دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی عمران

مدل‌سازی فرسایش رسوبات چسبنده

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی

نام دانشجو

مهران خیرخواهان

استاد راهنما

دکتر خسرو حسینی

اسفند ماه ۱۳۹۱

دانشکده مهندسی عمران

مدل‌سازی فرسایش رسوبات چسبنده

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی

نام دانشجو

مهران خیرخواهان

استاد راهنما

دکتر خسرو حسینی

استاد مشاور

مهندس احسان جعفری

اسفند ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی عمران

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان‌نامه آقای مهران خیرخواهان برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران – گرایش سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان "مدل‌سازی فرسایش رسوبات چسبنده" در جلسه مورخ / / بررسی و با نمره

عدد	
حروف	

مورد تأیید قرار گرفت.

اعضای هیئت داوران:

استاد راهنمای اول: **دکتر خسرو حسینی** امضا:

استاد راهنمای دوم: امضا:

استاد مشاور اول: **مهندس احسان جعفری** امضا:

استاد مشاور دوم: امضا:

استاد داور: **دکتر سید فرهاد موسوی** امضا:

استاد داور: **دکتر حجت کرمی** امضا:

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده: ..... امضا.....

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی عمران

اینجانب مهران خیرخواهان متعهد می‌شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان **"مدل‌سازی فرسایش رسوبات چسبنده"** که به عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی به دانشگاه ارائه شده است، دارای اصالت پژوهشی بوده و حاصل فعالیت‌های علمی اینجانب می‌باشد.

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود، کلیه حقوق معنوی متعلق به این پایان‌نامه از اینجانب سلب شده و موارد قانونی مترتب به آن نیز از طرف مراجع قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی:

شماره دانشجویی:

امضا

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان با ذکر مرجع بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما با ذکر مرجع بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تقدیم به:

پدرم و مادرم

با تشکر از استاد ارجمند جناب آقای دکتر خسرو حسینی که در تمامی مراحل انجام این پایان نامه،

صبورانه ایجانب را راهنمایی فرمودند.

چکیده

رفتار رسوبات چسبنده به علت ماهیت الکتروشیمیایی آن‌ها کاملاً متفاوت از رسوبات غیرچسبنده است. این نوع از رسوبات شامل کانی‌های رسی می‌باشند. این کانی‌ها دارای سطح مخصوص بزرگی با بار منفی می‌باشند. این ویژگی رسوبات باعث ایجاد پیوند هیدروژنی میان آن‌ها با آب خواهد شد که پس از برقرار شدن این پیوند، رسوبات چسبنده مستعد ترکیب با موادی دیگر از جمله سیلت، سدیم و ... خواهند بود.
به علت ماهیت رفتاری متفاوت رسوبات چسبنده با رسوبات دانه درشت، فرسایش آن‌ها نیز با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در تعیین نرخ فرسایش رسوبات غیرچسبنده از پارامترهای فیزیکی آن‌ها از جمله قطر متوسط و چگالی به همراه تنش برشی جریان روی بستر استفاده می‌گردد، در حالی که به علت پیچیدگی رفتار رسوبات چسبنده نرخ فرسایش این گروه از رسوبات به صورت رابطه‌ای میان نرخ فرسایش و تنش برشی بستر به همراه ضرایب ثابت مربوط به هر نوع رسوب تعریف می‌گردد.
در این تحقیق از اطلاعات آزمایشگاهی رسوبات چسبنده مصب رودخانه لویر به دریای آتلانتیک در کشور فرانسه استفاده شده است و پس از تعیین رابطه مناسب میان نرخ فرسایش و تنش برشی بستر برای این رسوبات با استفاده از مدل عددی، بسط داده‌ها صورت گرفته است. در ادامه با تعیین مناسب‌ترین معماری شبکه عصبی، مدلی جامع برای تعیین میزان فرسایش این رسوبات با در نظر گرفتن مشخصه‌های جریان و رسوب ارائه گردید. پارامترهای استفاده شده در مدل شامل مؤلفه‌های جریان از جمله سرعت، شیب بستر، چگالی، لزجت، عمق و مشخصه‌های رسوبات از جمله تنش برشی تسلیم، چسبندگی و چگالی خشک ذرات می‌باشند. به علت عملکرد بهتر شبکه عصبی این داده‌ها پس از بی‌بعدسازی به روش باکینگهام در شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت پس از انجام تحلیل حساسیت میان پارامترهای بی بعد مورد استفاده، پارامتر بدون بعد $\frac{V}{\sqrt{\tau_y/\rho_w}}$ به عنوان مؤثرترین پارامتر در افزایش نرخ فرسایش و پارامتر بدون بعد $\frac{\rho_s}{\rho_w}$ به عنوان مؤثرترین پارامتر در کاهش فرسایش معرفی گردیدند. در گام آخر، برای استفاده جامع‌تر از نمودار نرخ فرسایش در مقابل تنش برشی بستر، با کمک شبکه عصبی به بسط داده‌ها برای انواع رسوبات با ویژگی‌های مختلف دیگر پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: رسوبات چسبنده، نرخ فرسایش، مصب رودخانه لویر، ویژگی‌های سیال و رسوب، مدل عددی، شبکه عصبی مصنوعی

