



دانشگاه شهید چمران اَبَوار

دانشکده مهندسی علوم آب

رساله دکترا در رشته مهندسی علوم آب گرایش سازه‌های آبی

# تعیین تنش برشی در کانالهای مستطیلی با استفاده از روشهای ممنتیم و انرژی

نگارش:

بابک لشکرآرا

استاد راهنما :

دکتر منوچهر فتحی مقدم

استاد مشاور:

دکتر محمود شفاعی بجستان

دی ماه ۱۳۸۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ




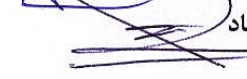
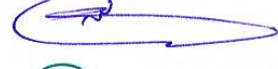


به نام خدا

### نتیجه ارزشیابی پایان نامه دکتری

بدینوسیله گواهی می‌گردد پایان نامه آقای بابک لشکرآرا دانشجوی رشته سازه های آبی از دانشکده مهندسی علوم آب به شماره دانشجویی ۸۵۱۱۶۰۴ تحت عنوان :

« تعیین تنش برشی در کانال های مستطیلی با استفاده از روشهای ممنتوم و انرژی »

جهت اخذ درجه دکتری (پی.اچ.دی) در تاریخ ۱۳۸۸/۱۰/۲۶ توسط هیئت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه عالی تصویب گردید.

امضاء	مرتبه علمی	اعضاء هیئت داوران
	دانشیار	استاد راهنما: دکتر منوچهر فتحی مقدم
	استاد	استاد مشاور: دکتر محمود شفاعی بجستان
	استاد	داور خارجی (۱): دکتر یوسف حسن زاده
	استاد	داور خارجی (۲): دکتر ناصر طالب بیدختی
	دانشیار	داور داخلی (۱): دکتر سید حبیب موسوی جهرمی
	استاد	داور داخلی (۲): دکتر مهدی قمشی
	دانشیار	نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر مجید بهزاد

تقدیم به :

اسوه های صداقت و پاکدامنی  
پدر و مادر بزرگوارم  
که موفقیت های خود را مدیون  
محبت های بی دریغشان می دانم



## تشکر و قدردانی

با سپاس و ستایش بی پایان به درگاه ایزد منان بر خود لازم می‌دانم از کلیه کسانی که در راه تهیه این رساله مرا یاری نموده اند تشکر و قدر دانی نمایم. در ابتدا از استاد ارجمند جناب آقای دکتر منوچهر فتحی مقدم به پاس راهنمایی‌ها و زحمات بی دریغشان کمال تشکر و سپاس را دارم. از جناب آقای دکتر محمود شفاعی بجستان که زحمت مشاوره طرح را بر عهده داشتند صمیمانه تشکر می‌نمایم.

از جناب آقایان دکتر یوسف حسن زاده، دکتر ناصر طالب بیدختی، دکتر مهدی قمشی و دکتر سید حبیب موسوی که زحمت داوری طرح را پذیرفتند کمال تشکر و سپاس را دارم.

از دانشگاه شهید چمران به پاس فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی تشکر می‌نمایم.

از همکاری صمیمانه پدر بزرگوام آقای روشن لشکرآرا بیاس مشاوره فنی در ساخت فلوم و کلیه دوستان و همکاران مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان اندیمشک که بنحوی اینجانب را در انجام این تحقیق یاری نمودند تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم.

بابک لشکرآرا

دی ماه ۱۳۸۸

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱ مقدمه و تئوری
۲.....	۱-۱. مقدمه.....
۲.....	۲-۱. معادلات پایه.....
۵.....	۳-۱. مفهوم لایه مرزی.....
۹.....	۴-۱. توزیع تنش برشی.....
۱۰.....	۵-۱. معادلات متوسط تنش برشی بستر و جداره در سطوح صاف.....
۱۱.....	۲-۵-۱. معادله متوسط تنش برشی بستر.....
۱۴.....	۳-۵-۱. معادله متوسط تنش برشی جداره.....
۱۶	فصل ۲ مروری بر منابع
۱۷.....	۱-۲. مقدمه.....
۱۷.....	۲-۲. مروری بر تحقیقات گذشته.....
۱۷.....	۱-۲-۲. بررسی گزارشهای علمی منتشر شده.....
۲۲.....	۲-۲-۲. مطالعات انشتین.....
۲۴.....	۳-۲-۲. مطالعات ونونی و بروکس.....
۲۵.....	۴-۲-۲. مطالعات ویلیامز.....
۲۵.....	۵-۲-۲. مطالعات کارتا و لئوفیسر.....
۲۶.....	۶-۲-۲. مطالعات گاش.....
۲۷.....	۷-۲-۲. مطالعات نایت و همکاران.....
۲۹.....	۸-۲-۲. مطالعات ردز و نایت.....
۲۹.....	۹-۲-۲. مطالعات یانگ و لیم.....
۳۰.....	۱۰-۲-۲. مطالعات پراسد و منسن.....
۳۱.....	۱۱-۲-۲. مطالعات گو و جولین.....
۳۳.....	۱۲-۲-۲. مطالعات وو و راجاتنام.....
۳۳.....	۱۳-۲-۲. کریشنپن و انگل.....
۳۴.....	۱۴-۲-۲. مطالعات بایرون و همکاران.....

