دانشگاه سیستان و بلوچستان

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی

عنوان:

شبیه‌سازی عددی انواع مشخصه‌های هیدرولیکی جریانهای ثانویه در کانال‌های باز مثلثی

استاد راهنما:

دکتر غلامحسین اکبری

استاد مشاور:

دکتر محمد گیوه‌چی

تحقیق و نگارش:

حسین ذبیحی

(این پایان‌نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره‌مند شده است.)

چکیده :

استفاده از مجاری طبیعی و مصنوعی جهت هدایت آب، کاربرد فراوان داشته و تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. اطلاعات سرعت متوسط عمقی را می‌توان علاوه بر تعیین سرعت متوسط مقطع و دبی، در تعیین ضریب پراکندگی طولی آلودگی نیز استفاده نمود.

تنش برشی نیز در تخمین پارامترهایی چون فرسایش و حمل رسوب از عوامل عمده و اساسی بشمار می-رود. از اینرو بررسی شرایط جریان در کانال‌های باز در سیستم انتقال آب به منظور طراحی و عملکرد بهینه کانال‌ها از مسایل مورد توجه بسیاری از محققین می‌باشد. جریان عبوری از کانال‌ها دارای سه مؤلفه سرعت، یک مؤلفه در جهت جریان و دو مؤلفه در جهت عرضی کانال است. نوسانات سرعت نسبت به سرعت متوسط عمقی، سبب ایجاد آشفتگی می‌شود. در اثر غیرهمگن بودن این نوسانات، یک سری گردابه‌های چرخشی در مقطع کانال ایجاد شده که سلول‌های جریان ثانویه نامیده می‌شوند. سلول‌های تولید شده در اثر این نوسانات، سبب ایجاد تنش برشی عرضی در جداره‌های کانال شده و در نتیجه بحث فرسایش و آبشستگی جداره‌های کانال را مطرح می‌کنند. بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان در کانال‌ها ، هزینه‌های مالی و زمانی زیاد به‌همراه داشته و همچنین نیاز به داشتن آزمایشگاه‌های مجهز دارد. برای حل این مشکل نیاز به بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی و ابزارهای کمکی نظیر نرم‌افزارهای محاسباتی می‌باشد.

در تحقیق حاضر جریان در کانال باز مثلثی به کمک نرم‌افزار ANSYS-CFX مدل‌سازی گردید. قابلیت (CFD) در مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه، پارامترهایی نظیر سرعت متوسط عمقی و تنش برشی موضعی و مواردی از جمله اثر زبری جداره‌ها، نسبت ابعادی کانال، هندسه کانال و ... روی سلول‌های جریان بررسی گردید. با صحت‌سنجی نتایج مدل عددی ساخته شده، با اطلاعات آزمایشگاهی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد انجام گردید و اطلاعات آزمایشگاهی دیگر محققین، توافق خوبی مشاهده گردید.پس از اطمینان از قابلیت نرم‌افزار در مدل‌سازی شرایط جریان در کانال‌ها، انواع مدل‌های آشفتگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل آشفتگی تنش برشی رینولدز SSG در مدلسازی سلول‌های جریان بود. از آنجایی که مشخصات جریان مانند سرعت و تنش برشی، تحت تاثیر عوامل مختلفی تغییر می‌کنند، از اینرو تاثیر تغییر عواملی مانند تغییر در شیب کف کانال، تغییر در شیب جداره‌های کانال، تغییر در حداکثر ارتفاع آب کانال، تغییر در زبری جداره‌ها، روی مشخصات جریان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن اریه شد.

کلمات کلیدی: سلول‌های جریان ثانویه، توزیع تنش برشی جداری، توزیع سرعت متوسط عمقی، جریان آشفته، کانال باز مثلثی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۳- اهداف تحقیق ۴

۱-۴- فرضیات ۵

فصل دوم: مطالعات گذشته و تاریخچه تحقیق ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- پیشینه تجربی تحقیق ۸

