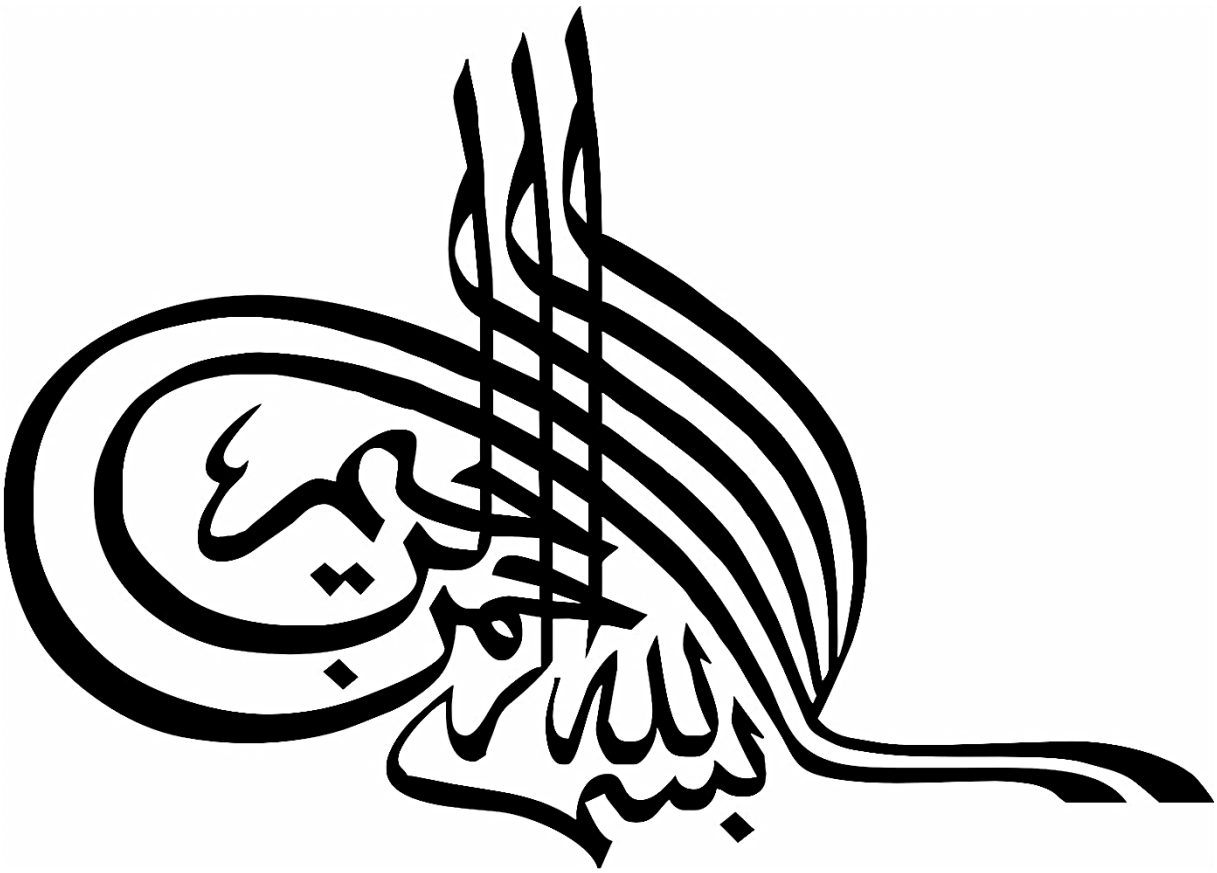
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی

عنوان:

مطالعه فرسایش‌پذیری پایین‌دست پرتاب‌کننده‌های جامی به روش CFD

اساتید راهنما:

دکتر مهدی اژدری‌مقدم

استاد مشاور:

دکتر محمدرضا کاویانپور اصفهانی

تحقیق و نگارش:

مجتبی گودرزی

بهمن ۱۳۹۰

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان " مطالعه فرسایش‌پذیری پایین‌دست پرتاب‌کننده‌های جامی به روش **CFD** " قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی توسط مجتبی گودرزی تحت راهنمایی آقای دکتر مهدی اژدری مقدم 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.

