مزایا و معایب روش‌های عددی
۳۹	جدول (۲-۲): برخی از معادلات انتقال بار بستر
۴۷	جدول (۳-۲): برخی از مدل‌های هیدرودینامیک و رسوب
۵۶	جدول (۴-۲): نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین مختلف در خم کانال‌ها
۵۹	جدول (۵-۲): مشخصات آزمایشات انجام شده توسط در مرکز مهندسی هیدرولیک و هیدرولوژی USSR
۶۹	جدول (۶-۲): حالت‌های شبیه‌سازی شده توسط هسیه و یانگ
۷۳	جدول (۷-۲): هندسی کانال و مشخصه‌های جریان در کانال‌های آزمایشگاهی
۱۲۶	جدول (۱-۳): ضرایب متریک
۱۴۳	جدول (۱-۴): هندسه کانال‌ها و پارامترهای جریان کانال‌های شبیه‌سازی شده
۱۵۰	جدول (۲-۴): حداکثر و میانگین تفاوت نسبی بین مدل‌ها و نتایج آزمایشگاهی کانال دوربند
۱۵۸	جدول (۳-۴): حداکثر و میانگین تفاوت نسبی بین مدل‌ها و نتایج آزمایشگاهی کانال رزوفسکی

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۳	شکل (۱-۱): کنترل‌ها در مورفولوژی خم رودخانه‌ها
۷	شکل (۱-۲): مقطع عرضی یک رودخانه پیچان رودی طبیعی
۹	شکل (۲-۲): جریان روی Point bar. شتاب انتقالی باعث افزایش شیب سطح آب پایین دست در دیواره خارجی و افزایش در دیواره داخلی می‌شود
۱۰	شکل (۳-۲): توسعه جریان ثانویه در خم رودخانه
۱۱	شکل (۴-۲): الگوهای توزیع سه‌بعدی جریان در پیچان رود
۱۲	شکل (۵-۲): تعریف نام‌ها و نشانه‌ها در پیچان رود رودخانه
۱۳	شکل (۶-۲) شکل سطحی خم گسترش سینوسی و تعریف پارامترهای خم
۱۴	شکل (۷-۲): ژئومتری سطحی پیچان رود
۱۵	شکل (۸-۲): خصوصیات رودخانه‌های پیچان رودی
۱۶	شکل (۹-۲): ژئومتری تجربی پیچان رودها
۱۷	شکل (۱۰-۲): ژئومتری تجربی پیچان رودها
۱۹	شکل (۱۱-۲): الگوی جریان و الگوهای فرسایش-تجمع رسوب در پیچان رودهای ملایم و تند
۱۹	شکل (۱۲-۲): توزیع $\frac{\bar{w}_c}{(\bar{w}_c)_{max}}$ در امتداد $l_c / L$
۲۱	شکل (۱۳-۲): الگو و بردارهای جابجایی موضعی از مهاجرت و توسعه حلقه
۲۳	شکل (۱۴-۲) روش‌های تخمین
۲۵	شکل (۱۵-۲): شبکه با ساختمان در میدان جریان حول یک آبشکن در کانال مستقیم
۲۵	شکل (۱۶-۲): شبکه بی‌ساختمان در میدان جریان حول پایه پل در کانال مستقیم
۲۶	شکل (۱۷-۲): شبکه کارتیزین برای میدان جریان در یک خم رودخانه-میدان جریان غیرمستطیلی
۲۷	شکل (۱۸-۲): تخمین معادله دیفرانسیل با استفاده از گسسته‌سازی و حل آن
۲۸	شکل (۱۹-۲): زیرمیدان‌ها در روش‌های المان محدود و تفاضل‌های محدود
۳۰	شکل (۲۰-۲): شبکه حجم محدود الف (cell-centered) ب (cell-vertex)
۳۱	شکل (۲۱-۲): برآورد شارها برای شمای cell-centred کاتزینی دوبعدی
۳۲	شکل (۲۲-۲): شمای بالادستی برای محاسبه شارها
۳۶	شکل (۲۳-۲): وضعیت جریان و انتقال رسوب
۴۵	شکل (۲۴-۲): شبکه Staggered در روش MAC



- شکل (۲-۲۵): شمایی از کانال و توزیع‌های سرعت در خم ۴۸
- شکل (۲-۲۶): گراف توابع  $F_1(\zeta)$ ,  $F_2(\zeta)$  ۵۱
- شکل (۲-۲۷): توزیع‌های سرعت عرضی برای مقادیر مختلف ضریب شزی ۵۲
