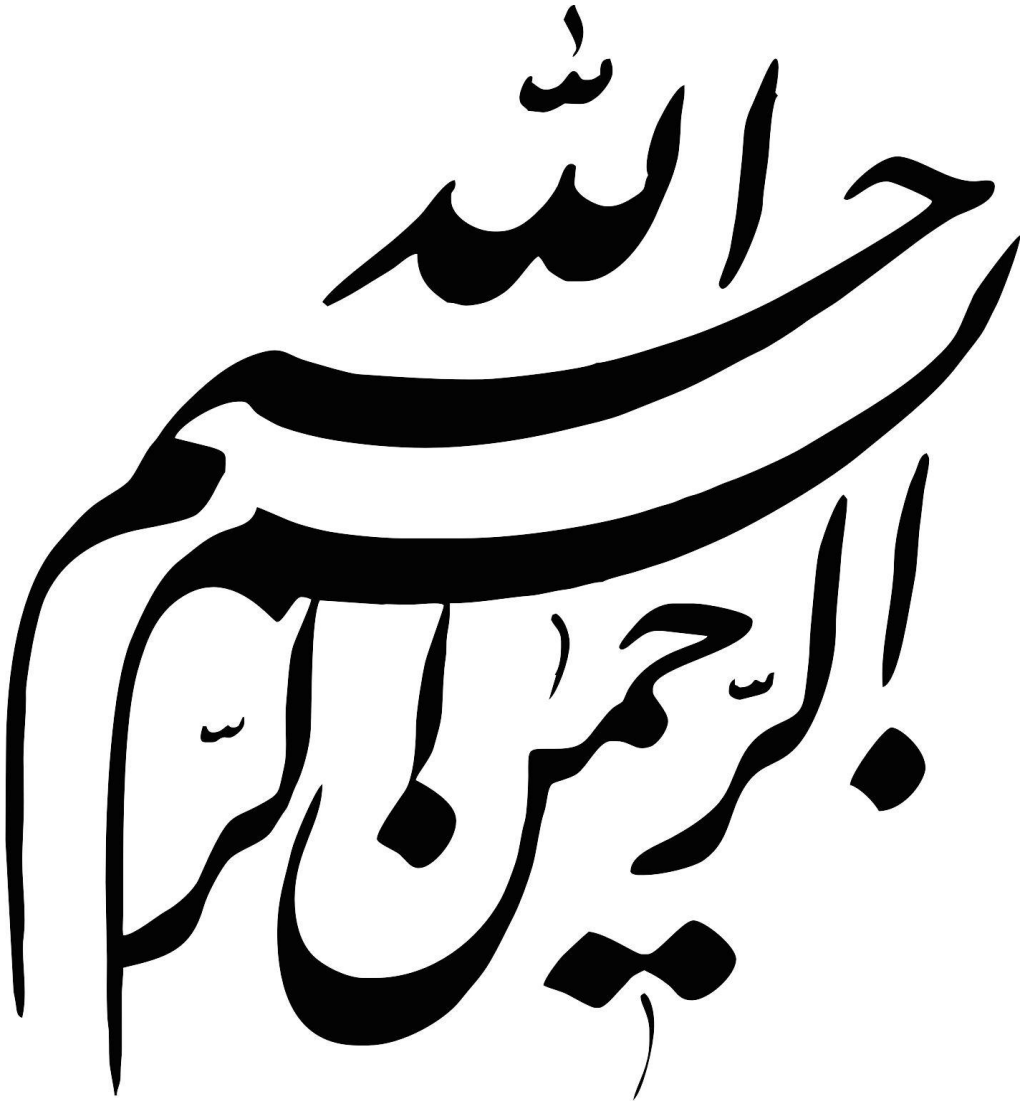
بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه سیستان و بلوچستان
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب

عنوان:

تخمین عمق آبشستگی در تکیه‌گاه پل به کمک شبکهٔ عصبی مصنوعی و مدل HEC-RAS

استاد راهنما:

دکتر غلامرضا عزیزیان

تحقیق و نگارش:

احسان افضلی

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است)

خرداد ۱۳۹۱

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان تعیین عمق آبشستگی در تکیه‌گاه پل به کمک سیستم‌های هوشمند و مدل HEC-RAS قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد عمران - آب توسط دانشجو احسان افضلی با راهنمایی استاد پایان نامه آقای دکتر غلامرضا عزیزیان تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

احسان افضلی

این پایان نامه ۶ واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ۹۱/۰۴/۳ توسط هیئت داوران بررسی و درجه عالی به آن تعلق گرفت.

	نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**
استاد راهنما:	دکتر غلام رضا عزیزیان		
استاد راهنما:			
استاد مشاور:			
داور ۱:	دکتر مهدی اژدری مقدم		
داور ۲:	دکتر محمد گیوه‌چی		
نماینده تحصیلات تکمیلی:	دکتر محمد حسین شفیعی		

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب احسان افضلی تعهد می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: احسان افضلی

امضاء

تقدیم به:

اعضای خانواده ام

اشخاصی که همیشه

حضورشان را

احساس کرده ام

سپاسگزاری

اینجانب بر خود واجب می دانم که از جناب آقای دکتر عزیزیان برای راهنمایی بی دریغشان در طول انجام این تحقیق و ویرایش آن، کمال قدردانی خویش را اعلام دارم. همچنین مایلم مراتب احترام و سپاس خویش را از اساتید محترم گروه عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان، جناب آقای دکتر مهدی اژدری مقدم و جناب آقای دکتر محمد گیوه‌چی در خصوص پذیرش بخش داوری این پایان‌نامه و ذکر نکات اصلاحی در جهت بهبود محتوای آن بیان دارم.

لازم است از همکلاسیان و دوستانم در دورهٔ کارشناسی ارشد میلاد نوروزپور، عارف حاج حسینی، حسن گل آقایی و بهرام عنانی که حضور فکری و معنویشان کمک شایانی به اینجانب بوده است، سپاسگزاری نمایم.

چکیده:

اجرای پل‌ها بر روی آبراهه‌ها مستلزم استفاده از ستون‌هایی بر روی بستر رودخانه است. این بخش از پل عموماً در معرض پدیدهٔ آبشستگی موضعی قرار می‌گیرد. تعیین میزان عمق این نوع آبشستگی از مسائل حائز اهمیت در مهندسی هیدرولیک است. مکانیسم جریان اطراف پایهٔ پل‌ها پیچیده بوده و ایجاد یک مدل تجربی کلی برای تعیین میزان دقیق آبشستگی هزینه بر است. از این‌رو بکارگیری روش‌های جدید مبتنی بر علم انفورماتیک به منظور پیش بینی این عمق گسترش یافته است. در این رساله پدیدهٔ آبشستگی در تکیه‌گاه کناری پل به طور اختصاصی مورد بررسی قرار گرفته است. محققان ۷۰ درصد از هزینه‌های مصرف شده در بحث نگهداری و تعمیر پل‌ها در کشور نیوزلند را وابسته به آبشستگی در تکیه‌گاه کناری دانسته‌اند. در این راستا با استفاده از داده‌های آبشستگی آزمایشگاهی منتشر شده در مراجع معتبر، میزان دقت مدل‌های هوشمند شامل شبکه‌های عصبی، سیستم‌های استنتاج فازی- عصبی و همچنین روابط مرسوم در بحث برآورد عمق آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها و مدل نرم افزاری HEC-RAS بررسی شده است. متوسط ضریب همبستگی در مراحل آموزش و آزمون برای مناسب‌ترین شبکهٔ عصبی مصنوعی (شبکهٔ شعاعی) به ترتیب ۰/۹۴و ۰/۹۲ و برای مدل فازی- عصبی به ترتیب برابر با ۰/۷۸، ۰/۹۲ بوده است. میزان ریشهٔ میانگین مربعات خطا برای مدلهای مذکور در مراحل آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۰۰۳، ۴/۷۱ در برابر ۰/۰۰۷، ۴/۴۷ بوده است. میزان این خطا برای مدل HEC-RAS و بهترین رابطهٔ تجربی (ملویل و کولمان) به ترتیب ۲۰/۱۶ و ۵/۳ بوده است. شبکهٔ عصبی مصنوعی بهترین عملکرد آموزشی را از خود نشان داده است در حالی‌که مدل فازی ـ عصبی بیشترین قابلیت اعتماد را در مرحله آزمون فراهم آورده است. همچنین استفاده از فرآیند بی‌بعد سازی داده‌ها باعث افزایش میزان ریشهٔ میانگین مربعات خطا در مدل‌ها شده است (برای شبکهٔ عصبی شعاعی و مدل فازی عصبی به ترتیب ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۸ در مرحلهٔ آموزش و ۰/۲۵ و ۰/۱۹ در مرحلهٔ آزمون می‌باشد). رابطهٔ بی‌بعد جدیدی مبتنی بر روش آنالیز رگرسیون غیر خطی برای تعیین عمق آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پیشنهاد شده است. ضریب همبستگی برای این رابطه در مرحلهٔ کالیبراسیون و آزمون به ترتیب ۰/۸۶و ۰/۹۶ و میزان پارامتر ریشهٔ میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با ۰/۷۲ و ۰/۳۸ بوده است.