۲-۳- پیشینه تحلیلی تحقیق ۱۱

۲-۳-۱- معرفی روش شینو و نایت (Shiono and Knight Method) ۱۲

۲-۳-۱-۱- حل تحلیلی معادله SKM ۱۷

۲-۳-۲- دیگر روش های تحلیلی ۲۰

۲-۳-۲-۱- روش مساحت قائم (Vertical Area Method) ۲۰

۲-۳-۲-۲- روش مساحت عمود (Normal Area Method) ۲۱

۲-۳-۲-۳- روش Pizzuto ۲۲

۲-۴- پیشینه عددی تحقیق ۲۲

فصل سوم: مبانی نظری تحقیق ۲۵

۳-۱- مقدمه ۲۶

۳-۲- معادلات حاکم بر جریان ۲۶

۳-۳- آشفتگی چیست؟ ۲۸

۳-۳-۱- جریان‌های آشفته ۲۸

۳-۳-۲- معادلات حاکم بر جریان آشفته ۳۰

۳-۳-۳- مدل‌های آشفتگی ۳۲
۳-۳-۳-۱- مدل صفر معادله‌ای– مدل طول مخلوط ۳۳
۳-۳-۳-۲- مدل‌های یک معادله‌ای ۳۳
۳-۳-۳-۳- مدل‌های دو معادله‌ای ۳۴
۳-۳-۳-۳-۱- مدل دو معادله‌ای- مدل $k-\varepsilon$ ۳۵
۳-۳-۳-۳-۲- مدل دو معادله‌ای- مدل $k-\varepsilon$ استاندارد ۳۶
۳-۳-۳-۳-۳- مدل دو معادله‌ای- مدل RNG (Renormalized Group) ۳۷
۳-۳-۳-۴- مدل محسوس..... ۳۹
۳-۳-۳-۵- مدل معادله تنش‌های رینولدز (Reynolds Stress Model Equation) ۴۱
۳-۳-۳-۵-۱- مدل تنش رینولدز LLR-IP, LLR-IQ (LLR Reynolds Stress Model)....۴۲
۳-۳-۳-۵-۲- مدل تنش رینولدز SSG (SSG Reynolds Stress Model) ۴۲
۳-۳-۳-۶- مدل تنش جبری (Algebric Stress Model).....۴۲
۳-۴- جریان‌های ثانویه ۴۳
۳-۴-۱- اثرات جریان‌های ثانویه روی مشخصه‌های جریان اصلی ۴۸
۳-۵- معرفی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ۵۰
۳-۵-۱- معرفی روش‌های عددی ۵۱
۳-۵-۱-۱- روش تفاضل محدود Finite Defference Method ۵۲
۳-۵-۱-۲- روش اجزاء محدود Finite Element Method..... ۵۳
۳-۵-۱-۳- روش حجم محدودFinite Volume Method ۵۴
۳-۵-۱-۴- روش‌های طیفی..... ۵۵
۳-۶- معرفی برخی از نرم افزارهای تحلیل عددی جریان ۵۶
۳-۶-۱- نرم‌افزار FLUENT ۵۶
۳-۶-۲- نرم‌افزار STAR-CD ۵۷
۳-۶-۳- نرم‌افزار FLOW-3D ۵۸
۳-۶-۴- نرم‌افزار ANSYS ۵۹

۳-۶-۵- نرم‌افزار ANSYS-CFX ۵۹
۳-۶-۵-۱- سطوح همگرایی در نرم‌افزار ANSYS-CFX ۶۰
۳-۶-۵-۲- مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار ANSYS-CFX ۶۱
۳-۶-۵-۳- مدل‌سازی جریان چند فازی و سطح آزاد در نرم‌افزار ANSYS-CFX ۶۲
۳-۶-۵-۴- روش عددی و الگوریتم بکار رفته در نرم‌افزار ANSYS-CFX ۶۴
فصل چهارم: مدل‌سازی، تحلیل مدل‌ها، نتایج و بحث ۶۷
۴-۱- مقدمه ۶۸
۴-۲- تعریف مسیله ۶۸
۴-۳- انتخاب نرم‌افزار ۶۹
۴-۴- مدل‌سازی عددی ۶۹
۴-۴-۱- مقدمه و مراحل مدل‌سازی عددی ۶۹
۴-۴-۲- مدل‌سازی هندسی کانال ۷۲
۴-۴-۳- مشخصات مقاطع مثلثی مورد آزمایش ۷۳
۴-۴-۴- شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان ۷۴
۴-۴-۵- حساسیت‌سنجی نسبت به شبکه ۷۸
۴-۴-۶- شرایط مرزی ۸۱
۴-۴-۶-۱- شرایط مرزی در ورودی کانال ۸۱
۴-۴-۶-۲- شرایط مرزی در خروجی کانال ۸۱
۴-۴-۶-۳- شرایط مرزی سطح آزاد ۸۲
۴-۴-۶-۴- شرایط مرزی جداره‌های کانال ۸۲
۴-۴-۷- اتنخاب مدل آشفتگی ۸۳
۴-۴-۸- انتخاب سطح همگرایی ۸۳
۴-۵- صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ۸۳
۴-۵-۱- صحت‌سنجی نتایج با استفاده از مدل اغتشاشی SSG در سطح همگرایی 10^{-4} ۸۴
۴-۵-۱-۱- نتایج مربوط به مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه ۸۴