مجتبی گودرزی

این پایان نامه ۶.. واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ ..... توسط هیئت داوران بررسی و درجه ..... به آن تعلق گرفت.

	نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**
استاد راهنما:	مهدی اژدری‌مقدم		
استاد راهنما:			
استاد مشاور:	محمدرضا کاویانپور اصفهانی		
داور ۱:	غلام‌رضا عزیزیان		
داور ۲:	حمیدرضا سلوکی		
نماینده تحصیلات تکمیلی:	محمدرضا شهرکی		

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب مجتبی گودرزی تأیید 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: مجتبی گودرزی

امضاء

تقدیم به

بهترین‌ها و زیباترین‌های زندگی‌ام

پدر و مادر مهربان و فداکارم

برادران دلسوز

و

خواهر عزیزتر از جانم

و کسی که تحصیلاتم را مدیون ایشانم

جناب آقای محمد حسن راستگو

"من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق"

راز و رمز پویای علم و کشف معانی بدیع و تجلی جلوه های شهودی معرفت کیمیایی است که آسمان علم به برکت سیما و سیره ی نورانی نبی مکرم صلی الله علیه و آله و سلم، انسان در بند خاک را به معراج حضور می خواند.

سپاسگزار کسانی هستم که سرآغاز تولد من هستند. از یکی زاده می شوم و از دیگری جاودانه؛ پدری که سپیدی را بر تخته سیاه زندگیم نگاشت و مادری که تار مویی از او به پای من سیاه نماند. به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش برادران عزیز و خواهر مهربانم که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبانم هستند، به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند. سپاسی فراوان و ارادتی خاضعانه محضر آقای محمد حسن راسکو که مظهر مهر هستند و از تبار باران، فروغ مهرشان روشنی بخش حریم مهرورزی و ریزش ابر کرامتشان رویش زندگی است و یار دیار امروز و یادگار ماندگار فردا.

بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر مهدی اژدری مقدم که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم. بر خود لازم می دانم از راهنمایی های گرانسنگ جناب آقای دکتر محمدرضا کاویانپور اصفهانی به جهت قرار دادن اطلاعات و دانسته های ارزشمند خویش قدردانی نمایم.

از جناب آقای محمد عظمت اله استاد دانشگاه *Sains* مالزی بخاطر در اختیار گذاشتن داده های آزمایشگاهی کمال تشکر و قدردانی را دارم. از راهنمایی های آقای محمدرضا نجف زاده دانشجوی دکتری سازه های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان سپاسگزارم. قدردان دوستان عزیزم: مسعود آرامی، احمد فرخی، محمد مهدی هوشمند، نوید علیزاده، سالار خانی، مصطفی رستمی، مراد کاکی، رضا رومیانی، حمید رضایی، احمد اندام، محمد علی ریگی، احسان سلطانی، پیام خدادادی و ابراهیم جعفری که به هر نحوی یار و یاور من بودند، هستم. از زحمات بی شائبه سرکار خانم مرضیه سهرابی زاده کمال تشکر و قدردانی فراوان را دارم.

در پایان امیدوارم بتوانم با تکیه بر معلومات و دانش اندوخته، برای آبادانی و پیشرفت ایران عزیزم گامی ارزنده بردارم.

چکیده:

پرتاب‌کننده‌های جامی از جمله مستهلک کننده‌های انرژی می‌باشد که سیلاب مازاد را از سدها عبور می‌دهند. بر اثر برخورد جت ریزشی عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز تشکیل می‌شود. در این تحقیق آبشستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده‌های جامی با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیلات محاسباتی FLOW-3D.V.9.3 شبیه‌سازی شده است. از قابلیت‌های این نرم‌افزار پیش‌بینی فرسایش‌پذیری اطراف پایه پل وسرریزها است. مدل آبشستگی شامل دو مؤلفه نیروی رانش و نیروی بالابرنده است. مؤلفه دراگ (کشش) از ترکیب این دو مؤلفه، حاصل می‌شود. زمانی که غلظت رسوب برابر کسر حجمی چسبندگی می‌شود، نیروی دراگ که مشخص کننده رفتار جامد گونه مدل رسوب است، فعال می‌شود. با تغییر غلظت رسوب، گرانروی و چگالی سیال نیز تغییر می‌کنند.

