دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته سازه‌های آبی

شبیه سازی عددی الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف سری آبشکن‌های قائم و زاویه دار با مدل عددی FLOW-3D

به کوشش:

مجتبی اسدی

استاد راهنما:

دکتر سید محمدعلی زمردیان

زمستان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

اظهار نامه

اینجانب مجتبی اسدی(۹۰۰۱۳۲) دانشجوی رشته مهندسی آب گرایش سازه هـای آبـی دانشـکده کشاورزی اظهار می کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و و در جاهایی کـه از منـابع دیگران استفاده کرده ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته ام. همچنین اظهار مـی کـنم که تحقیق و موضوع پایان نامه ام تکـراری نیسـت و تعهـد مـی نمـایم کـه بـدون مجـوز دانشـگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیـین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضاء

به نام خدا

شبیه سازی عددی الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف سری آبشکن‌های قائم و زاویه دار با مدل عددی FLOW-3D

به کوشش:

مجتبی اسدی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت های لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ی:

مهندسی آب ، گرایش سازه های آبی

دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه:

دکتر سید محمدعلی زمردیان، دانشیار بخش مهندسی آب(استاد راهنما).....

دکتر تورج هنر، دانشیار بخش مهندسی آب(استاد مشاور).....

دکتر شاهرخ زندپارسا، دانشیار بخش مهندسی آب(استاد مشاور).....

دکتر علی اصغر قائمی،دانشیار بخش مهندسی آب(داور متخصص داخلی).....

اسفند ماه ۱۳۹۲

سپاسگزاری

اکنون که این پایان نامه به پایان رسیده است، بر خود لازم می دانم از جناب آقای دکتر سید محمدعلی زمردیان، استاد راهنمای بنده، به پاس راهنمایی ها و مساعدت های ایشان، نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم. از جناب آقایان دکتر تورج هنر و دکتر شاهرخ زند پارسا، اساتید مشاور ارجمند نیز، جهت راهنمایی ها و تعلیمات ارزنده ایشان متشکرم.

همچنین از جناب آقای مهندس بهرنگ سیستانی و آقای امان الله زارعی به دلیل راهنماییها و مساعدت های فراوان و آماده سازی مدل های آزمایشگاهی، صمیمانه قدردانی می نمایم.

در نهایت از زحمات پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی همواره پشتیبان من بوده اند، بسیار ممنون و سپاسگزارم.

تقدیم به

پدر عزیزم

شمع فروزان زندگی ام، که دعای خیرشان بدرقه راهمان بوده و خواهد بود

مادر عزیزتر از جانم

گوهر تابناکی که راه پر فراز و نشیب زندگی را بر من روشن و هموار ساخت، او که خود نخورد ولی لقمه در دهانم گذاشت

او که درس های زندگی را، مهربانی و شکیبایی را از او آموختم.

و همسر عزیزم و امیر علی کوچکم به پاس قدر دانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است

همدلی که با واژه ی نجیب و مغرور تلاش؛ آشنایی دارد و تلاش را تین را می شناسد و عطر رویایی آن را استشمام می کند و مرا در راه رسیدن به اهداف عالی یاری می رساند؛

چکیده

شبیه سازی عددی الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف سری آبشکن‌های قائم و زاویه دار با مدل عددیFLOW-3Dگ

به کوشش:

مجتبی اسدی

بررسی خصوصیات و رفتار جریان در رودخانه ها وسازه های مرتبط با آن از پدیده های پیچیده است که استفاده از نرم افزار را امری اجتناب ناپذیر می نماید. در ابتدا از نتایج مدل آزمایشگاهی ارائه شده توسط دوان[1]و همکاران (۲۰۰۹) در آزمایشگاه مینیسوتا آمریکا برای صحت سنجی نرم افزار FLOW-3D و مقایسه نتایج عددی شبیه سازی شده استفاده شده است. در این مقاله ابتدا آبشکن قائم جهت صحت سنجی نتایج مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه آبشکن مایل با زوایای ۶۰ و ۳۰ درجه نسبت به جهت جریان مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی ها بانرم افزار FLOW-3D، به مدت۶۵۰ ثانیه و با استفاده از مدل های آشفتگی (LES،RNG،k-ε)انجام شد. با مقایسه مدل‌های مختلف آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی، حداکثر عمق آبشستگی در نوک آبشکن با زاویه ۹۰ درجه در شرایط آزمایشگاه ۸/۸۲ سانتی متر و با استفاده از نرم افزار FLOW-3D ، حداکثر عمق آبشستگی در مدل های آشفتگی LES،RNG،k-εبه ترتیب ۹/۱ ، ۸/۹ و ۹/۱ حاصل گردید که مدل آشفتگیRNG تقریبا با ۱ درصد خطا، نسبت به دو مدل آشفتگی k-ε و LES مطابقت بهتری را نشان می‌دهد. همچنین در شبیه سازی مربوط به آبشکن ۶۰ و ۳۰ درجه حداکثر عمق آبشستگی در نوک آبشکن ها به ترتیب ۸/۷۵ و ۶/۵ سانتی متر است. در ادامه به شبیه سازی عددی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف سری آبشکن با حل معادلات سه بعدی ناویر استوکس و معادلات انتقال رسوب با استفاده از نرم افزار FLOW-3D پرداخته شده است. آبشکن ها در دو موقعیت ۳۰ و ۹۰ درجه نسبت به جهت جریان قرار گرفته و دبی جریان ۳۵ لیتر بر ثانیه و عمق جریان ۲۰ سانتی متر و قطر ذرات رسوب ۰/۸۵ میلی متر می باشد. از مدلهای آشفتگی (k-ε) و گروه نرمال شده (RNG) و شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) در شبیه سازی سرعت جریان و حداکثر عمق آبشستگی در اطراف سری آبشکن ها با شرایط آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. آنالیز حساسیت بر روی اندازه مش بندی انجام شده و نتایج نشان می دهد که در شبیه سازی با مش بندی بزرگ مدل آشفتگیLES هم از نظر پروفیل چاله آبشستگی و هم از لحاظ حداکثر عمق آبشستگی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت نزدیک داشته و خطایی در حدود ۵ درصد می باشد. ولی با کوچک نمودن اندازه مش ها، مدل آشفتگی RNG در تعیین حداکثر عمق آبشستگی و همچنین پروفیل چاله آبشستگی مدل دقیقتر و مناسبتری معرفی شده است و دارای خطایی در حدود ۱ درصد می باشد.

[1]-duan et al.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : مقدمه

۱-۱-مقدمه ۲

۱-۲-ضرورت انجام تحقیق ۴

۱-۳-هدف تحقیق ۵

۱-۴- مروری بر مطالب سایر فصل ها ۶

فصل دوم : مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- فرآیند فرسایش در رودخانهها ۹