۳۵	۳-۲. بررسی گزارشهای علمی در خصوص اندازه گیری تنش برشی با لوله پرستون.....
۳۵	۱-۳-۲. مطالعات پرستون.....
۳۶	۲-۳-۲. تئوری روش لوله پرستون.....
۳۹	2-3-3. مطالعات هوانگ و لارسن.....

### فصل ۳ مواد و روشها

۴۱	
۴۲	۱-۳. مقدمه.....
۴۲	۲-۳. تئوری تحقیق.....
۴۴	۳-۳. روشهای اندازه گیری تنش برشی.....
۴۵	۱-۳-۳. اندازه گیری تنش با استفاده از پروفیل سرعت.....
۴۷	۲-۳-۳. استفاده از شیب خط انرژی.....
۴۷	۳-۳-۳. اندازه گیری تنش با استفاده از تکنیک انرژی جنبشی آشفته TKE.....
۵۱	۴-۳-۳. روش انتقال جرم و حرارت.....
۵۲	۵-۳-۳. اندازه گیری تنش با استفاده از حسگر شناور FES.....
۵۳	۶-۳-۳. اندازه گیری تنش با استفاده از نیروی دراگ و جذب ممتم.....
۵۴	۴-۳. بسط مدل به کمک آنالیز ابعادی.....
۵۵	۱-۴-۳. آنالیز ابعادی تنش برشی جداره و کف در مجاری مستطیلی.....
۵۷	3-5. ساخت مدل فیزیکی مورد نیاز و انجام آزمایشات.....
۵۸	۲-۵-۳. فلوم لبه چاقویی.....
۵۹	۳-۵-۳. تحلیل پایداری فلوم.....
۶۳	۶-۳. تجهیزات اندازه گیری.....
۶۳	۱-۶-۳. اندازه گیری سرعت جریان.....
۶۳	۲-۶-۳. اندازه گیری تنش.....
۶۳	۳-۶-۳. اندازه گیری تراز سطح آب.....
۶۵	۴-۶-۳. اندازه گیری فشار دینامیک.....
۶۵	۵-۶-۳. اندازه گیری بار دینامیک.....
۶۷	۷-۳. نصب تجهیزات اندازه گیری.....
۶۸	۸-۳. دقت در اندازه گیریها.....
۶۸	۱-۸-۳. خطاهای اندازه گیری در مدل.....
۶۸	۲-۸-۳. خطا در قرائت رقوم سطح آب و عمق جریان.....
۶۹	۳-۸-۳. خطای اندازه گیری سرعت.....
۶۹	۴-۸-۳. خطای اندازه گیری دبی جریان.....
۶۹	۵-۸-۳. خطای اندازه گیری فشار دینامیکی.....
۶۹	۶-۸-۳. خطای اندازه گیری بار دینامیکی.....
۷۰	۹-۳. توابع خطا و معیارهای ارزیابی.....

## فصل ۴ نتایج آزمایشگاهی

۷۳

- ۷۴-۱. مقدمه.....
- ۷۴-۲. نتایج آزمایشگاهی اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر صاف.....
- ۷۴-۱-۲-۴. اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر صاف به روش انرژی.....
- ۸۴-۲-۲-۴. اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر صاف به روش ممتنم.....
- ۹۳-۳-۴. اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر زبر.....
- ۹۴-۱-۳-۴. اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر زبر به روش انرژی.....
- ۱۰۶-۲-۳-۴. اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر زبر به روش ممتنم.....

## فصل ۵ تحلیل نتایج

۱۱۷

- ۱۱۸-۱. مقدمه.....
- ۱۱۸-۲. مقایسه نتایج حاصل از اندازه گیری سرعت برشی به روش ممتنم و انرژی.....
- ۱۲۴-۳. تعیین تنش برشی در بستر و جداره کانال‌های مستطیلی صاف.....
- ۱۳۱-۴. تعیین ضریب مقاومت جریان.....
- ۱۳۲-۲-۴-۵. ضریب مقاومت جریان در بسترهای صاف هیدرولیکی.....
- ۱۳۸-۳-۴-۵. ضریب مقاومت جریان در بسترهای زبر هیدرولیکی.....
- ۱۴۶-۵. مقایسه ضریب زبری داری-ویسباخ حاصل از تحقیق حاضر در بستر زبر با معادله کلبروک-وایت.....

