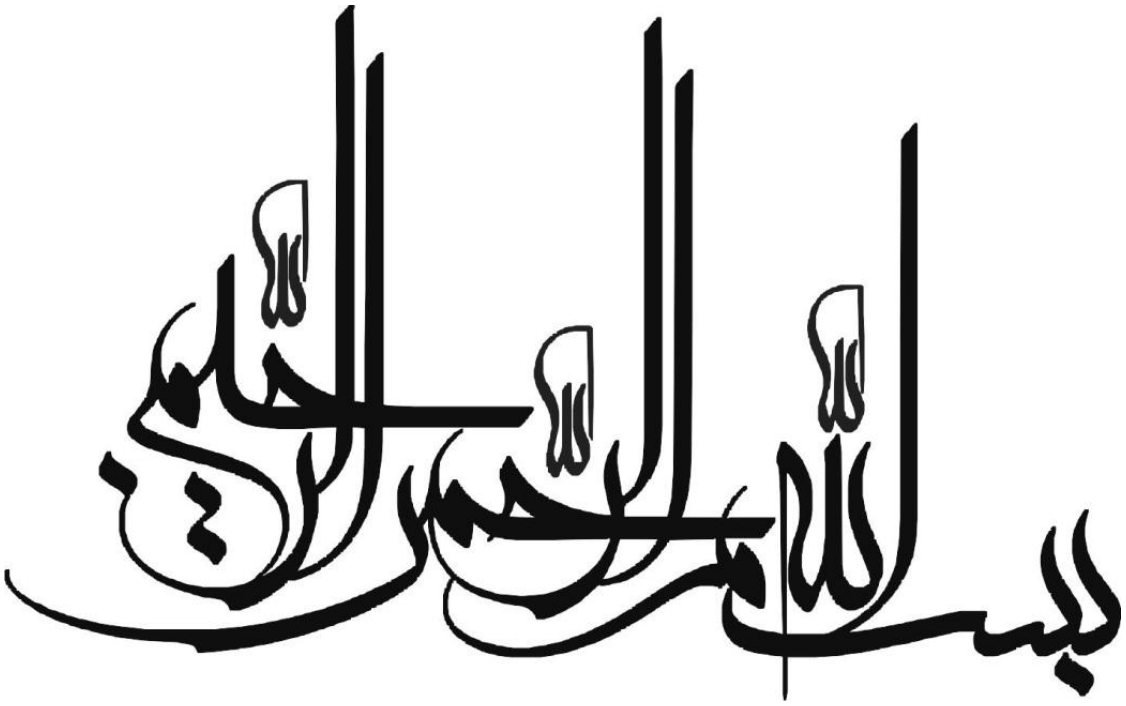
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش سازه‌های هیدرولیکی

عنوان:

تخمین حداکثر عمق آبشستگی پایه پل به کمک سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی

استاد راهنما:

دکتر محمد گیوه‌چی

استاد مشاور:

دکتر امیر احمد دهقانی

تحقیق و نگارش:

محمد مهدی هوشمند

بهمن ماه ۱۳۹۰

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان تخمین حداکثر عمق آبشستگی پایه پل توسط سیستم استنتاج تطبیقی فـازی- عصـبی قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی توسط محمد مهدی هوشمند با راهنمایی آقای دکتر محمد گیوه‌چی تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهـداف آموزشـی بـا ذکـر مرجـع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

محمد مهدی هوشمند

این پایان نامه ..... واحد درسی شناخته می شود و در تـاریخ ..... توسـط هیئـت داوران بررسـی و درجه ..... به آن تعلق گرفت.

	نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**
استاد راهنما:	دکتر محمد گیوه‌چی		
استاد راهنما:			
استاد مشاور:	دکتر امیر احمد دهقانی		
داور ۱:	دکتر مهدی اژدری مقدم		
داور ۲:	دکتر غلامرضا عزیزیان		
نماینده تحصیلات تکمیلی:	دکتر مهدی شفیعی آفارانی		

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب محمد مهدی هوشمند تعهد می‌کنم 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: محمد مهدی هوشمند

امضاء

تقدیم به:

ساحت مقدس آقا علی بن موسی الرضا (ع)

محضر حضرت ولی عصر (عجل الله تعالی)

تمام زندگی ام

پدر و مادرم

که دعایشان آرام بخش روحم در تلاطم دریای مواج زندگی است

خواهرم و آرش و عسل

برادرانم محمدرضا و محمد مجتبی

حامیان همیشگی ام در مسیر زندگی

سپاسگزاری

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت،

هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون برمی‌آید مفرح ذات پس در هر نفس دو نعمت است و بر هر نعمت شکری واجب

سپاس فراوان ایزد پاک را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند، باری دیگر بی‌هیچ منت مرا مورد رحمت خویش قرار داد و توفیق را رفیق راهم ساخت تا مسئولیتی دیگر را به پایان برسانم. بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات یکان یکان عزیزان جان که هماره مرا مورد محبت خویش قرار دادند قدردانی نمایم. از پدر و مادرم همانان که وجودم وامدار وجودشان است و پیوسته بر غفلت‌هایم قلم عفو کشیدند و دعای خیرشان را توشه‌ام ساختند بی‌نهایت سپاسگزارم. از استادان اندیشمند و بزرگوارم آقایان دکتر محمد گیوه‌چی و دکتر امیر احمد دهقانی که با سعه صدر و حسن خلق در راستای تحقق این مهم از هیچ کمکی بر من دریغ ننمودند بی‌کران سپاسگزارم. از استادان فرزانه آقایان دکتر مهدی اژدری مقدم و دکتر غلامرضا عزیزیان و دکتر ناصر شابختی که چون شمعی فروزان روشنی بخش مسیرم بودند سپاسگزارم. از آقایان پروفسور ملویل، پروفسور اتما و پروفسور چیو که داده‌های مورد نیاز را در اختیارم قرار دادند سپاسگزارم. از خانواده‌ام به سبب حمایت‌های بی‌ریایشان که تمامی خستگی‌های مسیر را به امید و روشنی برایم تبدیل نمودند سپاسگزارم. امید آن‌که در آینده‌ای نه چندان دور پاسخگوی محبتشان باشم. سپاس فراوان نثار یکان یکان دوستان مهرورزم مصطفی رستمی، مریم مغنی‌نژاد، احسان برقی، احمد فرخی، مسعود آرامی، مجتبی گودرزی، سالار خانی، نوید علیزاده، مهدی منوچهری، ناصر کاظمی، حمید خوش‌اندام، مرتضی هنرور، فرزاد طوسی، احسان جعفری، احسان بهادری، سعید قدرتی، محمد خدابخش، محمد پاریزی، مهدی فرزادمهر، فرزاد آزادمنش، حمید نوروزی، علی شیر آبادی، ادریس احمدی، سجاد موسوی، علی سلاجقه، میلاد صحرایی، رشید عباسپور، جواد غلامی، ابراهیم امین الرعایایی، صغری بردستانی و آقای مهندس جعفر واحدی که در سختی روزگاران یاورم بودند.

چکیده:

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین وسایل ارتباطی بوده، که در مواقع سیلاب اهمیت دو چندانی می‌یابند. به‌عنوان مثال در ایالات متحده بالغ بر ۳۶۰۰۰ پل یا در معرض آبشستگی و یا در محل وقوع آن قرار دارند. بنابراین طراحی دقیق و نگهداری از آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. در این راستا طراحی دقیق نقش ویژه‌ای را ایفا می‌کند. به‌منظور تحقق این مهم می‌بایستی اطلاعات اولیه، از صحت کافی و قابل قبولی برخوردار باشند که در این بین عمق آبشستگی موضعی در بستر رودخانه بسیار مهم می‌باشد. بنابراین تخمین دقیق این عمق سبب افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های نگهداری آن می‌شود. در تحقیق حاضر جهت ارائه روشی سومند برای تخمین عمق آبشستگی از سیستم‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی (ANFIS) بهره گرفته شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد روش‌های ذکر شده از داده‌های آزمایشگاهی در چهار حالت خام، نرمال شده، بی‌بعد و بی‌بعد نرمال شده استفاده شد. در ادامه پس از تعیین بهترین مدل، به کمک آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در پدیده‌ی آبشستگی معرفی گردید. اما جهت تعمیم‌پذیر بودن و اطمینان از نتایج حاصل از این روش‌ها، از داده‌های صحرایی نیز استفاده گردید. تمامی مراحل ذکر شده برای داده‌های آزمایشگاهی برای این مجموعه نیز عملیاتی گردید. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که تأثیر بی‌بعد سازی در بهبود عملکرد مدل‌ها نسبت به نرمال‌سازی بیشتر می‌باشد. متوسط ضریب همبستگی به‌دست آمده به کمک مدل ANFIS به‌طور میانگین ۱٪ بیشتر از مدل‌های ANN بود. متوسط مقدار میانگین ریشه مربع خطاها برای مدل ANFIS نسبت به مدل‌های ANN، ۰/۰۲ کمتر و میانگین مطلق خطا ۰/۰۴ بیشتر بود. شبکه عصبی بهترین عملکرد را در درک ارتباط بین پارامترهای ورودی داشته و در نهایت سیستم استنتاج تطبیق فازی- عصبی به علت قابلیت تعمیم‌پذیری بیشتر و نوسان کمتر در نتایج حاصل، عملکرد بهتری را نشان داد. پس از انجام آنالیز حساسیت مدل ANFIS به ازای داده‌های نرمال شده و بی‌بعد نرمال شده مشخص گردید که به ترتیب پارامترهای سرعت جریان در بالادست پایه پل و قطر پایه پل در حالت نرمال شده و نسبت سرعت جریان به قطر پایه پل در حالت بی‌بعد نرمال شده از مؤثرترین عوامل در عمق آبشستگی پایه پل هستند. همچنین نسبت d_{84}/d_{50} به عنوان پارامتر پیشنهادی در این تحقیق بعد از نسبت Y/D مؤثرترین عامل در عمق آبشستگی می‌باشد.

کلمات کلیدی: عمق آبشستگی، پایه پل، شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسأله ۲