۴-۵-۱-۲- صحت‌سنجی نتایج مربوط به مدل‌سازی سرعت عمق میانگین ۸۹
۴-۵-۱-۳- صحت‌سنجی نتایج مربوط به مدل‌سازی تنش برشی جداری ۹۰
۴-۵-۱-۴- جمع بندی نتایج صحت‌سنجی ۹۱
۴-۶- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ۹۲
۴-۶-۱- انتخاب مدل اغتشاشی مناسب ۹۴
۴-۶-۲- انتخاب مقدار مناسب برای ضریب CR5 ..... ۱۰۳
۴-۶-۳- انتخاب سطح همگرایی مناسب ۱۰۸
۴-۶-۴- بررسی اثر زبری جداره‌ها در نتایج مدل‌سازی عددی ۱۱۲
۴-۶-۴-۱- جداره‌ها با ارتفاع زبری معادل 0.011m , 0.0035 m ۱۱۳
۴-۶-۴-۲- جداره‌های با زبری نامتقارن ۱۱۷
۴-۶-۵- بررس اثر تغییر در شیب کف کانال ۱۲۲
۴-۶-۶- برسی اثر تغییر در شیب جداره‌های کانال ۱۲۶
۴-۶-۷- بررسی اثر تغییر در عمق حداکثر آب ۱۳۳
۴-۶-۸- مقایسه نتایج سرعت متوسط عمقی و تنش‌برشی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهیLane ۱۳۷
فصل پنجم: جمع بندی نهایی نتایج و ارائه پیشنهادات ۱۳۹
۵-۱- جمع بندی نهایی نتایج ۱۴۰
۵-۲- پیشنهادات ۱۴۲
مراجع ۱۴۳

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱. ضرایب ثابت لاندر و اسپالدینگ برای معادلات $K-\varepsilon$ [۳۱] ۳۵

جدول ۳-۲. ثابت‌های مدل $K-\varepsilon$ استاندارد[۳۱] ۳۷

جدول ۳-۳. ضرایب ثابت برای مدل $K-\varepsilon$ حالت RNG ۳۹

جدول ۳-۴. ضرایب ثابت مدل محسوس ۴۰

جدول ۴-۱. مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی با زبری یکنواخت در کانال باز مثلثی[۱۵] ۷۱

جدول ۴-۲. مشخصات مدل آزمایشگاهی کانال باز مثلثی بازبری غیر یکنواخت [۱۵] ۷۱

جدول ۴-۳. مشخصات کانال ذوزنقه‌ای[۴] ۷۱

جدول ۴-۴. مشخصات زبری مقاطع ۷۴

جدول۴-۵. اطلاعات چهار مش‌بندی مورد بررسی نهایی ۷۹

جدول ۴-۶. روند مدل‌سازی‌های انجام شده ۹۲

جدول ۴-۷. تعداد تکرارها و بازه زمانی مورد نیاز برای مدل‌های اغتشاشی ۹۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱. خطوط هم سرعت در مجراهای بسته مثلثی [۱۰] ۹

شکل۲-۲. ساختار سلول‌های جریان ثانویه در کانال باز ذوزنقه‌ای [۴] ۱۱

شکل ۲-۳. جریان های ثانویه در مجراهای بسته مثلثی [۱۱] ۱۱

شکل۲-۴. (الف) مشخصات جریان در مجاری طبیعی و (ب) دیاگرام آزاد المان در امتداد جریان [۱۵] . ۱۳

شکل۲-۵. توصیف شماتیک روش VAM[۶] ۲۱

شکل۲-۶. توصیف شماتیک روش NAM[۶] ۲۱

شکل۳-۱. نمایش شماتیک دو دیدگاه بررسی جریان ۱) دیدگاه لاگرانژی ۲) دیدگاه اولری [۲۲] ۲۸

شکل۳-۲. نوسانات سرعت جریان در جریان آشفته نسبت به مقدار متوسط [۲۶] ۲۹

شکل۳-۳. مقایسه ی بین ساختار سلول‌های جریان ثانویه در کانال ۱) مستطیلی بسته ۲)مستطیلی بازصاف ۳)مستطیلی باز زبر ۴)ذوزنقه‌ای [۴] ۴۵

شکل۳-۴. خطوط بی بعد $(\overline{W}^2-\overline{V}^2)/U_{\max}^2$ برای ۱) کانال روباز مستطیلی ۲) کانال بسته مستطیلی ۳)کانال ذوزنقه‌ای [۴] ۴۷

شکل۳-۵. مقایسه‌ای بین توزیع تنش برشی در کانال مستطیلی (۵۳) و کانال‌های ذوزنقه‌ای با زوایای $(T_{23})\ \theta=32^\circ$, $(T_{03})\ \theta=44^\circ$ $(T_{13})\ \theta=60^\circ$ [۴] ۴۹