کلمات کلیدی: آبشستگی، تکیه‌گاه کناری، رگرسیون غیر خطی، شبکهٔ عصبی مصنوعی، مدل فازی – عصبی HEC – RAS ،

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- بیان موضوع ۲
۱-۳- ضرورت و هدف از انجام تحقیق ۳
۱-۴- رویکرد به کار رفته در تحقیق ۴
۱-۵- تقسیم بندی موضوعی تحقیق ۵
فصل دوم: مبانی فرسایش و رسوب در رودخانه‌ها ۷
۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- حمل و انتقال رسوب ۸
۲-۳- شکل‌های مختلف بستر آبراهه ۸
۲-۴- خصوصیات ذرات رسوب ۹
۲-۵- پدیدهٔ مسلح شدن بستر ۹
۲-۶- خصوصیات ذرات منفرد غیر چسبنده ۱۰
۲-۷- توزیع دانه بندی ذرات ۱۰
۲-۸- سرعت سقوط ذرات ۱۱
۲-۹- آستانهٔ حرکت ذرات رسوب ۱۲
فصل سوم: کلیات آبشستگی ۱۵
۳-۱- مقدمه ۱۶
۳-۲- انواع آبشستگی ۱۶
۳-۳- تغییرات دراز مدت بستر آبراهه ۱۷
۳-۴- مکانیزم آبشستگی موضعی ۱۷
۳-۵- آبشستگی در آب زلال و آب حاوی رسوب..... ۲۱
۳-۶- تعیین عمق آبشستگی در تکیه‌گاه کناری پل‌ها (روابط مرسوم) ۲۲
۳-۶-۱- عوامل تأثیر گذار در آبشستگی در تگیه‌گاه ۲۳
۳-۶-۱-۱- شکل تکیه گاه ۲۴
۳-۶-۱-۲- موقعیت تکیه گاه در آبراهه ۲۵
۳-۶-۱-۳- ساختار تکیه گاه ۲۶
۳-۶-۱-۴- مجاورت پایه‌های میانی ۲۶
۳-۶-۱-۵- رسوب و خاک ۲۶

۳-۶-۱-۶- میدان جریان ۲۷
۳-۶-۲- روابط مرسوم تعیین عمق آبشستگی با تئوری جریان به طور توأم منقبض و آشفته شده ۲۸
۳-۶-۲-۱- روش پیشنهاد شده توسط رابرت اتما و همکاران (۲۰۱۰) ۲۹
۳-۶-۲-۲- روش ABSCOUR ۳۵
۳-۶-۲-۳- تخمین عمق آبشستگی با استفاده از رابطه لارسن (۱۹۸۰)..... ۳۸
۳-۶-۳- روابط مرسوم تعیین عمق آبشستگی با تئوری جریان به طور مجزا منقبض و آشفته شده ۴۰
۳-۶-۳-۱- آبشستگی در تنگ شدگی طویل ۳۹
۳-۶-۳-۲- آبشستگی موضعی در تکیه گاه کناری ۴۱
۳-۶-۳-۲-۱- لیو و همکاران (۱۹۶۱) ۴۱
۳-۶-۳-۲-۲-فروهلیچ (۱۹۸۹) ۴۳
۳-۶-۳-۲-۳- ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵و ۲۰۰۱) ۴۳
۳-۶-۳-۲-۴- ملویل و کولمان (۲۰۰۰) ۴۴
۳-۶-۳-۲-۵- استورم و جانجوا (۱۹۹۳) ۴۵
۳-۶-۳-۲-۶- تونسند و کوچکزاده (۱۹۹۷ و ۱۹۹۸) ۴۸
فصل چهارم: داده‌های آبشستگی و مدل‌های پیش بینی کننده..... ۵۰
۴-۱- مقدمه ۵۱
۴-۲- داده‌های آبشستگی مورد استفاده در تحقیق ۵۱
۴-۳- مدل‌های ریاضی پیش‌بینی کننده ۵۷
۴-۳-۱- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۸
۴-۳-۱-۱- شبکهٔ پرسپترون چند لایه با الگوریتم پس انتشارخطا ۵۸
۴-۳-۱-۲- شبکهٔ عصبی مصنوعی مبتنی بر تابع پایهٔ شعاعی ۶۰
۴-۳-۱-۳- شبکهٔ رگرسیونی تعمیم یافته..... ۶۱
۴-۳-۲- منطق فازی و سیستم استنتاج فازی ۶۲
۴-۳-۲-۱- مدل فازی ۶۲
۴-۳-۲-۲- مدل فازی ممدانی..... ۶۳
۴-۳-۲-۳- مدل فازی تاکاگی-سوگنو..... ۶۳
۴-۳-۲-۴- سیستمهای فازی – عصبی ۶۳
۴-۳-۲-۵- روش خوشه بندی بندی FCM ۶۵
۴-۳-۲-۶-روش خوشه بندی بندی کاهشی ۶۶
۴-۳-۳- فرآیند آبشستگی در تکیه گاه های انتهایی پل ها در نرم افزار HEC-RAS ۶۶

فصل پنجم: آنالیز داده‌های آبشستگی به روش شبکهٔ عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی ۷۰
۵-۱- مقدمه ۷۱