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق ۴

۱-۴- محدودیت‌های انجام تحقیق ۵

۱-۵- هدف از انجام تحقیق ۶

۱-۶- ساختار پایان‌نامه ۷

فصل دوم: آبشستگی ۸

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- انواع آبشستگی ۱۰

۲-۳- آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل ۱۳

۲-۴- الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل ۱۶

۲-۴-۱- سیستم گرداب نعل اسبی ۱۷

۲-۴-۲- سیستم گردابی شیاری ۱۹

۲-۴-۳- سیستم گرداب دنباله‌دار ۲۰

۲-۴-۴- سیستم گرداب رو به پایین ۲۰

۲-۴-۵- سیستم گرداب موج کمانی ۲۱

۲-۵- جداشدگی خطوط جریان در اطراف پایه ۲۱

۲-۶- پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی موضعی در پایه‌های پل ۲۲
۲-۷- انتقال رسوب ۲۶
۲-۸- جریان ۲۹
۲-۹- تلاش‌های صورت گرفته به‌منظور تخمین عمق آبشستگی ۲۹
۲-۹-۱- مطالعات آزمایشگاهی ۳۰
۲-۹-۲- مدل‌های هوش مصنوعی ۳۳
۲-۱۰- شرایط حاکم بر داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق ۳۴
فصل سوم: شبکه‌های عصبی ۴۱
۳-۱- مقدمه ۴۲
۳-۲- تاریخچه‌ای از شبکه‌های عصبی ۴۲
۳-۳- شبکه‌های عصبی چیست؟ ۴۳
۳-۴- هوش مصنوعی و شبکه عصبی ۴۵
۳-۵- مزایای شبکه‌های عصبی مصنوعی ۴۵
۳-۶- مغز انسان ۴۶
۳-۷- ساختمان یک نورون عصبی ۴۷
۳-۸- تابع محرک: ۴۹
۳-۹- معماری شبکه‌های عصبی ۵۰
۳-۹-۱- شبکه‌های چند لایه ۵۰
۳-۹-۲- شبکه عصبی پس‌خور یا بازگشتی ۵۱
۳-۱۰- آموزش شبکه عصبی ۵۳
۳-۱۰-۱- آموزش با نظارت ۵۳

۳-۱۰-۲- آموزش بدون نظارت ۵۴
۳-۱۱- پرسپترون چند لایه ۵۴
۳-۱۲- الگوریتم پس انتشار ۵۶
۳-۱۳- نرخ یادگیری..... ۶۲
۳-۱۴- معیار توقف..... ۶۲
۳-۱۵- تعمیم پذیری ۶۳
۳-۱۶- توقف زود هنگام..... ۶۳
۳-۱۷- نحوه تقسیم بندی داده‌ها در روش Cross Validation ۶۳
۳-۱۸- الگوریتمهای مختلف یادگیری در پرسپترون‌های چند لایه ۶۴
فصل چهارم: منطق فازی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی.....۶۵
۴-۱- مقدمه ۶۶
۴-۲- اصول بنیادی منطق فازی ۶۷
۴-۲-۱- مجموعه‌های فازی..... ۶۷
۴-۲-۲- تابع عضویت..... ۶۷
۴-۲-۳- غیر فازی‌سازی..... ۶۹
۴-۲-۴- خواص مجموعه‌های فازی ۷۰
۴-۲-۵- متغیرهای زبانی و قواعد "اگر – آن‌گاه" فازی..... ۷۱
۴-۳- مزایا و محدودیت‌های منطق فازی ۷۲
۴-۳-۱- مزایای منطق فازی در مدل‌سازی..... ۷۲
۴-۳-۲- محدودیتهای منطق فازی در مدل‌سازی ۷۳
۴-۴- سیستم استنتاج فازی..... ۷۳

۴-۵- سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۷۸
۴-۵-۱- معماری مدل ANFIS ۷۸
۴-۵-۲- الگوریتم یادگیری هیبرید و برآورد پارامترها در مدل ANFIS ۸۱
۴-۵-۳- خوشه‌بندی کاهشی ۸۳
فصل پنجم: کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی در تخمین حداکثر عمق آبشستگی پایه پل ۸۵
۵-۱- مقدمه ۸۶
۵-۲- مجموعه داده‌های مورد استفاده برای تحلیل به‌وسیله‌ی ANN و ANFIS ۸۶
۵-۲-۱- کنترل داده‌ها ۸۷
۵-۲-۲- تأثیر نرمال سازی داده‌ها بر عملکرد شبکه ۸۷
۵-۲-۳- نحوه تقسیم بندی داده‌ها ۸۸
۵-۲-۴- بی‌بعد سازی ۸۹
۵-۳- کاربرد شبکه عصبی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی در تخمین حداکثر عمق آبشستگی پایه پل ۸۹
۵-۴- شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها ۹۱
۵-۵- تحلیل روشهای شبکه عصبی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۹۲
۵-۵-۱- طراحی معماری شبکه عصبی مصنوعی ۹۲
۵-۵-۲- طراحی معماری سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۱۰۴
۵-۶- تحلیل شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی و نتایج حاصل ۱۰۴
۵-۶-۱- تحلیل داده‌های خام آزمایشگاهی ۱۰۵
۵-۶-۲- تحلیل داده‌های نرمال شده آزمایشگاهی ۱۰۸