شکل۳-۶. وقوع سرعت طولی ماکزیمم در نزدیکی سطح آب [۸] ۵۰

شکل۳-۷. المان شبکه‌بندی[۲۲] ۶۵

شکل۴-۱. مشخصات مقطع عرضی کانال ۷۲

شکل۴-۲. هندسه کانال ایجاد شده در محیط نرم‌افزار ۷۲

شکل۴-۳. مشخصات مقاطع با زوایای داخلی مختلف ۷۳

شکل۴-۴. المان شبکه‌بندی از نوع چهار وجهی (Terahedral) [۳۲] ۷۶

شکل۴-۵. المان شبکه‌بندی از نوع شش وجهی (Hexahedral) [۳۲] ۷۶

شکل۴-۶. شبکه بندی محدوده‌ی کانال به کمک نرم‌افزار ۷۷

شکل۴-۷. ریز نمودن شبکه‌بندی در نواحی مربوط به سطح آب و دیواره‌ها ۷۸
شکل۴-۸. شماره‌گذاری کانال به قطعات مختلف ۷۹
شکل۴-۹. منحنی حساسیت‌سنجی برای سرعت متوسط عمقی ۸۰
شکل۴-۱۰. منحنی حساسیت‌سنجی برای تنش برشی ۸۰
شکل۴-۱۱. طرح شماتیکی از شرایط مرزی اعمال شده به کانال در محیط نرم‌افزار ۸۲
شکل۴-۱۲. مقایسه‌ی سلول‌های جریان ثانویه در داکت‌های مثلثی ۱)مدل آزمایشگاهی Aly[۱۱] ۲)مدل عددی ۸۵
شکل۴-۱۳. مقایسه‌ی سلول‌های جریان ثانویه در کانال ذوزنقه‌ای ۱)مدل آزمایشگاهی تومیناگا[۴] ۲) مدل عددی ۸۶
شکل۴-۱۴.روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در کانال مثلثی در فواصل۱)۲/۵ متری، ۲)۴/۸ متری ۳)۶/۵ متری از ورودی ۸۸
شکل۴-۱۵. صحت‌سنجی سرعت عمق میانگین براساس مدل آزمایشگاهی tR_1-t_1-H_{15} ۸۹
شکل۴-۱۶. صحت‌سنجی تنش‌برشی جداری براساس مدل آزمایشگاهی tR_1-t_1-H_{15} ۹۱
شکل۴-۱۷. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه برای مدل اغتشاشی SST ۹۶
شکل۴-۱۸. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه برای مدل اغتشاشی $K-\varepsilon$ ۹۷
شکل۴-۱۹. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه برای مدل اغتشاشی bLS ۹۸
شکل۴-۲۰. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه برای مدل اغتشاشی SSG ۹۹
شکل۴-۲۱. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه برای مدل اغتشاشی LLR ۱۰۰
شکل۴-۲۲. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی سرعت عمق میانگین برای پنج مدل اغتشاشی SSG ، LRR ، SST ، bLS ، $K-\varepsilon$ با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۰۱
شکل۴-۲۳. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تنش‌برشی جداری برای پنج مدل اغتشاشی SSG ، LRR ، SST ، bLS ، $K-\varepsilon$ با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۰۲
شکل۴-۲۴. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان برای ضریب Cr5=0.15 به ترتیب در فواصل ۲/۵ ، ۴/۸ و ۶/۵ متری از ورودی کانال ۱۰۴

شکل۴-۲۵. مقایسه‌ی سلول‌های تشکیل یافته در قسمت توسعه یافته‌ی کانال با ضریب Cr5=0.2 در فواصل ۲/۵ ، ۴/۸ و ۶/۵ متری از ورودی کانال ۱۰۵
شکل ۴-۲۶. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان برای ضریب Cr5=0.25 به ترتیب در فواصل ۲/۵ ، ۴/۸ و ۶/۵ متری از ورودی کانال ۱۰۶
شکل ۴-۲۷. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی سرعت میانگین برای سه ضریب Cr5=0.15 ، Cr5=0.2 و Cr5=0.25 با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۰۷
شکل ۴-۲۸. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تنش‌برشی جداری برای سه ضریب Cr5=0.15 ، Cr5=0.2 و Cr5=0.25 با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۰۸
شکل ۴-۲۹. روند حل معادلات در نرم‌افزار ANSYS-CFX برای رسیدن به سطح همگرایی 10^{-4} ..۱۰۹
شکل ۴-۳۰. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان برای سطح همگرایی 10^{-5} به ترتیب در فواصل ۲/۵ ، ۴/۸ و ۶/۵ متری از ورودی کانال ۱۱۰
شکل ۴-۳۱.مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی سرعت عمق میانگین برای سطوح همگرایی 10^{-4} و 10^{-5} با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۱۱
شکل ۴-۳۲. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تنش‌برشی جداری برای سطوح همگرایی 10^{-4} و 10^{-5} با نتایج مدلtR_1-t_1-H_{15}.....۱۱۲
شکل ۴-۳۳. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در حالت جداره‌ها با ارتفاع زبری معادل 0.0035m ...۱۱۴
شکل ۴-۳۴. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در حالت جداره‌ها با ارتفاع زبری معادل 0.011m.....۱۱۵
شکل ۴-۳۵. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی سرعت عمق میانگین برای جداره‌های با ارتفاع زبری معادل 0.0000003m ، 0.0035m و 0.011m با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۱۶
شکل ۴-۳۶. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تنش‌برشی جداری برای جداره‌های با ارتفاع زبری معادل 0.0000003m ، 0.0035m و 0.011m با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۱۷
شکل ۴-۳۷. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در حالت زبری نامتقارن جداره‌ها. ۱۱۸
شکل ۴-۳۸. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی سرعت عمق میانگین برای جداره‌های با ارتفاع زبری معادل 0.0000003m و ارتفاع زبری معادل غیریکنواخت با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۱۹

