

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی  
رشته مهندسی کشاورزی گرایش سازه‌های آبی  
پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی مورفولوژی رودخانه زهره با استفاده از نرم افزار CCHE2D

نگارنده : فاطمه درویش‌زاده

اساتید راهنما:

دکتر خلیل اژدری

دکتر صمد امامقلی‌زاده

استاد مشاور:

دکتر محمد سیاری

شهریور ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی کشاورزی

گروه: آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم فاطمه درویش زاده به شماره دانشجویی: ۹۲۳۶۰۲۴

تحت عنوان: بررسی مورفولوژی رودخانه زهره با استفاده از نرم افزار CCHE2D

در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور    | امضاء | اساتید راهنما         |
|-------|-----------------|-------|-----------------------|
|       | دکتر محمد سیاری |       | دکتر خلیل اژدری       |
|       |                 |       | دکتر صمد امامقلی زاده |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی                         | امضاء | اساتید داور                                    |
|-------|--|-------|--|
|       | نام و نام خانوادگی :<br>دکتر حسین میرزایی مقدم |       | نام و نام خانوادگی :<br>دکتر روزبه مؤذن زاده   |
|       |  |       | نام و نام خانوادگی :<br>دکتر سید حسین<br>حسینی |

## تقدیم اثر

تقدیم به مادر فداکارم که از اول آفرینش بیچ واژه ای توانسته مهر او را معنا کند

تقدیم به پدر بزرگوارم که با غیرت خود الفبای زندگی را به من آموخت

و تقدیم به همسر عزیزم به پاس قدردانی از قلب آکنده از عشق و معرفش که محیطی سرشار از سلامت، امنیت،

آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است

مهربانی که با واژه نجیب و مغرور تلاش آشنایی دارد، تلاش راستین را می شناسد، عطر رویایی آن را استشمام می-

کند و مراد رسیدن به اهداف عالی یاری می رساند

او که حس تعهد و مسؤلیت را در زندگیمان تلالوینی خدایی داده است.

## مشکرو قدردانی

حمد و سپاس و درود پروردگار یکتا را، خدایی را که لطف بی‌کرانش همواره شامل حال بندگانش و از جمله بنده تحسیر بوده است. بی‌شک انجام این تحقیق بدون همراهی بزرگوارانی که همواره در طی مسیر مریاری نمودند، میسر نبود. در این راه خود را مدیون اساتید بزرگوار می‌دانم که علم و اخلاق را به من آموختند. از زحمات بی‌دریغ استادان عزیز و کرامت‌دارم جناب آقایان دکتر حلیل اژدری و دکتر صد اما مطلق زاده که راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و بارها راهنمایی و مساعدت‌های ارزنده خود در تمامی مراحل این پژوهش دلسوزانه مریاری نمودند مشکرو قدردانی می‌نمایم. مراتب قدردانی خود را از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد سیاری که افتخار استفاده از مشاوره ایشان را در این پایان‌نامه داشته‌ام، ابراز می‌دارم. بر خود لازم می‌دانم از جناب آقایان دکتر مؤذن زاده و دکتر حسینی که داوران این پایان‌نامه را پذیرفتند سپاسگزار باشم.

قدردانی می‌کنم از والدین کرامت‌دارم که سایه پر مهر و دعای خیرشان همواره آرامش بخش لحظات نگرانی و سخت‌زنگی من بوده است. از خانواده بزرگوارم به ویژه خواهران مهربان و برادر عزیزم برای تمام خوبی‌هایشان سپاس گزارم و نیز نهایت سپاس و قدردانی را برای یگانه همسرم که با حمایت و مهربانی‌اش همیشه همراه و مشوق من بوده است، بجای می‌آورم.

فاطمه درویش زاده

## تعهد نامه

اینجانب **فاطمه درویش زاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **سازه های آبی** دانشکده **مهندسی کشاورزی** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره با استفاده از نرم افزار **CCHE2D** تحت راهنمایی **دکتر خلیل اژدری و دکتر صمد امامقلی زاده** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
  - در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
  - مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahroud University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
  - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
  - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است 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 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

بطور کلی عوامل فرسایش و رسوب‌گذاری که به تغییرات مورفولوژیکی منجر خواهند شد، در رودخانه‌های آبرفتی نمود پیدا می‌کنند. عبارتی علم مورفولوژی رودخانه‌های آبرفتی را می‌توان بصورت مطالعه، بررسی شکل و ساختار سطح زمین تحت تأثیر جریان آب تعریف نمود. یکی از موارد بسیار مهم در ارتباط با مورفولوژی، فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه خصوصاً فرسایش ساحل رودخانه در قوس بیرونی می‌باشد، که دلیل عمده‌ی آن، وجود جریان‌های ثانویه است. در این تحقیق تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره واقع در جلگه هندیجان، برای طول حدود ۲۳ کیلومتر در بین طول‌های جغرافیایی  $30^{\circ} 30'$  و  $49^{\circ} 38'$  خاوری و عرض‌های جغرافیایی  $30^{\circ} 2'$  و  $30^{\circ} 6'$  شمالی، برای آمار حدود ۳۰ سال ایستگاه دهملا، به ترتیب با بیشینه، متوسط و کمینه دبی ۱۴۵، ۹۰، ۵/۶ متر مکعب بر ثانیه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. بدین منظور بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره به دو روش انجام گرفت. روش اول، ابتدا با استفاده از نرم افزار CCHE2D به شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه زهره برای دبی‌های کمتر از ۱۵۰ متر مکعب بر ثانیه و دبی‌های سیلابی پرداخته شد و نتایج حاصل از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به اینکه رودخانه زهره در حدود ۸۰٪ مواقع سال شاهد دبی‌های کمتر از ۱۵۰ متر مکعب بر ثانیه است نتایج به دست آمده بیان کننده این بود که رودخانه زهره بیشتر مواقع سال پدیده رسوب‌گذاری را خواهد داشت و فقط در دبی‌های سیلابی بالاتر از ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه دارای فرسایش می‌باشد که خود عامل تغییراتی در مورفولوژی رودخانه زهره در دراز مدت است. در روش دوم، با مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای برای سه دوره زمانی مسیر قدیمی، سال ۲۰۰۰ میلادی و سال ۲۰۱۴ میلادی، به بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره پرداخته شد. بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای در محیط GIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و پارامترهای مهم در تغییرات مورفولوژی رودخانه از قبیل: ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، طول قوس، شعاع انحنا و غیره محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد. که در گذشته‌ی این رودخانه چهار قطع شدگی یا میانبر اتفاق افتاده است و نیز در آینده ایجاد یک میانبر قابل پیش‌بینی است. تعداد پیچش‌ها در طول این سه بازه زمانی از ۳۵ به ۲۱ کاهش پیدا کرده است و تغییراتی نیز در سایر خصوصیات پیچش‌ها اتفاق افتاده است. میانگین ضریب خمیدگی از ۱/۶۴ به ۱/۵۸، شعاع انحنا از ۴۵۰/۱ به ۶۳۲/۳ متر، زاویه مرکزی از ۱۹۶/۶ به ۱۹۳/۳ درجه و طول قوس از ۱۱۹۷ به ۱۱۵۴/۶ متر تغییر داشته‌اند. با توجه به طبقه‌بندی ولفرت براساس ضریب خمیدگی و طبقه‌بندی کورنایس براساس زاویه مرکزی، رودخانه زهره واقع در جلگه هندیجان در رده رودخانه‌های پیچانرودی و پیچانرود بیش از حد توسعه یافته قرار می‌گیرد. در آخر جهت جلوگیری از فرسایش،

طرح پیشنهادی آبشکن به عنوان سازه رودخانه‌ای ارائه گردید که نتایج آن نشان دهنده تاثیر بسزای آبشکن در کنترل فرسایش می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آبشکن، تصاویر ماهواره‌ای، رسوب‌گذاری، رودخانه زهره، شبیه‌سازی، فرسایش، مدل ریاضی CCHE2D، مورفولوژی



## فهرست مطالب

| <u>صفحه</u> | موضوع   |
|-------------|---|
| ۱.....      | فصل اول (مقدمه و مبانی تحقیق).....                                    |
| ۲.....      | ۱-۱- مقدمه .....  |
| ۲.....      | ۲-۱- ضرورت تحقیق .....  |
| ۴.....      | ۳-۱- اهداف پایان نامه .....   |
| ۴.....      | ۴-۱- ساختار پایان نامه .....  |
| ۷.....      | فصل دوم (کلیات و پیشینه تحقیق).....                                   |
| ۸.....      | ۱-۲- مقدمه .....  |
| ۸.....      | ۲-۲- مورفولوژی .....  |
| ۸.....      | ۱-۲-۲- مفهوم مورفولوژی .....  |
| ۹.....      | ۲-۲-۲- تعاریف و مفاهیم ریخت‌شناسی .....                               |
| ۱۰.....     | ۳-۲-۲- اهمیت، نقش و کاربرد مطالعات ریخت‌شناسی در مهندسی رودخانه ..... |
| ۱۱.....     | ۳-۲-۳- طبقه‌بندی به لحاظ شکل مسطحه رودخانه .....                      |
| ۱۲.....     | ۴-۲- مروری بر مطالعات گذشته .....                                     |
| ۲۷.....     | فصل سوم (مواد و روش‌ها).....  |
| ۲۸.....     | ۱-۳- مقدمه .....  |
| ۲۸.....     | ۲-۳- رودخانه زهره .....   |
| ۲۹.....     | ۱-۳-۲- محدوده مورد مطالعه .....                                       |
| ۳۰.....     | ۳-۳- مدل عددی .....   |
| ۳۲.....     | ۱-۳-۳- معرفی نرم‌افزار .....  |
| ۳۴.....     | ۲-۳-۳- مراحل استفاده از مدل CCHE2D .....                              |
| ۳۶.....     | ۳-۳-۳- معادلات حاکم در مدل CCHE2D .....                               |
| ۳۶.....     | ۱-۳-۳-۳- معادلات اصلی مدل‌سازی .....                                  |
| ۳۷.....     | ۲-۳-۳-۳- مدل‌های آشفتگی .....   |
| ۳۸.....     | ۳-۳-۳-۳- مدل مبتنی بر لزجت گردابه‌ای .....                            |
| ۳۹.....     | ۴-۳-۳-۳- مدل دو بعدی $k - \epsilon$ .....                             |
| ۳۹.....     | ۵-۳-۳-۳- انتقال رسوب .....  |

|    |  |
|----|--|
| ۳۹ | ..... بار کل ۱-۵-۳-۳-۳   |
| ۴۰ | ..... انتقال نامتعادل ۲-۵-۳-۳-۳  |
| ۴۰ | ..... طبقه‌بندی رسوب بستر ۳-۵-۳-۳-۳  |
| ۴۱ | ..... شرایط اولیه ۴-۵-۳-۳-۳  |
| ۴۱ | ..... فرمول‌های تجربی ۵-۵-۳-۳-۳  |
| ۴۲ | ..... تشکیل شبکه ۴-۳-۳-۳   |
| ۴۳ | ..... تشکیل شبکه با استفاده از روش‌های جبری ۱-۴-۳-۳-۳                            |
| ۴۳ | ..... روش دولایه مرزی ۱-۱-۴-۳-۳  |
| ۴۴ | ..... تابع بسط ۲-۱-۴-۳-۳   |
| ۴۵ | ..... تشکیل شبکه انطباق پذیر ۳-۱-۴-۳-۳   |
| ۴۶ | ..... تشکیل شبکه با استفاده از روش‌های عددی ۲-۴-۳-۳-۳                            |
| ۴۶ | ..... سیستم تشکیل شبکه TTM ۱-۲-۴-۳-۳   |
| ۴۸ | ..... سیستم تشکیل شبکه RL ۲-۲-۴-۳-۳  |
| ۴۹ | ..... ارزیابی شبکه ۳-۴-۳-۳   |
| ۵۰ | ..... درون‌یابی بستر (کف) ۴-۴-۳-۳  |
| ۵۴ | ..... روش انجام کار (اجرای مدل) ۵-۳-۳-۳  |
| ۵۴ | ..... برداشت مختصات هندسی رودخانه و تولید شبکه مدل ۱-۵-۳-۳                       |
| ۵۷ | ..... کالیبره کردن ۲-۵-۳-۳   |
| ۵۹ | ..... شبیه‌سازی جریان ۳-۵-۳-۳  |
| ۵۹ | ..... تنظیم پارامترهای جریان ۱-۳-۵-۳-۳   |
| ۶۰ | ..... داده‌های جریان ۲-۳-۵-۳-۳   |
| ۶۲ | ..... شبیه‌سازی رسوب ۴-۵-۳-۳   |
| ۶۲ | ..... داده‌های رسوب ۱-۴-۵-۳-۳  |
| ۶۳ | ..... انتخاب محل نمونه برداری رسوب ۲-۴-۵-۳-۳                                     |
| ۶۳ | ..... نحوه نمونه برداری رسوب ۳-۴-۵-۳-۳   |
| ۶۳ | ..... تعیین کلاس بندی اندازه‌ی ذرات رسوبی ۴-۴-۵-۳-۳                              |
| ۶۴ | ..... تعیین درصد کلاس‌ها برای نمونه‌های مواد بستر، بار معلق و بار بستر ۵-۴-۵-۳-۳ |
| ۶۶ | ..... اجرای اصلی مدل ۶-۳-۳-۳   |
| ۶۷ | ..... روش کار در بررسی تغییرات مورفولوژی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ۴-۳-۳-۳ |

|     |   |
|-----|---|
| ۶۹  | فصل چهارم (نتایج).....  |
| ۷۰  | ۱-۴- مقدمه .....  |
| ۷۰  | ۲-۴- نتایج حاصل از مدل CCHE2D.....  |
| ۷۰  | ۱-۲-۴- واسنجی بخش هیدرولیک مدل .....  |
| ۷۰  | ۱-۱-۲-۴- نتایج کالیبراسیون .....  |
| ۷۲  | ۲-۲-۴- بررسی الگوی جریان و رسوب محدوده مورد مطالعه با نرم افزار CCHE2D..... |
| ۷۲  | ۱-۲-۲-۴- نتایج اجرای اصلی مدل .....   |
| ۷۲  | ۱-۱-۲-۲-۴- نتایج گرافیکی .....  |
| ۷۹  | ۲-۱-۲-۲-۴- بررسی نتایج به صورت نمودار .....                                 |
| ۸۵  | ۲-۲-۲-۴- بررسی درصد رسوب‌گذاری شده برای هر کلاس .....                       |
| ۸۶  | ۳-۲-۲-۴- بررسی الگوی جریان و رسوب در دبی‌های سیلابی .....                   |
| ۸۷  | ۴-۲-۲-۴- بررسی طرح پیشنهادی استفاده از آبشکن .....                          |
| ۹۱  | ۳-۴- نتایج حاصل از مطالعه تصاویر ماهواره‌ای .....                           |
| ۹۱  | ۱-۳-۴- بررسی تغییرات مورفولوژی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای .....              |
| ۹۵  | ۲-۳-۴- ضریب خمیدگی .....  |
| ۹۸  | ۳-۳-۴- زاویه مرکزی .....  |
| ۱۰۱ | ۴-۳-۴- دیگر خصوصیات هندسی لازم برای مطالعه متاندرها .....                   |
| ۱۰۱ | ۱-۴-۳-۴- شعاع انحنا .....   |
| ۱۰۲ | ۲-۴-۳-۴- طول قوس‌ها و تعداد آن .....  |
| ۱۰۴ | ۳-۴-۳-۴- نیم طول موج .....  |
| ۱۰۵ | ۴-۴-۳-۴- جابجایی مرکز و تغییر شعاع دایره‌های مماسی .....                    |
| ۱۰۹ | ۵-۳-۴- پیش بینی .....   |
| ۱۱۱ | فصل پنجم (نتیجه‌گیری).....  |
| ۱۱۲ | ۱-۵- مقدمه .....  |
| ۱۱۲ | ۲-۵- خلاصه نتایج .....  |
| ۱۱۲ | ۱-۲-۵- نتایج مربوط به مدل CCHE2D.....                                       |
| ۱۱۴ | ۳-۵- نتایج مربوط به مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای .....                  |
| ۱۱۶ | ۴-۵- نتایج نهایی بررسی مورفولوژیکی رودخانه زهره .....                       |

|     |  |
|-----|--|
| ۱۱۷ | ۵-۵- پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی ایجاد شده در آینده ..... |
| ۱۱۷ | ۵-۶- جمع بندی مطالب .....                                |
| ۱۱۸ | ۵-۷- ارائه پیشنهادات .....                               |
| ۱۱۹ | فهرست منابع .....  |

## فهرست شکل‌ها

| <u>صفحه</u> | <u>موضوع</u>  |
|-------------|---|
| ۱۲          | شکل (۱-۲) : نمایی طبقه‌بندی رودخانه‌ها بر اساس الگوهای مختلف .....  |
| ۳۱          | شکل (۱-۳) : موقعیت رودخانه زهره در کشور ایران و استان خوزستان ..... |
| ۳۳          | شکل (۲-۳) : روند شبیه‌سازی مدل CCHE2D .....                         |
| ۴۱          | شکل (۳-۳) : طبقه‌بندی رسوب .....                                    |
| ۴۳          | شکل (۴-۳) : قلمرو یک بلوک واحد .....                                |
| ۴۴          | شکل (۵-۳) : نحوه توزیع گره‌ها بر روی یک خط .....                    |
| ۵۱          | شکل (۶-۳) : درون‌یابی بر اساس یک سطح مثلثی .....                    |
| ۵۲          | شکل (۷-۳) : درون‌یابی پایگاه داده‌های تصادفی .....                  |
| ۵۳          | شکل (۸-۳) : مثلث بندی داده‌ها .....                                 |
| ۵۵          | شکل (۹-۳) : دیتابیس رودخانه .....                                   |
| ۵۶          | شکل (۱۰-۳) : مش بندی رودخانه .....                                  |
| ۵۷          | شکل (۱۱-۳) : شبکه رودخانه با قالب بندی mesh *.geo .....             |
| ۵۷          | شکل (۱۲-۳) : نمای سه بعدی رودخانه زهره .....                        |
| ۶۰          | شکل (۱۳-۳) : تعیین پارامترهای شبیه‌سازی جریان .....                 |
| ۶۰          | شکل (۱۴-۳) : ثابت‌های صفحه Advanced .....                           |
| ۶۱          | شکل (۱۵-۳) : هیدروگراف متوسط ۳۰ ساله .....                          |
| ۶۱          | شکل (۱۶-۳) : شرایط مرزی ورودی .....                                 |
| ۶۲          | شکل (۱۷-۳) : شرایط مرزی خروجی .....                                 |
| ۶۴          | شکل (۱۸-۳) : پنجره ورود کلاس بندی ذرات .....                        |
| ۶۵          | شکل (۱۹-۳) : پنجره ورود اطلاعات رسوب .....                          |
| ۶۶          | شکل (۲۰-۳) : پنجره ورود درصد هر کلاس .....                          |

- شکل (۴-۱): نمودار نتایج مراحل کالیبراسیون ..... ۷۱
- شکل (۴-۲): نمایی کلی مدل (شاهد) ..... ۷۳
- شکل (۴-۳): ارتفاع سطح آب ..... ۷۳
- شکل (۴-۴): عمق آب ..... ۷۴
- شکل (۴-۵): سرعت جریان ..... ۷۴
- شکل (۴-۶): دبی در واحد عرض ..... ۷۵
- شکل (۴-۷): تنش برشی کف ..... ۷۵
- شکل (۴-۸): شاخص فرود (Fr) ..... ۷۶
- شکل (۴-۹): رقوم اولیه بستر ..... ۷۷
- شکل (۴-۱۰): رقوم بستر ۲/۵ ساله ..... ۷۷
- شکل (۴-۱۱): رقوم نهایی بستر ۵ ساله ..... ۷۸
- شکل (۴-۱۲): تغییرات بستر ..... ۷۸
- شکل (۴-۱۳): غلظت بار معلق در پایان دوره ..... ۷۹
- شکل (۴-۱۴): دبی بار بستر در پایان دوره ..... ۷۹
- شکل (۴-۱۵): جانمایی مقاطع در حوزه محاسباتی ..... ۸۰
- شکل (۴-۱۶): سرعت جریان (مقطع ۱) ..... ۸۱
- شکل (۴-۱۷): نمودار عدد فرود (مقطع ۱) ..... ۸۱
- شکل (۴-۱۸): تنش برشی (مقطع ۱) ..... ۸۱
- شکل (۴-۱۹): تغییرات بستر (مقطع ۱) ..... ۸۲
- شکل (۴-۲۰): سرعت جریان (مقطع ۲) ..... ۸۲
- شکل (۴-۲۱): نمودار عدد فرود (مقطع ۲) ..... ۸۳
- شکل (۴-۲۳): تغییرات بستر (مقطع ۲) ..... ۸۳
- شکل (۴-۲۴): سرعت جریان (مقطع ۳) ..... ۸۴
- شکل (۴-۲۵): عدد فرود (مقطع ۳) ..... ۸۴
- شکل (۴-۲۶): تنش برشی (مقطع ۳) ..... ۸۴
- شکل (۴-۲۷): تغییرات بستر (مقطع ۳) ..... ۸۵
- شکل (۴-۲۸): سرعت جریان در دبی ۱۰۰۰ ( $m^3/s$ ) بدون آبشکن ..... ۸۸
- شکل (۴-۲۹): سرعت جریان در دبی ۱۰۰۰ ( $m^3/s$ ) با نصب آبشکن ..... ۸۸
- شکل (۴-۳۰): نمودار نتایج سرعت جریان (در قوس، در محدوده آبشکن) ..... ۹۰

- شکل (۴-۳۱): نمودار نتایج تنش برشی (در قوس ، در محدوده آبشکن) ..... ۹۰
- شکل (۴-۳۲): نمودار نتایج عدد فرود (در قوس ، در محدوده آبشکن) ..... ۹۱
- شکل (۴-۳۳): تصویر ماهواره‌ای Google Earth ..... ۹۲
- شکل (۴-۳۴): مسیرهای رسم شده رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه ..... ۹۳
- شکل (۴-۳۵): پیچش‌های رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه و دواير مماس ..... ۹۴
- شکل (۴-۳۶): نمودار ضریب خمیدگی قوس‌های رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه ..... ۹۶
- شکل (۴-۳۷): نمودار تغییرات میانگین ضریب خمیدگی رودخانه زهره ..... ۹۷
- شکل (۴-۳۸): نمودار زاویه مرکزی انحنا برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه ..... ۹۹
- شکل (۴-۳۹): نمودار میانگین زاویه مرکزی برای رودخانه زهره ..... ۹۹
- شکل (۴-۴۰): شعاع انحنا برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه ..... ۱۰۱
- شکل (۴-۴۱): نمودار تغییرات میانگین شعاع در مسیر رودخانه زهره در محدوده ..... ۱۰۲
- شکل (۴-۴۲): طول قوس برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه در سه دوره ..... ۱۰۲
- شکل (۴-۴۳): نمودار تغییرات میانگین طول قوس در مسیر رودخانه زهره در محدوده ..... ۱۰۳
- شکل (۴-۴۴): نمودار تغییرات تعداد قوس در مسیر رودخانه زهره در محدوده ..... ۱۰۴
- شکل (۴-۴۵): نیم طول موج برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه در سه دوره ..... ۱۰۵
- شکل (۴-۴۶): نمودار تغییرات میانگین نیم طول موج در مسیر رودخانه زهره ..... ۱۰۵
- شکل (۴-۴۷): نمودار جابجایی دواير رسم شده در مسیر رودخانه زهره ..... ۱۰۶
- شکل (۴-۴۸): نمودار تغییر شعاع دواير مماسی در مسیر رودخانه زهره ..... ۱۰۶
- شکل (۴-۴۹): نحوه جابجایی دایره‌های مماسی رسم شده برای سه دوره زمانی ..... ۱۰۸
- شکل (۴-۵۰): تغییرات مسیر و پیش‌روی پیچانرودی رودخانه زهره ..... ۱۱۰

## فهرست جدول‌ها

| <u>موضوع</u>   | <u>صفحه</u> |
|--|-------------|
| جدول (۳-۱): مراحل کالیبره کردن مدل ..... ۵۸            |             |
| جدول (۳-۲): کلاس بندی اندازه ی ذرات رسوب ..... ۶۴      |             |
| جدول (۳-۳): درصد کلاس بندی اندازه ی ذرات رسوب ..... ۶۴ |             |
| جدول (۳-۴): اطلاعات مطالعات پیشنهادی ..... ۶۷          |             |
| جدول (۴-۱): نتایج مراحل کالیبراسیون ..... ۷۱           |             |

- جدول (۲-۴): درصد کلاس بندی دانه‌های رسوبگذاری شده در مقاطع تعیین شده ..... ۸۵
- جدول (۳-۴): نتایج سرعت و تنش برشی در رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه ..... ۸۶
- جدول (۴-۴): نتایج سرعت و تنش برشی برای سه مقطع مورد نظر در رودخانه زهره ..... ۸۷
- جدول (۵-۴): نتایج سرعت و تنش برشی در رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه ..... ۸۸
- جدول (۶-۴): مقادیر محاسبه شده برای سه دوره زمانی، رودخانه زهره در محدوده ..... ۹۲
- جدول (۷-۴): تقسیم‌بندی رودخانه‌ها برحسب ضریب خمیدگی ((Wolfert, 2001)) ..... ۹۵
- جدول (۸-۴): نوع پیچش‌ها و درصد فراوانی آن‌ها براساس ضریب خمیدگی ..... ۹۷
- جدول (۹-۴): میزان توسعه خم رودخانه بر مبنای زاویه مرکزی ..... ۹۸
- جدول (۱۰-۴): نوع پیچش‌ها و درصد فراوانی آنها براساس زاویه مرکزی ..... ۱۰۰





## فصل اول

# مبانی و کلیات تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

بطور کلی عوامل فرسایش و رسوب‌گذاری که به تغییرات مورفولوژیکی رودخانه منجر خواهند شد، در رودخانه‌های آبرفتی نمود پیدا می‌کنند. بعبارتی علم مورفولوژی رودخانه‌های آبرفتی را می‌توان بصورت مطالعه، بررسی شکل و ساختار سطح زمین تحت تأثیر جریان آب تعریف نمود (بیدنهارن و همکاران، ۱۹۹۷). رودخانه‌ها از منابع عمده تأمین آب شیرین در جهان به شمار می‌رود، کاهش منابع آب و کمبود آب شیرین در جهان، لزوم مطالعه و بررسی تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های آن را آشکار می‌کند. امروزه به دلیل افزایش جمعیت، میزان مصرف انرژی آب، مواد صنعتی و غذایی در جهان رشد فزاینده‌ای داشته است. برای تأمین مواد غذایی بیشتر، انسان به کشاورزی نوین روی آورده که نیازمند تأمین آب بیشتر است. مطالعات صورت گرفته نشان داده است که بسیاری از اشکال هندسی مجرا، در نتیجه وقوع تغییرات در میزان دبی جریان ایجاد می‌شوند (بریج، ۲۰۰۸). شکل آبراهه با واکنش به حالت‌های مختلف انرژی به اشکال مختلف تک شاخه‌ای (مستقیم، موجی، پیچانرود) یا چند شاخه‌ای (شریانی) در می‌آید (ریچاردز، ۲۰۰۳).

