





دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه زاینده رود با استفاده از نرم افزار CCHE2D

نگارنده : حامد کبیری

استاد راهنما

صمد امامقلی زاده

استاد مشاور

زهرا گنجی

خرداد ۱۳۹۶

تقدیم اثر

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی من است.

به استوارترین تکیه‌گاهم :

دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگی‌ام :

چشمان سبز مادرم

که هرچه آموخته‌ام در مکتب عشق شما آموخته‌ام و هرچه بکوشم قطره‌ای

از دریای بی‌کران مهربانی‌تان را سپاس نتوان بگویم

امروز هستیم به امید شماسست و فردا کلید باغ بهشت‌م رضای شما

آوردی گران‌قدرتر از این نداشتم تا خاک پایتان نثار کنم

باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگی‌تان را بزدايد

بوسه بر دستان پرمهرتان.

تشکر و قدردانی

به نام خدایی که هستی مان بخشید و به طریق علم دانش رهنمونمان شد.

به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود.

خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزی مان ساخت .

با سپاس از سه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ...

موهایشان سفید گشت تا ما روسفید گردیم ...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند ...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

تعهد نامه

این جانب **حامد کبیری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **سازه‌های آبی** دانشکده **مهندسی کشاورزی** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه زاینده‌رود با استفاده از نرم‌افزار **CCHE2D** تحت راهنمایی دکتر **صمد امامقلی زاده** و سرکار خانم دکتر **زهرا گنجی** متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
 - در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
 - مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
 - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
 - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

تغییرات مورفولوژی رودخانه می‌توانند مشکلات فراوانی را در مدیریت رودخانه از قبیل افزایش دادن تراز بستر رودخانه، تغییر دادن پروفیل سطح آب، تغییر در مسیر حرکت رودخانه، فرسایش یافتن بستر رودخانه، عریض شدن بستر رودخانه و تأثیر گذاشتن بر زمین‌های کشاورزی اطراف رودخانه، تأثیرات منفی برسازه‌های ساخته‌شده در اطراف رودخانه، از بین رفتن پوشش گیاهی اطراف رودخانه و کاهش مقاومت در برابر سیلاب را ایجاد کنند. به این خاطر یکی از راه‌های مهم و موردنیاز جهت مدیریت رودخانه و کاهش هزینه و خسارت‌های احتمالی بررسی کردن تغییرات مورفولوژی و برنامه‌ریزی بلندمدت طبق این بررسی‌ها است. با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش تغییرات مورفولوژی بازه‌ای از رودخانه زاینده‌رود که در مرکز ایران قرار دارد بررسی گردیده است. در این پژوهش به بررسی تغییرات مورفولوژی و فرسایش بازه‌ای از رودخانه زاینده‌رود به طول ۱۱ کیلومتر در شرق شهر اصفهان از پل چوم با طول جغرافیایی ۵۱،۴۶۱۳ و عرض جغرافیایی ۳۲.۳۵۰۶ و ارتفاع ۱۵۷۶ تا روستای گلستانه با استفاده از مدل عددی CCHE2D پرداخته‌شده است. بدین منظور با استفاده از ماکزیمم دبی‌های سالانه ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری پل چوم و استفاده از توزیع پیرسون ۵ پارامتره دبی رودخانه با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه‌شده است، پس‌از آن شبیه‌سازی جریان با استفاده از مقاطع عرضی نقشه‌برداری شده با مقیاس ۱ به ۲۵۰۰۰، اطلاعات مربوط به آزمایش دانه‌بندی ذرات بستر رودخانه و مشخص کردن ضریب زبری مانینگ در دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله صورت گرفته است. درنهایت با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D شبیه‌سازی جریان انجام پذیرفته است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که جریان در دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله زیربحرانی بوده و فقط در دبی‌های بالای ۱۴۰ مترمکعب بر ثانیه یعنی دوره بازگشت ۵۰ ساله جریان در نقاطی فوق بحرانی است. همچنین سرعت و تنش برشی در چهار مقطع عرضی در طول بازه موردبررسی قرار گرفته که نشان می‌دهد سرعت و تنش برشی در ابتدای بازه و خم‌های ابتدایی کم و قابل‌قبول است. اما در خم ۱۸۰ درجه انتهایی بازه میزان تغییرات سرعت و تنش برشی بسیار شدید و مقدار عددی آن بسیار زیاد بوده است. با مقایسه تنش برشی با تنش برشی بحرانی این نتیجه حاصل می‌شود در خم‌های ابتدایی بازه تا دوره بازگشت ۲۰ ساله فرسایشی حاصل نشده است اما در قسمت انتهایی بازه حتی با دبی در دوره بازگشت ۵ ساله در قوس خارجی فرسایش ایجاد می‌شود. در ادامه مقایسه فرسایش در دوره بازگشت‌های متفاوت و مقاطع مختلف صورت گرفته است که نشان می‌دهد بیشترین فرسایش در قوس خارجی مقطع ۴ ایجادشده است. همچنین تغییرات مورفولوژی بازه موردنظر با مطالعه تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۲ میانگین شعاع انحنا ۱۹۴/۴۵ متر و میانگین طول قوس‌ها برابر ۳۱۵/۴۵ متر بوده که در سال ۲۰۱۶ میانگین شعاع انحنا به ۱۹۰/۵ متر و میانگین طول قوس‌ها به ۳۳۶/۲ متر تغییر یافته است، همچنین

بامطالعه زوایای مرکزی مشخص گردید در سال ۲۰۰۲، ۳۷/۵ درصد از خمها از نوع پیچانرود توسعه نیافته، ۵۸/۳ درصد پیچانرود توسعه یافته و ۲۰/۸ درصد پیچانرود زیاد توسعه یافته است و در سال ۲۰۱۶، ۴/۲ درصد از خمها شبه پیچانرود، ۲۰/۸ درصد خمها پیچانرود توسعه نیافته، ۵۴/۲ درصد خمها پیچانرود توسعه یافته و ۲۰/۸ درصد خمها پیچانرود زیاد توسعه یافته است. که نشان دهنده تغییرات بستر رودخانه باگذشت زمان است.

کلمات کلیدی: تغییرات مورفولوژی، تنش برشی، سرعت جریان، مدل CCHE2D، رودخانه زاینده رود، عکسهای هوایی، شبیه سازی جریان، Arc GIS

مقالات مستخرج از پایان نامه:

- ۱- شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه زاینده‌رود در حالت غیر ماندگار با استفاده از مدل CCHE2D. اولین همایش ملی کشاورزی، منابع طبیعی و دامپزشکی. دانشگاه اردکان یزد. ۱۳۹۶/۰۲/۲۱.
- ۲- بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه تحت تأثیر تنش برشی در قوسی ۱۸۰ درجه با استفاده از مدل CCHE2D. اولین همایش ملی کشاورزی، منابع طبیعی و دامپزشکی. دانشگاه اردکان یزد. ۱۳۹۶/۰۲/۲۱.

فهرست مطالب

موضوع	صفحه
فصل اول (مبانی و کلیات تحقیق).....	۱
۱-۱-مقدمه.....	۲
۲-۱-ضرورت تحقیق.....	۲
۳-۱-اهداف پایان نامه.....	۴
۴-۱-ساختار پایان نامه.....	۵
فصل دوم (کلیات و پیشینه تحقیق).....	۷
۱-۲-مقدمه.....	۸
۲-۲-تعریف مورفولوژی.....	۸
۱-۲-۲-علم مورفولوژی.....	۸
۲-۲-۲-تغییرات مورفولوژی.....	۸
۳-۲-۲-دلایل بروز تغییرات مورفولوژی.....	۹
۳-۲-فرم بستر رودخانه‌های آبرفتی.....	۱۱
۱-۳-۲-تعریف فرم بستر رودخانه.....	۱۱
۲-۳-۲-انواع فرم بستر.....	۱۱
۴-۲-مروری بر مطالعات گذشته.....	۱۲
۵-۲-جمع‌بندی.....	۲۷
فصل سوم (مواد و روش‌ها).....	۲۹
۱-۳-مقدمه.....	۳۰
۲-۳-معرفی رودخانه زاینده‌رود.....	۳۰
۱-۲-۳-محدوده مورد مطالعه.....	۳۱

- ۳۲-۳-مدل عددی..... ۳۲
- ۳۳-۴-معرفی نرم افزار..... ۳۳
- ۳۵-۵-معادلات حاکم بر جریان آب و رسوب در مدل CCHE2D..... ۳۵
- ۳۵-۱-۵-۳-معادلات هیدرولیکی حاکم بر جریان..... ۳۵
- ۳۵-۲-۵-۳-مدل های آشفتگی..... ۳۵
- ۳۶-۱-۲-۵-۳-مدل های مبتنی بر لزجت گردابه ای..... ۳۶
- ۳۷-۲-۲-۵-۳-مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ ۳۷
- ۳۸-۳-۵-۳-معادلات حاکم بر محاسبات انتقال رسوب..... ۳۸
- ۳۸-۱-۳-۵-۳-معادلات انتقال رسوب متوسط گیری شده در عمق..... ۳۸
- ۴۰-۶-۳-روش های حل معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال رسوب..... ۴۰
- ۴۱-۱-۶-۳-روش حل معادلات جریان..... ۴۱
- ۴۲-۲-۶-۳-روش حل پدیده های جابه جایی و پخش..... ۴۲
- ۴۵-۷-۳-مراحل استفاده از مدل CCHE2D..... ۴۵
- ۴۵-۱-۷-۳-تولید شبکه محاسباتی..... ۴۵
- ۴۶-۱-۱-۷-۳-وارد نمودن اطلاعات هندسی در مدل CCHE-Mesh..... ۴۶
- ۴۶-۲-۱-۷-۳-ارزیابی شبکه..... ۴۶
- ۴۷-۳-۱-۷-۳-درون یابی رقوم بستر..... ۴۷
- ۴۷-۲-۷-۳-مشخص نمودن شرایط مرزی..... ۴۷
- ۴۷-۳-۷-۳-تنظیم پارامترها..... ۴۷
- ۴۷-۴-۷-۳-شبیه سازی..... ۴۷
- ۴۸-۵-۷-۳-شرح و تفسیر نتایج..... ۴۸
- ۴۸-۸-۷-۳-تولید شبکه محاسباتی برای رودخانه زاینده رود..... ۴۸

۴۸	.....بارگذاری اطلاعات توپوگرافی
۵۰	.....تعریف مرزهای محاسباتی
۵۰	.....Algebraic تولید شبکه محاسباتی با روش
۵۰	.....تنظیم پارامترهای همواری مرزها و توابع تغییر شکل
۵۱	.....ارزیابی شبکه محاسباتی
۵۲	.....درون‌یابی رقوم بستر
۵۲	.....مدل‌سازی جریان آب و رسوب
۵۲	.....مقدمه
۵۲	.....مشخص نمودن دبی جریان با دوره بازگشت متفاوت
۵۳	.....باز کردن فایل هندسی
۵۴	.....تنظیم شرایط اولیه جریان
۵۵	.....تنظیم پارامترهای جریان
۵۵	.....پارامترهای شبیه‌سازی
۵۷	.....تنظیم شرایط مرزی ورودی و خروجی
۵۷	.....کالیبره کردن نرم‌افزار
۵۹	.....دانه‌بندی ذرات بستر
۶۰	.....اجرای مدل
۶۰	.....محاسبه سرعت و تنش بحرانی
۶۱	.....روش کار با تصاویر ماهواره‌ای
۶۱	.....محاسبه ضریب خمیدگی
۶۱	.....محاسبه زاویه مرکزی
۶۳	.....فصل چهارم (نتایج)

۶۴	۱-۴-مقدمه.....
۶۴	۲-۴-نتایج حاصل از شبکه‌بندی مدل.....
۶۵	۱-۲-۴-فراخوانی اطلاعات توپوگرافی.....
۶۶	۲-۲-۴-نتایج مربوط به مرزهای محاسباتی.....
۶۷	۳-۲-۴-نتایج حاصل از شبکه‌بندی با روش Algebraic.....
۶۸	۴-۲-۴-نتایج هموار نمودن مرزها.....
۶۸	۵-۲-۴-نتایج حاصل از ارزیابی شبکه محاسباتی.....
۶۹	۶-۲-۴-نتایج حاصل از درون‌یابی رقوم ارتفاع بستر.....
۶۹	۷-۲-۴-نمایش شبکه تولیدشده در CCHE-MESH.....
۷۰	۳-۴-نتایج حاصل از دبی رودخانه با دوره بازگشت‌های متفاوت.....
۷۱	۴-۴-نتایج حاصل از کالیبراسیون نرم‌افزار.....
۷۷	۵-۴-نتایج حاصل از دانه‌بندی.....
۷۸	۶-۴-محاسبه تنش برشی در آستانه حرکت و سرعت بحرانی.....
۷۸	۷-۴-نتایج اجرای اصلی مدل.....
۷۹	۱-۷-۴-نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت پنج‌ساله.....
۸۴	۲-۷-۴-نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت ده‌ساله.....
۸۹	۳-۷-۴-نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت بیست‌ساله.....
۹۴	۴-۷-۴-نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت پنجاه‌ساله.....
۹۸	۸-۴-بررسی تنش برشی هر مقطع.....
۱۰۳	۹-۴-مقایسه تنش برشی در مقاطع متفاوت.....
۱۰۵	۱۰-۴-نتایج حاصل از عکس‌های هوایی.....
۱۰۵	۱-۱۰-۴-تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده.....

۱۰۷.....	۲-۱۰-۴- بررسی شعاع انحنای.....
۱۰۸.....	۳-۱۰-۴- محاسبه طول قوس‌ها.....
۱۰۹.....	۴-۱۰-۴- ضریب خمیدگی.....
۱۱۰.....	۵-۱۰-۴- زاویه مرکزی.....
۱۱۳.....	فصل پنجم (نتیجه‌گیری).....
۱۱۴.....	۱-۵- مقدمه.....
۱۱۴.....	۲-۵- نتایج مربوط به شبیه‌سازی جریان.....
۱۱۵.....	۳-۵- نتایج مربوط به مطالعه تصاویر ماهواره‌ای.....
۱۱۵.....	۴-۵- ارائه پیشنهادها.....
۱۱۶.....	فهرست و منابع.....

فهرست شکل‌ها

صفحه	موضوع
۱۴.....	شکل (۱-۲) نمای کلی شبیه‌سازی جریان در رودخانه زهره.....
۱۴.....	شکل (۲-۲) تغییرات تنش برشی در مقطع عرضی رودخانه زهره.....
۳۱.....	شکل (۱-۳) موقعیت حوزه آبریز زاینده‌رود و منطقه مطالعاتی بر روی نقشه.....
۳۹.....	شکل (۲-۳) نمایش الگوی جریان و انتقال رسوب در ستون قائم.....
۴۱.....	شکل (۳-۳) المان نه و چهار گره‌ای در یک شبکه جابه‌جاشده.....
۴۴.....	شکل (۴-۳) جواب دقیق برای مسئله جابه‌جایی-پخش بک بعدی.....
۴۹.....	شکل (۵-۳) نمایی از رودخانه زاینده‌رود بعد از پل چوم در زمان نقشه‌برداری.....
۴۹.....	شکل (۶-۳) مسیر نقشه‌برداری شده از زاینده‌رود.....
۴۹.....	شکل (۷-۳) پروفیل طولی از منطقه مطالعاتی.....

- شکل (۳-۸) نمایی از اطلاعات مربوط به مقاطع عرضی..... ۵۰
- شکل (۳-۹) پنجره مربوط به هموار نمودن مرزها..... ۵۱
- شکل (۳-۱۰) پنجره مربوط به اطلاعات ورودی جریان..... ۵۴
- شکل (۳-۱۱) پنجره مربوط به پارامترهای شبیه‌سازی..... ۵۵
- شکل (۴-۱) داده‌های تنظیم‌شده در نرم‌افزار Notpad..... ۶۵
- شکل (۴-۲) نمایی از فراخوانی اطلاعات توپوگرافی در مدل..... ۶۶
- شکل (۴-۳) مرزبندی محدوده مطالعاتی..... ۶۶
- شکل (۴-۴) شبکه‌بندی محدوده مطالعاتی..... ۶۷
- شکل (۴-۵) نمایی نزدیک‌تر از شبکه‌بندی محدوده مطالعاتی..... ۶۷
- شکل (۴-۶) هموار شدن مرزها..... ۶۸
- شکل (۴-۷) درون‌یابی رقوم بستر..... ۶۹
- شکل (۴-۸) شبکه تولیدشده توسط مدل CCHE-MESH..... ۶۹
- شکل (۴-۹) مدل سه‌بعدی ارتفاع رقوم بستر..... ۷۰
- شکل (۴-۱۰) نمودار توزیع لوگ پیرسون ۵..... ۷۰
- شکل (۴-۱۱) ارتفاع آب برای مدل K-ε..... ۷۱
- شکل (۴-۱۲) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length..... ۷۱
- شکل (۴-۱۳) ارتفاع سطح آب مدل Parabolic..... ۷۲
- شکل (۴-۱۴) ارتفاع آب برای مدل K-ε..... ۷۲
- شکل (۴-۱۵) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length..... ۷۲
- شکل (۴-۱۶) ارتفاع سطح آب مدل Parabolic..... ۷۳
- شکل (۴-۱۷) ارتفاع آب برای مدل K-ε..... ۷۳
- شکل (۴-۱۸) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length..... ۷۳

- شکل (۴-۱۹) ارتفاع سطح آب مدل Parabolic ۷۴
- شکل (۴-۲۰) ارتفاع آب برای مدل K-ε ۷۴
- شکل (۴-۲۱) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length ۷۴
- شکل (۴-۲۲) ارتفاع سطح آب مدل Parabolic ۷۵
- شکل (۴-۲۳) ارتفاع آب برای مدل K-ε ۷۵
- شکل (۴-۲۴) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length ۷۵
- شکل (۴-۲۵) ارتفاع سطح آب مدل Parabolic ۷۶
- شکل (۴-۲۶) نمودار دانه‌بندی ذرات بستر ۷۷
- شکل (۴-۲۷) نمایش مقاطع موردبررسی روی حوضه ۷۹
- شکل (۴-۲۸) رقوم سطح آب ۸۰
- شکل (۴-۲۹) تغییرات عدد فرود ۸۰
- شکل (۴-۳۰) نمودار تغییرات فرود در مقطع طولی ۸۱
- شکل (۴-۳۱) نمودار تنش برشی مقطع اول ۸۱
- شکل (۴-۳۲) نمودار تغییرات سرعت مقطع اول ۸۱
- شکل (۴-۳۳) نمودار تنش برشی مقطع دوم ۸۲
- شکل (۴-۳۴) نمودار تغییرات سرعت مقطع دوم ۸۲
- شکل (۴-۳۵) نمودار تنش برشی مقطع سوم ۸۳
- شکل (۴-۳۶) نمودار تغییرات سرعت مقطع سوم ۸۳
- شکل (۴-۳۷) نمودار تنش برشی مقطع چهارم ۸۴
- شکل (۴-۳۸) نمودار تغییرات سرعت مقطع چهارم ۸۴
- شکل (۴-۳۹) رقوم سطح آب ۸۵
- شکل (۴-۴۰) شاخص فرود ۸۵

- شکل (۴-۴۱) نمودار تغییرات فرود در مقطع طولی..... ۸۵
- شکل (۴-۴۲) نمودار تنش برشی مقطع اول..... ۸۶
- شکل (۴-۴۳) نمودار تغییرات سرعت مقطع اول..... ۸۶
- شکل (۴-۴۴) نمودار تنش برشی مقطع دوم..... ۸۶
- شکل (۴-۴۵) نمودار تغییرات سرعت مقطع دوم..... ۸۷
- شکل (۴-۴۶) نمودار تنش برشی مقطع سوم..... ۸۷
- شکل (۴-۴۷) نمودار تغییرات سرعت مقطع سوم..... ۸۷
- شکل (۴-۴۸) نمودار تنش برشی مقطع چهارم..... ۸۸
- شکل (۴-۴۹) نمودار تغییرات سرعت مقطع چهارم..... ۸۸
- شکل (۴-۵۰) رقوم سطح آب..... ۸۹
- شکل (۴-۵۱) شاخص فرود..... ۹۰
- شکل (۴-۵۲) نمودار تغییرات فرود در مقطع طولی..... ۹۰
- شکل (۴-۵۳) نمودار تنش برشی مقطع اول..... ۹۰
- شکل (۴-۵۴) نمودار تغییرات سرعت مقطع اول..... ۹۱
- شکل (۴-۵۵) نمودار تنش برشی مقطع دوم..... ۹۱
- شکل (۴-۵۶) نمودار تغییرات سرعت مقطع دوم..... ۹۱
- شکل (۴-۵۷) نمودار تنش برشی مقطع سوم..... ۹۲
- شکل (۴-۵۸) نمودار تغییرات سرعت مقطع سوم..... ۹۲
- شکل (۴-۵۹) نمودار تنش برشی مقطع چهارم..... ۹۳
- شکل (۴-۶۰) نمودار تغییرات سرعت مقطع چهارم..... ۹۳
- شکل (۴-۶۱) رقوم سطح آب..... ۹۴
- شکل (۴-۶۲) شاخص فرود..... ۹۴

- شکل (۴-۶۳) نمودار تغییرات فرود در مقطع طولی..... ۹۵
- شکل (۴-۶۴) نمودار تنش برشی مقطع اول..... ۹۵
- شکل (۴-۶۵) نمودار تغییرات سرعت مقطع اول..... ۹۵
- شکل (۴-۶۶) نمودار تنش برشی مقطع دوم..... ۹۶
- شکل (۴-۶۷) نمودار تغییرات سرعت مقطع دوم..... ۹۶
- شکل (۴-۶۸) نمودار تنش برشی مقطع سوم..... ۹۷
- شکل (۴-۶۹) نمودار تغییرات سرعت مقطع سوم..... ۹۷
- شکل (۴-۷۰) نمودار تنش برشی مقطع چهارم..... ۹۸
- شکل (۴-۷۱) نمودار تغییرات سرعت مقطع چهارم..... ۹۸
- شکل (۴-۷۲) نمودار مقایسه تنش برشی مقطع اول با تنش بحرانی..... ۹۹
- شکل (۴-۷۳) نمودار مقایسه تنش بیشینه مقطع اول با تنش بحرانی..... ۹۹
- شکل (۴-۷۴) نمودار مقایسه تنش برشی مقطع دوم با تنش بحرانی..... ۱۰۰
- شکل (۴-۷۵) نمودار مقایسه تنش بیشینه مقطع دوم با تنش بحرانی..... ۱۰۰
- شکل (۴-۷۶) نمودار مقایسه تنش برشی مقطع سوم با تنش بحرانی..... ۱۰۱
- شکل (۴-۷۷) نمودار مقایسه تنش بیشینه مقطع سوم با تنش بحرانی..... ۱۰۱
- شکل (۴-۷۸) نمودار مقایسه تنش برشی مقطع چهارم با تنش بحرانی..... ۱۰۲
- شکل (۴-۷۹) نمودار مقایسه تنش بیشینه مقطع چهارم با تنش بحرانی..... ۱۰۲
- شکل (۴-۸۰) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۵ ساله..... ۱۰۳
- شکل (۴-۸۱) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۱۰ ساله..... ۱۰۳
- شکل (۴-۸۲) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۲۰ ساله..... ۱۰۴
- شکل (۴-۸۳) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۲۰ ساله..... ۱۰۴
- شکل (۴-۸۴) تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۶..... ۱۰۵

- شکل (۴-۸۵) عکس هوایی تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۰۲..... ۱۰۶
- شکل (۴-۸۶) دواير مماس بر خم‌های مسیر رودخانه در سال ۲۰۰۲..... ۱۰۶
- شکل (۴-۸۷) دواير مماس بر خم‌های مسیر رودخانه در سال ۲۰۱۶..... ۱۰۷
- شکل (۴-۸۸) شعاع انحنا در بازه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶..... ۱۰۷
- شکل (۴-۸۹) تغییرات طول قوس در بازه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶..... ۱۰۸
- شکل (۴-۹۰) نمودار ضریب خمیدگی در بازه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰..... ۱۱۰
- شکل (۴-۹۱) نمودار زاویه مرکزی در بازه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶..... ۱۱۱

فهرست جدول‌ها

- جدول (۳-۱) ماکسیمم دبی سالانه ۵۳
- جدول (۳-۲) مراحل کالیبراسیون ۵۹
- جدول (۴-۱) دوره بازگشت و دبی جریان ۷۱
- جدول (۴-۲) نتایج کالیبراسیون ۷۶
- جدول (۴-۳) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۱ ۹۹
- جدول (۴-۴) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۲ ۱۰۰
- جدول (۴-۵) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۳ ۱۰۱
- جدول (۴-۶) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۴ ۱۰۲
- جدول (۴-۷) تقسیم‌بندی رودخانه‌ها ب اساس ضریب خمیدگی ۱۰۹
- جدول (۴-۸) میزان توسعه خم رودخانه‌ها بر مبنای زاویه مرکزی ۱۱۱
- جدول (۴-۹) نوع پیچش‌ها و درصد فراوانی آن‌ها بر اساس زاویه مرکزی در محدوده مطالعاتی ۱۱۲

فصل اول

مبانی و کلیات تحقیق

رودخانه‌ها به‌عنوان مجاری طبیعی مظهر حیات یک سرزمین بوده بطوریکه در گذشته هرگاه رودخانه مسیر خود را تغییر داده است ساکنان حواشی آن نیز به‌تبع آن کوچ نموده‌اند. عوامل مختلفی از جمله عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، تشکیلات زمین‌شناسی و خاک را می‌توان در تغییر مسیر رودخانه طبیعی تلقی نمود اما دخالت‌های آگاهانه و ناآگاهانه انسانی ناشی از دگرگونی‌های چشمگیر و سریع در ساختار اجتماعی و اقتصادی جوامع از عمده‌ترین و مخرب‌ترین عوامل در تغییر مورفولوژی رودخانه می‌باشند (اژدری مقدم، ۱۳۸۹). انحراف از شرایط تعادل در رژیم آب و رسوب یک سیستم رودخانه آبرفتی، پاسخ دینامیک رودخانه را در پی داشته تا مجدداً تعادل در آن برقرار گردد این پاسخ، سیستم رودخانه را به کاهش یا افزایش تراز رودخانه به‌ویژه تأثیر بر هندسه هیدرولیکی و مورفولوژی رودخانه متمایل می‌نماید (نوردجورد^۱، ۲۰۰۵).

تغییر در هندسه رودخانه و ته‌نشینی رسوبات باعث خروج آب از آن به سیلاب‌دشت می‌شود. با پخش جریان و انباشته شدن بار رسوبی بر سیلاب‌دشت، خاک‌ریزهای طبیعی تشکیل می‌شود در این حالت رودخانه عریض و کم‌عمق شده و مورفولوژی آن به‌سرعت تغییر می‌کند و مئاندرهایی در رودخانه ایجاد می‌گردد. با تشکیل مئاندرها خصوصیات فیزیکی رودخانه تغییر می‌کند. همچنین در اثر افزایش سرعت و تنش برشی جریان در رودخانه، بستر رودخانه در نواحی بحرانی فرسایش پیدا کرده و باعث تغییر در مورفولوژی رودخانه می‌شود.

۱-۲- ضرورت تحقیق

زاینده‌رود یا زنده رود به معنی دهنده زندگی، بزرگ‌ترین رودخانه فلات مرکزی ایران است که از کوه‌های زاگرس مرکزی به‌ویژه زرد کوه بختیاری سرچشمه گرفته و در کویر مرکزی ایران به

1. Nordfjord

سمت شرق حدود ۲۰۰ کیلومتر پیش می‌رود و در نهایت به مانداب گاوخونی می‌ریزد. در حال حاضر از این رودخانه برای آبیاری زمین‌های کشاورزی استان اصفهان و همچنین مصارف صنعتی استفاده می‌شود. بدین منظور در مسیر حرکت رودخانه سدها و سازه‌های فراوانی ایجاد گردیده است. زاینده‌رود ۱۱۸ امین اثر طبیعی است که توسط سازمان میراث فرهنگی در ۲۰ بهمن ۱۳۸۹ در فهرست میراث طبیعی ایران قرار گرفت. با توجه به اهمیت حوضه آبریز زاینده‌رود در منطقه خشک مرکزی ایران مطالعه دقیق و همه‌جانبه با تأکید بر خصوصیات مکانی رودخانه‌های موجود در این حوزه بسیار حائز اهمیت است. با توجه به مطالب فوق علی‌رغم اهمیت و باوجود مطالعات زیادی که در این حوضه مهم کشور انجام شده است هنوز مطالعه جامع و کاملی در خصوص ویژگی‌های رودخانه‌های این حوضه به لحاظ تأمین اهداف مهندسی رودخانه انجام نگرفته است.

این رودخانه علاوه بر تأمین نیاز آبی کشاورزی در استان اصفهان تأمین آب شرب و همچنین تأمین آب موردنیاز جهت مصارف صنعتی همانند ذوب‌آهن و فولاد مبارکه را نیز بر عهده دارد. از این جهت برای برداشت آب و تنظیم شرایط جریان سازه‌های فراوانی در مسیر رودخانه ساخته شده‌اند. همچنین در حاشیه رودخانه زمین‌های کشاورزی فراوانی قرار دارند که از آب رودخانه آبیاری می‌شوند. به این خاطر یکی از ویژگی‌های مهم رودخانه زاینده‌رود شکل‌گیری مورفولوژی رودخانه است و تغییرات مورفولوژی در بستر رودخانه می‌تواند باعث کاهش کارایی سازه‌های ساخته شده در مسیر این رودخانه گردد و هزینه‌های فراوانی را به دنبال داشته باشد.

عوامل مختلفی می‌توانند بر تغییر مورفولوژی یک رودخانه تأثیر بگذارند که می‌تواند به عواملی مانند برداشت بیش از حد و غیراصولی شن و ماسه از بستر رودخانه، تغییر در مشخصات هیدرولیک رودخانه و همچنین پروسه انتقال رسوب و رسوب‌گذاری اشاره کرد. این عوامل می‌توانند مشکلات فراوانی را در مدیریت رودخانه به وجود بیاورند مانند افزایش دادن تراز بستر رودخانه، تغییر دادن پروفیل سطح آب، تغییر در مسیر حرکت رودخانه، به وجود آمدن بستر ناپایدار، فرسایش یافتن

بستر رودخانه، عریض شدن بستر رودخانه و تأثیر گذاشتن بر زمین‌های کشاورزی اطراف رودخانه، تأثیرات منفی برسازه‌های ساخته‌شده در اطراف رودخانه، از بین رفتن پوشش گیاهی اطراف رودخانه و کاهش مقاومت در برابر سیلاب و همچنین می‌توانند اثرات اکولوژیکی مانند تأثیر بر روی موجودات آبی رودخانه مانند بی‌مهرگان، ماهی‌ها و به‌صورت کلی تمامی موجوداتی که زندگی آن‌ها با رودخانه مرتبط است داشته باشد. به این خاطر یکی از راه‌های مهم و موردنیاز جهت مدیریت رودخانه و کاهش هزینه و خسارت‌های احتمالی بررسی کردن تغییرات مورفولوژی و برنامه‌ریزی طبق این بررسی‌ها می‌باشد.

۱-۳- اهداف پایان‌نامه

یکی از اصلی‌ترین خصوصیات هر رودخانه مربوط به خصوصیات هندسی و مورفولوژی آن رودخانه است، که به‌طورکلی می‌توان گفت با استفاده از این خصوصیات می‌توان برنامه‌ریزی مدیریتی در جهت حفظ منابع طبیعی اطراف رودخانه و همچنین جلوگیری از کاهش کارایی سازه‌های ساخته‌شده در مسیر رودخانه انجام داد. با توجه به اینکه رودخانه زاینده‌رود در طول مسیر خود از میان زمین‌های کشاورزی عبور می‌کند و وظیفه آبرسانی به این زمین‌ها را بر عهده دارد و همچنین سازه‌هایی جهت برداشت آب از رودخانه ایجادشده‌اند که نیاز به مدیریت و برنامه‌ریزی بلندمدت در جهت تغییرات مورفولوژی دارند. از این‌رو مهم‌ترین هدف این تحقیق، بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی، هندسی و مورفولوژیکی رودخانه مهم و دائمی حوزه فلات مرکزی ایران است، بررسی میزان تغییرات پروفیل‌های عرضی بستر و بررسی چگونگی نابجایی عرضی بستر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مقاطع عرضی رودخانه در بلندمدت می‌باشد. علاوه بر این مقادیری از دبی که باعث فرسایش بستر رودخانه شده و تنش برشی برای دبی‌های متفاوت محاسبه‌شده و نقاط بحرانی مشخص گردیده است.

۱-۴- ساختار پایان نامه

به منظور دستیابی به اهدافی ذکر شده در قسمت قبل این تحقیق در پنج فصل به شرح زیر نوشته شده است.

فصل اول: ابتدا کلیاتی در مورد مهندسی رودخانه و همچنین عواملی که سبب تغییرات مورفولوژی رودخانه می‌شوند بررسی گردید سپس اثرات ناشی از تغییرات مورفولوژی نوشته شده و در نهایت ضرورت انجام تحقیق توضیح داده شده است.

فصل دوم: در این فصل ابتدا به تعریف مورفولوژی و اثرات ناشی از تغییرات مورفولوژی در رودخانه‌ها پرداخته شد و پس از آن دلایل بروز تغییرات مورفولوژی بیان گردیده است. سپس انواع رودخانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته شد. و در نهایت مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده در رابطه با تغییرات مورفولوژی، همچنین پژوهش‌های صورت گرفته با مدل CCHE2D و مطالعات صورت گرفته در رودخانه زاینده رود به صورت مختصر بیان گردیده است.

فصل سوم: در این فصل ابتدا حوزه مورد مطالعه معرفی می‌گردید. پس از آن منطقه مورد مورد مطالعه بر روی حوزه آبریز مشخص گردید. مدل CCHE2D معرفی گردید و معادلات و فرمول‌های مورد استفاده به صورت مختصر شرح داده شده است. روش کار با این مدل توضیح داده شد و چگونگی شبیه‌سازی منطقه مورد نظر با استفاده از مدل CCHE2D به صورت مرحله به مرحله بیان گردیده است. همچنین اطلاعات ورودی مدل مانند دبی، ارتفاع سطح آب، داده‌های توپوگرافی و دانه‌بندی معرفی گردیده است. در نهایت روش کار مطالعه تصاویر ماهواره‌ای جهت بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه آورده شده است.

فصل چهارم: این فصل مربوط به ارائه نتایج عددی به دست آمده است. در این فصل ابتدا نتایج به دست آمده از نرم افزار CCHE-Mesh ارائه شده که فراخوانی اطلاعاتی توپوگرافی، مرزبندی و در نهایت به دست آوردن رقوم بستر می‌باشد آورده شده است، پس از آن نتایج مربوط به مدل

CCHE-Gue به صورت گرافیکی و نموداری آورده شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

در نهایت نتایج مربوط به عکس‌های هوایی آورده شده است.

فصل پنجم: در این فصل در مورد نتایج به دست آمده در فصل چهارم بحث و نتیجه‌گیری شده

همچنین پیشنهادهایی برای تحقیق بیشتر ارائه گردیده است. در انتهای این فصل منابع

مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.

فصل دوم

کلیات و پیشینه تحقیق

۲-۱-مقدمه

در این فصل با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته و منابع داخلی و خارجی معتبر ابتدا به تعریف علم مورفولوژی و همچنین به صورت مختصر به توضیح در مورد تغییرات مورفولوژی و عوامل ایجادکننده تغییرات مورفولوژی پرداخته شده است. در ادامه مروری بر تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده با مدل CCHE2D و همچنین مطالعات صورت گرفته در حوضه آبریز زاینده‌رود گردآوری شده است.

۲-۲-تعریف مورفولوژی

۲-۲-۱-علم مورفولوژی

به‌طور کلی عوامل فرسایش و رسوب‌گذاری که به تغییرات مورفولوژیکی منجر خواهد شد، در رودخانه‌های آبرفتی نمود پیدا می‌کنند. تغییرات بستر رودخانه در علم مورفولوژی مورد بررسی قرار می‌گیرند. به عبارتی علم مورفولوژی رودخانه‌های آبرفتی را می‌توان به صورت مطالعه بررسی شکل و ساختار سطح زمین تحت تأثیر جریان آب تعریف نمود (بیدن هارن، ۱۹۹۷). مورفولوژی رودخانه علم شناخت سیستم رودخانه از نظر شکل و فرم کلی، ابعاد و هندسه هیدرولیکی، راستا و پروفیل طولی بستر و نیز روند و مکانیزم تغییرات آن است. بررسی مورفولوژیکی برای درک شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی رودخانه در آینده ضروری است و تنها از این طریق می‌تواند عکس‌العمل طبیعی آن را نسبت به تغییرات طبیعی یا اقدامات ناشی از اجرای طرح‌های اجرای مسیر و تثبیت کناره‌ها پیش‌بینی نمود و میزان جابجایی، تغییر ابعاد و الگوی رودخانه را تشخیص داد (درویش زاده، ۱۳۹۵).

۲-۲-۲-تغییرات مورفولوژی

بررسی عوامل مؤثر بر تغییر مورفولوژی رودخانه‌ها و فرسایش کناری نیازمند وجود اطلاعات

پایه‌ای درزمینه هیدرولیک رودخانه‌ای است و سرعت جریان و تنش برشی از پارامترهای مهم هیدرولیکی محسوب می‌گردند، که در تعیین مناطق فرسایش پذیر رودخانه و مناطقی که نیاز به سازه‌های حفاظتی دارند، استفاده می‌شوند (غفاری، ۱۳۸۵).

۲-۲-۳- دلایل بروز تغییرات مورفولوژی

۱- تغییرات مورفولوژی در اثر رسوب‌گذاری : مواد رسوبی که توسط رودخانه‌ها حمل می‌شوند توسط عوامل فیزیکی شیمیایی و مکانیکی از پوسته جامد زمین جدا شده و به رودخانه‌ها ریخته و به وسیله آب حمل می‌گردند. رسوبات موجود در رودخانه‌ها مشکلات زیادی را ایجاد می‌کنند از جمله این مشکلات می‌تواند به رسوب‌گذاری در بستر رودخانه‌ها، ایجاد جزایر رسوبی، تغییر بستر رودخانه و همچنین رسوب‌گذاری در مخزن سدها و کاهش ظرفیت آن اشاره نمود. با ورود رودخانه به مناطقی مانند مخزن سدها شرایط هیدرولیکی جریان به خصوص سرعت و تنش برشی بسیار کاهش پیدا کرده و پتانسیل انتقال رسوب رودخانه کاهش می‌یابد در نتیجه ذرات رسوبی به تدریج نهشته شده و رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد.