شکل ۴-۳۹. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تنش‌برشی جداری برای جداره‌های با ارتفاع زبری معادل 0.0000003m و ارتفاع زبری معادل غیریکنواخت با نتایج مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۲۰
شکل ۴-۴۰. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی سرعت عمق میانگین برای جداره‌های با ارتفاع زبری معادل غیریکنواخت با نتایج مدل S_2-H_{15} ۱۲۱
شکل ۴-۴۱. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تنش‌برشی جداری برای جداره‌های با ارتفاع زبری معادل غیریکنواخت با نتایج مدل S_2-H_{15} ۱۲۲
شکل ۴-۴۲. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در کانال با شیب کف S_0=0.001 . ..... ۱۲۳
شکل ۴-۴۳. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در کانال با شیب کف S_0=0.003 . ..... ۱۲۴
شکل ۴-۴۴. تغییرات حاصل در سرعت عمق میانگین تحت تأثیر تغییر در شیب کف کانال ۱۲۵
شکل ۴-۴۵. تغییرات حاصل در تنش‌برشی تحت تأثیر تغییر در شیب کف کانال ۱۲۶
شکل ۴-۴۶. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در کانال با شیب جانبی S=0.5 . ..... ۱۲۷
شکل ۴-۴۷. روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در کانال با شیب جانبی S=0.7 . ..... ۱۲۸
شکل ۴-۴۸. تغییرات سرعت در اثر تغییر در شیب جداره جانبی برای شیب‌های جانبی S=0.42 ، S=0.5 و S=0.7 و مقایسه با مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۲۹
شکل ۴-۴۹. تغییرات تنش‌برشی جداری در اثر تغییر در شیب جداره جانبی برای شیب‌های جانبی S=0.42 ، S=0.5 و S=0.7 و مقایسه با مدل tR_1-t_1-H_{15} ۱۳۰
شکل ۴-۵۰. مقایسه‌ی نتایج سرعت متوسط عمقی برای شیب جداره جانبی S=0.5 با نتایج مدل Tr_2-t_2-H_{15} ۱۳۱
شکل ۴-۵۱. مقایسه‌ی نتایج سرعت متوسط عمقی برای شیب جداره جانبی S=0.7 با نتایج مدل tR_3-t_3-H_{15} ۱۳۱
شکل ۴-۵۲. مقایسه‌ی نتایج تنش‌برشی جداری برای شیب جداره جانبی S=0.5 با نتایج مدل Tr_2-t_2-H_{15} ۱۳۲
شکل ۴-۵۳. مقایسه‌ی نتایج تنش‌برشی جداری برای شیب جداره جانبی S=0.7 با نتایج مدل tR_3-t_3-H_{15} ۱۳۲
شکل ۴-۵۴. روند شکل‌گیری سلول‌های در کانال برای ارتفاع حداکثر آب H_c=0.25m ۱۳۴

شکل ۴-۵۵. تغییرات حاصل در سرعت عمق میانگین تحت تأثیر تغییر در حداکثر ارتفاع آب ۱۳۵
شکل ۴-۵۶. تغییرات حاصل در تنش‌برشی جداری تحت تأثیر تغییر در حداکثر ارتفاع آب ۱۳۶
شکل ۴-۵۷.مقایسه‌ی نتایج سرعت متوسط عمقی برای ارتفاع حداکثر آب H_c=0.25m با نتایج مدل-tR_1 t_1-H_{15}.....۱۳۶
شکل ۴-۵۸. مقایسه‌ی نتایج تنش‌برشی جداری برای ارتفاع حداکثر آب H_c=0.25m با نتـایج مـدل -tR_1 t_1-H_{15}.....۱۳۷
شکل۴-۵۹. صحت‌سنجی سرعت عمق میانگین براساس مدل آزمایشگاهی tR_2-t_6-H_{15} (Lane).....۱۳۸
شکل۴-۶۰. صحت‌سنجی تنش‌برشی جداری براساس مدل آزمایشگاهی tR_2-t_6-H_{15} (Lane).....۱۳۸

فهرست علائم

علامت	نشانه
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
SKM	روش تحلیل شینوونایت
U_d	سرعت عمق میانگین
τ	تنش‌برشی
X	راستای طولی جریان
Y	راستای عمود بر جریان
Z	راستای عرضی جریان
W,V,U	مؤلفه های سرعت در جهات x و y و z
τ_{yx}	تنش رینولدزی در صفحه عمود بر راستای y در جهت x
τ_{zx}	تنش رینولدزی در صفحه عمود بر راستای z در جهت x
ρ	چگالی سیال
θ_0	زاویه کف کانال در راستای طولی با محور افق
g	شتاب ثقل
U	سرعت در راستای جریان
W	عرض سطح آزاد آب
y_0	رقوم بستر نسبت به دستگاه مختصات سراسری
y_s	رقوم سطح آب نسبت به دستگاه مختصات سراسری