## ۱-۲- ضرورت تحقیق

استان خوزستان با مساحتی معادل ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع به دو منطقه کوهستانی و جلگه‌ای تقسیم می‌گردد. منطقه کوهستانی حدود ۴۰٪ که عمدتاً در شمال و شمال شرقی استان در مناطق کوهستانی زاگرس واقع و منطقه جلگه‌ای حدود ۶۰٪ وسعت استان را با شیب کم تشکیل می‌دهد. اختلاف ارتفاع در استان از سطح دریا در آبادان شروع و تا کوه قارون به ارتفاع ۳۶۰۰ متر در شهرستان ایذه منتهی می‌شود که این تنوع ارتفاعی باعث بوجود آوردن پوشش گیاهی و آب و هوایی متفاوت در استان شده است. مهمترین رودخانه‌های استان شامل کارون، کرخه، دز، مارون، جراحی، زهره، خیرآباد و... است که نزدیک به ۳۰٪ آب‌های جاری کشور را شامل می‌شوند.

رودخانه زهره از رودخانه‌های استان خوزستان است که از دو شاخه اصلی فهلیان و خیرآباد تشکیل شده و با نام رودخانه زهره در انتهای دشت جلگه‌ای هندیجان به خلیج فارس می‌ریزد (شرکت مهندسی مشاور جاماب، ۱۳۷۸).

انتقال رسوب پروسه مهمی در شکل‌گیری مورفولوژی رودخانه است. ته‌نشینی بخش مهمی از این پروسه می‌باشد که مشکلات زیادی را در مدیریت رودخانه بوجود می‌آورد. افزایش تراز بستر، کاهش میزان آبگذری، افزایش پروفیل سطح آب، پخش سیلاب در سیلابدشت و کاهش کارایی تاسیسات آبی از جمله مشکلات عمده رسوب‌گذاری رودخانه‌ها می‌باشد که لایروبی سالیانه آن نیز می‌تواند هزینه‌های جاری سازمان‌های مرتبط با آن را نیز افزایش دهد. برداشت رسوبات از رودخانه‌هایی که نهشته گذاری در آنها سریع است می‌تواند برای کنترل سیلاب و پایداری کانال رود موثر باشد، اما برداشت بیش از حد رسوبات ورودی می‌تواند موجب فرسایش بستر رودخانه‌ها گردد (رینالدی و همکاران، ۲۰۰۵). اثرات برداشت رسوب از بستر رود را به صورت زیر خلاصه کردند:

۱- اثرات مورفولوژیکی که شامل فرسایش بالادست و پایین‌دست بستر رودخانه، ناپایداری رودخانه (تغییرات جانبی، تغییرات پهنای رودخانه)، ایجاد بسترهای رسوبی درشت دانه، ناپایداری رودخانه در نتیجه برداشت موانع رسوبی و تاثیرات منفی بر زیر ساخت‌ها می‌شود. ۲- اثرات هیدرولیکی که به صورت تاثیر در فراوانی آبگرفتگی، پایین رفتن سطح اساس آب زیرزمینی و تغییرات در هیدرودینامیک مناطق جزر و مدی بروز می‌کند. ۳- اثرات اکولوژیکی که می‌تواند به صورت از بین رفتن پوشش گیاهی حاشیه کانال رود و موجودات آبی رودخانه‌ها مانند ماهی‌ها، بی‌مهرگان و به طور کلی تخریب زیستگاه‌های آبی مشاهده می‌گردد. از این رو جهت جلوگیری از خسارت‌های احتمالی، بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

### ۱-۳- اهداف پایان نامه

خصوصیات هندسی و مورفولوژیکی هر رودخانه از مشخصه‌های اصلی آن به شمار می‌آید که به واسطه آن‌ها برنامه ریزی مدیریتی حوزه و حفظ منابع طبیعی پیرامون آن‌ها و مهندسی رودخانه امکان پذیر خواهد بود. با توجه به اینکه که رودخانه زهره محل مناسبی جهت ماهیگیری و کشتی‌رانیست و سواحل آن نیز محل مناسبی جهت کشاورزیست، از این رو مهم‌ترین هدف این تحقیق، بررسی مشخصه‌های هندسی و مورفولوژیکی این رودخانه مهم و دائمی حوزه خلیج فارس یعنی زهره می‌باشد، هدف از این تحقیق، بررسی میزان تغییرات پروفیل‌های عرضی بستر و بررسی چگونگی جابجایی عرضی بستر و پیچانرودی بودن رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مقاطع عرضی بازه مورد مطالعه می‌باشد. در این تحقیق از اطلاعات صحرایی مانند: DEM، مقاطع عرضی، دبی، دبی رسوب، دانه بندی و غیره استفاده می‌شود. با وارد کردن اطلاعات در مدل ریاضی CCHE2D، پارامترهای هیدرودینامیکی موثر در مورفولوژی این رودخانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین پلان رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در محیط GIS ترسیم خواهد شد.

### ۱-۴- ساختار پایان نامه

برای دستیابی به اهداف فوق، گزارش این تحقیق در پنج فصل بشرح زیر تدوین شده است. در فصل اول به تعریف مسئله، فرضیات و اهداف پژوهش و ارائه مبانی اساسی، پرداخته شده است. در فصل دوم ابتدا کلیاتی از مورفولوژی، انواع فرسایش، رسوب و تأثیر آن در مورفولوژی و پیچانرود آورده شده است و در ادامه فصل مروری بر مطالعات محققان گذشته ارائه شده است. فصل سوم شامل دو بخش می‌باشد، در بخش اول به معرفی حوضه مورد مطالعه پرداخته شده و در بخش دوم معرفی مدل عددی CCHE2D، سپس روش کار مطالعه تصاویر ماهواره‌ای جهت بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه، آورده شده است.

فصل چهارم، مربوط به ارائه نتایج بدست آمده از مدل عددی می‌باشد. در ادامه این فصل نتایج خروجی از نرم افزار مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سه دوره زمانی، پیچانرودی بودن و تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره واقع در جلگه هندیجان بررسی و نقشه-های مورد نظر در محیط GIS رسم شده و در نهایت تمام نتایج توسط نمودارها و شکل‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

فصل پنجم مربوط به بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادها می‌باشد و در انتها منابع مورد استفاده درج شده است.



## فصل دوم

# کلیات و پیشینه تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل با توجه به مطالعات انجام گرفته و منابع موجود، به تشریح مفاهیم مورد بحث، اعم از مورفولوژی، رسوب، فرسایش و پیچانرود پرداخته شده و در ادامه مروری بر تحقیقات محققان پیشین ارائه شده است.

## ۲-۲- مورفولوژی

### ۲-۲-۱- مفهوم مورفولوژی

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 می‌باشد. بررسی مورفولوژیکی برای درک شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی رودخانه در آینده ضروری است و تنها از این طریق می‌توان عکس العمل طبیعی آن را نسبت به تغییرات طبیعی و یا اقدامات ناشی از اجرای طرح های اصلاح مسیر و تثبیت کناره‌ها پیش بینی نمود و میزان جابجایی، تغییر ابعاد و الگوی رودخانه را تشخیص داد.

رودخانه‌های طبیعی به ندرت در حالت پایدار بوده و تحت تأثیر عوامل و متغیرهای مختلف همواره از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در تغییر هستند. حتی در مقیاس زمانی نسبتاً کوتاه کمتر از یکصد سال نیز روند فرسایش و رسوب‌گذاری در هر رودخانه تابع توازن میان عوامل کنترل کننده متغیرهای وابسته و مستقل آن می‌باشد (چورلی، ۱۹۸۵).

در این صورت هر گونه تغییری که به سیستم رودخانه تحمیل شود، تعادل موجود آن را بر هم زده و با عکس العمل رودخانه در جهت ایجاد موازنه جدید روبرو خواهد گشت. شدت تغییر پذیری و زمان این تغییرات بستگی به نوع و درجه‌ی تأثیر عوامل کنترل کننده دارد. تأثیر عوامل طبیعی نظیر تغییرات اقلیمی، زمین شناسی و تکتونیک<sup>۱</sup> تدریجی بوده و در کوتاه مدت ناچیز است. در حالی که تأثیر فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت شن و ماسه از بستر، سازه‌های بنا شده در

---

<sup>۱</sup> Tectonic



محدوده‌ی بستر رودخانه ( پل، سد، حفاظ، دیواره) و نظایر آن موجبات تغییر در رژیم جریان، رسوب، شیب مقطعی و ابعاد رودخانه شده و در کوتاه مدت مقدمات تغییر الگوی رودخانه را فراهم می‌کند. نقش هیدرولوژی (آب و رسوب) در تغییرات و ناپایداری آبراهه و مشخصات هندسی آن، رواناب حاصل از زهکشی حوضه همراه با بار و نوع رسوبی که با خود به آبراهه رودخانه می‌رساند، یکی از متغیرهای عمده‌ای است که در تعیین اندازه و ویژگی‌های شکل آبراهه‌ها اهمیت دارد (تلوری ۱۳۷۳).

اگر بار رسوبی یا مقدار تخلیه‌ای که توسط آبراهه انجام می‌شود در معرض کاهش و تقلیل قرار گیرد، پاسخ آبراهه به این پدیده به صورت رسوب‌گذاری یا فرسایش منعکس می‌شود و آبراهه به این ترتیب ناپایدار می‌گردد. اما چون آبراهه از ترکیب رسوباتی با درجه پایداری متفاوتی تشکیل شده، بنابراین میزان فرسایش و حمل و نقل و رسوب‌گذاری در آن یکسان نیست و از این رو آبراهه‌ها به نسبت دارای پاسخ‌های متفاوتی هستند. آبراهه‌های ناپایدار به طور مستمر به تغییرات خارجی مختلف نظیر بار رسوبی یا مقدار تخلیه واکنش نشان می‌دهند.

## ۲-۲-۲- تعاریف و مفاهیم ریخت‌شناسی

ریخت‌شناسی رودخانه، علم شناخت سامانه رودخانه از نظر شکل و شکل مسطحه، مشخصه-های هیدرولیکی، راستا و نیمرخ طولی بستر و نیز روند و ساز و کار تغییرات این مشخصات می‌باشد. از طریق بررسی ریخت‌شناسی رودخانه می‌توان شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی آن را در آینده بهتر درک نمود.

خصوصیات ریخت‌شناسی با زمان تغییر کرده و تحت تاثیر عواملی همچون دبی و سرعت جریان، نرخ انتقال و خصوصیات رسوب، جنس مواد تشکیل دهنده بستر و کناره‌ها، شرایط زمین-شناسی و عوامل دیگر می‌باشد.

علم مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه، در واقع کوششی است برای آن که رودخانه‌ها را به صورت نمود و پدیده‌های یکنواخت و تیپ توصیف نماید (قانونمند نمودن رفتار رودخانه). پدیده‌های

حاکم بر رودخانه از طریق حرکت سه بعدی بر روی بستر متحرک (فرسایش پذیر) شکل می‌گیرد. به دلیل آن که حرکت سه بعدی آب بر روی بستر فرسایش پذیر با روابط بسیار پیچیده‌ای مواجه است، خصوصیات رفتاری آن معمولاً به صورت توصیفی و کیفی بیان می‌گردد. بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، معمولاً توسط متخصصین زمین‌شناسی، مهندسی رودخانه و یا هر دو انجام می‌گیرد که هر کدام با دیدگاه خود با رفتارشناسی رودخانه برخورد می‌کند. در یک بیان کلی می‌توان گفت که زمین‌شناسان، تغییرات دراز مدت رودخانه‌ها را به صورت کیفی پیش بینی می‌کند در حالی که مهندسی رودخانه‌ای مباحث ریخت‌شناسی را به گونه تغییرات میان مدت (مثلاً در مقیاس ۱۰ یا ۲۰ساله) و با پیش بینی‌های کمی و عددی ارائه می‌دهند.

## ۲-۲-۳- اهمیت، نقش و کاربرد مطالعات ریخت‌شناسی در مهندسی رودخانه

کلیه اقدامات مهندسی رودخانه در بستر رودخانه‌ها که به منظور بهره‌برداری بیش‌تر و کاهش خطرات انجام می‌گیرد، مستقیماً موجب دگرگونی شرایط طبیعی رودخانه و تحمیل وضعیتی جدید می‌شود. دگرگون شدن شرایط پایدار رودخانه، فعل و انفعالات جدید و تغییرات متوالی را در مشخصه‌های فیزیکی رودخانه در پی خواهد داشت.

مهم‌ترین نقش مطالعات ریخت‌شناسی در چنین رودخانه‌هایی، تعیین کمی و کیفی عکس‌العمل رودخانه و پیش بینی روند تغییرات آینده آن می‌باشد. خطرات جدی و جبران ناپذیری که جابجایی‌ها و تغییرات رودخانه‌ها ممکن است به دنبال داشته باشد، ضرورت بررسی ریخت‌شناسی آن را در مرحله مطالعات، قبل از هر گونه اقدامی نمایان می‌سازد. امروزه برخی از اقدامات رایج مهندسی رودخانه در بستر رودخانه‌ها را می‌توان شامل احداث سازه‌های متقاطع مانند پل، بند انحرافی، سد مخزنی، ساخت و ساز در بستر و کاهش عرض، برداشت مصالح از بستر، احداث سازه‌های جنبی مانند آبگیری، پمپاژ، اسکله و بارانداز، تاسیسات پرورش ماهی و تصفیه‌خانه و تغییر مسیر و محدودسازی بستر دانست. هر یک از این اقدامات بدون در نظر گرفتن اثرهای متقابل با رودخانه، منجر به حوادث بحران ساز پیش‌بینی نشده خواهد شد که امروزه شاهد نمونه‌هایی از این گونه پروژه‌ها و خسارات و

زیان‌های ایجاد شده می‌باشیم. برخی از نمونه‌های تغییرات نامطلوب و پیش‌بینی نشده در رودخانه-های کشور را که ناشی از دست‌اندازی بشر در بستر آنها بوده است، شامل آبستگي شدید پایه‌های پل رودخانه تالار به علت برداشت شن و ماسه، انحراف جریان رودخانه تجن ناشی از برداشت مصالح و کف کنی پایه‌های پل خط انتقال گاز رودخانه سفیدرود، می‌باشد. در تمامی این موارد و بسیاری از تغییرات ایجاد شده در بستر رودخانه‌های کشور شاهد حوادث نامطلوب و تحمیل زیان‌های مالی فراوان هستیم. بررسی‌های ریخت‌شناسی و پیش‌بینی‌های احتمالی رفتار رودخانه در مقابل هر کدام از این اقدامات، می‌توانست از بسیاری از خسارات جلوگیری نموده و یا با برنامه‌ریزی صحیح، بهره‌برداری از رودخانه به گونه‌ای انجام یابد که تغییرات متعاقب آن به میزان حداقل خود واقع گردد.

## ۲-۳- طبقه‌بندی به لحاظ شکل مسطحه رودخانه<sup>۱</sup>

مشخصات ظاهری و ویژگی‌های یک رودخانه، ناشی از تنظیم مرزهای آن به واسطه جریان و رژیم رسوبي حاکم بر آن می‌باشد. در سال ۱۹۵۷ لئوپلد و ولمن بر اساس دو ضریب خمیدگی ( $M_c$ ) و ضریب نسبت عرض به عمق ( $B/D$ ) رودخانه‌ها را از لحاظ ظاهری به سه دسته مستقیم<sup>۲</sup>، پیچانرودی<sup>۳</sup> و شریانی<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی کردند. ضریب خمیدگی عبارت از نسبت طول خط‌القع<sup>۵</sup> رودخانه به طول محور آن در فاصله بین نقاط ابتدا و انتهای بازه است (لئوپلد، ۱۹۶۵). تقسیم بندی رودخانه‌ها براساس الگوهای مختلف در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

---

<sup>1</sup> River Plan Form

<sup>2</sup> Straight River

<sup>3</sup> Meandering River

<sup>4</sup> Braided River

<sup>5</sup> Talwege

روند نمای طبقه‌بندی رودخانه‌ها بر اساس الگوهای مختلف



شکل (۱-۲): نمایی طبقه‌بندی رودخانه‌ها بر اساس الگوهای مختلف

#### ۲-۴- مروری بر مطالعات گذشته

در این قسمت سعی شده است مجموعه‌ای از کارهای معتبر صورت گرفته در زمینه‌ی شبیه-سازی هیدرولیک جریان و رسوب در رودخانه‌ها و اطراف آبسکن و همچنین مطالعات صورت گرفته با نرم افزار CCHE2D و تصاویر ماهواره‌ای، ارائه گردد.

اسماعیل‌نژاد (۱۳۸۱) با ساختن یک میکرومدل، هیدرولیک جریان ورودی به آبگیرهای سد انحرافی حمیدیه را مورد مطالعه قرار داد. وی جهت رفع مشکل رسوب‌گذاری در آبگیرهای چمران و آزادگان، تغییر موقعیت آبگیر چمران، کاهش عرض و افزایش تراز کف آبگیر آزادگان بصورت توأم، را مناسب‌ترین گزینه معرفی کرد.

علینقی‌زاده بهبهانی (۱۳۸۳) با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی شرایط هیدرولیکی جریان در آبگیرهای با زاویه انحراف ۹۰ و ۷۵ درجه پرداخت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اندازه زاویه انحراف تأثیر فراوانی بر نسبت دبی انحرافی می‌گذارد، بطوری که در زاویه انحراف ۹۰ درجه نسبت به ۷۵ درجه در شرایط یکسان، نسبت دبی انحرافی بیشتر می‌باشد. همچنین موقعیت مکانی آبگیر (از لحاظ زاویه انحراف)، تأثیر زیادی بر نسبت رسوبات انحرافی دارد بطوری که زاویه ۷۵ درجه نسبت به

زاویه انحراف ۹۰ درجه در شرایط یکسان هیدرولیکی، نسبت رسوبات انحراف کمتری را شامل می‌شود.

تأییب و همکاران (۱۳۸۸) نیز شبیه سازی عددی جریان را در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدل CCHE2D مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد محدوده سرعت‌های زیاد در ابتدای خم تا زاویه ۵۰ درجه قوس در قسمت دیواره داخلی فلوم می‌باشد و از ۵۰ درجه به بعد به طرف میانه فلوم و در انتهای فلوم به سمت دیواره خارجی منحرف می‌شود.

آذرنگ (۱۳۸۸) در تحقیق خود شبیه‌سازی هیدرولیکی و رسوبی رودخانه کارون را در بازه اهواز فارسیات به کمک نرم افزار یک بعدی CCHE مورد مطالعه قرار داده است. نتایج حاصل از مدل CCHE، میزان رسوب گذاری در بازه اهواز - فارسیات در حدود دو و نیم میلیون تن در سال برآورد گردید.

خضری نژاد و همکاران در سال (۱۳۸۹) شبیه‌سازی الگوی رسوب گذاری در مخزن سد گرشا با استفاده از مدل ریاضی CCHE2D انجام دادند. در این تحقیق پس از کالیبره کردن شبکه محاسباتی، مدل برای یک دوره ۵۰ ساله اجرا و نتایج به صورت پروفیل‌های طولی و عرض رسم و حجم کل رسوب گذاری در طول مدت ۵۰ سال محاسبه شده است.

روغنیان در سال (۱۳۸۹) خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون را با استفاده از مدل CCHE2D بررسی نمود و دریافت که در قوس خارجی سرعت و تنش برشی به نسبت دیگر قسمت‌ها (قوس داخلی) بیشتر است.

کمان بدست و بهشتی در سال (۱۳۹۰) با استفاده از نرم افزار CCHE2D اقدام به شبیه‌سازی بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون بازه ملاتانی - اهواز کردند. در این تحقیق منحنی دبی - اشل ایستگاه هیدرومتری اهواز به عنوان شرط مرزی پائین دست و هیدروگراف جریان ایستگاه ملاتانی با دوره بازگشت ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ ساله به عنوان سیلاب طراحی شرط مرزی بالادست استفاده و اجرای مدل به صورت غیرماندگار حداکثر رقوم آب به دست آمد. برای نمونه

مقادیر رقوم سطح آب، برآیند سرعت، دبی در واحد عرض، برآیند تنش برشی و عدد فرود برای سیلاب ۲۵ ساله برابر ۱۶/۱۲ متر، ۱/۳۷۴ متر بر ثانیه، ۷/۸۱ متر مربع بر ثانیه، ۲۱/۵۸ نیوتن بر مجذور ثانیه و ۰/۲۰۱ برآورده شده است.

نیکنام (۱۳۹۱) روند رسوب‌گذاری در مخزن سد دز را با استفاده از نرم افزار CCHE2D شبیه‌سازی نمود و نشان داد که عمده ذرات درشت دانه در بالادست و ذرات ریز دانه در پایین دست رسوب می‌کند. عمده رسوبات بدلیل عمق زیاد مخزن و سرعت کم جریان در بالادست ترسیب می‌گردند. باراکدل و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی راه کارهای افزایش کارایی صفحات مستغرق پرداختند. آزمایشات انجام شده توسط ایشان نشان داد که شدت رسوبات ورودی بستر به داخل آبگیر پس از نصب صفحات مستغرق زمانی می‌تواند ناچیز باشد که نسبت دبی در واحد عرض آبگیر به دبی در واحد عرض کانال اصلی، کمتر از حدود ۰/۲ باشد.

فروغی و همکاران (۱۳۸۰)، با ایجاد شرایطی تقریباً مشابه رودخانه‌های فصلی و شریانی از طریق اعمال دبی متغیر پله‌ای (هیدروگراف) در طول آزمایش عملکرد صفحات مستغرق جهت ساماندهی رودخانه‌های فصلی که دارای دبی پایه نمی‌باشند، بررسی کردند. در این تحقیق طراحی صفحات براساس معیارهای ارائه شده توسط ادگار صورت گرفت و با انجام آزمایش‌های متعدد عملکرد سیستم و ابعاد بهینه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زاویه برخورد ۲۰ درجه نسبت به جهت جریان مرکزی شرایط بهتری را از نظر فرسایش موضعی اطراف صفحه و ایجاد برم فراهم می‌کند. همچنین ثابت کردند صفحات با ابعاد  $H/d=0.4$  و  $L/d=1.25$  با آرایش سه صفحه در هر ردیف و فاصله از یکدیگر برابر  $(\delta s = 12.5d)$  بهترین شرایط را از نظر ایجاد برم کناره و تثبیت رودخانه فراهم می‌کنند. ایشان در مجموع استفاده از صفحات مستغرق جهت تثبیت و ساماندهی رودخانه‌های فصلی مثبت ارزیابی کردند.

یمانی و همکاران (۱۳۸۵) در مطالعه‌ای سعی کردند تا نقش دبی جریان و رسوب را در تغییرات آبراهه و مشخصات هندسی (هیدرودینامیک) رودخانه‌های تالار و بابل مورد بررسی قرار دهند که در

این راستا پس از بررسی مشخصات هندسی آبراهه در رودخانه‌های مذکور ارتباط متغیرهای دبی آب و رسوب را به طور مقایسه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و در نهایت رابطه‌ای برای آن‌ها استخراج کردند. ایشان بدین منظور ابتدا با توجه به ایستگاه‌های موجود، مقادیر دبی آب و رسوب در امتداد هر یک از دو رودخانه، از علیا تا سفلی آن‌ها را استخراج کردند و در ادامه، مشخصات هندسی شامل عرض، عمق، نسبت عرض به عمق، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و طول موج رودخانه‌های نام برده را مورد مطالعه قرار دادند و در انتها این متغیرها در قالب مدل ویژه‌ای تجزیه و تحلیل شدند که با استناد به آن ضمن برقراری ارتباط متغیرها با یکدیگر، تغییرات دوره‌ای ابعاد، شکل و الگوی رودخانه‌ها را برآورد کردند.

نوحه‌گر و همکاران (۱۳۸۹) بخش علیای رودخانه میناب در بخش جلگه‌ای (محدوده سد تا پل میناب) را مورد مطالعه قرار دادند و نیز به بررسی مکانیزم فرسایش رود و عکس‌العمل رودخانه از نقطه نظر الگو و نیمرخ طولی و عرضی در مقابل ساختمان زمین شناسی پرداختند. به منظور بررسی تغییرات شیب بستر، نیمرخ طولی رودخانه با استفاده از نقشه‌های با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تعیین کردند. برای شناسایی و نوع عملکرد فرسایش در آبراهه، با توجه به تعداد زیاد مقاطع در این واحد ژئومورفولوژی (آبراهه)، ۴ مقطع در مکان‌های مختلف را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ایشان پس از بررسی‌های انجام گرفته بر روی مقاطع ۲۴۲ اولین مقطع عرضی بعد از سد میناب، مقطع ۲۳۶ که در سنگ بستر جریان داشته، مقطع ۲۲۲ عریض‌ترین بخش مسیر و در آخر مقطع ۲۰۷ که در مجاورت پل میناب و محل ورودی رودخانه به دلتای میناب می‌باشد، نتایج زیر را بیان کردند:

وضعیت بستر رودخانه میناب، در اثر کاهش تدریجی بار جامد حاصل از حوضه آبخیز میناب به علت احداث سد و گیر افتادن رسوب‌ها، مخصوصاً رسوب‌های درشت دانه در دریاچه سد، به صورت پایین رفتن نیمرخ در تمام طول مسیر رودخانه می‌باشد. بالا بودن تغییر پذیری به علت وجود رسوب‌های کمتر فرسایش یافته کف بستر می‌باشد که توانسته در مقابل جریان آب مقاومت بیشتری از خود

نشان دهد. به طور کلی رودخانه میناب از سد تا پل بعنوان یک واحد مورفولوژیکی، به سه بخش با بستر تنگ و عمیق، بستر عریض و با عمق کم و بستر تنگ با عمق متوسط تقسیم می‌شود.

رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی نقش عوامل ژئومورفیک<sup>۱</sup> و زمین شناختی بر شکل هندسه رودخانه و نشان دادن علت خمیدگی بستر در بازه دشتی و بازه کوهستانی پرداختند. از معیارهایی که در این تحقیق برای بررسی شکل هندسی رودخانه مورد استفاده قرار گرفته شد عبارتند از: معیارهای نسبت پهنا به عمق، ضریب بریدگی، شیب طولی توان رود، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی پیچان‌ها، شکل پلان و لیتولوژی<sup>۲</sup> بستر رودخانه، که جهت تعیین کمی پارامترهای فوق از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ سنجنده ETM<sup>+</sup>، نقشه‌های توپوگرافی (۱:۲۵۰۰۰)، مقاطع عرضی برداشت شده در طول مسیر رودخانه و حاشیه آن‌ها، نیمرخ طولی رودخانه مستخرج از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) استفاده کردند. ایشان در بخش نتیجه‌گیری این تحقیق نشان دادند که طول زیاد رودخانه و عبور از تشکیلات مارنی و فرسایش‌پذیر، باعث شده که هندسه این رودخانه در بازه دشتی شدیداً تحت تاثیر لیتولوژی بستر شکل بگیرد و فرسایش کناری و توان رودخانه نقش عمده در پیچانرودی رودخانه داشته است. در بازه کوهستانی نیز مسائل زمین ساختی حائز اهمیت است و هندسه بستر تحت تاثیر پارامترهای زمین ساختی از قبل طراحی شده است و الگوی مسیر رودخانه از این عوامل تبعیت می‌کند.

دول و همکاران (۲۰۰۳) معیار ضریب بریدگی را برای طبقه‌بندی الگوی رودخانه استفاده کرده و نتیجه گرفتند که بر اساس این پارامتر، رودخانه می‌تواند به صورت عمیق، کم عرض و کم عمق یا عریض باشد. همچنین بیان کردند که می‌توان وجود سیلاب دشت‌ها را توسط این فاکتور به صورت کمی در آورد و مورد مطالعه قرار داد.

---

<sup>1</sup> Geomorphic

<sup>2</sup> Lithology



میلار و کویک (۱۹۹۳) معیار شیب طولی و سینوزیته رودخانه را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند سینوزیته به شیب وابسته است به طوری که رودخانه‌های با شیب بیشتر دارای سینوزیته کمتر و رودخانه‌های با شیب کمتر دارای سینوزیته بزرگتری هستند.