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسئله تحقیق ۲

۱-۳- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۴- نوآوری تحقیق ۳

۱-۵- اهداف تحقیق ۴

۱-۶- روش انجام تحقیق ۴

۱-۷- فرضیات و محدودیت‌های تحقیق ۵

۱-۸- ساختار فصول پایان‌نامه ۵

فصل ۲: فرسایش رسوبات ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- رسوبات غیرچسبنده ۱۱

۲-۲-۱- معیارهای آستانه حرکت و کاربردهای آن ۱۱

۲-۲-۲- ملاحظات کلی ۱۱

۲-۲-۳- روش تنش برشی ۱۲

۲-۲-۴- روش سرعت ۱۸

۲-۲-۵- انتقال بار بستر ۲۱

۲-۲-۶- روش تنش برشی ۲۱

۲-۲-۷- روش شیب انرژی ۲۵

۲-۲-۸- روش بده ۲۶

۲-۳- رسوبات چسبنده ۲۷

۲-۳-۱- کلیات ۲۷

۲-۳-۲- رئولوژی ۲۸

۲-۳-۳- انواع ترکیبات در رسوبات چسبنده ۲۹

۲-۳-۴- اثر فاکتورهای الکتروشیمیایی در فرسایش ۳۰

۲-۳-۵- تأثیر نمک و مقدار اسید بر چسبندگی ۳۲

۲-۳-۶- اثر تنش برشی و غلظت در تشکیل ذرات ۳۵

۲-۳-۷- اندازه ذرات ۳۷

۲-۳-۸- مراحل تشکیل رسوبات چسبنده ۳۸

۲-۳-۹- توصیف فرکتال ۳۹
۲-۳-۱۰- مقاومت توده‌های فولوکوله ۴۰
۲-۳-۱۱- انتقال ذره فولوکوله ۴۱
۲-۳-۱۲- اندازه‌گیری پارامترهای فرسایش خاک‌های چسبنده توسط آزمایش‌ها ۴۲
۲-۳-۱۳- تحکیم ۴۴
۲-۳-۱۴- فرسایش ۴۶
۲-۳-۱۵- مقاومت برشی ۵۰
۲-۳-۱۶- برخی از روابط تعیین تنش برشی بحرانی فرسایش ۶۰
۲-۳-۱۷- برخی از روابط تعیین نرخ فرسایش ۶۱
۲-۴- نتیجه‌گیری ۶۳

فصل ۳: معرفی نرم افزار Mike **۶۴**
۳-۱- مقدمه ۶۵
۳-۲- دینامیک سیالات محاسباتی ۶۵
۳-۲-۱- روش حل معادلات حاکم ۶۶
۳-۲-۲- انواع مدل‌های ریاضی موجود ۶۶
۳-۳- معرفی نرم افزار Mike21 ..... ۷۰
۳-۳-۱- زمینه‌های مورد استفاده از نرم افزار Mike 21 ..... ۷۰
۳-۳-۲- دلایل انتخاب مدل عددی Mike ۷۲
۳-۳-۳- عملکرد مدل عددی ۷۲
۳-۴- معادلات حاکم در نرم افزار Mike ۷۳
۳-۴-۱- معادلات جریان ۷۳
۳-۴-۲- معادلات انتقال - انتشار ۷۴
۳-۴-۳- روابط موجود تعیین نرخ فرسایش رسوبات در مدل عددی Mike ۷۵
۳-۵- نحوه مدل‌سازی در نرم افزار ۷۹
۳-۵-۱- ایجاد هندسه مدل ۷۹
۳-۵-۲- تعیین شرایط مرزی و دیواره‌های مدل ۸۰
۳-۵-۳- نحوه اعمال شرایط اولیه ۸۰
۳-۵-۴- نحوه اعمال ویژگی‌های رسوب در مدل ۸۱
۳-۶- کاربردهای مدل‌های عددی در علوم آب ۸۱