علامت	نشانه
S_0	شیب بستر کانال
τ_b	تنش‌برشی بستر
S	شیب دیواره جانبی کانال
f	فاکتور اصطکاک دارسی-وایسباخ
ε_{zx}	ویسکوزیته گردابی بوزینسک
λ	ویسکوزیته گردابی بدون بعد
u_*	سرعت برشی
Γ	پارامتر جریان ثانویه
Φ	معادله تغییرات ارتفاع آب
YLM	روش تحلیلی یانگ ولیم
PMM	روش تحلیلی پراساد و مانسون
JMM	روش تحلیلی جوو ژولین
VAM	روش مساحت قائم
NAM	روش مساحت عمود
$(Rh)_i$	شعاع هیدرولیکی
P_i	پیرامون مرطوب
ε_{ij}	تانسور اتلاف

MPM	روش ستونی ادغام شده
S_{Mi}	کل نیروهای بدنه
P	فشار در هر نقطه سیال
P_t	لزجت سینماتیک
L	طول کانال
W', V', U'	مؤلفه های نوسانی متغیر با زمان
$\overline{U}$	سرعت متوسط
U'	سرعت نوسانی
$\tau_{ji,}\tau_{ij}$	تنش های رینولدز
μ_t	لزجت ادی
P_k	انرژی جنبشی تولیدی
K	انرژی جنبشی آشفتگی
ε	نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته
$\delta_k, \delta_\varepsilon$	اعداد پرانتل آشفتگی
RNG	مدل اصلاح شده $K-\varepsilon$
μ_{eff}	لزجت گردابه ای مؤثر
ω_k	سرعت زاویه ای
RSM	مدل تنش رینولذر
P_{ij}	تانسور تولید
ϕ_{IJ}	تانسور فشار- کرنش
D_{ij}	تانسور انتشار
LDA	بادسنج داپلر لیزری

SSG	اسپیزال ، سارکار ، گانسکی
ASM	مدل های تنش جبری
B	عرض کف
H	ارتفاع آب در کانال
Ψ	تابع جریان
$\overline{-vw}$	تنش برشی رینولدز
$\overline{w^2}$	تنش های عمودی رینولدز
FDM	روش تفاضل محدود
FEM	روش اجزای محدود
FVM	روش حجم محدود
V0F	روش حجم سیال
SST	انتقال تنش برشی
EL	اولرین- لاگرانژین
EE	اولرین- اولرین
θ	زاویه داخلی کانال
H_c	حداکثر ارتفاع آب در کانال
n	ضریب مانینگ
Q	دبی
δ	ارتفاع معادل زبری
PD	دامنه فیزیکی
CD	دامنه محاسباتی

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

رودخانه‌ها مجرای انتقال آب برروی زمین و منشاء خیر و برکت خداوند می‌باشند. علت ایجاد تمدن‌ها در مجاورت رودخانه‌ها را می‌توان نیاز بشر به آب و آسانی برداشت آب از رودخانه‌ها برای تأمین آب شرب و آبیاری اراضی کشاورزی دانست. به مرور زمان با افزایش جمعیت، شهرها به نواحی دیگری که منابع آب به آسانی در دسترس نیست، گسترش یافتند. امروزه با ایجاد شهرهای با جمعیت زیاد و توسعه یافتن جوامع، مصارف آب افزایش زیادی یافته و استفاده از آب‌های زیرزمینی به تنهایی، تأمین کننده‌ی آب مورد نیاز نمی‌باشد.

از این رو بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی و انتقال آب از یک مکان به مکان دیگر به منظور آبیاری و آبرسانی به عنوان یک ضرورت اساسی مورد توجه است. در میان روش‌های مختلف انتقال آب، استفاده از نیروی ثقل و به حرکت درآوردن آب به صورت جریان با سطح آزاد در کانال‌ها، از متداول‌ترین روش‌ها در آبرسانی، آبیاری، جمع‌آوری و انتقال فاضلاب و یا آب‌های سطحی می‌باشد. جریان در کانال‌های روباز، حرکت آب در آبراهه‌های طبیعی(نظیر رودخانه‌ها و نهرها)، آبراهه‌های مصنوعی(نظیر کانال آبرسانی و کانال‌های آبیاری و زهکشی)، شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب را شامل می‌گردد. جریان این کانال‌ها از پیچیدگی بیشتری نسبت به جریان در مجاری تحت فشار برخوردار می‌باشد. در جریان تحت فشار که می‌توان آن را جریان در مجاری بسته نیز نامید، تمام مایع درون یک مرز جامد محصور شده است، مرزهای حرکت مایع در تماس با جدار جامد می‌باشد ولی در کانال رو باز، مایع در حرکت، در تمام مرزها در تماس با جدار جامد نمی‌باشد، بلکه یک مرز در تمام مسیر در معرض فشار اتمسفر قرار دارد. اگر چه جریان در مجاری تحت فشار و جریان در کانال‌های رو باز از اصول حاکم بر حرکت سیالات تبعیت می‌کنند، ولی عواملی باعث پیچیده بودن جریان کانال‌های رو باز نسبت به مجاری تحت فشار شده است که در زیر به پاره‌ای از آنها اشاره می‌شود:

۱- جریان در کانال‌های رو باز درجه آزادی بیشتری نسبت به جریان در مجاری تحت فشار دارد و این درجه آزادی قابلیت تغییر عمق می‌باشند، لذا با تغییر در شیب کانال‌ها و یا ایجاد موانع و تغییر در مسیر جریان، نیروی ثقل تغییر نموده و در نتیجه موقعیت سطح آزاد آب و به دنبال آن سایر مشخصات جریان تغییر خواهد کرد.