۲-۲- ۱- عوامل موثر در فرسایش رودخانهای ۹

۲-۳- حفاظت رودخانه ۱۳

۲-۳-۱- روش های حفاظت بستر رودخانه ۱۳

۲-۳-۲- روش های حفاظت کناره های رودخانه ۱۳

عنوان **صفحه**

۲-۳-۲- ۱- روشهای حفاظت مستقیم دیوارهها (سواحل) رودخانه..... ۱۵

۲-۳-۲- ۲- روشهای حفاظت غیر مستقیم دیوارهها (سواحل) رودخانه..... ۱۶

۲-۴- تعریف آبشکن رودخانهای..... ۱۷

۲-۵- مروری بر تحقیقات گذشته..... ۱۸

۲-۵-۱- مدلسازی های عددی و آزمایشگاهی انجام شده توسط سایر محقیقین..... ۱۸

۲-۵-۱-۱- بررسی تغییرات سرعت طولی شامل حداقل و حداکثر سرعت..... ۱۹

۲-۵-۱-۲- توزیع تنش برشی بستر..... ۲۲

۲-۵-۱-۳-بررسیانواع گرداب‌های ایجاد شده اطراف آبشکن..... ۲۳

۲-۵-۱-۴-بررسی تاثیر زاویه قرارگیری آبشکن‌ها..... ۲۷

۲-۵-۱-۵-بررسی تاثیر ارتفاع آبشکن..... ۲۸

۲-۵-۱-۶-بررسی اثر طول آبشکن و فاصله بین آبشکن‌ها..... ۲۸

۲-۵-۱-۷-بررسی مدل‌های مختلف آشفتگی..... ۲۹

۲-۵-۱-۸-بررسی طول حفره آبشستگی..... ۲۹

۲-۶- ضعف مطالعات گذشته..... ۳۱

فصل سوم : مواد و روش ها

۳-۱- مقدمه..... ۳۳

۳-۲- دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)..... ۳۳

عنوان **صفحه**

۳-۳- معرفی نرم افزار عددی (FLOW-3D(Version 9.3 و معادلات حاکم ۳۵

۳-۳-۱- مدلهای اغتشاش..... ٤٨

۳-۳-۱-۱-متوسطگیری رینولدزی..... ٤٨

۳-۳-۱-۲- ٤٩

۳-۳-۱-۳-..... ٥٠

۳-۳-۱-۴-..... ٥٢

۳-۴- مراحل شبیه سازی جریان در نرم افزارFlow-3D ۶۴

۳-۴-۱-بخش(Global)..... ٦٤

۳-۴-۲-بخش(Physics)..... ٦٥

۳-۴-۳-بخش(Fluids)..... ٦٦

۳-۴-۴-شبکه بندی و هندسه (Meshing & Geometry)..... ٦٧

۳-۴-۵-مرزها(Boundaries)..... ٦٩

۳-۴-۶-شرایط اولیه (Initial)..... ۷۱

۳-۴-۷-فایل خروجی (Output)..... ۷۲

۳-۴-۸-تنظیمات عددی (Numerics)..... ۷۳

۳-۴-۹-بخش نهایی (Finalize)..... ۷٤

۳-۴-۱۰- *شبیه سازی (Simulate)*..... ۷۵

عنوان **صفحه**

۳-۵- مدل مورد استفاده در شبیه سازی عددی ۷۶

۳-۵-۱ مشخصات کانال با قوس ۹۰ درجه و شبکه بندی آن ۷۹

۳-۵-۲ شرایط مرزی اعمال شده ۸۰

۳-۵-۳-صحت سنجی مدل الگوی جریان در کانال با قوس ۹۰ درجه ۸۱

۳-۶- تجهیزات مدل آزمایشگاهی ۸۸

۳-۶-۱- کانال آزمایش ۸۸

۳-۶-۲- وسیله اندازه گیری آب ۸۹

۳- ۶- ۳- وسیله کنترل دبی ۹۰

۳-۶-۴- وسیله کنترل عمق جریان ۹۰

۳-۶-۵- اندازه گیری تغییرات بستر ۹۱

۳-۶-۶- سرعت سنج ۹۳

۳-۶-۷- مدل های آزمایش ۹۳

۳-۶-۸- انتخاب پارامترهای آزمایش ۹٤

۳-۶-۸-۱- عمق آب ۹٤

۳-۶-۸-۲- اندازه و دانه بندی ذرات ۹۵

۳-۶-۸-۳- مدت زمان آزمایش ۹۵

فصل چهارم : بحث و نتیجه گیری

عنوان **صفحه**

۴-۱ مقدمه ۹۸

۴-۲-بررسی پارامترهای موثر در شبیه سازی عددی ۹۸

۴-۲-۱- بررسی تاثیر زاویه قرارگیری آبشکن ۹۸

۴-۲-۱-۱- مشخصات مدل آبشکن با زاویه ۶۰،۹۰ و ۳۰ درجه ۹۸

۴-۲-۱-۲- شبکه بندی مدل ۱۰۰

۴-۲-۱-۳-شرایط مرزی اعمال شده ۱۰۱

۴-۲-۱-۴-صحت سنجی مدل با نتایج آزمایشگاهی ۱۰۳

۴-۲-۱-۵-مقایسه حداکثر عمق آبشستگی در اطراف آبشکن در زوایای مختلف این پژوهش با مطالعات پیشین ۱۰۹

۴-۲-۲- بررسی تاثیر مدل های مختلف آشفتگی آبشکن قائم ۱۰۹

۴-۲-۳- بررسی تغییرات سرعت طولی ، عرضی و عمودی شامل حداقل و حداکثر سرعت .. ۱۱۰

۴-۲-۴-آنالیز حساسیت بر روی اندازه مش بندی ۱۱۲

۴-۲-۴-۱-بررسی تاثیر زاویه قرارگیری آبشکن ۱۱٤

۴-۲-۴-۲-بررسی تاثیر مدل های مختلف آشفتگی آبشکن قائم ۱۱۹

۴-۳- مشخصات مدل سری آبشکن با زاویه های ۳۰ و ۹۰ درجه ۱۲۰

۴-۳-۱- مشخصات مدل سری آبشکن با زاویه ۹۰ ..... ۱۲۲

عنوان **صفحه**

۴-۳-۱- ۱-بررسی تاثیر ذرات مختلف ، دانسیته های مختلف و مدل های آشفتگی بر روی حداکثر عمق آبشستگی..... ۱۲٤