فصل ۴: **۸۲**

شبکه مصنوعی ۸۲
۴-۱- مقدمه ۸۳
۴-۲- تاریخچه‌ای از شبکه‌های عصبی ۸۳
۴-۳- شبکه عصبی چیست؟ ۸۵
۴-۴- هوش مصنوعی و شبکه عصبی ۸۶
۴-۵- مزایای شبکه‌های عصبی مصنوعی ۸۷
۴-۶- مغز انسان ۸۸
۴-۷- ساختمان یک نورون عصبی ۸۹
۴-۸- تابع محرک ۹۰
۴-۹- معماری شبکه‌های عصبی ۹۱
۴-۹-۲- شبکه‌های چند لایه ۹۲
۴-۹-۳- شبکه عصبی پسخور یا بازگشتی ۹۳
۴-۱۰- آموزش شبکه عصبی ۹۴
۴-۱۰-۱- آموزش با نظارت ۹۵
۴-۱۰-۲- آموزش بدون نظارت ۹۶
۴-۱۰-۳- یادگیری تشدیدی (تقویتی) ۹۶
۴-۱۱- پرسپترون چند لایه ۹۷
۴-۱۲- تعمیم پذیری ۹۸
۴-۱۳- توقف زود هنگام ۹۹
۴-۱۴- نحوه تقسیم بندی داده‌ها در روش Cross Validation ۹۹
۴-۱۵- الگوریتم‌های مختلف یادگیری در پرسپترون‌های چند لایه ۹۹
۴-۱۶- کاربردهای مدل‌های هوش مصنوعی در علوم آب ۱۰۰

فصل ۵: مدل‌سازی فرسایش و تعمیم نتایج ۱۰۲
۵-۱- مقدمه ۱۰۳
۵-۲- مجموعه داده‌های مورد استفاده برای تحلیل ۱۰۴
۵-۳- تعیین مناسب‌ترین رابطه حمل رسوب ۱۰۷
۵-۴- تعیین ضرایب رابطه حمل رسوب در نرم افزار ۱۰۸
۵-۵- صحت سنجی مدل عددی ۱۱۳
۵-۶- توسعه نتایج آزمایشگاهی با استفاده از مدل عددی ۱۱۵
۵-۷- کاربرد شبکه عصبی در تخمین نرخ فرسایش رسوبات چسبنده ۱۱۹
۵-۸- کنترل داده‌ها در شبکه عصبی ۱۲۰

۵-۹- تأثیر نرمال سازی داده‌ها بر عملکرد شبکه ۱۲۰
۵-۱۰- تقسیم بندی داده‌ها ۱۲۱
۵-۱۱- بی‌بعد سازی ۱۲۱
۵-۱۲- شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها ۱۲۳
۵-۱۳- تحلیل روش شبکه عصبی ۱۲۴
۵-۱۴- طراحی معماری شبکه عصبی مصنوعی ۱۲۴
۵-۱۵- بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر شبکه‌های عصبی ۱۲۵
۵-۱۵-۱- تأثیر تعداد نورون‌های لایه میانی و نوع توابع محرک بر عملکرد شبکه MLP. ۱۲۵
۵-۱۵-۲- تأثیر نوع تابع آموزشی بر عملکرد شبکه عصبی MLP ۱۲۷
۵-۱۵-۳- بررسی عملکرد مدل MLP در تعیین نرخ فرسایش رسوبات چسبنده ۱۲۹
۵-۱۶- تحلیل حساسیت ۱۳۰
۵-۱۶-۱- انواع روش‌های تفسیر عملکرد شبکه عصبی ۱۳۰
۵-۱۶-۲- تحلیل بر اساس بزرگای وزن‌های شبکه ۱۳۱
۵-۱۷- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت ۱۳۳
۵-۱۸- گسترش نمودار فرسایش در مقابل تنش برشی بستر آزمایشگاهی توسط شبکه ۱۳۵
۵-۱۸-۲- تأثیر تعداد نورون‌های لایه میانی و نوع توابع محرک بر عملکرد شبکه MLP. ۱۳۵
۵-۱۸-۳- تأثیر نوع تابع آموزشی بر عملکرد شبکه عصبی MLP ۱۳۷
۵-۱۸-۴- بررسی عملکرد مدل MLP در تعیین نرخ فرسایش رسوبات چسبنده ۱۳۸