چانگ (۱۹۸۴) و فرگوسن (۱۹۸۴) معیار توان رود را برای مقایسه توان هیدرولوژیکی و مقاومت برشی بستر رودخانه استفاده کردند. نامبردگان نتیجه گرفتند که این شاخص میزان فرساینده‌گی رودخانه را تعیین می‌کند.

ارشد و همکاران (۱۳۸۶) در مطالعه‌ای روند تغییرات مورفولوژیکی کارون در بازه گتوند تا ایستگاه فارسیات بر اساس چهار سری تصویر ماهواره‌ای Landsat-TM و IRS-LISS-III در دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۳۶۹ مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که خصوصیات قوس‌ها در طول رودخانه در حال تغییر است و مقدار جابجایی عرضی قوس‌ها در مناطقی به ۱۹۵۰ متر در طول ۱۳ سال می‌رسد. همچنین تراکم و اندازه انحنای قوس‌ها به سمت پایین دست جابجا شده‌اند. تغییرات زمانی ضریب خمیدگی قوس‌ها در محدوده گتوند تا بندقیر کاملاً مشهود بوده در حالیکه در بازه بندقیر تا فارسات این تغییرات ناچیز می‌باشد.

تورن (۲۰۰۲) در یک تحقیق به لزوم مطالعه رفتار مورفولوژیکی رودخانه‌های بزرگ پرداخته و یک چارچوب مطالعاتی در این زمینه ارائه نموده که تاکید آن بر پایش منظم مشخصات مورفولوژیکی رودخانه با استفاده از روش‌های نوین می‌باشد. برای رودخانه‌های بزرگ پایش منظم الگوهای آبراه‌های و تحلیل تغییرات زمانی پارامترهای هندسی بسیار دشوار است. در سال‌های اخیر تکنیک سنجش از دور (RS) با قابلیت‌های خاص خود برای تهیه تصاویر تکراری در وسعت گسترده، امکان پایش تغییرات زمانی رودخانه‌ها را فراهم آورده و در کنار آن سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پردازش آن‌ها را تسهیل و تسریع ساخته است.

رنگزن و همکاران (۲۰۰۲) امکان پایش و ارزیابی کمی تغییرات مسیر رودخانه ایندوس در پاکستان را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست مورد بررسی قرار دادند. این محققین برای تشخیص

خط ساحلی رودخانه تصویر باند هفت (باند مادون قرمز نزدیک NIR) تصویر MSS ماهواره لندست را مورد پردازش قرار داده و این باند را به عنوان بهترین محدوده طیفی برای جداسازی آب و خاک معرفی نمودند. بر اساس این تحقیقات مسیر رودخانه در دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۷۲ تغییرات زیادی داشته و عمده این تغییرات ناشی از چهار سیلاب بزرگ رخ داده در این دوره زمانی تشخیص داده شد. به نقل از اورفو و استواکس (۲۰۰۲) تحقیقی با هدف ارزیابی مورفولوژی رودخانه در بعد مکان (تاثیر کاربری در حوضه) و زمان طی سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۷۹ برای بررسی امکان برقراری ارتباط این تغییرات با پارامترهای مدیریتی حوضه، پستی و بلندی و سایر فاکتورهای موجود در محدوده مورد نظر با استفاده از عکس‌های هوایی (۱:۴۰۰۰) همراه با تکنیک RS, GIS و GPS در ایالت اورگان آمریکا به انجام رسید.

شفیعی فر (۲۰۰۱) الگوی مهاجرت رودخانه زهره را که یکی از رودخانه‌های حوضه خلیج فارس در جنوب ایران می‌باشد، بر اساس چند سری عکس هوایی و تصویر ماهواره‌ای مورد مطالعه قرار داد. هدف این مطالعات مکان یابی ساختگاه مناسب جهت پرورش ماهی در ساحل رودخانه بوده است.

فاطمی عقدا و همکاران (۱۳۸۰) در مطالعه‌ای رودخانه کرخه واقع در استان خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. این محققین با نمونه برداری از دیواره بستر و آب رودخانه، آزمایش‌های رسوب-شناسی و ژئوتکنیکی، وضعیت فرسایش پذیری دیواره‌ها و علت آن را مورد بررسی قرار دادند، که نتایج نشان دهنده‌ی پایین بودن درجه تراکم و سستی رسوبات دیواره‌ها به علت جدید بودن آن‌ها، متفاوت بودن جنس لایه‌ها، چسبندگی کم بعضی از لایه‌های رسوبی در معرض فرسایش، وجود املاح پراکنده کننده در بعضی از لایه‌ها، و نیز پیش‌بینی نشدن تمهیدات لازم برای جلوگیری از فرسایش کناری رودخانه، فرسایش مداوم دیواره ادامه یافته چنانکه سالانه چندین متر به قوس‌های خارجی خود پیشروی کرده است، و در پایان ایشان برای مقابله با تخریب و پیشروی رودخانه راهکارهایی نظیر استفاده از پوشش گیاهی، گابیون بندی و تبدیل شیب‌های پایدار در ساحل و یا احداث میانبر مصنوعی (Cut off) ارائه دادند.

حسین زاده و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی دلتای رودخانه مهران واقع در غرب استان هرمزگان را مورد مطالعه قرار دادند که تغییرات در عوارض گوناگون ژئومورفیک، مانند جابجایی بستر رودخانه در طی بازه‌ی ۲۱ ساله، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای TM و ETM کشف و شناسایی شدند. تفریق باندهای ساده و روش تعیین میانگین جهت‌دار خطی را برای کشف و شناسایی تغییرات در سطح محدوده مورد مطالعه به کار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که رودخانه مهران در بازه زمانی ۲۱ ساله دارای جابجایی زیادی بوده به طوری که تشکیل مائدرهای جدید و متروک شدن بخش‌هایی از مسیر رودخانه نتیجه همین جابجایی می‌باشد. همچنین تغییرات اندکی در خط ساحل که نتیجه پیشروی و رسوب‌گذاری رودخانه به داخل خلیج فارس بوده، مشاهده شد.

یمانی (۱۳۷۸) در بررسی علل تغییر مسیر دوره‌ای رودخانه‌ها در روی دلتاهای شرق جلگه ساحلی مکران به این نتیجه رسید که تعداد و وسعت تغییر رودخانه‌ها از غرب به شرق افزایش یافته و فاصله زمانی آن‌ها کاهش می‌یابد. وی همچنین به این نتیجه دست یافت که تغییر مسیر دوره‌ای رودخانه‌ها پدیده‌ای مشترک در سطح تمامی دلتاهای ساحلی می‌باشد و این امر عموماً نتیجه رسوب-گذاری هر رودخانه تحت تاثیر کاهش شیب بستر آن در راستای نیمرخ تعادل می‌باشد.

حقی‌آبی و امامقلی‌زاده (۱۳۹۴) در تحقیقی به منظور بررسی تغییرات زمانی پلان رودخانه کشکان، از نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های ماهواره‌ای را مورد استفاده قرار دادند. با انجام بازدیدهای میدانی و مقایسه پلان جدید و قدیم رودخانه با استفاده از نرم افزار GIS، تغییرات رودخانه در طی دوره ۵۲ ساله مورد بررسی و بازه‌های بحرانی رودخانه مشخص گردید. همچنین خصوصیات پیچانرودی رودخانه و میزان توسعه یافتگی مائدرها در وضعیت فعلی در ۴۹ قوس رودخانه در یک بازه ۱۰۸ کیلومتری در حدفاصل مناطق ورپل و تیمورآباد، بررسی گردید. نتایج نشان دهنده این بود که، ۶ درصد از قوس‌ها توسعه نیافته، ۵۱ درصد توسعه یافته و ۴۳ درصد بیش از حد توسعه یافته می‌باشند در نهایت با توجه به مشخصات هندسی رودخانه و به کمک روابط تجربی، میزان فرسایش کناری در بازه‌های بحرانی در آینده پیش‌بینی شد. نتایج پیش‌بینی نشان داد، رودخانه در منطقه کلپو

سفلی و چرخستان ۶۵۷ متر، در منطقه خاطره، دوآب و دول بزرگ ۱۰۳۵ متر و در منطقه بالا دست چم پلک ۱۲۹۷ متر پیشروی نماید تا بطور طبیعی تثبیت گردد.

سوریان و رینالدی (۲۰۰۳) در مطالعه‌ای نشان دادند، در بسیاری از سیستم‌های رودخانه‌ای، در طول صد سال گذشته، عوامل متعددی مانند استفاده از زمین، شهرنشینی، زهکشی، ساخت سدها، انحراف مسیر رودخانه، احداث معادن شن و ماسه و دیگر دخالت‌های انسانی دینامیک رودخانه‌ها را دستخوش تغییرات قابل توجهی کرده است.

یمانی و شرفی (۱۳۹۰) عوامل موثر در ناپایداری و فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها عکس‌های هوایی سال ۱۳۳۴ و تصویر ماهواره‌ای IRS سال ۱۳۸۶ را به عنوان ابزار مقایسه زمانی تغییرات مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها با تقسیم مسیر رودخانه به ۳ بازه نتیجه گرفتند علی‌رغم کاهش قطر ذرات و افزایش دبی و رسوب از بازه ۱ به طرف بازه ۳، بیشترین تغییرات در بازه اول رخ داده است. کمترین تغییرات در بازه سوم و بالاخره در بازه دوم نیز تغییرات، بیشتر از بازه سوم و کمتر از بازه اول می‌باشد. بر این اساس، نتایج کلی نشان می‌دهد که بر خلاف معمول، تغییرات مورفولوژی و فرسایش کناری رودخانه مورد مطالعه از بالادست به طرف پایین دست کاهش یافته است. همچنین یافته‌ها نیز نشان داد که ساختمان زمین شناسی و لیتولوژی بستر و کناره رودخانه، مهمترین عوامل تغییر پایداری بستر به شمار می‌روند.

از میان مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته می‌توان به شکری در سال ۱۹۵۰ میلادی اشاره نمود. شکری با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی الگوی جریان در قوس پرداخت. او مشاهده نمود که برای یک قوس با انحنای ملایم محل وقوع حداکثر سرعت در نیمه اول قوس به سمت جداره داخلی و با حرکت به سمت خروجی قوس به طرف جداره خارجی متمایل می‌شود.

رودی و لشزینر در سال ۱۹۷۸ میلادی هم با بررسی کامل یک قوس تند مشاهده نمود که محل وقوع حداکثر سرعت با نزدیک شدن به خروجی قوس به سمت جداره خارجی متمایل می‌شود. وی اشاره نمود که عامل اصلی انتقال حداکثر سرعت به سمت جداره خارجی در انتهای قوس، گرادیان

طولی فشار می‌باشد؛ در صورتی که در قوس‌های ملایم عامل اصلی جابجایی حداکثر سرعت جریان ثانویه است.

کامپوزانو و همکاران در سال ۲۰۱۱ هم از مدل دو بعدی GOTM برای ارزیابی هیدرودینامیکی و اکولوژیکی رودخانه AYSEN FJORD که در محدوده بین خلیج پاتاگونیای شیلی و دهانه رودخانه Bahia Blanca واقع در ایالت سانتوز برزیل قرارداد، استفاده کردند. آن‌ها با مطالعات دقیق الگوی جریان فقط در راستای عمودی شیب تند دبی خروجی رودخانه AYSEN را مورد بررسی قرار دادند و دلیلش را افزایش حجم زیاد و ناگهانی دبی ورودی و ذوب شدن یخچال‌های Andes و پایین بودن میزان درجه حرارت تحلیل کردند.

سازمان ملی پارک فناوری شهر دنور در ایالت کلرادو با همکاری گروه مهندسی FLO در سال ۱۹۹۸ از مدل دو بعدی به نام FLO\_2D برای تحلیل الگوی جریان رودخانه Green در محدوده سد Flaming Gorge و رودخانه کلرادو استفاده کردند. این مدل محاسبه هیدروگراف دبی و تعیین گام-های زمانی کوتاه ۳۰ ثانیه تا ۱ دقیقه را از روی نقشه‌ی مبنای رقومی رودخانه استخراج و اجزای سیستم شبکه‌بندی یکپارچه را ایجاد نمودند و همچنین با ورود داده‌های ژئومتری رودخانه، دبی جریان، موج سیلاب، دبی سرریزی و اندازه موج سیلاب گرفتگی در کانال را شبیه‌سازی کردند.

دیویس و همکاران (۲۰۰۳) به بررسی تأثیر سد اورویل روی فرآیندهای مورفولوژیکی در پایاب پرداخته و تأثیر آن را بر مورفولوژی رودخانه آشکار کردند. همچنین سانچز و خاواجا (۲۰۰۸) به بررسی فرآیندهای رسوبی و مورفولوژی رودخانه پرداخته و در پایان راهکارهایی را برای مشکلات بوجود آمده ارائه کردند.

علائی طالقانی و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهشی، نقش انسان در فرسایش کناری و گسترش جانبی مئاندرهای گاماسیاب در دشت بیستون مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان برای دستیابی به این هدف، شاخص‌های هندسی ۱۵ مئاندری که انسان در فرسایش و توسعه آن‌ها نقش داشته است با ۱۹ مئاندر دیگر در محدوده دشت بیستون در یک دوره‌ی ۲۴ ساله مورد بررسی مقایسه‌ای دادند. برای

این کار از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۱۰ استفاده شده است. پس از رقومی کردن این تصاویر در محیط GIS، ابتدا پلان رودخانه ترسیم و سپس دوایری مماس بر قوس مئاندرها رسم شد و آنگاه شاخص‌های هندسی مورد نظر شامل طول قوس، طول مجرا، زاویه‌ی مرکزی، شعاع قوس و ضریب خمیدگی قوس‌ها اندازه‌گیری کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که میانگین طول قوس ۱۵ مئاندری که انسان در آن‌ها دخالت داشته است، به میزان ۱۹ متر، میانگین زاویه مرکزی حدود ۵ درجه، میانگین شعاع قوس‌ها نزدیک به ۲۰ متر بیشتر از ۱۹ مئاندر دیگر افزایش داشته‌اند و میانگین طول مجرا نیز ۲۶ متر کمتر شده است. بر این اساس ضریب خمیدگی ۱۵ مئاندری که انسان در آن‌ها دخالت داشته است، به میزان ۰/۱۳ بیشتر از ضریب خمیدگی ۱۹ مئاندر دیگر افزایش داشته است. به این صورت که ضریب خمیدگی ۱۵ مئاندر مورد دخالت انسان از ۱/۵۱ در سال ۱۹۸۶ به ۱/۷ در سال ۲۰۱۰ رسیده است، در حالی که ضریب خمیدگی ۱۹ مئاندر دیگر در همین مدت از ۱/۲۲ به ۱/۲۸ افزایش پیدا کرده است.

مقصودی و همکاران (۱۳۸۹)، در مطالعه‌ای، مورفولوژی قسمتی از رودخانه‌ی خرم آباد در استان لرستان از روستای چغا خندق تا روستای غلامان سفلی به طول ۱۹/۵ کیلومتر مورد بررسی قرار دادند. این محققین با استفاده از عکس‌های هوایی سال ۱۳۳۴، تصاویر سنجنده TM ماهواره Land Sat سال ۱۳۷۷ و تصاویر Aster سال ۱۳۸۴ مسیر رودخانه در سه دوره‌ی زمانی را در محیط نرم افزار Arc GIS کردند. در مرحله‌ی بعد در محیط نرم افزاری Auto Cad پارامترهای هندسی رودخانه مانند طول موج، طول دوره، ضریب خمیدگی، زاویه‌ی مرکزی و شعاع دایره مماس بر قوس-ها، به بررسی تغییرات با روش برازش دایره‌های مماس بر قوس رودخانه پرداختند. در ادامه با نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل آماری را بر روی پارامترهای هندسی انجام دادند. نتایج مطالعه‌ی این پارامترها و مقایسه‌ی آن‌ها در سه بازه‌ی زمانی مورد بررسی نشان داد که در این محدوده تعداد ۱۷ مئاندر از سال ۱۳۳۴ تا سال ۱۳۷۷ حذف شده و تعداد مئاندرها از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۸۴ از ۵۱ به ۵۳ افزایش یافته است. مقادیر پارامترهای هندسی بدست آمده در سه دوره نیز تغییرات شکل و پلان

رودخانه را نشان می‌دهد. اصلی‌ترین دلیل این تغییرات، تغییر کاربری اراضی اطراف رودخانه و به طور کلی دخل و تصرف انسان در بستر رودخانه است.

خسروی (۱۳۹۱)، به شبیه‌سازی عددی جریان و رسوب پیچانرود پایین دست سد میناب با استفاده از نرم افزار دو بعدی CCHE2D پرداخت، نتایج نشان داد که مدل از قابلیت خوبی جهت پیش‌بینی مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچانرودی برخوردار است.

عزیزیان و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی روند حرکت گودال‌های برداشت مصالح رودخانه‌ای در رودخانه کردان کرج با استفاده از مدل دو بعدی CCHE2D پرداختند. بدین منظور در محدوده یک گودال ایجاد شده در اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای و در بازه‌های زمانی مختلف (به خصوص بعد از عبور جریان‌های سیلابی) مقاطع طولی گودال مساحی شده و با شبیه‌سازی گودال در مدل دو بعدی پروفیل طولی بستر حاصل شد و نتایج آن‌ها نشان داد که مدل دو بعدی CCHE2D توانایی پیش‌بینی حرکت گودال‌های برداشت مصالح رودخانه‌ای را با دقت قابل قبولی دارد.

مغربی (۱۳۹۰)، به بررسی اثر بخشی احداث آبشکن بر روی حفاظت از کرانه‌ها در حوزه کال شور استان گلستان با نرم افزار CCHE2D پرداخته و نتیجه گرفت که احداث آبشکن باعث هدایت سرعت و تنش برشی به سمت تالوگ رودخانه می‌گردد.

فتحی و همکاران (۱۳۸۹)، به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در بازه‌ای از رودخانه خشکه فارسان پرداختند و با توجه به اهمیت سرعت آب و نیروهای تنش برشی بر فرسایش کناره‌های رودخانه، از یک مدل دو بعدی تحت عنوان CCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان استفاده کردند و مزیت و اهمیت یک مدل عددی را به منظور پیش‌بینی و پایش فرآیندهای حاکم بر جریان رودخانه-ها که نوع تکامل یافته ژئومورفولوژی آبرفتی- سیلابی‌اند، نشان دادند.

فقیه الاسلام جهرمی و موسوی جهرمی (۱۳۸۸)، با استفاده از مدل عددی CCHE2D الگوی جریان و رسوب حول آبشکن در قوس ۱۸۰ درجه را شبیه‌سازی و نتایج را با مدل فیزیکی صحت-سنجی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل CCHE2D ناحیه برگشتی در پایین دست آبشکن را

به خوبی مدل می‌کند، همچنین نمودارهای پروفیل عرضی بستر در مدل ریاضی و فیزیکی از یک الگو پیروی می‌کند.

نجفی‌پور و ساکی (۱۳۸۵)، با ساماندهی بررسی پیچانرودهای ناپایدار جهت کنترل مسیر و کاهش فرآیند رسوب‌گذاری در یکی از پیچانرودهای رودخانه کارون نتیجه گرفتند که ساماندهی پیچانرودهای دارای جدار ناپایدار باعث می‌شود صدها هزار هکتار از اراضی موجود در مجاور رودخانه مورد استفاده کشاورزی قرار گیرد.

جیا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، به شبیه‌سازی عددی جریان، حمل رسوب، تغییرات توپوگرافی بستر و سازه‌های رودخانه‌ای، در رودخانه آرکانزاس<sup>۲</sup>، با مدل CCHE2D پرداختند و نتایج استفاده از دایک را تایید کرد، و نشان داد که وجود دایک باعث می‌شود مقدار رسوب کاهش پیدا کند.

زر کفلی<sup>۳</sup> (۲۰۰۷)، با بررسی مدل ریاضی دو بعدی CCHE2D و مدل یک بعدی HEC-RAS در رودخانه مردکا<sup>۴</sup> به این نتیجه رسیدند که اگر چه مدل‌های یک بعدی مانند HEC-RAS، به صورت گسترده استفاده می‌شود ولی توانایی تحلیلی برخی از مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند الگوی جریان و رسوب در پیچانرودها و محدوده سازه‌ها و موانع در رودخانه را ندارد که این قابلیت برای مدل دو بعدی وجود دارد.

حسن<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از مدل CCHE2D در بازه‌ای از رودخانه مودا<sup>۶</sup>، شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب را مورد بررسی قرار دادند و اظهار داشتند که می‌توان به خوبی از نرم افزار CCHE2D برای تحلیل رفتار جریان، هم در رودخانه و هم در سیلاب‌دشت استفاده کرد.

---

<sup>1</sup> Jia

<sup>2</sup> Arkansas

<sup>3</sup> Zorkeflee

<sup>4</sup> Merdeka

<sup>5</sup> Hasan

<sup>6</sup> Muda



که چپایه<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از مدل CCHE2D حمل و نقل رسوب و تغییرات مورفولوژیکی در بالادست و پایین دست رودخانه چی چی ویر<sup>۲</sup> شبیه سازی کردند و نتایج نشان داد که تغییرات مورفولوژیک به طور عمده در زمان سیل های بزرگ اتفاق می افتد.

عباسی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی مورفولوژی قسمتی از رودخانه ی زاب در استان آذربایجان غربی از روستای گرد رحمت تا روستای سوستان به طول ۳۱ کیلومتر را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از تصاویر سنجنده TM ماهواره LandSat سال ۱۳۷۷ و تصاویر Aster سال ۱۳۸۴ مسیر رودخانه را در دو دوره زمانی و در محیط نرم افزار RS و Arc GIS 10.2 به صورت رقومی در آوردند، در مرحله بعد در محیط نرم افزاری اتوکد پارامترهای هندسی رودخانه مانند طول موج، طول دره، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و شعاع دایره مماس بر قوس ها را برای بررسی تغییرات با روش برازش دایره های مماس بر قوس رودخانه اندازه گیری کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که تعداد مئاندرها افزایش پیدا کرده است. همچنین بررسی مقادیر این پارامترهای مذکور دلالت بر تغییرات، شکل و پلان رودخانه دارد که این تغییر از تغییر کاربری اراضی حاشیه رودخانه زاب و البته دخل و تصرف انسان در بستر رودخانه ناشی می گردد.

میرزاوند و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه ای به منظور تعیین الگوی رودخانه های بابل رود و سجادرود واقع در جلگه ی ساحلی مازندران، از ضریب خمیدگی (به روش لئوپولد) و نیز زاویه مرکزی (به روش کورنایس)، به عنوان ابزار غیرفیزیکی و از نقشه های توپوگرافی و عکس های هوایی به عنوان ابزار فیزیکی تحقیق استفاده کردند. و در نهایت نتایج تحقیق ایشان نشان داد که میانگین ضریب خمیدگی در محدوده ی مورد مطالعه برابر ۲/۲۶ می باشد که این رقم بیانگر بالا بودن نسبت پیچ و خم- دار بودن رودخانه است. همچنین نتایج نشان دهنده این است که سرعت تکامل پیچانرودها از نظر زمانی و مکانی یکسان نیست. از طرفی با توجه به نتیجه ی به دست آمده از شاخص ضریب خمیدگی، ۷۱/۷۶ درصد از قوس های این رودخانه در زمره ی الگوی پیچانرودی تکامل یافته قرار می گیرند.

<sup>1</sup> Yeh

<sup>2</sup> Chi-Chi Weir



فصل سوم

مواد و روش‌ها

### ۳-۱- مقدمه

دشت ساحلی هندیجان در پیرامون رودخانه زهره، کانون فعالیت‌های مهم کشاورزی، شیلاتی، بازرگانی و نظامی بوده و هر گونه تغییر در رژیم و حریم رودخانه زهره، تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در شرایط اقتصادی، اجتماعی و امنیتی منطقه خواهد داشت. عموماً مزارع کشاورزی شهر هندیجان و روستای پایین‌دست، در حاشیه رودخانه و بر تراس‌های آبرفتی آن واقع شده‌اند. صید و پرورش آبزیان بعنوان یکی از مشاغل اصلی ساکنین منطقه محسوب می‌شود و در طول رودخانه چندین جایگاه تخلیه صید سنتی و بندر صیادی \_ تجاری وجود دارد که رونق خاصی به آن بخشیده است. قابلیت رودخانه از لحاظ عمق و پهنا به گونه‌ای است که لنج‌های تجاری و صیادی توانایی رفت و آمد تا شهر هندیجان (با عمق بیش از ۶۰ کیلومتر در مصب) را دارند.

با این وصف بررسی دقیق پارامترهای هیدرولیکی موثر در تغییرات مورفولوژی منطقه و الگوی پیچانرودی به عنوان پارامترهای موثر در کلیه فعالیت‌های یاد شده به منظور راه‌های حفظ منابع و سرمایه‌های موجود و با توجه به محرومیت منطقه بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق با توجه به شرایط ویژه این دشت ساحلی سعی شده است، علاوه بر بررسی پارامترهای هیدرولیکی موثر در تغییرات مورفولوژی رودخانه مانند: سرعت و تنش برشی با استفاده از نرم افزار CCHE2D در بازه زمانی حدود ۳۰ ساله، با مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای در محیط GIS خصوصیات هندسی رودخانه در سه بازه زمانی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در این فصل، به معرفی محدوده مورد مطالعه، معرفی نرم افزار و روش مطالعه تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شده و نتایج آن در فصل چهارم به تفصیل آورده شده است.

### ۳-۲- رودخانه زهره

رودخانه زهره (شکل (۳-۱)) در شهرستان‌های بهبهان و بندر ماهشهر، ممسنی و گچساران در استان‌های خوزستان، فارس و کهگیلویه و بویراحمد جاری است. طول این رودخانه ۴۹۰ کیلومتر و ارتفاع آن در سرچشمه ۲۸۵۰ متر است. رودخانه زهره از کوه کنه دوده‌سه واقع در تنگ گوش مورّه

در فاصله ۱۴ کیلومتری شمال غربی اردکان سرچشمه گرفته و بنام رودخانه اردکان به طرف جنوب سرازیر می‌شود و از کنار شهر اردکان یا سپیدان می‌گذرد و به دهستان همایجان وارد می‌شود. در این دهستان با ریزابه‌هایی چون رود چهل چشمه، رود شیر و رود سعلکی مخلوط می‌شود و پس از تنگ رودیان بنام رود شش پیر به سوی غرب متوجه می‌گردد و به دهستان دشمن زیاری شهرستان ممسنی وارد می‌شود. پس از عبور از روستاهای حسنی و دره شور پایین و مخلوط شدن با رودخانه توکل‌آباد به رود شور ممسنی تغییر نام می‌دهد و به سوی شمال غربی جریان می‌یابد و پس از مخلوط شدن با رودخانه فهلیان وارد دهستان جاوید ماهوری از شهرستان ممسنی می‌شود و پس از عبور از دره‌های پر پیچ و خم و مخلوط شدن با ریزابه‌های فراوانی چون رودخانه دروغ‌نزن و گلگان و دلوارکوه سیاه، از استان فارس خارج می‌گردد و از طریق دهستان باشت به شهرستان گچساران وارد می‌گردد و به رود زهره تغییر نام می‌دهد و پس از مخلوط شدن با رودخانه‌های بابا منیر و هفت قنات و عبور از نواحی جنوبی گچساران به سردشت بهبهان وارد می‌شود. در این دهستان با رودخانه خیرآباد مخلوط شده و به دهستان قلعه کعبی داخل می‌شود و پس از سیراب نمودن تعدادی از روستاهای این دهستان، در روستای سویره یا سورین تغییر مسیر می‌دهد و به سمت جنوب می‌رود و سرانجام در غرب روستای چتله و در جنوب غربی هندیجان به خلیج فارس می‌ریزد. همان‌طور که در فصل ۲ توضیح داده شد، طبق طبقه‌بندی رودخانه‌ها براساس الگوهای مختلف (شکل (۲-۱)) رودخانه زهره واقع در جلگه‌ی هندیجان (بازه مورد مطالعه) یک رودخانه‌ی پیچانرودی، فرسایشی، پیر، دائمی و آبرفتی است.