## فصل ۶ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۱۵۱

- ۱۵۲-۱. نتیجه گیری.....
- ۱۵۵-۲. پیشنهادات.....

۱۵۷

واژه نامه

۱۶۵

مراجع



## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
<b>فصل ۱ مقدمه و تئوری</b>	<b>۱</b>
شکل ۱-۱. نیروهای موثر بر منشور مایع.....	۳
شکل ۱-۲. نقش لایه مرزی بین معادلات اولر و ناویر استوکس [۲].....	۵
شکل ۱-۳. تفکیک نواحی سیال نزدیک مرز توسط پرانتل [۲].....	۶
شکل ۱-۴. نمایش لایه مرزی در نزدیک مرز جامد [۲].....	۷
شکل ۱-۵. نمایش پروفیل سرعت در جریان آشفته و منحنی توزیع تنش در نواحی آرام و درهم.....	۹
شکل ۱-۶. نحوه اثر جریان‌های ثانویه بر توزیع تنش برشی جداره و کف در یک مجرای روباز مستقیم.....	۹
شکل ۱-۷. سیستم مختصات در جریان کانال روباز.....	۱۰
شکل ۱-۸. ناحیه بندی مساحت مقطع عرضی برای تنش برشی کف و جداره‌ها.....	۱۲
<b>فصل ۲ مروری بر منابع</b>	<b>۱۶</b>
شکل ۲-۱. روش ترسیمی لیگلی جهت تعیین تنش برشی در مجاری طبیعی.....	۱۸
شکل ۲-۲. توزیع نیروی مالشی در یک کانال دوزنقه‌ای.....	۱۹
شکل ۲-۳. حداکثر نیروی مالشی در کف و دیواره بر حسب $\gamma, \nu, K$ .....	۱۹
شکل ۲-۴. نواحی چند گانه تقسیم شعاع هیدرولیکی به روش انشتین.....	۲۲
شکل ۲-۵. تغییرات نسبت ماکزیمم تنش برشی کف و جداره بر تنش برشی متوسط در مقابل نسبت عمق جریان به عرض کانال در مطالعات گاش.....	۲۶
شکل ۲-۶. تغییرات تنش برشی مرزی در اطراف محیط خیس شده در مطالعات گاش.....	۲۷
شکل ۲-۷. مقایسه تنش برشی کف حاصل از تحقیقات یانگ و لیم با دیگر محققین (خط ممتد).....	۳۰
شکل ۲-۸. تنش برشی دیواره محاسبه شده توسط یانگ و لیم در مقایسه با دیگر محققین (خط ممتد).....	۳۰
شکل ۲-۹. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با اولین و دومین تقریب برای متوسط تنش برشی بستر در مطالعات گو و جولین.....	۳۲
شکل ۲-۱۰. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با اولین و دومین تقریب برای متوسط تنش برشی جداره‌ها در مطالعات گو و جولین.....	۳۲
شکل ۲-۱۱. توزیع تنش برشی به عنوان تابعی از سرعت زاویه‌ای فلوم ( کریشناپن و انگل، ۲۰۰۴).....	۳۴
شکل ۲-۱۲. نمایی از موقعیت نصب لوله پرستون نسبت به لایه مرزی.....	۳۵
شکل ۲-۱۳. منحنی کالیبراسیون ارائه شده توسط پتل.....	۳۸

- شکل ۲-۱۴. مقایسه نتایج مطالعات رودز و نو (۲۰۰۰) با کالیبراسیون انجام شده توسط پتل ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۵. منحنی کالیبراسیون ارائه شده توسط کساب (۱۹۹۳) جهت تعیین سرعت برشی ..... ۴۰

## ۴۱

### فصل ۳ مواد و روش‌ها

- شکل ۳-۱. اندازه گیری تنش برشی با استفاده از گرادیان سرعت ..... ۴۶
- شکل ۳-۲. مقایسه نحوه ایجاد تنش برشی در جریان‌های آرام و آشفته ..... ۴۸
- شکل ۳-۳. تعریف متغیر میانگین و نوسانی جریان آشفته ..... ۴۹
- شکل ۳-۴. میانگین حاصلضرب نوسانات سرعت ..... ۵۰
- شکل ۳-۵. نمایی از حسگر شناور جهت اندازه گیری سه بعدی تنش برشی ..... ۵۲
- شکل ۳-۶. نمایی از میز لبه چاقویی KET مورد استفاده در تحقیقات فتنی مقدم و کاون (۱۹۹۷) ..... ۵۳
- شکل ۳-۷. نمایی از فلوم مورد نظر جهت انجام آزمایشات ..... ۵۸
- شکل ۳-۸. نمایش شماتیک فلوم لبه چاقویی ..... ۵۸
- شکل ۳-۹. شماتیک آنالیز انجام شده توسط نرم افزار ETABS پس از بارگذاری ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۰. شماتیک طراحی نهایی انجام شده توسط نرم افزار ETABS ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۱. نمای جانبی از فلوم KEF پس از ساخت اسکلت ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۲. نمایی از نصب فلوم در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشگاه شهید چمران اهواز ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۳. نمایی از بخش متحرک فلوم ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۴. نمایی از لوله پرستون ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۵. شماتیک نحوه توزیع تنش برشی مرزی موضعی در اطراف محیط مرطوب ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۶. نمایی از عمق سنج دیجیتالی مورد استفاده در تحقیق حاضر ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۷. نمایی از محل نصب سلول باردینامیک و فشار سنج تفاضلی ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۸. نمایی از سیستم چند کاناله مبدل اندازه گیری نوسانات فشار و نیرو ..... ۶۶