۴-۳-۱- ۲-بررسی تاثیر ذرات مختلف با دانسیته ۲/۷۵ بر روی حداکثر عمق آبشستگی.. ۱٤٤

۴-۳-۱- ۳-بررسی تاثیر ذرات مختلف با دانسیته ۲/۶۵ بر روی حداکثر عمق آبشستگی.. ۱٤٤

۴-۳-۱- ۴-بررسی تاثیر ذرات مختلف با دانسیته ۲/۵۵ بر روی حداکثر عمق آبشستگی.. ۱٤٥

۴-۳-۱- ۵-بررسی تاثیر دانسیته های متفاوت رسوب بر روی حداکثر عمق آبشستگی ... ۱٤٥

۴-۳-۱- ۶-بررسی تاثیر مدل های مختلف آشفتگی بر روی حداکثر عمق آبشستگی ۱٤٥

۴-۳-۲- مشخصات مدل سری آبشکن با زاویه ۳۰ درجه..... ۱٤٦

۴-۳-۲-۱-آنالیز حساسیت بر روی اندازه مش بندی..... ۱٤۸

۴-۳-۲-۲-بررسی انواع گرداب های ایجاد شده در اطراف سری آبشکن..... ۱٥٤

۴-۳-۲-۳-تاثیر مدل های مختلف آشفتگی با توجه به مقادیر سرعت طولی..... ۱٥٥

۴-۳-۳-بررسی تاثیر دبی های مختلف در الگوی جریان..... ۱۷۰

۴-۴-مشخصات مدل آزمایشگاهی اثر متقابل آبشستگی تکیه گاه در خاک غیر چسبنده..... ۱۸۱

۴-۴-۱- صحت سنجی مدل با نتایج آزمایشگاهی..... ۱۸٤

فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- خلاصه نتایج ۱۸۹

۵-۱-۱-بررسی اثر زاویه قرارگیری آبشکن..... ۱۸۹

عنوان **صفحه**

۵-۱-۲ مقایسه حداکثر عمق آبشستگی در اطراف آبشکن در زوایای مختلف این پژوهش با مطالعات پیشین ۱۸۹

۵-۱-۳- بررسی مدل های مختلف آشفتگی مربوط به آبشکن قائم..... ۱۹۰

۵-۲- بررسی اثر حداکثر عمق آبشستگی در اطراف سری آبشکن های قائم و زاویه دار..... ۱۹۰

۵-۲-۱ بررسی مدل های مختلف آشفتگی مربوط به سری آبشکن قائم و زاویه دار..... ۱۹۱

۵-۳- شبیه سازی آبشستگی بستر در اطراف تکیه گاه ۵۰ و ۳۷/۵ سانتی متر ۱۹۱

پیشنهادات ۱۹۲

فصل ششم : منابع

منابع..... ۱۹٤

فهرست جداول

عنوان و شماره **صفحه**

جدول۳- ۱. خلاصهای از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه..... ۸۰

جدول٤- ۱. خلاصهای از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به مدل آزمایشگاهی آبشکن ۹۰ درجه توسط دوان و همکاران (۲۰۰۹) قطر ذرات ۱/۵۹ میلیمتر..... ۱۰۲

جدول٤- ۲. خلاصهای از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به آبشکن با زاویه های ۶۰ و ۳۰ درجه با قطر ذرات ۱/۵۹میلیمتر..... ۱۰۳

جدول٤- ۳. خلاصهای از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به مدل آزمایشگاهی آبشکن ۹۰ توسط دوان و همکاران(۲۰۰۹) با قطر ذرات ۱/۵۹ میلیمتر..... ۱۱۳

جدول۴- ۴. خلاصهای از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به آبشکن با زاویه های ۶۰ و ۳۰درجه با قطر ذرات ۱/۵۹میلیمتر..... ۱۱۳