فصل ۶: جمع‌بندی و پیشنهادها **۱۴۳**

۶-۱- مقدمه ۱۴۴
۶-۲- جمع‌بندی ۱۴۴
۶-۳- نوآوری ۱۴۵
۶-۴- پیشنهادها ۱۴۶

فصل ۷: مراجع **۱۴۷**

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱) نیروهای مؤثر بر یک ذره رسوب در جریان آبراهه روباز ۱۲
شکل (۲-۲) نمودار شیلدز برای آستانه حرکت ۱۴
شکل (۲-۳) نمودار اصلاح شده شیلدز توسط گاورز ۱۵
شکل (۲-۴) تنش برشی بحرانی به عنوان تابعی از قطر ذره ۱۸
شکل (۲-۵) معیارهای فرسایش و ته‌نشینی برای ذرات یکنواخت ۱۹
شکل (۲-۶) سرعت‌ها ی بحرانی آب برای رسوب کوارتز به صورت تابعی ازاندازه متوسط ذره ۱۹
شکل (۲-۷) شمای مدل بار بستر دوبوی ۲۲
شکل (۲-۸) پارامترهای رسوب و نیروی برشی بحرانی در معادله بار بستر دوبوی ۲۴
شکل (۲-۹) ضریب بده کل مواد بستر $\boldsymbol{Kt}$ برای ماسه‌های مختلف، با توجه به داده‌های فلوم آزمایشگاه. ... ۲۵
شکل (۲-۱۰) رسوب ریزدانه (گِل) ۲۷
شکل (۲-۱۱) رسوب درشت‌دانه (ماسه‌ای) ۲۸
شکل (۲-۱۲) تصویر شماتیکی از انواع مختلف سیال با توجه به رئولوژی سیال ۲۸
شکل (۲-۱۳)a: شکل شماتیکی از لایه مضاعف الکتریکی در کناره کانی رس که در برگیرنده ذرات است. b: پتانسیل $\boldsymbol{\xi}$ را به صورت تابعی از فاصله نشان می‌دهد. c: انرژی پتانسیل متناسب با عملکرد لایه مضاعف برای دو ذره نزدیک که $\mathbf{V_R}$ و $\mathbf{V_A}$ به ترتیب انرژی‌های پتانسیل دفع و جذب می‌باشند و ΔV اختلاف انرژی الکتریکی است. ۳۲
شکل (۲-۱۴) شکل ذرات فولوکوله در شرایط مختلف ۳۳
شکل (۲-۱۵) قطر متوسط فولوکوله‌های رسوبات رودخانه دیترویت که به صورت تابعی از زمان برای آب شور، آب شیرین و آب یونیزه نشان داده شده است. ذرات در نرخ کرنش $\mathbf{100\ s^{-1}}$ و غلظت 100 mg/l می باشند ۳۴
شکل (۲-۱۶) قطر متوسط فولوکوله‌های لای حفاری شده که به صورت تابعی از زمان برای آب شور، آب شیرین و آب یونیزه نشان داده شده است. ذرات در نرخ کرنش $\mathbf{50\ s^{-1}}$ و غلظت 400 mg/l می‌باشند. ۳۶
شکل (۲-۱۷) ساختار ذرات فولوکوله و چگونگی پیوستگی ذرات ۳۹
شکل (۲-۱۸) تصاویری از برخی فرکتال‌های موجود در طبیعت ۴۰
شکل (۲-۱۹) تصویر شماتیکی از انتقال و بهم پیوستن ذرات رسوب یا فولوکوله‌ها ۴۱