برای مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی سرریز پرتابی Parbati استفاده شده است. این سد بر روی رودخانه Parbati واقع در منطقه Kulla در ایالت Himachal Pardesh کشور هندوستان قرار دارد. از دو مدل آشفتگی (مدل انتقال دو معادله‌ای) $k-\varepsilon$ استاندارد و مدل RNG به منظور شبیه‌سازی، استفاده شده است. پس از بررسی‌های انجام شده، زمان رسیدن به تعادل در مدل شبیه‌سازی ۴۰۰ ثانیه حاصل شد. خطای نسبی به دست آمده بین نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که عمق، طول و عرض آبشستگی در مدل $k-\varepsilon$ استاندارد به ترتیب ۷/۴۰، ۴/۲۴ و ۳/۳۳ درصد می‌باشد؛ در حالی‌که این میزان خطا برای مدل RNG به ترتیب ۴/۳۲، ۲/۲ و ۳/۵۵ درصد حاصل شده است. ابعاد آبشستگی در حالتی‌که عمق پایاب اولیه وجود ندارد، برای طول، عرض و عمق آبشستگی نسبت به زمانی‌که عمق پایاب اولیه وجود دارد ۲/۸، ۳۴ و ۲۲/۳ درصد افزایش یافته و حجم آن حدود ۲/۴ برابر بیشتر می‌گردد. در صورت وجود عمق پایاب اولیه سرعت برخورد جت به بستر حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده از مدل RNG به منظور شبیه سازی رسوب و آبشستگی پیشنهاد می‌گردد. نتایج آبشستگی حاکی از وابستگی مستقیم این پدیده با عمق پایاب می‌باشد که در این مطالعه ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: پرتاب‌کننده جامی، حفره آبکند، استهلاک کننده انرژی، فرسایش، آبشستگی، روش CFD

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- آبشستگی، تعریف، مراحل و انواع آن ۲

۱-۳- سرریزهای جامی شکل ۳

۱-۴- فرسایش پایین‌دست سرریزهای جامی شکل ۴

۱-۵- ضرورت و اهداف تحقیق: ۵

۱-۷- ساختار پایان‌نامه ۶

فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- انتخاب نوع مستهلک کننده انرژی ۸

۲-۳- پرتاب کننده جامی ۹

۲-۴- هیدرولیک جریان ۱۰

۲-۵- جام پرتابی ۱۱

۲-۶- آبشستگی ۱۳

۲-۷- روابط مختلف برآورد حداکثر عمق آبشستگی ۱۹

۲-۸- آبشستگی ناشی از جت‌های مایل: ۲۷

۲-۹- پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی ۲۸

۲-۹-۱- اثر اختلاف چگالی $(\Delta\rho)$: ۲۹

۲-۹-۲- اثر عمق پایاب (d_w): ۳۰
۲-۹-۳- اثر ابعاد رسوب و دانه بندی مصالح بستر ۳۲
۲-۹-۴- اثر ابعاد و شکل جت ۳۴
۲-۹-۵- اثر دبی یا سرعت جت خروجی ۳۵
۲-۹-۶- اثر ارتفاع ریزش ۳۶
۲-۹-۷- اثر زاویه جت ۳۷
۲-۹-۸- اثر هوای ورودی به جت ۳۹
۲-۹-۹- اثر زمان ۴۰

فصل سوم: مبانی نظری تحقیق ۴۲

۳-۱- مقدمه ۴۳
۳-۲- دینامیک سیالات محاسباتی..... ۴۳
۳-۳- معرفی نرم‌افزارهای محاسبات عددی..... ۴۴
۳-۴- معادلات جریان ۴۸
۳-۵- مدل‌های آشفتگی..... ۴۹
۳-۶- مدل تنش رینولدز ۵۲
۳-۷- روش حجم سیال ۵۳
۳-۷-۱- الگوی های مختلف روش حجم سیال..... ۵۴
۳-۸- معرفی روش‌های عددی..... ۵۷