## ۷۳

### فصل ۴ نتایج آزمایشگاهی

- شکل ۴-۱. مقایسه مقادیر پیش بینی شده سرعت برشی بستر  $u_{*p}/V$  حاصل از تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر صاف در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۴) ..... ۸۲
- شکل ۴-۲. مقایسه مقادیر پیش بینی شده سرعت برشی جداره  $u_{*w}/V$  حاصل از تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر صاف در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۴) ..... ۸۲
- شکل ۴-۳. مقایسه مقادیر پیش بینی شده سرعت برشی بستر  $u_{*p}/V$  توسط معادله (۴-۸) در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر صاف در مقابل نتایج مطالعات انشتین (۱۹۴۲) و دوئرتی و همکاران (۱۹۸۹) ..... ۸۴
- شکل ۴-۴. نمایش مقادیر میانگین و تغییرات انحراف معیار تغییرات نیروی ثبت شده توسط نیرو سنج منصوبه بر روی مقطع KEF و در هر یک از نسبت‌های B/H ..... ۸۵
- شکل ۴-۵. مقایسه مقادیر پیش بینی شده سرعت برشی بستر  $u_{*p}/V$  حاصل از تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر صاف در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۴) ..... ۹۱
- شکل ۴-۶. مقایسه مقادیر پیش بینی شده سرعت برشی جداره  $u_{*w}/V$  حاصل از تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر صاف در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۴) ..... ۹۱
- شکل ۴-۷. مقایسه مقادیر پیش بینی شده سرعت برشی بستر  $u_{*p}/V$  توسط معادله (۴-۱۲) در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر صاف در مقابل نتایج مطالعات انشتین (۱۹۴۲) و دوئرتی و همکاران (۱۹۸۹) ..... ۹۳
- شکل ۴-۸. نمایی از نحوه پخش یکنواخت مصالح دانه بندی شده بر روی صفحات آلومینیومی آغشته به چسب ..... ۹۵
- شکل ۴-۹. صفحات آلومینیومی حاوی ذرات دانه بندی شده با قطرهای مختلف در معرض نور آفتاب ..... ۹۵
- شکل ۴-۱۰. نمونه‌های مصالح رودخانه ای دانه بندی شده جهت استفاده در آزمایشات با بستر زبر ..... ۹۶
- شکل ۴-۱۱. نصب ورق آلومینیومی حاوی مصالح رودخانه‌ای نصب شده در فلوم ..... ۹۶

- شکل ۴-۱۲. مقایسه سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۶) در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۱)..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۳. مقایسه سرعت برشی جداره  $\bar{u}_{*w}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۷) در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۱)..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۴. مقایسه سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۶) در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات دوئرتی و همکاران (۱۹۸۹)..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۵. مقایسه سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۶) در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات انشتین (۱۹۴۲)..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۶. نمایش مقادیر میانگین و تغییرات انحراف معیار نیروی دینامیکی ثبت شده توسط نیرو سنج با زبری بستر  $D_{50}=1.31$  mm..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۷. نمایش مقادیر میانگین و تغییرات انحراف معیار نیروی دینامیکی ثبت شده توسط نیرو سنج با زبری بستر  $D_{50}=3.55$  mm..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۸. نمایش مقادیر میانگین و تغییرات انحراف معیار نیروی دینامیکی ثبت شده توسط نیرو سنج با زبری بستر  $D_{50}=7.15$  mm..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۹. مقایسه سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۸) در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۱)..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۰. مقایسه سرعت برشی جداره  $\bar{u}_{*w}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۹) در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۱)..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۱. مقایسه سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۸) در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات دوئرتی و همکاران (۱۹۸۹)..... ۱۱۵
- شکل ۴-۲۲. مقایسه مقایسه سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  پیش بینی شده توسط معادله (۴-۱۸) در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زبر در مقابل نتایج مطالعات انشتین (۱۹۴۲)..... ۱۱۶