شکل (۲-۲۰) نرخ فرسایش در مقابل تنش برشی برای خاک یولو و مونتموریلونیت..... ۵۰
شکل (۲-۲۱) (الف)تنش برشی بحرانی برای چندین خاک مزرعه‌ای تابعی از مقدار درصد رس . (ب) تنش برشی بحرانی برای چندین خاک مزرعه‌ای تابعی از شاخص خمیری اسمردون و بیاسلِی (۱۹۶۱)..... ۵۳
شکل (۲-۲۲) منحنی‌های مرزی فولوکوله شدن و جدایش ذرات برای مونتمورلینیت برای سه محدوده pH ۵۶
شکل (۲-۲۳) پروفیل مقاومت برشی بستر برای بستر کائولینیتی در آب شور..... ۵۷
شکل (۲-۲۴) انواع فرسایش در مقابل تنش برشی..... ۵۹
شکل (۳-۱) حل معادلات در مدل عددی Mike..... ۷۳
شکل (۳-۲) فرایند انتقال اطلاعات جریان و مشخصات فیزیکی از مدل هیدرودینامیکی به مدل انتقال رسوب توسط AD..... ۷۵
شکل (۳-۳) فلوم ایجاد شده در مدل..... ۷۹
شکل (۳-۴) نحوه اعمال دبی و ارتفاع در مدل..... ۸۰
شکل (۳-۵) نحوه اعمال شرایط مرزی در مدل ۸۰
شکل (۴-۱) عناصر اصلی سیستم هوش مصنوعی..... ۸۷
شکل (۴-۲) سیستم عصبی انسان..... ۸۸
شکل (۴-۳) عصب و سیناپس‌های آن..... ۸۸
شکل (۴-۴) مدل یک نورون با یک ورودی..... ۸۹
شکل (۴-۵) شبکه تک لایه..... ۹۲
شکل (۴-۶) شبکه سه لایه ۹۳
شکل (۴-۷) شبکه بازگشتی..... ۹۳
شکل (۴-۸) یادگیری با ناظر..... ۹۵
شکل (۴-۹) یادگیری بدون ناظر..... ۹۶
شکل (۵-۱) مصب رودخانه لویر در شهر نانت فرانسه ۱۰۵
شکل (۵-۲) داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در تحقیق..... ۱۰۷
شکل (۵-۳) نرخ فرسایش آزمایشگاهی در مقابل نرخ فرسایش حاصل از رابطه مهتا برای غلظت ۱۰۰کیلوگرم بر مترمکعب..... ۱۱۰
شکل (۵-۴) نرخ فرسایش آزمایشگاهی در مقابل نرخ فرسایش حاصل از رابطه مهتا برای غلظت ۱۵۰کیلوگرم بر مترمکعب..... ۱۱۱

شکل (۵-۵) نرخ فرسایش آزمایشگاهی در مقابل نرخ فرسایش حاصل از رابطه مهتا برای غلظت ۲۱۰کیلوگرم بر مترمکعب ۱۱۱
شکل (۵-۶) نرخ فرسایش آزمایشگاهی در مقابل نرخ فرسایش حاصل از رابطه مهتا برای غلظت ۲۶۰کیلوگرم بر مترمکعب ۱۱۲
شکل (۵-۷) نرخ فرسایش آزمایشگاهی در مقابل نرخ فرسایش حاصل از رابطه مهتا برای غلظت ۳۱۰کیلوگرم بر مترمکعب ۱۱۲
شکل (۵-۸) نرخ فرسایش آزمایشگاهی در مقابل نرخ فرسایش حاصل از رابطه مهتا برای غلظت ۴۲۰کیلوگرم بر مترمکعب ۱۱۳
شکل (۵-۹) تغییرات فرسایش در مقابل عدد فرود ۱۱۹
شکل (۵-۱۰) تغییرات فرسایش در مقابل عدد رینولدز ۱۱۹
شکل (۵-۱۱) تعیین ضریب CORR برای توابع آموزشی مختلف با تابع محرک logsig ۱۲۷
شکل (۵-۱۲) تعیین بهترین تابع آموزشی با کمترین خطای MAE و با تابع محرک logsig ۱۲۸
شکل (۵-۱۳) معماری شبکه مورد استفاده در تحقیق ۱۲۹
شکل (۵-۱۴) نمودار پراکندگی میان مقادیر پیش بینی شده و مشاهداتی عددی نرخ فرسایش برای بهترین شبکه ۱۲۹
شکل (۵-۱۵) مقادیر فرسایش به دست آمده از مدل در مقابل مقادیر مشاهداتی برای دادهای ارزیابی ۱۳۰
شکل (۵-۱۶) روش‌های موجود برای تفسیر عملکرد شبکه‌های عصبی ۱۳۱
شکل (۵-۱۷) میزان تأثیر پارامترهای بی بعد بر نرخ فرسایش ۱۳۴
شکل (۵-۱۸) تغییرات فرسایش در مقابل عدد بدون بعد $V/\sqrt{\frac{\tau y}{\rho w}}$ ۱۳۴
شکل (۵-۱۹) تغییرات فرسایش در مقابل عدد فرود ۱۳۵
شکل (۵-۲۰) تعیین ضریب CORR برای توابع آموزشی مختلف با تابع محرک logsig ۱۳۷
شکل (۵-۲۱) تعیین ضریب CORR برای توابع آموزشی مختلف با تابع محرک tansig ۱۳۸
شکل (۵-۲۲) نمودار پراکندگی میان مقادیر پیش بینی شده و مشاهداتی نرخ فرسایش برای بهترین شبکه ۱۳۹
شکل (۵-۲۳) مقادیر فرسایش به دست آمده از مدل در مقابل مقادیر مشاهداتی برای داده‌های ارزیابی ۱۳۹
شکل (۵-۲۴) تغییرات چگالی ذرات در مقابل غلظت ۱۴۰
شکل (۵-۲۵) تغییرات تنش برشی تسلیم در مقابل غلظت ۱۴۱
شکل (۵-۲۶) نرخ فرسایش در مقابل تنش برشی بستر با توجه به غلظت‌های مختلف رسوب ۱۴۲