۲- تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش: کانال‌هایی که بستر آن‌ها از مواد رسوبی تشکیل شده‌اند اگر جریان آب کم باشد ذرات بستر هیچ‌گونه حرکتی ندارند. اما با افزایش شرایط جریان سرعت و تنش برشی افزایش پیدا می‌کند، در این حالت ذرات شروع به حرکت خواهند کرد. این حرکت در ابتدا به صورت بالا و پایین آمدن ذرات بدون انتقال است، ولی با افزایش تدریجی جریان ذرات به سمت پایین دست شروع به حرکت می‌کنند. لحظه‌ای که ذرات شروع به حرکت می‌کنند را اصطلاحاً آستانه حرکت^۱ نامند. تعریف آستانه حرکت ذره از دیدگاه دانشمندان متفاوت است. عده‌ای شروع حرکت یک یا چند ذره را که با چشم دیده می‌شود را به عنوان حرکت ذره می‌دانند و تعدادی شروع حرکت ذره را تحت تأثیر شرایط جریان دانسته‌اند. شماری از دانشمندان از جمله

1 . Incipient motion

انیشترین وجود لحظه‌ای را به‌عنوان آستانه حرکت قبول ندارند، و معتقد هستند به دلیل شرایط جریان درهم نمی‌توان حد متوسطی را به‌عنوان شروع حرکت ذره در نظر گرفت، با این حال برای مهندسان هیدرولیک تعیین حد متوسطی به‌عنوان شروع حرکت ذره حائز اهمیت است، به این خاطر برای بدست‌آوردن روابط هیدرولیکی در زمان شروع ذره روش‌های فراوانی ارائه‌شده است. این روابط بر اساس تنش برشی و سرعت جریان هستند. ازجمله این معیارها می‌تواند به معیار شیلدز، منحنی گلسر، تئوری وایت^۱، روش کالینسکی^۲ و روش تجربی لین^۳ اشاره کرد، که بر مبنای تنش برشی بحرانی هستند (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

۳- برداشت بیش‌ازحد و غیراصولی شن و ماسه : رودخانه‌های آبرفتی به‌عنوان یک منبع رسوبی برای استفاده در صنعت، ساختمان‌سازی و راه‌سازی همواره موردتوجه هستند. این موضوع خصوصاً در کشورهایی که دارای رشد سریع شهرنشینی و صنعتی بوده‌اند بیشتر دیده می‌شود. برداشت رسوبات از رودخانه‌هایی که رسوب‌گذاری در آن‌ها سریع است می‌تواند برای کنترل سیلاب و پایداری کانال رود مؤثر باشد (رینالدی و همکاران، ۲۰۰۵). اما برداشت بیش‌ازحد رسوبات ورودی می‌تواند موجب فرو سایه بستر رودخانه‌ها گردد.

۴- ساخت سدها و سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه : ساختارهای دست‌ساز انسانی در مسیر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها باوجوداینکه مزایایی از قبیل تنظیم رژیم جریان رودخانه و کاهش در اثرات مخرب ناشی از سیلاب‌ها که دارد دارای تأثیرات مخربی نیز می‌باشند. ازجمله تأثیرات منفی سازه‌های هیدرولیکی در آبراهه می‌توان به ایجاد رژیم‌های مصنوعی از جریان آب در پایاب‌های رودخانه، ایجاد آشفستگی در مسیر انتقال رسوبات و درنهایت تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه اشاره کرد.

1 . white

2 . Kalinske

3 lane

۲-۳- فرم بستر رودخانه‌های آبرفتی

۲-۳-۱- تعریف فرم بستر رودخانه

فرم بستر یا به عبارتی ناهمواری‌های بستر به شکل‌های مختلف، در بستر رودخانه در اثر حرکت جریان به وجود می‌آید و تأثیر مستقیمی روی زبری بستر و در نتیجه مقاومت در برابر جریان دارد. شناخت و بررسی فرم بستر در رودخانه‌های آبرفتی ابتدا توس گیلبرت^۱ تشریح گردید. و پس از آن مهندسان علوم هیدرولیک به بررسی آن پرداختند از جمله این مهندسان بروکز^۲ است که در مطالعاتی نشان داد که زبری تولیدشده در بستر همیشه با افزایش سرعت آب افزایش نمی‌یابد و ممکن است با افزایش سرعت آب از زبری کاسته شود. همچنین چانگ^۳ نشان داد تغییر فرم بستر می‌تواند به فرم رودخانه بستگی داشته باشد (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

۲-۳-۲- انواع فرم بستر

فرم بستر به انواع مختلفی دسته‌بندی شده است که معمولاً این دسته‌بندی‌ها بر اساس سرعت و تنش برشی است. در ادامه چند فرم از بستر تشریح گردیده است:

شکنج‌ها ناهمواری‌های مثلی کوچکی هستند که طول موج کمتر از ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع کمتر از ۳ سانتی‌متر دارند.

تلماسه‌ها نوعی فرم بستر بوده که از شکنج‌ها بزرگ‌تر هستند زمانی که در بستر تشکیل می‌شوند، نیم‌رخ آب و بستر رودخانه همسو نیست.

حالت انتقالی در این حالت انواع فرم بستر ممکن است تشکیل گردد.

1. Gilbert(1914)

2. Brooks(1958)

3. Chang(1985)

پادتلماسه‌ها فرم‌های بستری هستند که به‌صورت پستی‌وبلندی یکنواختی دیده می‌شوند.

سرسره و استخر فرم‌های بستری هستند که در رودخانه‌ها با شیب زیاد و دبی رسوبات نسبتاً زیادی رخ می‌دهند.

۲-۴- مروری بر مطالعات گذشته

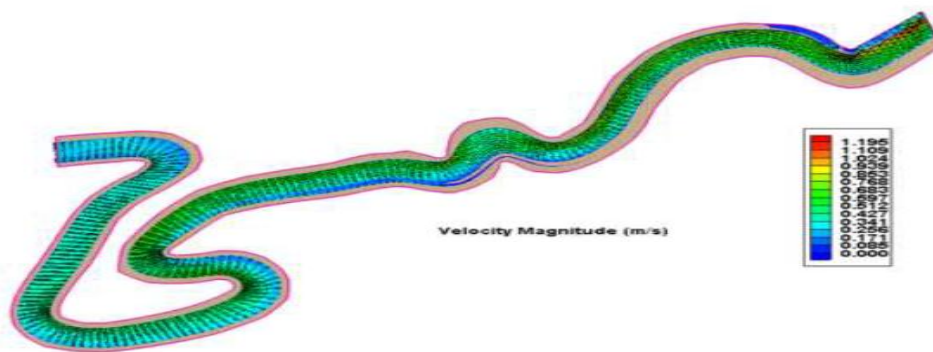
در این بخش مجموعه‌ای از تحقیقات و مقالات داخلی و خارجی معتبر که در ارتباط با تغییرات مورفولوژی صورت گرفته است گردآوری شده است. در ابتدا تحقیقات انجام‌شده با مدل CCHE2D گردآوری شده است. پس‌از آن پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص تغییرات مورفولوژی تحت تأثیر عوامل مختلف آورده شده است و درنهایت تحقیقات صورت گرفته در رودخانه زاینده‌رود و حوضه آبریز گاوخونی جمع‌آوری گردیده است که موردبررسی قرار گرفته است و در ادامه شرح داده شده است.

فتحی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی به ارزیابی قابلیت مدل دوبعدی CCHE2D در شبیه‌سازی و پیش‌بینی هیدرودینامیک جریان و رسوب پرداخت. در این تحقیق بازه‌ای از رودخانه حدفاصل سد تا پل شهرستان میناب در استان هرمزگان شبیه‌سازی گردید. همچنین با نقشه‌برداری دقیق و تهیه نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس مناسب هندسه منطقه و شبکه محاسباتی تهیه شد. در انتها بر اساس مشخصات اندازه‌گیری شده جریان و رسوب رودخانه پارامترهایی مانند عمق جریان، رسوب رودخانه، سرعت جریان و تنش برشی شبیه‌سازی گردید. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده دقت بالا و خطای مدل در پیش‌بینی پارامترهای جریان است.

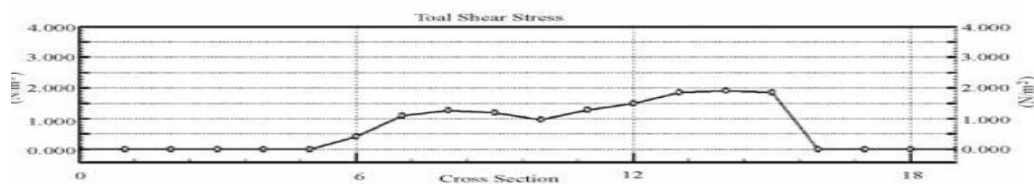
حمدی نژاد (۱۳۹۴) در تحقیقی به شبیه‌سازی الگوی جریان در رودخانه قره‌آغاج با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CCHE2D پرداخت. در این پژوهش بازه‌ای به طول ۱۳ کیلومتر از رودخانه

قره‌آغاچ در استان فارس با دوره بازگشت‌های ۲، ۲۵، و ۵۰ ساله با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نشان داد در تمامی دوره بازگشت-ها جریان زیربحرانی بوده است. بین تنش برشی با سرعت رابطه مستقیمی وجود دارد. همچنین در هیچ‌یک از دبی‌ها با دوره بازگشت‌های متفاوت رودخانه پر نمی‌گردد.

فاطمه درویش زاده (۱۳۹۵) در تحقیقی تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره واقع در جلگه هندیجان برای طول حدود ۲۳ کیلومتر برای آمار سی‌ساله را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق ابتدا فرسایش و رسوب‌گذاری به‌عنوان دلایل تغییرات مورفولوژی معرفی گردید. پس‌از آن با استفاده از مدل عددی دوبعدی CCHE2D و داده‌های ایستگاه هیدرومتری ده‌ملا شبیه‌سازی جریان و رسوب برای بازه مشخص شده انجام گرفت. بررسی‌های انجام‌شده در این تحقیق نشان داد رودخانه زهره در ۸۰ درصد از مواقع سال دارای دبی کمتر از ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه است و در این شرایط هیدرولیکی رودخانه زهره دارای پدیده رسوب‌گذاری است. و برای دبی‌های بالای ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه این رودخانه دارای پدیده فرسایش در قوس‌های خارجی است. که سبب تغییرات مورفولوژی در رودخانه می‌شوند. در ادامه این تحقیق به بررسی تغییرات مورفولوژی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای سه دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۴ میلادی، ۲۰۰۰ میلادی و مسیر قدیمی در محیط GIS پرداخته شد. در این بررسی پارامترهای مهم در تغییرات مورفولوژی مانند ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، طول قوس، شعاع انحنا و غیره محاسبه گردید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در گذشته در این رودخانه چهار قطع‌شدگی یا میانبر اتفاق افتاده است. همچنین بر اساس ضریب خمیدگی و طبقه‌بندی کورنایس بر اساس زاویه مرکزی، این رودخانه در رده رودخانه‌های بیش‌ازحد توسعه‌یافته قرار می‌گیرد. در پایان جهت جلوگیری از فرسایش طرح پیشنهادی آب‌شکن به‌عنوان سازه هیدرولیکی ارائه شده. نتایج نموداری و گرافیکی حاصل از شبیه‌سازی به‌صورت زیر است.



شکل (۱-۲) نمای کلی شبیه‌سازی جریان در رودخانه زهره



شکل (۲-۲) تغییرات تنش برشی در مقطع عرضی رودخانه زهره

معتضدی (۱۳۹۲) پژوهشی در بازه‌ای به طول ۲/۱۵۴ کیلومتر از رودخانه دالکی که شامل یک خم بود انجام داد، که در آن سیلاب ثبت‌شده در تاریخ ۲۸ دی‌ماه ۱۳۸۴ را در ایستگاه هیدرومتری خم چیت با استفاده از مدل CCHE2D شبیه‌سازی نمود. نتایج حاصل از این تحقیق شامل عمق آب، برآیند تنش برشی و همچنین برآیند سرعت و دبی در واحد سطح را مورد بررسی قرارداد. در نهایت به این نتیجه رسید که برآیند سرعت و تنش برشی در جداره خارجی خم نسبت به سایر نقاط دیگر بسیار بیشتر است در این قسمت باید اقدامات سازه‌ای جدار خارجی خم را زیرتر نمود تا از فرسایش جداره خارجی خم جلوگیری شود.

سلطان‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهشی به بررسی تأثیر ناگهانی زبری بستر کانال بر توزیع سرعت و پروفیل سطح آب در کانال‌های روباز به صورت عددی و آزمایشگاهی پرداختند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی جریان از مدل‌های عددی FLUENT و CCHE2D و آزمایش‌ها خود را در آزمایشگاه سازه هیدرولیک دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام دادند. روش کار این پژوهش به این ترتیب بود در مقطعی از بستر کانال زبری ناگهانی ایجاد می‌کردند و پروفیل سطح آب در طول کانال و توزیع سرعت برای مقادیر مختلفی از دبی جریان و ارتفاع زبری تعیین

می‌شد و تأثیر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری در حالت‌های متفاوت بررسی می‌گردید. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که در مقطعی که زبری ایجادشده توزیع سرعت در جهت عمقی و عرضی کاهش یافته است و افزایش سطح آب را در این منطقه مشاهده می‌شود. علاوه بر این پروفیل سطح آب در اطراف مقطعی که زبری ایجادشده (کمی بالاتر و پایین تر از ناحیه موردنظر) دچار نوسان می‌شود. درنهایت پس از بررسی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی سلطان‌زاده و همکاران به این نتیجه رسیدند که تطابق مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی وجود دارد. این تطابق نشان داد که مدل عددی CCHE2D برای شبیه‌سازی جریان در شرایط زبری متفاوت بسیار کاربرد دارد و نتایج آن می‌تواند قابل‌اعتماد باشد.

وو (۲۰۰۹) در تحقیقی به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین پرداخت. در این پژوهش علاوه بر شبیه‌سازی مدل‌های آشفتگی این نرم‌افزار نیز مقایسه گردید. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد در جریان ساده تمامی مدل‌های آشفتگی نتایج نزدیک به واقعیت را نشان می‌دهند، اما در جریان‌های پیچیده مدل K-ε واقعی‌تر است.

کمان به دست و بهشتی (۱۳۹۰) در پژوهشی به بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون بازه ملاتانی-اهواز با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D پرداختند. در این تحقیق شبیه‌سازی با استفاده از دبی‌های ثبت‌شده در ایستگاه ملاتانی با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله به‌صورت غیر ماندگار انجام گردید. نتایج حاصل از این پژوهش عبارت‌اند از مقادیر سرعت، دبی در واحد عرض برآیند تنش برشی و عدد فرود برای دبی با دوره بازگشت-های متفاوت که به‌صورت عددی و نموداری ارائه گردید.

رستمی (۱۳۹۱) یکی از اجزاء مهم مورفولوژیکی در سامانه رودخانه‌ها را محل تلاقی رودخانه‌ها

و کانال‌ها دانست، که به‌عنوان ناحیه‌ای با اغتشاشات بالا شناخته‌شده است. زیرا در این ناحیه تغییر در مقدار و جهت سرعت رخ می‌دهد و همچنین دبی جریان و رسوب تغییر کرده و پدیده‌هایی مانند فرسایش عمیق در بستر فرسایش سواحل و همچنین رسوب‌گذاری در پایین‌دست می‌شود. به همین منظور وی در تحقیقی به بررسی کارایی مدل CCHE2D به‌عنوان یک مدل متوسط‌گیری شده در عمق برای شبیه‌سازی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی شاخه‌های فرعی با رودخانه اصلی، تأثیر بازشدگی دهانه شاخه فرعی بر تغییرات مورفولوژیکی کانال اصلی پرداخت. او در این تحقیق با مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در شرایط بدون بازشدگی نشان داد که مدل عددی CCHE2D قادر به شبیه‌سازی مشخصات مورفولوژیکی محل تلاقی با خطای حدود ۸ درصد را دارا است.

مغربی (۱۳۸۹) در تحقیقی به بررسی الگوی جریان حول جزیره رسوبی در رودخانه سرباز در مجاورت شهر راسک در دو دبی مختلف پرداخت. در این پژوهش برای شبیه‌سازی الگوی جریان از مدل متوسط‌گیری شده CCHE2D و برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل K-E استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوی جریان در حول جزیره رسوبی از شرایط هیدرولیکی جریان تبعیت می‌کند. همچنین به این نتیجه رسید که جزیره رسوبی در دبی‌های متفاوت تأثیر متفاوتی بر الگوی جریان در ناحیه‌ی مشخص شده دارد.

بست (۱۹۸۸) از اولین محققانی بود که یک مدل تصویری از تغییرات مورفولوژی ارائه کرد. مدل تصویری وی در مطالعه آزمایشگاهی در شرایط بسترهای متحرک و در تلاقی‌های نامتقارن با کانالی به عرض ۰/۱۵ متر و شیب طولی یکسان به دست آمد. در مطالعه‌ای که بست انجام داد نسبت‌های مختلف دبی و زوایای تلاقی بین منظور گردید. همچنین دانه‌بندی مناسب نیز در بستر کانال انتخاب شد و نتایج حاصل از حداکثر عمق آبستتگی بستر به‌عنوان تابعی از نسبت‌های دبی و زاویه اتصال را به دست آورد.

رستمی (۱۳۹۲) در پژوهشی اثر تغییرات مورفولوژیکی بستر رودخانه‌ها بر تغییر ظرفیت آبدگزی سرریز جانبی را شبیه‌سازی و بررسی نمود. در این تحقیق بیان شد که سرریزهای جانبی سازه‌هایی هستند که برای تنظیم و انحراف جریان‌های اضافی در کانال‌ها و رودخانه‌ها احداث می‌شوند. اگر ارتفاع آب در کانال از حد معینی بیشتر شود موجب مهار سیلاب و کاهش خطرهای احتمالی می‌گردد. در چنین شرایطی اگر کانال اصلی خاصیت فرسایش‌پذیری داشته باشد تغییرات مورفولوژی در آن ایجاد شده که باعث عکس‌العمل جریان شده و دبی جریان عبوری بر روی سرریز جانبی را تغییر می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش بررسی کارایی مدل CCHE2D به‌عنوان یک مدل متوسط‌گیری شده در عمق برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در محل سرریز جانبی است. در این تحقیق از نتایج یک مدل آزمایشگاهی که الگوی جریان و رسوب در محل سرریز جانبی احداث‌شده در یک کانال اصلی به عرض ۱/۵ متر برای دبی‌های جریان و دبی‌های رسوب متفاوت برای ارزیابی مدل CCHE2D استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تغییرات مورفولوژی بستر باعث تغییر الگوی جریان و میزان جریان خروجی از سرریز می‌شود. هرچه دبی بیشتر باشد تغییرات مورفولوژی بستر شدیدتر است و تغییرات مورفولوژی صورت گرفته در کنار سرریز جانبی موجب افزایش ۴۰ درصدی آب از سرریز جانبی شده است. همچنین مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد مدل مذکور با خطایی در حدود ۱۰ درصد قادر به پیش‌بینی دبی خروجی سرریز در شرایط تغییرات مورفولوژی است.

ریبیرو (۲۰۱۱) تغییرات مورفولوژی بستر کانال اصلی در اثر تلاقی یک آبراهه فرعی با زاویه ۹۰ درجه را مورد بررسی قرارداد. او در این تحقیق با افزایش دبی در کانال فرعی با سه سری نسبت دبی مختلف و وارد کردن دبی رسوب از دهانه شاخه فرعی تغییرات مورفولوژیکی بستر در دهانه کانال اصلی و کانال فرعی را مورد بررسی قرارداد و پس از آن با بازشدگی در دهانه ورودی شاخه فرعی در سه مرحله با همان نسبت‌های دبی به مقایسه میزان فرسایش و رسوب پرداخته و نتایج را مقایسه نمود.

خماری و پامساری (۱۳۹۰) در پژوهشی به بررسی الگوی جریان غیر ماندگار در رودخانه چم- میرکی با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D پرداختند. در این پژوهش تغییرات رفتاری پارامتر- های سرعت، عمق جریان، تنش برشی و عدد فرود مورد ارزیابی قرار گرفت.

فروزان و کریمی پاشایی (۱۳۸۸) در پژوهشی به بررسی الگوی جریان در رودخانه ایست فورک^۱ در ایالات متحده آمریکا پرداختند. در این تحقیق بیان شد که رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آبی شناخته شده است که به‌طور مستمر در حال تغییر و تحول هستند. در ابتدا اهمیت فراوان بررسی رفتار و ریخت‌شناسی رودخانه‌ها که تحت تأثیر عواملی مانند فرم و ساختار رودخانه، دبی جریان در رودخانه، شکل هندسی آبراهه، شکل بستر رود و نیمرخ رودخانه است توضیحاتی ارائه گردید. پس از آن اهمیت این تأثیرات در طرح‌های مهندسی رودخانه تحت تأثیر عوامل پیچان‌رودی مطالبی ارائه شد. و در نهایت الگوی جریان غیر ماندگار بر روی رودخانه ایست فورک آمریکا که جزء رودخانه‌های پیچان‌رودی را با استفاده از مدل عددی CCHE2D مورد بررسی قرار گرفت. و تغییرات رفتاری پارامترهای جریان مانند سرعت، عمق جریان، تنش برشی و... را در قوس جریان مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که تنش برشی در قوس خارجی بیشتر از قوس داخلی است.

نثار (۲۰۱۱) در پژوهشی با استفاده از مدل عددی CCHE2D بازه‌ای از رودخانه نیل^۲ را به‌صورت دوبعدی مورد بررسی قرارداد. نتایج حاصل از بررسی داده‌های شبیه‌سازی جریان در این پژوهش نشان داد که الگوی جریان در این رودخانه تحت تأثیر ضریب زبری بستر قرار دارد. به عبارتی نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای جریان بر الگوی جریان در این رودخانه نشان داد بیشترین حساسیت مربوط به ضریب زبری کف است. همچنین وی نتیجه گرفت در تعیین ضریب زبری

¹ - East fork little river

² - Nile River

بستر رودخانه فرمول تجربی Van Rign ۱۹۸۴ بسیار کارآمدتر است.

مغربی (۱۳۹۰) در پژوهشی به بررسی اثر میان‌گذر مستقیم بر روی الگوی جریان آشفته در قوسی ۱۸۰ درجه از رودخانه کارون پرداخته است. در این پژوهش الگوی جریان در یک قوس ۱۸۰ درجه در حالت استفاده شده k و برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل CCHE2D بدون میانبر استفاده شده و با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که احداث کانال میانبر باعث کاهش سرعت بیشینه و تنش برشی در رأس قوس گردد. و به‌نوعی فرسایش را در قوس خارجی کاهش می‌دهد. علاوه بر این نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد الگوی جریان در دهانه آبگیر و خروجی میانبر وابسته به هندسه موقعیت میانبر بوده و تنش برشی در خروجی میانبر به جریان اصلی متمرکز شده که می‌تواند در طراحی کانال‌ها مؤثر باشد.

زرکفلی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل عددی CCHE2D در پژوهشی به شبیه‌سازی جریان در دریاچه هاراپان پرداختند. رودخانه گامبیر به این دریاچه می‌ریزد و سالیان درازی آلاینده‌های فراوانی را وارد این دریاچه کرده است. هدف اصلی این پژوهش مشخص کردن مئاندرهای ایجاد شده در دریاچه بود که توسط آلاینده‌های رودخانه گامبیر ایجاد شده است. که با استفاده از قابلیت نرم‌افزار CCHE2D در شبیه‌سازی انتقال رسوب این مناطق شناسایی گردید.

میرپنجی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی تأثیرات طول آب‌شکن و دبی جریان را بر آب‌شستگی کناره رودخانه با استفاده از مدل شبیه‌سازی دوبعدی CCHE2D و مدل آزمایشگاهی موردبررسی قراردادند. در این تحقیق شبیه‌سازی دوبعدی هیدرولیک جریان و رسوب در حالت‌های متفاوت با آب‌شکن قائم و بدون آب‌شکن در طول و دبی‌های مختلف موردبررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مطابقت مناسبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد و به‌خوبی می‌توان از مدل عددی CCHE2D به‌منظور ارزیابی عملکرد آب‌شکن در شرایط مختلف استفاده

نمود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد با افزایش طول آب‌شکن فرسایش کناری رودخانه‌ها کاهش یافته است. کمترین سطح فرسایش در بیشترین طول آب‌شکن و کمترین دبی ایجاد گردیده است.

حقی‌آبی و امامقلی‌زاده (۱۳۹۴) در پژوهشی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های ماهواره‌ای تغییرات زمانی پلان رودخانه کشکان را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با بازدید‌های میدانی و همچنین مقایسه پلان جدید و پلان قدیم رودخانه با استفاده از نرم‌افزار GIS تغییرات رودخانه در طی یک بازه زمانی ۵۲ ساله مورد بررسی قرار گرفت. همچنین خصوصیات مربوط به پیچان‌رودی رودخانه و میزان توسعه‌یافتگی مماندرها در قوس‌های رودخانه در یک بازه ۱۰۸ کیلومتری که بین منطقه ورپل و تیمورآباد قرار داشت بررسی گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در این بازه ۶ درصد از قوس‌ها توسعه‌نیافته است و از ۹۴ درصد باقی‌مانده ۴۳ درصد بیشتر از توسعه‌یافته و ۵۱ درصد توسعه‌یافته است. در پایان میزان فرسایش کناری رودخانه به کمک روابط تجربی در بازه‌های بحرانی برای آینده پیش‌بینی گردید.

صاحب‌دل (۱۳۸۷) در پژوهشی به تعیین حریم بستر رودخانه قره‌چای رامیار از سرچشمه‌های گرگان‌رود با استفاده از مدل عددی HEC-RAS پرداخته است. در این تحقیق از آمار و اطلاعات ۱۹ ایستگاه هیدرومتری منطقه استفاده شده است. برای محاسبه دبی حداکثر لحظه‌ای از مدل HYFA و برای محاسبه تعیین پروفیل سطح آب و سایر مشخصات هیدرولیکی جریان از مدل HEC-RAS بهره برده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد تجاوزات انسان در محدوده حریم بستر رودخانه به شکل‌های گوناگون نظیر ایجاد مناطق مسکونی در حریم رودخانه، فعالیت زراعی و باغی در بستر رودخانه و برداشت بی‌رویه و غیراصولی مصالح از بستر رودخانه اتفاق افتاده است.

آندام (۲۰۰۳) در پژوهشی با استفاده از مدل HEC-RAS رژیم رودخانه‌های جنگلی و رودخانه‌های خارج از جنگل را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق تغییرات سرعت و عدد فرود

در این دو نوع رودخانه مورد بررسی قرار گرفت، همچنین تأثیر پوشش گیاهی بر رژیم و رفتار هیدرولیکی جریان را با استفاده از مدل HEC-GeoRAS مقایسه نمود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد در رودخانه‌های جنگلی که پوشش گیاهی در آن‌ها بیشتر است سرعت کمتر است و تغییرات سرعت محسوس‌تر است، همچنین بیان داشت مدل هیدرولیکی HEC-RAS می‌تواند مقادیر عددی مناسبی را جهت مطالعه رژیم و سایر رفتار هیدرولیکی رودخانه در اختیار محققین قرار دهد.

امیری (۱۳۹۳) در پژوهشی تغییرات مورفولوژی رودخانه جراحی در استان خوزستان تحت تأثیر برداشت شن و ماسه با استفاده از مدل عددی HEC-RAS را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق با استفاده از مدل عددی HEC-RAS و حل عددی معادلات سنت و نانت و همچنین حل عددی معادله پیوستگی تغییرات بستر رودخانه تحت تأثیر فرسایش و رسوب‌گذاری در شرایط قبل از برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه و پس از برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه شبیه‌سازی گردید و نتایج آن مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که در تمام مقاطع سرعت جریان آب و عدد فرود تقریباً دو برابر افزایش داشته است. این در حالی است که سطح جریان در هر مقطع افزایش پیدا کرده است و همچنین با افزایش عدد فرود رژیم جریان از زیربحرانی به فوق بحرانی تبدیل شده است. با افزایش تنش برشی پس از برداشت شن و ماسه در این رودخانه کناره رودخانه فرسایش یافته است.

عسگری (۱۳۹۴) در تحقیقی فرسایش کناری رودخانه چراداول واقع در اسلام‌آباد و کرد در بازه چناره را با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق اطلاعات هیدرولوژیکی از سازمان آب منطقه‌ای ایلام دریافت گردیده و با استفاده از متوسط دبی‌های روزانه و نرم‌افزار SMADA و با استفاده از توزیع لوگ نرمال ۳ پارامتره اطلاعات هیدرولیکی با دوره بازگشت‌های متفاوت مشخص گردید. شبیه‌سازی در بازه‌ای به طول ۱/۵

کیلومتر با دوره بازگشت‌های ۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله انجام گردید. برای تعیین نقاط مستعد فرسایش و رسوب‌گذاری مقادیر حداقل و حداکثر تنش برشی و سرعت در نقاط مختلف بازه تعیین گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد تنش برشی و سرعت در دوره بازگشت‌های متفاوت، در کانال اصلی بیشتر از سواحل بوده است. بیشتر بودن فرسایش کانال اصلی نسبت به سواحل باعث افزایش شیب رودخانه و درنهایت فرسایش کناری گردد.

احمدیان یزدی (۱۳۸۰) در پژوهشی به بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه تجن-هریرود با استفاده از عکس‌های هوایی پرداخت. در این تحقیق با استفاده از دو سری عکس هوایی مربوط به سال ۱۳۳۴ و ماهواره‌ای مربوط به سال ۱۹۸۵ و انجام عملیات میدانی و تلفیق نتایج به‌دست‌آمده نقش پوشش گیاهی در حفاظت خاک و تثبیت کناره‌های رودخانه موردبررسی قرار گرفت. درنهایت با استفاده از نتایج این تحقیق مناطقی از رودخانه که دارای حداکثر تنش برشی و سرعت بود شناسایی گردید و اولویت‌بندی محدوده‌های مستعد فرسایش کناری انجام پذیرفت، همچنین پیش‌بینی مورفولوژی کناره آبراهه به‌منظور استفاده از این اطلاعات در مدیریت و ساماندهی آبراهه ثبت گردید.

پیرا و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی به بررسی عددی جریان هیدرولیکی و رسوب در پایین‌دست رودخانه می‌سی‌سی‌پی پرداختند. در این تحقیق از مدل یک‌بعدی HEC-RAS برای شبیه‌سازی عددی انتقال رسوب استفاده گردید. با کالیبره کردن مدل برای بازه به طول ۶۴ کیلومتر ضریب زبری مانینگ برابر ۰/۰۲۲ تعیین گردید. و با بررسی نتایج مشخص شد معادله آنگلوند-هانسن بهترین جواب‌ها را نشان می‌دهد.

وهاب‌زاده (۱۳۹۱) در تحقیقی به شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل HEC-RAS در محیط GIS پرداخت. در این پژوهش با تلفیق مدل هیدرولیکی HEC-RAS با نرم‌افزار Arc View از مجموعه نرم‌افزارهای ArcGIS از طریق الحاقیه

HEC-GeoRAS شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی رودخانه بشار صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که به ازای دوره بازگشت‌های طولانی‌تر سطح سیلاب در هر یک از مقاطع افزایش یافته است. با افزایش سطح مقطع ارتفاع سیل گیری کاهش می‌یابد به ازای کاهش یا افزایش سطح سیلابی عمق نیز کاهش یا افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان این نتیجه را گرفت که مدل HEC-RAS می‌تواند مقادیر عددی مناسب را در جهت مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها ارائه دهد و جهت پهنه‌بندی سیلاب با دقت بالا و هزینه اندک مورد استفاده قرار گیرد.

غلامی و همکاران (۱۳۸۶) در پژوهشی به بررسی رفتار هیدرولیکی جریان در رودخانه هزار و دشت سیلابی آن تحت تأثیر موانع موجود در مسیر اصلی آبراه پرداختند. در این پژوهش از سیستم اطلاعات جغرافیایی و نقشه‌های توپوگرافی رودخانه با مقیاس ۱:۵۰۰ استفاده گردید. رفتار هیدرولیکی جریان با مدل HEC-RAS در دو شرایط وجود موانع در مسیر آبراه و عدم وجود موانع در مسیر آبراه شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از مقایسه این دو شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وجود موانع در کانال اصلی باعث افزایش عمق آب گردیده است. همچنین وجود موانع سبب انحراف آب به کناره‌ها و تشدید فرسایش کناره‌ها شده است.

بیاتی خطیبی (۱۳۷۸) در پژوهشی به بررسی تغییر مورفولوژی بستر رودخانه ناشی از ویژگی‌های فرسایشی و رسوب‌زایی بر روی رودخانه‌ی قرنقو واقع در استان آذربایجان شرقی تحت تأثیر ایجاد سد سهند پرداخت است. در این تحقیق شدت فرسایش، میزان رسوب‌دهی بخش‌های مختلف رودخانه با استفاده از روش‌های آماری ارزیابی گردیده است، همچنین با بهره‌گیری از امکانات سیستم اطلاعات جغرافیایی مناطق حساس به فرسایش و رسوب‌گذاری مشخص گردیده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که بخش‌های بالادست حوزه از نظر شدت فرسایش در وضعیت نسبتاً بحرانی قرار گرفته‌اند، همچنین عوامل فرسایشی و ایجاد لغزش‌های

نسبت بزرگ در کنار دره‌ها و در نزدیکی سد سهند سبب شده رسوبات فراوانی وارد آبراهه شود که در پشت سد نهشت می‌کنند.

کیم و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی شاخه‌ای از رودخانه مانجیونگ در کشور کره جنوبی پرداختند. در این پژوهش شاخه‌ای از رودخانه با استفاده از مدل یک‌بعدی HEC-RAS شبیه‌سازی گردید. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد از بین رابطه‌های موجود نزدیک‌ترین جواب‌ها به اطلاعات آماری مربوط به رابطه انگلوند-هانسن بوده است. همچنین نتایج خروجی از مدل شبیه‌سازی نشان داد تراز بستر از سال ۱۹۷۶ تا سال ۲۰۰۹ به میزان تقریبی ۲ متر کاهش یافته است.

کاشیان و شفاعی بجستان (۱۳۹۴) در پژوهشی به مدل‌سازی روند تغییرات در بستر رودخانه زاینده‌رود در اثر فرسایش و رسوب‌گذاری با استفاده از مدل HEC-RAS پرداخته‌اند. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری از اطلاعات آماری مانند دبی رسوب و همچنین آبگذری رودخانه در بالادست سد زاینده‌رود و همچنین استخراج مقاطع عرضی و طولی رودخانه از نقشه‌های ۱ به ۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور در مدل یک‌بعدی HEC-RAS4.1 استفاده شده است. نتایج حاصل از فرسایش و رسوب در سه مقطع بررسی گردید. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد بحرانی‌ترین حالت در مقطع ۳۵ است که فرسایش در آن در سال ۱۳۷۵ حدود ۲۰ سانتیمتر و در سال ۱۳۹۰ برابر ۹۸ سانتیمتر بوده است. همچنین در پنج‌ساله اولیه دهه هفتاد در خط مرکزی این رودخانه ۱۹ سانتیمتر رسوب‌گذاری و در سال‌های ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۰ ۲۱ سانتیمتر فرسایش داشته است.

رضاپوریان (۱۳۹۴) در پژوهشی به محاسبه تحلیلی میزان فرسایش کناره رودخانه زاینده‌رود پرداخت. در این تحقیق بیان گردید فرسایش رودخانه طی دو پروسه فرسایش پایه و ریزش کناره رودخانه صورت می‌گیرد که این امر باعث جابه‌جایی و تغییر مسیر رودخانه می‌شود. ریزش کناره

رودخانه متأثر از نیروی وزن مواد کناره بستر است. در این پژوهش با استفاده از یک مدل ریاضی در دو بخش برای محاسبه فرسایش پایه و ترکیب با یکرو احتمالاتی شکست و ریزش کناره رودخانه در بازه‌ای از رودخانه زاینده‌رود از مجموع دو فرسایش پایه و ریزش کناره‌ای محاسبه گردید.

ساغروانی و صادقیان (۱۳۹۵) در پژوهشی به شبیه‌سازی روند تغییرات بستر رودخانه در اثر فرسایش و رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS بر روی شاخه قلعه شارخ در بالادست سد زاینده‌رود پرداخت. در این تحقیق عنوان گردید بسیاری از تغییرات مورفولوژیکی در رودخانه‌ها به دلیل تغییرات مکانی رسوب در بستر رودخانه است. که علت ایجاد مشکلاتی مانند تخریب سازه‌ها در رودخانه و همچنین بروز مشکل در ایستگاه‌های پمپاژ می‌شود. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات آماری مانند رسوبده ساله، دبی بیست‌ساله و مقاطع عرضی نقشه‌برداری شده و با استفاده از مدل یک‌بعدی HEC-RAS تغییرات بستر رودخانه شبیه‌سازی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد دبی متوسط سالانه رسوب برابر ۱۵/۷۶ مترمکعب بر روز است. و در بحرانی-ترین مقطع در دو طرف رودخانه فرسایش از سال ۱۳۶۹ تا سال ۱۳۹۰ برابر افزایش پیدا کرده است. و در خط مرکزی همین مقطع از سال ۱۳۶۹ الی ۱۳۷۵ رسوب‌گذاری و از سال ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۰ فرسایش صورت گرفته است.

رضایی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی به پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیکی رودخانه زاینده‌رود با استفاده از الگوریتم K- نزدیک‌ترین همسایه پرداخت. در این پژوهش عنوان گردید با توجه به پدیده خشک‌سالی و وابستگی محصولات کشاورزی به آب سطحی با پیش‌بینی کردن جریان رودخانه می‌توان برای استفاده از آب رودخانه مدیریت دقیق‌تری انجام داد. به این منظور در این تحقیق از اطلاعات دمایی و بارشی طی سال‌های ۱۳۶۲ الی ۱۳۹۳ در دو ایستگاه اصفهان و سد چادگان استفاده شده است، سپس برای تخمین ۸۰ درصد داده‌ها به‌منظور آموزش مدل و ۲۰

درصد به منظور صحت سنجی مدل انتخاب گردید. در نهایت دبی ایستگاه هیدرومتری موسیان و بارش ایستگاه‌های اصفهان و چادگان تخمین زده و شبیه‌سازی گردید.

شیرانی و همکاران (۱۳۸۴) در پژوهشی عوامل مؤثر بر مورفولوژی رودخانه در حوضه زاینده‌رود را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. در این تحقیق بیان گردید که مورفولوژی رودخانه تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی، زمین‌شناسی و ویژگی‌های سطح کانال و حوضه آبریز است، که نقش این عوامل بر مورفولوژی رودخانه زاینده‌رود در ۴۴ واحد هیدرولوژی و ۲۶۹۵ بازه از رودخانه استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی مشخص گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که نسبت پیچان‌رودی رابطه مستقیمی (در سطح ۹۵ درصد) با تیپ پوشش گیاهی و سازندهای فرسایش‌پذیری داشته و تحت تأثیر عوامل فیزیکی حوضه آبخیز نیست. در حالی که نسبت جریان‌های مستقیم با طول حوضه و نسبت جریان شریانی با مساحت و محیط حوضه رابطه مستقیم و با شیب حوضه رابطه معکوس دارند. به عبارتی نسبت جریان‌های پیچان‌رودی تحت تأثیر عوامل فیزیکی حوضه نبوده و سازندهای فرسایش‌پذیری و بار رسوب در آن دخالت دارند.

خوشحال و همکاران (۱۳۸۸) در تحقیقی به بررسی شاخص‌های هیدروژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز زاینده‌رود-گاوخونی با استفاده از مدل GIS پرداختند. در ابتدای این تحقیق زاینده‌رود به‌عنوان مهم‌ترین رودخانه فلات مرکزی ایران شناخته شده است که با توجه به توسعه شهرنشینی، گسترش کشاورزی، وجود مناطق صنعتی و پروژه‌های انتقال آب در این حوضه نیاز به بررسی جامع در خصوص تحلیل مکانی و ویژگی‌های مورفولوژیکی در این حوضه وجود دارد. در این پژوهش مشخص گردید حوضه زاینده‌رود دارای ۱۸ زیر حوضه مجزا است که تعداد ۸۰۵ بازه رودخانه را شامل می‌شود. تحلیل عوامل مؤثر بر مورفولوژی رودخانه با مدل GIS نشان داد فرسایش‌پذیری و پوشش گیاهی مهم‌ترین دلیل تغییر مورفولوژی در این حوضه می‌باشند.