- شکل (۲-۲۸): گراف محاسبه تابع  $f\left(\frac{\kappa C}{\sqrt{g}}\right)$  ۵۳
- شکل (۲-۲۹): توزیع‌های سرعت عرضی  $U_{\infty}$  برای بستر زبر ۵۴
- شکل (۲-۳۰): بردارهای سرعت در عرض کانال آزمایشگاهی دوریند و کنخ ۶۰
- شکل (۲-۳۱): نسبت سرعت متوسط عمقی به سرعت متوسط کل جریان شبیه‌سازی شده در عرض بدون بعد کانال برای کانال دوریند و کنخ ۶۱
- شکل (۲-۳۲): توزیع سرعت شبیه‌سازی شده کانال آزمایشگاهی رزوفسکی ۶۲
- شکل (۲-۳۳): توزیع سرعت شبیه‌سازی شده کانال آزمایشگاهی رزوفسکی ۶۳
- شکل (۲-۳۴): محاسبه ورود خالص از بستر فرسایش‌پذیر- پروفیل‌های غلظت بار معلق محاسبه شده و برداشت شده ۶۵
- شکل (۲-۳۵): محاسبه ته‌نشینی خالص پروفیل‌های غلظت بار معلق محاسبه شده و برداشت شده ۶۶
- شکل (۲-۳۶): بردارهای (a) محاسبه شده سرعت جریان ثانویه و (b) خطوط هم‌سرعت در جهت جریان در مقاطع مختلف خم ۶۷
- شکل (۲-۳۷): خطوط هم عمق (a) برداشت شده و (b) محاسبه شده ۶۸
- شکل (۲-۳۸): پروفیل‌های عرضی بستر در خم ۶۹
- شکل (۲-۳۹): تغییرات  $MAXU^*$  بر حسب تابعی از  $SI$  در  $\theta$  های مختلف ۷۰
- شکل (۲-۴۰): تغییرات  $MAXU^*$  بر حسب تابعی از  $SI$  در  $\theta$  های مختلف ۷۱
- شکل (۲-۴۱): تغییرات  $MAXU^*$  بر حسب تابعی از  $SI$  در  $\theta$  های مختلف ۷۲
- شکل (۲-۴۲): ترازهای بستر و سطح آب در آزمایشات سیل و همکاران (a) بعد از ۱۶/۸ ساعت، (b) بعد از ۳۲/۴ ساعت ۷۴
- شکل (۲-۴۳): اعماق فرسایش شبیه سازی شده و اندازه‌گیری شده در آزمایشات آشیدا و میچیوز ۷۵
- شکل (۲-۴۴): مقایسه سرعت‌های آزمایشگاهی دوریند و شبیه‌سازی شده ۷۵
- شکل (۲-۴۵): مقایسه تراز سطح آب آزمایشگاهی دوریند و شبیه‌سازی شده ۷۶
- شکل (۲-۴۶): مقایسه سرعت‌های آزمایشگاهی رزوفسکی و شبیه‌سازی شده ۷۷
- شکل (۲-۴۷): مقایسه تراز سطح آب آزمایشگاهی رزوفسکی و شبیه‌سازی شده ۷۸
- شکل (۲-۴۸): بردارهای سرعت حاصل از شبیه‌سازی قسمتی از رودخانه زانگ‌جیانگ ۷۹

صفحه	عنوان
۷۹	شکل (۲-۴۹): توزیع‌های سرعت در عرض شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده
۸۰	شکل (۲-۵۰): توزیع‌های غلظت رسوب در عرض
۸۱	شکل (۲-۵۱): توزیع‌های غلظت رسوب در عرض
۸۲	شکل (۲-۵۲): شماتیکی از کانال با شبکه‌بندی غیریکنواخت
۸۲	شکل (۲-۵۳): مقایسه پروفیل‌های سطح آب محاسبه شده در شبکه غیریکنواخت
۸۳	شکل (۲-۵۴): شماتیکی از کانال با شبکه‌بندی شکسته
۸۳	شکل (۲-۵۵): مقایسه پروفیل‌های سطح آب محاسبه شده در شبکه شکسته
۸۷	شکل (۳-۱): دیاگرام مدل توسعه داده شده در تحقیق
۹۰	شکل (۳-۲): وضعیت میدان جریان
۹۵	شکل (۳-۳): سلول محاسباتی معادله انتقال-پخش یکبعدی
۹۷	شکل (۳-۴): سلول‌های حجم کنترل
۹۸	شکل (۳-۵): توزیع غلظت خطی و ثابت در طول حجم کنترل
۹۹	شکل (۳-۶): توزیع غلظت در سلول خطی با شیب $s_i$