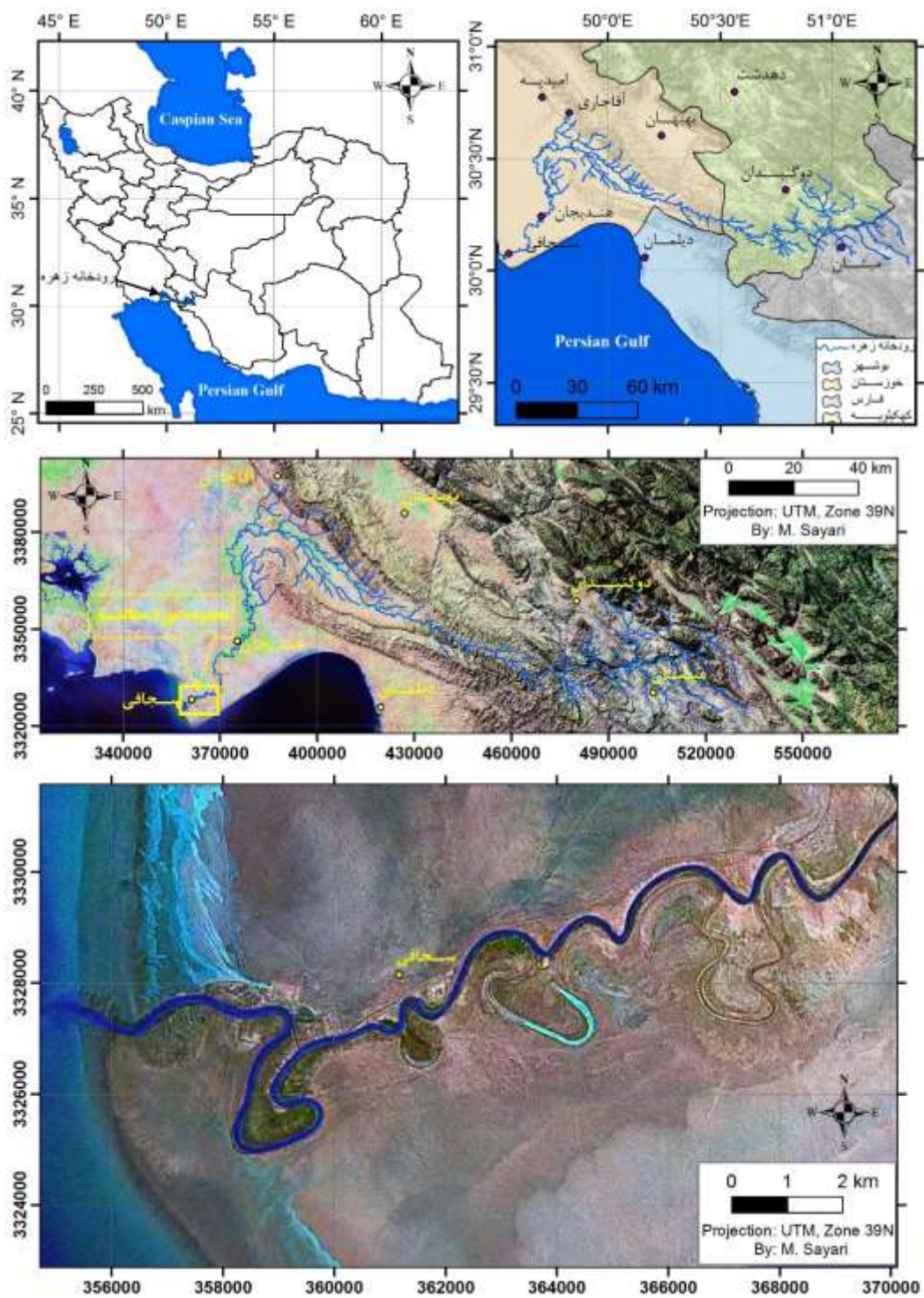
### ۳-۲-۱- محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه (شکل (۳-۱)) در دلتای رودخانه زهره واقع شده، که در حد فاصل شهر هندیجان تا سواحل خلیج فارس، بین طول‌های جغرافیایی  $۳۰^{\circ} ۳۰'$  و  $۴۹^{\circ} ۳۸'$  خاوری و عرض‌های جغرافیایی  $۲^{\circ} ۳۰'$  و  $۳۰^{\circ} ۰۶'$  شمالی قرار گرفته است. طول رودخانه در این بازه ۲۳ کیلومتر است. متوسط بارندگی منطقه ۲۰۰ میلی‌متر (ایستگاه هواشناسی دهملا) که بیشینه بارش در دی‌ماه، ۲۱

درصد بارندگی سالانه را شامل می‌شود و کم‌ترین بارش مربوط به تیر ماه با  $0/1$  درصد است. بالاترین دما در تیرماه با بیش از  $50$  درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین آن در دی ماه است. دبی بیشینه، متوسط و کمینه به ترتیب  $145$ ،  $90$  و  $5/6$  متر مکعب بر ثانیه است (شرکت مهندسی مشاور جاماب،  $1387$ ).

### ۳-۳- مدل عددی

مطالعات تغییرات هیدرولیکی و مورفولوژیکی در رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های فیزیکی مستلزم صرف وقت و هزینه بالایی می‌باشد که در بسیاری از موارد از لحاظ اقتصادی توجیه چندانی ندارد، از این رو بررسی دراز مدت و یا حتی کوتاه مدت این گونه تغییرات بدون استفاده از مدل‌های ریاضی امری تقریباً غیر ممکن می‌باشد. بر این اساس مدل‌های ریاضی مختلفی توسط محققین مختلف برای مطالعه جریان و رسوب در رودخانه‌ها توسعه یافته است که برخی از آن‌ها جنبه تجاری پیدا کرده و به دفعات در پروژه‌های متعدد در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفتند که یکی از آن‌ها مدل CCHE2D می‌باشد.



شکل (۳-۱): موقعیت رودخانه زهره در کشور ایران و استان خوزستان، و نیز موقعیت محدوده مورد مطالعه

### ۳-۳-۱- معرفی نرم افزار

مدل CCHE2D در سال ۱۹۹۷ در مرکز بین‌المللی محاسبات علوم مهندسی آب<sup>۱</sup> توسط وانگ، سام و جیا تحت نظر دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه گردید. در سالیان اخیر مدل مذکور به تدریج توسعه یافته به طوری که نگارش آخر آن (CCHE2D 3.2) از قابلیت‌های زیادی در زمینه شبیه‌سازی آب و رسوب برخوردار می‌باشد. کدهای این برنامه با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن ۹۰ نوشته شده است. به طور کلی این مجموعه شامل دو مدل جداگانه می‌باشد. یکی مدل مش‌بندی و دیگری مدل CCHE2D-GUI. مدل مش‌بندی<sup>۲</sup> با ایجاد قابلیت تولید شبکه ساخت‌یافته<sup>۳</sup> از خطوط منقطع، محیطی ایجاد می‌نماید که حل معادلات آب و رسوب به کار رفته در مدل CCHE2D-GUI را بر اساس روش عددی المان محدود<sup>۴</sup> ممکن می‌سازد. مدل CCHE2D-GUI یک مدل دو بعدی متوسط عمقی می‌باشد که شرایط جریان در این مدل به صورت غیرماندگار است و می‌تواند در این حالت جریان آب و رسوب را بر اساس روش المان محدود شبیه‌سازی کند. شبیه‌سازی جریان آب بر اساس حل معادلات متوسط عمقی ناویر-استوکس می‌باشد. تنش برشی متلاطم با استفاده از تخمین بوزینسک محاسبه می‌گردد و برای محاسبه لزجت گردابه‌ای متلاطم از سه مدل توربولانت مختلف می‌توان استفاده نمود. مجموعه معادلات حاصله به صورت ضمنی با استفاده از روش حجم کنترل و عناصر موثر حل می‌گردند. استفاده از این روش نوسان‌های عددی را از بین برده و حل پایداری ارایه می‌نماید. شبیه‌سازی جریان رسوب (چسبنده و غیر چسبنده) با استفاده از مدل‌های انتقال غیر تعادلی انجام می‌گیرد. از سه روش مختلف انتقال برای شبیه‌سازی بار بستر، بار معلق و بار کل استفاده می‌گردد. معادلاتی که در این قسمت به کار برده می‌شوند عبارتند از معادلات انتقال بار بستر، بار معلق و معادله تغییرات تراز بستر. این معادلات به روش المان موثر<sup>۵</sup> یا تفاضل‌های نمایی حل می‌شوند.

<sup>1</sup> National Center for Computational Hydroscience and Engineering (NCCHE)

<sup>2</sup> Mesh Generator

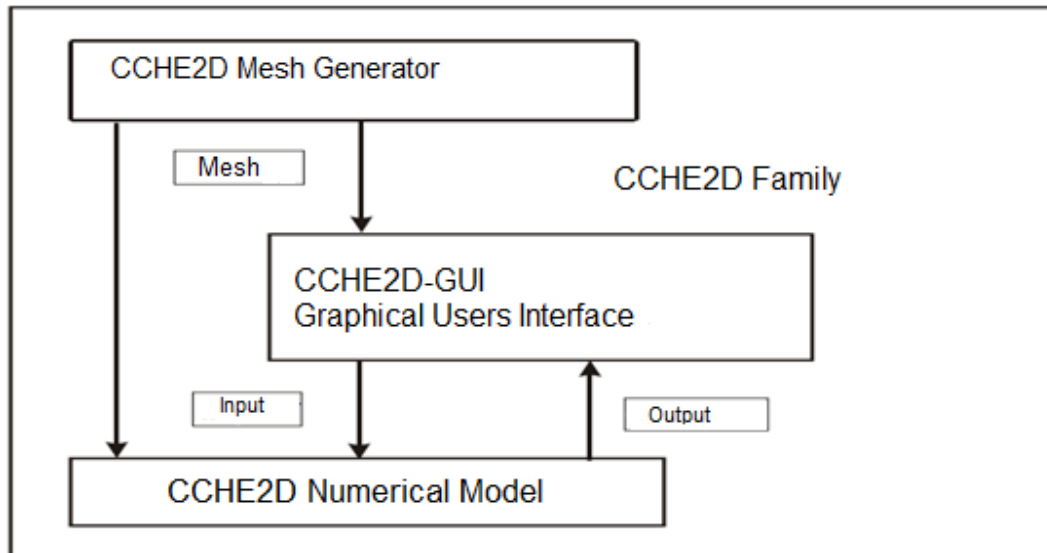
<sup>3</sup> Structured

<sup>4</sup> Finite Element

<sup>5</sup> Efficient Element



شوند. روند به کار گرفته شده در مدل CCHE2D به طور شماتیک در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲): روند شبیه سازی مدل CCHE2D

برای آماده سازی شبکه محاسباتی مورد نیاز CCHE2D، لازم است تا ابتدا با کمک CCHE Mesh Generator محدوده محاسبات به یک شبکه منظم از گره ها با مختصات مشخص تبدیل شود. شبکه حاصل به صورت یک فایل به CCHE2D وارد شده و مرزهای ورودی و خروجی مشخص می گردد. مدل قابلیت استفاده از شرایط مرزی متنوعی را داراست، مانند هیدروگراف دبی در مرز ورودی یا هیدروگراف سطح آب در مرز خروجی، همچنین می توان از شرایط ساده استفاده نمود.

این برنامه برای محاسبه مسائل جریان های ناپایدار بسیار قوی عمل می کند. این نرم افزار برای حل مسائل مربوط به حوزه های آبی ساده و پیچیده از معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی (P.D.E) بعلاوه روش المان محدود استفاده می کند. یک نرم افزار تشکیل شبکه قدرتمند در امر حل

مسائل هیدرولیکی جریان باید دارای خصوصیات و ویژگی های زیر باشد:

- دارای تمامی روش ها و فرمول های مناسب جهت شبکه بندی باشد.
- نتایج و خروجی ها را به صورت گرافیکی ارائه کند.
- دارای محیط کاربری ساده و گرافیکی باشد.

نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D بر اساس ویژگی‌های بالا توسعه یافته است.

### ۳-۳-۲- مراحل استفاده از مدل CCHE2D

برای اجرای شبیه‌سازی در مدل پنج مرحله وجود دارد که در ادامه هر یک از آن‌ها همراه با توضیحات مختصری آمده است.

#### ۱- تشکیل شبکه

گام اول در مدل‌سازی، فراخوانی یک فایل شبکه با پسوند GEO می‌باشد که می‌توان از نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D برای ایجاد این فایل استفاده کرد. فایل شبکه شامل اطلاعات هندسی و شرایط اولیه حوضه مورد نظر مانند مختصات (X,Y)، ارتفاع اولیه بستر، ارتفاع سطح آب، زبری اولیه بستر و مشخصات گره‌ها می‌باشد. در ادامه اطلاعات مختصری در مورد شبکه‌بندی با این نرم افزار آمده است. برای شبکه بندی مسائل مربوط به جریان‌های ناپایدار غیر خطی دو نوع شبکه شامل شبکه‌های ساخت یافته و شبکه‌های بی‌ساخت وجود دارد. در شبکه‌های ساخت یافته تمام گره‌های شبکه با دو اندیس (در شبکه‌های دو بعدی) و سه اندیس (در شبکه‌های سه بعدی) شناخته می‌شوند و دستیابی به آن‌ها آسان است ولی در شبکه‌های بی‌ساخت این ویژگی وجود ندارد و نیاز به جداول اتصال برای شناسایی ارتباط بین گره‌های شبکه است. اصولاً در شبکه‌های ساخت یافته از دو روش تفاضل محدود و حجم محدود استفاده می‌شود ولی در شبکه‌های بی‌ساخت تنها از روش المان محدود استفاده می‌شود. نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D بر پایه شبکه‌های ساخت یافته توسعه یافته است. می‌توان روش‌های به کار رفته در تشکیل شبکه ساخت یافته این نرم افزار را به دو گروه روش‌های عددی و روش‌های جبری تبدیل کرد. نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D دارای شش روش عددی و سه روش جبری برای تشکیل شبکه می‌باشد. روش‌های عددی که از حل معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی بدست می‌آیند، برای تعیین توزیع شبکه و ناهمواری‌های شبکه کاربرد دارند. در این روش امکان ایجاد شبکه‌ای با کیفیت بالا محیا می‌گردد ولی زیاد بودن محاسبات تشکیل شبکه و پیچیده بودن فرمول‌های به کار رفته از معایب آن محسوب می‌شود. روش‌های جبری نیز در تشکیل

شبکه با استفاده از درویابی کاربرد دارند. محاسبه سریع و کنترل مستقیم گره‌های شبکه دو مزیت عمده روش‌های جبری هستند. کیفیت شبکه بدست آمده از این نرم افزار توسط چندین شاخص از قبیل حداکثر انحراف عمودی ( $MDO^1$ )، متوسط انحراف عمودی ( $ADO^2$ )، حداکثر نسبت دید (تابع تغییر شکل) شبکه ( $MAR^3$ ) و متوسط نسبت دید ( $AAR^4$ ) ارزیابی می‌شود. دو شاخص اول معیار راست گوشه بودن شبکه می‌باشند و هرچه این دو معیار کمتر، کیفیت شبکه بالاتر است. دو شاخص بعدی معیار همواری (صاف بودن) شبکه هستند و هر چه این دو مقدار به یک نزدیک‌تر شوند کیفیت شبکه بالاتر می‌رود. در این نرم افزار دو روش برای درونیابی بستر با استفاده از پایگاه داده‌ای توپوگرافی وجود دارد. اولی روش وزنی معکوس فاصله ( $IDW^5$ )، که بر اساس میانگین وزنی می‌باشد و دومی روش دو وجهی ( $PIM^6$ )، که بر اساس یک سطح مثلثی است. در نرم افزار CCHE2D داده‌ها به دو گروه پایگاه داده‌ای تصادفی و پایگاه داده‌ای ساخت یافته تقسیم می‌شوند. در این نرم افزار دو الگوریتم درونیابی برای پایگاه داده‌ای تصادفی شامل الگوریتم درونیابی تصادفی و درونیابی مثلثی وجود دارد، همچنین یک الگوریتم درونیابی برای پایگاه داده‌ای ساخت یافته به نام الگوریتم درونیابی ساخت یافته موجود است.

## ۲- تعیین شرایط اولیه جریان و رسوب

مرحله دوم مدل‌سازی عددی تعیین شرایط اولیه است. تعیین نامناسب شرایط اولیه باعث کاهش فرآیند همگرایی، در نتیجه کاهش دقت نتایج شبیه‌سازی می‌شود. شرایط اولیه به دو بخش شرایط اولیه جریان و شرایط اولیه رسوب تقسیم می‌شود، مانند تعیین ارتفاع اولیه بستر، ارتفاع اولیه سطح آب، زبری بستر و ویرایش شبکه (اصلاح مشخصات گره‌های شبکه و ...).

---

<sup>1</sup> Maximum deviation orthogonality  
<sup>2</sup> Averaged deviation from orthogonality  
<sup>3</sup> Maximum grid aspect ratio  
<sup>4</sup> Averaged grid aspect ratio  
<sup>5</sup> Inverse distance weighting method  
<sup>6</sup> Planer interpolation method

### ۳- تنظیم پارامترها

مرحله سوم تنظیم پارامترهای مدل است. پارامترهای مدل به دو بخش پارامترهای جریان و پارامترهای رسوب تقسیم می‌شود. پارامترهای جریان شامل زبری بستر و مشخصات فیزیکی آب است. پارامترهای رسوب نیز شامل تعیین اندازه ذرات رسوب، تعیین معادلات انتقال رسوب، مدل انتقال رسوب و ... می‌باشد. در این نرم افزار تعدادی از این پارامترهای فیزیکی به صورت پیش فرض وجود دارد. که در بیشتر مواقع نیازی به تغییر آنها نیست.

### ۴- تعیین شرایط مرزی

در مرحله چهارم شرایط مرزی به طور دقیق تعیین می‌شود. برای مدل‌سازی انتقال رسوب، لازم است مشخصات بستر و همچنین مشخصات مقاطع ورودی (تعیین کردن دبی کل ورودی، هیدروگراف دبی ورودی و ...) و خروجی (تعیین کردن ارتفاع سطح آب و منحنی دبی \_ اشل جریان خروجی و ...) را تعیین کرد.

### ۵- شبیه‌سازی و مشاهده نتایج

پس از تشکیل شبکه و تعیین شرایط اولیه و مرزی می‌توان شبیه‌سازی را شروع نمود. شبیه‌سازی عددی براساس شرایط اولیه جریان انجام می‌شود. در بعضی از موارد که شرایط اولیه جریان ناشناخته است، می‌توان با حدس زدن شرایط اولیه جریان به نتایج قابل قبولی رسید ولی هنگامی که جریان ناپایدار است، حدس زدن شرایط اولیه جریان بسیار مشکل است. برای شبیه‌سازی مسائل پیچیده، مانند مسائل مربوط به جریان‌های ناپایدار، لازم است گام‌های زمانی را کوچک در نظر گرفت، زیرا گام‌های زمانی بزرگ ممکن است به نتایج غیر قابل قبولی منجر شود.

### ۳-۳-۳- معادلات حاکم در مدل CCHE2D

### ۳-۳-۳-۱- معادلات اصلی مدلسازی

دو معادله اصلی مدلسازی عبارتند از:

معادله پیوستگی

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

معادله مومنتم (اندازه حرکت)، معادلات (۲-۳) و (۳-۳)

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

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

که در آنها،

$u$  = مولفه سرعت در راستای X

$v$  = مولفه سرعت در راستای Y

$g$  = شتاب ثقل

$Z$  = ارتفاع سطح آب

$\rho$  = دانسیته آب

$h$  = عمق سطح آب در نقطه مورد نظر

$f_{cor}$  = اثر کوریولیس (اثر پیچشی)

$\tau_{xx}$  ،  $\tau_{xy}$  ،  $\tau_{yx}$  و  $\tau_{yy}$  = مولفه‌های تنش برشی رینولدز

$\tau_{bx}$  ،  $\tau_{by}$  = مولفه‌های تنش برشی در سطح بستر

۲-۳-۳-۳-۳ مدل‌های آشفتگی<sup>۱</sup>

در معادلات زیر، تنش برشی رینولدز بر اساس فرضیات بوسینسک تقریب زده شده است.

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

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = Vt \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4-3) \text{ (ب)}$$

<sup>۱</sup> Turbulence Closure

$$\tau_{yy} = 2Vt \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3-4) \text{ (پ)}$$

$v_t =$  ضریب لزجت گردابه‌ای

### ۳-۳-۳-۳ مدل مبتنی بر لزجت گردابه‌ای<sup>۱</sup>

در این نرم افزار برای محاسبه لزجت گردابه‌ای از دو معادله در شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. معادله اول بر اساس مدل سهمی شکل است که ضریب تناسب لزجت گردابه‌ای  $v_t$  با استفاده از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$v_t = \frac{A_{xy}}{6} k U^* h \quad (3-5)$$

که در آن،  $A_{xy}$  = ضریب قابل تنظیم لزجت گردابه‌ای

$U^*$  = سرعت برشی

$k$  = ثابت وون کارمن

دومین معادله براساس مدل طول اختلاط است که ضریب لزجت گردابه‌ای  $v_t$  با استفاده از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$v_t = \bar{I}^2 \sqrt{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2} \quad (3-6) \text{ (الف)}$$

$$\bar{I} = \frac{1}{h} \int kz \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h}\right)} dz = kh \int_0^1 \lambda \sqrt{1 - \lambda} d\lambda \approx 0.267 kh \quad (3-6) \text{ (ب)}$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = C_m \frac{U^*}{kh} \quad (3-6) \text{ (پ)}$$

$$\text{گرادیان قائم سرعت} = \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}$$

و ضریب  $C_m$  برابر است با ۰.۲/۳۴۳۷۵.

<sup>۱</sup> Eddy Viscosity Model

اگر جریان به صورت یکنواخت باشد (در تمام راستای افقی شیب سرعت صفر باشد)، می شود به جای معادله (۳-۵) از معادلات (۳-۶) استفاده نمود.

$$k - \varepsilon \text{ مدل دو بعدی } ۳-۳-۴$$

این مدل از دو معادله دیفرانسیلی برای مدل سازی عددی استفاده می کند. معادلات دیفرانسیلی این مدل عبارتند از:

(۱) انرژی جنبشی جریان متلاطم (k)

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad \text{الف (۳-۷)}$$

$$\varepsilon = \mu_t \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad \text{ب (۳-۷)}$$

(۲) نسبت اتلاف انرژی جنبشی جریان متلاطم (ε)

$$۳-۳-۵ \text{ انتقال رسوب}^1$$

در این بخش اطلاعات مورد نیاز برای مدل سازی (عددی) انتقال رسوب در نرم افزار CCHE2D به طور خلاصه شرح داده شده است.

$$۳-۳-۵-۱ \text{ بار کل}^2$$

بر اساس طبقه بندی لایه های رسوب، حرکت رسوب در راستای عمودی به دو صورت بار معلق (SUSPENDED LOAD) و بار بستر (BED LOAD) تقسیم می شود. بار بستر به آن قسمت از رسوب گفته می شود که در نزدیکی بستر (کف) حرکت کند. بار معلق به آن قسمت از حرکت رسوب گفته که رسوب در راستای عمق جریان معلق باشند و به لایه بالایی بار بستر نیز گفته می شود. نرم افزار CCHE2D قابلیت شبیه سازی بارکل انتقال رسوب را دارد.

<sup>1</sup> SEDIMENT TRANSPORT

<sup>2</sup> TOTAL LOAD

### ۳-۳-۳-۲- انتقال نامتعادل<sup>۱</sup>

از آنجایی که انتقال رسوب بیشتر در شرایط عدم تعادل اتفاق می‌افتد پس لازم است شبیه سازی بار معلق بر اساس مدل انتقال نامتعادل باشد. از طرفی لازم است شبیه‌سازی بار بستر انتقال رسوب در شرایط انتقال نامتعادل به طور جداگانه انجام شود. نرم افزار CCHE2D قابلیت شبیه‌سازی انتقال رسوب در شرایط نامتعادل برای هر دو مورد ( بار بستر و بار کف) را دارا می‌باشد. این نرم افزار از معادله انتقال- انتشار برای مدل‌سازی در حالت بار معلق و از معادله پیوستگی برای مدل‌سازی در حالت بار بستر استفاده می‌کند.

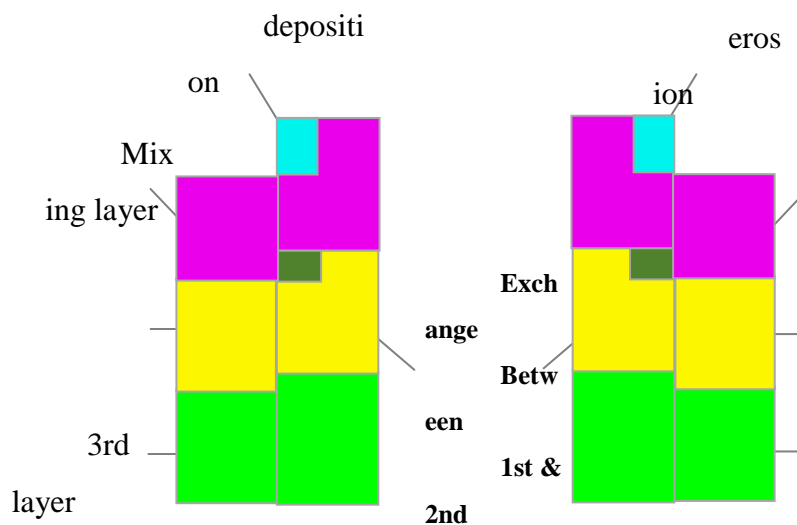
### ۳-۳-۳-۳- طبقه بندی رسوب بستر<sup>۲</sup>

طبقه‌بندی رسوب بستر در راستای عمودی بسیار متغیر است. از این رو رسوب بستر بالای لایه غیرقابل فرسایش (NON-ERODABLE) به چند لایه تقسیم می‌شود. در شکل (۳-۳) TOP LAYER بیانگر لایه بالایی و (MIXING LAYER) بیانگر لایه مختلط و SECOND LAYER بیانگر لایه زیر سطحی است. تغییر(نوسانات) طبقه‌بندی رسوب بستر در TOP LAYER را می‌توان با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی تخمین زد، در صورتی که برای تخمین طبقه‌بندی رسوب بستر در لایه‌های پایینی از قانون بقای جرم استفاده می‌شود.

<sup>1</sup> NON-EQUILIBRIUM TRANSPORT

<sup>2</sup> Bed material sorting





شکل (۳-۳): طبقه بندی رسوب

### ۳-۳-۳-۴- شرایط اولیه<sup>۱</sup>

برای شبیه سازی انتقال رسوب لازم است که اطلاعاتی در مورد مشخصات رسوب، ظرفیت انتقال رسوب، زبری بستر و طول انطباقی بدون تعادل موجود باشد. مشخصات رسوب شامل اندازه ذرات رسوب، وزن مخصوص ذرات رسوب ( مقدار آن به طور پیش فرض برابر ۲/۶۵ است)، فاکتور شکل ذرات رسوب (مقدار آن به طور پیش فرض برابر ۰/۷ است) و ضریب تخلخل رسوب است. ظرفیت انتقال رسوب و زبری کانال و طول انطباقی بدون تعادل با استفاده از فرمول‌های تجربی بدست می‌آیند.