همچنین عنوان گردید در این حوضه عملیات آبخیزداری و مدیریت سر آب باید به صورت دقیق - تری بررسی گردد.

انگیز و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی اثر دبی بر روی ضریب زبری به کمک کالیبراسیون مدل ریاضی یک بعدی مطالعه موردی رودخانه زاینده رود بازه سد تنظیمی پل کله پرداخته است. در این پژوهش از اطلاعات ایستگاه هیدرومتری پل زمان خان و مدل ریاضی FASTER برای کالیبراسیون ضریب زبری و همچنین شبیه سازی سطح آب و دبی رودخانه زاینده رود استفاده شده است. واسنجی و صحت سنجی برای دو دوره سه ماهه صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که ضریب زبری مانینگ با کاهش دبی افزایش می یابد.

چیت ساز و همکاران (۱۳۸۵) در تحقیقی به توسعه پایگاه اطلاعات رودخانه زاینده رود با استفاده از سامانه های اطلاعات جغرافیایی پرداختند. با توجه به اهمیت رودخانه زاینده رود در فلات مرکزی ایران و منطقه خشک هیچ مطالعه جامعی در ارتباط با خصوصیات مورفولوژیکی حوضه انجام پذیرفته است. به این منظور در این پژوهش اطلاعات اولیه مورفولوژیکی حوضه نظیر فرسایش - پذیری سازندهای زمین شناسی و نوع پوشش گیاهی حاشیه و کف رودخانه از عوامل تأثیرگذار بر مورفولوژی رودخانه است.

۲-۵- جمع بندی

با توجه به مطالب ارائه شده می توان گفت نرم افزار CCHE2D نرم افزاری پر کاربرد و دقیق برای شبیه سازی جریان و رسوب است و مطالعات فراوانی به کمک آن صورت گرفته است، اما متأسفانه مطالعات صورت گرفته در حوضه زاینده رود بسیار کم بوده و معمولاً مربوط به منطقه قبل از سد می باشد و در قسمت پایین سد زاینده رود مطالعاتی صورت نگرفته است.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

با پیدایش رایانه‌ها و راهکارهای جدید برای حل معادلات حرکت آب و رسوبات، مدل‌های ریاضی متعددی با فرضیات ساده کننده و درجه‌های مختلف دقت به منظور شبیه‌سازی شرایط جریان و رسوب‌گذاری ایجاد شده است. به دلیل دشواری عملیات اندازه‌گیری مستقیم شرایط جریان و رسوب و بالا بودن هزینه‌های آن و همچنین پایین بودن دقت روش‌های تجربی از مدل‌های ریاضی و رایانه‌ای استفاده می‌شود. که به منظور کاربردی کردن مدل‌ها محققان با استفاده از فرضیات ساده روش‌هایی را در جهت حل معادلات دیفرانسیل جزئی حرکت و پیوستگی آب و رسوب ارائه نموده‌اند (بجستان، ۱۳۹۲). در این فصل ابتدا به معرفی منطقه مطالعاتی و مدل مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است. پس از آن به نحوه محاسبه و جمع‌آوری اطلاعات ورودی مدل پرداخته و در نهایت نحوه استفاده از مدل به صورت مختصر شرح گردیده است (بجستان، ۱۳۹۲).

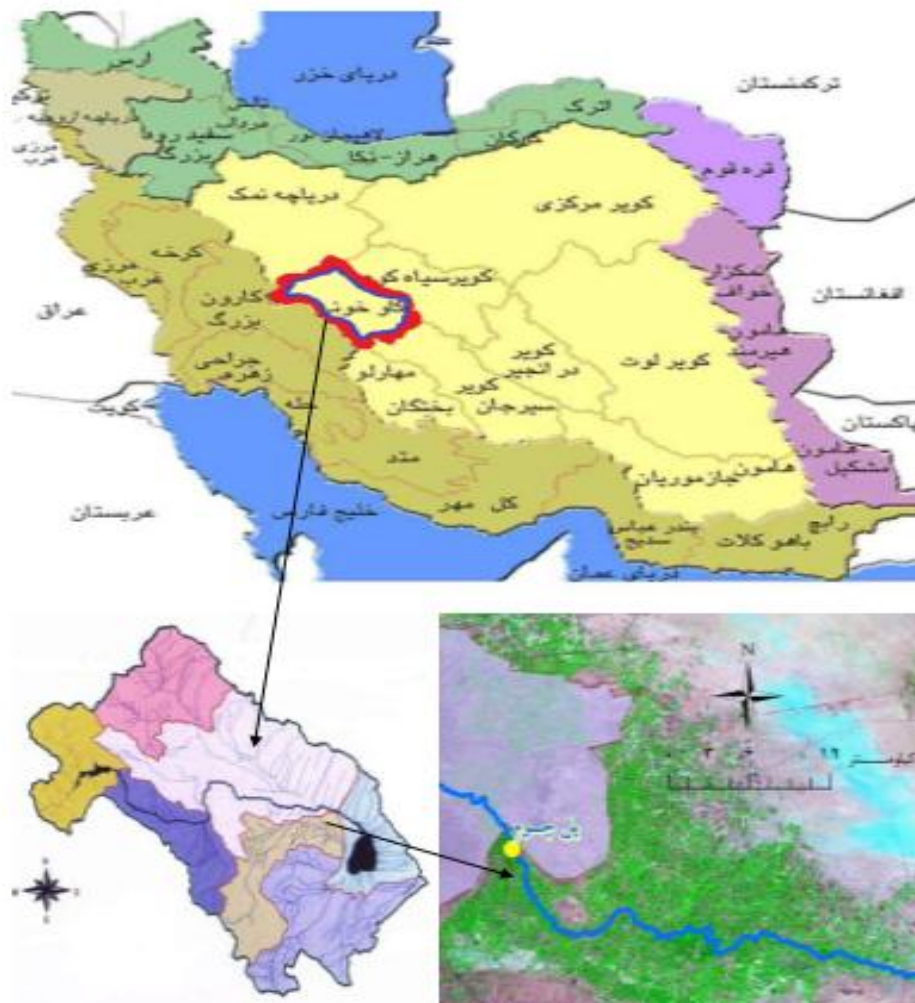
۳-۲- رودخانه زاینده‌رود

رودخانه زاینده‌رود یکی از مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های داخلی ایران بوده که حوضه آبریز اصفهان و گاوخونی را زهکشی می‌نماید. این رودخانه از ارتفاعات زرد کوه بختیاری سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسیر پرپیچ‌وخم به تالاب گاوخونی می‌ریزد. طول زاینده‌رود از سرچشمه تا انتها در حدود ۴۰۵ کیلومتر، مساحت حوزه رودخانه ۴۱،۵۰۰ کیلومترمربع است. برآورد می‌شود جریان آب این رودخانه در مطلوب‌ترین شرایط ۱،۲ کیلومترمکعب در سال و یا ۳۸ مترمکعب در ثانیه است. طول این رودخانه ۴۰۰ کیلومتر، ارتفاع سرچشمه ۳۹۷۴ متر و ارتفاع ریزش گاه ۱۴۶۶ متر است. این رودخانه زندگی را برای هزاران سال در فلات مرکزی ایران ممکن ساخته است جوامع شکل گرفته در کنار این رودخانه در طی سال‌ها کشاورزی، مدنیت، اقتصاد، هنر، سیاست و فرهنگ را در کشور و جهان توسعه داده‌اند ولی متأسفانه در سال‌های اخیر بخش مهمی از مسیرش به سبب مجموعه‌ای از دلایل خشک گردیده است. زاینده‌رود در طول ادوار

زمین‌شناسی بارها مسیر خود را تغییر داده است که نشانه‌هایی از آن برجا مانده است.

۳-۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در شرق استان اصفهان و در محدوده دهستان کراج قرار گرفته است. این محدوده در فاصله ۶ کیلومتری شرق پل شهرستان قرار دارد، که از پل تاریخی چوم شروع شده از روستاهای قلعه‌چوم، زردنجان، حیدرآباد و دشتی می‌گذرد تا به روستای گلستانه برسد. در طی مشکلات تغییر مورفولوژی و حریم بستر زاینده‌رود مطالعاتی در سال ۱۳۷۸ در طول ۱۱۸ کیلومتر از سد زاینده‌رود تا پل چوم صورت گرفت اما می‌توان گفت این اولین تحقیق در بازه زاینده‌رود بعد از پل چوم است.



شکل (۳-۱) موقعیت حوزه آبریز رودخانه زاینده‌رود بر روی نقشه ایران همچنین موقعیت منطقه مورد مطالعه

۳-۳-مدل عددی

انجام مطالعات و تحقیقات مختلف مهندسی هیدرولیک و هیدرولیک رسوب به‌طور معمول دارای پیچیدگی و محاسبات فراوان است که مستلزم دقت و توجه زیاد است. بنابراین لازم است قبل از اقدام به طراحی و اجرای پروژه‌های هیدرولیکی از نحوه عملکرد آن‌ها اطلاعاتی به دست آورده شود. به‌منظور پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده هیدرولیکی لازم است از تکنیک شبیه‌سازی یا مدل-سازی استفاده شود که برای انجام این امر معمولاً دو روش وجود دارد: یکی مدل ریاضی و دیگری مدل فیزیکی در مدل ریاضی اطلاعات موردنظر از طریق محاسبات به دست می‌آیند و درحالی‌که این امر در مدل فیزیکی با اندازه‌گیری امکان‌پذیر است. امروزه با پیشرفت فراوان رایانه و توسعه هرچه بیشتر روش‌های عددی، مدل‌های ریاضی کاربرد فوق‌العاده وسیعی یافته‌اند.

در مدل‌های ریاضی سیستم رودخانه توسط یکسری معادلات ریاضی که بیانگر خصوصیات آن سیستم می‌باشند، معرفی شده سپس این معادلات به روش‌های تحلیلی یا عددی حل می‌گردند. توسعه یک مدل ریاضی برای بیان یک پدیده خاص عبارت است از شناخت قوانین حاکم بر آن و بیان آن در قالب مجموعه‌ای از روابط ریاضی و سپس دادن شکل خاص به این روابط به‌گونه‌ای که بتوان در کوتاه‌ترین مدت رفتار واقعی پدیده را که در طبیعت رخ می‌دهد پیش‌بینی نمود.

به علت شباهت رفتار هیدرودینامیکی مدل فیزیکی با نمونه واقعی و نیز ضرورت مدل کردن جریان‌ات پیچیده هنوز مدل‌های فیزیکی کاربرد وسیعی دارند. بسیاری از پدیده‌ها دارای آن‌چنان پیچیدگی هستند که روابط ریاضی حاکم یا پیچیده بوده یا هنوز حل عددی دقیق آن‌ها امکان‌پذیر نیست. اما انجام آزمایش در یک مدل با مقیاس یک‌به‌یک خیلی گران بوده و شاید غیرممکن باشد. همچنین در استفاده از مدل با مقیاس کوچک‌تر، مسئله دقت و نحوه تعمیم نتایج به‌دست‌آمده از مدل به نمونه اصلی در تمام جنبه‌های مختلف مطرح است. این محدودیت‌ها و معایب، مفید بودن نتایج آزمایشگاهی را کاهش می‌دهد همچنین در بسیاری از حالات، مشکلات

جدی اندازه‌گیری وجود دارد.

مدل ریاضی مدلی است که بر اساس روابط حاکم بر یک پدیده به وجود می‌آید. بنابراین تنها پدیده‌هایی را می‌توان مدل‌سازی نمود که اولاً روابط ریاضی حاکم بر آن پدیده استخراج شده باشد و ثانیاً روش قابل قبول و ابزار مناسبی برای حل روابط وجود داشته باشد. یک مدل ریاضی دارای مزایایی است از جمله هزینه بسیار پایین آن که به مراتب کمتر از مدل آزمایشگاهی است، نتایج حاصل به سرعت به دست می‌آید به طوری که بررسی تأثیر هر یک از متغیرها در یک پدیده خاص خیلی سریع و آسان بوده و می‌توان در زمان کوتاه یک طرح بهینه به دست آورد، در یک مدل‌سازی ریاضی خیلی از شرایط واقعی مسئله به راحتی قابل شبیه‌سازی است، امکان شبیه‌سازی شرایط ایده‌آل به طوری که فقط روی پارامترهای محدود تمرکز شده و بقیه جنبه‌ها حذف شده وجود دارد. با این حال سهولت کاربرد و دقت به دست آمده از مدل ریاضی بستگی به مدل و روش‌های عددی مورد استفاده دارد (عزیزیان، ۱۳۹۲).

۳-۴- معرفی نرم افزار

از سال ۱۹۹۰ مطالعات مربوط به مدل‌های هیدرودینامیکی دوبعدی آغاز شد. این مدل‌های اطلاعات وسیعی درباره عمق آب و ارتفاع بستر در رودخانه‌ها، دریاچه و مصب رودها در اختیار کاربران قرار می‌دهد معادلات دوبعدی، معادلات انتشار-پخشیدگی را با محاسبه مقادیر عمق و عرض متوسط در شرایط مرزی مناسب حل می‌کند.

یکی از این مدل‌های دوبعدی مدل (Center for Computational Hydro Science) CCHE2D (and Engineering) می‌باشد که برای مطالعه جریان آب و رسوب در رودخانه توسعه یافته است. این مدل همچنین در زمینه مدل‌سازی جریان و رسوب در رودخانه‌ها، به صورت رایگان قابل دسترس بوده و از مدل‌های کاربر دوست است. به همین دلیل استفاده گسترده از مدل مذکور

در پروژه‌های تحقیقاتی و مطالعاتی مرتبط با زمینه‌های مهندسی رودخانه و سواحل کشور قابل پیش‌بینی است.

نرم‌افزار CCHE2D یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز است که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک مهندسی محاسباتی (NCCHE) دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه و توسعه یافت این مدل جزو مدل هیدرودینامیکی دوبعدی بوده که برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط گیری شده در عمق استفاده می‌کند و برای شبیه‌سازی جملات انتقال آشفتگی، دو مدل صفر معادله‌ای توزیع سهموی^۱ و مدل طول اختلاط^۲ لزجت گردابه‌ای و نیز مدل دو معادله‌ای ϵ - k را به کار می‌برد (رستمی، ۱۳۹۳).

مدل شبیه‌ساز پدیده انتقال رسوب این نرم‌افزار توانایی مدل‌سازی انتقال هر دو فاز بار معلق و بستر در حالت غیر تعادلی، غیریکنواخت و رسوب چسبنده و غیر چسبنده را دارد. همچنین این نرم‌افزار تأثیر جریان ثانویه بر نحوه انتقال ذرات رسوب بار بستر در بازه‌های قوسی را در نظر می‌گیرد.

ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی در یک نرم‌افزار مجزا پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH صورت می‌گیرد و حل میدان جریان و انتقال رسوب و همچنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم‌افزار CCHE-GUE انجام می‌شود. گسسته‌سازی معادلات جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش مبتنی بر المان محدود صورت می‌گیرد و حل معادلات جبری میدان جریان و انتقال رسوب به ترتیب با استفاده از روش تصحیح سرعت و روش‌های تکرار گوس سایدل و SIP^۳ انجام می‌شود.

1. parabolic Eddy viscosity

2. Mixing length

3. strongly implicit procedure

۳-۵-۵- معادلات بنیادی حاکم بر جریان آب و رسوب در مدل CCHE2D

۳-۵-۱- معادلات هیدرولیکی حاکم بر جریان آب

با توجه به اینکه جریان کانال‌های باز اغلب جزو مسائل آب‌های کم‌عمق است لذا تأثیر حرکت قائم ذرات آب از اهمیت چندانی برخوردار نبوده به همین دلیل معادلات دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق در اکثر موارد برای شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی رودخانه‌ها از دقت و کارایی کافی برخوردار است. معادلات پیوستگی و مؤمنتم جریان متوسط‌گیری شده در عمق برای جریان‌های آشفته در دستگاه مختصات کارتزین را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor}v \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{cor}u \quad (3-3)$$

در معادلات فوق u و v به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای x و y ، t زمان، g شتاب جاذبه، z بیانگر تراز ارتفاعی سطح آب، ρ دانسیته آب، h عمق محلی جریان و f_{cor} ضریب مربوط به شتاب کوریولیس، τ_{xx} ، τ_{xy} ، τ_{yx} ، τ_{yy} تنش‌های رینولدز متوسط-گیری شده در عمق و τ_{bx} و τ_{by} تنش‌های برشی بستر در راستای x و y است.

۳-۵-۲- مدل‌های آشفته‌گی

در معادلات (۲-۳) و (۳-۳) تنش‌های رینولدز با استفاده از ایده بوزینسک^۱ و از طریق ضریب تناسب لزجت گردابه‌ای ν_t به نرخ کرنش‌های متوسط جریان مرتبط می‌شوند.

1. Boussinesq's Assumption

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4-3)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5-3)$$

$$\tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6-3)$$

۳-۵-۲-۱-مدل‌های مبتنی بر لزجت گردابه‌ای

در این نرم‌افزار از دو مدل صفر معادله‌ای برای محاسبه لزجت گردابه‌ای متوسط گیری شده در عمق استفاده می‌شود. مدل اول، مدل توزیع سهموی لزجت گردابه‌ای است که در این روش ضریب تناسب لزجت گردابه‌ای (ν_t) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\nu_t = \frac{A_{xy}}{6} kU^*h \quad (7-3)$$

در این رابطه A_{xy} ضریب قابل تنظیم لزجت گردابه‌ای است که در حالت پیش‌فرض برابر یک است ولی قابل تغییر از ۱ تا ۱۰ می‌باشد. K ضریب ثابت ون کارمن^۱ و U^* سرعت برشی است. در مدل دوم از مدل متوسط عمقی طول اختلاط استفاده شده است. در این رابطه ضریب لزجت گردابه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\nu_t = \bar{l}^{-2} \sqrt{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}\right)^2} \quad (8-3)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{h} \int kz \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h}\right)} dz = kh \int_0^1 \lambda \sqrt{1 - \lambda} d\lambda \approx 0.267kh \quad (9-3)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = C_m \frac{U^*}{kh} \quad (10-3)$$

¹. Von karman constant

$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}$ جمله گرادیان قائم سرعت بوده و بیانگر اثر تولید آشفتگی از بستر رودخانه است. در جریان-های یکنواخت جمله مذکور برابر صفر بوده و نشان از عدم تشکیل آشفتگی در بستر است. در رابطه فوق، C_m برابر مقدار ثابت $2/34375$ است.

۳-۲-۵-۲-مدل دو معادله‌ای k-ε

در این نرم‌افزار علاوه بر دو مدل صفر معادله‌ای، مدل دو معادله‌ای k-ε متوسط گیری شده در عمق برای مواردی که مدل‌سازی نیاز به دقت بالاتری دارد، در نظر گرفته شده است. معادلات انتقال حاکم بر این مدل به صورت زیر است.

$$\frac{\partial k}{\partial t} = u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] = p - \varepsilon + p_{\varepsilon v} \quad (11-3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} p - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + p_{\varepsilon v} \quad (12-3)$$

که :

$$p = -\overline{u'_i u'_j u'_{i,j}} = v_t \left[2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (13-3)$$

$$p_{\varepsilon v} = C_\varepsilon \frac{U_*^4}{h^2} \quad , \quad p_{kv} = c_k \frac{U_*^3}{h^2} \quad (14-3)$$

$$U_* = \sqrt{c_f(u^2 + v^2)} \quad (15-3)$$

$$C_\varepsilon = 3.6 \frac{c_{2\varepsilon}}{c_f^{3.4}} \sqrt{c_u} \quad (16-3)$$

و C_f ضریب اصطکاک است.

بر اساس مقادیر منطقه‌ای محاسبه شده k و ε ، لزجت گردابه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$v_t = \frac{c_u k^2}{\varepsilon} \quad (17-3)$$

در معادلات فوق مقادیر زیر برای ثابت‌های تجربی به کار می‌روند:

$\sigma_\varepsilon=1.3$

$\sigma_k=1$

$c_{2\varepsilon}=1.9$

$c_{1\varepsilon}=1.45$

$c_u=0.09$

۳-۵-۳- معادلات حاکم بر محاسبات انتقال رسوب

انتقال بار معلق اغلب در حالت غیر تعادلی (بین تعلیق و ته‌نشینی) صورت می‌گیرد: از این رو با مدل‌های غیر تعادلی هم شبیه‌سازی می‌شود. اما بسیاری از مدل‌های موجود با فرض تعادل محلی (لحظه‌ای) به شبیه‌سازی بار بستر می‌پردازند. مطالعات نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد مدل‌های غیر تعادلی برای شبیه‌سازی بار بستر نیاز می‌باشند. نسخه جدید نرم‌افزار CCHE2D (version 2,1) یک مدل کاملاً غیر تعادلی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب غیریکنواخت به کار می‌گیرد. این مدل برای محاسبه انتقال رسوب به شبیه‌سازی بار مواد کف (بار بستر معلق) با به کار بردن سه شیوه متفاوت می‌پردازد.

۳-۵-۳-۱- معادلات انتقال رسوب متوسط گیری شده در عمق^۱

اساس مدل‌سازی انتقال رسوب توسط معادله جابه‌جایی-پخش متوسط گیری شده در عمق برای انتقال بار معلق و معادله پیوستگی برای بار بستر صورت می‌گیرد.

$$\frac{\partial(hc_k)}{\partial t} + \frac{\partial(Uhc_k)}{\partial x} + \frac{\partial(Vhc_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_s h \frac{\partial c_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon_s h \frac{\partial c_k}{\partial y}) + E_{bk} - D_{bk} \quad (۱۸-۳)$$

$$(1 - \rho') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\delta c_{bk}})}{\partial t} + \frac{\partial q_{bkx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bky}}{\partial y} = -E_{bk} + D_{bk} \quad (k = 1, 2, 3 \dots N) \quad (۱۹-۳)$$

اندیس k بیانگر کلاس ابعادی ذرات رسوب است.

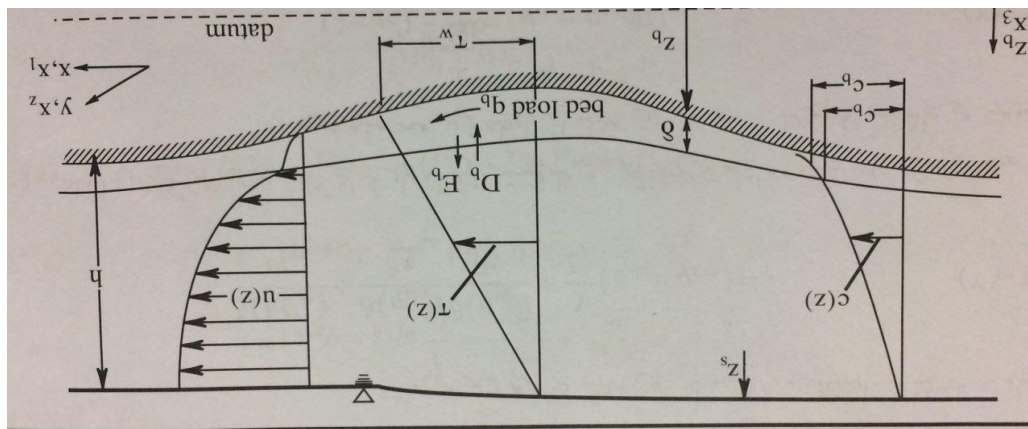
در رابطه (۱۸-۳) C_k و ε_s به ترتیب عبارت‌اند از غلظت بار رسوب معلق و ضریب پخش گردابه‌ای رسوب که ε_s از رابطه $\varepsilon_s = v_t / \sigma_s$ محاسبه می‌شود. Q_s و v_t به ترتیب لزجت گردابه‌ای جریان و

^۱ . Depth-Averaged sediment Transport

عدد اشمیت-پرانتل آشفتگی^۱ (که بین ۰/۵ تا ۱ قرار دارد) است. E_{bk} و D_{bk} به ترتیب بیانگر نرخ ورود ذرات رسوب از ناحیه بار بستر به ناحیه بار معلق و نرخ ته‌نشینی ذرات رسوب در مرز بین نواحی بار بستر و معلق است (شکل ۳-۱).

$$E_{bk} - D_{bk} = \alpha \omega_{sk} (C^*_{bk} - C_k) \quad (3-20)$$

ضریب α پارامتری است در مدل‌سازی انتقال رسوب به نام ضریب تطبیقی^۲ غیر تعادلی بار معلق، $\alpha \omega_{sk}$ سرعت سقوط مربوط به کلاس ابعادی ذرات رسوب و C^* بیانگر غلظت رسوبات در حال تعادلی (ظرفیت انتقال رسوب) است.



شکل (۳-۲) نمایش الگوی جریان و انتقال رسوب در ستون قائم

در رابطه (۳-۱۹) p' تخلخل مواد کف، $\overline{C_{bk}}$ غلظت متوسط بار بستر در منطقه حرکت بار بستر، δ ضخامت لایه بستر، q_{bkx} و q_{bky} مؤلفه‌های نرخ انتقال بار بستر در راستای x و y می‌باشند. جمله اول سمت چپ معادله نیز بیانگر تغییرات تراز بستر است (z_b بیانگر تراز ارتفاعی بستر است). شکل ۳-۱ الگوی جریان و انتقال رسوب در ستون قائم جریان را نشان می‌دهد.

1 . Turbulent Prandtl-Schmidt Number

2 . Adaptation factor

۳-۶- روش‌های حل معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال رسوب

برای حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر میدان جریان، میدان مزبور به مجموعه‌ای از نقاط یا سلول‌ها منفصل می‌شود. سپس معادلات با استفاده از یک سری معادلات جبری بر روی مجموعه نقاط یا سلول‌ها تقریب زده شده و در نهایت با حل دستگاه معادلات جبری حاصله، مجموعه‌ای از مقادیر عددی گسسته که به‌عنوان یک تقریب از حل معادلات بر روی کل میدان می‌باشند، حاصل می‌شوند. دو روش عمده به‌عنوان روش‌های انفصال میدان جریان مطرح است:

۱- روش اجزاء محدود^۱

۲- روش تفاضل محدود^۲

در روش‌های بالا مراحل زیر انجام می‌شود:

□ تقریب متغیرهای جریان با استفاده از توابع ساده

□ گسسته سازی با استفاده از جایگذاری تقریب‌ها در معادلات حاکم بر جریان

□ حل معادلات جبری

معمولاً در تعیین پروفیل انتخابی برای متغیر موردنظر، منطقه کوچکی از میدان را پوشش می‌دهند که به این ترتیب میدان محاسباتی به تعداد میدان کوچک‌تری تقسیم می‌شود که هر یک از این میدان‌های کوچک دارای یک پروفیل فرضی است. معادله انفصال رابطه‌ای جبری است که مقادیر متغیر در یک میدان کوچک را به هم مرتبط می‌سازد. تفاوت بین روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود از نحوه انتخاب پروفیل‌های میدان‌های منفصل شده و نحوه به دست آوردن معادلات انفصال حاصل می‌شود (عزیزیان ۱۳۹۳).

1 . Finite Element Method

2 . Finite Deifference Method

۳-۶-۱- روش حل معادلات جریان (روش مبتنی بر المان محدود)

روش عددی که در مدل CCHE2D برای معادلات حاکم بر میدان جریان به کار گرفته شده است یک نوع روش المان محدود معروف به روش المان مؤثر است که توسط وانگ و هوو^۱ در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است. این مدل از یک شبکه جابه‌جاشده با ساختار منظم برای گسسته نمودن میدان محاسباتی و از روش تجمع محلی برای ایجاد معادلات جبری استفاده می‌کند. مطابق شکل (۲-۳) مؤلفه‌های سرعت در گره‌های متناوب حل می‌شوند. در صورتی که فشار در مرکز سلول‌ها محاسبه می‌شود. یک تابع درون یاب^۲ درجه‌دو برای منفصل نمودن معادلات مومنوم در یک المان نه گره‌ای به کار می‌رود، در صورتی که منفصل نمودن معادلات پیوستگی در گره‌های متناوب نیازمند یک تابع خطی درجه‌دو است. برای حل سیستم معادلات حاکم جبری از روش تصحیح سرعت استفاده می‌شود و شبیه‌سازی الگوی جریان غیر پایدار توسط طرح پیشروی زمانی انجام می‌شود. فرم صحیح معادلات پیوستگی و مومنوم گسسته شده به صورت زیر است:

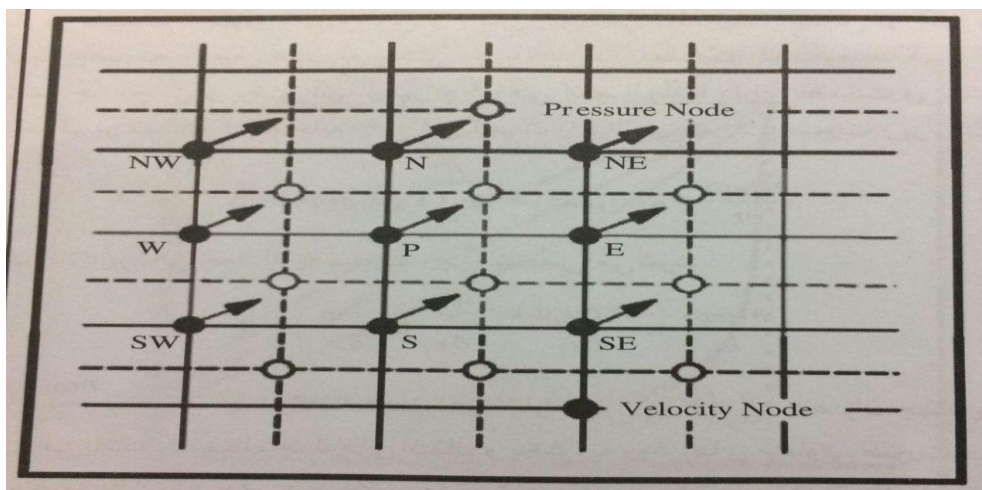
$$Z^{n+1} = \Delta t \cdot Q^n + \Delta t \cdot FS^n \quad (۲۱-۳)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t \cdot C_u^n + \Delta t \cdot FM_u^n \quad (۲۱-۳)$$

$$v^{n+1} = v^n + \Delta t \cdot C_v^n + \Delta t \cdot FM_v^n \quad (۲۲-۳)$$

^۱ . Wang and Hu

^۲ . Interpolation Function



شکل (۳-۳) المان نه و چهار گره‌ای در یک شبکه جابه‌جاشده

که Z' پارامتر تصحیح تراز سطح آب، Δt گام زمانی، n زمان Q پارامتر دیورژانس، F_s جمله چشمه، پارامترهای C_u و C_v بیانگر فرم گسسته شده جمله‌های سمت چپ معادلات مومنتوم می‌باشند. جمله‌های FM_u و FM_v بیانگر فرم گسسته نیروهای مومنتوم (گرادیان فشار، تنش‌های رینولدز، تنش‌های برشی، نیروی کورولیس) در سمت راست معادله مومنتوم می‌باشند (رستمی، ۱۳۹۳). روش تصحیح فشار برای کوپل نمودن سرعت و میدان فشار به کار می‌رود. سرعت توسط پارامتر تصحیح فشار (سطح آب) برای حفظ بقای جرم تصحیح می‌شود:

$$\vec{u}^{n+1} = \vec{u}^* - \Delta t \cdot g \cdot \nabla Z' \quad (24-3)$$

$$Z' = Z^{n+1} - Z^n \quad (25-3)$$

که \vec{u}^* بیانگر سرعت موقت و Z تراز سطح آب است.

۳-۶-۲- روش حل پدیده‌های جابه‌جایی و پخش

پدیده انتشار در طبیعت به صورت جابه‌جایی و پخش انجام می‌شود. بیشتر مسائل فیزیکی و هیدرولیکی مستقیماً شامل پدیده‌های جابه‌جایی و پخش می‌باشند. در معادلات مومنتوم حاکم بر جریان و نیز سایر معادلات، جابه‌جایی و پخش آن‌ها و نیز چگونگی انفصال آن‌ها دارای اهمیت

می‌باشند. در حالت کلی معادله حاکم بر کمیت φ که جابه‌جایی این کمیت را بیان می‌نماید به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(p\varphi)}{\partial t} + \text{div}(p\mathbf{u}\varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}(\varphi)) + S \quad (26-3)$$

که در سیستم کارتیزین این معادله به صورت زیر مشخص می‌شود.

$$\frac{\partial(p\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(pu_j\varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x_j} \right) + S \quad (27-3)$$

جمله $\frac{\partial(pu_j\varphi)}{\partial x_j}$ به عنوان جمله انتقال متغیر φ و پارامتر $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x_j} \right)$ به عنوان جمله پخش متغیر φ در معادله معین می‌باشند. انفصال جمله‌های انتقال و پخش به روش‌های متفاوتی صورت می‌گیرد. چنانچه شبکه انتخاب شده به اندازه کافی ریز باشد، روش‌های انفصالی انتخابی در نتیجه نهایی تأثیر چندانی نخواهند داشت. اگر Γ مقدار ثابت باشد و جریان تراکم پذیر فرض شود، در این صورت مقدار $p\mathbf{u}$ مقداری ثابت خواهد بود که معادله دیفرانسیل ساده شده فوق در حالت یک‌بعدی به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$p\mathbf{u} \frac{\partial\varphi}{\partial x} = \Gamma \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} \quad (28-3)$$

در حل دقیق معادلات دیفرانسیل فوق چنانچه دامنه محاسبه $0 < x < L$ و در مرزها مقادیر معین باشد در این صورت:

$$\text{at } x = l: \varphi = \varphi_t \quad , \quad \varphi = \varphi_0 : x = 0 \text{ at}$$

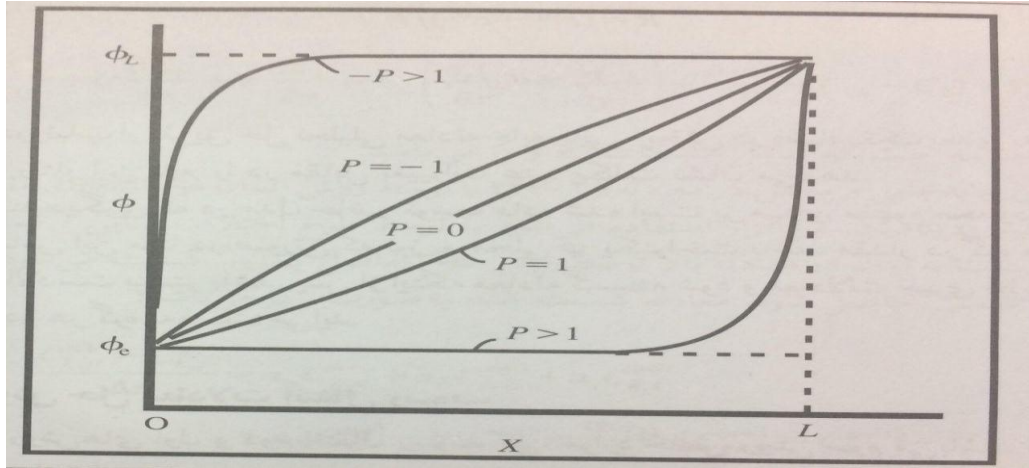
جواب معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\varphi(x) - \varphi_0}{\varphi_t - \varphi_0} = \frac{\exp(p^x/L) - 1}{\exp(p) - 1} \quad (29-3)$$

P عدد پکلت است که به صورت نسبت جابه‌جایی به پخش تعریف می‌گردد.

$$p = \frac{(p\mathbf{u})}{(\Gamma/L)} \quad (30-3)$$

تغییرات ϕ نسبت به x بر حسب اعداد مختلف پکلت ترسیم شده است، که در (شکل ۳-۴) مشاهده می شود.



شکل (۳-۴) جواب دقیق برای مسئله جابه جایی-پخش یک بعدی

چنانچه $p = 0$ باشد در این صورت پخش خالص بر میدان جریان حاکم است و انتقال هیچ اثری نخواهد داشت و چنانچه $p \gg -1$ یا $p \ll -1$ باشد در این صورت جمله انتقال حاکم بوده و اثر جمله پخش بسیار ناچیز است.

نرم افزار CCHE2D با بهره گیری از طرح بالادست از یک تابع درون یاب انتقال برای محاسبه جمله انتقال استفاده می کند.

$$c_1 = \frac{1}{2T} [(2e^{pe\epsilon} - e^{-pe} - e^{pe})(1 - \frac{\epsilon_0(R+1)}{\epsilon_0 R+1}) + T - \frac{\epsilon T(R+1)}{\epsilon_0 R+1}] \quad (31-3)$$

$$c_2 = 1 - c_1 - c_3 \quad (32-3)$$

$$c_{13} = \frac{1}{2T} [(2e^{pe\epsilon} - e^{-pe} - e^{pe})(1 - \frac{\epsilon_0(R-1)}{\epsilon_0 R+1}) + T - \frac{\epsilon T(R-1)}{\epsilon_0 R+1}] \quad (33-3)$$

که:

$$T = e^{pe} - e^{-pe} - 2e^{pe\epsilon} \quad (34-3)$$

$$R = (e^{pe} - e^{-pe})/T \quad (35-3)$$

$$p_e = u_c/v_t$$

(۳-۳۶)

این تابع درون یاب از طریق حل تحلیلی معادله جابه‌جایی-پخش در فضای تک‌بعدی به دست می‌آید. (شکل ۲-۴) رفتار این تابع را در مقابل تغییرات عدد پکلت نشان می‌دهد.

طرح آپویند دیگری که در مدل حاضر توسعه داده شده است بر مبنای مفهوم محدودیت فیزیکی است. بر اساس این مبنا در صورتی که توزیع محلی φ یکنواخت باشد مقدار در گره مرکزی نباید از مقدار در گره بالادست بیشتر باشد. پس از اینکه معادله گسسته شود و معادلات جبری حل شوند، مشتق نسبت به X در هر گره به دست می‌آید (رستمی، ۱۳۹۳).

۳-۷- مراحل استفاده از مدل CCHE2D

برای اجرای شبیه‌سازی در مدل CCHE2D پنج مرحله وجود دارد که در ادامه این پنج مرحله را معرفی می‌نماییم.

تولید تشکیل محاسباتی

مشخص نمودن شرایط مرزی

تنظیم پارامترها

شبیه‌سازی

شرح و تفسیر نتایج

۳-۷-۱- تولید شبکه محاسباتی

جهت تولید شبکه محاسباتی باید از مدل CCHE-MESH Generator استفاده گردد. مدل CCHE2D نیز همانند تمامی مدل‌ها جهت شبیه‌سازی نیازمند اطلاعات توپوگرافی از محدوده مطالعاتی است. این مدل توانایی پشتیبانی از انواع اطلاعات هندسی را دارا بوده و از توابع مختلف

جهت تولید شبکه محاسباتی بهره می‌برد که در ادامه راجع به نحوه آماده نمودن اطلاعات هندسی به تفصیل مطالبی ارائه خواهد گردید.