فصل چهارم: معرفی مدل رسوب-آبشستگی در نرم‌افزار FLOW-3D.V9.3 .....۶۱

۴-۱- مقدمه ۶۲
۴-۲- معادلات حاکم و سیستم‌های مختصات..... ۶۳
۴-۲-۱- ارزیابی گرانروی ۶۵
۴-۳- سطح آزاد و مشترک سیال ۶۶

۴-۴- مدل‌های آشفتگی ۶۷
۴-۵- فرضیه بوزینسک ۶۹
۴-۶- روش حجم سیال به کار رفته در نرم‌افزارFLOW-3D ۶۹
۴-۷- روش کسر مساحت – حجم مانع ۷۳
۴-۸- مدل رسوب و آبشستگی در نرم‌افزار FLOW-3D ۷۳

فصل پنجم: ارائه و تفسیر نتایج عددی ۷۹

۵-۱- مقدمه ۸۰
۵-۲- مدل آزمایشگاهی ۸۰
۵-۳- مراحل معرفی هندسه مدل به نرم‌افزار FLOW-3D ۸۲
۵-۳-۱- مش‌بندی مدل ۸۳
۵-۴- حساسیت‌سنجی ۸۶
۵-۵- شرایط مرزی ۸۸
۵-۶- مدل آبشستگی-رسوب ۹۰
۵-۶-۱- معرفی پارامترهای مهم در مدل آبشستگی – رسوب ۹۱
۵-۶-۲- روش عددی تحلیل مدل ۹۶
۵-۶-۳- مدل معیار به منظور واسنجی ۹۶
۵-۶-۴- مقایسه نتایج عددی و نتایج حاصل از آزمایشگاه ۱۰۰
۵-۶-۵- تأثیر عدد فرود در لبه پرتاب‌کننده بر ابعاد حفره آبشستگی ۱۰۵
۵-۶-۶- تأثیر سرعت در لبه پرتاب‌کننده بر آبشستگی ۱۰۷
۵-۶-۷- تأثیر عمق پایاب (Tail Water) بر آبشستگی ۱۱۰
۵-۶-۸- محاسبه حجم حفره آبشستگی ۱۱۲

فصل ششم: جمع‌بندی نهایی و ارایه پیشنهادات ۱۱۶

۶-۱- مقدمه ۱۱۷
۶-۲- جمع بندی نتایج تحقیق ۱۱۷

۶-۳- پیشنهادات ادامه تحقیق ۱۱۸

مراجع..... ۱۱۸

پیوست الف: مراحل شبیه‌سازی آبشستگی و رسوب در نرم‌افزار FLOW-3D.V9.3 .....۱۲۶

الف-۱- مراحل شبیه‌سازی جریان توسط نرم‌افزار FLOW-3D..... ۱۲۷

الف-۲- Navigator ۱۲۷

الف-۳- Model setup..... ۱۲۷

الف-۴- Physics..... ۱۲۸

الف-۵- Fluids..... ۱۳۰

الف-۶- Meshing & Geometry..... ۱۳۰

الف-۷- Boundaries ۱۳۱

الف-۸- Initial ۱۳۲

الف-۹- Out put..... ۱۳۳

الف-۱۰-Numerics ۱۳۴

الف-۱۱-Simulation..... ۱۳۵

الف-۱۲-Analyze ۱۳۶

الف-۱۳-Display ۱۳۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱. خلاصه روابط ارائه شده به منظور برآورد حداکثر عمق آبشستگی (نقل از Locher)[۱۸]..... ۱۹