## فصل ۵ تحلیل نتایج

۱۱۷

- شکل ۵-۱. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  به روش ممتنم و انرژی در بستر صاف..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده سرعت برشی جداره  $\bar{u}_{*w}/V$  به روش ممتنم و انرژی در بستر صاف..... ۱۲۰
- شکل ۵-۳. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  به روش ممتنم و انرژی در بستر زبر..... ۱۲۱
- شکل ۵-۴. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده سرعت برشی جداره  $\bar{u}_{*w}/V$  به روش ممتنم و انرژی در بستر زبر..... ۱۲۱
- شکل ۵-۵. تغییرات سرعت برشی بدون بعد بستر در مقابل نسبت B/H در بسترهای صاف و زبر به روش های انرژی و ممتنم..... ۱۲۲
- شکل ۵-۶. تغییرات سرعت برشی بدون بعد جداره در مقابل نسبت B/H در بسترهای صاف و زبر به روش های انرژی و ممتنم..... ۱۲۳
- شکل ۵-۷. تغییرات سرعت برشی بدون بعد کل در مقابل نسبت B/H در بسترهای صاف و زبر به روش های انرژی و ممتنم..... ۱۲۳
- شکل ۵-۸. درصد نیروی برشی کل وارده بر جداره ها در مقابل نسبت B/H..... ۱۲۵
- شکل ۵-۹. متوسط تنش برشی بدون بعد جداره در مقابل نسبت B/H..... ۱۲۶
- شکل ۵-۱۰. متوسط تنش برشی بدون بعد بستر در مقابل نسبت B/H..... ۱۲۷
- شکل ۵-۱۱. متوسط تنش برشی بدون بعد جداره در مقابل نسبت B/H..... ۱۲۹
- شکل ۵-۱۲. متوسط تنش برشی بدون بعد بستر در مقابل نسبت B/H..... ۱۳۰
- شکل ۵-۱۳. متوسط سرعت برشی بدون بعد بستر در مقابل نسبت B/H..... ۱۳۰
- شکل ۵-۱۴. فرم دیاگرام مودی برای کانالهای روباز با جدار مرزی صلب [۵۴]..... ۱۳۳

- شکل ۵-۱۵. مقایسه قانون پراتل در لوله‌های صاف و معادله نایت و همکاران (۱۹۸۴) با نتایج ضریب مقاومت جریان حاصل از تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر صاف ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۱۶. مقایسه قانون پراتل در لوله‌های صاف و معادله نایت و همکاران (۱۹۸۴) با نتایج ضریب مقاومت جریان حاصل از تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر صاف ..... ۱۳۷
- شکل ۵-۱۷. مقایسه ضریب زبری اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر با معادله کلبروک-وایت ..... ۱۴۵
- شکل ۵-۱۸. نمایش ضریب زبری اندازه‌گیری شده به روش انرژی در مقایسه با معادله کلبروک-وایت ..... ۱۴۷
- شکل ۵-۱۹. نمایش مقادیر ضریب زبری اندازه‌گیری شده به روش ممتنم در مقایسه با معادله کلبروک-وایت ..... ۱۴۷
- شکل ۵-۲۰. روند تغییرات نسبت  $P/R$  در مقایسه با مقادیر مختلف  $B/H$  در کانال‌های مستطیلی ..... ۱۴۸
- شکل ۵-۲۱. مقایسه روند تغییرات ضریب شکل  $\psi(P/R)$  در مقابل مقادیر مختلف  $P/R$  ..... ۱۴۹
- شکل ۵-۲۲. مقایسه اثر روش اندازه‌گیری ممتنم و انرژی در تعیین ضریب زبری داری در دانه بندی‌های متفاوت. ۱۵۰

## ۱۵۱ فصل ۶ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

### ۱۵۷ واژه نامه

### ۱۶۵ مراجع

## فهرست جداول

۱	فصل ۱ مقدمه و تئوری
۱۶	فصل ۲ مروری بر منابع
۲۰	جدول ۱-۲. خلاصه مطالعات انجام شده
۲۱	جدول ۲-۲. تشریح خصوصیات مطالعات انجام شده
۴۱	فصل ۳ مواد و روش‌ها
۷۳	فصل ۴ نتایج آزمایشگاهی
۷۵	جدول ۱-۴. خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر صاف هیدرولیکی به روش انرژی
۷۶	جدول ۲-۴. خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر صاف هیدرولیکی به روش انرژی
۷۸	جدول ۳-۴. مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی بستر $\bar{u}_{*b}/V$ در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر صاف
۷۹	جدول ۴-۴. مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی جداره $\bar{u}_{*w}/V$ در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر صاف
۸۰	جدول ۵-۴. ضرائب ثابت معادله پیشنهادی (۴-۶) جهت تخمین سرعت برشی بستر بروش انرژی-صاف
۸۰	جدول ۶-۴. ضرائب ثابت معادله مستوی (۴-۲) جهت تخمین سرعت برشی جداره بروش انرژی-صاف
۸۱	جدول ۷-۴. توابع خطای حاصل از نتایج معادلات پیشنهادی (۴-۸) و (۴-۹) جهت تخمین سرعت برشی بستر و جداره در تحقیق حاضر در مقابل نتایج حاصل از مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۴)
۸۱	جدول ۸-۴. توابع خطای حاصل از نتایج معادله (۴-۸) در مقابل مقادیر اندازه گیری شده توسط دوثرتی و همکاران (۱۹۸۹) و انشتین (۱۹۴۲)
۸۶	جدول ۹-۴. خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر صاف با استفاده از روش ممنتم
۸۸	جدول ۱۰-۴. مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی بستر $\bar{u}_{*b}/V$ در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش ممنتم در بستر صاف