۵-۲- فرآیند آماده‌سازی داده‌های آماری در مدل‌های پیش بینی کننده..... ۷۱
۵-۳- معیار ارزیابی مدل‌ها و روابط ریاضی پیش بینی کننده ۷۳
۵-۴- تحلیل داده‌های آبشستگی با مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی ۷۳
۵-۴-۱- شبکه‌های عصبی پیش خور ۷۴
۵-۴-۱-۱- طراحی شبکهٔ عصبی ۷۴
۵-۴-۱-۱-۱- طراحی شبکهٔ عصبی پیش خور بر اساس الگوی داده ای نوع اول..... ۷۴
۵-۴-۱-۱-۲- طراحی شبکهٔ عصبی پیش خور بر اساس الگوی داده ای نوع دوم ۷۶
۵-۴-۱-۱-۳- طراحی شبکهٔ عصبی پیش خور بر اساس الگوی داده ای نوع سوم ۷۷
۵-۴-۱-۲- آنالیز داده‌های آبشستگی با استفاده از شبکهٔ عصبی پیش خور..... ۷۸
۵-۴-۱-۲-۱- تحلیل نتایج شبکهٔ عصبی برای الگوی داده ای نوع اول ۷۹
۵-۴-۱-۲-۲- تحلیل نتایج شبکهٔ عصبی برای الگوی داده ای نوع دوم ۸۰
۵-۴-۱-۲-۳- تحلیل نتایج شبکهٔ عصبی برای الگوی داده ای نوع سوم ۸۰
۵-۴-۲- شبکهٔ عصبی مصنوعی تابع شعاعی..... ۸۲
۵-۴-۲-۱- آنالیز شبکهٔ عصبی مصنوعی تابع شعاعی با الگوی داده ای نوع اول..... ۸۳
۵-۴-۲-۲- آنالیز شبکهٔ عصبی مصنوعی تابع شعاعی با الگوی داده ای نوع دوم..... ۸۴
۵-۴-۲-۳- آنالیز شبکهٔ عصبی مصنوعی تابع شعاعی با الگوی داده ای نوع سوم..... ۸۵
۵-۴-۳- شبکهٔ عصبی مصنوعی رگرسیونی تعمیم یافته ۸۷
۵-۴-۳-۱- آنالیز شبکهٔ رگرسیونی با الگوی داده ای نوع اول ۸۷
۵-۴-۳-۲- آنالیز شبکهٔ رگرسیونی با الگوی داده ای نوع دوم ۸۸
۵-۴-۳-۳- آنالیز شبکهٔ رگرسیونی با الگوی داده ای نوع سوم ۸۹
۵-۵- سیستم استناج فازی – عصبی ۹۰
۵-۵-۱- سیستم فازی – عصبی (روش grid partition) ۹۰
۵-۵-۱-۱- آنالیز روش grid partition برای الگوی داده ای اول ۹۱
۵-۵-۱-۲- آنالیز روش grid partition برای الگوی داده ای دوم ۹۲
۵-۵-۱-۳- آنالیز روش grid partition برای الگوی داده ای سوم ۹۳
۵-۵-۲- سیستم فازی – عصبی (روش subtractive clustering) ۹۴
۵-۵-۲-۱- آنالیز داده‌ها با روش خوشه بندی کاهشی بر اساس الگوی داده ای اول ۹۴
۵-۵-۲-۲- آنالیز داده‌ها با روش خوشه بندی کاهشی بر اساس الگوی داده ای دوم ۹۵
۵-۵-۲-۳- آنالیز داده‌ها با روش خوشه بندی کاهشی بر اساس الگوی داده‌ای سوم ۹۶
۵-۵-۳- سیستم فازی – عصبی (روش FCM clustering) ۹۸
۵-۵-۳-۱- آنالیز داده‌ها با روش FCM بر اساس الگوی داده ای اول ۹۸
۵-۵-۳-۲- آنالیز داده‌ها با روش FCM بر اساس الگوی داده ای دوم ۹۹
۵-۵-۳-۳- آنالیز داده‌ها به روش FCM برای الگوی داده ای نوع سوم ۱۰۰
۵-۶- آنالیز حساسیت آبشستگی نسبت به پارامترهای مؤثر ۱۰۱

فصل ششم: آنالیز داده‌های آبشستگی به روش روابط تجربی (روش رگرسیون غیر خطی) **۱۰۵**
۶-۱- مقدمه ۱۰۶
۶-۲- پیشنهاد یک رابطهٔ جدید با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی ۱۰۶
۶-۲-۱- آنالیز حساسیت رابطه (۶-۱۰) نسبت به پارامترهای مؤثر رابطه ۱۱۰
۶-۲-۱-۱-بررسی میزان حساسیت پذیری عمق آبشستگی به پارامتر طول تکیه گاه ۱۱۰
۶-۲-۱-۲-آنالیز حساسیت نسبت به عمق جریان ۱۱۲
۶-۲-۱-۳- آنالیز حساسیت نسبت به عدد فرود جریان ۱۱۳
۶-۳- بررسی مقادیر آبشستگی محاسباتی با نرم افزار HEC – RAS ۱۱۳
۶-۴- استفاده از روابط تجربی در پیش بینی عمق آبشستگی ۱۱۴
فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات **۱۱۹**
۷-۱- مقدمه ۱۲۰
۷-۲- جمع بندی نتایج ۱۲۰
۷-۲-۱- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۱۲۰
۷-۲-۲- سیستم استناج فازی – عصبی ۱۲۱
۷-۲-۳- روش رگرسیون غیر خطی ۱۲۲
۷-۲-۴- آنالیز حساسیت ۱۲۲
۷-۳- پیشنهادات ۱۲۳
مراجع **۱۲۴**
پیوست الف: مبنای تئوری روش اتما (۲۰۱۰) **۱۳۱**
پیوست ب: حل مثال‌هایی از آبشستگی با روش‌های اتما و دیویس **۱۳۸**