۵-۶-۳- تحلیل داده‌های بی‌بعد شده آزمایشگاهی ۱۱۰
۵-۶-۴- تحلیل داده‌های بی‌بعد نرمال شده آزمایشگاهی ۱۱۳
۵-۷- پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد شبکه عصبی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۱۱۸
۵-۷-۱- بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد شبکه عصبی مصنوعی ۱۱۸
۵-۷-۲- بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۱۱۸
۵-۸- آنالیز حساسیت ۱۲۲
۵-۹- تحلیل داده‌های صحرایی ۱۲۴
۵-۹-۱- تحلیل داده‌های خام صحرایی ۱۲۵
۵-۹-۲- تحلیل داده‌های نرمال شده صحرایی ۱۲۶
۵-۹-۳- تحلیل داده‌های بی‌بعد شده صحرایی..... ۱۲۷
۵-۹-۴- تحلیل داده‌های بی‌بعد نرمال شده صحرایی ۱۲۸
۵-۱۰- بررسی پارامترهای مؤثر در سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی به ازای داده‌های صحرایی
..... ۱۳۲
۵-۱۰-۱- شعاع تأثیر..... ۱۳۲
۵-۱۰-۲- تعداد تکرارها..... ۱۳۳
۵-۱۱- آنالیز حساسیت ۱۳۴
فصل ششم: جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادات.....۱۳۷
۶-۱- مقدمه ۱۳۸
۶-۲- جمع‌بندی نتایج..... ۱۳۸
۶-۲-۱- نتایج حاصل از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی ۱۳۸
۶-۲-۲- نتایج حاصل از تحلیل داده‌های صحرایی..... ۱۳۹

۶-۳- نتایج حاصل از تحلیل عملکرد شبکه عصبی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۱۴۰

۶-۴- نتایج حاصل از تحلیل آنالیز حساسیت ۱۴۱

۶-۵- پیشنهادات ۱۴۱

مراجع ۱۴۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱. توابع محرک متداول ۴۹

جدول ۵-۱. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های ورودی و خروجی و تعداد تکرارها برای الگوریتم آموزشی LM ۹۳

جدول ۵-۲. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۹۶

جدول ۵-۳. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۹۷

جدول ۵-۴. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۹۸

جدول ۵-۵. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۹۹

جدول ۵-۶. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۱۰۰

جدول ۵-۷. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۱۰۱

جدول ۵-۸. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دست‌یابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۱۰۲

جدول ۵-۹. شبکه‌های ANN ارزیابی شده جهت دستیابی به تعداد بهینه نورون‌ها لایه‌های پنهان، نوع توابع محرک و الگوریتم آموزشی ۱۰۳

جدول ۵-۱۰. اطلاعات آماری مربوط به داده‌های خام آزمایشگاهی ۱۰۵

جدول ۵-۱۱. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای داده‌های خام آزمایشگاهی ۱۰۶