### ۳-۳-۳-۵- فرمول های تجربی<sup>۲</sup>

نرم افزار CCHE2D دارای ۴ فرمول (یا مدل) تجربی برای مدل سازی انتقال رسوب است.

(۱) فرمول ایگرز و وایت<sup>۳</sup> (پرافیت و سوترلند<sup>۴</sup>، ۱۹۸۳)

(۲) فرمول وو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۰)

(۳) مدل SEDTRA (گارپرچت<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۵)

<sup>1</sup> Initial conditions

<sup>2</sup> Empirical formulas

<sup>3</sup> Ackers and White

<sup>4</sup> Proffit and Sutherland

<sup>5</sup> Wu et al.

(۴) فرمول اصلاح شده انگلند و هانسن<sup>۲</sup> (وو و ویرا، ۲۰۰۰)

### ۳-۳-۴- تشکیل شبکه<sup>۳</sup>

مسائل مربوط به این‌گونه مسائل بر پایه حل معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی (P.D.E) است. درستی و دقت حل معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی بستگی به کیفیت شبکه دارد. برای شبکه‌بندی این‌گونه مسائل دو نوع شبکه وجود دارد: شبکه‌های ساخت یافته و شبکه‌های ساخت نیافته (بی ساخت).

در شبکه‌های ساخت یافته تمام گره‌های شبکه با دو اندیس (در شبکه‌های دو بعدی) و یا سه اندیس (در شبکه‌های سه بعدی) شناخته می‌شوند و دستیابی به آن‌ها آسان است ولی در شبکه ساخت نیافته این ویژگی وجود ندارد و نیاز به جداول اتصال برای شناسایی ارتباط بین گره‌های شبکه است.

اصولاً در شبکه‌های ساخت یافته از دو روش تفاضل محدود و حجم محدود استفاده می‌شود ولی در شبکه‌های ساخت نیافته تنها از روش المان محدود استفاده می‌شود. نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D بر پایه شبکه‌های ساخت یافته توسعه یافته است. می‌توان روش‌های به کار رفته در تشکیل شبکه ساخت یافته این برنامه را به دو گروه تقسیم کرد:

۱- روش‌های عددی

۲- روش‌های جبری

روش‌های عددی که از حل معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی بدست می‌آیند برای تعیین توزیع شبکه و تعیین ناهمواری‌های شبکه کاربرد دارند و روش‌های جبری با استفاده از درون‌یابی در تشکیل شبکه کاربرد دارند.

---

<sup>1</sup> Garbrecht

<sup>2</sup> Englund and Hansen

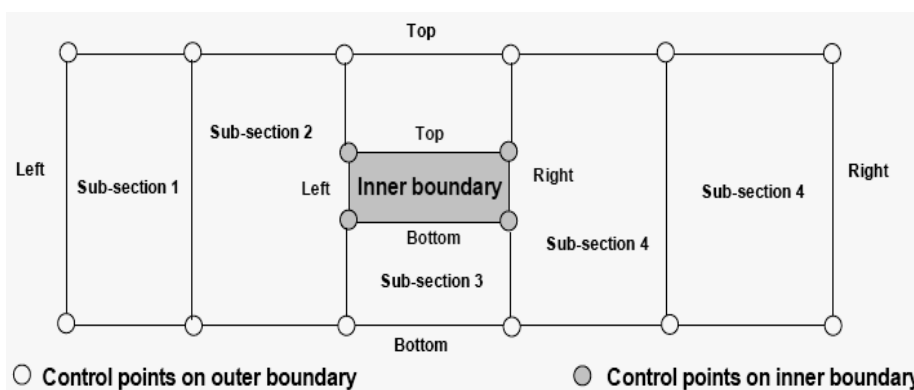
<sup>3</sup> Mesh generation

### ۳-۳-۴-۱- تشکیل شبکه با استفاده از روشهای جبری

محاسبه سریع و کنترل مستقیم گره‌های شبکه دو مزیت عمده روشهای جبری هستند.

#### ۳-۳-۴-۱-۱- روش دولایه مرزی<sup>۱</sup>

روش دولایه مرزی از جمله روشهای جبری برای تشکیل شبکه است. برای کار با این روش به حوزه ساده تک بلوکه شکل (۳-۴) توجه کنید.



شکل (۳-۴): قلمرو یک بلوک واحد

شکل این حوزه توسط لایه‌های مرزی بیرونی کنترل می‌شود. تمام سطح این حوزه توسط لایه های مرزی درونی احاطه شده است و هنگام انجام شبیه‌سازی عددی تمام گره‌های شبکه در این سطح غیرفعال هستند. لایه‌های مرزی درونی و بیرونی از مرز بالا و پایین و مرز چپ و راست تشکیل شده‌است. در روش دو لایه مرزی، مرز بالا<sup>۲</sup> و مرز پایین<sup>۳</sup> از هم مستقل هستند و در کنترل ژئومتری کاربرد دارند. در حالی که مرز چپ و راست وابسته به مرز بالا و پایین می‌باشد. نقاط کنترل در سرتاسر مرز بالا و پایین توزیع می‌شوند تا بدینوسیله شکل کلی این مرزها تخمین زده شود. نقاط کنترل در سرتاسر حوزه‌های مقاطع زیرین<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند.

اصولاً سه مرحله در روش جبری تشکیل شبکه دو لایه مرزی وجود دارد:

۱. تعیین لایه‌های مرزی بیرونی و درونی با استفاده از تعیین نقاط کنترل مرزها.
۲. توزیع نقاط کنترل در مرزها (برای تعیین خطوط کنترل).

<sup>1</sup> Two-boundary methods

<sup>2</sup> Top boundary

<sup>3</sup> Bottom boundary

<sup>4</sup> Sub section

۳. توزیع گره‌های شبکه (گره‌های داخلی) در سرتاسر خطوط کنترل.

توزیع گره‌ها با استفاده از تابع بسط کنترل می‌شود.

تذکر: در صفحات بعد مرز (کران) پایین با اسم مرز اول و کران بالا با مرز دوم شناخته می‌شود.

### ۳-۳-۴-۱-۲- تابع بسط<sup>۱</sup>

تابع بسط کاربرد وسیعی در روش‌های جبری تشکیل شبکه دارد و باعث انعطاف پذیری بیشتر

روش‌های جبری می‌شود.

$$S_j = \sum_1^{j-1} \left[ \frac{2}{\exp(\phi) + \exp(-\phi)} \right]^E / \sum_1^{j-1} \left[ \frac{2}{\exp(\phi) + \exp(-\phi)} \right]^E \quad (الف) (۸-۳)$$

$$\phi = \left[ j - \frac{1}{N} - D \right] \times S \quad (ب) (۸-۳)$$

که در این معادلات،

$S_j$  ترتیب نسبی قرارگیری است.

$j$  بر چسب یک نقطه است.

$N$  کل نقاط در سرتاسر خطوط شبکه است.

$E$  ( $-1, 0, 1$ ) پارامتر نمایی (تشریحی) است.

$D$  پارامتر انحراف است. و  $S$  ( $>0$ ) پارامتر کنترل درجه کشش نقاط است.

تابع بسط هر گره از یک خط ( $AB$ ) از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود (شکل (۳-۵)).

$$x_j = x_A + (x_B - x_A) \cdot S_j \quad (۹-۳)$$



شکل (۳-۵): نحوه توزیع گره‌ها بر روی یک خط

<sup>۱</sup> - Stretching function

### ۳-۳-۴-۱-۳- تشکیل شبکه انطباق پذیر<sup>۱</sup>

در این برنامه از تابع بسط برای تشکیل شبکه انطباق پذیر استفاده می‌شود. زیرا پارامتر  $D$  می‌تواند ترتیب نسبی توزیع نقاط را کنترل کند. در این صورت می‌توان به راحتی یک شبکه ۲ بعدی سازگار برای رودخانه‌های طبیعی ایجاد کرد. پارامتر  $D$  را می‌توان از طریق فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\left[ \frac{N_z \min}{N_j} + \frac{1}{2} \right] D_j = \frac{1}{2} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن،  $N_z \min$  تعداد گره‌هایی که کمترین ارتفاع کف را در برش عرضی<sup>۲</sup> داشته باشند.  $N_j$  تعداد کل گره‌ها در برش عرضی<sup>۳</sup> است.

یک شبکه انطباق پذیر را می‌توان براساس معادلات (۳-۸، ۳-۹، ۳-۱۰) و با کمک معادله

لاپلاس هموار ساز استاندارد (۳-۱۱) تشکیل داد. معادلات (۳-۱۱) الف) و (۳-۱۱) ب):

$$y_i^n = \sum_{K=1}^{N(P_i)} y_K / N(P_i) \quad (الف) (۳-۱۱)$$

$$x_i^n = \sum_{K=1}^{N(P_i)} x_K / N(P_i) \quad (ب) (۳-۱۱)$$

که در این معادلات،

$N(P_i)$  تعداد گره‌ها در نزدیکی  $P_i$  است.

بالانویس  $n$  به معنی مقدار جدید است.

برای ایجاد یک شبکه سازگار باید مراحل زیر طی شود:

۱- ابتدا باید یک شبکه با استفاده از  $E = 0$  یا  $S = 0$  تشکیل شود.

۲- برای تمام گره‌های شبکه ارتفاع بستر<sup>۳</sup> درون‌یابی می‌شود.

۳- ارزیابی پارامتر انحراف  $D$  در هر یک از برش‌های عرضی با استفاده از معادله (۳-۱۵)

۴- انتخاب مقداری مناسب برای پارامترهای  $E$  و  $S$

<sup>1</sup> Generation adaptive mesh

<sup>2</sup> Cross section

<sup>3</sup> Bed elevation

تشکیل شبکه‌ای دیگر با استفاده از E, S, D بدست آمده از مراحل قبلی

۵- هموار کردن شبکه با استفاده از فرمول لاپلاس هموار ساز استاندارد

۶- درونیابی کف برای شبکه نهایی

### ۳-۳-۲- تشکیل شبکه با استفاده از روش‌های عددی

با استفاده از روش‌های عددی امکان ایجاد شبکه‌ای با کیفیت بالا محیا می‌گردد. اما این روش

دارای دو عیب عمده است :

۱- محاسبات تشکیل شبکه بسیار زیاد می‌شود.

۲- فرمول‌های به کار رفته در روش‌های عددی برای تشکیل شبکه بسیار پیچیده هستند.

روش برای تشکیل شبکه از طریق حل معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی استفاده می‌شود.

سیستم معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی مورد استفاده در روش‌های عددی شامل سیستم

بیضوی و سیستم هذلولی، سیستم سهموی و سیستم تغییر لاپلاسی است.

### ۳-۳-۲-۱- سیستم تشکیل شبکه<sup>۱</sup> TTM

سیستم بیضوی در تشکیل شبکه‌های دو بعدی کاربرد وسیعی دارد که از طریق معادله لاپلاس

برای تابع جریان و تابع پتانسیل سرعت بدست می‌آید. دو نوع سیستم بیضوی به طور وسیع استفاده

می‌شود:

(۱) سیستم TTM

(۲) سیستم RL

سیستم TTM از فرمول پواسون و فرمول زیر برای تشکیل شبکه استفاده می‌کند:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P(\xi, \eta) \quad (۳-۱۲) \text{ (الف)}$$

<sup>۱</sup> TTM mesh generation system

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q(\xi, \eta) \quad (ب)(۱۲-۳)$$

$\xi$  و  $\eta$  = سیستم مختصات محاسباتی

$X, Y$  = سیستم مختصات فیزیکی

$P, Q$  = توابع کنترل هستند

معادله لاپلاس (۱۷-۳) سیستم TTM ناهمگن (غیر متجانس) نامیده می‌شود. در فضای

محاسباتی معادله لاپلاس به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$\alpha \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \delta \left( P \frac{\partial x}{\partial \xi} + Q \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) \quad (الف)(۱۳-۳)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + \delta \left( P \frac{\partial y}{\partial \xi} + Q \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) \quad (ب)(۱۳-۳)$$

که در این دو معادله،  $\alpha = g_{22}$ ،  $\beta = g_{12}$ ،  $\gamma = g_{11}$ ،  $\delta = g$  و  $g$  تانسور متریک است و از

ماتریس زیر بدست می‌آید:

$$g = \begin{vmatrix} (x_\xi^2 + y_\xi^2) & (x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \\ (x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) & (x_\eta^2 + y_\eta^2) \end{vmatrix} \quad (پ)(۱۳-۳)$$

در مختصات قائم  $\beta = g_{12} = g_{21} = 0$  است.

اگر طرح تفاضل مرکزی و مختصات قائم را در معادله (۴-۶) جایگذاری کنیم معادله زیر بدست

می‌آید:

$$x_{ij}^n = \frac{\alpha'}{2\alpha' + 2\gamma'} + \frac{5\delta'}{2\alpha' + 2\gamma'} P(x_{i+1,j} - x_{i-1,j}) + \frac{5\delta'}{2\alpha' + 2\gamma'} Q(x_{ij+1} - x_{ij-1}) \quad (الف)(۱۴-۳)$$

$$y_{ij}^n = \frac{\alpha'}{2\alpha' + 2\gamma'} (y_{i-1,j} + y_{i+1,j}) + \frac{\gamma'}{2\alpha' + 2\gamma'} (y_{ij-1} + y_{ij+1}) + \frac{5\delta'}{2\alpha' + 2\gamma'} P(y_{i+1,j} - y_{i-1,j}) + \frac{5\delta'}{2\alpha' + 2\gamma'} Q(y_{ij+1} - y_{ij-1}) \quad (ب)(۱۴-۳)$$

بالا نویس  $n$  در این معادلات، نمایانگر مقدار جدید است و  $(i, j)$  نمایانگر اندیس‌ها (شاخصه‌ها) در سیستم مختصات محاسباتی است.

$$\alpha' = 0.25[(x_{i,j+1} - x_{i,j-1})^2 + (y_{i,j+1} - y_{i,j-1})^2] \quad (14-3) \text{ (پ)}$$

$$\gamma' = 0.25[(x_{i+1,j} - x_{i-1,j})^2 + (c)^2]$$

$$\delta' = [(x_{i+1,j} - x_{i-1,j})(y_{i,j+1} - y_{i,j-1}) - (x_{i,j+1} - x_{i,j-1})(x_{i+1,j} - x_{i-1,j})]^2/16$$

### ۳-۳-۴-۲- سیستم تشکیل شبکه RL<sup>۱</sup>

در سیستم TTM تابع کنترل که برای ایجاد شبکه‌های راست گوشه استفاده می‌شود از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{1}{h_\xi h_\eta} f_\xi \quad Q = \frac{1}{h_\xi h_\eta} \left(\frac{1}{f}\right)_\eta \quad (15-3)$$

که در آن،

$$h_\eta \text{ و } h_\xi \text{ فاکتورهای مقیاس و } h_\xi = g_{11}^{1/2} \text{ و } h_\eta = g_{11}^{1/2} \text{ است.}$$

$f$  نسبت دید (که به آن تابع تغییر شکل هم گفته می‌شود) که از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{h_\eta}{h_\xi} = \left(\frac{x_\eta^2 + y_\eta^2}{x_\xi^2 + y_\xi^2}\right)^{1/2} \quad (15-3) \text{ (الف)}$$

جایگزینی معادله (۱۵-۳) در معادله (۱۴-۳) و بازآرایی آنها باعث ایجاد معادله لاپلاس کوواریان RL که در تشکیل شبکه‌های راست گوشه کاربرد دارد می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(f \frac{\partial x}{\partial \xi}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{f} \frac{\partial x}{\partial \eta}\right) = 0 \quad (15-3) \text{ (ب)}$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(f \frac{\partial y}{\partial \xi}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{f} \frac{\partial y}{\partial \eta}\right) = 0 \quad (15-3) \text{ (پ)}$$

<sup>۱</sup> RL MESH GENERATION SYSTEM



با استفاده از طرح تفاضل مرکزی در معادله (۳-۱۵) برای یک نقطه با اندیس (j, i) در شبکه

فرمول زیر بدست می‌آید:

$$F_{i,j} X_{i,j} = f_{i+1/2,j} X_{i+1,j} + f_{i-1/2,j} X_{i-1,j} + \frac{1}{f_{i,j+1/2}} X_{i,j+1} + \frac{1}{f_{i,j-1/2}} X_{i,j-1} \quad (الف)(۳-۱۶)$$

$$F_{i,j} Y_{i,j} = f_{i+1/2,j} Y_{i+1,j} + f_{i-1/2,j} Y_{i-1,j} + \quad (ب)(۳-۱۶)$$

$$\frac{1}{f_{i,j+1/2}} Y_{i,j+1} + \frac{1}{f_{i,j-1/2}} Y_{i,j-1}$$

که در این معادلات،

$$F_{i,j} Y_{i,j} = f_{i+1/2,j} + f_{i-1/2,j} + \frac{1}{f_{i,j+1/2}} + \frac{1}{f_{i,j-1/2}}$$

نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D، تمام سیستم‌های تشکیل شبکه معرفی شده را دارد.

### ۳-۳-۴-۳- ارزیابی شبکه<sup>۱</sup>

کیفیت شبکه با استفاده از چندین شاخص ارزیابی می‌شود از قبیل حداکثر انحراف عمودی

(MDO)<sup>۲</sup> و متوسط انحراف عمودی (ADO)<sup>۳</sup> حداکثر نسبت دید (تابع تغییر شکل) شبکه<sup>۴</sup> (MAR)

و متوسط نسبت دید<sup>۵</sup> (AAR). MDO و ADO میزان راست گوشه بودن شبکه را ارزیابی می‌کنند و

از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند:

$$MDO = \max(\theta_{i,j}) \quad (الف)(۳-۱۷)$$

$$ADO = \frac{1}{(n_i-2)} \frac{1}{(n_j-2)} \sum_2^{n_i-1} \sum_2^{n_j-1} \max(\theta_{i,j}) \quad (ب)(۳-۱۷)$$

که در این فرمول‌ها،

$n_i$  بیشترین مقدار خطوط شبکه در راستای  $i$  است.

<sup>1</sup> Mesh evaluation

<sup>2</sup> Maximum deviation orthogonality

<sup>3</sup> Averaged deviation from orthogonality

<sup>4</sup> Maximum grid aspect ratio

<sup>5</sup> Averaged grid aspect ratio

$N_j$  بیشترین مقدار خطوط شبکه در راستای  $\eta$  است.

و مقدار  $\theta$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\theta_{i,j} = \arccos \left( \frac{g_{12}}{h_{\xi} h_{\eta}} \right)_{i,j} \quad (18-3)$$

MAR و AAR مقدار همواری (صاف بودن) شبکه را ارزیابی می‌کنند و از طریق فرمول‌های زیر

بدست می‌آیند: معادلات (۱۹-۳) (الف) و (۱۹-۳) (ب)

$$MAR = \max[\max(f_{i,j}, \frac{1}{f_{i,j}})]$$

$$AAR = \frac{1}{(ni-2)} \frac{1}{(nj-2)} \sum_2^{ni-1} \sum_2^{nj-1} \max[\max(f_{i,j}, \frac{1}{f_{i,j}})]$$

۳-۳-۴- درون‌یابی بستر<sup>۱</sup> (کف)

درون‌یابی کف فرآیندی است برای بدست آوردن ارتفاع بستر هر گره از شبکه توسط پایگاه داده‌های (بانک اطلاعاتی) توپولوژی زمین و یا عمق سنجی. پایگاه داده‌ها نقش بسیار مهمی در درون‌یابی بستر دارد. توزیع نقاط در پایگاه داده‌ها و شبکه نباید با هم اختلاف داشته باشند در غیر این صورت دقت شبکه بسیار کم می‌شود. در نرم افزار CCHE2D پایگاه داده‌ها به دو گروه تقسیم می‌شود:

۱- پایگاه داده‌ای تصادفی<sup>۲</sup>

۲- پایگاه داده‌ای ساخت یافته<sup>۳</sup>

در پایگاه داده‌ای ساخت یافته اطلاعات مربوط به هر نقطه و برش عرضی به خوبی سازمان دهی شده‌است در صورتی که در پایگاه داده‌ای تصادفی اطلاعات مربوط به نقاط به طور تصادفی نسبت داده می‌شود. در نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D چند الگوریتم درون‌یابی بستر برای پایگاه داده‌ای مختلف وجود دارد. روش‌های درون‌یابی بستر عبارتند از:

(۱) روش وزنی معکوس فاصله<sup>۴</sup>

<sup>1</sup> Bed interpolation

<sup>2</sup> Randomly database

<sup>3</sup> Structured database

<sup>4</sup> Inverse distance weighting

برای درون‌یابی ارتفاع بستر نقاط  $Z_i$  ( $i=0,1,2,\dots,n$ ) در شبکه  $G$  از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$Z_G = \frac{\sum_i^n w_i Z_i}{\sum w_i} \quad (20-3)$$

که در آن،  $w_i$  فاکتور وزن برای درون‌یابی نقطه  $i$  است.

فاکتور وزن از معکوس فاصله بین درون‌یابی یک نقطه و نقاط شبکه به دست می‌آید.

$$Z_G = \frac{\sum_i^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum \frac{1}{d_i^p}} \quad (21-3)$$

در معادله (۲۶-۳) مقدار  $d$  نشان دهنده اختلاف بین درون‌یابی یک نقطه و نقاط شبکه است و

تابع نمایی (تشریحی)  $P$  برای تنظیم فاکتور وزن است و در این برنامه مقدار آن یک است ( $P=1$ ).

(۲) روش درون‌یابی سطحی (دو وجهی)<sup>۱</sup>

دومین روش درون‌یابی بر اساس یک سطح مثلثی است، شکل (۳-۶). ارتفاع بستر نقاط در

شبکه  $G$  از روش زیر بدست می‌آید. معادلات (۳-۲۷) الف) الی (ج) (۳-۲۷):

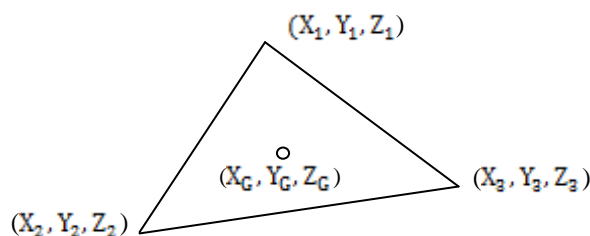
$$a = y_1 \cdot (Z_2 - Z_3) + y_2 \cdot (Z_3 - Z_1) + y_3 \cdot (Z_1 - Z_2) \quad (22-3) \text{ الف)}$$

$$b = z_1 \cdot (x_2 - x_3) + z_2 \cdot (x_3 - x_1) + z_3 \cdot (x_1 - x_2) \quad (22-3) \text{ ب)}$$

$$c = x_1 \cdot (y_2 - y_3) + x_2 \cdot (y_3 - y_1) + x_3 \cdot (y_1 - y_2) \quad (22-3) \text{ پ)}$$

$$d = -x_1 \cdot (y_2 Z_3 - y_3 Z_2) - x_2 \cdot (y_3 Z_1 - y_1 Z_3) - x_3 \cdot (y_1 Z_2 - y_2 Z_1) \quad (22-3) \text{ ت)}$$

$$Z_G = -(a \cdot x_G + b \cdot y_G + d) / c \quad (\text{if } C \neq 0) \quad (22-3) \text{ ج)}$$



شکل (۳-۶): درون‌یابی بر اساس یک سطح مثلثی

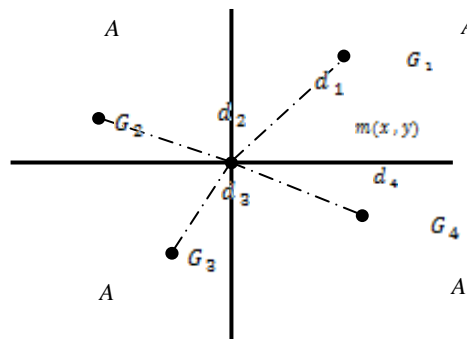
<sup>1</sup> Planar interpolation method

### ۳) الگوریتم های درون یابی

در نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D دو الگوریتم درون یابی برای پایگاه داده ای تصادفی و یک الگوریتم درون یابی برای پایگاه داده ای ساخت یافته است.

#### ۴) پایگاه داده ای تصادفی<sup>۱</sup>

اولین الگوریتم پایگاه داده ای تصادفی در شکل بالا نشان داده شده است. در شکل (۷-۳) در این الگوریتم محل قرار گیری هر یک از گره های شبکه با استفاده از سیستم مختصات دکارتی مشخص می شود. در یک فضای دو بعدی چهار ناحیه وجود دارد و در هر ناحیه نقاطی که کمترین فاصله را با نقاط دیگر در ناحیه های دیگر دارند انتخاب می شوند سپس با استفاده از روش وزنی معکوس فاصله (IDW) ارتفاع بستر را بدست می آوریم. در نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D این الگوریتم را درون یابی تصادفی<sup>۲</sup> می نامند. بعضی موارد هنگام تجزیه و تحلیل ممکن است درون یابی تصادفی دارای اشکالات مهمی باشد (مخصوصاً در شبکه های پیچیده).



شکل (۷-۳) : درون یابی پایگاه داده ای تصادفی

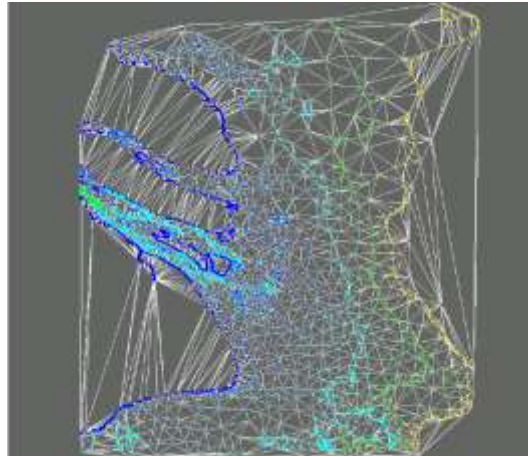
دومین الگوریتم درون یابی مثلث بندی<sup>۳</sup> نام دارد. در این روش ابتدا شبکه مثلث بندی می شود و در هر یک از مثلث های تشکیل شده برای بدست آوردن ارتفاع بستر از روش درون یابی مثلثی استفاده می شود. شکل (۸-۳) چگونگی مثلث بندی یک پایگاه داده ای را نشان می دهد (روش درون یابی مثلث بندی در مقایسه با روش درون یابی تصادفی بسیار پایدارتر است (مخصوصاً در شبکه های

<sup>1</sup> Random database

<sup>2</sup> Random interpolation

<sup>3</sup> Triangulation interpolation

پیچیده). تنها اشکال این روش محاسبات زیاد آن است (مخصوصاً در مورد شبکه های غیر خطی  
( $1 <$ ) که مقدار اطلاعات هر نقطه بیشتر می شود).



شکل (۳-۸) : مثلث بندی داده ها

(۵) پایگاه داده ای ساخت یافته

هر دو روش درون یابی تصادفی و درون یابی مثلث بندی را می توان در پایگاه داده ای ساخت یافته به کار برد. اما بهتر است از الگوریتم خاصی که براساس پایگاه داده ای ساخت یافته توسعه یافته است استفاده کرد. در نرم افزار تشکیل شبکه CCHE2D به این الگوریتم درون یابی ساخت یافته<sup>۱</sup> گفته می شود. برای اصلاح دقت این درون یابی از برآورد داده های مربوط به مقاطع عرضی با توجه به جهت جریان استفاده می شود .