فهرست جدول ها

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۳-۱- پارامترهای معرفی شده در رابطهٔ (۳-۱۶) ۴۱

جدول ۳-۲- فاکتور شکل به کار رفته در رابطهٔ فروهلیچ (۱۹۸۹) ۴۳

جدول ۳-۴- معرفی فاکتورهای موجود در رابطهٔ ملویل و کولمان (۲۰۰۰) ۴۶

جدول ۴-۱- دامنهٔ تغییرات به کار رفته در تحقیق ۵۲

جدول ۴-۲- داده‌های آبشستگی استفاده شده در امر کالیبراسین مدل‌های ریاضی ۵۲

جدول ۴-۳- داده‌های اختصاص یافته در امر امتحان مدل..... ۵۷

جدول ۵-۱- آنالیز حساسیت برای داده‌های اصلی ۱۰۲

جدول ۵-۲- آنالیز حساسیت برای داده‌های بی بعد ۱۰۲

جدول ۵-۳- مقایسهٔ نتایج عددی به دست آمده از مدل‌های هوشمند با بر اساس الگوی داده ای
شمارهٔ ۱ ..... ۱۰۳

جدول ۵-۴- مقایسهٔ نتایج عددی به دست آمده از مدل‌های هوشمند با بر اساس الگوی داده ای
شمارهٔ ۲ ..... ۱۰۳

جدول ۵-۵- مقایسهٔ نتایج عددی به دست آمده از مدل‌های هوشمند با بر اساس الگوی داده ای
شمارهٔ ۳ ..... ۱۰۴

جدول ۶-۱- ابعاد پاراکترهای مؤثر در آبشستگی در تکیه گاه ۱۰۷

جدول ۶-۲- داده‌هاب آبشستگی مورد استفاده برای تعیین حساسیت رابطهٔ (۶-۱۰) ۱۱۱

جدول ۶-۳- تغییرات عمق حداکثر آبشستگی بر اثر تغییرات عمق جریان ۱۱۲

فهرست شکل ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۲- ۱- مقادیر C_d برای ذرهٔ منفرد کروی [۱۴] ۱۲

شکل ۲-۲- منحنی شیلدز [۱۴] ۱۴

شکل ۳- ۱-انواع آبشستگی محتمل در محل تکیه گاه پل ۱۷

شکل ۳- ۲-مکانیزم آبشستگی در مجاورت پایهٔ میانی (PIER) [۱۹] ۱۹

شکل ۳- ۳- مکانیزم آبشستگی در مجاورت تکیه گاه کناری پل [۱۹] ۲۱

شکل ۳- ۴- تغییرات زمانی عمق آبشستگی ۲۲

شکل ۳- ۵- تکیه گاه با جدارهٔ شیب دار با خاکریز تمام شده در سیلاب دشت آبراهه [۲] ۲۴