۲- در کانال‌های رو باز وابستگی بیشتری بین پارامترهای هیدرولیکی مشاهده می‌شود، به عنوان مثال، در یک جریات تحت فشار، سرعت هنگامی تغییر می‌کند که مقطع جریان تغییر کند ولی سرعت در کانال رو باز، بستگی به شیب طولی کانال، زبری جداری مقطع، مساحت مقطع، شکل مقطع و سایر پارامترهای هیدرولیکی

جریان داردکانال‌ها با مقاطع مختلف همچون مثلث، مستطیل، ذوزنقه‌ای به اقتضای شرایط کمی و کیفی سیال و محیط طراحی و ساخته می‌شوند. از این‌رو شناخت پارامترهای مؤثر بر جریان در رودخانه‌ها و کانال‌های مصنوعی، به منظور طراحی بهینه و جلوگیری از خطرات احتمالی، توجه مهندسین علم هیدرولیک را به خود جلب نموده است. به همین دلیل در کانال‌های باز، شناسایی و تشخیص کمیت‌های مختلف جریان مانند خطوط هم سرعت، توزیع سرعت عرضی، پروفیل سرعت عمقی، دبی و جریان‌های ثانویه در مقطع جریان از اهمیت زیادی برخوردار است. جریان‌های ثانویه از مسائل حائز اهمیت در نحوه توزیع تنش و مسئله پایداری دیواره‌ها و بستر کانال در مقابل فرسایش و همچنین تخمین ضریب انتشار آلودگی می‌باشند. در حال حاضر به صورت نظری و آزمایشگاهی اثبات شده است که مؤلفه‌های عرضی سرعت میانگین در طول رژیم‌های جریان آشفته تشکیل می‌شوند. این مؤلفه‌های عرضی که به همراه مؤلفه طولی جریان‌های پایدار خطوط جریان Spiral را تشکیل می‌دهند، به صورت طولی در جریان‌های یکنواخت در یک مقطع عبوری غیردایروی وجود دارند و تشکیل جریان‌های ثانویه را می‌دهند [۱]. جریان‌های ثانویه در صفحه‌ی مقطع جریان به وجود می‌آیند. اینگونه جریان‌ها در انحناها بسیار قوی‌تر از کانال بدون انحنا می‌باشند که این امر به دلیل تأثیر زبری جداره و نامنظمی مقطع می-باشد[۲].

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

یکی از پیش نیازهای قابل توجه در بررسی موضوعات مهم مختلفی از جمله مدیریت و مدل‌سازی آلودگی، مطالعات زیست محیطی و مدیریت بحران، تحقیقات علمی در زمینه‌های مختلف هیدرولیکی از جمله فرسایش و آبشستگی، رسوب‌گذاری، توزیع طولی و عرضی سرعت می‌باشد[۳].

در برآورد بسیاری از مشخصات هیدرولیکی، تخمین توزیع سرعت جریان، از اهمیت بالایی برخوردار است. توزیع سرعت عرضی در مقطع کانال به عوامل متعددی همچون سرعت متوسط جریان، شکل مقطع، زبری جداره‌های کانال، چگالی و لزجت سیال، جریان‌های ثانویه و وجود انحنا در مسیر کانال بستگی دارد. در جریان‌های کم عمق و عریض یا در کانال‌های خیلی صاف، سرعت بیشینه ممکن است در سطح آزاد جریان اتفاق بیفتد. در حالی که در کانال‌های باریکتر سرعت بیشینه در نزدیکی سطح آزاد و در فاصله تا ۰/۲۵ عمق

جریان از سطح آزاد اتفاق می‌افتد. علت اصلی اینکه سرعت بیشینه در نزدیکی سطح آزاد پیش می‌آید، بیش از آن که تحت تأثیر تنش برشی ناشی از مقاومت هوا باشد، تحت تأثیر جریان‌های ثانویه ضعیف است[۲].

از دیگر مسائلی که در این کانال‌ها مهم است و در طراحی کانال‌ها نقش بسزایی دارد، رسوب‌گذاری در کف کانال است که منجر به کاهش ظرفیت انتقال کانال می‌شود. در این میان نیز وجود جریان‌های ثانویه به دلیل اثرات قابل توجهی که روی میدان جریان اصلی و نحوه‌ی رسوب‌گذاری و انتقال رسوب دارد، نیازمند توجه بیشتر است.