۳-۷-۱-۱-وارد نمودن اطلاعات هندسی در مدل CCHE-MESH

روش‌های مختلفی برای ایجاد فایل هندسی در مدل CCHE-MESH Generator وجود دارند که عبارت‌اند از:

- ۱- فایل‌های تولیدشده توسط GIS که به صورت shape file هستند.
- ۲- فایل‌های تولیدشده توسط GIS که به صورت digital elevation model (ASCII) هستند.
- ۳- فایل‌های به فرمت (*.mesh_xyz) topography database که حاصل از دوربین‌های نقشه‌برداری بوده و به صورت XYZ هستند.
- ۴- فایل‌های تصویری با فرمت (*.bmp) که شامل تصویری از نقشه‌های توپوگرافی است. و مدل ابزاری را در اختیار کاربر می‌گذارد تا بتواند نقشه‌های تصویری را رقوم دار کند.

۳-۷-۱-۲-ارزیابی شبکه

کیفیت یک شبکه با شاخص‌های متعددی مانند ماکزیمم انحراف از حالت قائم (MDO)، متوسط انحراف از حالت قائم (ADO)، نسبت ماکزیمم ابعاد شبکه (MAR) و نسبت متوسط ابعاد شبکه (AAR) ارزیابی می‌گردد. شاخص‌های MDO و ADO برای ارزیابی متعامد بودن شبکه‌ها و شاخص‌های MAR و AAR برای ارزیابی یک شبکه از لحاظ همواری به کار می‌رود. مطالعات نشان می‌دهد که برای رودخانه‌های طبیعی هرچه MDO و ADO کمتر باشند، شبکه‌ها متعامدتر هستند. و همچنین هرچه MAR و AAR به یک نزدیک‌تر باشند، شبکه‌ها هموارتر می‌باشند. در هر بار ایجاد شبکه می‌توان گزارشی از پارامترهای فوق را در مدل CCHE-MESH مشاهده نمود.

۳-۷-۱-۳- درون‌یابی رقوم بستر

برای اینکه یک شبکه محاسباتی قابل کاربرد باشد، رقوم بستر (درهرگره) باید با درون‌یابی اطلاعات توپوگرافی محدوده مطالعاتی به دست آید. از آنجایی که در محل گره‌ها ممکن است هیچ‌گونه اطلاعاتی موجود نباشد عملیات درون‌یابی موجب تولید اطلاعات موردنیاز در هر گره می‌شود.

این مدل از الگوریتم‌های مختلفی جهت درون‌یابی نقاط بستر استفاده می‌کند که مهم‌ترین آن‌ها درون‌یابی تصادفی و درون‌یابی مثلثی است.

۳-۷-۲- مشخص نمودن شرایط مرزی

شرایط مرزی، چگونگی حرکت و رفتار سطوح شبیه‌سازی شده در مرزها می‌باشد. بنابراین شرایط مرزی باید تا حد ممکن به شرایط فیزیکی صحیح نزدیک باشد. معمولاً توزیع شرایط مرزی (مانند توزیع سرعت در مقاطع) مشخص نیست و در این مورد می‌تواند مشخصات متوسط جریان را تعیین و به مدل معرفی نمود.

۳-۷-۳- تنظیم پارامترها

شبیه‌سازی عددی تولید دوباره فیزیک صحیح مسئله به همراه حل معادلات ریاضی است. بنابراین پارامترهای فیزیکی و عددی بسیاری موردنیاز است که تعدادی از آن‌ها به‌عنوان پیش‌فرض در مدل GUI گردآوری شده‌اند و فقط به‌عنوان راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعداد زیادی از این پارامترها به‌وسیله کاربر برای کاربرد معین تغییر داده می‌شوند.

۳-۷-۴- شبیه‌سازی

پس از فراخوانی شبکه محاسباتی رودخانه و معرفی پارامترهای موردنظر در محیط نرم‌افزار GUI مدل آماده فرآیند شبیه‌سازی است. نکته مهم در مدل‌سازی جریان و دستیابی به نتایج مطلوب

پایداری مدل عددی است. هنگامی که گام‌های زمانی برای یک مسئله معین خیلی بزرگ انتخاب شود شبیه‌سازی ادامه نمی‌یابد و یا مدل با نتایج غیرمعقول مواجه خواهد شد. اگرچه مدل عددی CCHE3D از روش ضمنی استفاده می‌کند و گام‌های زمانی می‌توانند به صورت دلخواه تعیین شوند.

۳-۷-۵- شرح و تفسیر نتایج

پس از شبیه‌سازی جریان توسط مدل می‌توان اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی را به صورت گرافیکی، نموداری و جدولی مشاهده کرد و مورد بررسی قرار داد. همچنین امکان دستیابی به اطلاعات به صورت مقاطع عرضی و طولی وجود دارد.

۳-۸- تولید شبکه محاسباتی برای رودخانه زاینده‌رود

۳-۸-۱- بارگذاری اطلاعات توپوگرافی

اولین گام در ساختن شبکه محاسباتی، بارگذاری اطلاعات توپوگرافی است. اطلاعات توپوگرافی شامل مقادیر ارتفاعات بستر و یا اطلاعات عمق است. در این مدل ما از بین پنج روش توضیح داده شده در قسمت (۳-۶-۱-۱) از روش فایل‌های به فرمت topography database (*.meshxyz) که حاصل از دوربین‌های نقشه‌برداری بوده و به صورت XYZ هستند استفاده می‌کنیم.

اطلاعات توپوگرافی رودخانه مربوط به نقشه‌برداری حریم و بستر رودخانه زاینده‌رود توسط شرکت مهندسی مشاور ساز آب پردازان به منظور نقشه‌برداری ۷۵ کیلومتر از رودخانه زاینده‌رود است. این نقشه‌ها شامل خطوط توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ با منحنی تراز ۱ متر و باند یک کیلومتر تهیه شده و به همراه نقشه‌های ۳۳۰ مقطع حدفاصل بند رودشتین تا روستای ورزنه از رودخانه زاینده‌رود تحویل شرکت آب منطقه‌ای اصفهان گردیدند.

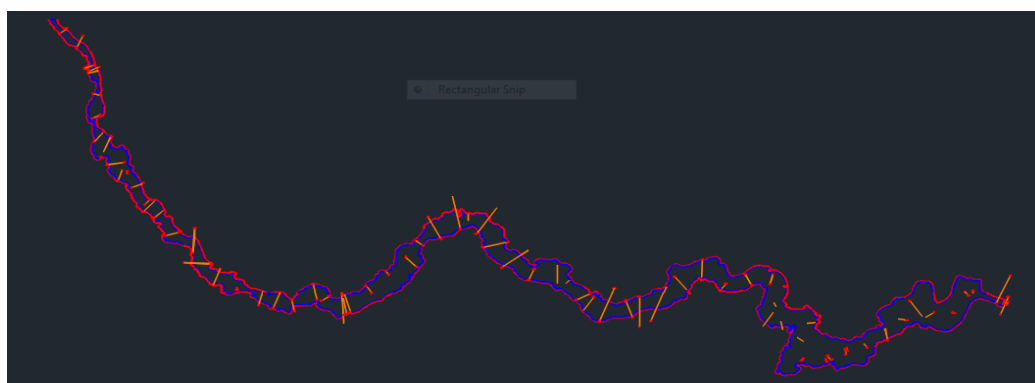


شکل (۳-۵) نمایی از رودخانه زاینده رود بعد از پل چوم در زمان نقشه برداری

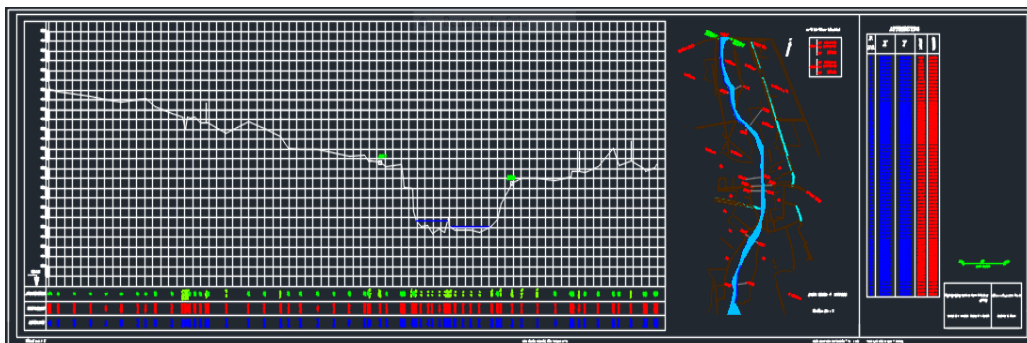


شکل (۳-۶) مسیر نقشه برداری شده از زاینده رود

مبنای مسطحاتی نقشه‌های توپوگرافی بیضوی WGS 84 و سیستم تصویر آن UTM بوده است، همچنین مبنای ارتفاعی کلیه نقشه‌ها MSL و فاصله متوسط مقاطع عرضی رودخانه از یکدیگر ۲۵۰ متر است.



شکل (۳-۷) پروفیل طولی از منطقه مطالعاتی در نرم افزار اتوکد



شکل (۳-۸) نمایی از اطلاعات مربوط به مقطع عرضی در نرم‌افزار اتوکد

۳-۸-۲- تعریف مرزهای محاسباتی

پس از بارگذاری اطلاعات توپوگرافی، برای تعیین محدوده فیزیکی و محاسباتی باید مرزهایی برای آن تعریف شود. به این ترتیب که در نرم‌افزار CCHE2D در قسمت نوارابزار بر روی First Boundary کلیک کرده و سپس برای ایجاد مرز بر روی گزینه B+ کلیک کرده مرز سمت راست رودخانه را مشخص کرده سپس با انتخاب گزینه Second Boundary و مراحل قبل ساحل سمت چپ رودخانه را مشخص می‌کنیم.

۳-۸-۳- تولید شبکه محاسباتی با روش Algebraic

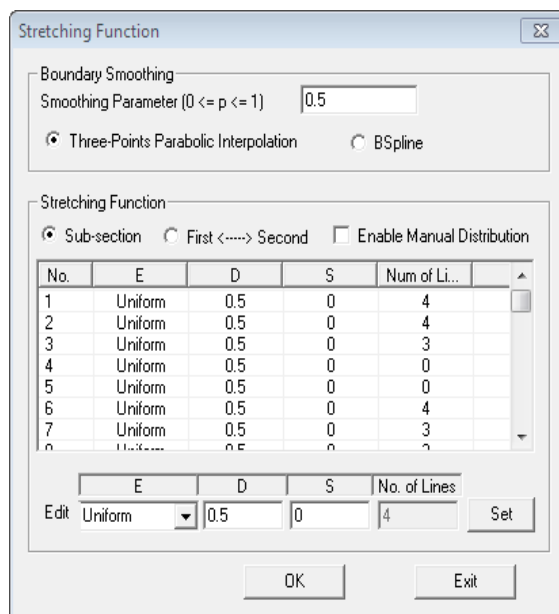
باید ابتدا شبکه محاسباتی بر اساس این روش تولید و سپس از دیگر روش‌ها برای اعمال تغییرات و اصلاحات موردنظر در شبکه استفاده نمود. در این مدل حداکثر خطوط شبکه در راستای جهت جریان ۱۰۰ و حداکثر خطوط شبکه در راستای عمود بر جهت جریان ۷ در نظر گرفته شده است.

۳-۸-۴- تنظیم پارامترهای همواری مرزها و توابع تغییر شکل

پس از ایجاد شبکه باید برخی از پارامترها از لحاظ هموار بودن مرزها، منطبق بودن شبکه‌ها با شرایط هندسی و ... تنظیم گردد. این تنظیمات در منوی setting نوارابزار می‌باشند و به دودسته پارامترهای هموار نمودن مرز^۱ و پارامترهای مربوط به Stretching function تقسیم می‌شوند. در

^۱ . Boundary Smoothing

این بخش پنجره‌ای وجود دارد که نشان‌دهنده هموار بودن مرزها است که به صورت زیر است.



شکل (۳-۹) پنجره مربوط به هموار نمودن مرزها

در این پنجره اگر $P = 1$ باشد ماکزیمم اثرات همواری و اگر $P = 0$ باشد در مرزها هیچ‌گونه همواری نداریم.

برای همواری بیشتر ابتدا روش B-spline را انتخاب کرده که بسیار پایدار است. برای مقدار $P = 0.8$ را انتخاب کرده همچنین مقادیر E, D, S را مشخص می‌کنیم.

مقدار $D = 0.5$ ، برای S و گزینه Contract را برای E انتخاب می‌کنیم. در پایان گزینه

Set را کلیک کرده و OK می‌کنیم و نتایج را بررسی می‌نماییم (CCHE2D Mesh)

.(Generator Users' Manua

۳-۸-۵-ارزیابی شبکه محاسباتی

به‌منظور اطمینان از کیفیت مطلوب شبکه تولیدشده در راستای عمود بودن اجزای شبکه و هموار

بودن آن می‌تواند شبکه را ارزیابی نمود. که شاخص‌های ارزیابی در پنجره Mesh Evaluation

در قسمت Evaluate نشان داده خواهد شد. در مورد شاخص‌های ارزیابی در قسمت (۳-۶-۱-۲)

توضیح داده شد.

۳-۸-۶- درون‌یابی رقوم بستر

برای استفاده از شبکه تولیدشده نیاز به درون‌یابی ارتفاع بستر برای هر یک از گره‌ها یا نقاط شبکه داریم. برای درون‌یابی در این مدل از روش Random Interpolation که دارای سرعت بالایی است استفاده می‌گردد. پس از انجام عملیات درون‌یابی هر کدام از گره‌ها دارای رقوم ارتفاعی می‌شوند و مدل رقومی نمایش داده خواهد شد. پس از ایجاد شبکه محاسباتی باید فایل هندسی را با پسوند *geo ذخیره نمود.

۳-۹- مدل‌سازی جریان آب و رسوب

۳-۹-۱- مقدمه

پس از تهیه مدل هندسی و شبکه محاسباتی در مدل CCHE-MESH در این مرحله برای اجرای یک شبیه‌سازی مطلوب و قابل قبول نیاز به یک محیط گرافیکی واسط کاربر (GUI) جهت تحلیل معادلات جریان و رسوب می‌باشد. این نرم‌افزار از وبسایت علوم آب محاسباتی و مهندسی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی به آدرس <http://www.ncche.olemiss.edu> قابل دریافت است. در این تحقیق مدل برای رودخانه زاینده‌رود با شرایط متفاوت (دوره بازگشت‌های مختلف) اجرا گردید و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۹-۲- مشخص نمودن دبی جریان با دوره بازگشت‌های متفاوت

برای مشخص نمودن دبی در دوره بازگشت‌های متفاوت ماکزیمم دبی بین سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۱ را مشخص کرده‌ایم.

جدول (۳-۱) ماکزیمم دبی سالانه

سال	۱۳۷۱	۱۳۷۲	۱۳۷۳	۱۳۷۴	۱۳۷۵	۱۳۷۶	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	۱۳۸۱
دبی (m ³ /s)	۵۸	۱۸۵/۹	۶۶/۵	۴۶/۷	۵۸/۲	۳۰/۵	۶۰/۷	۲۳/۸	۲۲/۷	۱۷/۵۸	۳۱/۲
سال	۱۳۸۲	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	
دبی (m ³ /s)	۲۸/۴	۴۶/۱	۹۳/۳	۵۹	۲۷/۱	۳/۶	۳۵	۱/۸۷	۴۷/۵	۱۹/۷	

برای محاسبه دوره بازگشت از توزیع پیرسون^{۱۵} استفاده می‌کنیم که معادله آن به صورت زیر است:

$$f(x) = \frac{\exp(-\beta/(x-\gamma))}{\beta\Gamma(\alpha((x-\gamma)/\beta)^{\alpha+1}} \quad (3-37)$$

در این رابطه β پارامتر مقیاس مداوم بوده و مقدار آن برابر $425/21$ است، α پارامتر شکل مستمر و مقدار آن برابر $6/550.9$ و γ محل مستر است و مقدار آن برابر $31/10.4$ است.

طبق محاسبات آماری با توزیع پیرسون ۵ دبی رودخانه با دوره بازگشت‌ها ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله به ترتیب برابر $37/25$ ، $66/4$ ، $88/3$ ، $111/57$ ، $145/11$ متر مکعب بر ثانیه است.

۳-۹-۳- باز کردن فایل هندسی

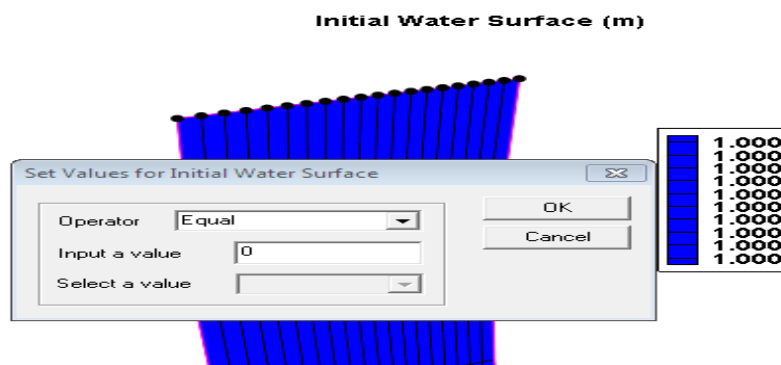
اولین گام در آماده‌سازی یک پروژه برای شبیه‌سازی فراخوانی شبکه محاسباتی محدوده موردنظر است. که فایل شبکه باید حاوی شرایط هندسی و اولیه مانند مختصات طولی و عرضی رقوم اولیه بستر رقوم سطح آب اولیه و زبری بستر باشد که این فایل در قسمت قبلی آماده گردید.

¹. Pearson Type 5 Distribution

۳-۹-۴- تنظیم شرایط اولیه جریان

شرایط اولیه جریان به دودسته شرایط اولیه جریان و شرایط اولیه بستر تقسیم می‌شوند. برای جریان شرایط اولیه شامل رقوم اولیه بستر رقوم سطح آب اولیه می‌باشند. و برای بستر نیز شرایط اولیه شامل زبری بستر قابلیت فرسایش بستر و ماکزیمم ضخامت رسوب گذاری است.

۱- برای وارد نمودن شرایط اولیه جریان بر روی گزینه initial water surface کلیک کرده سپس در بالادست رودخانه بر روی ابتدا و انتهای خط عرضی کلیک کرده تا پنجره set values for initial water surface باز شود در قسمت input a value رقوم سطح آب بالادست را وارد کرده- ایم.



شکل (۳-۱۰) پنجره مربوط به اطلاعات ورودی جریان

برای رقوم سطح آب پایین دست نیز همانند رقوم سطح آب بالادست در قسمت پایین دست رودخانه در ابتدا و انتهای خط عرضی کلیک کرده، و در پنجره باز شده رقوم سطح آب پایین دست را وارد می‌کنیم.

داده‌های جریان شامل اطلاعات مربوط به دبی اشل است که شرکت آب منطقه‌ای اصفهان از سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۲ برداشت نموده است.

۲- برای زبری بستر از پنجره Variable گزینه Bed Roughness را کلیک کرده و دونقطه در

ابتدا و انتهای شبکه انتخاب کرده و مقدار ضریب مانینگ را برای زبری بستر وارد کرده‌ایم.

۳-۹-۵- تنظیم پارامترهای جریان

پارامترهای جریان به سه گروه کلی زیر تقسیم می‌شوند:

۱- پارامترهای شبیه‌سازی

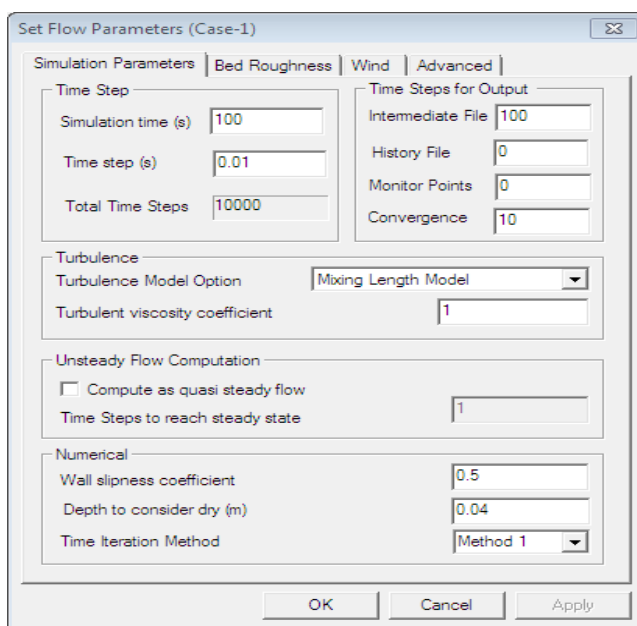
۲- پارامترهای زبری بستر

۳- پارامترهای پیشرفته

۳-۹-۶- پارامتر شبیه‌سازی

برای تنظیم پارامترهای جریان گزینه Simulation را انتخاب می‌کنیم تا پنجره Simulation Parameter در این پنجره سه گروه با عنوان Simulation Parameters, Bed Roughness و Advanced وجود دارد که در ادامه در مورد هر یک بحث خواهد شد.

الف) گروه Simulation parameter



شکل (۳-۱۱) پنجره مربوط به پارامترهای شبیه‌سازی

همان طور که در شکل نشان داده شده در این گروه پارامترها به پنج بخش تقسیم می‌شوند.

بخش time step که شامل Simulation time بیانگر زمان لازم جهت شبیه‌سازی برحسب ثانیه است که در این مدل مقدار ۲۰۰۰۰ را قرار داده‌ایم، Time step گام زمانی موردنیاز برای حل عددی شبکه محاسباتی در این مدل ده گام زمانی تعیین می‌کنیم، Total Time steps بیانگر تعداد گام زمانی کل است.

بخش $\text{time Set for Output}$ در این بخش زمانی را که نیاز است مدل نتایج خروجی را ارائه دهد وارد نموده که مقدار آن را ۱۰۰ قرار می‌دهیم.

بخش Turbulence در این نرم‌افزار، پنج مدل آشفتگی برای مدل‌سازی جریان به کار می‌رود. این مدل‌ها عبارت‌اند از :

۱- مدل $\text{parabolic Eddy Viscosity}$

۲- مدل Mixing Length

۳- مدل $\text{K-}\epsilon$

۴- مدل $\text{For wind-Driven Flow}$

۵- مدل Smagorinski

تحقیقات حاکی از آن است که سه مدل اول برای شبیه‌سازی مناسب‌تر هستند. همچنین مدل

$\text{K-}\epsilon$ از قابلیت بیشتری برای مدل‌سازی انواع جریان‌ها دارا است. (رستمی، ۱۳۹۳)

در این تحقیق بهترین مدل آشفتگی بر اساس نتایج حاصل از کالیبره کردن نرم‌افزار انتخاب می‌شود.

ب) گروه Bed Roughness

این گروه به دو بخش تقسیم می‌شود. در گزینه geo File می‌توان هر یک از گزینه‌های ضریب مانینگ یا ارتفاع بستر را انتخاب نمود. که در این مدل ما ارتفاع بستر را انتخاب می‌کنیم. در بخش Use Bed Roughness Formula دو فرمول برای محاسبه زبری بستر وجود دارد رابطه ون راین و دیگری رابطه وو و وانگ که با انتخاب هر روش باید پارامترهایی مانند D_{90} , D_{50} , D_{16} و فاکتور کالیبراسیون را وارد کنیم.

ج) گروه Advanced

در این صفحه پارامترهایی مانند ضریب نیروی کوریولیس، شتاب ثقلی، ثابت ون کارمن و ویسکوزیته باید وارد شوند. با توجه به شرایط در این مدل از مقادیر پیش فرض استفاده می‌کنیم.

۳-۹-۷-تنظیم شرایط مرزی ورودی و خروجی

برای تنظیم شرایط مرزی ورودی و خروجی بر روی گزینه به‌علاوه در نوار ابزار Simulations کلیک کرده سپس بر روی اولین و آخرین نقطه از اولین خط شبکه در راستای J در بالادست کلیک کرده و مقدار دبی ورودی را وارد می‌کنیم. سپس بر روی اولین و آخرین نقطه در پایین- دست کلیک کرده و رقوم سطح آب را وارد می‌نماییم.

۳-۱۰-کالیبره کردن نرم‌افزار

پس از انجام مرحله مش‌بندی و مشخص کردن شرایط مرزی برای به دست آوردن نتایج مطلوب و قابل قبول به کالیبره کردن مدل پرداختیم. در این تحقیق از دو پارامتر برای کالیبره کردن مدل استفاده شده است:

۱- مدل زبری مانینگ

۲- مدل آشفتگی

برای کالیبره کردن مدل در این تحقیق از سه مدل آشفتگی و پنج عدد مانینگ به شرح زیر استفاده گردیده است:

مقادیر استفاده شده برای ضریب زبری مانینگ عبارت‌اند از: (۰/۰۱۵ ، ۰/۰۲ ، ۰/۰۲۵ ، ۰/۰۳ ، ۰/۰۳۵)

مدل‌های معمول و پرکاربرد در این نرم‌افزار عبارت‌اند از:

K-Epsilon model

Mixing Length model

Parabolic Eddy Viscosity model

برای کالیبره کردن از دبی ورودی ۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه استفاده و با توجه به داده‌های دبی اشل ایستگاه هیدرومتری در منطقه ارتفاع سطح آب در رودخانه برابر ۲/۷ متر است.

در هر ران نرم‌افزار با داده‌های دبی ورودی و ارتفاع آب خروجی اجرا گردید. و نتایج به دست آمده به صورت فایل اکسل از نرم‌افزار با داده مشاهده‌ای مقایسه گردید. در نهایت درصد خطای هر شبیه‌سازی محاسبه شد.

پس از انجام شبیه‌سازی‌های فراوان به این نتیجه رسیدیم که در تمامی مدل‌های شبیه‌سازی زمان شبیه‌سازی برای کالیبره ۲۰۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شود و بازه زمانی محاسبات ۱۰۰ ثانیه و نمایش نتایج هر ۱۰۰ ثانیه انجام پذیرد.

مراحل شبیه‌سازی‌های انجام شده جهت کالیبراسیون به شرح زیر است:

جدول (۲-۳) مراحل کالیبراسیون

شماره مرحله	مدل آشفتگی	مقادیر زبری مانینگ
۱	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۱۵
۲	Mixing length Model	۰/۰۱۵
۳	K-Epsilon model	۰/۰۱۵
۴	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۲
۵	Mixing length Model	۰/۰۲
۶	K-Epsilon model	۰/۰۲
۷	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۲۵
۸	Mixing length Model	۰/۰۲۵
۹	K-Epsilon model	۰/۰۲۵
۱۰	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۳
۱۱	Mixing length Model	۰/۰۳
۱۲	K-Epsilon model	۰/۰۳
۱۳	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۳۵
۱۴	Mixing length Model	۰/۰۳۵
۱۵	K-Epsilon model	۰/۰۳۵

۳-۱۱- دانه‌بندی ذرات بستر

مصالح رودخانه‌ای دارای اندازه‌های متفاوتی می‌باشند. برای نشان دادن توزیع دانه‌بندی مصالح بستر رودخانه از آزمایش دانه‌بندی با الک استفاده می‌کنند. برای به دست آوردن منحنی دانه‌بندی سه نمونه خاک از بستر رودخانه به عمق سی سانتیمتری به صورت دستی و میدانی برداشت

گردید. این نمونه در آزمایشگاه خاک و آب مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی اصفهان تحت آزمایش دانه‌بندی به صورت خشک به وسیله الک قرار گرفت. مقدار خاک مانده بر روی هر الک وزن گردید. با توجه به قطر روزه‌های هر الک و مقدار خاک عبوری از آن با استفاده از نرم‌افزار اکسل منحنی دانه‌بندی رسم گردید. با رسم منحنی دانه‌بندی مقادیر D_{16} ، D_{50} ، D_{90} را مشخص می‌نماییم.

۳-۱۲- اجرای مدل

پس از کالیبره کردن مدل و مشخص شدن بهترین مدل آشفتگی و ضریب زبری مانینگ و تنظیم نمودن مقادیر اولیه و شرایط مرزی فرآیند شبیه‌سازی قابل اجرا خواهد بود.

در این تحقیق مدل برای چهار دوره با دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۵ و ۱۰۰ ساله شبیه‌سازی شده است که نتایج حاصل از آن در فصل بعد مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱۳- محاسبه سرعت و تنش بحرانی

هنگامی که آب در کانال‌های باز جریان می‌یابد نیرویی در جهت حرکت آب به سطح بستر کانال اثر می‌کند. این نیرو به‌طور ساده نیروی کشش آب در محیط مرطوب است. و مقدار آن در واحد سطح به‌عنوان تنش برشی^۱ شناخته می‌شود.

در رودخانه‌ها با جریان کم ذرات بستر هیچ‌گونه حرکتی ندارند و در محل خود ثابت می‌باشند با افزایش شرایط جریان (تنش برشی و سرعت جریان) ذرات شروع به حرکت می‌کنند. این حرکت ابتدا به‌صورت بالا و پایین آمدن و سپس به‌صورت حرکت انتقالی است. لحظه‌ای را که در آن ذرات شروع به حرکت می‌کنند اصطلاحاً آستانه حرکت گویند^۲. آقای شیلدز^۳ با انجام مطالعات بنیادی و آزمایشات فراوان معیاری برای آستانه حرکت ارائه کرد. که به‌صورت زیر است.

¹ shear stress

² Incipient motion

³ Shields

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) D_{50}} = 0.056 \quad (38-3)$$

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma_w) D_{50} \times 0.056 \quad (39-3)$$

τ_c تنش برشی در آستانه حرکت و γ_s وزن مخصوص ذرات می‌باشند.

برای محاسبه سرعت بحرانی از معادله زیر استفاده می‌گردد (امامقلی زاده، ۱۳۸۸):

$$v_c = 6.19 y^{0.166} . D_{50}^{0.333} \quad (40-3)$$

۳-۱۴- بررسی تغییرات مورفولوژی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

در این تحقیق مورفولوژی و الگوی پیچانرودی رودخانه زاینده‌رود با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth استفاده شده است. برای مطالعات تصاویر ماهواره‌ای از باکیفیت‌ترین تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶ استفاده گردیده است که در آن مقادیر ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، طول قوس، شعاع انحنای و طول موج محاسبه و بررسی شده است

۳-۱۴-۱- محاسبه ضریب خمیدگی

ضریب خمیدگی یکی از عوامل تعیین‌کننده نوع رودخانه است که با استفاده از آن می‌توان پیچانرودی رودخانه را تعیین نمود. بر اساس معیار ولفرت^۱ رودخانه‌ها بر اساس ضریب خمیدگی به چهار دسته مستقیم ضریب خمیدگی کمتر از ۱/۰۵، سینوسی ضریب خمیدگی ۱/۲۵-۱/۰۶، پیچانرودی ۲-۱/۲۶ و پیچانرودی شدید بزرگ‌تر از ۲ تقسیم می‌شوند.

۳-۱۴-۲- محاسبه زاویه مرکزی

با استفاده از زاویه مرکزی می‌توان توسعه پیچانرودی رودخانه را بررسی نمود که عبارت است از زاویه مرکزی بین دو شعاع متصل به نقاط عطف که در دو خم متوالی تشکیل می‌شود.

^۱ . Wolfert

کورنایس^۱ برای مقایسه رودخانه آبرفتی با یکدیگر بر اساس زاویه مرکزی، میزان توسعه خم رودخانه‌ها را تقسیم‌بندی نمود.

^۱ . Komis

فصل چہارم

نتائج

۴-۱-مقدمه

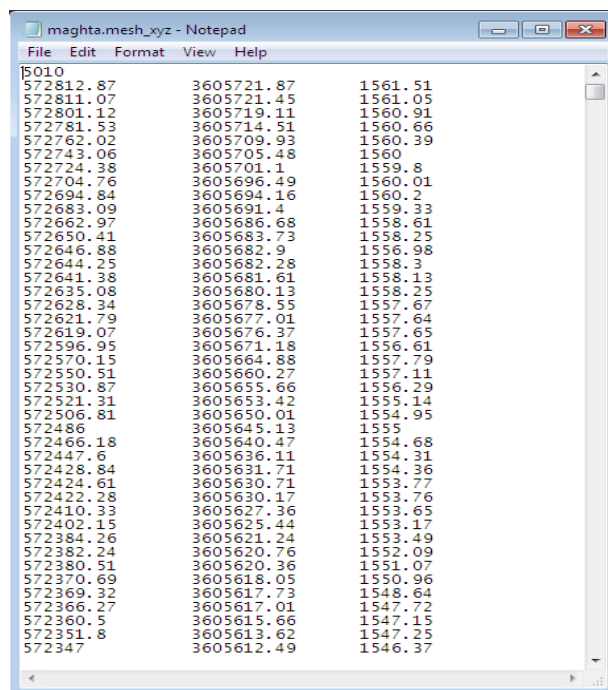
همان‌طور که در فصل سه بیان شد مهم‌ترین بخش مدل، تولید شبکه محاسباتی یا به عبارتی مش بندی رقوم بستر و مرزبندی رودخانه است. به این ترتیب در این فصل ابتدا نحوه ایجاد شبکه محاسباتی در مدل CCHE-MESH به‌طور کامل بیان شده است. و نتایج آن مرحله به مرحله ارائه گردیده است. سپس محاسبه اطلاعات ورودی مدل CCHE-GUI مانند دبی با دوره بازگشت متفاوت همچنین اطلاعات مربوط به دانه‌بندی حوضه مورد محاسبه قرار گرفته است. در ادامه برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر و کاهش خطا، مدل بر اساس ضریب زبری و مدل‌های آشفتگی کالیبره شده و با مشخص شدن بهترین ضریب زبری و مدل آشفتگی شبیه‌سازی با دوره بازگشت-های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله انجام گردید. نتایج حاصل از تنش برشی و همچنین سرعت جریان در خم‌های حوضه به‌صورت تصاویر گرافیکی و همچنین نموداری ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است. و در نهایت به مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای برای محدوده مورد نظر پرداخته شده است.

۴-۲-نتایج حاصل از شبکه‌بندی مدل

مدل CCHE2D همانند تمامی مدل‌ها جهت شبیه‌سازی نیازمند اطلاعات توپوگرافی از محدوده مطالعاتی است. که باید از مدل CCHE-MESH استفاده گردد. این مدل توانایی پشتیبانی انواع اطلاعات هندسی را دارا بوده و از توابع مختلفی جهت تولید شبکه محاسباتی بهره می‌برد. چون در این تحقیق از اطلاعات واقعی و نقاط نقشه‌برداری شده استفاده شده پس باید در تعریف مرزها و تعیین شبکه هندسی دقت فراوانی صورت گیرد. از این جهت در ادامه نتایج ایجاد یک شبکه محاسباتی به‌صورت کامل ارائه شده است. این نتایج شامل نتایج حاصل از فراخوانی اطلاعات توپوگرافی، مرزهای محاسباتی، شبکه‌بندی محدوده مطالعاتی، هموار نمودن مرزها، و در نهایت ارزیابی شبکه محاسباتی است.

۴-۲-۱- فراخوانی اطلاعات توپوگرافی

اطلاعات توپوگرافی دریافتی از سازمان آب منطقه‌ای اصفهان به صورت فایل‌های کد بوده و برای ورود به نرم‌افزار این اطلاعات توسط نرم GIS به داده‌های اکسل تبدیل شده و با تنظیم این داده‌ها در Notepad قابل استفاده در نرم‌افزار CCHE2D می‌شود. پس از تبدیل اطلاعات از فایل‌های کد به اکسل و سپس تنظیم این اطلاعات به صورت شکل (۴-۱) ۵۰۱۰ نقطه قابل استفاده و فراخوانی در مدل CCHE-MESH تبدیل می‌گردند.



شکل (۴-۱) داده‌های تنظیم شده در پنجره Notepad

با وارد کردن نقاط نقشه‌برداری شده در مدل CCHE2D این نقاط به صورت شکل (۴-۲) در مدل نمایان گردیده است.

Initial Bed Elevation (m)

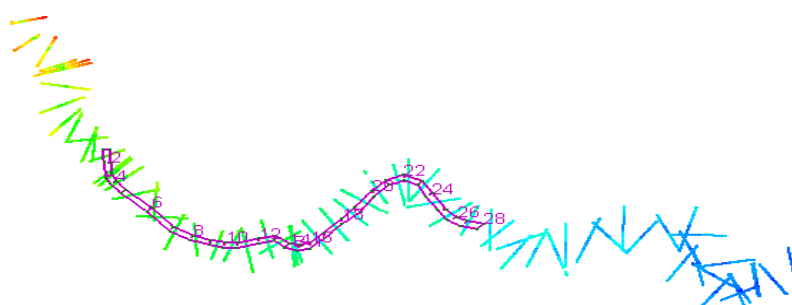


شکل (۲-۴) فراخوانی اطلاعات توپوگرافی در مدل

اطلاعات توپوگرافی شامل ۵۰۱۰ نقطه نقشه برداری شده است که هر نقطه دارای مقادیر طولی، عرضی و ارتفاعی است، که برای محاسبه اطلاعات بین نقاط میان‌یابی انجام گرفته است.

۲-۲-۴- نتایج مربوط به مرزهای محاسباتی

پس از تعریف مرز رودخانه به روش ۳-۷-۳ که در فصل قبل توضیح داده شد. مرز رودخانه به صورت شکل (۳-۴) نمایان گردیده است.

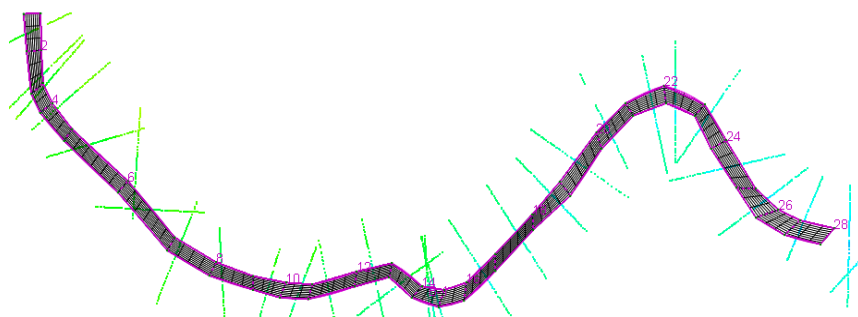


شکل (۳-۴) مرزبندی محدوده مطالعاتی

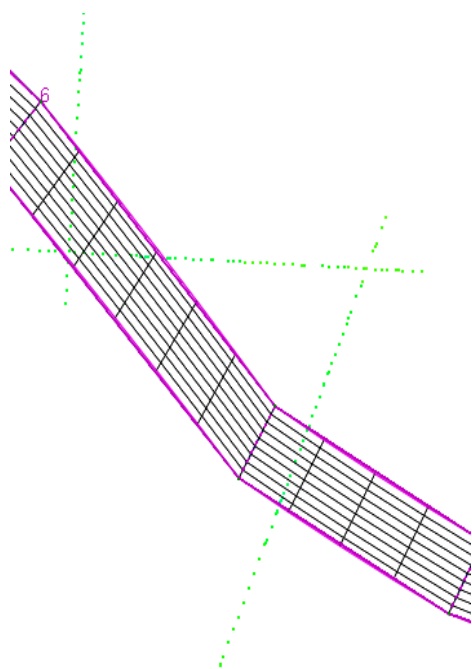
با توجه به عرض رودخانه زاینده رود و ارتفاع نقاط در مقاطع عرضی و همچنین مرز ورودی و خروجی در طول رودخانه مرزبندی به صورت بالا ترسیم شده است.

۴-۲-۳- نتایج حاصل از شبکه‌بندی با روش Algebraic

پس از وارد کردن اطلاعات هندسی باید محدوده مطالعاتی شبکه‌بندی شود. ابتدا شبکه‌بندی بر اساس روش Generate Algebraic Mesh صورت گرفته است، و سپس با روش‌های دیگر بر اساس این روش تولید شده است. انجام عملیات شبکه‌بندی طبق توضیحات (۳-۷-۴) مدل به صورت شکل (۴-۴) شبکه‌بندی شده است.