شکل ۳- ۶- فرم تکیه گاه با دیوارهٔ هادی [۲] ۲۵

شکل ۳- ۷- مدل یک تکیه گاه با جداره های قائم [۲] ۲۵

شکل ۳- ۸- موقعیت تکیه گاه و خاکریز مجاور آن در یک کانال مرکب ۲۶

شکل ۳- ۹- الگوی جریان در یک انقباض کوتاه [۲] ۲۷

شکل ۳- ۱۰- الگوی جریان و موقعیت حفرهٔ آبشستگی در یک کانال مرکب [۲] ۲۸

شکل ۳- ۱۱- آبشستگی در حالت نوع A [۲] ۳۰

شکل ۳- ۱۲- تخمین ضریب α_A برای تکیه گاه با جدارهٔ شیبدار [۲] ۳۱

شکل ۳- ۱۳- تخمین ضریب α_A برای تکیه گاه با دیوارهٔ هادی [۲] ۳۱

شکل ۳- ۱۴- آبشستگی در حالت نوع B [۲] ۳۲

شکل ۳- ۱۵- تعیین پارامتر α_B برای تکیه گاه با جدارهٔ شیبدار [۲] ۳۳

شکل ۳- ۱۶- تعیین پارامتر α_A برای تکیه گاه با دیوارهٔ هادی [۲] ۳۳

شکل ۳- ۱۷- شرایط آبشستگی نوع C [۲] ۳۴

شکل ۳- ۱۸- موقعیت حفرهٔ آبشستگی در مجاورت تکیه گاه [۳۵] ۴۲

شکل ۳- ۱۹- تعریف هندسی زاویه برخورد جریان با تکیه گاه ۴۴
شکل ۳-۲۰- نمایش پارامترهای معرفی شده در رابطهٔ (۳-۳۱) ۴۷
شکل ۳-۲۱- الگوی جریان و تعریف پارامترهای معرفی شده در رابطه ی (۳-۳۲) [۵۰] ۴۸
شکل ۴- ۱- الگوریتم عملکرد یک شبکهٔ عصبی مصنوعی [۶۲]..... ۵۹
شکل ۴- ۲- معماری شبکهٔ عصبی چند لایه ۵۹
شکل ۴- ۳- ساختار شبکهٔ شعاعی ۶۱
شکل ۴- ۴- ساختار شبکهٔ رگرسیونی تعمیم یافته ۶۲
شکل ۴- ۵- ساختار مدل فازی-عصبی از درجهٔ یک با دو قانون ۶۴
شکل ۴- ۶- مقاطع عرضی استفاده شده در HEC-RAS به منظور انجام محاسبات افت جریان ۶۷
شکل ۵- ۱- تأثیر تعداد نرون و لایه در شبکهٔ عصبی بر میزان خطای MAE برای الگوی داده ای نوع اول ۷۵
شکل ۵- ۲- تأثیر تعداد نرون و لایه در شبکهٔ عصبی بر میزان خطای RMSE برای الگوی داده ای نوع اول.... ۷۵
شکل ۵- ۳- تأثیر تعداد تکرار در شبکهٔ عصبی بر میزان خطای RMSE برای الگوی داده ای نوع اول ۷۶
شکل ۵- ۴- تأثیر نوع الگوریتم آموزش شبکهٔ عصبی بر میزان خطای RMSE برای الگوی داده ای نوع اول ... ۷۶
شکل ۵- ۵- تأثیر تعداد نرون و لایه در شبکهٔ عصبی بر میزان خطای RMSE برای الگوی داده ای نوع دوم... ۷۷
شکل ۵- ۶- بررسی تأثیر نوع الگوی داده ای بر عملکرد شبکه ۷۸
شکل ۵- ۷ - تأثیر تعداد نرون و لایه در شبکهٔ عصبی بر میزان خطای RMSE برای الگوی داده ای نوع سوم .. ۷۸
شکل ۵- ۸- بررسی تأثیر نوع الگوی داده ای بر عملکرد شبکه ۷۸
شکل ۵- ۹- فرآیند آموزش و ارزیابی شبکهٔ منتخب برای الگوی داده ای نوع اول ۷۹
شکل ۵- ۱۰- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ پیش خور (براساس الگوی دادهای نوع اول) ۸۰
شکل ۵- ۱۱- فرآیند آموزش و ارزیابی شبکهٔ منتخب برای الگوی داده ای نوع دوم ۸۱
شکل ۵- ۱۲- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ پیش خور (براساس الگوی دادهای نوع دوم)..... ۸۱
شکل ۵- ۱۳- فرآیند آموزش و ارزیابی شبکهٔ منتخب برای الگوی داده ای نوع سوم ۸۲
شکل ۵- ۱۴- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ پیش خور (براساس الگوی دادهای نوع سوم) ۸۲
شکل ۵- ۱۵- بررسی تأثیر پارامتر SPREAD در میزان خطای شبکهٔ شعاعی..... ۸۳
شکل ۵- ۱۶- فرآیند آموزش شبکهٔ منتخب شعاعی برای الگوی داده ای نوع اول ۸۴