جدول ۲-۲. مقادیر مختلف ضرایب ثابت روابط گروه اول[۱۹] ۲۱

جدول ۲-۳ .تعداد و مقادیر پارامترهای مورد آزمایش توسط محبوبی[۶] ۲۷

جدول ۲-۴ . ضرایب معادله (۲-۱۱)[۲۶] ۳۱

جدول ۲-۵. ضرایب رابطه(۲-۲۶) [۲۷] ۳۲

جدول ۴-۱. مقادیر ورودی مدل کریو و معادل آن‌ها در FLOW-3D[۴۶] ۶۶

جدول ۵-۱. مشخصات هندسی سرریز Parbati[۵۹] ۸۱

جدول ۵-۲. خصوصیات بلوک‌های به کار رفته در مدل..... ۸۴

جدول ۵-۳. تعداد سلول‌های مورد استفاده در مدل..... ۸۶

جدول ۵-۴. شرایط مرزی مورد استفاده در نرم‌افزار FLOW-3D.V9.3[۴۶]..... ۸۹

جدول ۵-۵. شرایط مرزی بلوک‌های به‌کار رفته در مدل ۸۹

جدول ۵-۶. پارامتر شیلدز بحرانی برای ماسه با d_{50} = ۲ mm براساس روابط تجربی ۹۳

جدول ۵-۷. پارامتر نهایی معرفی شده به نرم‌افزار ۹۵

فهرست اشکال

شکل ۲-۱. سد تاربلا – پاکستان [۱۳] ۱۰

شکل ۲-۲. استهلاک انرژی در پرتاب‌کننده جامی [۱۵] ۱۰

شکل ۲-۳. جام پرتابی[۱۷] ۱۱

شکل ۲-۴. جام‌های استوانه‌ایی [۱۷] ۱۲

شکل ۲-۵. طرح‌های ساده از انواع باکت[۱۷] ۱۳

شکل ۲-۶.مراحل توسعه حفره آبشستگی [۱۸] ۱۴

شکل ۲-۷. اجزای آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل [۱۸] ۱۵

شکل ۲-۸. تغییرات عمق آبشستگی موضعی در زمان در حالت آبشستگی آب زلال و بستر متحرک[۲۰] ۱۶

شکل ۲-۹. آبشستگی موضعی پایین‌دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی[۲] ۱۸