جدول۴- ۵. مشخصات شبیه سازی های انجام شده بر روی سری آبشکن قائم و تعداد آن ها... ۱۲۳

جدول٤- ٦. خلاصه از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به سری آبشکن های ۹۰ درجه در مدل آزمایشگاهی اچیرا و همکاران(۲۰۱۱) با قطر ذرات متفاوت ، دانسیته های متفاوت و مدل های مختلف آشفتگی..... ۱۲۳

جدول۴- ۷.خلاصه ۱۸ شبیه سازی انجام شده بر روی سری آبشکن قائم..... ۱٤۳

عنوان و شماره **صفحه**

جدول۴- ۸. خلاصه از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به آبشکن هایی با زاویه ۳۰ درجه و قطر ذرات ۰/۸۵ میلیمتر با مش بندی بزرگ ۱۴۸
جدول۴- ۹. خلاصه از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به آبشکن هایی با زاویه ۳۰ درجه و قطر ذرات ۰/۸۵ میلیمتر با مش بندی ریزتر ۱۵۱
جدول٤ -۱۰ مقایسه سرعت طولی در انواع مدل های مختلف آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی..... ۱٦٦
جدول٤- ۱۱. خلاصه از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به مدل سری آبشکن با زاویه های۹۰ و ۳۰درجه قطر ذرات ۰/۸۵ میلیمتر..... ۱۷۰
جدول٤- ۱۲. خلاصه از پارامترهای ورودی به نرم افزار FLOW-3D مربوط به تکیه گاه ۵۰ و ۳۷/۵ سانتی متری..... ۱۸۳

فهرست اشکال

عنوان صفحه

شکل۱- ۱. نمای شماتیک الگوی جریان و حفره آبشستگی موضعی اطراف یک آبشکن (عباس چناری و ملکی، ۱۳۹۱).....۳

شکل۲- ۱. نمایش سطوح مختلف دیواره رودخانه با تلفیق روش های طبیعی - سازه ای (یاسی،۱۳۶۷).....۱۵

شکل۲- ۲. اصلاح مسیر یک بازه مارپیچی (نشریه شماره ۵۱۶ وزارت نیرو،۱۳۸۸).....۱۷

شکل۲- ۳. نمایش ساختار عمومی یک آبشکن در پلان (پرزچویسکی،۱۹۹۵).....۱۸

شکل۲- ۴. توزیع بی بعد سرعت طولی جریان در اطراف آبشکن‌های قائم و زاویه ای.(ایگر، ۲۰۰۹) ۲۰

شکل۲- ۵. تاثیر آبشکن‌های زاویه دار در نزدیک بستر و a)توزیع فشار و b) توزیع سرعت.(هالتینگ و همکاران.۲۰۰۷).....۲۱

عنوان **صفحه**

شکل۲- ۶. توزیع تنش برشی در اطراف آبشکن منفرد در زوایای مختلف (یزدی و سرکرده، ۱۳۸۷). ۲۳

شکل۲- ۷. شبیه سازی جریان اطراف آبشکن مستغرق الف)گرداب عمودی ب)گرداب عرضی ج)گرداب افقی یا طولی.(کانل و همکاران، ۲۰۰۲و۲۰۰۸)..... ۲٤

شکل۲- ۸. خطوط جریان محاسبه شده حول آبشکن الف)فرسایش اولیه ب)تعادل نهایی(ناگاتا و همکاران. ۲۰۰۹)..... ۲٦

شکل۲- ۹. منطقه جداشدگی جریان در زوایای مختلف در اطراف آبشکن منفرد (یزدی و سرکرده، ۱۳۸۷)..... ۲۷