شکل (۴-۴) شبکه‌بندی محدوده مطالعاتی

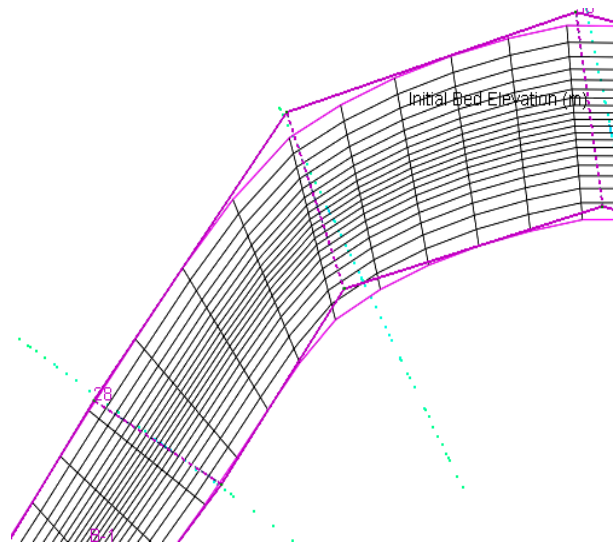


شکل (۴-۵) نمای نزدیک تر شبکه‌بندی محدوده مطالعاتی

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود در شبکه‌بندی با این روش محدوده مطالعاتی به شبکه‌های ریز مستطیلی تقسیم شده است، که در آن I بیانگر تقسیمات طولی و J بیانگر تعداد تقسیمات عرضی است.

۴-۲-۴- نتایج هموار نمودن مرزها

پس از ایجاد شبکه باید مرزهای مدل هموار شود تا منطبق با شرایط طبیعی رودخانه گردد. پس از هموارسازی طبق توضیحات فصل قبل مرزها به صورت شکل (۴-۶) تغییر شکل می‌دهند.



شکل (۴-۶) هموار شدن مرزها

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده گردید همواری در خم‌ها و مرزهای خارجی به صورت مطلوب صورت گرفته است. که باعث بالا بردن دقت نتایج خروجی شده است.

۴-۲-۵- نتایج حاصل از ارزیابی شبکه محاسباتی

برای ارزیابی کیفیت شبکه شاخص‌های مقادیر زیر ارائه شده است.

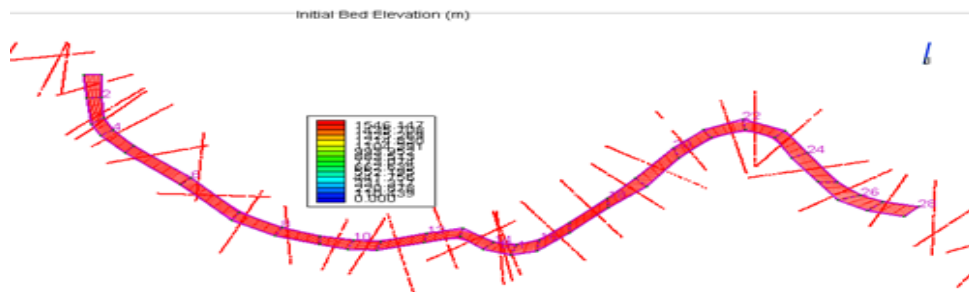
بر طبق نتایج بالا مقدار (MDO) که بیان‌گر ماکزیمم انحراف از حالت قائم است برابر ۳۲ شده که زیاد است ولی قابل قبول است. همچنین مقدار (ADO) متوسط انحراف از حالت قائم برابر ۶

شده که مطلوب است. این دو پارامتر برای ارزیابی متعادل بودن شبکه می‌باشند. هرچه این دو پارامتر کمتر باشند شبکه متعادلتر است.

و همچنین مقادیر (MAR) ماکزیمم ابعاد شبکه و (AAR) متوسط ابعاد شبکه برابر ۸ و ۴ می‌باشند. هرچه این دو پارامتر به یک نزدیک‌تر باشد شبکه هموارتر و بهتر است.

۴-۲-۶- نتایج حاصل از درون‌یابی رقوم ارتفاع بستر

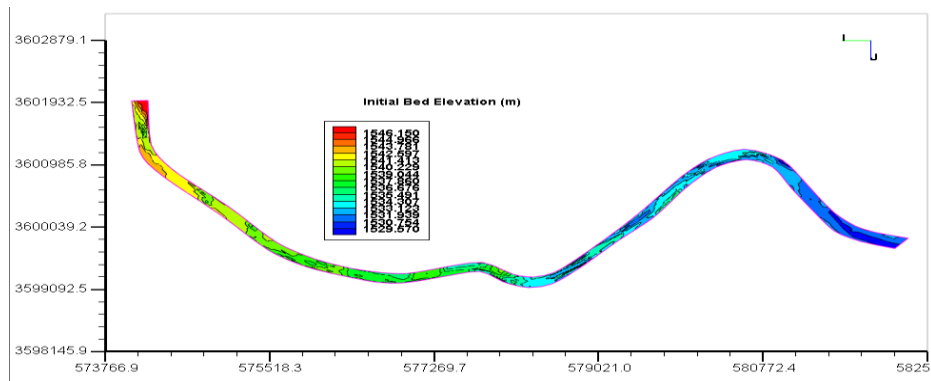
طبق شکل (۴-۷) با عملیات درون‌یابی تمامی گره‌ها دارای ارتفاع خواهد شد.



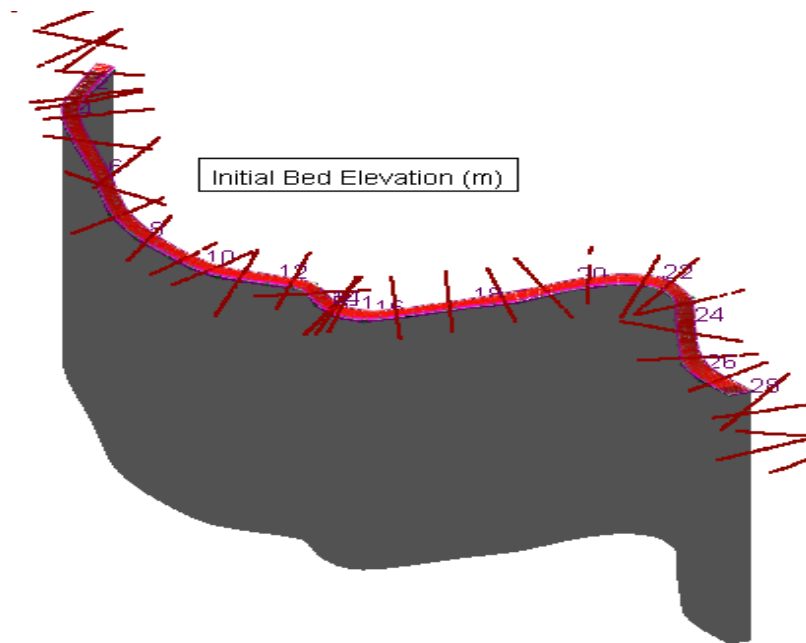
شکل (۴-۷) درون‌یابی رقوم بستر

۴-۲-۷- نمایش شبکه تولیدشده در CCHE-MESH

پس از انجام مراحل قبل در این مرحله شبکه قابل مشاهده است. همچنین نمایی از مقاطع عرضی و طولی هم قابل مشاهده است. اطلاعات این بخش ذخیره شده تا در نرم‌افزار CCHE-GUI مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۴-۸) شبکه تولیدشده توسط مدل CCHE-MESH



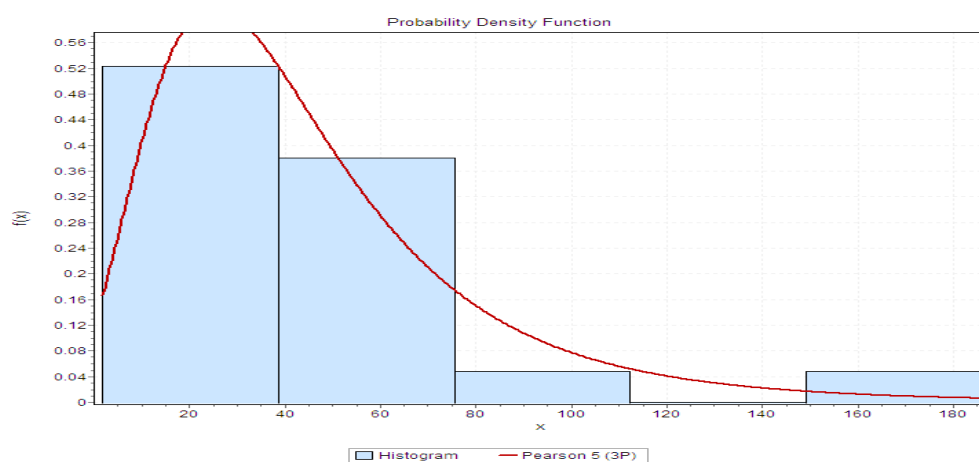
شکل (۹-۴) مدل سه بعدی ارتفاع رقوم بستر (نشان دهنده شیب رودخانه)

۳-۴- نتایج حاصل از دبی رودخانه با دوره بازگشت های متفاوت

برای محاسبه دبی با دوره بازگشت متفاوت از توزیع لوگ پیرسون پنج پارامتره استفاده شده است که نتایج آن به شرح زیر است.

$$f(x) = \frac{\exp(-\beta/(x-\gamma))}{\beta\Gamma(\alpha((x-\gamma)/\beta)^{\alpha+1}} \quad (۱-۴)$$

نمودار این توزیع به صورت زیر است.



شکل (۱۰-۴) نمودار توزیع لوگ پیرسون ۵

نتایج مقدار دبی با دوره بازگشت‌های موردنظر در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

جدول (۴-۱) دوره بازگشت و دبی جریان

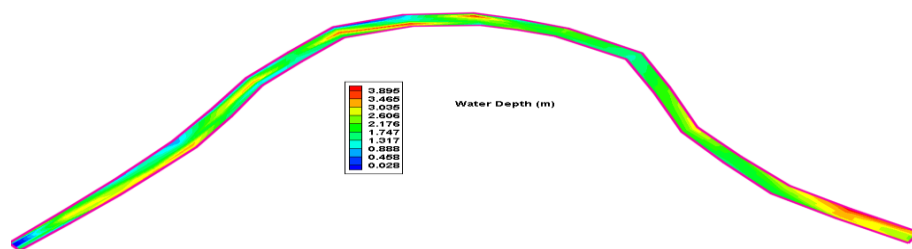
۵۰	۲۰	۱۰	۵	۲	دوره بازگشت (سال)
۱۴۵	۱۱۱	۸۸	۴۶	۳۷	دبی (m ³ /s)

با داده‌های جدول بالا و منحنی و معادلات دبی-اشل می‌توان ارتفاع سطح آب را برای هر دوره بازگشت با توجه به دبی و معادله دبی اشل محاسبه کرد.

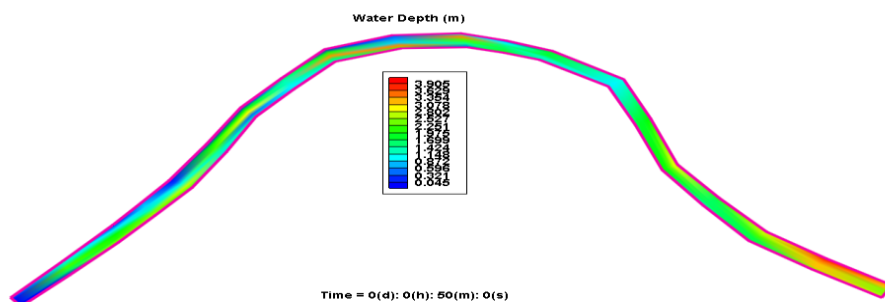
۴-۴- نتایج حاصل از کالیبراسیون نرم‌افزار:

از شبیه‌سازی مدل با ضرایب زبری و مدل‌های آشفتگی متفاوت نتایج زیر حاصل شده است.

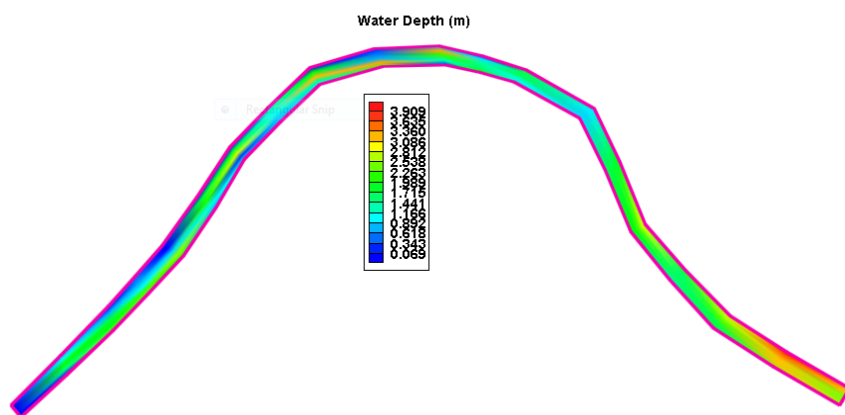
برای ضریب زبری مانینگ ۰/۰۱۵ و مدل‌های آشفتگی متفاوت تغییرات ارتفاع آب به صورت زیر است:



شکل (۴-۱۱) ارتفاع سطح آب برای مدل K-ε

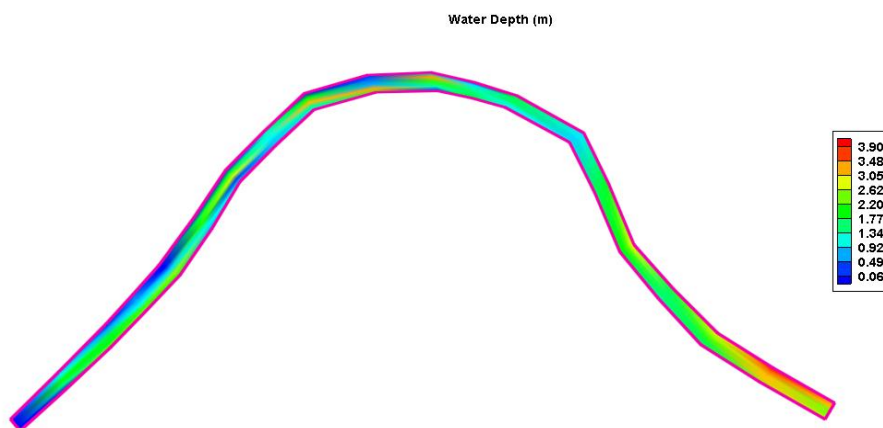


شکل (۴-۱۲) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length

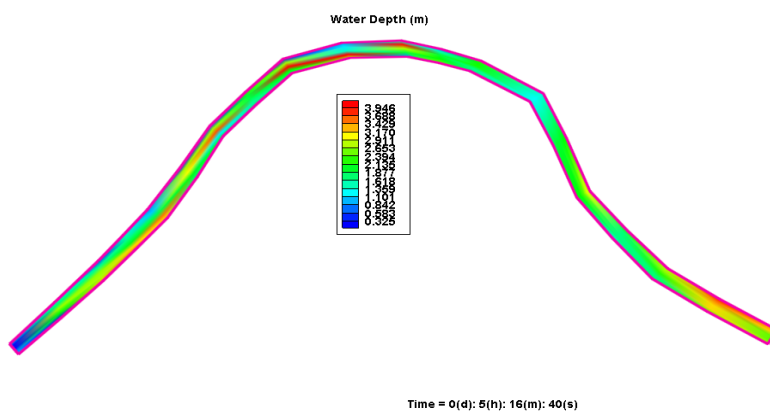


شکل (۴-۱۳) ارتفاع سطح آب مدل parabolic

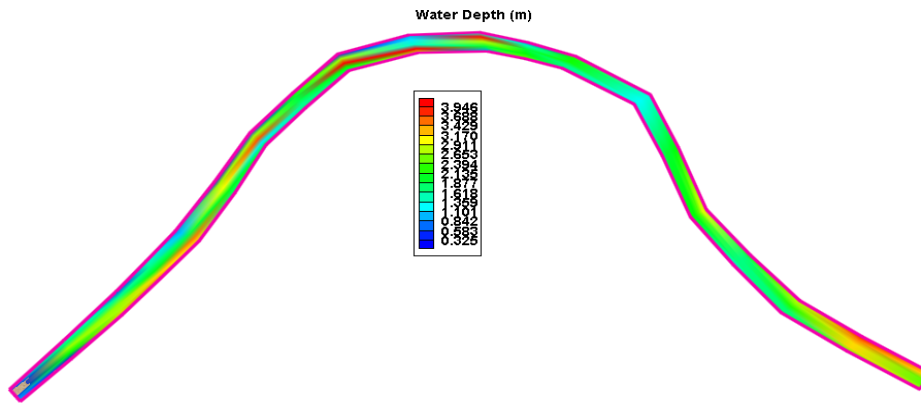
برای ضریب زبری ۰/۰۲ و مدل‌های آشفتگی متفاوت تغییرات ارتفاع آب به صورت زیر است



شکل (۴-۱۴) ارتفاع سطح آب مدل K-ε

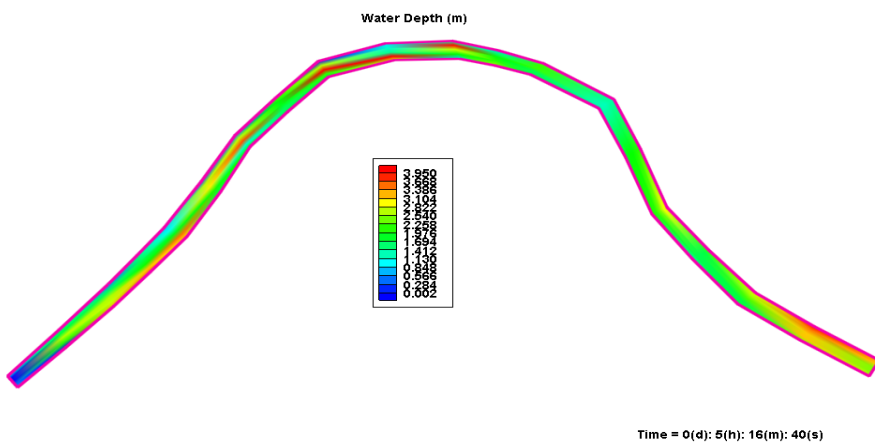


شکل (۴-۱۵) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length

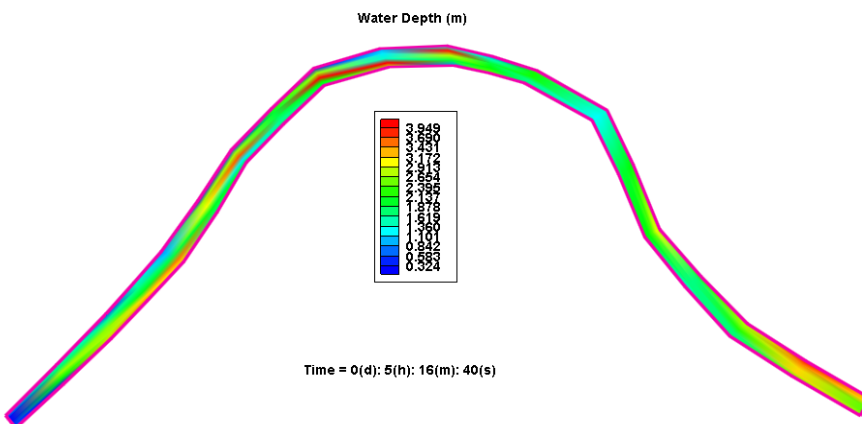


شکل (۴-۱۶) ارتفاع سطح آب مدل parabolic

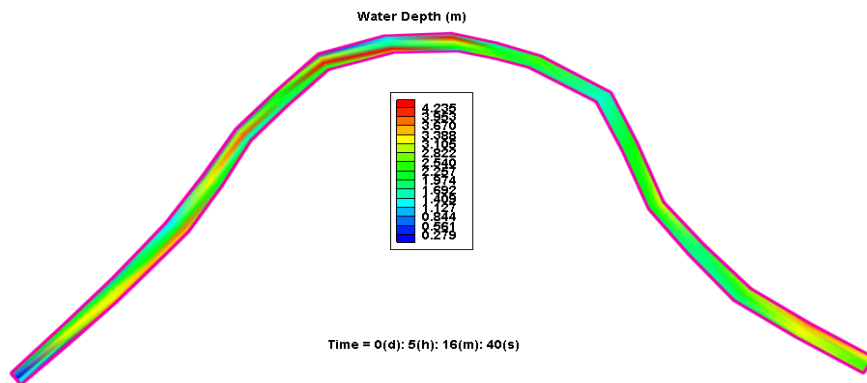
برای ضریب زبری ۰/۰۲۵ و مدل‌های آشفتگی متفاوت تغییرات ارتفاع آب به صورت زیر است



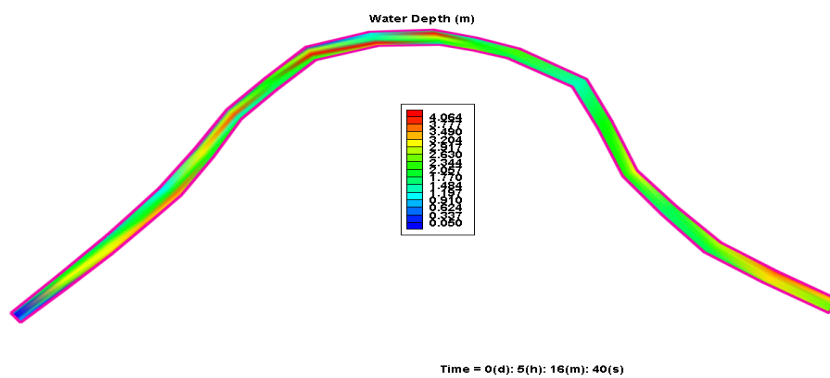
شکل (۴-۱۷) ارتفاع سطح آب مدل K-ε



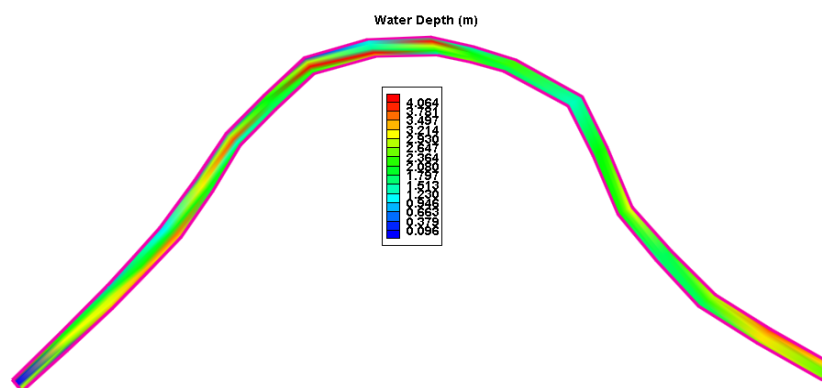
شکل (۴-۱۸) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length



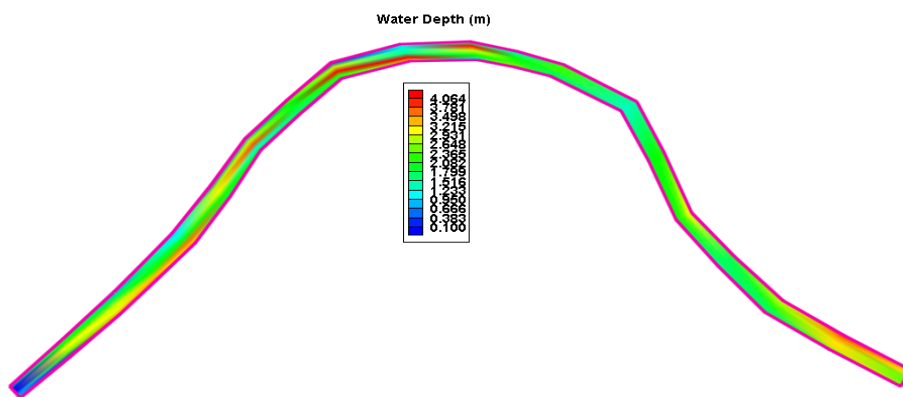
شکل (۴-۱۹) ارتفاع سطح آب مدل parabolic برای ضریب زبری ۰/۰۳ و مدل‌های آشفتگی متفاوت تغییرات ارتفاع آب به صورت زیر است



شکل (۴-۲۰) ارتفاع سطح آب مدل K-ε

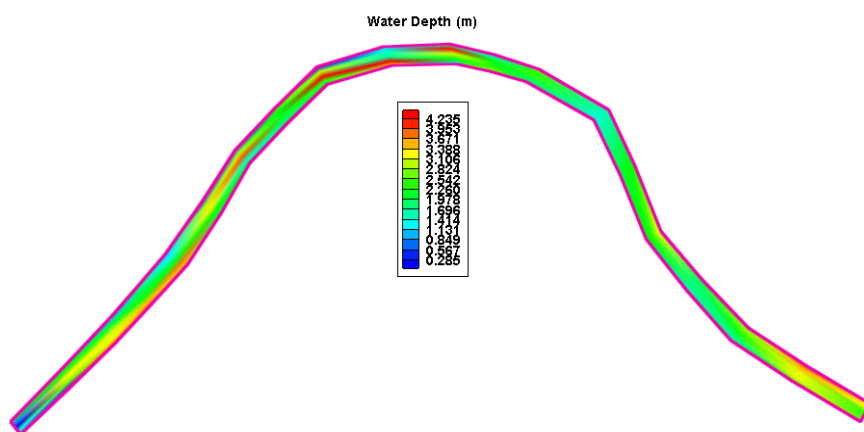


شکل (۴-۲۱) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length



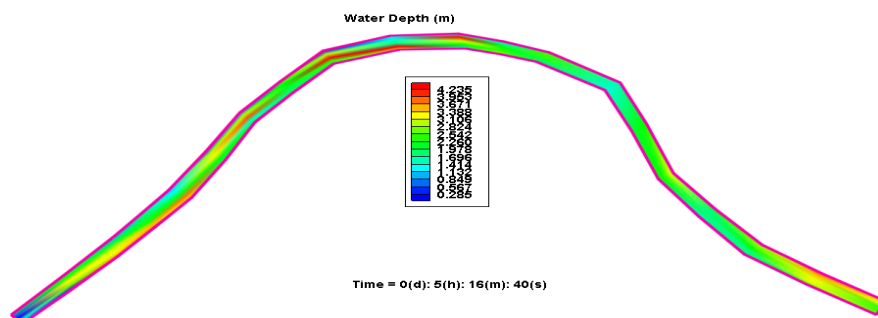
شکل (۲۲-۴) ارتفاع سطح آب مدل parabolic

برای ضریب زبری ۰/۰۳۵ مدل‌های آشفتگی متفاوت تغییرات ارتفاع آب به صورت زیر است



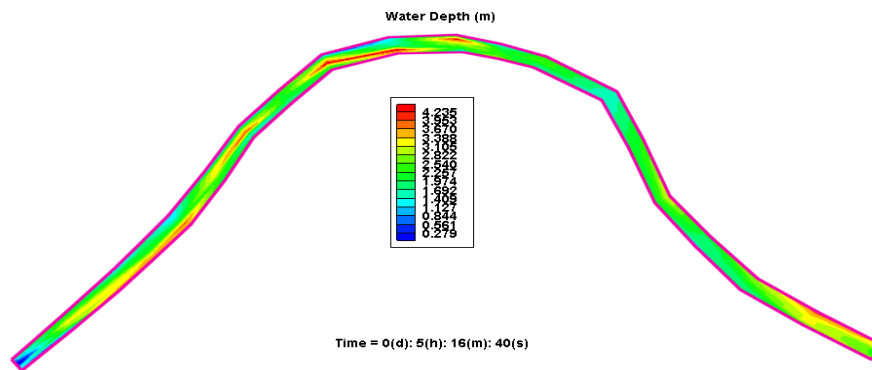
Time = 0(d): 5(h): 16(m): 40(s)

شکل (۲۳-۴) ارتفاع سطح آب مدل K-ε



Time = 0(d): 5(h): 16(m): 40(s)

شکل (۲۴-۴) ارتفاع سطح آب مدل Mixing Length



شکل (۴-۲۵) ارتفاع سطح آب مدل parabolic

نتایج حاصل از ۱۵ مدل شبیه‌سازی در جدول زیر ارائه شده است:

جدول (۴-۲) نتایج کالیبراسیون

شماره مرحله	مدل آشفتگی	زبری مانینگ	ارتفاع شاهد (m)	ارتفاع شبیه‌سازی (m)	درصد خطا نسبی
۱	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۱۵	۲/۷	۲/۵۳۸	-۰/۰۰۶
۲	Mixing length Model	۰/۰۱۵		۲/۵۲۷	-۰/۰۰۶۴
۳	K-Epsilon model	۰/۰۱۵		۲/۵۶	-۰/۰۰۵۲
۴	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۰۲		۲/۵۶۵	-۰/۰۰۵
۵	Mixing length Model	۰/۰۰۲		۲/۵۵۶	-۰/۰۰۵۴
۶	K-Epsilon model	۰/۰۰۲		۲/۶۰۶	-۰/۰۰۳۵
۷	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۰۲۵		۲/۷۲۲	۰/۰۰۰۸
۸	Mixing length Model	۰/۰۰۲۵		۲/۷۳۴	۰/۰۰۱۲۶
۹	K-Epsilon model	۰/۰۰۲۵		۲/۷۱۲	۰/۰۰۰۴
۱۰	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۰۳		۲/۷۵۸	۰/۰۰۲۱

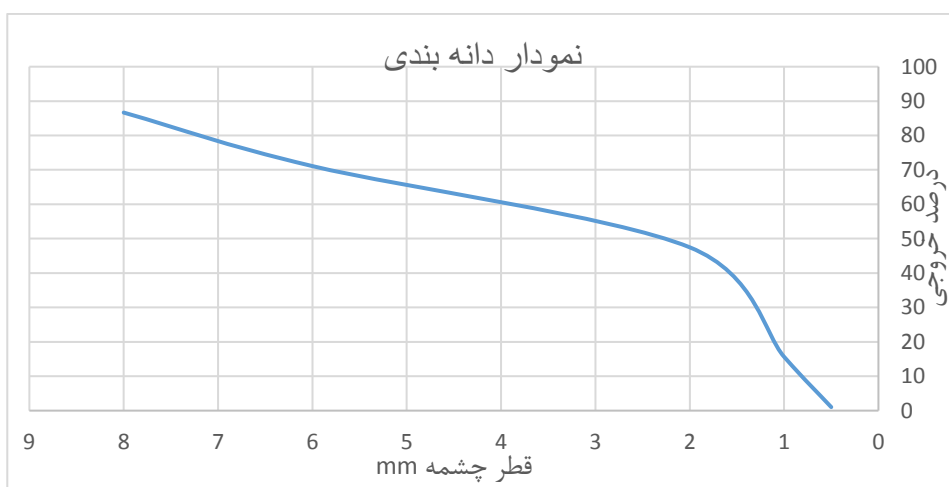
۱۱	Mixing length Model	۰/۰۳	۲/۷۷۸	۰/۰۲۹
۱۲	K-Epsilon model	۰/۰۳	۲/۷۸۲	۰/۰۳
۱۳	Parabolic Eddy viscosity Model	۰/۰۳۵	۲/۸۲۲	۰/۰۴۵
۱۴	Mixing length Model	۰/۰۳۵	۲/۸۴۲	۰/۰۵۲
۱۵	K-Epsilon model	۰/۰۳۵	۲/۸۲۴	۰/۰۴۶

همان گونه که در جدول (۴-۲) مشاهده می شود بهترین سناریو مربوط به آزمایش شماره ۹ است، که در آن از مدل آشفتگی K-Epsilon و ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲۵ استفاده شده است. تحقیقات حاکی از آن است که مدل K-Epsilon از قابلیت بیشتری برای مدل سازی انواع جریان ها دارا است و نتایج دقیق تری را نشان می دهد (رستمی، ۱۳۹۳)

۴-۵- نتایج حاصل از دانه بندی

برای محاسبه دانه بندی ذرات از روش دانه بندی خشک با استفاده الک استفاده گردید. با استفاده از این روش و رسم منحنی دانه بندی مقادیر D_{10} ، D_{16} ، D_{50} و D_{60} محاسبه شده است.

$$D_{10} = 0.8 \text{ mm} \quad , \quad D_{16} = 1 \text{ mm} \quad , \quad D_{50} = 2.2 \text{ mm} \quad , \quad D_{90} = 8.3 \text{ mm}$$



شکل (۴-۲۶) نمودار دانه بندی ذرات بستر

۴-۶- محاسبه تنش برشی در آستانه حرکت و سرعت بحرانی

با انجام آزمایش دانه‌بندی و محاسبه D_{50} و همچنین وزن مخصوص ذرات و با استفاده از رابطه شیلدز مقدار تنش برشی در آستانه حرکت محاسبه شده که برابر 0.87 است.

$$(\gamma_s - \gamma_w) = (G_s - 1)\gamma_w \quad (۲-۴)$$

$$\tau_{c=(\gamma_s-\gamma_w)D_{50}\times 0.056} \rightarrow \tau_c = 0.87 \text{ N/m}^2 \quad (۳-۴)$$

سرعت بحرانی محاسبه شده در این تحقیق برابر با 0.9 متر بر ثانیه است.

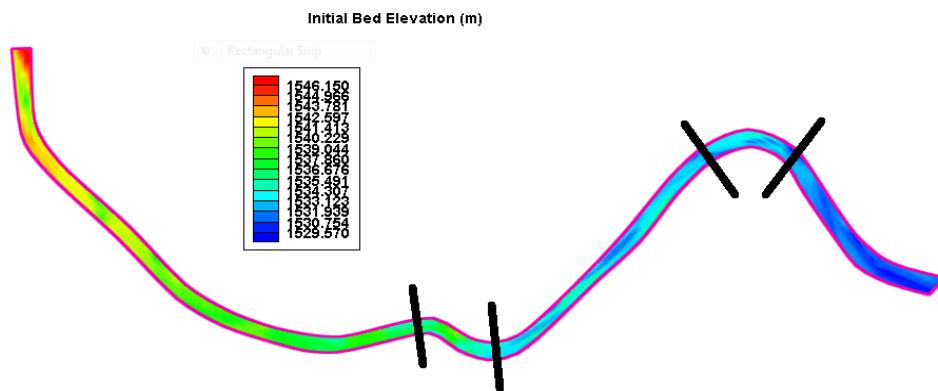
$$v_c = 6.19 y^{0.166} \cdot D_{50}^{0.333} \rightarrow v_c = 0.9 \text{ m/s} \quad (۴-۴)$$

اکنون با مقایسه تنش برشی حاصل از شبیه‌سازی مدل CCHE2D در دوره بازگشت‌های متفاوت و تنش برشی آستانه حرکت (تنش برشی بحرانی) تأثیرات تنش برشی بر تغییر مورفولوژی رودخانه زاینده‌رود را بررسی نموده‌ایم. و نقاط بحرانی را در مسیر رودخانه مشخص گردیده است.

۴-۷- نتایج اجرای اصلی مدل

چون منطقه مورد مطالعاتی پایین‌دست سد زاینده‌رود است و با توجه به وجود سازه‌های فراوان در مسیر رودخانه در شهر اصفهان میزان رسوب جریان رودخانه بسیار ناچیز (نزدیک به صفر) بوده است، و مدل شبیه‌سازی رسوب نزدیک به صفر را برابر صفر در نظر می‌گیرد. همچنین پس از یک‌بار برداشت رسوب از این ایستگاه توسط اداره آب منطقه‌ای اصفهان و ناچیز بودن رسوب، مقدار رسوب این منطقه در آب منطقه‌ای صفر در نظر گرفته شده است. پس از مشاوره با مهندسين بخش مهندسی رودخانه آب منطقه‌ای اصفهان و بررسی میزان بسیار ناچیز دبی رسوب اندازه‌گیری شده به این نتیجه می‌رسیم که تغییرات مورفولوژی در بستر رودخانه ناشی از فرسایش بستر تحت تأثیر شرایط جریان رودخانه از بستر رودخانه است، و اثر رسوب‌گذاری بر تغییرات مورفولوژی بسیار ناچیز است. از این جهت در این قسمت، نتایج حاصل از فرسایش بستر رودخانه

تحت تأثیر جریان با دوره بازگشت‌های متفاوت (دبی‌های متفاوت) مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل شامل اطلاعات حاصل از جریان آب (رقوم سطح آب، سرعت، تنش برشی و عدد فرود) است، که به صورت گرافیکی و نمودار به دست آمده است. با توجه به این که در قوس‌ها شرایط فرسایش پذیرتری داریم، در نتیجه تغییرات مورفولوژی در قوس‌ها شدیدتر است، به این دلیل مقاطع مورد نظر بر روی قوس‌ها انتخاب شده است و اطلاعات آن مورد بررسی قرار گرفته است. این اطلاعات در چهار شبیه‌سازی با دوره بازگشت‌های پنج، ده، بیست و پنجاه ساله در چهار مقطع مورد بررسی قرار گرفته، که به صورت گرافیکی و جدول در ادامه ذکر شده است. این نتایج در چهار مقطع که در شکل (۴-۲۷) مشخص شده است بررسی گردیده است.