شکل ۲-۱۰. انواع رژیم جریان یک جت مایل داخل حفره آبشستگی[۱۸] ۲۸

شکل ۲-۱۱. حجم کنترل و پارامترهای مختلف رابطه Hoffman (۱۹۹۸)[۷] ۳۸

شکل ۳-۱. تغییرات کمیت ϕبر حسب t [۳۹]. ۴۹

شکل ۳-۲. سطح تماس واقعی دو سیال [۳۹] ۵۷

شکل ۳-۳. سطح تماس به روش یانگز [۳۹] ۵۷

شکل ۳-۴. سطح تماس به روش دهنده و گیرنده [۳۹] ۵۸

شکل ۴-۱. نمونه از مقادیر VOF در نزدیکی سطح آزاد[۴۶] ۷۰

شکل ۴-۲. سه مرحله تعیین سطح آزاد به روش VOF[۴۶]. ۷۳

شکل ۴-۳. مدل رسوب در FLOW-3D را تحت جت ریزشی[۵۲] ۷۶

شکل ۴-۴. نیروهای وارد بر ذرات رسوب در سطح شیب‌دار[۵۳] ۷۷

شکل ۵-۱. مدل آزمایشگاهی سرریز Parbati[۵۸] ۸۱

شکل ۵-۲. مشخصات هندسی سرریز روزنه‌ای[۵۹] ۸۱

شکل ۵-۳. مدل فیزیکی در FLOW-3D ۸۲

شکل ۵-۴. نماهای مختلف از مدل شبیه‌سازی هندسی سرریز ۸۲

شکل ۵-۵. الگوی مش‌بندی نهایی (بهینه) ۸۴
شکل ۵-۶. نسبت انطباق بلوک‌های روی سرریز، (a) هم‌پوشانی کامل، (b) هم‌پوشانی قابل قبول ۸۴
شکل ۵-۷. مقایسه طول پرش در شرایط مش‌بندی با بلوک‌های مختلف ۸۵
شکل ۵-۸. تغییر شکل موانع به دلیل تقاطع چندگانه در شبکه‌بندی FLOW-3D ۸۷
شکل ۵-۹. عملکرد روش FAVOR بر روی مرزهای جامد با ابعاد متفاوت ۸۸
شکل ۵-۱۰. سطوح مشخص شده بر روی بلوک شش وجهی در دستگاه دکارتی ۸۹
شکل ۵-۱۱. ساختارهای متفاوت ماسه با درصد حجمی متفاوت..... ۹۱
شکل ۵-۱۲. منحنی شیلدز[۶۳]. ۹۲
شکل ۵-۱۳. نمونه‌هایی از زوایای پایداری[۵۳]..... ۹۴
شکل ۵-۱۴. مدل عددی نهایی جام پرتابی در نماهای سه بعدی و دو بعدی با جریان ۵۰٪ دبی طراحی..... ۹۷
شکل ۵-۱۵. منحنی تغییرات عمق آبشستگی در مدل عددی..... ۹۸
شکل ۵-۱۶. پروفیل‌های طولی و عرضی و حفره آبشستگی تشکیل شده در مدل ۹۸
شکل ۵-۱۷. مراحل تشکیل حفره آبشستگی در زمان‌های مختلف ۹۹
شکل ۵-۱۸. عمق آبشستگی عددی(مدل $k-\varepsilon$) در مقابل عمق آبشستگی آزمایشگاهی ۱۰۱
شکل ۵-۱۹. طول آبشستگی عددی(مدل $k-\varepsilon$) در مقابل طول آبشستگی آزمایشگاهی ۱۰۱
شکل ۵-۲۰. عرض آبشستگی عددی(مدل $k-\varepsilon$) در مقابل عرض آبشستگی آزمایشگاهی ۱۰۲
شکل ۵-۲۱. عمق آبشستگی عددی (مدل RNG) در مقابل عمق آبشستگی آزمایشگاهی ۱۰۲
شکل ۵-۲۲. طول آبشستگی عددی (مدل RNG) در مقابل طول آبشستگی آزمایشگاهی ۱۰۳
شکل ۵-۲۳. عرض آبشستگی عددی (مدل RNG) در مقابل عرض آبشستگی آزمایشگاهی..... ۱۰۳
شکل ۵-۲۴. مقایسه ابعاد حفره آبشستگی عددی (RNG و $k-\varepsilon$) و آزمایشگاهی ۱۰۴
شکل ۵-۲۵. مقایسه عمق آبشستگی عددی و عدد فرود لبه پرتاب‌کننده..... ۱۰۵
شکل ۵-۲۶. مقایسه طول آبشستگی عددی و عدد فرود لبه پرتاب‌کننده.....۱۰۶
شکل ۵-۲۷. مقایسه عرض آبشستگی عددی و عدد فرود لبه پرتاب‌کننده..... ۱۰۷
شکل ۵-۲۸. کانتورهای سرعت مدل عددی پرتاب‌کننده در طول مسیر جریان..... ۱۰۸
شکل ۵-۲۹. عمق آبشستگی در مقابل h/r ۱۰۸

شکل ۵-۳۰. طول آبشستگی در مقابل h/r ۱۰۹
شکل ۵-۳۱. عرض آبشستگی در مقابل h/r ۱۰۹
شکل ۵-۳۲. شبیه‌سازی مدل بدون عمق پایاب ۱۱۰
شکل ۵-۳۳. مقایسه عمق آبشستگی در دو حالت وجود و عدم وجود عمق پایاب اولیه..... ۱۱۱
شکل ۵-۳۴. مقایسه طول آبشستگی در دو حالت وجود و عدم وجود عمق پایاب اولیه..... ۱۱۱
شکل ۵-۳۵. مقایسه عرض آبشستگی در دو حالت وجود و عدم وجود عمق پایاب اولیه..... ۱۱۲
شکل ۵-۳۶. مقایسه حجم آبشستگی روش تجربی با روش عددی..... ۱۱۳
شکل ۵-۳۷. مقایسه حجم آبشستگی با عمق پایاب و بدون عمق پایاب ۱۱۴
شکل ۵-۳۸. مقایسه سرعت برخورد جت جریان با بستر با عمق پایاب و بدون عمق پایاب ۱۱۴
شکل ۵-۳۹. کانتورهای سرعت برخورد به بستر فرسایش‌پذیر..... ۱۱۵
شکل الف- ۱. بخش Model Setup..... ۱۲۸
شکل الف- ۲. بخش Physics ۱۲۹
شکل الف- ۳. بخش Fluids ۱۳۰
شکل الف- ۴. بخش Meshing&Geometry ۱۳۱
شکل الف- ۵. بخش Boundaries..... ۱۳۲
شکل الف- ۶. بخش Initial..... ۱۳۳
شکل الف- ۷. بخش Out put ۱۳۴
شکل الف- ۸. Numerics..... ۱۳۵
شکل الف- ۹. بخش Simulate ۱۳۶
شکل الف- ۱۰. بخش Analyze ۱۳۷
شکل الف- ۱۱. بخش Display ۱۳۸