شکل ۵- ۱۷- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ شعاعی (براساس الگوی دادهای نوع اول) ۸۴
شکل ۵- ۱۸- فرآیند آموزش شبکهٔ منتخب شعاعی برای الگوی داده ای نوع دوم ۸۵
شکل ۵- ۱۹- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ شعاعی (براساس الگوی دادهای نوع دوم) ۸۵
شکل ۵- ۲۰- فرآیند آموزش شبکهٔ منتخب شعاعی برای الگوی داده ای نوع سوم ۸۶
شکل ۵- ۲۱- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ شعاعی (براساس الگوی دادهای نوع سوم) ۸۶
شکل ۵- ۲۲- بررسی تأثیر پارامتر SPREAD در میزان خطای شبکهٔ رگرسیونی ۸۷
شکل ۵- ۲۳- فرآیند آموزش شبکهٔ رگرسیونی برای الگوی داده ای نوع اول ۸۸
شکل ۵- ۲۴- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ رگرسیونی (براساس الگوی دادهای نوع اول) ۸۸
شکل ۵- ۲۵- فرآیند آموزش شبکهٔ رگرسیونی برای الگوی داده ای نوع دوم..... ۸۹
شکل ۵- ۲۶- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔرگرسیونی (براساس الگوی دادهای نوع دوم) ۸۹
شکل ۵- ۲۷- فرآیند آموزش شبکهٔ رگرسیونی برای الگوی داده ای نوع سوم ۹۰
شکل ۵- ۲۸- عمق آبشستگی پیش بینی شده با شبکهٔ رگرسیونی (براساس الگوی دادهای نوع سوم) ۹۰
شکل ۵- ۲۹- فرآیند آموزش مدل فازی - عصبی برای الگوی داده ای نوع اول ۹۱
شکل ۵- ۳۰- عمق آبشستگی پیش بینی شده با مدل فازی- عصبی (بر اساس الگوی دادهای نوع اول)..... ۹۲
شکل ۵- ۳۱- فرآیند آموزش مدل فازی - عصبی برای الگوی داده ای نوع اول ۹۲
شکل ۵- ۳۲- عمق آبشستگی پیش بینی شده با مدل فازی- عصبی (بر اساس الگوی دادهای نوع دوم) ۹۳
شکل ۵- ۳۳- آموزش مدل فازی – عصبی بر اساس الگوی داده ای نوع سوم ۹۳
شکل ۵- ۳۴- عمق آبشستگی پیش بینی شده با مدل فازی- عصبی (بر اساس الگوی دادهای نوع سوم)..... ۹۴
شکل ۵- ۳۵- بررسی اثر شعاع تأثیر در عملکرد مدل فازی..... ۹۴
شکل ۵- ۳۶- فرآیند آموزش در روش خوشه بندی کاهشی برای الگوی داده ای نوع اول ۹۵
شکل ۵- ۳۷- عمق آبشستگی محاسباتی با روش خوشه بندی کاهشی (بر اساس الگوی دادهای نوع اول)..... ۹۵
شکل ۵- ۳۸- فرآیند آموزش در روش خوشه بندی کاهشی برای الگوی داده ای نوع دوم ۹۶
شکل ۵- ۳۹- عمق آبشستگی پیش بینی شده به روش خوشه بندی کاهشی (بر اساس الگوی دادهای نوع دوم)
..... ۹۶
شکل ۵- ۴۰- روند آموزش در روش خوشه بندی کاهشی بر اساس الگوی داده ای نوع سوم ۹۷

شکل ۵- ۴۱- عمق آبشستگی پیش بینی شده به روش خوشه بندی کاهشی (بر اساس الگوی دادهای نوع سوم) ۹۷
شکل ۵- ۴۲- بررسی اثر افزایش تعداد خوشه در عملکرد مدل فازی..... ۹۸
شکل ۵- ۴۳- فرآیند آموزش در روش FCM برای الگوی داده ای نوع اول..... ۹۸
شکل ۵- ۴۴- عمق آبشستگی محاسباتی با روش FCM (بر اساس الگوی دادهای نوع اول) ۹۹
شکل ۵- ۴۵- فرآیند آموزش در روش FCM برای الگوی داده ای نوع دوم..... ۹۹
شکل ۵- ۴۶- عمق آبشستگی پیش بینی شده به روش FCM (بر اساس الگوی دادهای نوع دوم) ۱۰۰
شکل ۵- ۴۷- روند آموزش روش FCM بر اساس الگوی داده ای نوع سوم ۱۰۰
شکل ۵- ۴۸- عمق آبشستگی پیش بینی شده به روش FCM (بر اساس الگوی دادهای نوع سوم) ۱۰۱
شکل ۶- ۱-کالیبراسیون رابطه (۶-۱۰) بر مبنای داده های جدول (۴-۲) ۱۰۹
شکل ۶- ۲- عمق آبشستگی پیش بینی شده با رابطهٔ (۶-۱۰) براساس دادههای آزمون..... ۱۰۹
شکل ۶- ۳- تعریف پارامترهای هندسی مؤثر تکیه گاه در آبشستگی ۱۱۰
شکل ۶- ۴- بررسی تأثیر طول تکیه گاه در عمق آبشستگی ۱۱۲
شکل ۶- ۵- تغییرات عمق آبشستگی بر حسب تغییرات عمق جریان..... ۱۱۳
شکل ۶- ۶- تغییرات عمق آبشستگی در مقابل تغییرات در عدد فرود جریان بالا دست..... ۱۱۳
شکل ۶- ۷- پیش بینی عمق آبشستگی به روش نرم افزاری HEC _ RAS..... ۱۱۴
شکل ۶- ۸- مقادیر عمق آبشستگی مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه فروهلیچ ... ۱۱۴
شکل ۶- ۹- مقادیر عمق آبشستگی مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه لیو ۱۱۵
شکل ۶- ۱۰- مقادیر عمق آبشستگی مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه ملویل ۱۱۶
شکل ۶- ۱۱- مقادیر عمق آبشستگی مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه لارسن.....۱۱۶
شکل ۶- ۱۲- مقادیر محاسباتی عمق آبشستگی با استفاده از روابط تجربی $\left(1<\frac{L_a}{Y_1}<25\right)$ ۱۱۷
شکل ۶- ۱۳- مقادیر محاسباتی عمق آبشستگی با استفاده از روابط تجربی $\left(0<\frac{L_a}{Y_1}<1\right)$ ۱۱۷
شکل ۶- ۱۴- مقادیر محاسباتی عمق آبشستگی با استفاده از روابط تجربی $\left(\frac{L_a}{Y_1}>25\right)$ ۱۱۸