برای اصلاح این الگوریتم باید مراحل زیر انجام شود :

(۱) بدست آوردن داده های نقاط در راستای عرضی تمام مقاطع عرضی با استفاده از درون یابی

خطی

(۲) هر یک از مقاطع عرضی را به سه قسمت تقسیم می شود :

۱- ساحل سمت چپ<sup>۲</sup>

۲- ساحل سمت راست<sup>۳</sup>

<sup>1</sup> Structur interpolation

<sup>2</sup> Left bank

<sup>3</sup> Right bank

### ۳- کانال اصلی<sup>۱</sup>

(۳) در هر یک از مقاطع عرضی داده‌های نقاط در این سه قسمت دوباره توزیع می‌شود.

(۴) بدست آوردن داده‌های نقاط در راستای طولی هر یک از مقاطع عرضی

بعد از انجام مراحل بالا هر یک از نقاط در مقاطع عرضی دارای داده و اطلاعات جداگانه‌ای هستند و باعث ایجاد شبکه ساخت یافته می‌شود و برای تعیین ارتفاع بستر این شبکه از الگوریتم درون‌یابی ساخت یافته استفاده می‌شود. در الگوریتم درون‌یابی ساخت یافته برای بدست آوردن ارتفاع بستر از روش وزنی معکوس فاصله (IDW) استفاده می‌شود. الگوریتم درون‌یابی ساخت یافته در مقایسه با الگوریتم درون‌یابی تصادفی بسیار پایدارتر است ولی نیاز به پایگاه داده‌ای ساخت یافته (داده‌های مقاطع عرضی) دارد.

### ۳-۳-۵- روش انجام کار (اجرای مدل)

داده‌های مورد نیاز برای انجام تحقیق به چند سری دسته‌بندی می‌گردند که به طور کلی

عبارتند از:

(۱) داده‌های توپوگرافی رودخانه

(۲) داده‌های جریان

(۳) داده‌های رسوبی

داده‌های توپوگرافی اولیه برای تولید و درون‌یابی شبکه‌ی Mesh مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی به کار می‌رود. روند مدل‌سازی شبیه‌سازی جریان و رسوب است. نحوه آماده‌سازی و فراهم نمودن اطلاعات مورد نیاز در بخش‌های بعدی شرح داده می‌شود.

### ۳-۳-۵-۱- برداشت مختصات هندسی رودخانه و تولید شبکه مدل

برای شبکه‌سازی جریان، ابتدا بستر رودخانه آماده گردید. بدین منظور، از مدل رقومی

---

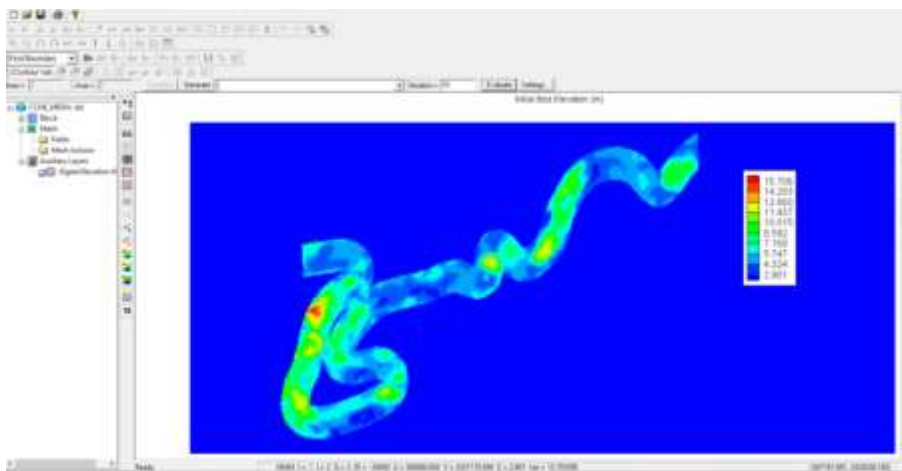
<sup>1</sup> Main channel

ارتفاع (DEM)<sup>۱</sup> رودخانه (شکل (۳-۹)) و وارد کردن آن به نرم افزار CCHE-MESH شبکه سازی انجام شد. شبکه سازی جریان در برنامه‌ی شبکه ساز Mesh Generator انجام می‌شود. برای شبکه سازی بلوک ابتدا باید خطوط مرزی اول و دوم (ساحل راست و چپ) مشخص و ذخیره شوند. سپس مقادیر تعداد خطوط شبکه در مسیر I (تعداد خطوط طولی) و J (تعداد خطوط عرضی) می‌شوند. پس از آن شبکه‌سازی با روش‌های مختلف، بصورت تک و یا ترکیبی انجام می‌شود. پس از شبکه‌سازی بلوک مجدداً با روش‌های شبکه‌سازی، شبکه‌سازی نهایی صورت می‌گیرد (شکل (۳-۱۰)). کیفیت شبکه ساخته شده با پارامترهای موجود در پنجره‌ی Mesh Evaluation که با زدن دکمه‌ی Evaluate ظاهر می‌شود، سنجیده می‌شوند. طبق متن راهنمای نرم افزار، بهترین حالت شبکه‌سازی زمانی است که پارامترهای کیفیت شرایط زیر را داشته باشند:

ADO, MDO : هرچه کوچکتر باشند کیفیت شبکه بهتر است.

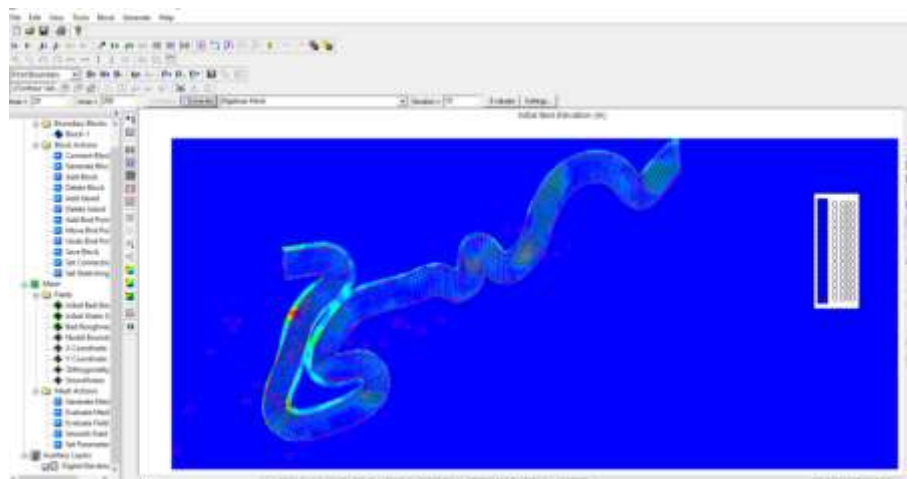
AAR, MAR : هرچه به عدد یک (۱) نزدیک‌تر باشند کیفیت شبکه بهتر است.

با استفاده از روش درون‌یابی تصادفی، درون‌یابی بستر شبکه انجام شد.



شکل (۳-۹): دیتابیس رودخانه

<sup>۱</sup> Digital Elevation Model



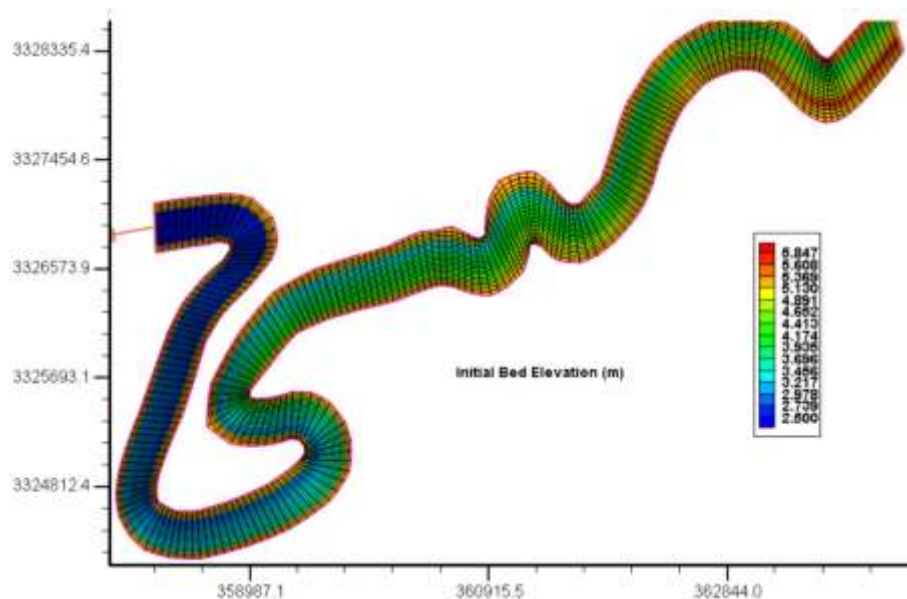
شکل (۱۰-۳): مش بندی رودخانه

برای تولید شبکه ی Mesh مورد نظر ابتدا سطح حوزه بلوک بندی شد و سپس بر اساس بلوک بندی انجام شده طی مراحل شبکه بندی ایجاد گردید. Mesh جبری به عنوان شبکه بندی اولیه تولید می گردد و به هیچ وجه کیفیت لازم را برای فرآیند شبیه سازی نخواهد داشت. در گام بعد باید کیفیت Mesh جبری با روش های عددی بهبود یابد. پس از آزمون و خطا از میان روش های موجود روش [1] RL Orthogonal Mesh with smoothness controls به دلیل بهبود چشمگیر کیفیت Mesh مناسب تشخیص داده شد. پس از اعمال روش عددی پارامترهای ارزیابی کیفیت Mesh به ترتیب زیر به دست آمد:

- $ADO = 2.5$
- $AAR = 1.4$

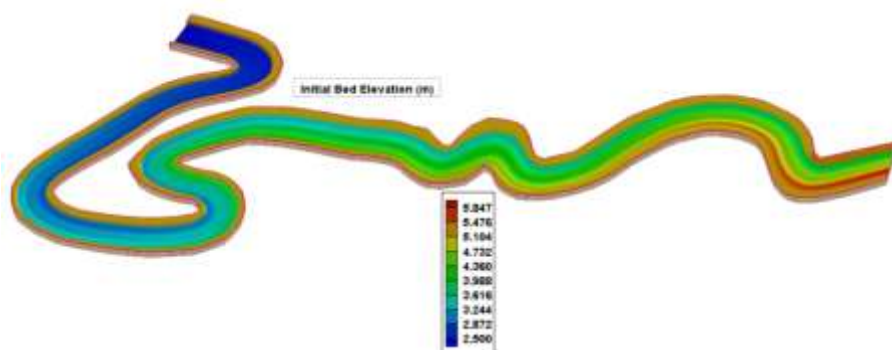
در نهایت شبکه ی با قالب بندی *geo*\* به دست آمده مشابه شکل (۱۱-۳) گردید. نمای سه بعدی رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه، نیز در شکل (۱۲-۳) آورده شده است.





شکل (۳-۱۱): شبکه رودخانه با قالب بندی mesh \*.geo

تعداد  $J_{max}=250$   $I_{max}=20$  به دست آمد.



شکل (۳-۱۲): نمای سه بعدی رودخانه زهره

### ۳-۳-۵-۲- کالیبره کردن

بعد از مش بندی و ایجاد شبکه مناسب، به مرحله شبیه سازی جریان می رسیم اما ضروریست برای بدست آوردن نتایج درست و مطلوب، قبل از آن به کالیبره کردن مدل بپردازیم. با توجه به مراحل حساسیت سنجی، دو پارامتر زیر برای کالیبره کردن مدل (کالیبراسیون) استفاده می شود:

۱- ضریب زبری مانینگ (n)

۲- مدل های آشفستگی

برای کالیبره کردن مدل، سناریوهای مختلف با استفاده از داده های مشاهده ای و در حالت های

مختلف ضریب زبری و مدل های آشفستگی انجام شد. جزئیات سناریوها به شرح زیر است:

مقادیر ضریب زبری مانینگ (n): ۰/۰۱۷ ، ۰/۰۲ ، ۰/۰۲۱ ، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۸

مدل‌های مهم و معمول آشفتگی که در این نرم افزار استفاده می‌شود:

Parabolic Eddy Viscosity Model

Mixing Length Model

K-Epsilon Model

ضریب مدل آشفتگی تنها زمانی باید وارد شود که مدل Parabolic Eddy Viscosity یا

Mixing Length انتخاب شده باشند.

دبی ورودی: ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه

ارتفاع سطح آب در رودخانه: ۴/۶ متر نسبت به سطح دریا

هر سناریو با داده‌های دبی ورودی، ارتفاع آب در خروجی و ارتفاع اولیه آب در رودخانه برای

کالیبره کردن، اجرا شد. در هر شبیه‌سازی، از نتایج بدست آمده، مقدار ارتفاع سطح آب در نرم افزار

محاسبه شد و پس از وارد کردن نتایج در نرم افزار اکسل، با داده مشاهده‌ای (۴/۶ متر) مقایسه گردید

و در هر سناریو میزان خطا محاسبه شد.

در تمام شبیه‌سازی‌ها انجام شده زمان شبیه‌سازی برای کالیبره ۸۶۴۰۰ ثانیه و بازه زمانی

محاسبات ۱ ثانیه بوده است که برای کالیبره کردن کافی می‌باشد. جزئیات شبیه‌سازی‌های انجام شده

جهت کالیبره کردن مدل در جدول (۱-۳) آمده است.

جدول (۱-۳): مراحل کالیبره کردن مدل

| نام مرحله | مدل آشفتگی                     | مقدار ضریب زبری (n) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|
| سناریو ۱  | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۱۷               |
| سناریو ۲  | Mixing Length Model            | ۰/۰۱۷               |
| سناریو ۳  | K-Epsilon Model                | ۰/۰۱۷               |
| سناریو ۴  | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲                |
| سناریو ۵  | Mixing Length Model            | ۰/۰۲                |
| سناریو ۶  | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲                |
| سناریو ۷  | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲۱               |
| سناریو ۸  | Mixing Length Model            | ۰/۰۲۱               |
| سناریو ۹  | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲۱               |
| سناریو ۱۰ | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲۵               |

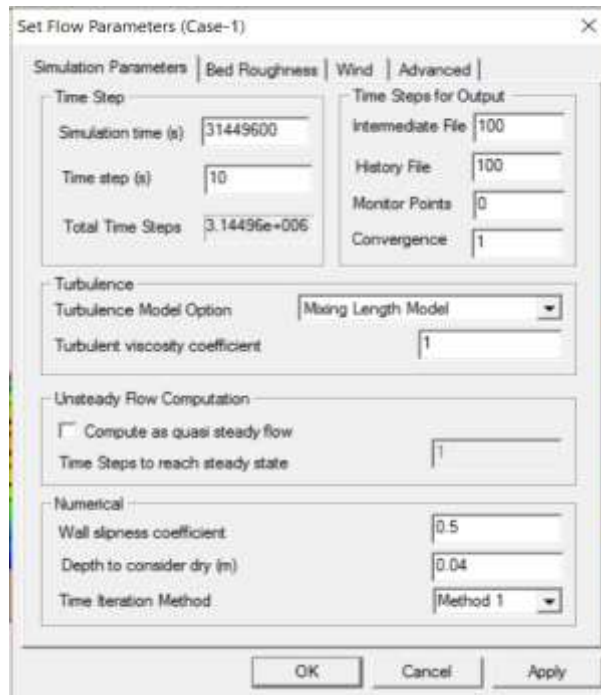
| نام مرحله | مدل آشفتگی                     | مقدار ضریب زبری (n) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|
| سناریو ۱۱ | Mixing Length Model            | ۰/۰۲۵               |
| سناریو ۱۲ | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲۵               |
| سناریو ۱۳ | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲۸               |
| سناریو ۱۴ | Mixing Length Model            | ۰/۰۲۸               |
| سناریو ۱۵ | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲۸               |

### ۳-۳-۵-۳- شبیه‌سازی جریان

این مرحله از شبیه‌سازی، گام اول در بخش CCHE2D-GUI را ایفا می‌کند و باید قبل از شبیه‌سازی انتقال رسوب، برای تعیین و تنظیم شرایط جریان اجرا شود.

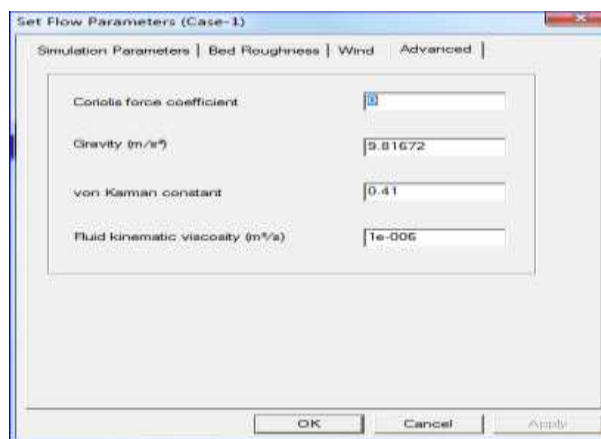
#### ۳-۳-۵-۳-۱- تنظیم پارامترهای جریان

برای تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی، باید به سراغ گزینه Set Flow Parameters رفت. این گزینه شامل ۳ قسمت Bed Roughness, Simulation Parameters و Advanced می‌باشد. ابتدا Simulation Parameters را کامل کرده. در قسمت Simulation time برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی اصلی جریان زمان بیشتری را برابر ۳۱۴۴۹۶۰۰ ثانیه (۳۶۴ روز) را وارد می‌کنیم که نشان دهنده زمان شبیه‌سازی می‌باشد. با تکرار فراوان اجرای نرم افزار برای به دست آوردن بهترین گام زمانی و مشاهده نتایج، گام زمانی را پس از انجام سعی و خطا فراوان برابر ۱۰ ثانیه در نظر می‌گیریم که برای دقت کار ما کافی می‌باشد. گزینه‌های قسمت Time Steps for Output و Numerical را طبق شکل (۳-۱۳) وارد می‌کنیم.



شکل (۳-۱۳): تعیین پارامترهای شبیه‌سازی جریان

صفحه Advanced شامل مقادیر  $g$  (شتاب جاذبه) ثابت فون کارمن و ویسکوزیته سینماتیک می‌باشد که در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده‌است و دارای مقادیر پیش فرضی هستند که با توجه به شرایط این پروژه نیز نیازی به تغییر آن‌ها نیست.

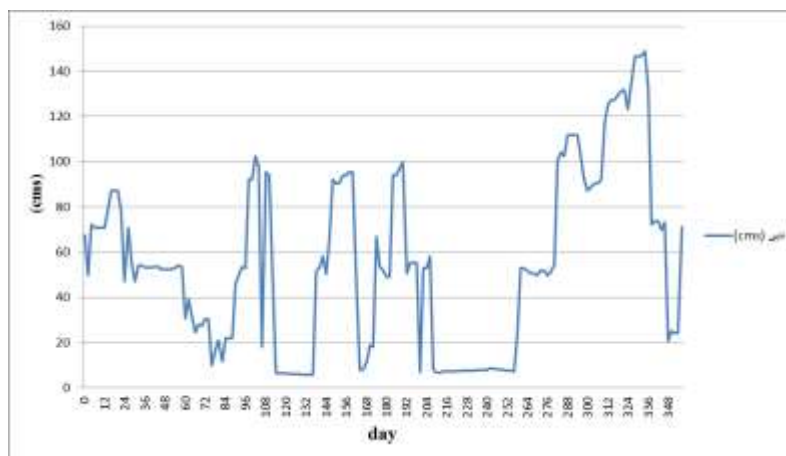


شکل (۳-۱۴): ثابت‌های صفحه Advanced

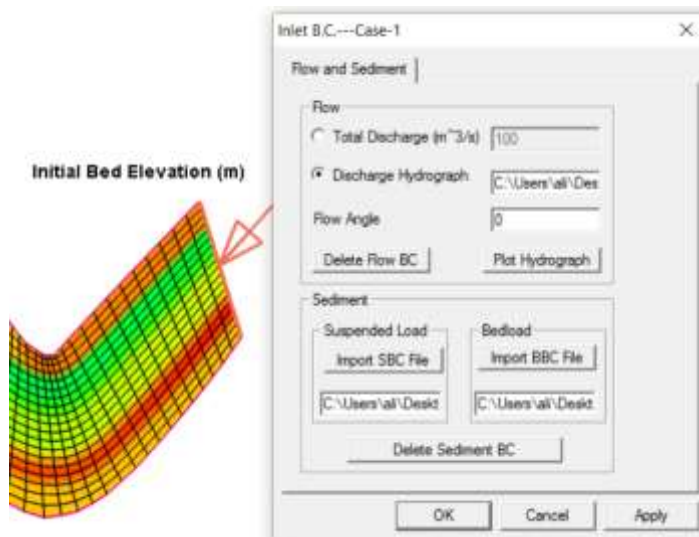
### ۳-۳-۵-۲- داده‌های جریان

داده‌های جریان شامل شرایط اولیه‌ی جریان، شرایط مرزی و پارامترهای جریان در مدل CCHE2D می‌باشند. رقوم اولیه بستر همچنان که پیش‌تر گفته شد از طریق درونیابی Mesh بر اساس

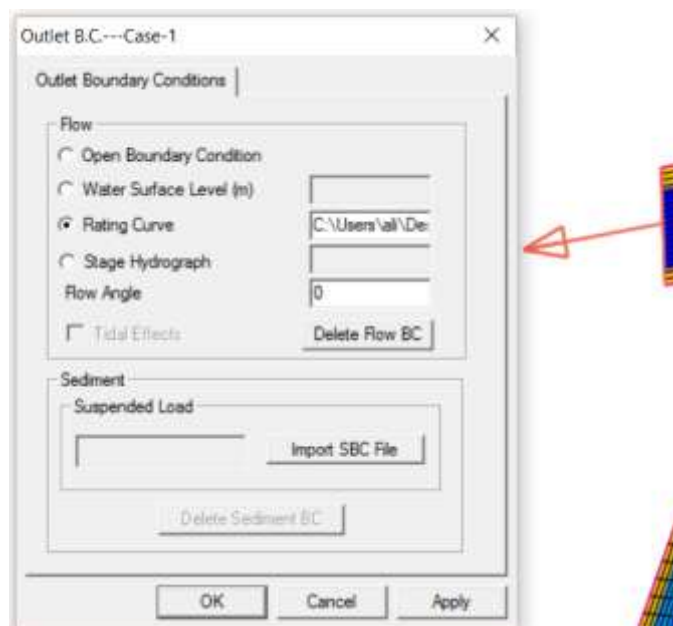
توپوگرافی اولیه رودخانه تعریف شده است. همچنین تراز اولیه‌ی سطح آب متناسب با اشل اندازه گیری شده در ایستگاه هیدرومتری ده‌ملا تعیین گردیده است. شرایط مرزی جریان شامل جریان هیدروگراف متوسط و منحنی اشل-دبی در خروجی می‌باشد (شکل ۳-۱۵)) هیدروگراف جریان متوسط از متوسط‌گیری هیدروگراف‌های ما بین سال ۱۳۶۰ الی ۱۳۹۰ بدست آورده شد. پایین‌ترین دبی ۵/۶ مترمکعب بر ثانیه و بالاترین دبی در زمان سیلابی ۹۸۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. شکل (۳-۱۶) و (۳-۱۷) پنجره‌ی ورود، شرایط مرزی ورودی و خروجی می‌باشد.



شکل (۳-۱۵): هیدروگراف متوسط ۳۰ ساله



شکل (۳-۱۶): شرایط مرزی ورودی



شکل (۳-۱۷): شرایط مرزی خروجی

### ۳-۳-۴-۵-۳-۳- شبیه‌سازی رسوب

پس از کالیبره کردن ضریب زبری و شبیه‌سازی جریان، شبیه‌سازی رسوب را می‌توان انجام داد.

البته برای رسیدن به نتایج مطلوب، بایستی پارامترهای جریان و رسوب را با دقت بالایی تعیین و تنظیم کرد.

### ۳-۳-۴-۵-۳-۳-۱- داده‌های رسوب

به طور مشابه داده‌های رسوب شامل شرایط اولیه‌ی رسوب، شرایط مرزی و پارامترهای رسوب در مدل CCHE2D می‌باشند. شرایط اولیه رسوب عبارتند از قابلیت فرسایش پذیری بستر، بیشینه‌ی ضخامت فرسایش و نهشت، نمونه‌ها و ضخامت لایه‌های رسوبات کف بستر. نمونه‌های بستر بر اساس ترکیب کلاس‌های دانه بندی مواد بستر تعیین می‌گردند. بدین معنی که در هر نمونه درصد هر کلاس با نمونه‌ی دیگر متفاوت می‌باشد.

شرایط مرزی رسوب شامل دبی رسوب معلق، دبی رسوب بستر و درصد کلاس‌های اندازه‌ی قرار گرفته در هر یک می‌باشد. بنابراین برای تعریف شرایط اولیه و مرزی رسوب ابتدا باید کلاس بندی اندازه‌ی دانه‌ها را برای مدل تعریف نمود. کلاس بندی دانه‌ها جزء پارامترهای رسوب در CCHE2D می‌باشد، که در ادامه چگونگی تعیین آن‌ها آورده خواهد شد. پس از تعریف شرایط اولیه،

شرایط مرزی و پارامترهای مدل مربوط جریان و رسوب برای اجرا آماده می‌گردد. لازم به ذکر است شرایط اولیه تنها برای Run اولیه لازم است و برای اجراهای بعدی تنها شرایط مرزی تغییر پیدا می‌کند.

### ۳-۳-۵-۴-۲- انتخاب محل نمونه برداری رسوب

چون حداکثر حمل رسوب در مواقع سیلابی رخ می‌دهد لذا نمونه برداری رسوب می‌بایستی دربرگیرنده طغیان‌ها نیز باشد. مناسب‌ترین محل برای نمونه برداری بخش‌هایی از رودخانه می‌باشد که بهم خوردگی آب در آن شدید است زیرا بدلیل وجود جریان درهم، بار رسوبی بیشتر خواهد بود. اغلب همان محل‌هایی که برای ایستگاههای هیدرومتری در نظر گرفته می‌شود، برای نمونه برداری رسوب مناسب هستند.

### ۳-۳-۵-۴-۳- نحوه نمونه برداری رسوب

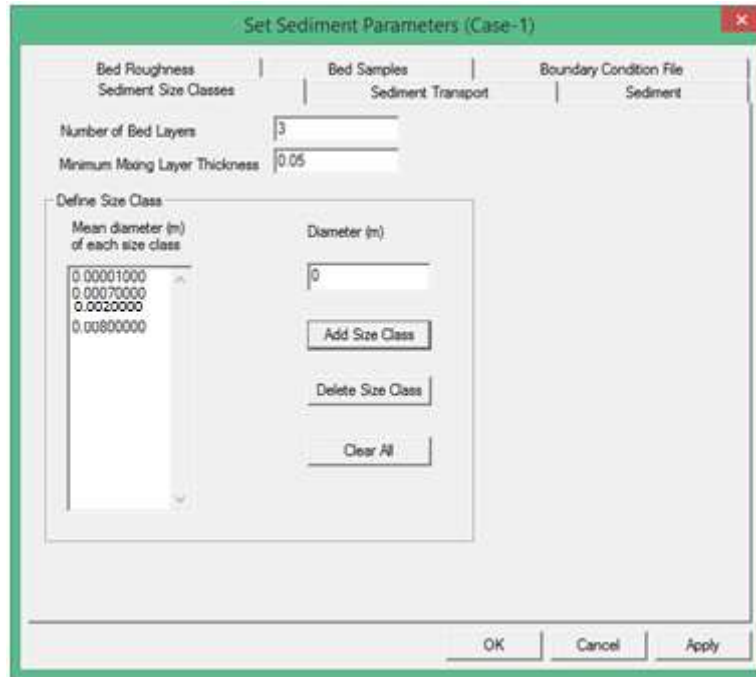
نمونه برداری‌ها توسط متصدیان ایستگاه‌ها از سه نقطه عرضی رودخانه (نزدیک ساحل راست، وسط و نزدیک ساحل چپ)، در یک امتداد، عمود بر جریان، بوسیله نمونه بردار انتگرالی، زیر پل تلفریک یا از روی پل ساختمانی و یا بوسیله قایق برداشت گردیده و سپس هر سه نمونه را مخلوط نموده و در دو بطری ریخته که یکی غلیظ شده برای آزمایش دانه بندی و دیگری برای تعیین میزان رسوب و مواد معلق فرستاده می‌شود.