فهرست علائم

علامت	نشانه
a,b,c,d,x,y,z	ضرایب ثابت
B_s	حداکثر عرض حفره آبشستگی از محور جت
C_m	غلظت رسوبات بستر
C_s	غلظت رسوبات معلق
$C_{3\varepsilon}$	در معادله $k-\varepsilon$ اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می‌کند
D	عرض جت در محل برخورد به سطح حوضچه استغراق
D_{ij}	تانسور انتشار
d	قطر مشخصه ذرات بستر رودخانه
d_s	حداکثر عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده از سطح پایاب
d_w	عمق پایاب
d_n	ضخامت جت در لبه جام پرتابی
d_{wi}	عمق پایاب حدی
d_{50}	اندازه قطر متوسط مصالح
d_{90}	قطر مشخصه مصالح که ۹۰٪ وزنی مصالح کوچک‌تر از آن می‌باشند
e	پوکی
$\mathrm{E_c}$	پارامتر فرسایش جت استوانه ای
F_{ij}	جزء حجم سیال
FL_r	میزان شار $\mathbf{F}$ در دیواره سمت راست هر سلول
Fr	عدد فرود جریان
f_s	بخش جامد رسوب (میزان جامد حجم کل رسوب)
$f_{s,co}$	بخش جامد چسبنده رسوب
$f_{s,cr}$	بخش جامد بحرانی
g	شتاب جاذبه زمین
G_b	عبارت چشمه معادله k می‌باشد که اثر شناوری را در معادله اعمال می‌کند
G_K	عبارت چشمه معادله k می‌باشد که اثر گرادیان سرعت میانگین را در معادله اعمال می‌کند
H	اختلاف ارتفاع بالادست و پایین‌دست جت (ارتفاع ریزش)
h_b	ارتفاع آب روی انحنای جام
H_2	ارتفاع ریزش از لبه جام پرتابی تا سطح حوضچه آرامش
K	ضریب دراگ بین ذرات
k	انرژی جنبشی آشفتگی
$K\boldsymbol{u}$	دراگ خطی
l_s	طول آبشستگی
n	تخلخل (نسبت منافذ)

n_s	بردار عمود بر سطح بستر
p	فشار در هر نقطه از سیال
P_{ij}	تانسور تولیدی
q	دبی بر واحد عرض سرریز و خروجی از جام پرتاب کننده
$\boldsymbol{q}$	بردار نرخ تغییرات بار بستر
Q_b	دبی بار بستر
R	شعاع جام
R_h	شعاع هیدرولیکی جت
R^2	ضریب همبستگی
s	چگالی نسبی
SN	عدد پایداری یا عدد فرود ذرات
T	زمان
u	سرعت متوسط جریان
u_c	سرعت بحرانی ذرات در آستانه حرکت
U_1	سرعت متوسط جت
$\boldsymbol{u.\delta t}$	میزان شار در سلول $\lvert\boldsymbol{V}\rvert$
V	سرعت جت در محل برخورد به سطح حوضچه استغراق
V_b	سرعت جت در برخورد به سطح مصالح
V_e	حداقل سرعت جت
V_j	سرعت در لبه جام پرتابی
w_s	عرض آبشستگی
y_s	حداکثر عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده از سطح مصالح
α	زاویه‌ای که لبه جام پرتاب کننده با افق می‌سازد
α_u	نرخ فرسایش (احتمال جدایی ذره از سطح توده رسوب)
β	زاویه برخورد جت با بستر
ε	نرخ اتلاف انرژی جنبشی
ε_{ij}	تانسور اتلاف
ϕ	زوایه جام پرتاب‌کننده
ϕ_{ij}	تانسور فشار- کرنش
φ	ابعاد حفره آبشستگی اندازه گیری در آزمایشگاه
μ	لزجت سیال (آب)
μ_{eff}	لزجت گردابه‌ای مؤثر
μ_f	گرانروی مولکولی سیال
ν	لزجت مولکولی (سینماتیک) سیال
ν_s	حجم حفره آبشستگی
ν_t	لزجت گردابه‌ای