شکل الف - ۱- طرح شماتیک انقباض و آشفتگی در یک لولهٔ جریان در مجاورت تکیه گاه [۲]..... ۱۳۲

شکل الف - ۲-میدان جریان اطراف یک تکیه گاه در سیلاب دشت [۲] ۱۳۶

شکل ب - ۱- کانال مرکب مورد استفاده در آزمایشات استورم. ۱۳۹

شکل ب - ۲ – روند استفاده از روش اتما (۲۰۱۰) برای تعیین عمق آبشستگی در تکیه گاه ۱۴۰

فهرست علائم

نشانه	علامت	بعد
سطح مقطع جریان در رابطهٔ (۳-۲۲)	A_e	L^2
بعد تکیه گاه همسو با جریان	B_a	L
عرض کلی کانال یا آبراهه	B	L
عرض سیلاب دشت	B_f	L
مقدار بایاس در شبکه عصبی	b	L
ضرایب رابطهٔ اتما (۲۰۱۰)	m_A, C_{TA}	-
ضریب رانش	C_d	-
قطر کوچکترین ذره ی غیر قابل حمل توسط جریان در مقطع پل	D_m	L
قطر پایه میانی مجاور تکیه گاه	D_p	L
میانه ی قطر ذرات	D_{50}	L
قطر متوسط هندسی	D_g	L
قطر ذره رسوب	D_s	L
حداکثر عمق آبشستگی در محل تکیه گاه	$d_{s,\max}$	L
قطر هیدرولیکی	D_H	L
قطر ذره مربوط به درصد عبوری ۸۴	d_{84}	L
قطر ذره مربوط به درصد عبوری ۱۶	d_{16}	L
قطر ذره نماینده در سیلاب دشت	d_f	L
قطر ذره نماینده در بستر اصلی	d	L
میزان عقب نشینی تکیه گاه نسبت به کانال اصلی	d_{short}, d_{long}	L
عمق آبشستگی پس از رسیدن به یک وضعیت پایدار	d_{se}	L

میزان خطای مدل ریاضی برای پیش بینی مقدار هدف	e	-
ارتفاع بخش خاکریز راه در مجاورت تکیه گاه	E_H	L
عدد فرود جریان در روی سیلاب دشت در مقطع بالا دست	Fr_{f1}	-
عدد فرود جریان مربوط به Q_e	Fr_e	-
عدد فرود جریان	Fr	-
نرخ رسوب حمل شده توسط جریان	G_s	L^3T^{-1}
نرخ رسوب حمل شده در واحد عرض	g_s	L^2T^{-1}
ارتفاع دیون ها	H	L
ضریب شکل تکیه گاه در روش دیویس	K_t	-
فاکتور عمق جریان (روش ملویل و کولمان)	K_{yl}	-
فاکتور زاویه برخورد جریان با تکیه گاه (روش ملویل و کولمان)	K_θ	-
ضریب تأثیر زاویه برخورد جریان با تکیه گاه(روش ملویل و کولمان)	K_β	-
فاکتور اصلاح سرعت در رابطه دیویس	K_U	-
ضریب شکل تکیه گاه (روش ملویل)	K_s	-
فاصله بین ستون تکیه گاه و پایه میانی مجاور	L_p	L
ضریب انقباض دبی در روش استورم	M	-
بردار ورودی اعمال شده به شبکهٔ عصبی	P	-
دبی جریان در کانال اصلی	Q_1	L^3T^{-1}
دبی کل در آبراهه	Q	L^3T^{-1}
دبی واحد عرض در محل پل	q_2	L^2T^{-1}
دبی جریان روی سیلاب دشت که توسط تکیه گاه به داخل کانال اصلی برگردانده می شود (روش کوچکزاده)	Q_a	L^3T^{-1}
سرعت برشی بحرانی برای مصالح بستر اصلی	$(U_*)_c$	LT^{-1}
سرعت جریان در آستانه حرکت ذرات	U_c	LT^{-1}

سرعت جریان در مقطع بالا دست پل در کانال اصلی	U_1	LT^{-1}
سرعت بحرانی برای رسوب بستر در مقطع بالا دست در سیلاب دشت	V_{f1c}	LT^{-1}
میزان بازشدگی سیلاب دشت در محل پل (روش دیویس)	W_2	L
عمق جریان در سیلاب دشت در بالادست پل	Y_f	L
عمق جریان در در مقطع بالا دست	Y_1	L
چگالی آب	ρ	ML^{-3}
چگالی رسوب مرطوب	$(\rho_{sed})_{wet}$	ML^{-3}
ویسکوزیته سینماتیک آب	υ	L^2T^{-1}
شتاب گرانش	g	LT^{-2}
ضریب افزاینده در رابطه اتما (۲۰۱۰)	α	-
سرعت برشی	U_*	LT^{-1}
پارامتر بحرانی شیلدز	$(\tau_*)_c$	-
زاویه شیب کانال	θ'	-
مقاومت برشی خاکریز	σ_E	$ML^{-1}T^{-2}$
زاویه برخورد جریان به پایه	β	-