جدول ۵-۱۲. اطلاعات آماری مربوط به داده‌های نرمال شده آزمایشگاهی..... ۱۰۸
جدول ۵-۱۳. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای داده‌های نرمال شده آزمایشگاهی ۱۰۸
جدول ۵-۱۴. اطلاعات آماری مربوط به داده‌های بیبعد آزمایشگاهی ۱۱۰
جدول ۵-۱۵. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای دادههای بی‌بعد شده آزمایشگاهی ۱۱۱
جدول ۵-۱۶. اطلاعات آماری مربوط به دادههای بی‌بعد نرمال شده آزمایشگاهی..... ۱۱۳
جدول ۵-۱۷. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای داده‌های بی‌بعد نرمال شده آزمایشگاهی ۱۱۳
جدول ۵-۱۸. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANFIS برای مجموعه داده‌های آزمایشگاهی ۱۱۵
جدول ۵-۱۹. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN برای مجموعه داده‌های آزمایشگاهی..... ۱۱۶
جدول ۵-۲۰. مقایسه نتایج حاصل از عملکرد شبکه به ازای مقادیر اولیه و بهینه شعاع..... ۱۱۹
جدول ۵-۲۱. تأثیر تعداد تکرار بر روی عملکرد سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۱۲۱
جدول ۵-۲۲. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای پارامترهای موجود در داده‌های نرمال شده آزمایشگاهی ۱۲۲
جدول ۵-۲۳. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای پارامترهای موجود در داده‌های بی‌بعد نرمال شده آزمایشگاهی ۱۲۳
جدول ۵-۲۴. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای داده‌های خام صحرایی ۱۲۵
جدول ۵-۲۵. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای داده‌های نرمال شده صحرایی. ۱۲۶
جدول ۵-۲۶. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای داده‌های بی‌بعد صحرایی ۱۲۷
جدول ۵-۲۷. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN و ANFIS برای داده‌های بی‌بعد نرمال شده صحرایی ۱۲۸

جدول ۵-۲۸. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANFIS برای مجموعه داده‌های صحرایی ۱۲۹

جدول ۵-۲۹. نتایج حاصل از قابلیت پیش‌بینی ANN برای مجموعه داده‌های صحرایی..... ۱۳۱

جدول ۵-۳۰. مقایسه نتایج حاصل از عملکرد شبکه به ازای مقادیر اولیه و بهینه شعاع..... ۱۳۲

جدول ۵-۳۱. تأثیر تعداد تکرار بر روی عملکرد سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی ۱۳۴

جدول ۵-۳۲. اطلاعات آماری مربوط به داده‌های بی‌بعد نرمال شده صحرایی..... ۱۳۵

جدول ۵-۳۳. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای پارامترهای موجود در داده‌های بی‌بعد نرمال شده صحرایی ۱۳۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱. مراحل توسعه آبشستگی[۱] ۱۰

شکل ۲-۲. پدیده آبشستگی موضعی در اثر تنگ شدگی ناشی از حضور پایه پل[۱۶] ۱۲

شکل ۲-۳. مقطع معادل تنگ شدگی ناشی از حضور پایه پل[۱۶] ۱۲

شکل ۲-۴. تشکیل حفره آبشستگی در تک پایه استوانه‌ای[۲] ۱۲

شکل ۲-۵. اجزای آبشستگی[۱] ۱۳

شکل ۲-۶. الگوی جریان به همراه سیستم‌های گردابه‌ای اطراف پایه پل ۱۷

شکل ۲-۷. گرداب نعل اسبی در اطراف پایه استوانه‌ای[۱۸] ۱۸

شکل ۲-۸. الگوی سه بعدی جریان در اطراف پایه استوانه‌ای[۱] ۲۰

شکل ۲-۹. نمودار آبشستگی در مقابل زمان[۱] ۲۶

شکل ۲-۱۰. نمودار آبشستگی در مقابل سرعت برشی[۱] ۲۶

شکل ۲-۱۱. الگوی حرکت جهش ناگهانی در رسوب بستر[۲] ۲۷

شکل ۲-۱۲. نوسان توزیع تنش برشی مرزی τ_0 و تنش برشی بحرانی τ_c بیانگر مفهوم پوشش[۲] ۲۸