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱) کانی‌های رسی، CEC و میزان نمک بحرانی برای فولوکوله شدن..... ۳۰
جدول (۲-۲) پارامترهای تحکیم او-کانر و نیکلسون..... ۴۵
جدول (۲-۳) پارامترهای فرسایش رابطه اوکانر و نیکلسون..... ۴۸
جدول (۲-۴) اطلاعات تنش برشی بحرانی کانال رسوب به دست آمده توسط دیون ۵۲
جدول (۲-۵) بیان وابستگی میان مقاومت برشی و شکست حجم جامد..... ۵۴
جدول (۲-۶) طبقه بندی استحکام خاک بر اساس مقاومت برشی پره ۵۵
جدول (۲-۷) پارامترهای مقاومت برشی برای رسوبات آلی غنی. ۵۸
جدول (۳-۱) سرعت‌های بحرانی با توجه به اندازه ذرات مدل ایواگاکی ۷۷
جدول (۴-۱) توابع محرک متداول ۹۱
جدول (۵-۱) چگالی‌ها و غلظت‌های رسوبات آزمایشگاهی..... ۱۰۵
جدول (۵-۲) مقادیر تنش برشی تسلیم (N/m^2) به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی ۱۰۶
جدول (۵-۳) مقادیر چسبندگی (N/m^2) به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی..... ۱۰۶
جدول (۵-۴) مقادیر ضریب تبیین خطی و نمایی برای داده‌های آزمایشگاهی ۱۰۸
جدول (۵-۵) تعیین ضرایب رابطه مهتا برای ۷ رسوب مورد مطالعه..... ۱۱۰
جدول (۵-۶) درصد خطای مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی..... ۱۱۴
جدول (۵-۷) تغییرات عمق در نرم افزار ۱۱۶
جدول (۵-۸) تغییرات سرعت در نرم افزار ۱۱۷
جدول (۵-۹) تغییرات شیب در نرم افزار ۱۱۸
جدول (۵-۱۰) اثر تعداد نورون با تابع محرک logsig بر عملکرد شبکه مصنوعی ۱۲۶
جدول (۵-۱۱) اثر تعداد نورون با تابع محرک tansig بر عملکرد شبکه مصنوعی ۱۲۶
جدول (۵-۱۲) تعیین بهترین تابع آموزشی..... ۱۲۷
جدول (۵-۱۳) اثر تعداد نورون با تابع محرک logsig بر عملکرد شبکه مصنوعی ۱۳۶
جدول (۵-۱۴) اثر تعداد نورون با تابع محرک tansig بر عملکرد شبکه مصنوعی ۱۳۶
جدول (۵-۱۵) تعیین بهترین تابع آموزشی..... ۱۳۷

فهرست علائم اختصاری

شتاب گرانش زمین ..... g (m/s^2)

نیروی کششی ..... F_D (N)

نیروی بالابرنده ..... F_L (N)

نیروی مستغرق ..... W_s (N)

نیروی مقاوم ..... F_R (N)