### ۳-۳-۵-۴-۴- تعیین کلاس بندی اندازه‌ی ذرات رسوبی

برای شبیه سازی رسوب غیریکنواخت تعیین کلاس‌های اندازه‌ی ذرات رسوب و درصدهای هر کلاس برای نمونه‌های مختلف مواد بستر و دبی‌های رسوب معلق و بستر ضروری است. متناسب با شرایط این پروژه تعریف ۴ کلاس اندازه منطقی به نظر می‌رسد. در این تحقیق کلاس‌های اندازه‌ی تعیین شده برای معرفی به مدل مطابق جدول (۳-۲) می‌باشند. در ادامه پنجره کلاس بندی ذرات را نشان داده شده است (شکل (۳-۱۸)).

جدول (۳-۲): کلاس بندی اندازه ی ذرات رسوب

|   |   |     |      |                 |
|---|---|-----|------|-----------------|
| ۴ | ۳ | ۲   | ۱    | شماره کلاس      |
| ۸ | ۲ | ۰/۷ | ۰/۰۱ | اندازه قطر (mm) |



شکل (۳-۱۸): پنجره ورود کلاس بندی ذرات

۳-۳-۴-۵- تعیین درصد کلاس‌ها برای نمونه‌های مواد بستر، بار معلق و بار بستر

درصد هر کلاس اندازه بر اساس منحنی‌های دانه‌بندی تهیه شده توسط سازمان آب و برق

خوزستان، محاسبه شده و در جدول (۳-۳) برای مواد بستر، بار معلق و بار کف ارائه شده‌اند.

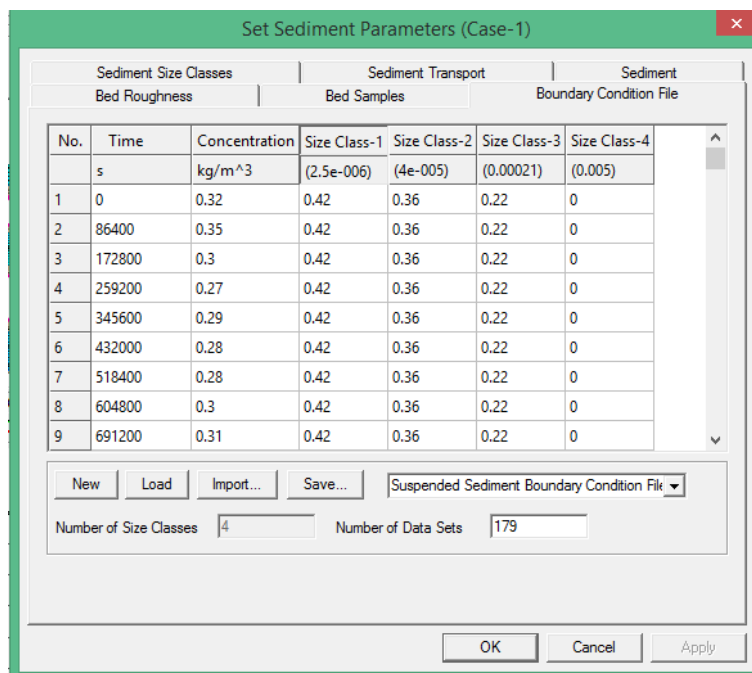
جدول (۳-۳): درصد کلاس بندی اندازه ی ذرات رسوب

|    |    |    |    |                      |
|----|----|----|----|----------------------|
| ۴  | ۳  | ۲  | ۱  | شماره کلاس دانه بندی |
| ۰  | ۲۲ | ۳۶ | ۴۲ | درصد رسوب معلق       |
| ۱۱ | ۲۳ | ۳۴ | ۳۲ | درصد رسوب بستر       |
| ۲۵ | ۲۵ | ۲۵ | ۲۵ | درصد نمونه رسوب کف   |



چنانچه ملاحظه می‌گردد برای بار کف و بار معلق یک ترکیب با درصدهای ثابت معرفی شده است. در واقع فرض می‌شود برای دبی‌های مختلف رسوب اعم از بار معلق یا بار بستر درصد کلاس‌ها تغییر نمی‌کند. به دلیل انتقال غیر تعادلی رسوب از گزینه TOTAL LOAD AS BED LOAD PLUS SUSPENDED LOAD MODEL استفاده شد. در شکل‌های (۳-۱۹) و (۳-۲۰) پنجره ورود اطلاعات رسوب نشان داده شده است.

شکل (۳-۱۹): پنجره ورود اطلاعات رسوب



شکل (۳-۲۰): پنجره ورود درصد هر کلاس

حال مدل آمادگی شبیه‌سازی جریان را دارد که این کار با گزینه Run CCHE2D Model در منوی Simulation صورت می‌گیرد. در این تحقیق مدل برای ۵ سال شبیه‌سازی گردید. که در فصل بعد به بررسی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی می‌پردازیم.

### ۳-۳-۶- اجرای اصلی مدل

بعد از انجام کالیبره و مشخص نمودن بهترین مدل آشفتگی و ضریب زبری مانینگ، مدل برای زمان ۵ دوره زمانی ممتد ۱ ساله (جمعا ۵ سال) و بازه زمانی ۱۰ ثانیه شبیه‌سازی شده است. که در فصل بعد نتایج و تفسیر شبیه‌سازی آورده شده است.

برای طرح پیشنهادی استفاده از آبشکن، شبیه‌سازی جریان برای ۵ دبی ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه انجام شده است که در جدول (۳-۴) قابل مشاهده می‌باشد. نتایج و تفسیر آن در فصل بعد ارائه شده است.

جدول (۳-۴): اطلاعات مطالعات پیشنهادی

| آزمایش | آبشکن         | فاصله آبشکن ها از هم | دبی (m <sup>3</sup> /s) |
|--------|---------------|----------------------|-------------------------|
| ۱      | بدون<br>آبشکن | -                    | ۲۰۰                     |
| ۲      |               |                      | ۴۰۰                     |
| ۳      |               |                      | ۶۰۰                     |
| ۴      |               |                      | ۸۰۰                     |
| ۵      |               |                      | ۱۰۰۰                    |
| ۶      | آبشکن<br>ساده | ۱۰۴                  | ۲۰۰                     |
| ۷      |               |                      | ۴۰۰                     |
| ۸      |               |                      | ۶۰۰                     |
| ۹      |               |                      | ۸۰۰                     |
| ۱۰     |               |                      | ۱۰۰۰                    |

#### ۳-۴- روش کار در بررسی تغییرات مورفولوژی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

در این تحقیق مورفولوژی و الگوی پیچانرودی رودخانه زهره در دشت ساحلی هندیجان با استفاده از ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، شعاع انحنا، طول قوس، طول موج و غیره مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از اطلاعات پایه مانند: تصاویر ماهواره‌ای Google Earth سه مسیر رودخانه در سه بازه زمانی، سال ۲۰۱۴، سال ۲۰۰۰ و مسیر قدیمی این رودخانه با دقت بالایی شناسایی و ترسیم گردید و برای پردازش‌های بعدی وارد محیط GIS شد. پردازش و محاسبات لازم برای بررسی مورفولوژی محدوده مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار Arc- Map 10/2 صورت گرفت که در فصل چهارم به تفصیل ارائه شده است.



## فصل چہارم

# نتائج

همان‌طور که در فصل ۳ اشاره شد شرط استفاده از مدل عددی کالیبره کردن آن می‌باشد. در تحقیق انجام شده پس از بدست آمدن بهترین ضریب زبری و بهترین مدل آشفتگی با کمترین خطا، در ادامه به شبیه‌سازی مدل اصلی پرداخته شده است و نتایج آن در این فصل آورده شده‌است. بنابراین در این فصل ابتدا به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از نرم افزار CCHE2D که شامل: واسنجی (کالیبراسیون) بخش هیدرولیک مدل، بررسی الگوی جریان و رسوب می‌باشد پرداخته می‌شود و سپس، به مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای برای محدوده مورد مطالعه پرداخته شده است. در ادامه نتایج حاصل از آن‌ها مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفته‌است.

#### ۴-۲- نتایج حاصل از مدل CCHE2D

##### ۴-۲-۱- واسنجی بخش هیدرولیک مدل

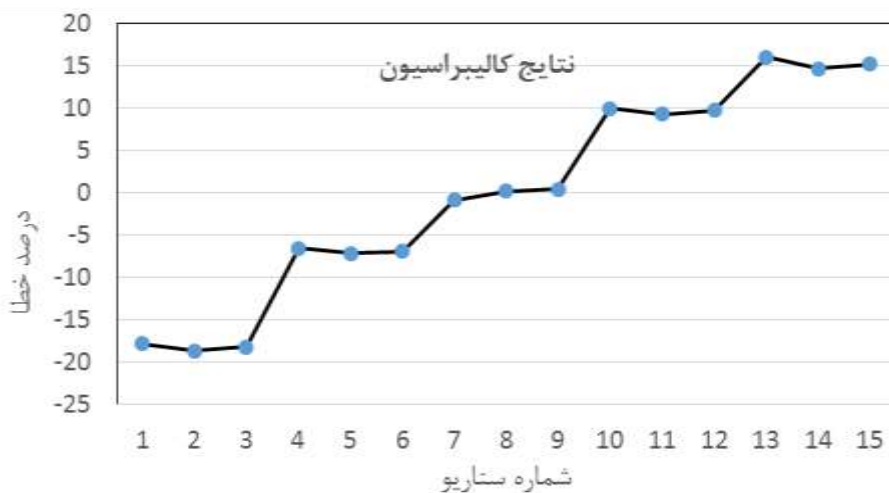
طبق آنچه که در فصل ۳ بیان شد، جهت کالیبراسیون مدل مورد نظر، ابتدا ۵ ضریب زبری در بازه (۰/۱۷-۰/۲۸) در نظر گرفته شد سپس این ضرایب زبری را برای هر سه مدل آشفتگی ذکر شده در فصل ۳، با در نظر گرفتن دبی ۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه و ارتفاع آب ورودی ۴/۶ متر نسبت به سطح دریا و زمان شبیه‌سازی ۸۶۴۰۰ ثانیه (یک روز) و بازه زمانی محاسبات ۱ ثانیه، در ۱۵ سناریو در نرم افزار CCHE2D مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در زیر آمده است.

##### ۴-۲-۱-۱- نتایج کالیبراسیون

طبق نتایج بدست آمده از ۱۵ سناریو انجام شده در کالیبره کردن، کمترین خطا در سناریوها با استفاده از ضریب زبری\_مانینگ ۰/۲۱ و مدل آشفتگی Mixing Length Model بدست آمد. میزان خطا در این حالت ۰/۲۱٪ می‌باشد. در ادامه با استفاده از مقادیر بدست آمده در فرآیند کالیبره کردن، مراحل بعدی شبیه‌سازی انجام شده‌است. جزئیات سناریوهای انجام شده جهت کالیبره کردن مدل در جدول (۴-۱) آمده است. جهت درک بهتر نتایج کالیبراسیون، نتایج به صورت نمودار در شکل (۴-۱) آمده است.

جدول (۴-۱): نتایج مراحل کالیبراسیون

| نام آزمایش | مدل آشفتگی                     | ضریب<br>زبری<br>(n) | ارتفاع<br>سطح آب<br>شاهد | ارتفاع سطح آب<br>شبیه سازی<br>شده | درصد<br>خطا |
|------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------|
| سناریو ۱   | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۱۷               | ۴/۶                      | ۳/۷۸                              | -۱۷/۸۳      |
| سناریو ۲   | Mixing Length Model            | ۰/۰۱۷               |                          | ۳/۷۴                              | -۱۸/۷۰      |
| سناریو ۳   | K-Epsilon Model                | ۰/۰۱۷               |                          | ۳/۷۶                              | -۱۸/۲۶      |
| سناریو ۴   | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲                |                          | ۴/۳                               | -۶/۵۲       |
| سناریو ۵   | Mixing Length Model            | ۰/۰۲                |                          | ۴/۲۷                              | -۷/۱۸       |
| سناریو ۶   | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲                |                          | ۴/۲۸                              | -۶/۹۶       |
| سناریو ۷   | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲۱               |                          | ۴/۶۴                              | ۰/۸۶        |
| سناریو ۸   | Mixing Length Model            | ۰/۰۲۱               |                          | ۴/۶۱                              | ۰/۲۱        |
| سناریو ۹   | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲۱               |                          | ۴/۶۲                              | ۰/۴۳        |
| سناریو ۱۰  | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲۵               |                          | ۵/۰۶                              | ۱۰          |
| سناریو ۱۱  | Mixing Length Model            | ۰/۰۲۵               |                          | ۵/۰۳                              | ۹/۳۴        |
| سناریو ۱۲  | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲۵               |                          | ۵/۰۵                              | ۹/۷۸        |
| سناریو ۱۳  | Parabolic Eddy Viscosity Model | ۰/۰۲۸               |                          | ۵/۳۴                              | ۱۶/۰۸       |
| سناریو ۱۴  | Mixing Length Model            | ۰/۰۲۸               |                          | ۵/۲۸                              | ۱۴/۷۰       |
| سناریو ۱۵  | K-Epsilon Model                | ۰/۰۲۸               |                          | ۵/۳                               | ۱۵/۲۱       |



شکل (۴-۱): نمودار نتایج مراحل کالیبراسیون

#### ۴-۲-۲- بررسی الگوی جریان و رسوب محدوده مورد مطالعه با نرم افزار CCHE2D

در این بخش: ۱- الگوی جریان و رسوب برای محدوده تقریبی دبی ۱۵۰ متر مکعب بر ثانیه و زیر آن، مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه پارامترهای هیدرولیکی مهم در تغییرات مورفولوژی رودخانه مانند: تنش برشی، سرعت، تغییرات کف و ... مورد بررسی قرار گرفتند و در انتهای آن، نتایج رسوبی رودخانه به صورت تصاویر و تفسیر آن نیز، آماده است. ۲- الگوی جریان و رسوب برای دبی- های سیلابی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن به تفصیل بیان شده است. ۳- طرح پیشنهادی آبشکن در این نرم افزار اجرا شده و نتایج آن ارائه شده است.

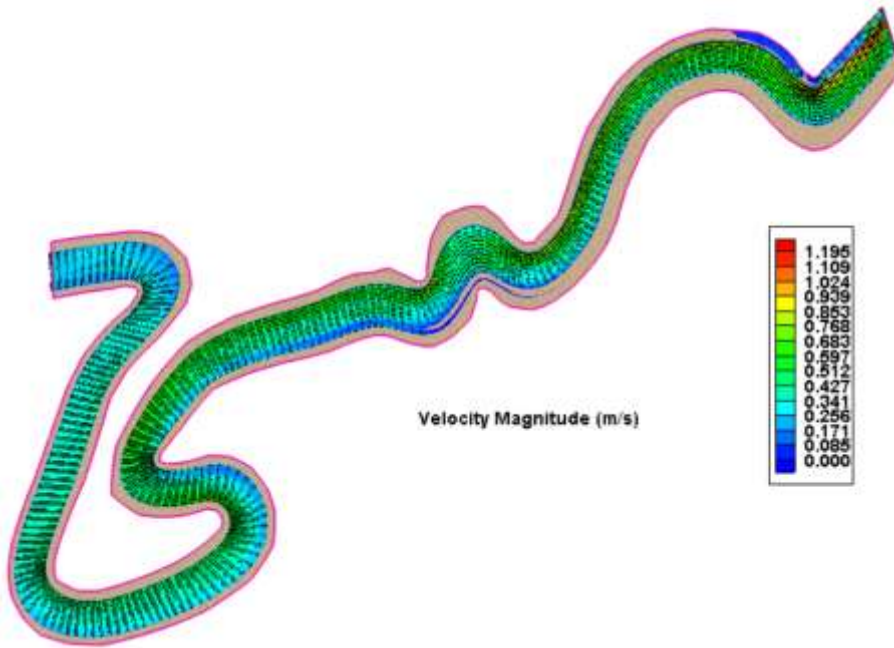
#### ۴-۲-۲-۱- نتایج اجرای اصلی مدل

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در بردارنده‌ی نتایج جریان و رسوب، می‌باشد که به دو صورت، گرافیکی و جدول آمده است.

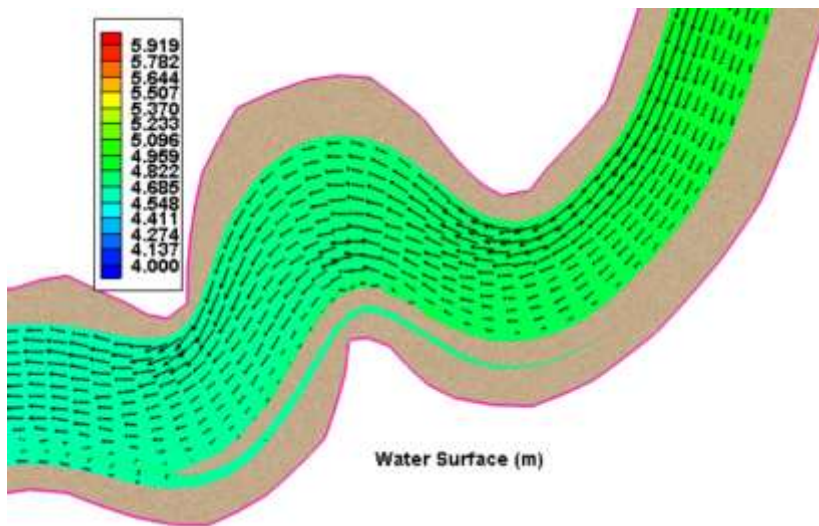
#### ۴-۲-۲-۱-۱- نتایج گرافیکی

نتایج گرافیکی شامل نمای پلان حوزه و چگونگی توزیع پارامترهای هیدرولیکی مورد نظر مانند: سرعت، تنش برشی، تغییرات کف و ... در مدل محاسباتی می‌باشد که در شکل های (۲-۴) تا (۴-۲۶) نشان داده شده‌اند. شکل (۲-۴) نمایی کلی مدل است. بدلیل اینکه در نمای کامل جهت و اندازه بردارهای سرعت مشخص نیست لذا از شکل (۳-۴) تا شکل (۴-۲۶) از نمای نزدیک استفاده شده است. از شکل (۳-۴) الی (۴-۸) نتایج گرافیکی شامل ارتفاع سطح آب نسبت به سطح دریا، عمق آب، سرعت جریان، تنش برشی و عدد فرود در انتهای دوره شبیه‌سازی جریان با دبی تقریبی ۹۰ مترمکعب بر ثانیه آمده است.

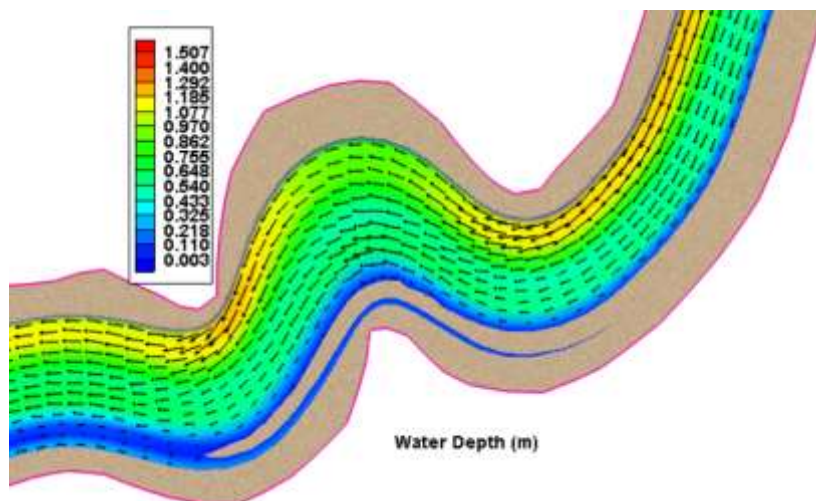




شکل (۲-۴): نمایی کلی مدل (شاهد)



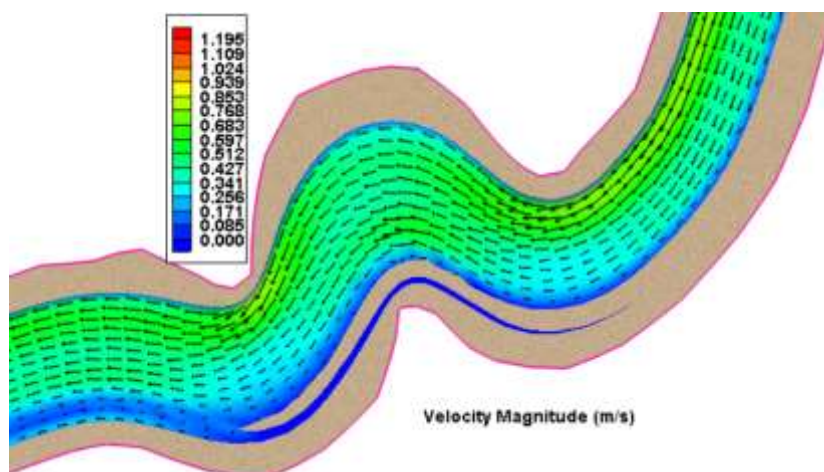
شکل (۳-۴): ارتفاع سطح آب



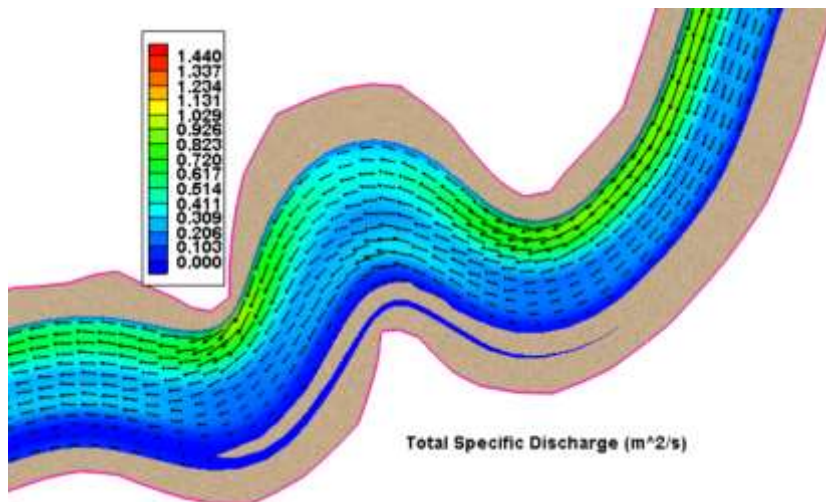
شکل (۴-۴): عمق آب

با توجه به نتایج ارتفاع سطح آب (شکل (۴-۳)) به خوبی می توان صحت عمق آب شبیه سازی

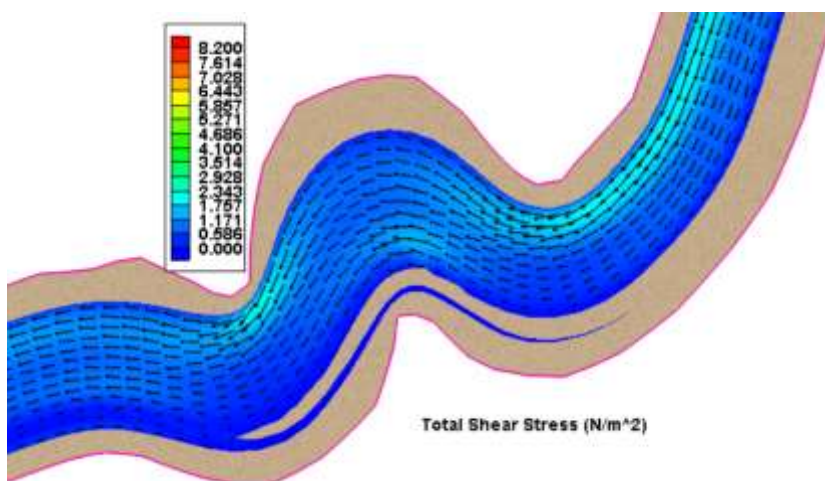
شده را مشاهده کرد.



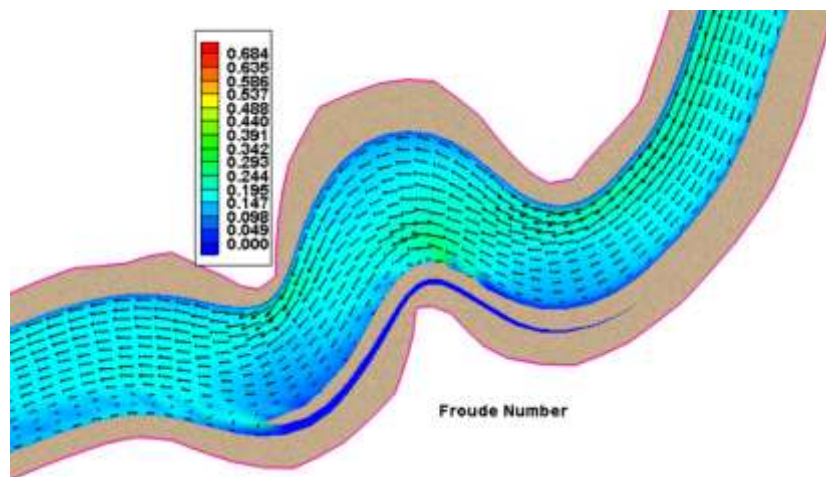
شکل (۴-۵): سرعت جریان



شکل (۴-۶): دبی در واحد عرض

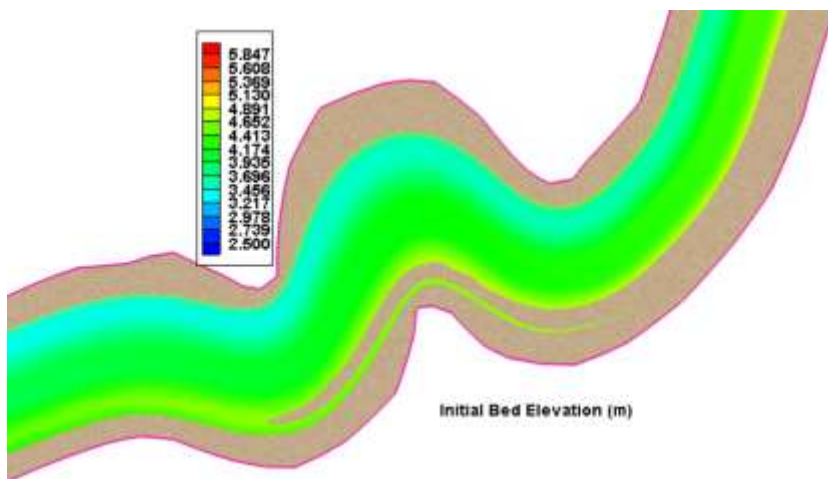


شکل (۴-۷): تنش برشی کف

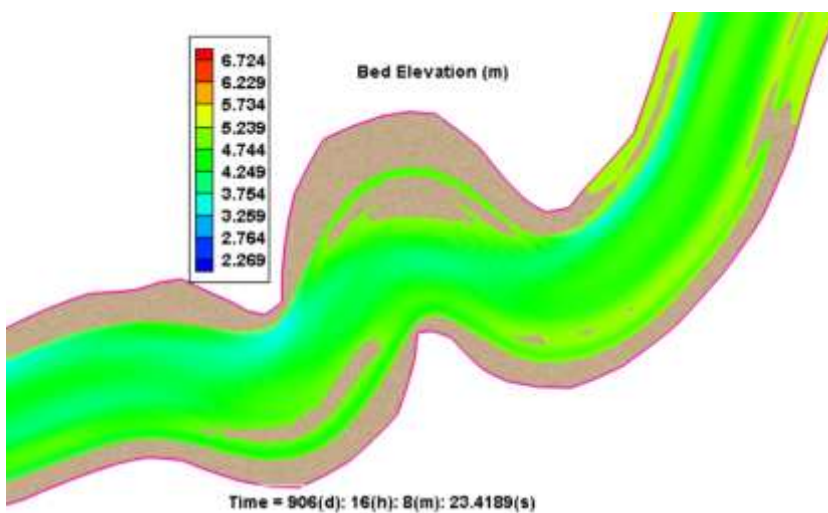


شکل (۴-۸): شاخص فرود

همانطور که از شکل‌های (۴-۳) تا (۴-۸) مشاهده می‌شود شاخص‌های هیدرولیکی شامل سرعت، تنش برشی و ... نشان می‌دهند در دبی‌ها تا ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه که دبی متداول هیدروگراف هستند، در رودخانه عمدتاً پدیده رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد. اما در طغیان‌های سیلابی با بالا رفتن دبی از ۱۵۰ تا ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه که در ادامه به صورت نتایج گرافیکی آماده است، فرسایش قابل مشاهده است. در ادامه نتایج گرافیکی پارامترهای رسوبی شامل رقوم اولیه و رقوم نهایی بستر برای دو دوره ۲/۵ و ۵ ساله، تغییرات کف، درصد ذرات و ... نشان داده شده است. با توجه به نتایج گرافیکی شکل (۴-۹) الی (۴-۱۴) می‌توان دریافت عمده مقطع مورد نظر پدیده رسوب‌گذاری اتفاق افتاده است که این پدیده باعث ایجاد جزیره‌های در وسط رودخانه شده که به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.