$\nu_\rho = \frac{C_F . \mu}{\rho}$	ضریب پخش
$\nu \frac{\partial u_i}{\partial u_j}$	تنش ناشی از لزجت مولکولی (دینامیکی)
θ	نسبت حجم هوا به حجم آب در جت
ρ	چگالی سیال
ρ_s	چگالی ذرات بستر
$\overline{\rho}$	چگالی متوسط بستر توده رسوب
$\overline{\rho u_i' u_j'}$	تنش رینولدز
τ	تنش برشی ناشی از گرانروی سیال
τ_{crit}	تنش برشی بحرانی
ω	سرعت سقوط ذرات بستر
$\frac{\nabla P}{\overline{\rho}}$	شتاب بدنه (ذرات رسوب)
Δt	دوره تناوبی نوسانات آشفتگی
ζ	زاویه گسیختگی
Θ	پارامتر شیلدز بحرانی

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

بحث آبشستگی به دلیل پیچیدگی‌های خاص آن مورد توجه محققان است، زیرا این پدیده در رودخانه‌ها و همچنین در اطراف سازه‌های هیدرولیکی ممکن است به تغییرات زیادی در پیرامون آن‌ها منجر شود [۱]. در سال‌های پایانی قرن هیجدهم میلادی یک مهندس فرانسوی به نام دوبو (Dubuat) پایه‌گذار آزمایش‌هایی شد که این آزمایش‌ها نام وی را به عنوان بنیان‌گذار علم رسوب و آبشستگی در تاریخ هیدرولیک ثبت کرد. فعالیت‌های وی منجر به نوشتن کتاب اصول هیدرولیک گردید که جلد دوم این کتاب راجع به مسائل رسوب می‌باشد. پس از مدتی این آزمایش‌ها به فراموشی سپرده شد. ولی با گذشت حدود دو و نیم قرن دانشمندان دیگری در این عرصه پا به میدان گذاردند، که نتایج تحقیقات آنان اثرات اساسی بر روی هیدرولیک رسوب و آبشستگی گذارده است. بعضی از این آثار هم اکنون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این دانشمندان می‌توان به شیلدز (Shields,1936) اشاره کرد. وی نخستین فردی بود که به طور سیستماتیک آستانه حرکت یا شروع حرکت ذرات رسوبی را مورد مطالعه قرار داد. وی با نمودار کـه ارائه نمود ابزاری جهت استفاده طراحان فراهم آورد تا نسبت به پایداری کانال‌های خاکی و رودخانه‌ها اظهار نظر نمایند [۲].

۱-۲- آبشستگی، تعریف، مراحل و انواع آن

یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه مسئله آبشستگی و شست و شوی بستر رودخانه می‌باشد. برای این پدیده تعاریف زیادی ارائه شده اما به نظر می‌رسد کـه تعاریف تقریباً جامعی برای آن مطرح می‌باشد. آبشستگی عبارت است از حرکات ذرات جامد از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری تحت تأثیر جریان سیالی که آن را احاطه نموده است. فرآیند آبشستگی به طور عادی در کف رودخانه‌ها و دیواره‌های آن‌ها اتفاق می‌افتد. اما حالت بسیار بحرانی آن معمولاً پس از گذشتن جریان از حول یک سازه هیدرولیکی اتفاق می‌افتد [۳]. این پدیده عموماً در هر کجا که افزایش سرعت روی دهد به وقوع می‌پیوندد. این افزایش سرعت می‌تواند ناشی ازکاهش سطح مقطع جریان، افزایش دبی عبوری از مقطع، افزایش شیب و یا کاهش زبری بستر باشد. از آنجاکه مکانیزم آبشستگی در مکان‌های مختلف، متفاوت می‌باشد لذا به دو دسته آبشستگی عمومی (General Scour) و آبشستگی موضعی (Local Scour) تقسیم‌بندی شده است. آبشستگی عمومی در