۱۰۲	شکل (۳-۷): Amplification factor روش‌های مختلف به ازای مقادیر متفاوت تعداد گره یا سلول در یک طول موج
۱۰۴	شکل (۳-۸): خطای فاز روش‌های مختلف به ازای مقادیر متفاوت تعداد گره یا سلول در یک طول موج برای اعداد کورانت مختلف
۱۰۵	شکل (۳-۹): میدان جریان، شبکه‌بندی و توزیع غلظت اولیه
۱۰۵	شکل (۳-۱۰): سلول محاسباتی شبکه حجم محدود staggered
۱۰۷	شکل (۳-۱۱): (a) الگوی سه‌بعدی غلظت بعد از ۶۰۰ ثانیه (b) نتیجه بدست آمده از حل جهت‌مند مرتبه اول پسرو و مقایسه آن با حل تحلیلی
۱۰۸	شکل (۳-۱۲): (a) الگوی سه‌بعدی غلظت بعد از ۶۰۰ ثانیه (b) نتیجه بدست آمده از حل Lax-Wendroff و مقایسه آن با حل تحلیلی
۱۰۹	شکل (۳-۱۳): (a) الگوی سه‌بعدی غلظت بعد از ۶۰۰ ثانیه (b) نتیجه بدست آمده از حل Fromm و مقایسه آن با حل تحلیلی
۱۱۲	شکل (۳-۱۴): نتایج حاصل از حل ضمنی پخش برای ضرایب پخش ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱
۱۱۳	شکل (۳-۱۵): شبکه حجم محدود staggered برای حل معادلات جریان دوبعدی متوسط عمقی
۱۱۵	شکل (۳-۱۶): روال حل معادلات انتقال-پخش پارامترهای $p$ و $q$ با استفاده از تکنیک time splitting

۱۱۷	شکل (۱۷-۳): شبکه حجم محدود محاسبه تراز سطح آب
۱۲۱	شکل (۱۸-۳): دیاگرام محاسبات مدل دوبعدی متوسط عمقی
۱۲۲	شکل (۱۹-۳): بردارهای سرعت و خطوط جریان در اطراف آبشکن
۱۲۲	شکل (۲۰-۳): خطوط هم‌تراز عمق در اطراف آبشکن
۱۲۳	شکل (۲۱-۳): پروفیل طولی سطح آب در امتداد دیواره مقابل آبشکن
۱۲۳	شکل (۲۲-۳): پروفیل طولی سطح آب در امتداد دیواره آبشکن
۱۲۴	شکل (۲۳-۳): حرکت موج منفی بالادست
۱۲۴	شکل (۲۴-۳): پروفیل تراز سطح آب موج منفی بالادست شبیه‌سازی شده و حاصل از حل تحلیلی
۱۲۵	شکل (۲۵-۳): تبدیل مختصات فیزیکی به مختصات عمومی
۱۲۶	شکل (۲۶-۳) سیستم مختصات استوانه‌ای و کروی
۱۲۸	شکل (۲۷-۳): سیستم مختصات $(s, n, z)$
۱۳۱	شکل (۲۸-۳): حجم‌های کنترلی در نزدیک بستر و نزدیک سطح آب
۱۳۲	شکل (۲۹-۳): نتایج آزمایشگاهی کولمان در ارتباط با ضریب پخش رسوب
۱۳۳	شکل (۳۰-۳): شبکه حجم محدود محاسبه تغییرات تراز بستر
۱۳۵	شکل (۳۱-۳): دیاگرام محاسبات در مدل سه‌بعدی رسوبی
۱۳۷	شکل (۳۲-۳): دیاگرام روال محاسبات مدل نهایی و اتصال مدل هیدرودینامیکی و رسوبی
۱۴۴	شکل (۱-۴): شبکه محاسباتی ایجاد شده برای شبیه‌سازی کانال آزمایشگاهی دوریند
۱۴۵	شکل (۲-۴): بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده کانال دوریند توسط مدل عددی
۱۴۶	شکل (۳-۴): بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده در حدفصل زاویه $75^\circ$ تا $105^\circ$ خم
۱۴۷	شکل (۴-۴): نسبت‌های سرعت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در مقابل عرض بدون بعد کانال برای کانال آزمایشگاهی دوریند
۱۴۸	شکل (۵-۴): تراز سطح آب شبیه‌سازی شده کانال آزمایشگاهی دوریند