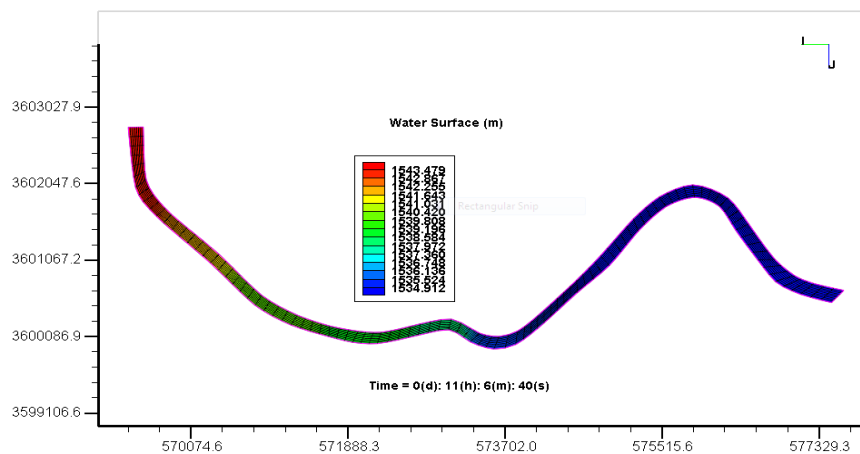


شکل (۴-۲۷) مقاطع مورد بررسی روی حوضه

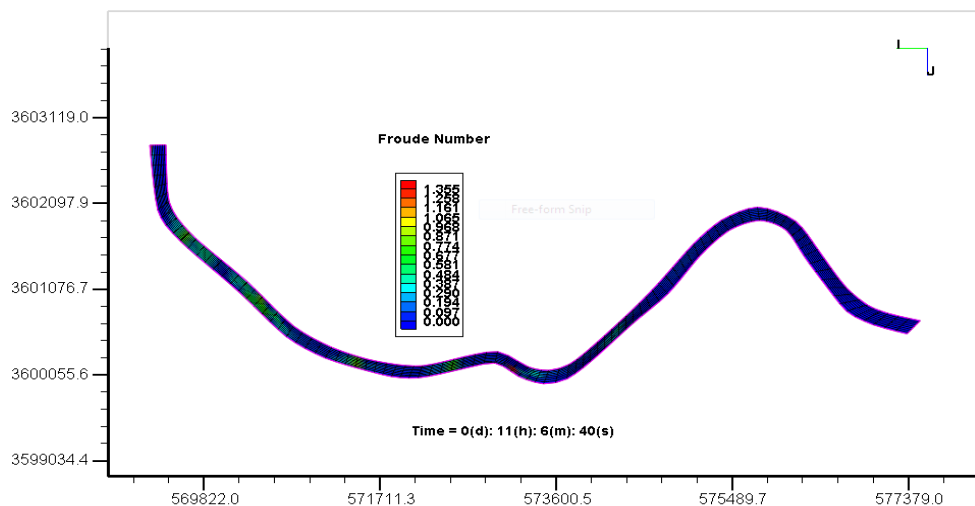
۴-۷-۱- نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت پنج ساله

طبق محاسبات انجام شده در دوره بازگشت پنج ساله مقدار دبی ورودی به حوضه برابر ۶۶ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع آب در این حالت برابر ۱/۲ متر است. که از نمودار دبی اشل به دست آمده است، که به صورت شرایط مرزی در مدل وارد گردیده است. نتایج گرافیکی در این بخش در بردارنده پلان کل حوزه و چگونگی توزیع پارامترهای هیدرولیکی است، که در شکل (۴-۲۸) تا (۴-۳۰) نمای کل حوزه نشان داده شده است. و در شکل‌های (۴-۳۱) تا (۴-۳۸) نمایی مربوط به تغییرات تنش برشی و سرعت جریان در مقطع عرضی آورده شده است، و خصوصیات

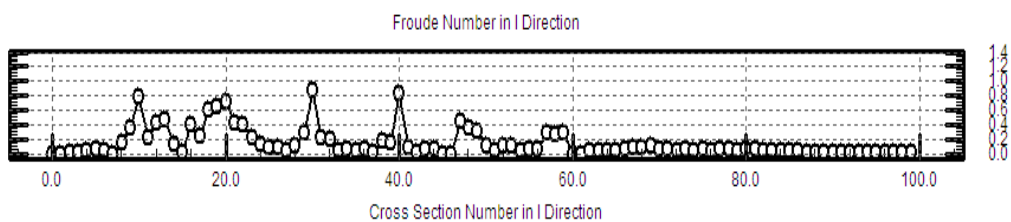
جریان در خم‌های مشخص شده است، که به ترتیب تصاویر مربوط به رقوم سطح آب، عدد فرود، تنش برشی و سرعت جریان است. در ادامه خصوصیات جریان را در مقاطع عرضی خم‌های رودخانه به صورت نموداری مورد بررسی قرار داده‌ایم، و نتایج حاصل از مدل را با سرعت و تنش برشی بحرانی مقایسه نموده‌ایم. شکل شماره (۲۸-۴) تغییرات رقوم سطح آب را در کل حوضه نمایش می‌دهد.



شکل (۲۸-۴) رقوم سطح آب



شکل (۲۹-۴) تغییرات عدد فرود

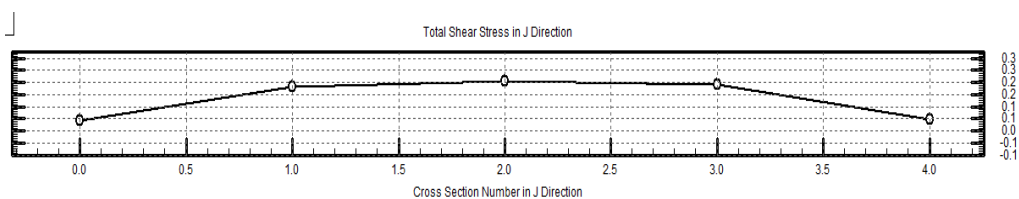


شکل (۴-۳۰) نمودار تغییرات فرود در مقطع طولی در مرکز رودخانه

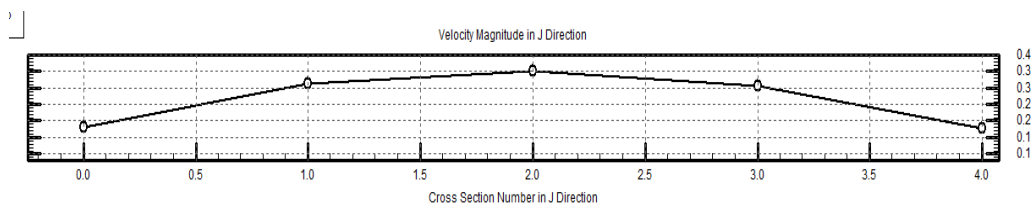
از شکل‌های ارائه‌شده این نتیجه برداشت گردید که در تمامی طول رودخانه جریان زیربحرانی بوده است و بیشترین مقدار عدد فرود $0/8$ محاسبه گردیده است. و رقوم سطح آب با شیب ملایم تقریباً هم‌تراز با شیب کف رودخانه تغییر کرده است. شیب رودخانه در نیمه سمت راست شدیدتر می‌شود.

به دلیل اینکه در نمای کلی مقدار و جهت بردارها به‌خوبی مشخص نیست برای بررسی سرعت و مقدار تنش برشی کف از تصاویر نمای نزدیک‌تر و مقاطع عرضی در دو خم جریان استفاده شده است.

نتایج تنش برشی و سرعت در مقطع اول تا چهارم به‌صورت زیر است.

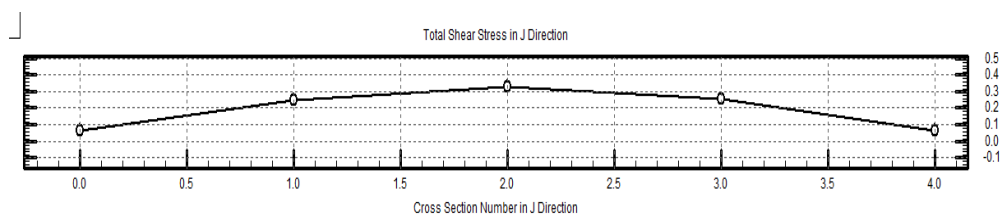


شکل (۴-۳۱) نمودار تنش برشی مقطع اول

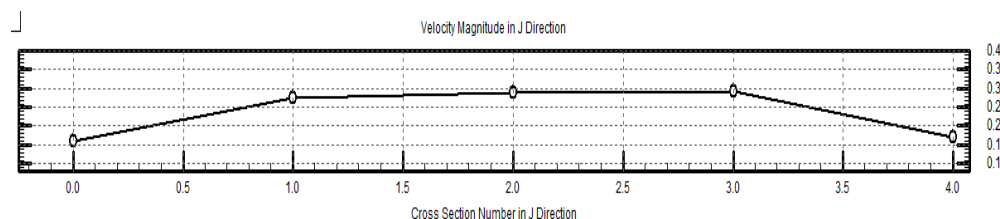


شکل (۴-۳۲) تغییرات سرعت مقطع اول

با توجه به شکل‌های (۳۱-۴) و (۳۲-۴) در مقطع اول متوسط تنش برشی برابر $0/16$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر $0/25$ نیوتون بر متر مربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/24$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/3$ متر بر ثانیه است که در میانه مقطع واقع شده است. با توجه به این که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است کمتر است می‌توان نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنج‌ساله و دبی‌های کمتر از 66 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش ایجاد نشده است.



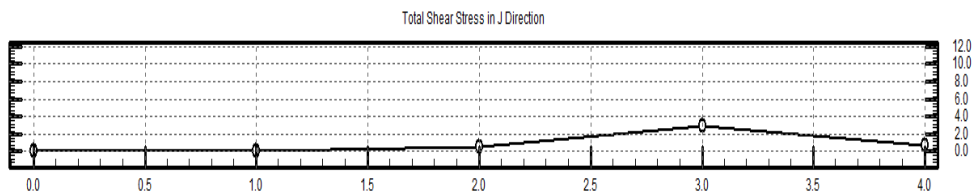
شکل (۳۳-۴) نمودار تنش برشی مقطع دوم



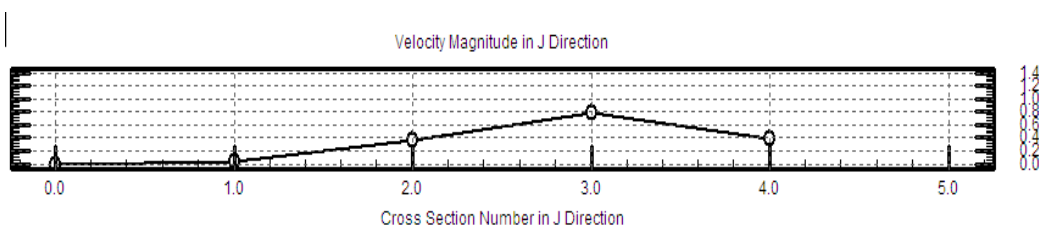
شکل (۳۴-۴) تغییرات سرعت مقطع دوم

با توجه به شکل‌های (۳۳-۴) و (۳۳-۴) در مقطع دوم متوسط تنش برشی برابر $0/21$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر $0/32$ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/23$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/29$ متر بر ثانیه بوده است، که در میانه مقطع واقع شده است. با توجه به این که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است کمتر است می‌تواند نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنج‌ساله و دبی‌های کمتر از 66 مترمکعب بر ثانیه در مقطع دوم تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش نداریم.

همچنین مقدار سرعت نیز از سرعت بحرانی کمتر است و بیشترین سرعت و تنش در قسمت میانی مقطع واقع شده است.

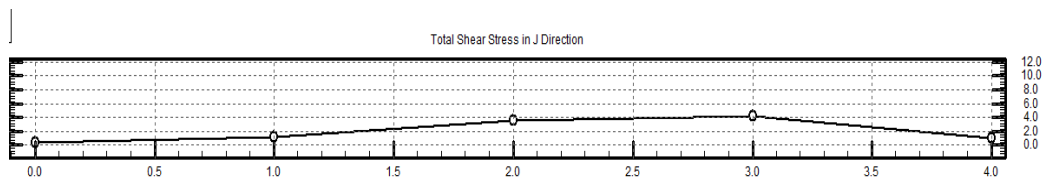


شکل (۳۵-۴) نمودار تنش برشی مقطع سوم

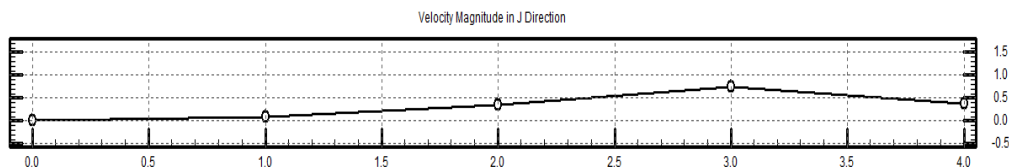


شکل (۳۶-۴) تغییرات سرعت مقطع سوم

با توجه به شکل‌های (۳۵-۴) و (۳۶-۴) در مقطع سوم متوسط تنش برشی برابر $0/62$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر $2/1$ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است، به عبارتی در سمت چپ مقطع تنش برشی نزدیک به صفر و بیشترین تنش را در نزدیکی مرز سمت راست یعنی در قوس خارجی مقطع عرضی اتفاق افتاده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/33$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/8$ متر بر ثانیه بوده است که در سمت راست مقطع واقع شده است. با توجه با این که مقدار تنش برشی متوسط از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است کمتر است می‌توان نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنج‌ساله و دبی‌های کمتر از 66 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش فقط در قسمتی از قوس خارجی ایجاد می‌گردد. زیرا در محدوده‌ای در سمت راست مقطع عرضی سرعت و تنش بسیار زیاد است که باعث فرسایش ساحل سمت راست رودخانه می‌شود.



شکل (۳۷-۴) نمودار تنش برشی مقطع چهارم



شکل (۳۸-۴) تغییرات سرعت مقطع چهارم

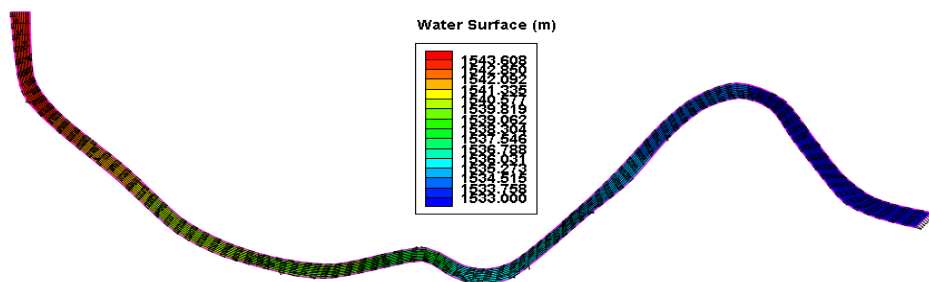
با توجه به شکل‌های (۳۷-۴) و (۳۸-۴) در مقطع چهارم متوسط تنش برشی برابر 0.82 نیوتون بر مترمربع شبیه‌سازی گردیده است. بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع قرار دارد که مقدار آن برابر 4 نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر 0.33 متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر 0.8 متر بر ثانیه است که در میانه مقطع در سمت راست واقع شده است. با توجه با این که مقدار تنش برشی سمت راست از تنش برشی بحرانی که مقدار آن 0.86 نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می‌توان نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنج‌ساله و دبی‌های بیشتر از 66 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در سمت راست صورت می‌گیرد.

۴-۷-۲- نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت ده‌ساله

طبق محاسبات انجام شده در دوره بازگشت ده‌ساله مقدار دبی ورودی به حوضه برابر 88 مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع آب در این حالت برابر 1.5 متر بوده است.

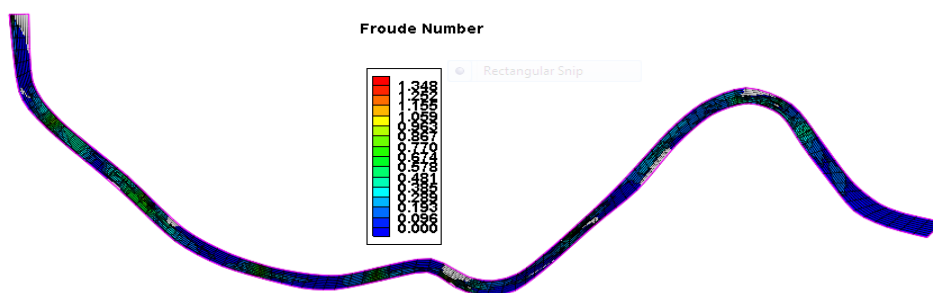
نتایج گرافیکی در این بخش در بردارنده پلان کل حوزه و چگونگی توزیع پارامترهای هیدرولیکی است.

شکل (۳۹-۴) تغییرات رقوم سطح آب را در کل حوضه نمایش می‌دهد.

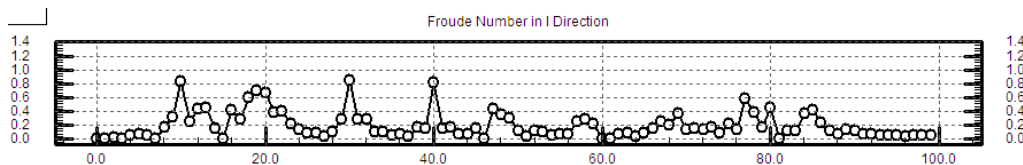


شکل (۴-۳۹) رقوم سطح آب

شکل تغییرات عدد فرود در حوضه به صورت شکل (۴-۴۰) و (۴-۴۱) است:



شکل (۴-۴۰) شاخص فرود

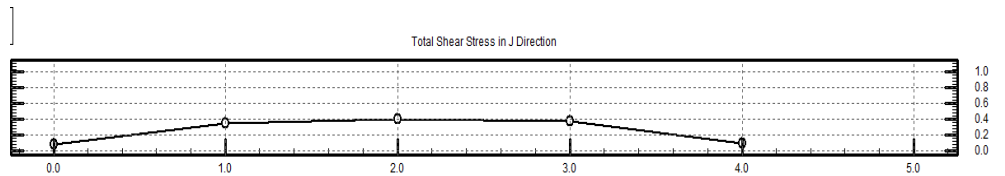


شکل (۴-۴۱) تغییرات شاخص فرود در طول جریان در مرکز رودخانه

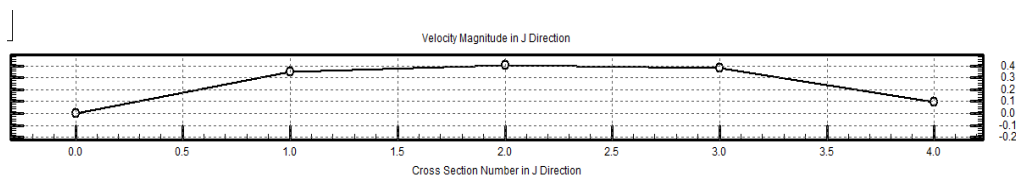
همان طور که در شکل های بالا مشاهده می شود ارتفاع آب در دوره بازگشت ده ساله افزایش پیدا کرده است همچنین تغییرات عدد فرود در این بخش شدیدتر بوده است. باین وجود در کل حوضه عدد فرود کوچکتر از یک بوده است که نشان می دهد در کل حوضه جریان زیر بحرانی است.

بررسی سرعت و مقدار تنش برشی کف از تصاویر نمای نزدیک تر در دو خم در ادامه ذکر شده است:

نتایج تنش برشی و سرعت در مقطع اول تا چهارم به صورت زیر است:

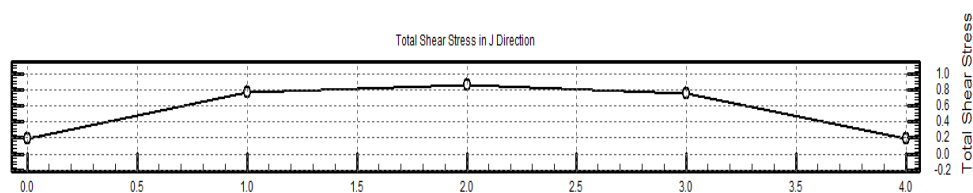


شکل (۴-۴۲) نمودار تنش برشی مقطع اول

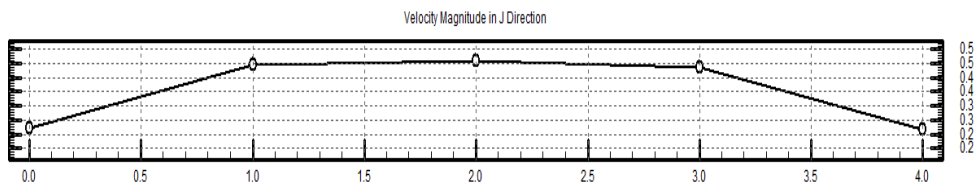


شکل (۴-۴۳) تغییرات سرعت مقطع اول

از شکل های (۴۲-۴) و (۴۳-۴) این نتیجه حاصل گردید که در مقطع اول با دوره بازگشت ده ساله متوسط تنش برشی برابر $0/3$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر $0/4$ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/28$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/4$ متر بر ثانیه است که در میانه مقطع واقع شده است. با توجه با این که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است کمتر است این نتیجه حاصل گردید که در دوره بازگشت ده ساله و دبی های کمتر از 88 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش ایجاد نشده است. در این مقطع سرعت نیز از مقدار سرعت بحرانی کمتر است.

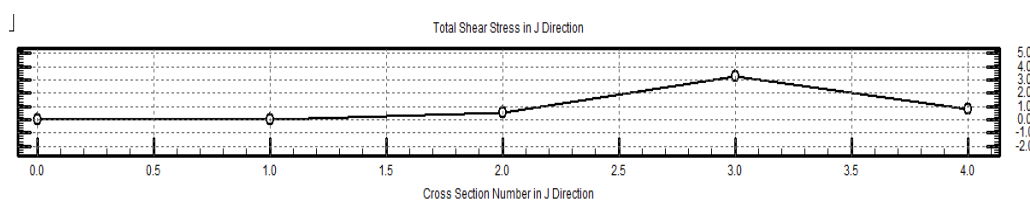


شکل (۴-۴۴) نمودار تنش برشی مقطع دوم

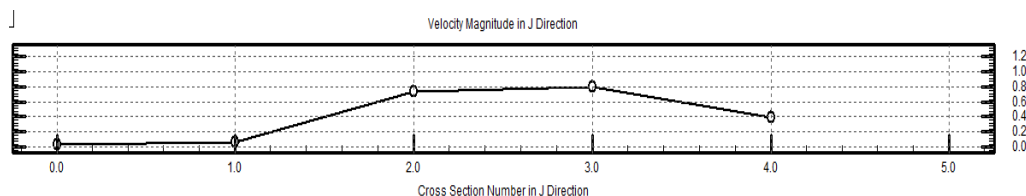


شکل (۴-۴۵) تغییرات سرعت در مقطع دوم

با توجه به شکل‌های (۴-۴۴) و (۴-۴۵) در مقطع دوم متوسط تنش برشی برابر $0/56$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر $0/81$ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/4$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/5$ متر بر ثانیه شبیه‌سازی گردیده است. که در میانه مقطع واقع شده است. با وجود اینکه مقدار تنش متوسط از تنش بحرانی در این مقطع کمتر بوده ولی مقدار تنش در مرکز مقطع بیشتر از تنش بحرانی بوده و در مرکز مقطع فرسایش ایجاد شده است. به عبارتی کف کنی در مرکز رودخانه مشاهده می‌گردد. از این رو می‌توان گفت در دوره بازگشت ده‌ساله و دبی‌های بیشتر از 88 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در مرکز مقطع عرضی به وجود آمده است. همچنین مقدار سرعت نیز از سرعت بحرانی کمتر است و بیشترین سرعت و تنش در قسمت میانی مقطع واقع شده است.

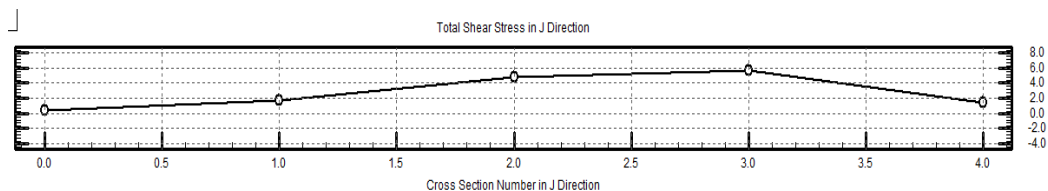


شکل (۴-۴۶) نمودار تنش برشی مقطع سوم

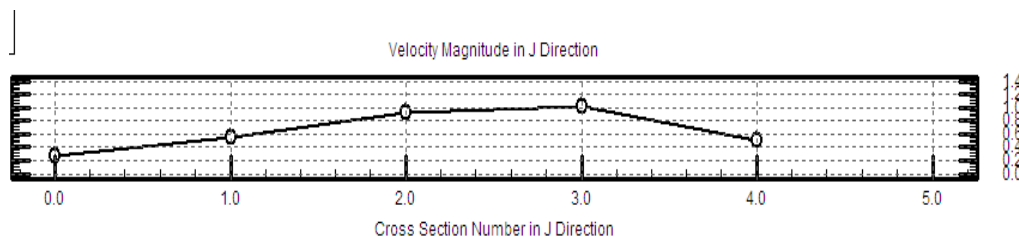


شکل (۴-۴۷) تغییرات سرعت مقطع سوم

با توجه به شکل‌های (۴-۴۶) و (۴-۴۷) در مقطع سوم با دوره بازگشت ده‌ساله متوسط تنش برشی برابر $0/96$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر 3 نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. به عبارتی اگر رودخانه را به دو قسمت تقسیم کنیم در سمت چپ تنش بسیار پایین بوده و در سمت راست مقطع تنش از حالت بحرانی بیشتر است. در سمت چپ مقطع تنش برشی نزدیک به صفر و بیشترین تنش را در نزدیکی مرز سمت راست مقطع عرضی داریم. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/45$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/8$ متر بر ثانیه است که در سمت راست مقطع وارد شده است. با توجه با این که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می‌توان نتیجه گرفت در دوره بازگشت ده‌ساله و دبی‌های بیشتر از 88 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در سمت راست مقطع اتفاق افتاده است. همچنین در سمت راست مقطع سرعت از سرعت بحرانی کمتر است.



شکل (۴-۴۸) نمودار تنش برشی مقطع چهارم



شکل (۴-۴۹) تغییرات سرعت مقطع چهارم

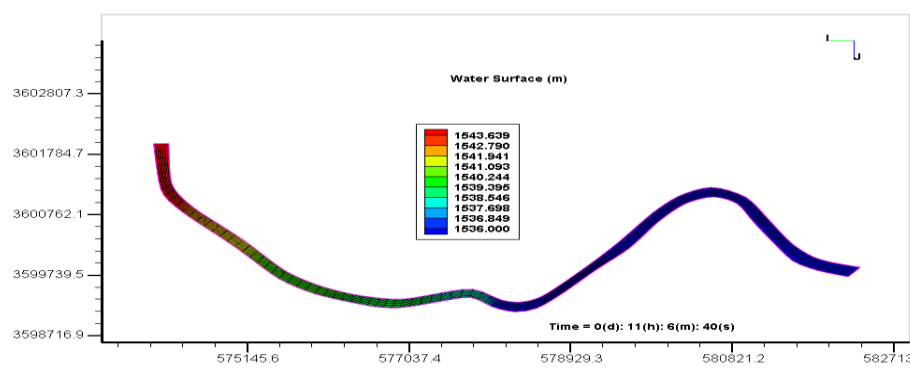
با توجه به شکل‌های (۴-۴۸) و (۴-۴۹) در مقطع چهارم متوسط تنش برشی برابر $2/85$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع قرار دارد که مقدار آن برابر $5/9$

نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/5$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر 1 متر بر ثانیه است که در میانه مقطع در سمت راست واقع شده است. با توجه با این که مقدار تنش برشی سمت راست از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می تواند نتیجه گرفت در دوره بازگشت ده ساله و دبی های بیشتر از 88 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در سمت راست صورت می گیرد. همچنین سرعت نیز از سرعت بحرانی بیشتر است.

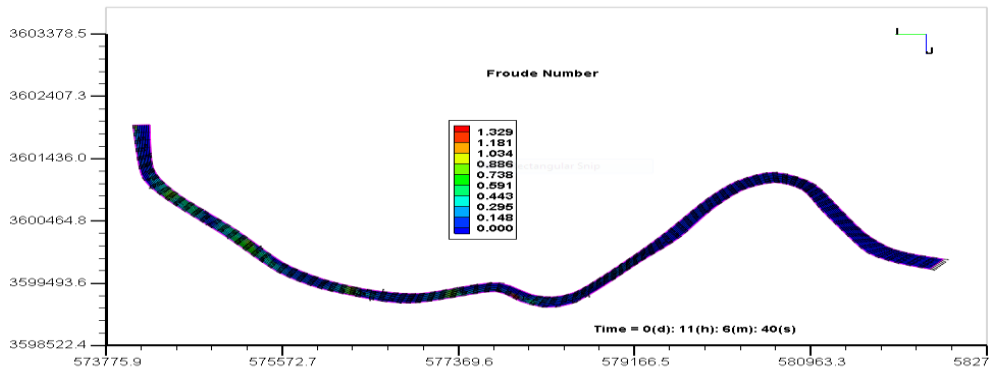
۴-۷-۳- نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت بیست ساله

در دوره بازگشت بیست ساله مقدار دبی ورودی به حوضه برابر 111 مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع آب در این حالت برابر $1/9$ متر است. که از نمودار دبی اشل به دست آمده است، که به صورت شرایط مرزی در مدل وارد می شود.

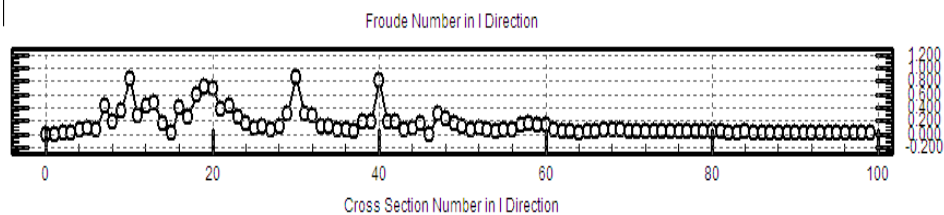
نتایج گرافیکی در این بخش در بردارنده پلان کل حوزه و چگونگی توزیع پارامترهای هیدرولیکی است. که در اشکال (۴-۵۰) الی (۴-۶۰) به صورت نمای کل حوزه و نمایی نزدیک تر در مقاطع مشخص در خمها و نقاط بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۴-۵۰) رقوم سطح آب دوره بازگشت بیست ساله

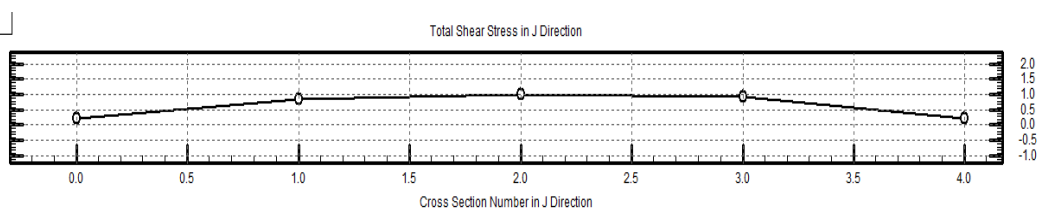


شکل (۴-۵۱) شاخص فرود دوره بازگشت بیست‌ساله

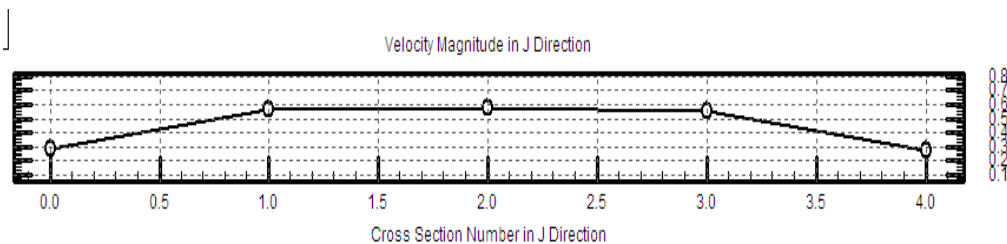


شکل (۴-۵۲) تغییرات طولی عدد فرود در مرکز رودخانه

طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدل در دوره بازگشت بیست‌ساله رقوم سطح آب افزایش پیدا کرده همچنین تغییرات رقوم در خم‌ها به‌خوبی قابل‌مشاهده است. در این حالت عدد فرود نیز در مقطعی به مرز بحرانی نزدیک شده است. برای بررسی سرعت و مقدار تنش برشی کف از تصاویر نمای نزدیک‌تر استفاده شده که در ۴ مقطع در دو خم بررسی گردیده که در ادامه ذکر شده است. نتایج تنش برشی و سرعت در مقطع اول تا چهارم به‌صورت زیر است:

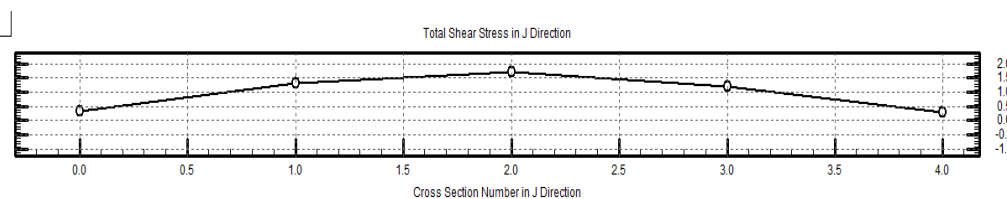


شکل (۴-۵۳) تنش برشی مقطع ۱

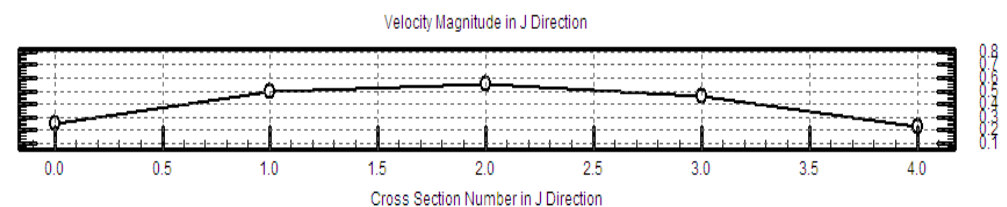


شکل (۴-۵۴) سرعت مقطع ۱

از شکل‌های (۴-۵۳) و (۴-۵۴) این نتایج حاصل گردید که در مقطع اول با دوره بازگشت بیست‌ساله متوسط تنش برشی برابر 0.176 نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر 1 نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر 0.47 متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر 0.58 متر بر ثانیه است که در میانه مقطع واقع شده است. با توجه با این که این مقدار تنش برشی در میانه مقطع یا به عبارتی در سه‌پنجم میانی از تنش برشی بحرانی که مقدار آن 0.86 نیوتون بر مترمربع است بیشتر است این نتیجه حاصل شده است که در دوره بازگشت بیست‌ساله و دبی‌های بیشتر از 111 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش ایجاد شده و باعث فرسایش بستر رودخانه در قسمت میانی شده است. در این مقطع سرعت از مقدار سرعت بحرانی کمتر است.

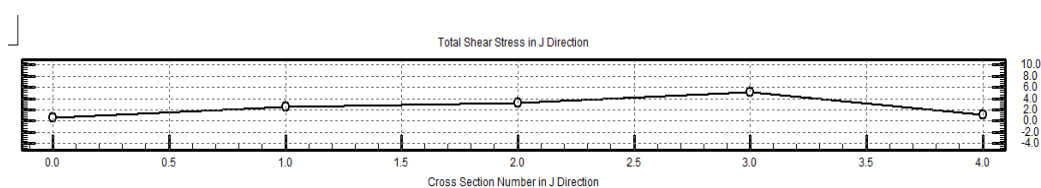


شکل (۴-۵۵) تنش برشی مقطع ۲

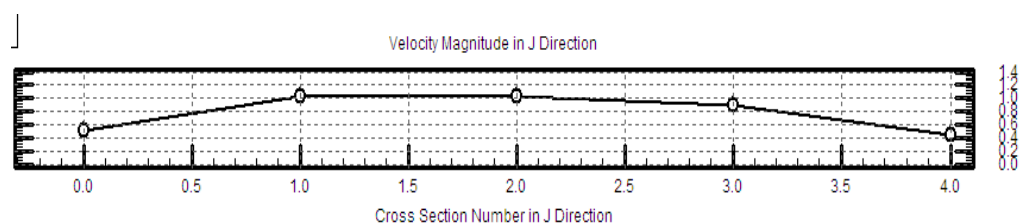


شکل (۴-۵۶) سرعت مقطع ۲

با توجه به شکل‌های (۴-۵۵) و (۴-۵۶) در مقطع دوم متوسط تنش برشی برابر ۱/۱ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر ۱/۷ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر ۰/۴۲ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر ۰/۵۸ متر بر ثانیه است که در میانه مقطع واقع شده است. با توجه با این که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن ۰/۸۶ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می‌تواند نتیجه گرفت در دوره بازگشت بیست‌ساله و دبی‌های بیشتر از ۱۱۱ مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در مقطع وجود دارد. که مقدار فرسایش در مرکز مقطع بسیار شدیدتر بوده است. همچنین مقدار سرعت نیز از سرعت بحرانی کمتر است و بیشترین سرعت و تنش در قسمت میانی مقطع واقع شده است.



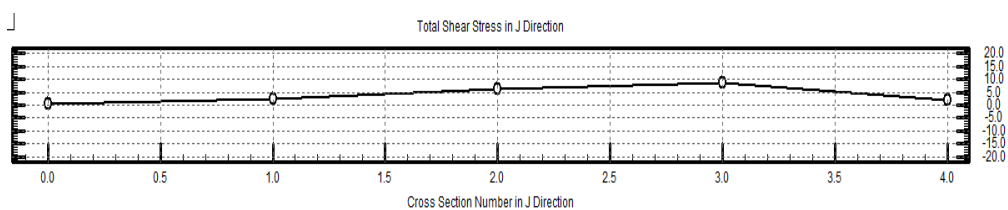
شکل (۴-۵۷) تنش برشی مقطع ۳



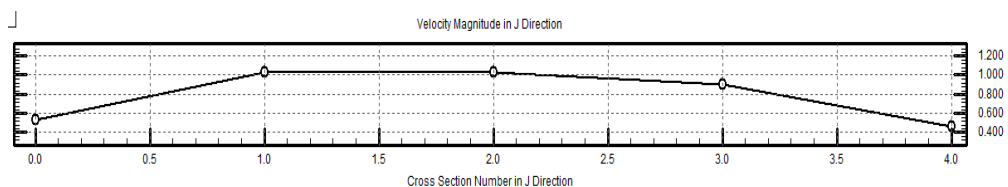
شکل (۴-۵۸) سرعت مقطع سه

با توجه به شکل‌های (۴-۵۷) و (۴-۵۸) در مقطع سوم با دوره بازگشت بیست‌ساله متوسط تنش برشی برابر ۲/۴۶ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر ۵/۸ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر ۰/۷۸ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر ۱ متر بر ثانیه است که در سمت راست مقطع وارد شده

است. با توجه با این که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می تواند نتیجه گرفت در دوره بازگشت بیست ساله و دبی های بیشتر از 111 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در سمت راست مقطع اتفاق افتاده است. همچنین در سمت راست مقطع سرعت نیز از سرعت بحرانی بیشتر است.



شکل (۴-۵۹) تنش برشی مقطع ۴



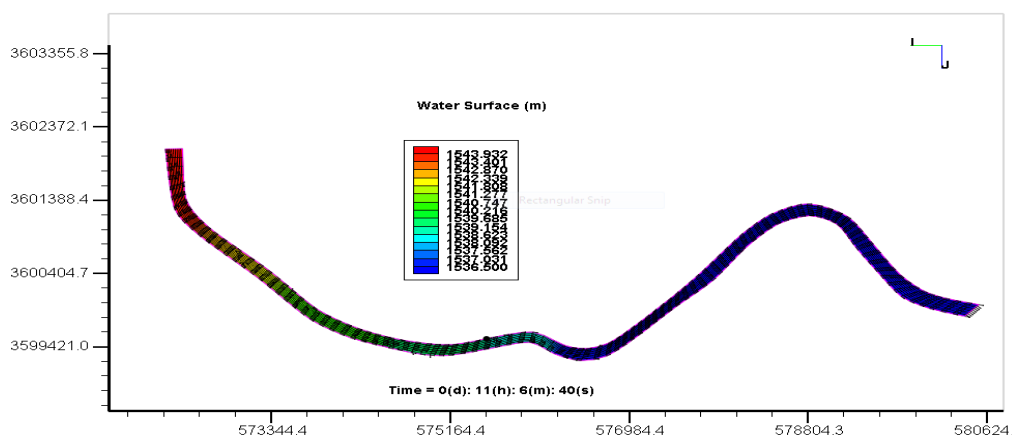
شکل (۴-۶۰) سرعت مقطع ۴

با توجه به شکل های (۴-۵۹) و (۴-۶۰) در مقطع چهارم متوسط تنش برشی برابر $3/6$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع قرار دارد که مقدار آن برابر 9 نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/33$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/8$ متر بر ثانیه است که در میانه مقطع در سمت راست واقع شده است. با توجه با این که مقدار تنش برشی سمت راست از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می تواند نتیجه گرفت در دوره بازگشت بیست ساله و دبی های بیشتر از 66 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در سمت راست صورت می گیرد.