شکل ۲-۱۳. تأثیر شدت جریان بر عمق آبشستگی [۳۰] ۳۸

شکل ۲-۱۴. اندرکنش گرداب سطحی و غلتکی[۲۷] ۳۹

شکل ۲-۱۵. تأثیر کم عمقی جریان بر عمق آبشستگی[۲۷] ۳۹

شکل ۲-۱۶. تأثیر زبری رسوب بر عمق آبشستگی[۲۷] ۴۰

شکل ۲-۱۷. تأثیر زبری رسوب بر استهلاک انرژی[۲۷] ۴۰

شکل ۳-۱. عناصر اصلی سیستم هوش مصنوعی[۴۱] ۴۵

شکل ۳-۲. سیستم عصبی انسان[۴۱] ۴۶
شکل ۳-۳. عصب و سیناپس‌های آن [۴۷] ۴۷
شکل ۳-۴. مدل یک نورون با یک ورودی[۴۲] ۴۸
شکل ۳-۵. شبکه تک لایه [۵۰] ۵۰
شکل ۳-۶. شبکه سه لایه [۵۰] ۵۱
شکل ۳-۷. شبکه بازگشتی [۴۲] ۵۱
شکل ۳-۸. یادگیری با ناظر[۴۲] ۵۳
شکل ۳-۹. یادگیری بدون ناظر[۴۲] ۵۴
شکل ۴-۱. رابطه‌ی دقت در منطق فازی [۵۰] ۶۶
شکل ۴-۲. مقایسه مجموعه‌های کلاسیک و فازی [۵۶] ۶۷
شکل ۴-۳. انواع تابع عضویت[۵۹] ۶۸
شکل ۴-۴. تابع عضویت گوسین [۶۱] ۶۹
شکل ۴-۵. روش مرکز سطح برای تعیین z^* [۵۶] ۷۰
شکل ۴-۶. سیستم استنتاج فازی [۶۴] ۷۴
شکل ۴-۷. رایج‌ترین مکانیزم‌های استدلال و قوانین "اگر- آن‌گاه" فازی [۶۴] ۷۵
شکل ۴-۸. نحوه عملکرد قانون در مدل استنتاجی سوگنو[۵۰] ۷۷
شکل ۴-۹. سیستم استنتاج فازی سوگنو با دو ورودی، دو قانون و یک خروجی[۶۴] ۷۹
شکل ۴-۱۰. معماری مدل ANFIS معادل سیستم استنتاجی سوگنو[۶۴] ۷۹
شکل ۵-۱. طرح کلی از آبشستگی پایه پل ۸۹
شکل ۵-۲. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آموزش ۱۰۷
شکل ۵-۳. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آزمون ۱۰۷

شکل۵-۴. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های خام آزمایشگاهی ۱۰۷

شکل ۵-۵. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آموزش..... ۱۰۹

شکل ۵-۶. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آزمون..... ۱۰۹

شکل۵-۷. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های نرمال شده آزمایشگاهی ۱۱۰

شکل ۵-۸. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANN با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آموزش..... ۱۱۲

شکل ۵-۹. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANN با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آزمون..... ۱۱۲

شکل۵-۱۰. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های بی‌بعد شده آزمایشگاهی ۱۱۲

شکل ۵-۱۱. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آموزش..... ۱۱۴

شکل ۵-۱۲. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آزمون..... ۱۱۴

شکل ۵-۱۳. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های بی‌بعد نرمال شده آزمایشگاهی..... ۱۱۵

شکل ۵-۱۵. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS به ازای مقدار بهینه شعاع با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آموزش ۱۲۰

شکل ۵-۱۴. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS به ازای مقدار اولیه شعاع با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آموزش ۱۲۰

شکل ۵-۱۷. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS به ازای مقدار بهینه شعاع با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آزمون ۱۲۰

شکل ۵-۱۶. مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS به ازای مقدار اولیه شعاع با مقادیر آزمایشگاهی برای مرحله آزمون ۱۲۰

شکل ۵-۱۸. مقایسه میزان خطای متوسط شبکه برای مقادیر مختلف شعاع ۱۲۱

شکل ۵-۱۹. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های خام صحرایی ۱۲۵

شکل ۵-۲۰. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های نرمال شده صحرایی ۱۲۶

شکل ۵-۲۱. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های بی‌بعد صحرایی ۱۲۷

شکل ۵-۲۲. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط ANN و ANFIS برای داده‌های بی‌بعد نرمال شده صحرایی..... ۱۲۹