- جدول ۴-۱۱.** مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی جداره  $\bar{u}_{*w}/V$  در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر صاف..... ۸۸
- جدول ۴-۱۲.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیونی در معادله پیشنهادی (۴-۱۰) سرعت برشی بدون بعد بستر..... ۸۹
- جدول ۴-۱۳.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیونی در معادله پیشنهادی (۴-۱۱) سرعت برشی بدون بعد جداره..... ۹۰
- جدول ۴-۱۴.** توابع خطای حاصل از نتایج معادلات پیشنهادی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده توسط نایت و همکاران (۱۹۸۴)..... ۹۰
- جدول ۴-۱۵.** توابع خطای حاصل از نتایج معادله (۴-۱۲) در مقابل مقادیر اندازه گیری شده توسط دوئرتی و همکاران (۱۹۸۹) و انشتین (۱۹۴۲)..... ۹۲
- جدول ۴-۱۶.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر زبر با  $D_{50}=1.31$  میلیمتر..... ۹۷
- جدول ۴-۱۷.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر زبر با  $D_{50}=3.55$  میلیمتر..... ۹۸
- جدول ۴-۱۸.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر زبر با  $D_{50}=7.15$  میلیمتر..... ۹۸
- جدول ۴-۱۹.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر زبر با  $D_{50}=1.31$  میلیمتر..... ۹۹
- جدول ۴-۲۰.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر زبر با  $D_{50}=3.55$  میلیمتر..... ۹۹
- جدول ۴-۲۱.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر زبر با  $D_{50}=7.15$  میلیمتر..... ۱۰۰
- جدول ۴-۲۲.** مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زبر..... ۱۰۱
- جدول ۴-۲۳.** مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی جداره  $\bar{u}_{*w}/V$  در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زبر..... ۱۰۱
- جدول ۴-۲۴.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیونی در معادله پیشنهادی (۴-۱۴) سرعت برشی بدون بعد بستر..... ۱۰۲
- جدول ۴-۲۵.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیونی در معادله پیشنهادی (۴-۱۵) سرعت برشی بدون بعد جداره..... ۱۰۲
- جدول ۴-۲۶.** توابع خطای حاصل از نتایج معادلات پیشنهادی (۴-۱۶) و (۴-۱۷) در مقابل مقادیر اندازه گیری شده توسط نایت و همکاران (۱۹۸۱)..... ۱۰۴
- جدول ۴-۲۷.** توابع خطای حاصل از نتایج معادلات پیشنهادی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده توسط دوئرتی و انشتین..... ۱۰۵
- جدول ۴-۲۸.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه گیری تنش برشی در بستر زبر با  $D_{50}=1.31$  mm به روش ممتنم..... ۱۰۹
- جدول ۴-۲۹.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه گیری تنش برشی در بستر زبر با  $D_{50}=3.55$  mm به روش ممتنم..... ۱۰۹
- جدول ۴-۳۰.** خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه گیری تنش برشی در بستر زبر با  $D_{50}=7.15$  mm به روش ممتنم..... ۱۱۰
- جدول ۴-۳۱.** مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی بستر  $\bar{u}_{*b}/V$  در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زبر..... ۱۱۱
- جدول ۴-۳۲.** مقایسه آماری توابع خطای حاصل از مدل‌های پیشنهادی جهت تخمین سرعت برشی جداره  $\bar{u}_{*w}/V$  در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زبر..... ۱۱۱
- جدول ۴-۳۳.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیونی در معادله پیشنهادی (۴-۱۵) سرعت برشی بدون بعد بستر..... ۱۱۲
- جدول ۴-۳۴.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیونی در معادله پیشنهادی (۴-۱۶) سرعت برشی بدون بعد جداره..... ۱۱۲

- جدول ۴-۳۵.** توابع خطای حاصل از نتایج معادلات پیشنهادی در مقابل نتایج حاصل از مطالعات نایت و همکاران (۱۹۸۱) ..... ۱۱۳
- جدول ۴-۳۶.** توابع خطای حاصل از نتایج معادله (۴-۱۰) در مقابل مقادیر اندازه گیری شده توسط دوئرتی و انشتین ۱۱۵