شکل۳- ۱. نمایش پنجره Global..... ٦٥

شکل۳- ۲. نمایش پنجره Physics..... ٦٦

شکل۳- ۳. نمایش پنجره Fluids..... ٦۷

شکل۳- ۴. نمایش پنجره Meshing And Geometry..... ٦۹

شکل۳- ۵. نمایش پنجره Boundaries..... ۷۰

شکل۳- ۶. نمایش پنجره Initial..... ۷۲

شکل۳- ۷. نمایش پنجره Output..... ۷۳

شکل۳- ۸. نمایش پنجره Numerics..... ۷٤

شکل۳- ۹. نمایش پنجره Finalize..... ۷٥

شکل۳- ۱۰. نمایش پنجره Simulate..... ۷٦

شکل۳- ۱۱. پلان و کانال آزمایشگاه(واقفی و همکاران،۱۳۸۷)..... ۷۷

عنوان **صفحه**

شکل۳- ۱۲. نقاط برداشت داده های آزمایشگاهی در یک مقطع عرضی از کانال. (واقفی و همکاران،۱۳۸۷).....۷۸
شکل۳- ۱۳. الگوی جریان در قوس(واقفی و همکاران،۱۳۸۷).....۷۹
شکل۳- ۱٤. مش بندی کانال و شبکه چند بلوکی.....۷۹
شکل۳- ۱۵. مقایسه پروفیل سرعت طولی حاصل از نتایج شبیهسازی عددی با نرم افزار-FLOW 3D و آزمایشگاهی در زاویه ۴۰ درجه و در عمق ۳ سانتی متری(w= فاصله از جداره خارجی)...۸۱
شکل۳- ۱٦. مقایسه پروفیل سرعت طولی حاصل از نتایج شبیهسازی عددی با نرم افزار-FLOW 3D و آزمایشگاهی در زاویه ۵۰ درجه و در عمق ۳ سانتی متری.....۸۲
شکل۳- ۱۷. مقایسه پروفیل سرعت طولی حاصل از نتایج شبیهسازی عددی با نرم افزار-FLOW 3D و آزمایشگاهی در زاویه ۴۰ درجه و در عمق۹ سانتی متری.....۸۲
شکل۳- ۱۸. مقایسه پروفیل سرعت طولی حاصل از نتایج شبیهسازی عددی با نرم افزار-FLOW 3D و آزمایشگاهی در زاویه ۵۰ درجه و در عمق ۹ سانتی متری.....۸۳
شکل۳- ۱۹. مقایسه پروفیل سرعت طولی حاصل از نتایج شبیهسازی عددی با نرم افزار-FLOW 3D و آزمایشگاهی نسبت به عمق، در زاویه ۴۰ درجه از قوس و در عرض های مختلف.....۸۵
شکل۳- ۲۰. نمایش کانتورهای سرعت الف)در نزدیکی بستر(عمق ۰/۵ سانتی متری)، ب)در عمق متوسط کانال(عمق ۶ سانتی متری) ج)در سطح آب(عمق ۱۱/۵سانتی متری).....۸۷
شکل۳- ۲۱. کانال مورد آزمایش.....۸۹
شکل۳- ۲۲. کانال مورد آزمایش.....۸۹
شکل۳- ۲۳. دبی سنج الکتریکی.....۹۰
شکل۳- ۲۴. شیر کنترل دبی.....۹۰

عنوان **صفحه**

شکل۳- ۲۵. دریچه کشویی..... ۹۱
شکل۳- ۲۶. متر لیزری..... ۹۱
شکل۳- ۲۷. ریل برای جابه جایی ارتفاع سنج..... ۹۲
شکل۳- ۲۸. عمق سنج..... ۹۲
شکل۳- ۲۹. سرعت سنج..... ۹۳

شکل٤- ۱. مدل فلوم آزمایشگاهی و اندازه گیری سرعت در طول و عرض کانال با استفاده از ADV. *(دوان و همکاران،۲۰۰۹)*..... ۹۹
شکل٤- ۲. مدل فلوم آزمایشگاهی و اندازه گیری سرعت در طول و عرض کانال با استفاده از ADV *(دوان و همکاران،۲۰۰۹)*..... ۹۹
شکل٤- ۳. شبیه سازی فلوم آزمایشگاهی و آبشکن با زاویه ۹۰ به وسیله نرم افزار FLOW-3D با مش بندی..... ۱۰۰
شکل۴- ۴. شبیه سازی فلوم آزمایشگاهی و آبشکن با زاویه ۶۰ به وسیله نرم افزار FLOW-3D با مش بندی..... ۱۰۱
شکل۴- ۵. شبیه سازی فلوم آزمایشگاهی و آبشکن با زاویه ۳۰ به وسیله نرم افزار FLOW-3D با مش بندی..... ۱۰۱
شکل٤- ٦. منحنی های هم ارتفاع بستر شسته شده اطراف آبشکن در شرایط آزمایشگاهی در مدت زمان ۴۸ ساعت(دوان و همکاران،۲۰۰۹)..... ۱۰٤