۱۴۸	شکل (۶-۴): پروفیل‌های تراز سطح آب در عرض کانال دوریند در مقاطع مختلف
۱۴۹	شکل (۷-۴): تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با و بدون استفاده از عبارات پراکندگی و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده برای کانال آزمایشگاهی دوریند
۱۴۹	شکل (۸-۴): مقایسه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده توسط مدل حاضر، مدل دوبعدی دان و برداشت شده برای کانال آزمایشگاهی دوریند
۱۵۱	شکل (۹-۴) بردارهای سرعت در کانال مستقیم متصل به خروجی خم

- شکل (۱۰-۴): شبکه محاسباتی کانال رزوفسکی ۱۵۲
- شکل (۱۱-۴): بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده برای کانال آزمایشگاهی دوریند ۱۵۳
- شکل (۱۲-۴): بردارهای سرعت در کانال مستقیم متصل به خروجی خم ۱۵۵
- شکل (۱۳-۴): پروفیل سطح آب از نماهای مختلف در کانال آزمایشگاهی رزوفسکی ۱۵۶
- شکل (۱۴-۴): نمودار سایه‌ای تراز سطح آب و خطوط هم‌تراز سطح آب شبیه‌سازی شده کانال آزمایشگاهی رزوفسکی ۱۵۷
- شکل (۱۵-۴): تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با و بدون استفاده از عبارات پراکندگی و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده برای کانال آزمایشگاهی رزوفسکی ۱۵۷
- شکل (۱۶-۴): مقایسه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده توسط مدل حاضر، مدل دوبعدی دان و برداشت شده برای کانال آزمایشگاهی رزوفسکی ۱۵۸
- شکل (۱۷-۴): تغییرات تنش‌های پراکندگی در امتداد طول بدون بعد کانال حاصل از شبیه‌سازی کانال رزوفسکی ۱۵۹
- شکل (۱۸-۴): تغییرات تنش‌های پراکندگی شبیه‌سازی شده در امتداد طول بدون بعد کانال رزوفسکی ۱۶۰
- شکل (۱۹-۴): منحنی‌های مختلف برای بیان ژئومتری پیمان‌رود ۱۶۱
- شکل (۲۰-۴): شبکه‌بندی کانال sine-generated ۱۶۱
- شکل (۲۱-۴): شبکه‌بندی کانال sine-generated در محدوده تاج مثبت ۱۶۲
- شکل (۲۲-۴): بردارهای سرعت متوسط عمقی ۱۶۳
- شکل (۲۳-۴): بردارهای سرعت متوسط عمقی با استفاده از عبارات پراکندگی ۱۶۴
- شکل (۲۴-۴): خطوط هم‌تراز و سایه‌ای عمق آب در کانال sine-generated ۱۶۴
- شکل (۲۵-۴): تراز سطح آب در مجاورت دیواره‌های کانال sine-generated ۱۶۵
- شکل (۲۶-۴): ژئومتری کانال ۱۶۶
- شکل (۲۷-۴): نمودار سایه‌ای و خطوط هم‌تراز سطح آب شبیه‌سازی شده ۱۶۷
- شکل (۲۸-۴): پروفیل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده تراز سطح آب در کانال ۱۶۸
- شکل (۲۹-۴): ثیب عرضی سطح آب شبیه‌سازی شده ۱۶۹
- شکل (۳۰-۴): پروفیل طولی سطح آب شبیه‌سازی شده در مجاورت دیواره خارجی و داخلی خم ۱۶۹
- شکل (۳۱-۴): بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده در خم ۱۷۱
- شکل (۳۲-۴): بردارهای سرعت عرضی شبیه‌سازی شده (الف) قبل از خم (ب) در ابتدای خم ۱۷۲
- شکل (۳۳-۴): بردارهای سرعت محاسبه شده جریان ثانویه و مسیر چرخش جریان در مقاطع مختلف ۱۷۳