۱۱۷

## فصل ۵ تحلیل نتایج

- جدول ۵-۱.** توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی روش ممتنم در مقابل روش انرژی در بستر صاف ..... ۱۱۹
- جدول ۵-۲.** توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی روش ممتنم در مقابل روش انرژی در بستر زیر ..... ۱۲۲
- جدول ۵-۳.** مقایسه ضریب همبستگی و انحراف از معیار معادلات پیشنهادی [۲۴] با معادلات متناظر آن در تحقیق حاضر ..... ۱۲۹
- جدول ۵-۴.** مقایسه ضرائب A و B در معادله (۵-۱۵) در تحقیقات مختلف کانال‌های روباز با بستر صاف ..... ۱۳۴
- جدول ۵-۵.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر صاف ..... ۱۳۴
- جدول ۵-۶.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر صاف ..... ۱۳۶
- جدول ۵-۷.** توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی روش ممتنم و انرژی در مقابل قانون پراتل در لوله‌های صاف در محاسبه ضریب زبری داری و سیسباخ ..... ۱۳۸
- جدول ۵-۸.** مقایسه ضرائب  $K_1$  و  $K_2$  و  $K_3$  در معادله (۵-۱۹) در تحقیقات مختلف در بستر زیر ..... ۱۳۹
- جدول ۵-۹.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زیر با قطر متوسط ذرات  $D_{50}=1.31 \text{ mm}$  ..... ۱۴۰
- جدول ۵-۱۰.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زیر با قطر متوسط ذرات  $D_{50}=3.55 \text{ mm}$  ..... ۱۴۱
- جدول ۵-۱۱.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش انرژی در بستر زیر با قطر متوسط ذرات  $D_{50}=7.15 \text{ mm}$  ..... ۱۴۱
- جدول ۵-۱۲.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زیر با قطر متوسط ذرات  $D_{50}=1.31 \text{ mm}$  ..... ۱۴۲
- جدول ۵-۱۳.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زیر با قطر متوسط ذرات  $D_{50}=3.55 \text{ mm}$  ..... ۱۴۲
- جدول ۵-۱۴.** محاسبه ضریب داری و سیسباخ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش ممتنم در بستر زیر با قطر متوسط ذرات  $D_{50}=7.15 \text{ mm}$  ..... ۱۴۳
- جدول ۵-۱۵.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیون در معادله پیشنهادی (۵-۱۹) در اندازه گیری ضریب داری به روش انرژی  $R^2 = 0.994$  ..... ۱۴۳
- جدول ۵-۱۶.** مقادیر ثابت و ضرائب رگرسیون در معادله پیشنهادی (۵-۱۹) در اندازه گیری ضریب داری به روش ممتنم  $R^2 = 0.993$  ..... ۱۴۴
- جدول ۵-۱۷.** توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی روش ممتنم و انرژی در مقابل معادله کلبروک-وایت در محاسبه ضریب زبری داری و سیسباخ ..... ۱۴۴

۱۵۱	فصل ۶ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
۱۵۷	واژه نامه
۱۶۵	مراجع

## فهرست علائم اختصاری

---

BNC – Baseband Network Cable Connector  
BSS - Boundary Shear Stress  
KEF – Knife Edge Flum  
KET – Knife Edge Table  
TKE – Turbulent Kinetic Energy  
USB – Universal Serial Bus  
USBR - U.S. Burean of Reclamation