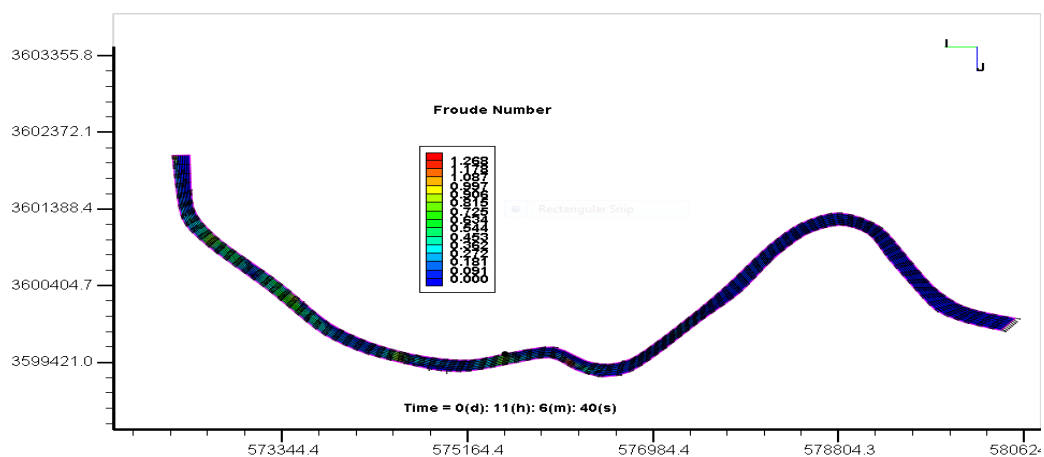
۴-۷-۴- نتایج اجرای مدل برای دوره بازگشت پنجاهساله

در دوره بازگشت پنجاهساله مقدار دبی ورودی به حوضه برابر ۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع آب در این حالت برابر ۲/۴ متر است. که از نمودار دبی اشل به دست آمده است، که به صورت شرایط مرزی در

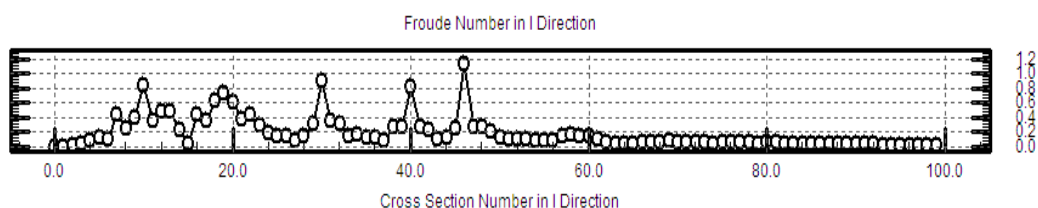
نتایج گرافیکی در این بخش در بردارنده پلان کل حوزه و چگونگی توزیع پارامترهای هیدرولیکی است. که در اشکال (۴-۶۱) الی (۴-۷۱) به صورت نمای کل حوزه و نمایی نزدیک تر در مقاطع مشخص در خمها و نقاط بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۴-۶۱) رقوم سطح آب دوره بازگشت پنجاهساله

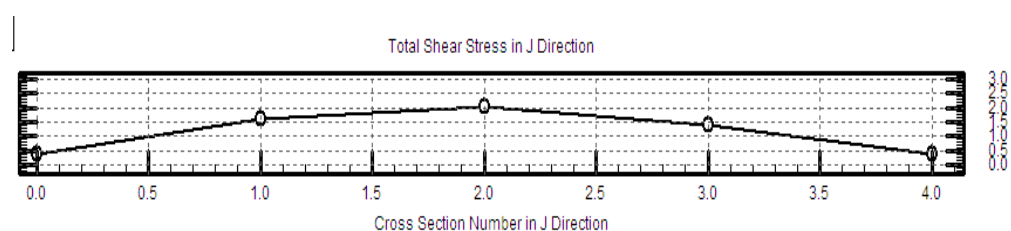


شکل (۴-۶۲) شاخص فرود دوره بازگشت پنجاهساله

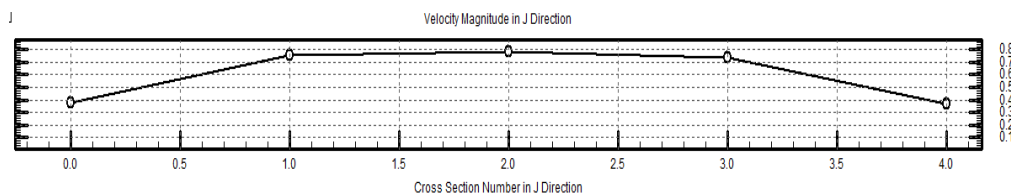


شکل (۴-۶۳) تغییرات طولی عدد فرود در مرکز رودخانه

بررسی سرعت و مقدار تنش برشی کف از تصاویر نمای نزدیک تر در دو خم در ادامه ذکر شده است. نتایج تنش برشی و سرعت در مقطع اول تا چهارم به صورت زیر است.



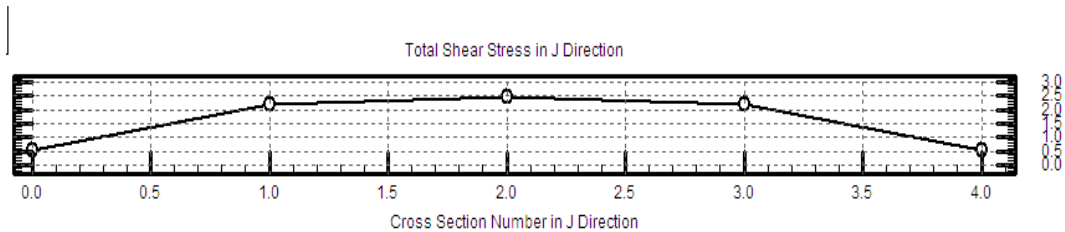
شکل (۴-۶۴) تنش برشی مقطع ۱



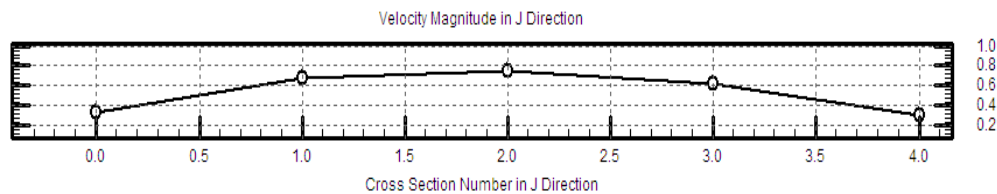
شکل (۴-۶۵) سرعت مقطع ۱

از شکل‌های (۴-۶۴) و (۴-۶۵) این نتیجه حاصل می‌شود که در مقطع اول با دوره بازگشت پنجاه‌ساله متوسط تنش برشی برابر $1/2$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر 2 نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/6$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/8$ متر بر ثانیه است که در میانه مقطع واقع شده است. طبق نتایج بالا مقدار تنش برشی متوسط و ماکزیمم از مقدار تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می‌توان نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنجاه‌ساله و دبی‌های بیشتر از 145 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در

اثر فرسایش بسیار شدید بوده و فرسایش در مرکز رودخانه صورت می‌گیرد. در این مقطع سرعت متوسط از مقدار سرعت بحرانی کمتر است. و بیشترین سرعت در مرکز رودخانه قرار دارد.

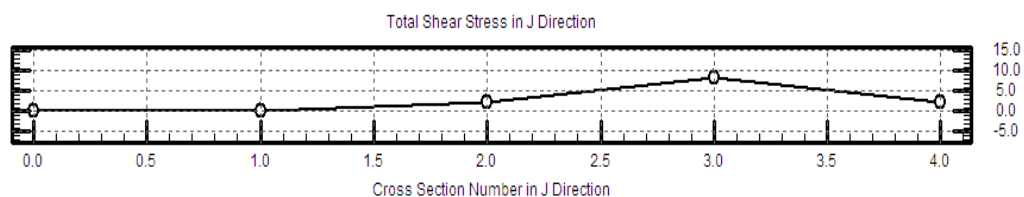


شکل (۴-۶۶) تنش برشی مقطع ۲

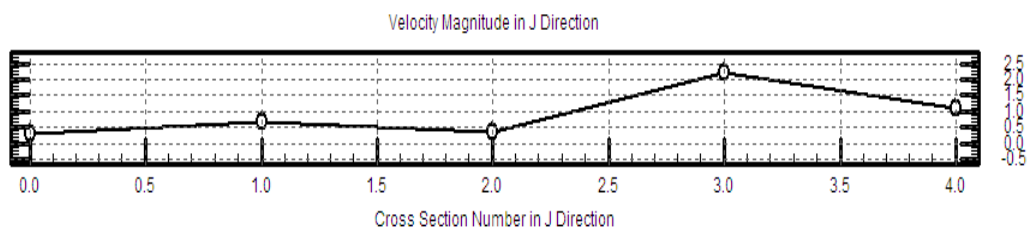


شکل (۴-۶۷) سرعت مقطع ۲

از شکل‌های (۴-۶۶) و (۴-۶۷) می‌توان این نتیجه را گرفت در مقطع دوم متوسط تنش برشی برابر $1/6$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در مرکز رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر $2/5$ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/57$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $0/8$ متر بر ثانیه است که در میانه مقطع واقع شده است. با توجه با این- که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می‌توان نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنجاهساله و دبی‌های بیشتر از 145 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در مقطع بسیار شدید است، که مقدار فرسایش در مرکز مقطع بسیار شدیدتر بوده است. همچنین مقدار سرعت نیز از سرعت بحرانی کمتر است و بیشترین سرعت و تنش در قسمت میانی مقطع واقع شده است.

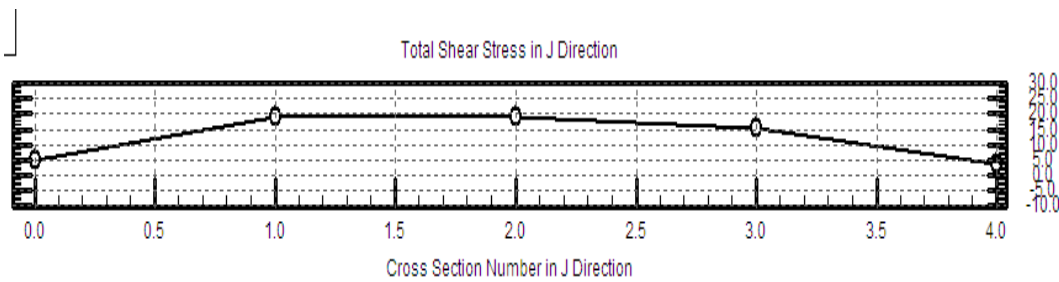


شکل (۴-۶۸) تنش برشی مقطع ۳

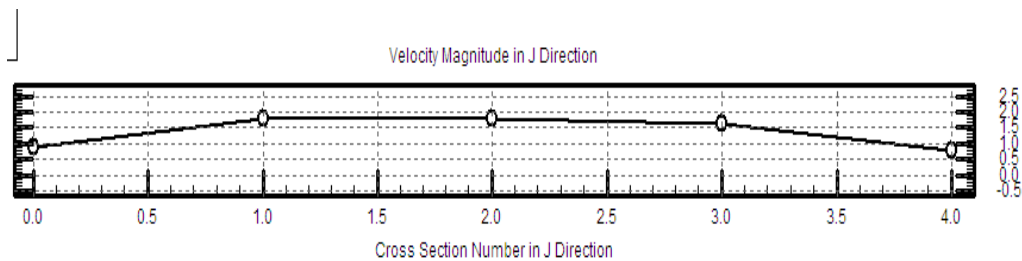


شکل (۴-۶۹) سرعت مقطع ۳

با توجه به شکل‌های (۴-۶۸) و (۴-۶۹) در مقطع سوم با دوره بازگشت پنجاهساله متوسط تنش برشی برابر $3/4$ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع رودخانه قرار دارد که مقدار آن برابر 9 نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. به عبارتی اگر رودخانه را به دو قسمت تقسیم کنیم در سمت چپ تنش بسیار پایین بوده و در سمت راست مقطع تنش از حالت بحرانی بیشتر است. در سمت چپ مقطع تنش برشی نزدیک به صفر و بیشترین تنش را در نزدیکی مرز سمت راست مقطع عرضی داریم. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر $0/89$ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر $2/2$ متر بر ثانیه است که در سمت راست مقطع وارد شده است. با توجه با این که این دو مقدار (تنش برشی متوسط و ماکزیمم) از تنش برشی بحرانی که مقدار آن $0/86$ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می‌تواند نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنجاهساله و دبی‌های بیشتر از 145 مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در سمت راست مقطع اتفاق افتاده است. همچنین در سمت راست مقطع سرعت نیز از سرعت بحرانی بیشتر است.



شکل (۴-۷۰) تنش برشی مقطع ۴



شکل (۴-۷۱) سرعت مقطع ۴

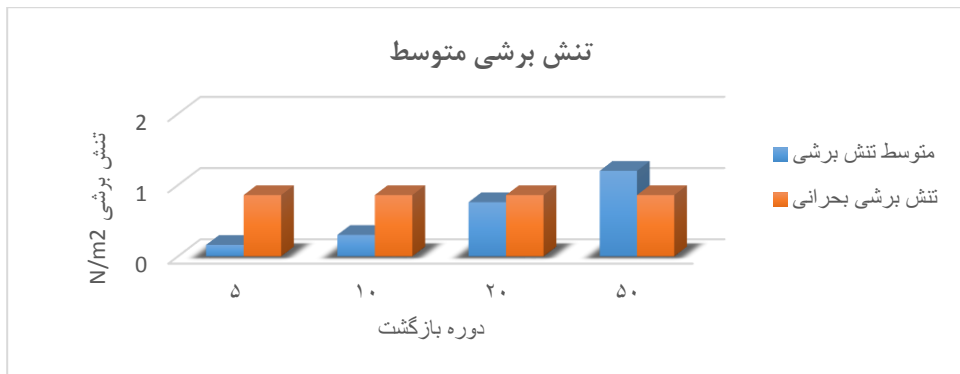
با توجه به شکل‌های (۴-۷۰) و (۴-۷۱) در مقطع چهارم متوسط تنش برشی برابر ۱۲ نیوتون بر مترمربع است و بیشترین تنش برشی در سمت راست مقطع قرار دارد که مقدار آن برابر ۲۰ نیوتون بر مترمربع محاسبه شده است. همچنین متوسط سرعت در این مقطع برابر ۱/۳ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار سرعت برابر ۱/۷ متر بر ثانیه است که در میانه مقطع در سمت راست واقع شده است. با توجه با این که مقدار تنش برشی از تنش بحرانی که مقدار آن ۰/۸۶ نیوتون بر مترمربع است بیشتر است می‌توان نتیجه گرفت در دوره بازگشت پنجاه‌ساله و دبی‌های بیشتر از ۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی در اثر فرسایش در سمت راست صورت می‌گیرد.

۴-۸- بررسی تنش برشی هر مقطع

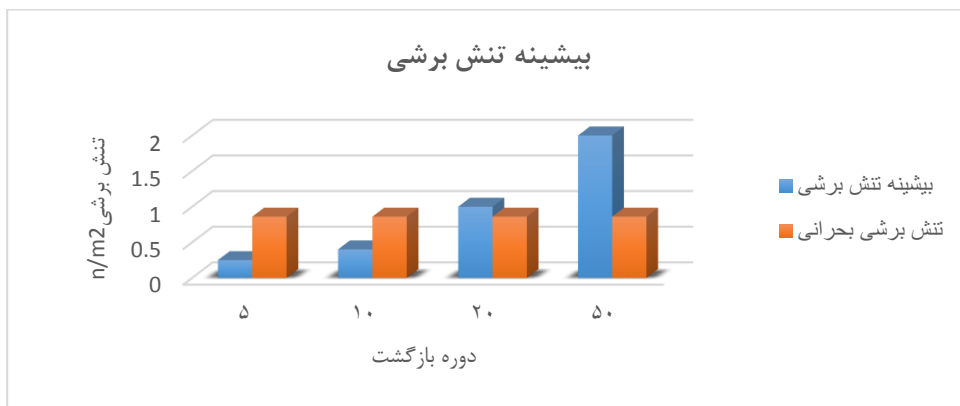
برای بررسی و مقایسه دقیق‌تر در ادامه تغییرات تنش برشی و سرعت، در هر مقطع آورده شده است.

جدول (۳-۴) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۱

مقطع اول	۵ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله
متوسط تنش برشی N/m^2	۰/۱۶	۰/۳	۰/۷۶	۱/۲
بیشترین تنش برشی نقطه‌ای N/m^2	۰/۲۵	۰/۴	۱	۲
متوسط سرعت m/s	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۴۷	۰/۶
بیشترین سرعت نقطه‌ای m/s	۰/۳	۰/۴	۰/۵۸	۰/۸



شکل (۴-۷۲) نمودار مقایسه تنش برشی مقطع اول با تنش بحرانی

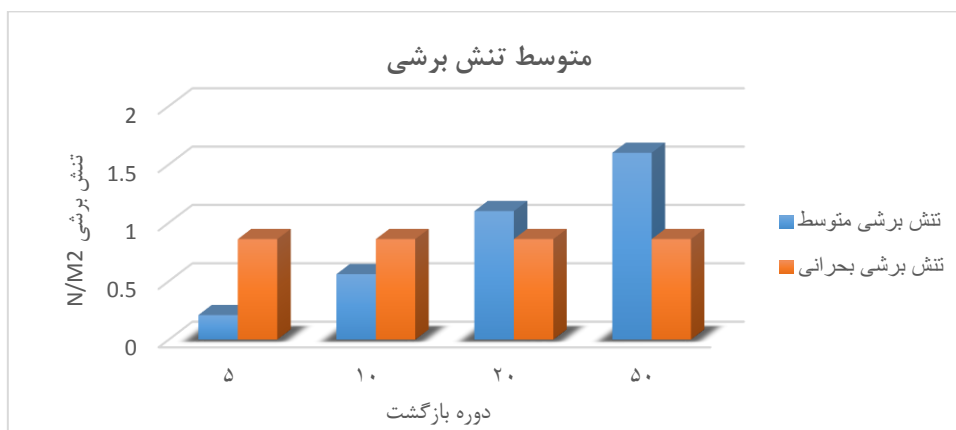


شکل (۴-۷۳) نمودار مقایسه تنش بیشینه مقطع اول با تنش بحرانی

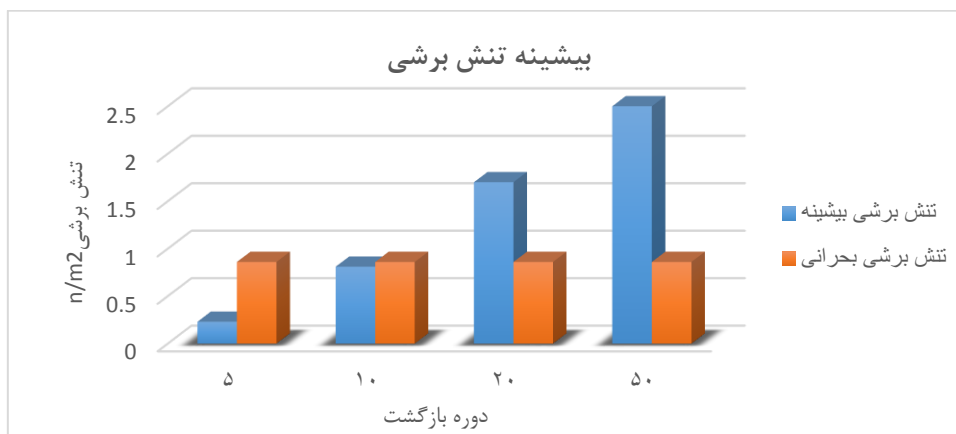
با توجه به شکل‌های (۴-۷۲) و (۴-۷۳) این نتیجه حاصل گردید تنش برشی در دوره بازگشت-های کمتر از ده سال یعنی با دبی‌های کمتر از ۸۸ مترمکعب بر ثانیه هیچ‌گونه فرسایشی در بستر رودخانه نداریم. و در دوره بازگشت بیست‌ساله فرسایش بسیار کم در مرکز رودخانه انجام گردیده است ولی در دوره بازگشت پنجاه‌ساله و دبی‌های بیشتر از ۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه فرسایش بسیار شدید است.

جدول (۴-۴) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۲

مقطع دوم	۵ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله
متوسط تنش برشی N/m^2	۰/۲۱	۰/۵۶	۱/۱	۱/۶
بیشترین تنش برشی نقطه‌ای N/m^2	۰/۳۲	۰/۸۱	۱/۷	۲/۵
متوسط سرعت m/s	۰/۲۳	۰/۴	۰/۴۲	۰/۵۷
بیشترین سرعت نقطه‌ای m/s	۰/۲۹	۰/۵	۰/۵۸	۰/۸



شکل (۴-۷۴) مقایسه متوسط تنش برشی مقطع دوم با تنش بحرانی



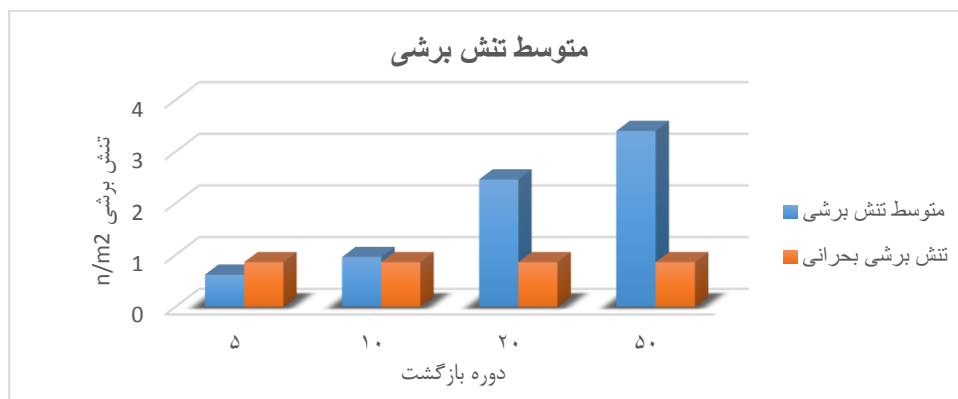
شکل (۴-۷۵) نمودار مقایسه تنش بیشینه مقطع دوم با تنش بحرانی

از نمودارهای شکل‌های (۴-۷۴) و (۴-۷۵) این نتیجه به دست آمده است که در مقطع دوم فرسایش در دوره بازگشت‌های ۵ و ۱۰ ساله وجود ندارد ولی در دوره بازگشت‌های ۲۰ و ۵۰ ساله میزان فرسایش در مرکز رودخانه بسیار شدید بوده و تنش برشی از تنش برشی بحرانی بیشتر

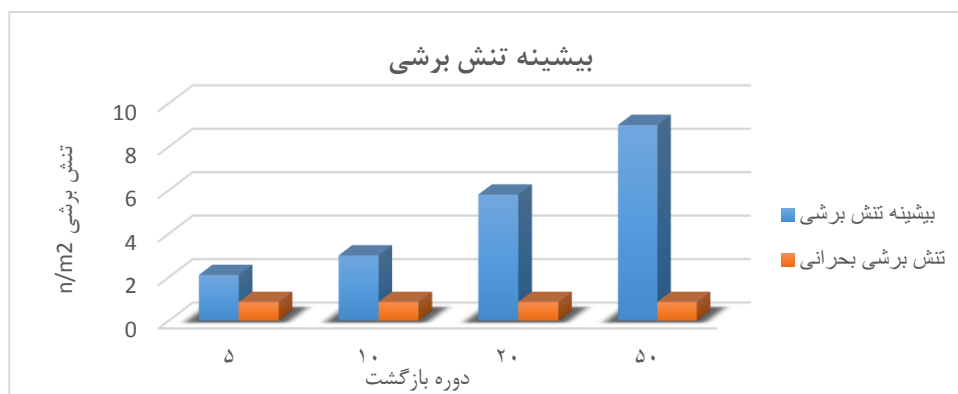
است. و در دبی‌های بیشتر از ۱۱۱ مترمکعب بر ثانیه تغییرات مورفولوژی ناشی از فرسایش در مرکز رودخانه ایجاد گردیده است.

جدول (۴-۵) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۳

مقطع سوم	ساله ۵	ساله ۱۰	ساله ۲۰	ساله ۵۰
متوسط تنش برشی N/m^2	۰/۶۲	۰/۹۶	۲/۴۶	۳/۴
بیشترین تنش برشی نقطه‌ای N/m^2	۲/۱	۳	۵/۸	۹
متوسط سرعت m/s	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۷۸	۰/۸۹
بیشترین سرعت نقطه‌ای m/s	۰/۸	۰/۸	۱	۲/۲



شکل (۴-۷۶) مقایسه متوسط تنش برشی مقطع سوم با تنش بحرانی



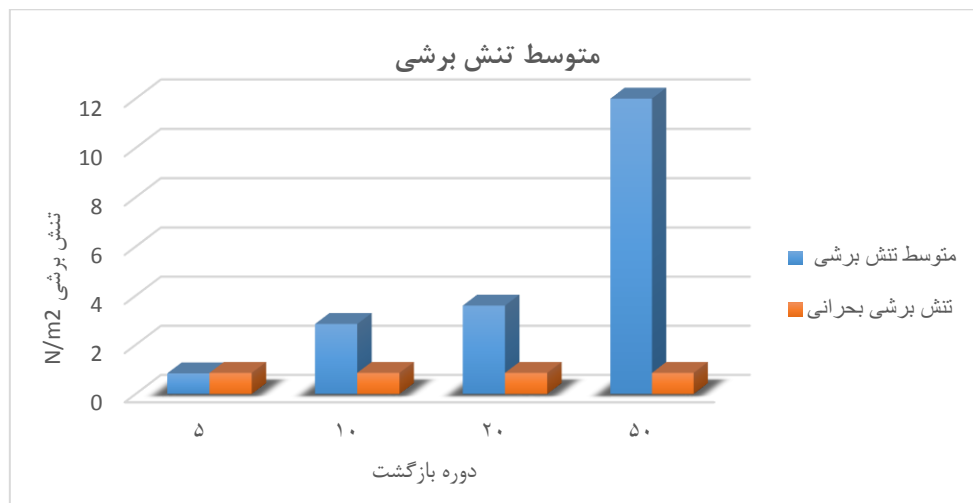
شکل (۴-۷۷) نمودار مقایسه بیشینه تنش برشی مقطع سوم با تنش بحرانی

با توجه به شکل‌های (۴-۷۶) و (۴-۷۷) مشاهده می‌گردد در تنش برشی در مقطع سوم بسیار شدید بوده به طوری که تغییرات مورفولوژی ناشی از فرسایش از دبی‌هایی با دوره بازگشت ۵ ساله

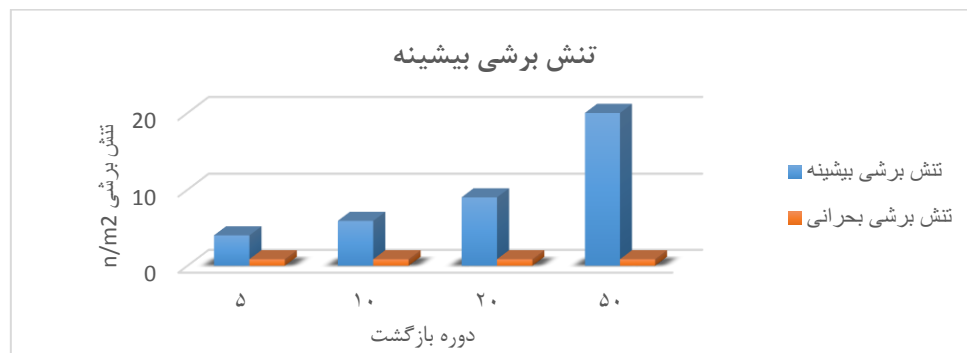
یعنی دبی‌هایی با مقدار ۶۶ مترمکعب بر ثانیه ایجاد می‌گردد. در نتیجه برای کاهش تنش برشی باید اقدامات سازه‌ای در این منطقه ایجاد گردد.

جدول (۴-۶) تغییرات تنش برشی و سرعت مقطع ۴

مقطع چهارم	۵ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله
متوسط تنش برشی N/m^2	۰/۸۴	۲/۸۵	۳/۶	۱۲
بیشترین تنش برشی نقطه‌ای N/m^2	۴	۵/۹	۹	۲۰
متوسط سرعت m/s	۰/۳۳	۰/۵	۰/۹	۱/۳
بیشترین سرعت نقطه‌ای m/s	۰/۸	۱	۱/۱	۱/۷



شکل (۴-۷۸) مقایسه متوسط تنش برشی مقطع چهارم با تنش بحرانی

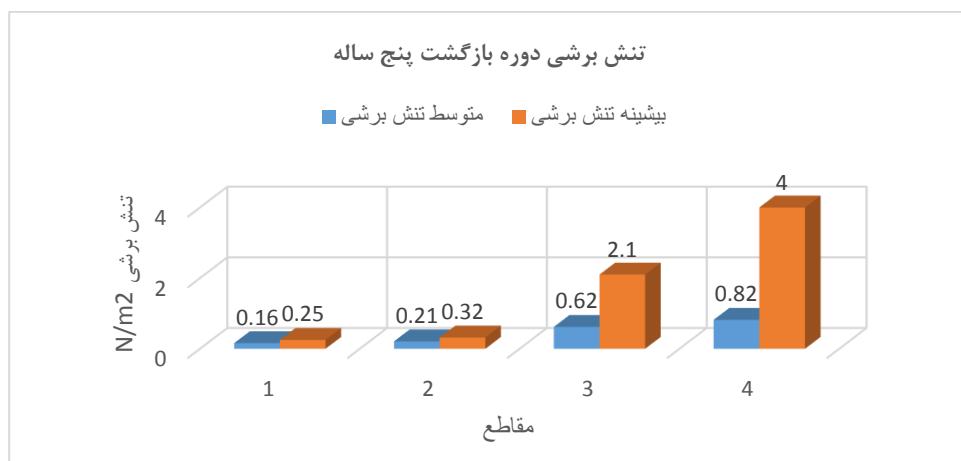


شکل (۴-۷۹) نمودار مقایسه تنش بیشینه مقطع دوم با تنش بحرانی

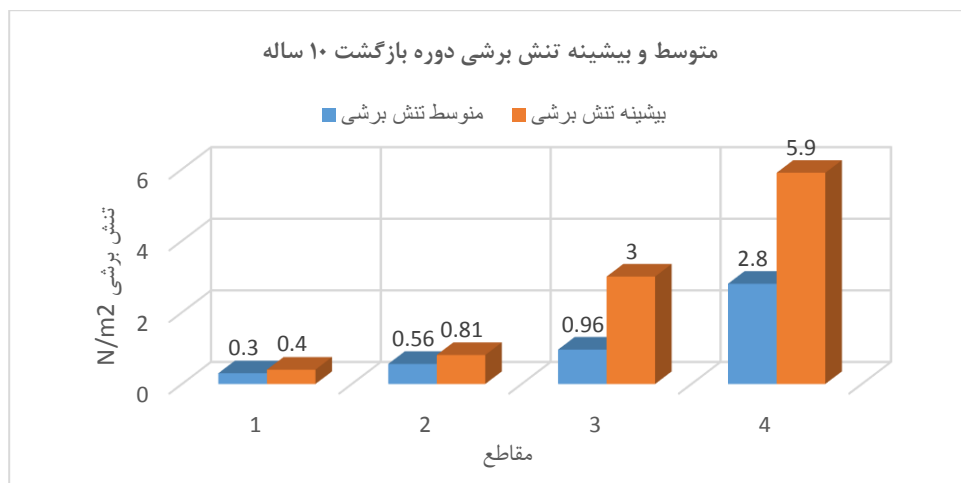
با توجه به شکل‌های (۷۸-۴) و (۷۹-۴) می‌توان نتیجه گرفت تنش برشی در تمامی دوره بازگشت‌ها از تنش برشی بحرانی بیشتر بوده است و در این مقطع تغییرات مورفولوژی تحت تأثیر فرسایش بسیار شدید است.

۹-۴- مقایسه تنش برشی در مقاطع متفاوت

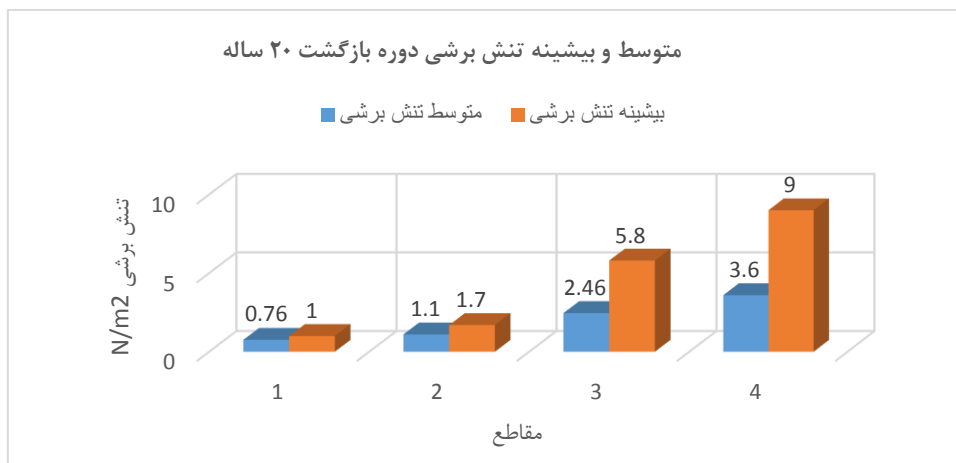
برای درک بهتر تغییرات تنش برشی و فرسایش در مسیر طولی رودخانه تنش برشی متوسط و ماکزیمم را در هر مقطع با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.



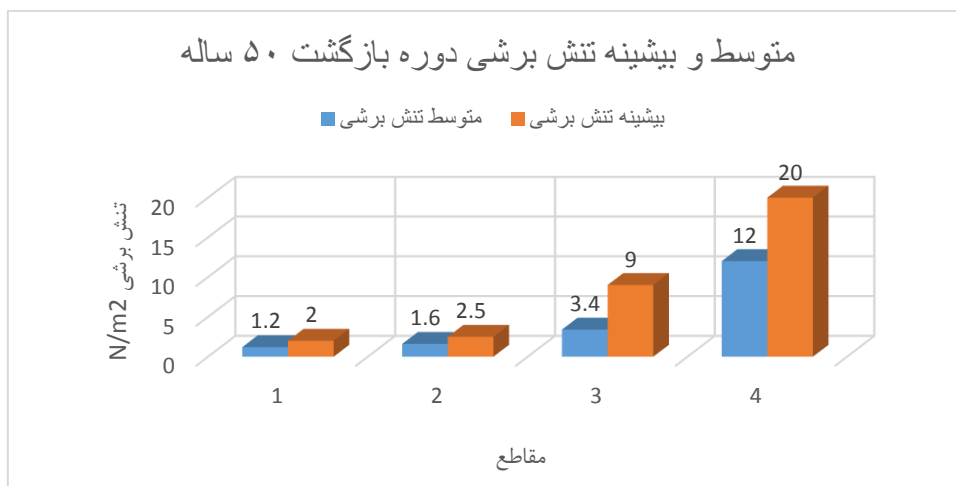
شکل (۸۰-۴) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۵ ساله



شکل (۸۱-۴) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۱۰ ساله



شکل (۴-۸۲) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۲۰ ساله



شکل (۴-۸۳) مقایسه تنش برشی مقاطع در دوره بازگشت ۵۰ ساله

طبق شکل‌های (۴-۸۰) الی (۴-۸۴) این نتیجه حاصل گردید که در مقاطع اول و دوم یا به عبارتی در خم‌های ابتدایی بازه رودخانه تنش برشی کمتر و در نتیجه فرسایش کم و قابل قبول بوده است. ولی در مقاطع سوم و چهارم یعنی در خم ۱۸۰ درجه تنش برشی بسیار شدید بوده است و تغییرات مورفولوژی ناشی از فرسایش را به همراه دارد. در نتیجه در این منطقه باید با ایجاد سازه‌های کنترل جریان در این منطقه از تنش برشی کاسته و شرایط مطلوب‌تری ایجاد نمود. همچنین تنش برشی در قوس خارجی در مقاطع ۳ و ۴ زیاد است. همچنین اختلاف تنش برشی متوسط و میانگین در مقاطع ۳ و ۴ بسیار زیاد است که نشان‌دهنده تغییرات شدید تنش برشی در عرض رودخانه است. به صورتی که اختلاف تنش برشی میانگین و ماکزیمم در خم

ابتدایی بازه در دوره بازگشت ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله برابر ۰/۳۶، ۰/۲۵، ۰/۲۴ و ۰/۴ است، این مقادیر برای مقطع دوم برابر ۰/۳۴، ۰/۳، ۰/۳۵ و ۰/۳۶ است و برای مقطع سوم برابر ۰/۷، ۰/۶۸، ۰/۵۷ و ۰/۶۲ است و برای مقطع چهارم برابر ۰/۸، ۰/۵۳، ۰/۶ و ۰/۴ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تغییرات تنش برشی در مقطع عرضی در مقاطع ۳ و ۴ یعنی در قوس ۱۸۰ درجه شدیدتر است.

۴-۱۰- نتایج حاصل از عکس‌های هوایی

در این قسمت ابتدا پارامترهای تغییرات مورفولوژی بر روی سی‌گردیده و در نهایت نتایج به صورت زیر ارائه گردیده است.

۴-۱۰-۱- تصاویر ماهواره‌ای استفاده‌شده

در این پژوهش سعی بر آن شد از تصاویر ماهواره‌ای استفاده شود که بهترین کیفیت را دارا باشد بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۰۲ استفاده شد که در شکل‌های (۴-۸۴) و (۴-۸۵) ارائه گردید.

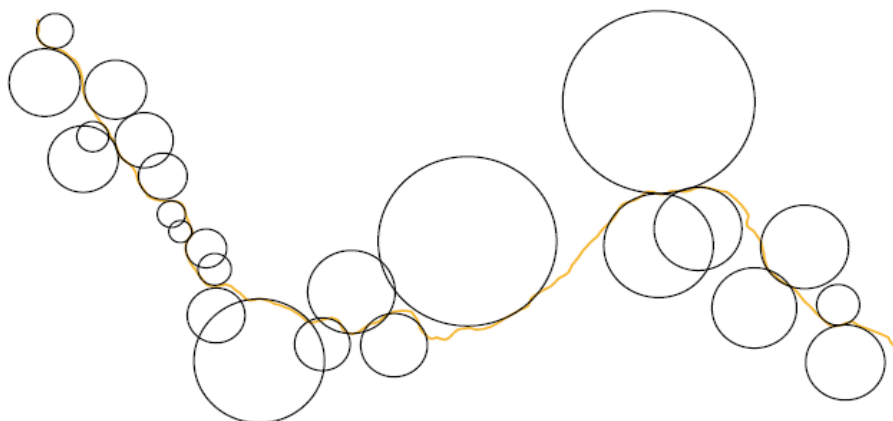


شکل (۴-۸۴) تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۶

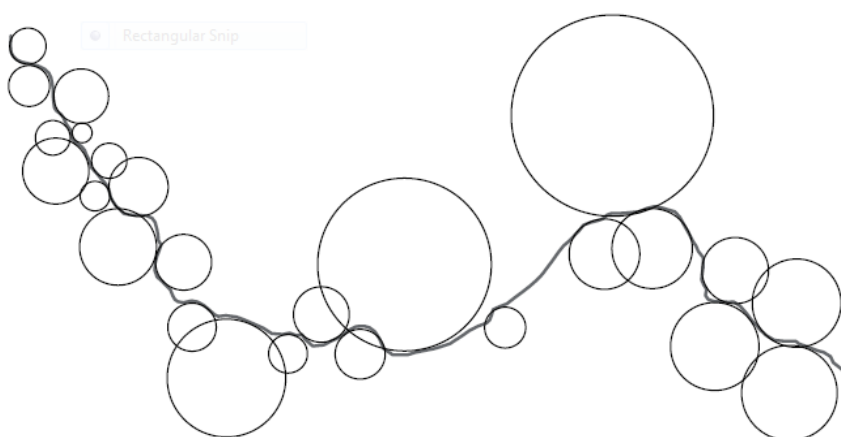


شکل (۴-۸۵) تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۰۲

برای بررسی تغییرات مورفولوژی و همچنین پیچانرودی رودخانه، تصاویر ماهواره‌ای دریافتی از Google Earth وارد محیط GIS گردید و پس از مطالعات بر روی این اطلاعات پارامترهای مهم تغییرات مورفولوژی بررسی شد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.2 مسیر رودخانه بر روی تصاویر ماهواره‌ای رسم گردید و با وارد کردن مسیر رودخانه در نرم‌افزار اتوکد دواپری مماس با پیچش‌های موجود در مسیر رودخانه ترسیم گردید، که در شکل‌های (۴-۸۶) و (۴-۸۷) قابل مشاهده است. پس از آن با استفاده از این اطلاعات پارامترهای طول قوس، شعاع انحناء، ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی محاسبه و بررسی گردیده است.