جریان‌های ثانویه، ساختارهای سه بعدی ایجاد و جریان میانگین اصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۴]. تومیناگا و همکاران (۱۹۸۹)، اهمیت بررسی جریان‌های ثانویه در مهندسی هیدرولیک در جریان کانال‌های روباز را به دلیل اثر این جریان‌ها روی میدان جریان میانگین اصلی، قانون اصطکاک، تشکیل پیکربندی سه بعدی بستر از قبیل نوارهای شنی و انتقال رسوب با اهمیت می‌دانند[۵] . نتایج نشان می‌دهد که سلول‌های جریان‌های ثانویه روی توزیع تنش برشی مرزی تأثیر می‌گذارند[۶].

جریان‌های عرضی (ثانویه) به صورت قابل توجهی فرآیندهای انتقال اختلاط و گرما و جرم را افزایش می‌دهند، نیروهای هیدرودینامیکی را روی پیرامون مرطوب کانال باز توزیع می‌کنند، نواحی با کسر رسوبات را ایجاد می‌کنند و به موجب آن وقوع انبساط محیط با پایداری-های متفاوت را توسعه می‌دهند[۱].

مطالعات زیادی برروی مقاطع ذوزنقه‌ای به دلیل کاربرد وسیع آن‌ها، توسط محققین متعددی از جمله Knight و همکاران [۷] صورت گرفته است. در این تحقیق به بررسی و مطالعه عددی مقاطع مثلثی که کاربرد زیادی در جمع آوری آب‌های سطحی و کارهای آزمایشگاهی دارد، پرداخته شده و الگوی جریان ثانویه و توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در آن ارائه شده است. مدل‌سازی با نرم‌افزار ANSYS-CFX انجام شده است.

۱-۳- اهداف تحقیق

در این تحقیق با بکارگیری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به بررسی الگوی جریان ثانویه در کانال مثلثی پرداخته، توزیع سرعت و تنش برشی، و اثراتی نظیر تغییر در شیب جداره، نسبت ابعادی کانال، زبری جداره‌ها روی مشخصات جریان مورد بررسی قرار گرفته است. انواع مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار ANSYS-

CFX بکار گرفته شد تا کارایی این مدل‌ها در مدل کردن سلول‌های جریان ثانویه بررسی و مقایسه شود. از اینرو اهداف تحقیق عبارت است از:

۱. بررسی قابلیت CFD برای مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه؛

۲. بررسی عددی الگوی جریان ثانویه در کانال‌های مثلثی

۳. گزینش شرایط مرزی و مش‌بندی مناسب در مدل‌سازی صحیح این سلول‌ها

انتخاب بهترین مدل اغتشاشی برای مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه

۴ . بررسی عددی توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برش در جریان کانال مثلثی و اثر سلول‌های جریان روی این توزیع

۵. بررسی اثر نسبت ابعادی کانال روی نحوه ی تشکیل این سلول‌ها

۶. بررسی اثر تغییر در زبری جداره‌ها روی این سلول‌ها

۷. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با اطلاعات آزمایشگاهی

۸. بررسی اثر تغییر در شیب کف کانال روی مشخصات جریان

۱-۴- فرضیات

فرضیاتی که در این تحقیق به منظور ساده‌سازی در نظر گرفته شدند، عبارتند از:

۱. سیال تراکم‌ناپذیر است.

۲. سیال نیوتونی است.

۳. سیال لزج است.

۴. دما ثابت است.

این تحقیق شامل پنج فصل بوده، که پس از مقدمه‌ای راجع به موضوع، ضرورت انجام تحقیق و اهداف تحقیق در فصل دوم پیشینه‌ای از کارها و مطالعات انجام شده در زمینه‌ی موضوع مورد مطالعه در سه بخش تجربی، تحلیلی و عددی ارائه می‌شود. در بخش سوم به بیان مبانی نظری مرتبط با پروژه پرداخته خواهد شد. معادلات حاکم بر جریان سیال در کانالها، مفهوم آشفتگی، معادلات حاکم برجریان آشفته، مدل‌های آشفتگی، نحوه و عامل شکل‌گیری جریان‌های ثانویه، دینامیک سیالات محاسباتی، معرفی روش‌های عددی و معرفی چند نرم-

افزار در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. فصل چهارم مدل‌سازی عددی انجام شده به تفضیل توضـیح داده می‌شود و نتایج این مدل‌سازی‌ها ارائه و بحث می‌شود، عوامل موثر در مشخصات جریان مانند زبـری جـداره‌هـا، شیب کف کانال،حداکثر ارتفاع آب کانال مورد توجه قرار گرفته و تاثیر تغییر این پارامترها بر مشخصات جریـان مورد بررسی قرار گرفت. و در نهایت فصل پنجم شامل نتیجه‌گیری‌های کلـی و نهـایی از مطالعـه و ارائـه چنـد پیشنهاد برای ادامه کار برروی این تحقیق می‌باشد.