نام خانوادگی: لشکرآرا محمره	نام: بابک
عنوان پایان نامه: تعیین تنش برشی در کانالهای مستطیلی با استفاده از روش های ممنتم و انرژی	
استاد راهنما: دکتر منوچهر فتیحی مقدم	استاد مشاور: دکتر محمود شفاعی بجستان
درجه تحصیلی: دکتری	گرایش: سازه های آبی
محل تحصیل: دانشگاه شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی علوم آب
تاریخ فارغ التحصیلی: دی ماه ۱۳۸۸	تعداد صفحات: ۱۶۲
واژه های کلیدی: تنش برشی، سرعت برشی، لوله پرستون، فلوم لبه چاقویی، ممنتم، انرژی.	
<b>چکیده :</b>	
<p>تحقیق حاضر بمنظور بررسی آزمایشگاهی و تعیین میزان سهم هر یک از تنش های برشی کف و جداره و همچنین تعیین ضریب مقاومت هیدرولیکی جریان در یک مجرای مستطیلی با استفاده از روش های اندازه گیری ممنتم و انرژی پیشنهاد شده است. در این تحقیق نیروی برشی کل وارده بر سطوح مرطوب کانال با استفاده از روشی نوین اندازه گیری شده است. این روش بر مبنای اندازه گیری مستقیم نیرو استوار بوده و سیستم اندازه گیری مذکور فلوم لبه چاقویی (KEF<sup>1</sup>) نامگذاری شده است. جهت تعیین تغییرات تنش برشی موضعی از لوله پرستون با قطر خارجی ۴ میلیمتر مجهز به سلول های حساس به فشار دینامیک استفاده گردید. جهت تبدیل تفاضل فشار قرائت شده به تنش برشی از منحنی کالیبراسیون پتل<sup>۲</sup> استفاده گردیده است.</p> <p>نتایج حاصل از معادلات پیشنهادی به روش انرژی با نتایج نظیر حاصل از محققین قبلی مطابقت دارد.</p> <p>شیب خط رگرسیون عبوری از میان مقادیر <math>1/\sqrt{f}</math> و <math>\text{Log}(\text{Re}\sqrt{f})</math> حاصل از اندازه گیری به روش ممنتم در بسترهای صاف و زبر هیدرولیکی نسبت به شیب خط معادله پرائتل موازی می باشد در صورتی که استفاده از روش انرژی نشانگر واگرایی در مقایسه ای مشابه بوده است. ضریب زبری داری اندازه گیری شده به روش ممنتم در مقایسه با مقادیر نظیر حاصله از معادله کلبروک-وایت از مقادیر بیشتری برخوردار است. این موضوع توسط محققین قبلی که از روش انرژی بهره گیری نموده اند نیز تایید گردیده است.</p> <p>از انطباق نتایج حاصل از اندازه گیری ضریب زبری به روش های انرژی و ممنتم در بسترهای صاف و زبر هیدرولیکی نشان می دهد که خط رگرسیون عبوری از میان نتایج حاصل از روش ممنتم با خط رگرسیون عبوری از میان مقادیر حاصل از روش انرژی در طول از مبداء واحدی یکدیگر را قطع می نمایند. با افزایش مقادیر <math>\text{Log}(\text{Re}\sqrt{f}) &gt; 4.65</math>، مقادیر ضریب زبری داری حاصل از روش ممنتم نسبت به روش انرژی کاهش می یابد.</p> <p>از دست آوردهای مهم این تحقیق اندازه گیری دقیق تنش برشی کل وارده بر محیط مرطوب و همچنین اصلاح اثر زبری بر روی میزان افت اصطکاک مبتنی بر اندازه گیری مستقیم ضریب زبری داری-ویسباخ می باشد.</p>	

<sup>1</sup> -Knife Edge Flume

<sup>2</sup> -Calibration relationships of Patel



# فصل ۱

## مقدمه و تئوری

## ۱-۱. مقدمه

در کانالهای روباز مولفه نیروی ثقل در جهت جریان موجب حرکت آب می‌شود در حالیکه در مجاری تحت فشار عامل ایجاد کننده حرکت اختلاف فشار بین دو مقطع از جریان است. در لوله‌های تحت فشار به علت دایره ای شکل بودن مقطع جریان، تنش برشی در تمام نقاط جداره تقریباً یکسان است. اما در کانالهای روباز در سطح آزاد که آب با هوا در تماس می‌باشد تنش برشی تقریباً صفر و در سایر نقاط در جداره دارای توزیعی غیر یکنواخت است. بعلاوه به علت تنوع شکل مقطع جریان در کانالهای روباز، هر شکل مقطع توزیع تنش برشی مربوط به خود را دارد. مطابق با مطالعات دفتر مهندسی عمران امریکا<sup>۱</sup>، هنگامیکه آب در کانال جریان می‌یابد نیرویی در جهت حرکت آب، بر سطح بستر کانال اثر می‌کند. این نیرو بطور ساده نیروی کشش آب در روی محیط مرطوب است و بعنوان نیروی مالشی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود [۵].

## ۱-۲. معادلات پایه

اگر سرعت متوسط جریان در تمام مقاطع مجرا یکسان باشد، حرکت یکنواخت نامیده می‌شود. برای این منظور، لازم است که مقطع کانال در تمام طول آن از نظر شکل و عمق یکسان باشد که در چنین حالتی، سطح آزاد مایع با کف بستر موازی خواهد بود. برای بدست آوردن رابطه اصلی حرکت مایع در مجاری روباز، قسمتی از مایع را که به شکل منشوری بین دو مقطع AD و BC محدود است، بعنوان حجم مشخصه مایع در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱-۱).

نیروهایی که بر این حجم از مایع موثرند بشرح زیر است :

الف- نیروهای فشاری  $F_1$  و  $F_2$  که بر طرفین آن اثر میکنند.

ب- نیروی وزن  $W$  که مولفه آن در جهت حرکت برابر  $W \cdot \sin \theta$  می‌باشد.

د- نیروی مقاوم ناشی از گرانروی مایع که بر کف و دیواره‌های این حجم موثر بوده و مقدار آن

<sup>1</sup> -U.S. Bureau of Reclamation

<sup>2</sup> - Tractive Force