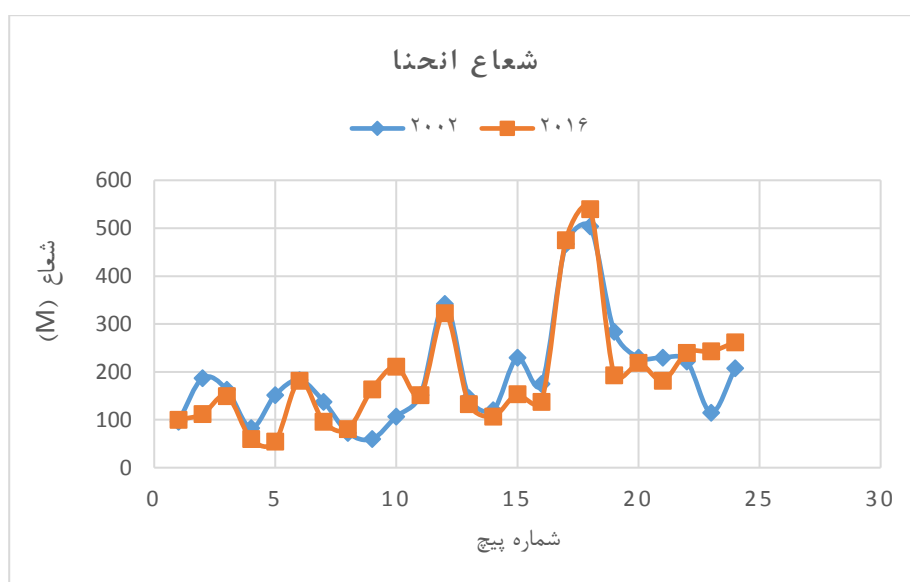
شکل (۴-۸۶) دواپر مماس بر خم‌های مسیر رودخانه مربوط به سال ۲۰۰۲



شکل (۴-۸۷) دواير مماس بر خم‌های مسیر رودخانه مربوط به سال ۲۰۱۶

۴-۱۰-۲- بررسی شعاع انحنا

شعاع انحنا عبارت است از شعاع دایره‌ای که به قسمتی از خم رودخانه مماس باشد. با توجه به شکل‌های (۴-۸۶) و (۴-۸۷) دوایری به صورت مماس در خم‌های رودخانه ترسیم شده است و شعاع انحنای مسیر رودخانه برای دو دوره زمانی مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶ محاسبه گردید، که نتایج حاصل از این محاسبات در نمودار شکل (۴-۸۸) ارائه شده است.

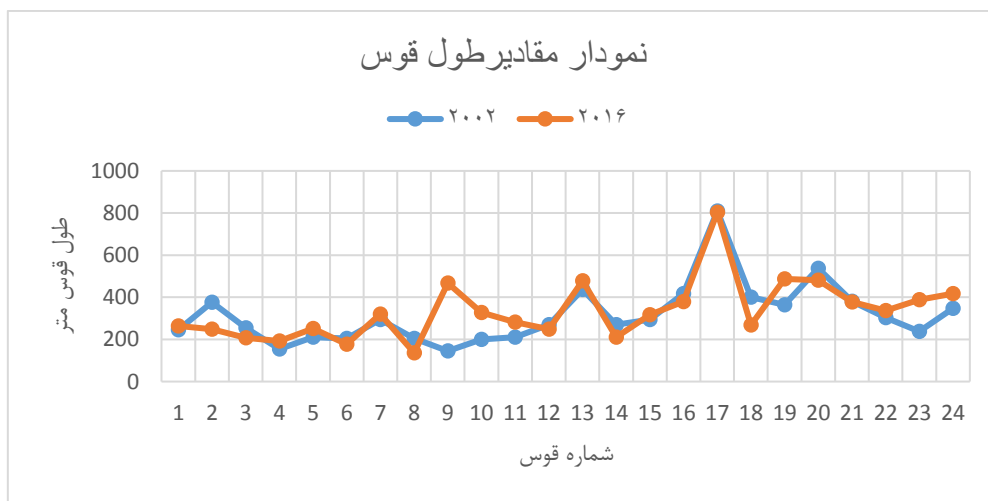


شکل (۴-۸۸) شعاع انحنا در بازه مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶

نمودار شکل (۴-۸۸) تغییرات شعاع انحنا در دو دوره زمانی را نمایش می‌دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود در بیشتر خم‌ها تطابق نسبی میان شعاع انحنا در دو دوره زمانی وجود دارد، ولی باگذشت زمان شعاع انحنا در ابتدای بازه کمتر شده ولی در میانه و انتهای بازه مقادیر شعاع انحنا افزایش پیدا کرده است. همچنین میانگین شعاع انحنا در سال ۲۰۰۲ برابر ۱۹۴/۴۵ بوده است، که با گذر زمان این مقدار در سال ۲۰۱۶ به ۱۹۰/۵ رسیده که نشان می‌دهد در طول این زمان شعاع انحنا به مقدار ۳/۹۵ متر کاهش پیدا کرده است. این تغییر نشان می‌دهد در این بازه زمانی تغییرات مورفولوژی صورت گرفته است.

۴-۱۰-۳- محاسبه طول قوس‌ها

طول قوس رودخانه طول خطی از یک نقطه عطف تا نقطه عطف انحنای بعدی در مسیر رودخانه تعریف می‌گردد. در نمودار شکل (۴-۸۹) تغییرات طول قوس‌های بازه مورد مطالعاتی برای سال-های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود طول قوس‌ها دائماً در حال افزایش و کاهش بوده که نشان‌دهنده تغییرات مورفولوژی در بستر رودخانه است.



شکل (۴-۸۹) تغییرات طول قوس بازه مطالعاتی در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶

همان‌گونه که در نمودار بالا مشاهده گردید طول قوس‌ها در قسمت میانی بازه و قسمت انتهایی یعنی در قوس‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ همچنین قوس‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ بیشترین تغییرات طول را داشته

است. بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول بالا میانگین طول قوس بازه مطالعاتی در سال ۲۰۰۲ برابر ۳۱۵/۴۵ متر بوده و در سال ۲۰۱۶ میانگین طول قوس به ۳۳۶/۲ متر رسیده است که نشان‌دهنده تغییرات مورفولوژی و افزایش پیچانرودی رودخانه هست.

۴-۱۰-۴- ضریب خمیدگی

در طول مسیر رودخانه تعدادی قوس یا خم وجود دارد، که با مشخصات متفاوتی شکل گرفته است این قوس‌ها با گذر زمان تغییر کرده و تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه را رقم می‌زنند. یکی از عوامل تعیین‌کننده نوع رودخانه ضریب خمیدگی قوس‌ها در مسیر طولی رودخانه می‌باشد. اندازه ضریب خمیدگی در قوس‌ها رودخانه با استفاده از معادله (۴-۳) محاسبه می‌گردد که در آن L طول قوس موردنظر و λ طول موج و S ضریب خمیدگی رودخانه می‌باشد.

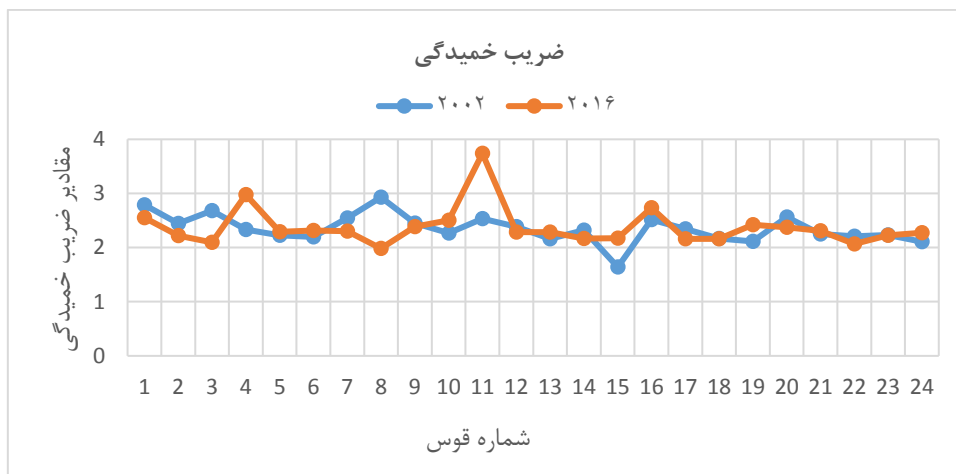
$$S = \frac{L}{\lambda/2} \quad (۴-۵)$$

بر اساس معیار ولفرت با توجه به ضریب خمیدگی رودخانه‌ها به ۴ دسته سینوسی، پیچانرودی، پیچانرودی شدید و مستقیم تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی در جدول (۴-۷) آمده است.

جدول (۴-۷) تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر اساس ضریب خمیدگی

ضریب پیچش	۱-۱/۰۵	۱/۱-۰۶/۲۵	۱/۲-۲۶	>۲
نوع رودخانه	مستقیم	سینوسی	پیچانرودی	پیچانرودی شدید

ضریب خمیدگی در بازه مطالعاتی از رودخانه زاینده‌رود طبق رابطه (۴-۵) و با استفاده از نرم-افزارهای GIS و Auto CAD برای دو بازه زمانی مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۶ محاسبه گردید و نتایج این محاسبات در نمودار شکل (۴-۸۹) ارائه شده است.



شکل (۴-۹۰) نمودار ضریب خمیدگی در بازه مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۰۲. طبق نتایج ارائه شده در شکل (۴-۹۰) این نتیجه حاصل شد که بازه مورد مطالعه از رودخانه زاینده‌رود دارای پیچانرودی شدید است. با گذر زمان در اثر تغییرات مورفولوژی پیچانرودی در قوس‌ها کاهش یا افزایش یافته است به طوری که میانگین ضریب پیچانرودی در سال ۲۰۰۲ برابر ۲/۳۵ بوده است و این مقدار در سال ۲۰۱۶ به ۲/۳۸ رسیده است که نشان‌دهنده این است که پیچانرودی در این فاصله زمانی مقداری افزایش یافته است.

۴-۱۰-۵- زاویه مرکزی

زاویه مرکزی عبارت است از زاویه بین دو شعاع متصل به نقاط عطف در دو خم متوالی که با استفاده از مقادیر این زاویه پیچانرودی رودخانه مشخص می‌گردد. برای محاسبه زاویه مرکزی از فرمول (۴-۵) استفاده می‌گردد که در آن A زاویه مرکزی، L طول قوس و R شعاع قوس می‌باشد.

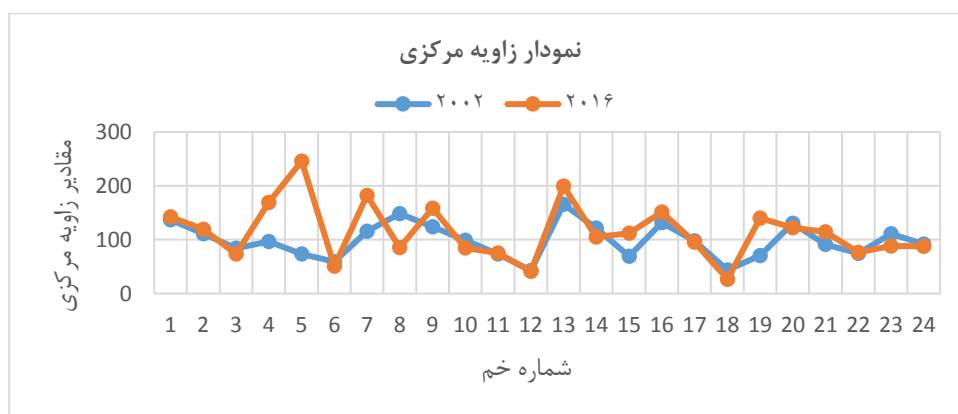
$$A = \frac{180L}{R\pi} \quad (۴-۶)$$

بر اساس توضیحات بخش (۳-۱۵-۲) طبق نظریه کورنایس پیچانرودی رودخانه‌ها بر اساس زاویه مرکزی طبق تقسیم‌بندی جدول (۴-۸) صورت می‌گیرد.

جدول (۴-۸) میزان توسعه خم رودخانه بر مبنای زاویه مرکزی

زاویه مرکزی درجه	شکل رودخانه
۰	مستقیم
۴۱-۱	شبه پیچانرودی
۸۵-۴۱	پیچانرودی توسعه نیافته
۱۵۸-۸۵	پیچانرودی توسعه یافته
۲۹۶-۱۵۸	پیچانرودی زیاد توسعه یافته
>۲۹۶	شاخ گوی

با قرار دادن داده‌های اندازه‌گیری شده از دواير مماس بر خم‌های موجود رودخانه زاینده‌رود در بازه مورد مطالعاتی در معادله (۴-۴) نمودار زاویه مرکزی برای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۰۲ به صورت نمودار شکل (۴-۹۱) ترسیم گردید.



شکل (۴-۹۱) نمودار زاویه مرکزی برای بازه مطالعاتی در رودخانه زاینده‌رود

با توجه به نمودار شکل (۴-۹۱) مشاهده می‌گردد مقادیر زاویه مرکزی دواير مماس بر خم‌های رودخانه در سال‌های ۲۰۰۲ الی ۲۰۱۶ در بیشتر خم‌ها افزایش پیدا کرده به طوری که میانگین زاویه مرکزی در سال ۲۰۰۲ برابر ۹۸/۶ بوده که این مقدار در سال ۲۰۱۶ به ۱۱۴/۵ رسیده که بیان‌کننده تغییرات مورفولوژی صورت گرفته در این مدت زمانی است.

بر اساس داده‌ها نمودار شکل (۴-۹۱) و اطلاعات مربوط به توسعه خم‌های رودخانه در جدول (۴-۸) نوع پیچش‌ها و درصد فراوانی آن‌ها در بازه مورد مطالعاتی محاسبه گردیده و در جدول

(۴-۹) ارائه شده است.

جدول (۴-۹) نوع پیچش‌ها و درصد فراوانی آن‌ها بر اساس زاویه مرکزی در محدوده مطالعاتی

نوع پیچش‌ها بر اساس زاویه مرکزی	مسیر در سال ۲۰۰۲		مسیر در سال ۲۰۱۶	
	درصد	تعداد	درصد	تعداد
شبه پیچانرود	۰	۰	۴/۲	۱
پیچانرود توسعه‌نیافته	۳۷/۵	۹	۲۰/۸	۵
پیچانرود توسعه‌یافته	۵۸/۳	۱۴	۵۴/۲	۱۳
پیچانرود زیاد توسعه‌یافته	۴/۲	۱	۲۰/۸	۵
شاخ گاوی	۰	۰	۰	۰

نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۴-۹) نشان می‌دهد در سال ۲۰۰۲ پیچش‌ها بر اساس زاویه مرکزی ۳۷/۵ درصد از نوع پیچانرود توسعه‌نیافته، ۵۸/۳ درصد از نوع پیچانرود توسعه‌یافته و ۴/۲ درصد از نوع پیچانرود زیاد توسعه‌یافته بوده است، و در سال ۲۰۱۶ نوع پیچانرودی به صورتی تغییر کرده که ۴/۲ درصد از نوع شبه پیچانرود، ۲۰/۸ از نوع پیچانرود توسعه‌نیافته، ۵۴/۲ از نوع پیچانرود توسعه‌یافته و ۲۰/۸ از نوع پیچانرود زیاد توسعه‌یافته است.

فصل پنجم

نتیجه گیری

در فصل‌های ابتدایی این پژوهش به معرفی منطقه مطالعاتی و بررسی مدل‌های عددی پرداخته شد، همچنین نرم‌افزار CCHE2D به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و روش کار با این نرم‌افزار شرح داده شد. پس از آن چگونگی شبیه‌سازی منطقه مطالعاتی، محاسبه دوره بازگشت، منحنی دانه‌بندی، کالیبره کردن نرم‌افزار و بررسی تصاویر ماهواره‌ای بیان گردید. در فصل چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، همچنین نتایج حاصل از مطالعات تصاویر ماهواره‌ای تفسیر و ارائه گردید. در این فصل ابتدا نتایج به‌صورت خلاصه بیان شده و در ادامه جمع‌بندی صورت گرفته و پیشنهادهایی برای مطالعات بعدی ارائه گردیده است.

۵-۲-نتایج مربوط به شبیه‌سازی جریان

با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده مشخص گردید دبی رودخانه در دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله برابر ۴۶، ۸۸، ۱۱۱ و ۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه بوده است، همچنین ضریب زبری مانینگ برای منطقه مورد مطالعه برابر ۰/۰۲۵ مشخص گردیده است. با انجام آزمایش دانه‌بندی قطر متوسط ذرات برابر ۲/۲ میلی‌متر محاسبه گردید. با شبیه‌سازی جریان مقادیر عدد فرود و ارتفاع سطح آب در طول بازه مشخص گردید، همچنین مقادیر تنش برشی و سرعت در دو قوس از بازه به دست آمد. با مقایسه تنش برشی و سرعت در خم‌ها با تنش برشی و سرعت بحرانی مشخص گردید تغییرات مورفولوژی در مقاطع ۳ و ۴ شدیدتر بوده است و در این دو مقطع حتی در دوره بازگشت‌های ۵ و ۱۰ ساله نقاطی وجود دارند که تنش برشی از تنش برشی بحرانی بیشتر است و سرعت نیز در این دو مقطع در نقاطی از سرعت بحرانی بیشتر شده و فرسایش شدیدی را به دنبال داشته است، ولی در مقاطع ابتدایی بازه تغییرات تنش برشی کمتر بوده است و تغییرات مورفولوژی در دوره بازگشت ۲۰ ساله ایجاد شده است.

۵-۳- نتایج مربوط به مطالعات تصاویر ماهواره‌ای

طبق مطالعات انجام شده با استفاده از عکس‌های هوایی مشخص گردید در سال ۲۰۰۲ میانگین شعاع انحنای در بازه مطالعاتی از رودخانه زاینده‌رود برابر ۱۹۴/۴۵ بوده که در سال ۲۰۱۶ به ۱۹۰/۵ رسیده است که این تغییر بیانگر تغییرات مورفولوژی در بازه است، همچنین میانگین طول قوس‌ها در سال ۲۰۰۲ برابر ۳۱۵/۴۵ بوده که در سال ۲۰۱۶ به ۳۳۶/۲ تغییر پیدا کرده است. میانگین ضریب خمیدگی در بازه نیز با گذشت زمان تغییر پیدا کرده است و از ۲/۳۵ در سال ۲۰۰۲ به ۲/۳۸ در سال ۲۰۱۶ رسیده است. با محاسبات انجام شده و بررسی زوایای مرکزی در خم‌های بازه مشخص گردید که در سال ۲۰۰۲، ۳۷/۵ درصد از خم‌ها از نوع پیچانرود توسعه‌نیافته، ۵۸/۳ درصد پیچانرود توسعه‌یافته و ۲۰/۸ درصد پیچانرود زیاد توسعه‌یافته است و در سال ۲۰۱۶، ۴/۲ درصد از خم‌ها شبه پیچانرود، ۲۰/۸ درصد خم‌ها پیچانرود توسعه‌نیافته، ۵۴/۲ درصد خم‌ها پیچانرود توسعه‌یافته و ۲۰/۸ درصد خم‌ها پیچانرود زیاد توسعه‌یافته است. که نشان‌دهنده تغییرات خم‌ها با گذشت زمان است.

۵-۴- ارائه پیشنهادها

(۱) با توجه به نزدیک بودن نتایج حاصل از شبیه‌سازی به شرایط واقعی پیشنهاد می‌شود بازه‌های دیگری از رودخانه نیز شبیه‌سازی گردد و برنامه‌ریزی بلندمدت بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته انجام گردد.

(۲) با توجه به اهمیت رودخانه زاینده‌رود در فلات مرکزی ایران و تغییرات مورفولوژی این رودخانه پیشنهاد می‌گردد تأثیرات تغییرات مورفولوژی بر زمین‌های اطراف مورد مطالعه قرار گیرد.

۳) پیشنهاد می‌گردد شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای دیگر انجام گیرد و نتایج آن‌ها مورد مقایسه قرار گیرد.

۴) شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی انجام گیرد.

۵) بررسی تغییرات مورفولوژی در سایر رودخانه‌ها با استفاده از این روش انجام گیرد.

۶) تغییرات مورفولوژی به‌صورت میدانی و نقشه‌برداری محاسبه‌شده و نتایج آن با نتایج ارائه‌شده در این پژوهش مقایسه گردد.

فهرست منابع

۱. اژدری مقدم، م.، شرفی، ی. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه سیستان. دومین کنفرانس سراسری مدیریت جوامع منابع آب کرمان. صفحات ۱ الی ۷.
۲. احمدیان یزدی، م. ۱۳۸۵. بررسی نقش پوشش گیاهی در کنترل فرسایش کناری پیچانرود تجن هریرود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۳. امیری، ع.، حقی‌زاده، ع.، طهماسبی‌پور، ن. ۱۳۹۳. اثرات برداشت شن و ماسه بر مورفولوژی بستر رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS مطالعه موردی رودخانه جراحی خوزستان. دومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند. صفحات ۱ الی ۶.
۴. امامقلی زاده، ص. ۱۳۹۳. هیدرولیک جریان در کانال‌های روباز، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود. فصل ۷ صفحات ۳۸۰ الی ۴۰۰.
۵. انگیز، ف.، کاشفی‌پور، م. ۱۳۹۴، بررسی اثر دبی بر روی ضریب زبری به کمک کالیبراسیون مدل ریاضی یک‌بعدی مطالعه موردی زاینده‌رود بازه سدتنظیمی پل کله، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز. صفحات ۱ الی ۷.
۶. بیاتی خطیبی، م.، ۱۳۸۶. بررسی نحوه تأثیر سد سهند بر مورفولوژی بستر جریان رودخانه قرنقو، بر ویژگی‌های فرسایشی و رسوب‌زایی آن. مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱۱، صفحات ۱۹۹-۲۲۰.
۷. چیت‌ساز، و.، شیرانی ک.، مدرس، ر. ۱۳۸۵. توسعه اطلاعات رودخانه در حوضه زاینده‌رود با استفاده از اطلاعات جغرافیایی. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود، دانشگاه شهرکرد. صفحات ۱ الی ۷.
۸. حقی‌آبی، ا.، امامقلی زاده، ص. ۱۳۹۱. پیش‌بینی فرسایش کناری بخش‌های پیچان‌رودی رودخانه کشکان. فصلنامه جغرافیا و توسعه، سال سیزدهم. شماره چهارم. صفحات ۱ الی ۶.
۹. حمیدی نژاد، ا.، حیدر پور، م. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی الگوی جریان در رودخانه قره‌آغاج توسط

مدل هیدرودینامیک CCHE2D. چهاردهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان. صفحات ۳ الی ۶.

۱۰. خماری پامساری، ح.، کریمی پاشاکی، م. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان غیردائمی در رودخانه با استفاده از مدل CCHE2D (مطالعه موردی رودخانه چم میرکی). دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران رشت، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان. صفحات ۱ الی ۶.

۱۱. خوشحال، ج.، شیرانی، ک. ۱۳۸۸. بررسی شاخص های هیدروژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز زاینده رود- گاوخونی با استفاده از GIS هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحات ۳ الی ۶.

۱۲. درویش زاده، ف. ۱۳۹۵. بررسی مورفولوژی رودخانه زهره با استفاده از نرم‌افزار CCHE2D. پایان‌نامه ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود. فصل چهارم. صفحات ۷۲ الی ۸۲.

۱۳. رستمی، م.، عزیزیان، ا. ۱۳۹۳. کتاب آموزش کاربردی CCHE2D. در مدل‌سازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب مجاری روباز. انتشارات نو پردازان. فصل‌های ۱۱ الی ۳. صفحات ۱۰ الی ۳۸.

۱۴. رستمی، م.، شمس، م.، روحانی، ع. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی دو بعدی اثر تغییرات مورفولوژیکی بستر رودخانه‌ها بر تغییر آگذری سرریز جانبی. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان. صفحات ۱ الی ۷.

۱۵. رستمی، م.، حبیبی، س.، فرهمند، ع. ۱۳۹۱. بررسی عددی جریان آب و رسوب در محل تلاقی رودخانه‌ها با استفاده از مدل CCHE2D. نهمین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

۱۶. رضایی، ا.، مرتضوی، ا. ۱۳۹۵. پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیکی رودخانه زاینده‌رود با استفاده از الگوریتم k - نزدیک‌ترین همسایه. دومین کنگره سراسری در مسیر توسعه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان دانشگاه فرهنگیان استان گلستان. صفحات ۳ الی ۶.

۱۷. رضاپوریان، س.، احمدی، م. ۱۳۹۴، محاسبه تحلیلی میزان فرسایش کناره رودخانه زاینده‌رود، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران. صفحات ۲ الی ۶.

۱۸. روغنیان، س. ۱۳۸۹. بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون با استفاده از مدل CCHE2D. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان. فصل‌های ۴ و ۳. صفحات ۲۰ الی ۵۵.

۱۹. ساغروانی، ف.، صادقیان، م.، نعمت‌الهی، ش. ۱۳۹۵. مدل‌سازی روند تغییرات در بستر رودخانه در اثر فرسایش و رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS مطالعه مردی قلعه شارخ از رودخانه زاینده‌رود. دومین کنفرانس بین‌المللی اکولوژی سیمای سرزمین، دانشگاه صنعتی اصفهان. صفحات ۲ الی ۵.

۲۰. سلطان زاده، ن.، رحیم پور، م.، قادری، ک.، رحیمی، ا. ۱۳۸۸. بررسی اثر تغییر ناگهانی زبری بستر بر پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در کانال‌های روباز، دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، دانشگاه شهید باهنر. صفحات ۱ الی ۶.

۲۱. شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۲. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحات ۸۰-۸۷، ۱۶۲-۱۶۵.

۲۲. شیرانی، ک.، خوشحال، ج. ۱۳۸۸، بررسی شاخص‌های هیدروژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز زاینده‌رود- گاوخونی با استفاده از GIS، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحات ۱ الی ۷.

۲۳. شیرانی، ک.، چیت‌ساز، و.، مدرس، ر. ۱۳۸۴، بررسی عوامل مؤثر بر مورفولوژی رودخانه در حوضه زاینده‌رود، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان، دانشگاه باهنر کرمان. صفحات ۳ الی ۶.

۲۴. صاحب‌دل، ش.، یعقوب‌زاده، م.، جعفری، م. ۱۳۸۹. تعیین حریم بستر رودخانه به کمک مدل HEC-RAS مطالعه موردی رودخانه رامیارو همایش ژئوماتیک ۸۹. تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور.

۲۵. صاحب‌دل، ج.، بقعی، س. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در محل اتصال کانال‌ها. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران. صفحات ۱ الی ۶.

۲۶. عزیزیان، ا. ۱۳۹۳. آموزش کاربردی CCHE2D در مدل‌سازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب مجاری روباز انتشارات نو پردازان. فصل ۳. صفحات ۵۰ الی ۶۰.

۲۷. عسگری، ش.، احمدی، م.، همتی، م. ۱۳۹۴. فرسایش کناری رودخانه چرداول با استفاده از مدل GIS و HEC-RAS. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۳۰، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۱.

۲۸. غفاری، گ. ۱۳۸۵. بررسی تغییرات مرفولوژی کناری آبراهه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی بابلرود و مازندران. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. صفحات ۱ الی ۷.

۲۹. غلامی، و.، یوسفی، ز. ۱۳۸۶. رودخانه هراز و تعیین وضعیت محیطی رودخانه هراز از طریق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دهمین همایش ملی بهداشت محیط، همدان، دانشگاه علوم پزشکی همدان، صفحات ۲ الی ۵.

۳۰. فتحی، م.، هنربخش، ا.، رستمی، م. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی الگوی جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی با استفاده از مدل CCHE2D. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران سال ششم، شماره ۱۹.

۳۱. فتحی، م.، هنربخش، ا. ۱۳۹۲. ارزیابی قابلیت یک مدل عددی در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و رسوب، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی، صفحات ۲ الی ۵.

۳۲. فروزان، ف.، کریمی پاشاکی، م. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی هیدرودینامیکی الگوی جریان غیر ماندگار در رودخانه با استفاده از مدل عددی CCHE2D دومین کنفرانس سراسری آب. بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان. صفحات ۲ الی ۶.

۳۳. قبادیان، ر.، شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی جداسازی رسوبات در محل

تلاقی رودخانه‌ها برای شرایط جریان زیربحرانی. تحقیقات منابع آب ایران.

۳۴. کاشیان، م.، شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۴. مدل‌سازی روند تغییرات در بستر رودخانه در اثر فرسایش و رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS مطالعه موردی شاخه قلعه شاهرخ از رودخانه زاینده‌رود در بالادست سد. سیزدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳۵. کمان به دست، ا. ۱۳۸۹. کتاب راهنمای نرم‌افزار CCHE2D. انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز. فصل‌های ۲ و ۳.

۳۶. کمان به دست، ا.، بهشتی، ع. ۱۳۹۰. تحلیل عددی پارامترهای هیدرولیکی در رودخانه‌ها، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران، صفحات ۲ الی ۵.

۳۷. معتضدی، ا.، رئیسی، ا.، مهرفر، ح. ۱۳۹۲. مدل‌سازی جریان غیر ماندگار در رودخانه‌ها با استفاده از مدل CCHE2D. اولین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران. صفحات ۱۱ الی ۷.

۳۸. مغربی، م. ۱۳۹۰. مقایسه مدل‌های CCHE2D و MIKE21 FM در شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس رودخانه. اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران. صفحات ۱ الی ۶.

۳۹. مغربی، م.، مقدم، ع.، مشکی، م. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان آشفته حول جزیره رسوبی در رودخانه شیرانی با استفاده از مدل CCHE2D مطالعه موردی رودخانه سرباز. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس. صفحات ۱۳ الی ۷.

۴۰. میرپنجی، س.، موسوی جهرمی، ح.، موسوی، ب. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر مشخصات هندسی و هیدرولیکی آب‌شکن قائم بر آبشستگی کناره رودخانه با استفاده از مدل CCHE2D. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ارومیه. انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه. صفحات ۱ الی ۷.

41. Andam, K.S. (2003). "Comparing physical habitat condition in forest and non-forested streams." Msc Thesis, University of Vermont, USA, 136 pp.

42. Best, J. L. (1987). "Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology, Recent Developments in Fluvial Sedimentology." *Spec. Publ. SEPM Soc. Sediment. Geol.*, 39, 27-35.
43. Best, J. L. (1988). "Sediment transport and bed morphology at river channel confluences." *Sedimentology*, 35, 481-498.
44. Best, J. L. (1987). "Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology, Recent Developments in Fluvial
45. Biedenharn et. A. (1997). *The Wes strem investigation and streambank stabilization, hand book.* U.S.Army Engineering.
46. Chow, V. T. (1959), *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
47. Jia, Yafei and Wang, Sam S.Y. (2001). "CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed." *NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2001-01.*
48. Kalinske, A. A., (1947). *Movement of Sediment as Bed Load in Rivers*, *Transaction, American Geophysical Union*, 28 (4):615-625.
49. Khan, A.A. (2002). "CCHE2D-GUI: Graphical Selectr Interface for CCHE2D Model. Selectrs Manual—Version 2.0." *NCCHE Technical Report.*
50. Kim, J., Julien, P. Y., Ji, U., and Kang, J. (2001). *Journal of the Environmental Sciences*, DOI: 10.5322/JES.2011.20.5.555, 2011.
51. M.A .Nassar. (2001) "Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channelo flow simulations in Nile River" *ournal of Hydro-environment Research*. Volume 5, Issue 3, September 2011, Pages 187–195.
52. Mosley, M. (1976)." An experimental study of channel confluences." *The journal of geology*, 84, 535.
53. Zorkeflee A. Hasan, Kah H. Lee, Hazi Md. Azamathulla, and Aminuddin Ab. Ghani. *FLOW SIMULATION FOR LAKE HARAPAN USING CCHE2D.* *International Journal of Modelling and Simulation – 2011 .DOI: 10.2316/Journal.205.2011.1.205-5460*
54. Nordfjord S., Goff J A. Austin J A., Summerfield C K., (2005). *Seismic geomorphology of Buried channel systems on the New Jersey outer shelf: assessing past environmental conditions.* *Marine Geology* 214,339– 364.
55. Pereira, J. F., Mc Corquodale, J. A., Meselhe, E. A. and Georgiou, I. Y. (2009) *Numerical Simulation of Bed Matrial Transport in the Lower Mississippi River.* *Journal of Coastal Research*, SI. 56, ISSN 0749-02558, Portugal.

56. Ribeiro, M. (2011). "Influence of tributary widening on confluence morphodynamics." Chow, V.T. 1959. "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill Book, Singapore.
57. Ribeiro, M (2011). "Influence of tributary widening on confluence morphodynamics ", Laboratory of Hydraulic Constructions, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.
58. Rinaldi, M., B. Wyzga and N. Surian. (2005). Sediment mining in alluvial channels: Physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21(7): 805-828.
59. Shields, I. A. (1936). Application of similarity principles and Turbulence Research to Bed-load Movement, A Translation From the German by W.P. Ott and J.C. Van Vchelin, U.S. Soil Conserv. Service Coop. Lab., California Inst. Of Teach. Pasadena, Publication 167.
60. Uyumaz, A. (2005). "Discharge control by a side weir in a triangular main channel", 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark.
61. Weber, L. J., E. D. Schumate, and N. Mawer (2001b). "Experiments on Flow at a 90° Open-Channel Junction" *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 340-350.
62. Wu, Weiming (2001). "CCHE2D Sediment Transport Model." NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2001-03, Aug 2001.
63. Wu, W. 2009. CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1). Tech Report No. NCCHE-TR-2001-3, NCCHE, University of Mississippi, USA, P: 12.
64. Zorkeflee A. Hasan, Kah H. Lee, Hazi Md. Azamathulla, and Aminuddin Ab. Ghani. FLOW SIMULATION FOR LAKE HARAPAN USING CCHE2D. *International Journal of Modelling and Simulation – 2011* .DOI: 10.2316/Journal.205.2011.1.205-5460 *Sedimentology*. "Spec. Publ. SEPM Soc. Sediment. Geol., 39, 27-35.
65. Shettar A. S., K. K. Murthy (6771). "A numerical study of division of flow in open channels." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 34, No. 5, 651±675.
66. Zhang, Yaixin (2005). "CCHE2D Mesh Generator Users' Manual—Version 2.50." NCCHE Technical Report. NCCHE-TR-2005-01.
67. Zhang, Yaixin (2006). "CCHE-MESH 2D Structured Mesh Generator Users' Manual—Version 3.0." NCCHE Technical Report. NCCHE-TR-2007-01, March 2007.
68. Zhang, Yaixin (2005). "CCHE2D-GUI Quick Start Guide." NCCHE Technical Report.
69. Zhang, Yaixin (2005). "CCHE2D-GUI: Graphical User Interface for CCHE2D Model. Users Manual—Version 2.2." NCCHE Technical Report.
70. Zhang, Yaixin (2006). "CCHE-GUI: Graphical User Interface for CCHE2D Model. Users Manual—Version 3.0." NCCHE Technical Report.

Abstract

River morphology changes can make several problems in river management such as increasing river bed level, changing water surface profile river flow direction, erosion of the riverbed, widening the river bed and affecting on agricultural land around the river, negative effects on structures built around the river, destruction of vegetation around the river and reduced resistance against flood. Therefore, one of the important and required ways to manage river and reduce costs and possible damage is to consider morphology changes and long-term planning based on these investigations. According to the importance of the issue in this research, morphology changes range of the Zayandehroud River that is located in the center of Iran was investigated. In this research, range erosion and morphology changes in Zayandehroud River with 11 kilometer length in east of Isfahan in Choum Bridge with Longitude 13-46-51 and latitude 06-35-32 and 1576 height to Golestaneh village investigated using numerical model CCHE2D. Therefore, maximum and registered annual discharge in hydrometer station in Choum Bridge and Pierson distribution with 5 parameters in the river discharge are calculated with different return period. Then, flow simulation using mapped cross sections with scale 1 to 25000, information related to particles aggregation test in riverbed and determination of Manning roughness coefficient in return periods 5,10,20 and 50 years has been performed. Finally, flow simulation was performed using CCHE2D model. The results obtained from simulation represents that the flow in return periods 5, 10 and 20 years are subcritical and it is supercritical only in discharge upper $140 \text{ m}^3/\text{s}$ in 50 year return period. Also, speed and shear stress are investigated in four cross sections in interval length which represents speed and shear stress is acceptable in the beginning of interval and basic bends. But in 180 degree bend at the end of interval, speed changes and shear stress and its numerical value have been very high. By comparing the shear stress with critical shear stress, this result is obtained in which in first interval bend to 20 year return period, no erosion is obtained, but at the end of interval, the discharge in 5 year return period the erosion took place in outlet bend. In the following, erosion comparison in different sections and return periods has been performed which represents that the most erosion is made in external bend in section 4. Also, morphology changes in related interval has been performed by studying satellite images in 2002 and 2016.

The results of this research represent that in 2002, average curve radius and arc length were 194.45 and 315.4 meter respectively which was changed in 2016 as respectively 190.5 and 336.2 meter. Also, it was determined by studying center angles that in 2002, 37.5, 58.3 and 20.8 percents of bends are undeveloped twist (Pichanrood), developed twist respectively and very developed twist and in 2016, 4.2, 20.8, 54.28 percent of bends are as undeveloped twist, developed twist and very developed twist respectively which represents the changes in riverbed over the time.

Keywords: Aerial photos, Arc GIS, CCHE2D model, Flow rate, Flow simulation, morphology changes, Shear stress, Zayanehroud River,



Shahrood University of Technology

Faculty of Agriculture

M.Sc.Thesis in Waters Structures Engineering

**Investigation of morphology changes of Zayandehrood
River using CCHE2D model**

By: Hamed Kabiry

Supervisor

Dr. Samad Ememgholizadeh

Advisor

Dr. Zahra Ganji

June 2017