گشاور واژگونی ..... M_O $(N.m)$

گشتاور مقاوم ..... M_R $(N.m)$

تنش برشی ..... τ (N/m^2)

قطر ذره ..... d (m)

چگالی ذره ..... γ_s (N/m^3)

چگالی آب ..... γ_w (N/m^3)

تنش برشی بحرانی ..... τ_c (N/m^2)

جرم مخصوص ذره ..... ρ_s (kg/m^3)

جرم مخصوص آب ..... ρ_w (kg/m^3)

لزجت دینامیکی ..... μ (kg/ms)

لزجت سینماتیکی ..... ν (m^2/s)

سرعت برشی ..... u_* (m/s)

عدد بی بعد شیلدز (فرود) ..... θ

عدد بی بعد شیلدز (رینولدز) ..... Re_*

سرعت ذره ..... v_b (m/s)

سرعت متوسط جریان ..... V (m/s)

اندازه‌ای از رسوب که Z درصد مصالح از آن کوچکترند ..... d_z (m)

شعاع هیدرولیکی ..... R (m)

شیب انرژی ..... S_f

سرعت بحرانی آستانه حرکت ..... V_c (m/s)

عمق آب ..... D (m)

ضخامت لایه رسوب ..... ε (m)

ضریب اصطکاک ..... C_f

تنش برشی بستر ..... $(N/m^2)\tau_b$

دبی واحد عرض..... $(m^2/s)q$

بده بحرانی..... $(m^2/s)q_c$

نرخ کرنش..... $(1/s)\dot{\gamma}$

تنش برشی تسلیم..... $(N/m^2)\tau_y$

چسبندگی زهکشی نشده..... $(N/m^2)C_u$

قطر فولوکوله..... $(m)d_f$

چگالی فولوکوله ..... $(N/m^3)\gamma_f$

مقاومت فولوکوله..... $(N/m^2)\tau_f$

بار بستر ..... $(m^2/s)q_b$

شاخص خمیری ..... PI

حد روانی LL

حد پلاستیسیته..... PL

زمان..... $(s)t$

نرخ فرسایش سطحی..... $(kg/m^2s)Q_{se}$

تنش برشی بحرانی فرسایش سطحی..... $(N/m^2)\tau_{se}$

ثابت نرخ فرسایش سطحی..... $(kg/m^2s)M_{se}$

نرخ فرسایش جرمی..... $(kg/m^2s)Q_{me}$

تنش برشی بحرانی فرسایش جرمی..... $(N/m^2)\tau_{me}$

ثابت نرخ فرسایش جرمی..... $(kg/m^2s)M_{me}$

نرخ فرسایش کل..... $(kg/m^2s)E$

ثابت نرخ فرسایش کل(فرسایش پذیری) ..... $(kg/m^2s)E_0$

مقاومت برش پره..... $(N/m^2)S_v$

ضریب شزی ..... $(m^{1/2}/s)C$

فشار اتمسفر ..... $(N/m^2)p_a$

میزان غلظت در عمق ..... $(kg/m^3)\bar{c}$

ضریب مانینگ..... $(m^{1/3}/s)n$

دبی واحد سطح افقی..... $(m^3/m^2s)Q_l$

میزان غلظت دبی..... $(kg/m^3)C_l$

ضریب فرسایش ..... $(kg/m^3s)S$

وزن داده‌های ورودی ..... w

تابع انتقال ..... f

ورودی به شبکه ..... P

خروجی از شبکه ..... a

خروجی مطلوب ..... t_i

پارامتر تعیین شده از طرف نورون ..... b

تعداد نورون‌ها ..... S

خطای یادگیری محاسبه شده ..... e^j

مجموع وزنی ورودی‌های نورون ..... V_j

تعداد نورون ..... j

خروجی نورون ..... y

خروجی نورون c

تعداد الگوها ..... N

مقدار انرژی خطای لحظه‌ای ..... $C(n)$

میانگین انرژی خطا ..... C_{ave}

تعداد ورودی به نورون ..... m

خطای تصحیح ..... Δw

گرادیان محلی ..... δ_{ij}

نرخ یادگیری ..... η

درصد خطای هدف ..... E

داده مورد بررسی x

مقدار کمینه مجموعه‌ی داده‌ها ..... min

مقدار بیشینه مجموعه‌ی داده‌ها ..... max

مقدار نرمال شده ..... x_n