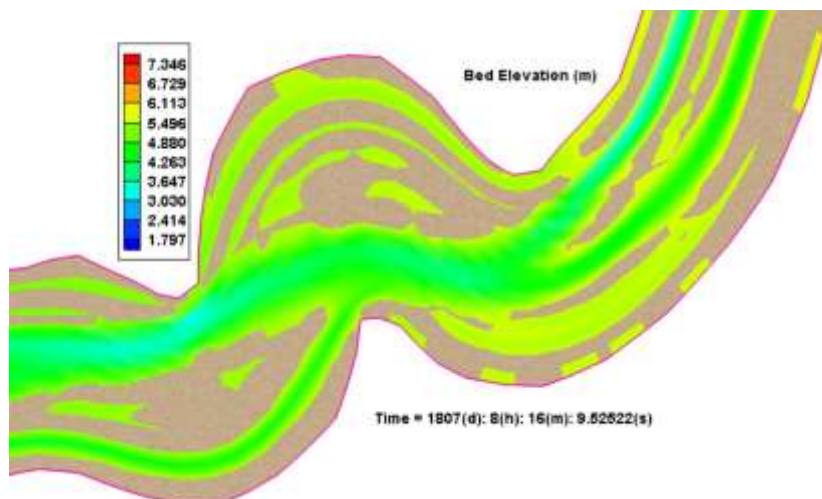


شکل (۹-۴): رقوم اولیه بستر

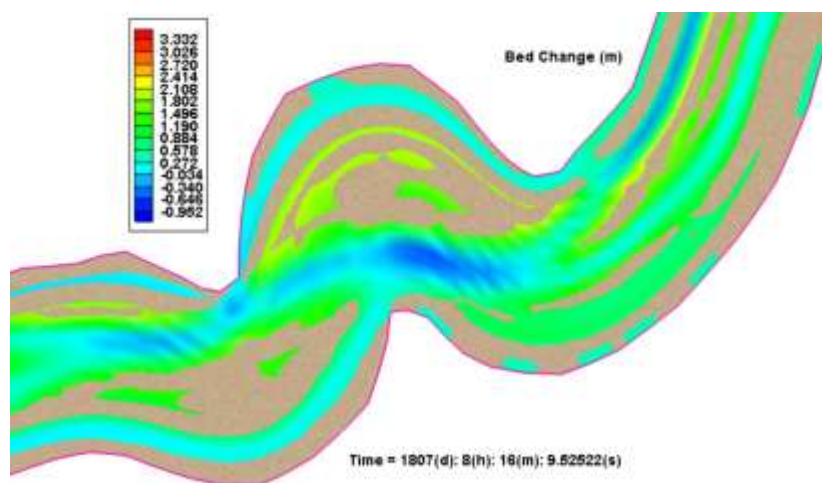


شکل (۱۰-۴): رقوم بستر ۲/۵ ساله

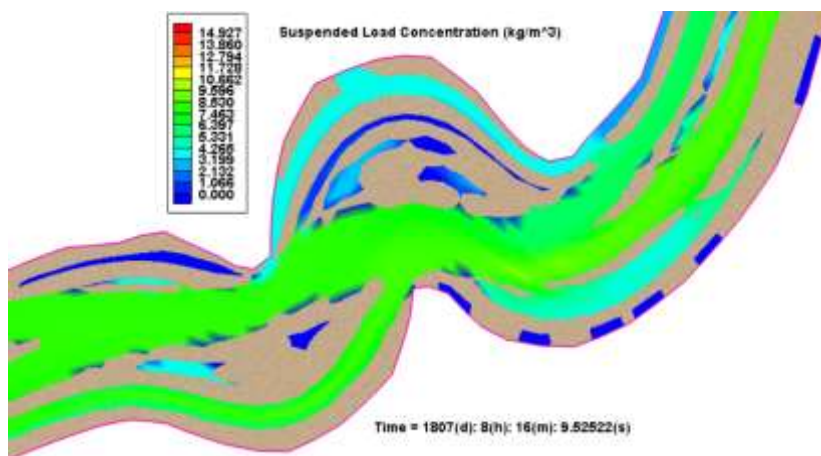
با توجه به رقوم بستر شکل (۹-۴) و رقوم بستر ۲/۵ ساله شکل (۱۰-۴) می‌توان دریافت که روند رسوب‌گذاری و فرسایش، باعث از بین رفتن و صاف شدن قوس رودخانه شده که به خوبی در شکل (۱۰-۴) مشاهده می‌شود.



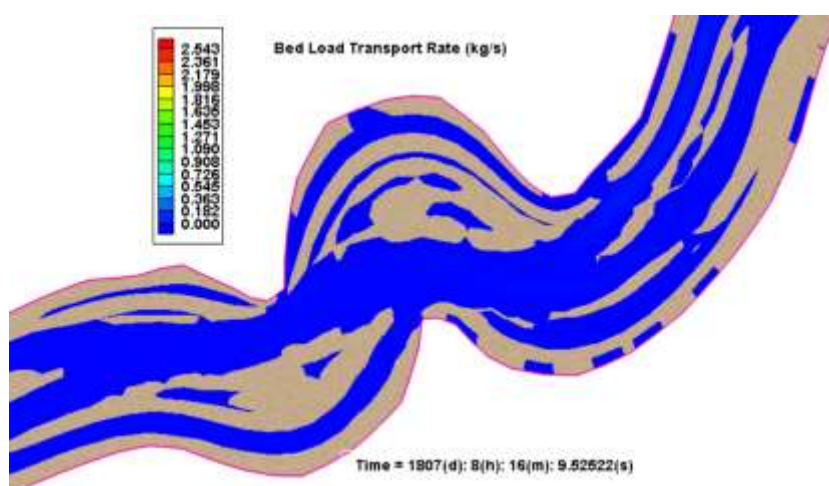
شکل (۴-۱۱): رقوم نهایی بستر ۵ ساله



شکل (۴-۱۲): تغییرات بستر



شکل (۴-۱۳): غلظت بار معلق در پایان دوره

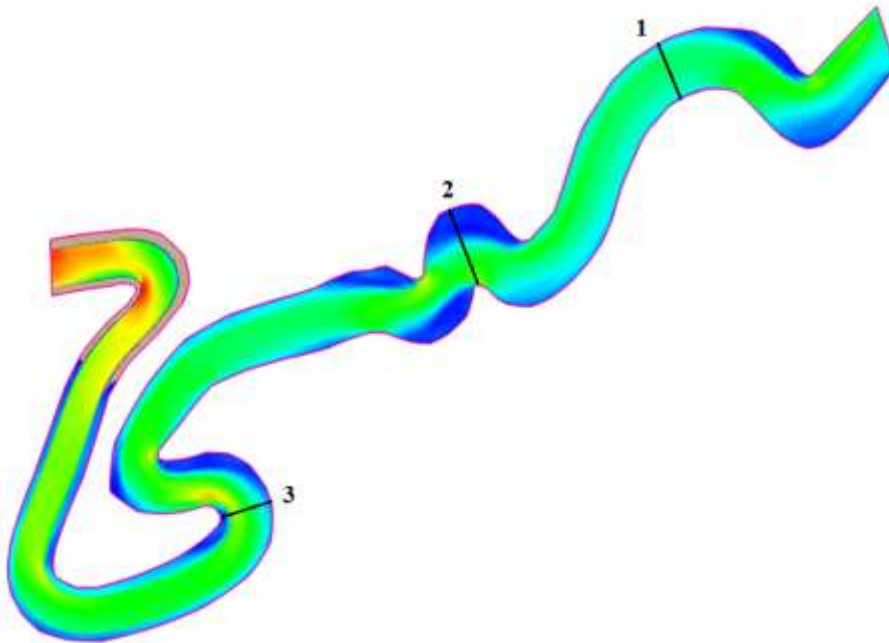


شکل (۴-۱۴): دبی بار بستر در پایان دوره

#### ۴-۲-۲-۱-۲- بررسی نتایج به صورت نمودار

در ادامه به نتایج نموداری سرعت، تنش برشی و تغییرات بستر رودخانه در سه مقطع عرضی پرداخته شده است. به دلیل اینکه قوس‌ها شرایط فرسایش‌پذیری و در نتیجه تغییر مورفولوژیکی بیشتر را دارند، مقاطع انتخاب شده شامل سه مقطع روی قوس در نظر گرفته شد (شکل (۴-۱۵)). در نمودارهای مقاطع محورهای عمودی به ترتیب شامل: بردار سرعت (m/s)، بردار تنش برشی ( $N/m^2$ ) و بردار تغییرات بستر (m) می‌باشند. همچنین به دلیل ناپایدار بودن جریان، نتایج نموداری به صورت

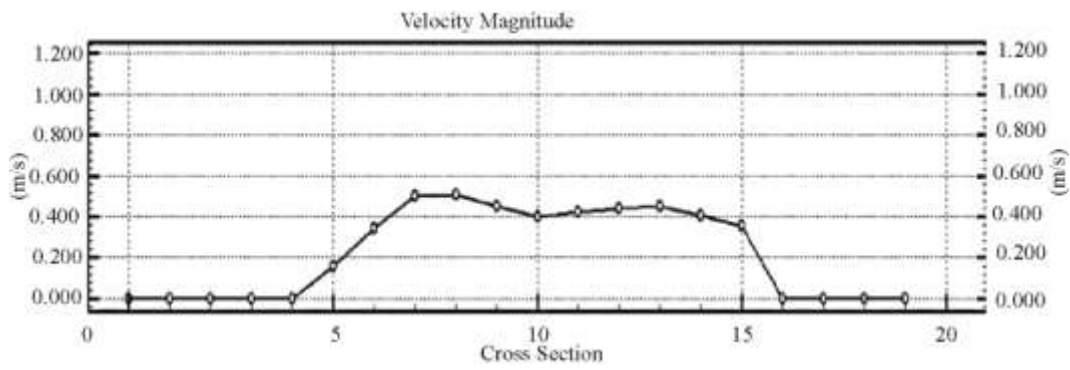
متوسط می‌باشد. با مقایسه نتایج متوسط، سرعت و تنش برشی می‌توان تغییرات بستر رودخانه را توجیح کرد.



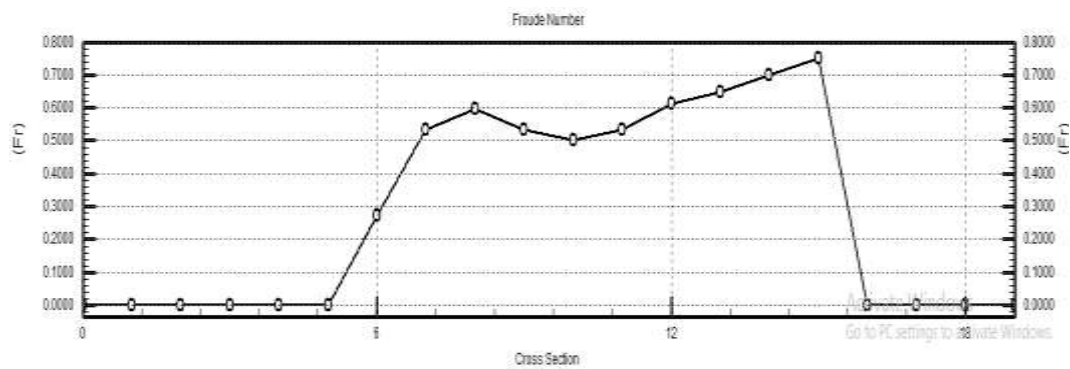
شکل (۴-۱۵): جانمایی مقاطع در حوزه محاسباتی

با توجه به شکل (۴-۱۶) تا (۴-۱۸) در مقطع ۱، متوسط سرعت برابر با  $0.25$  متر بر ثانیه، عدد فرود  $0.4$  و متوسط تنش برشی برابر با  $0.5$  نیوتن بر متر مربع می‌باشد که از سرعت بحرانی ( $0.73$  متر بر ثانیه) و تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) ( $0.71$  نیوتن بر متر مربع) پایین‌تر بوده و باعث بروز پدیده رسوب‌گذاری شده است. با نگاهی به نمودار سرعت و تنش برشی می‌توان دریافت که همانند سرعت، تنش برشی نیز تغییر کرده است و در سمت چپ و راست رودخانه، تنش برشی تقریباً صفر می‌باشد. روند رسوب‌گذاری از ساحل سمت چپ و راست به سمت میانه  $1$  متر بوده و هر چه به سمت وسط رودخانه رفته است اول کاهش و بعد با رسیدن به وسط رودخانه افزایش یافته و به  $1/7$  متر رسوب‌گذاری رسیده است که در نمودار شکل (۴-۱۹) مشخص می‌باشد.

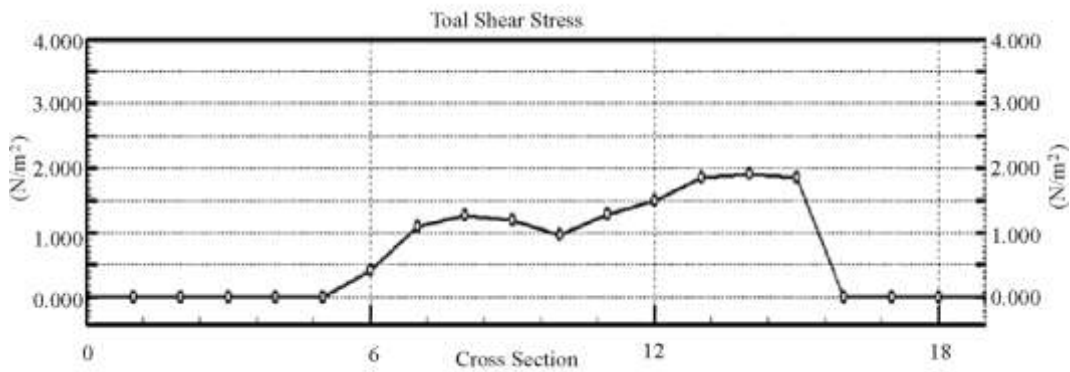




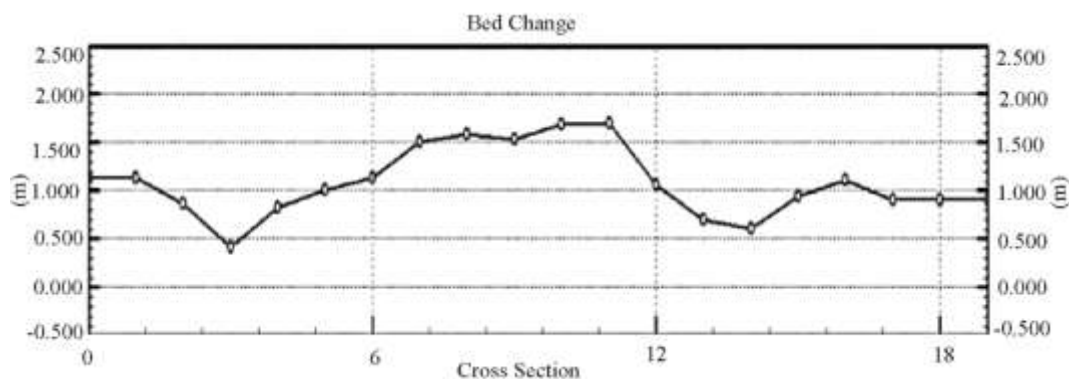
شکل (۴-۱۶): سرعت جریان (مقطع ۱)



شکل (۴-۱۷): نمودار عدد فرود (مقطع ۱)

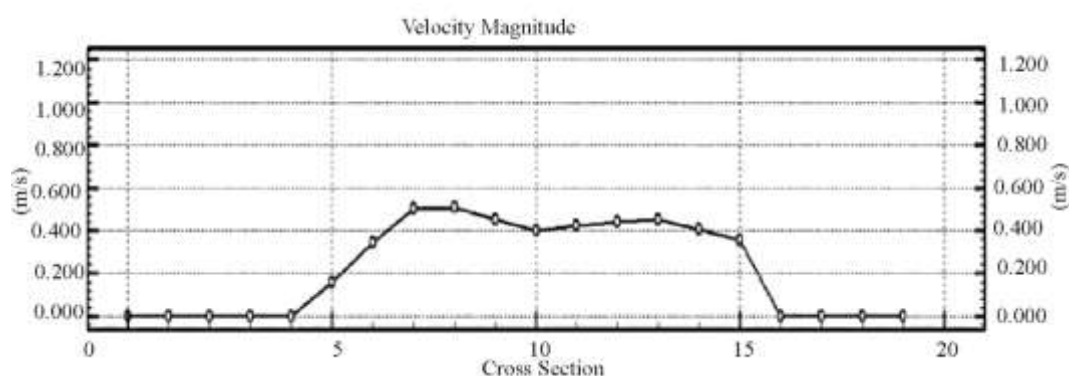


شکل (۴-۱۸): تنش برشی (مقطع ۱)

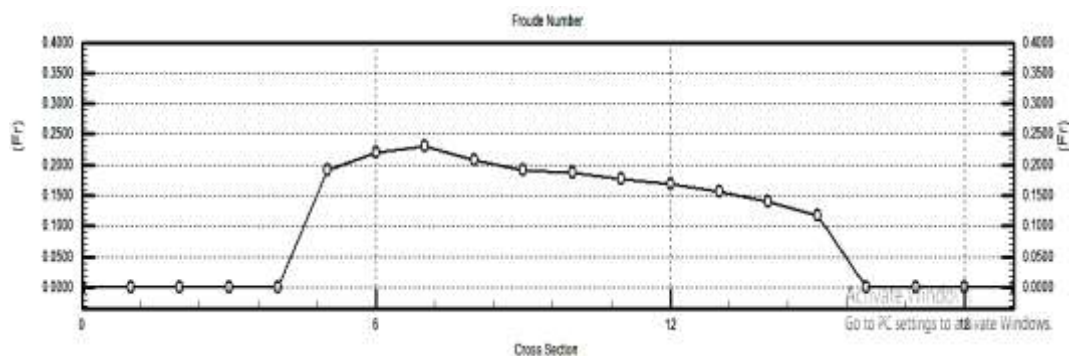


شکل (۴-۱۹): تغییرات بستر (مقطع ۱)

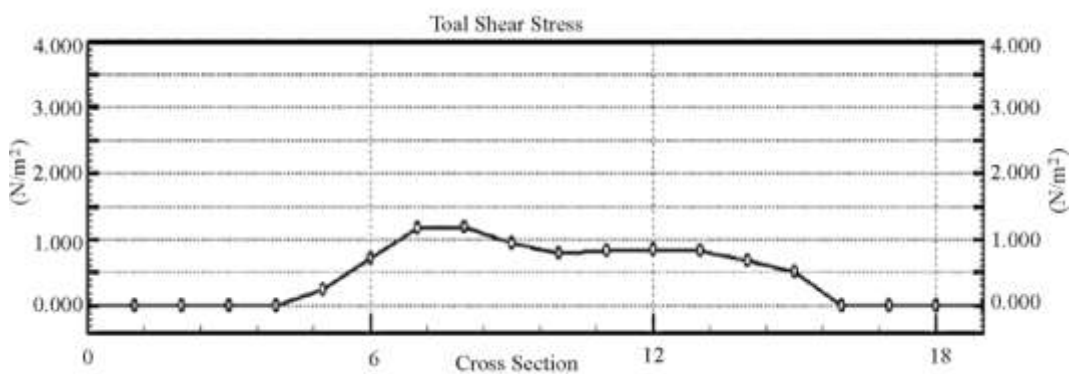
با توجه به شکل (۴-۲۰) تا (۴-۲۲) در مقطع ۲، متوسط سرعت برابر با  $0/2$  متر بر ثانیه، عدد فرود  $0/15$  و متوسط تنش برشی برابر با  $0/5$  نیوتن بر متر مربع می‌باشد که از سرعت بحرانی ( $0/68$  متر بر ثانیه) و تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) ( $0/56$  نیوتن بر متر مربع) پایین‌تر بوده و باعث بروز پدیده رسوب‌گذاری شده‌است با نگاهی به نمودار سرعت و تنش می‌توان دریافت که همانند سرعت، تنش برشی نیز تغییر کرده است و در سمت چپ و راست رودخانه، تنش برشی تقریباً صفر می‌باشد. روند رسوب‌گذاری از ساحل سمت چپ به طرف وسط رودخانه به دلیل سرعت و تنش برشی بالاتر، کمتر بوده اما از سمت راست به سمت وسط رودخانه به دلیل سرعت و تنش برشی کم مقدار رسوب‌گذاری بیشتر بوده و به  $2$  متر می‌رسد که در نمودار شکل (۴-۲۳) مشخص می‌باشد.



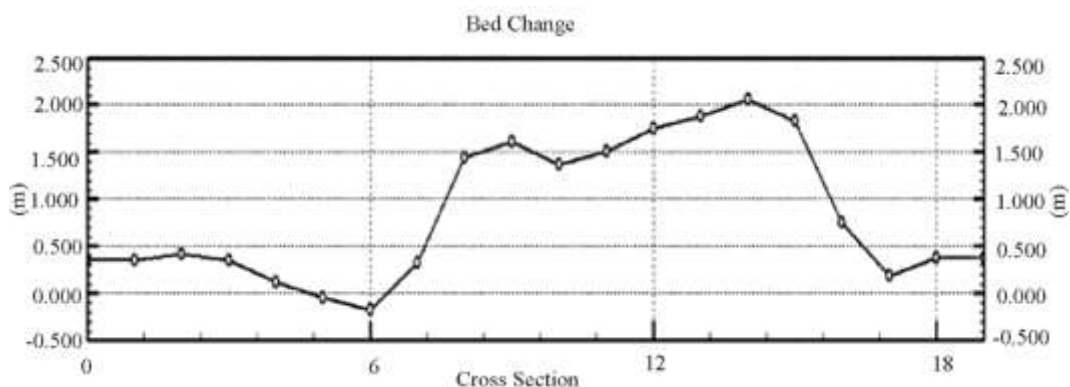
شکل (۴-۲۰): سرعت جریان (مقطع ۲)



شکل (۲۱-۴): نمودار عدد فرود (مقطع ۲)



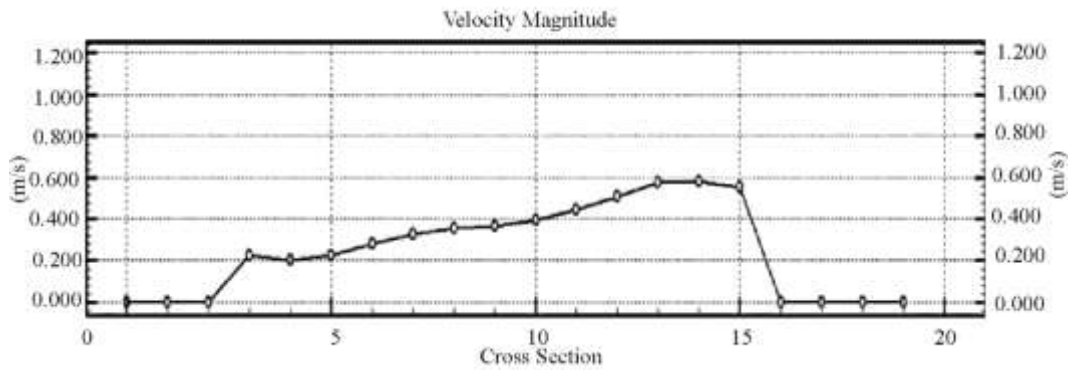
شکل (۲۲-۴): تنش برشی (مقطع ۲)



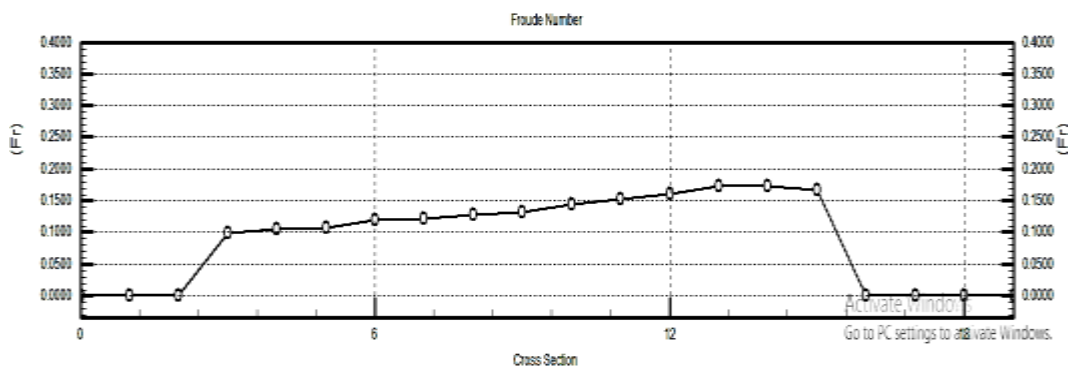
شکل (۲۳-۴): تغییرات بستر (مقطع ۲)

با توجه به شکل (۲۴-۴) تا (۲۶-۴) در مقطع ۳، متوسط سرعت برابر با ۰/۱۹ متر بر ثانیه، عدد فرود ۰/۱۱ و متوسط تنش برشی برابر با ۰/۴ نیوتن بر متر مربع می‌باشد که از سرعت بحرانی (۰/۶۵ متر بر ثانیه) و تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) (۰/۵ نیوتن بر متر مربع) پایین‌تر بوده و باعث بروز پدیده رسوب‌گذاری شده است. با نگاهی به نمودار سرعت و تنش می‌توان دریافت که همانند سرعت، تنش برشی نیز تغییر کرده است و در سمت چپ و راست رودخانه، تنش برشی تقریباً صفر می‌باشد. روند رسوب‌گذاری از ساحل سمت راست به سمت وسط رودخانه به دلیل زیاد بودن سرعت و تنش برشی،

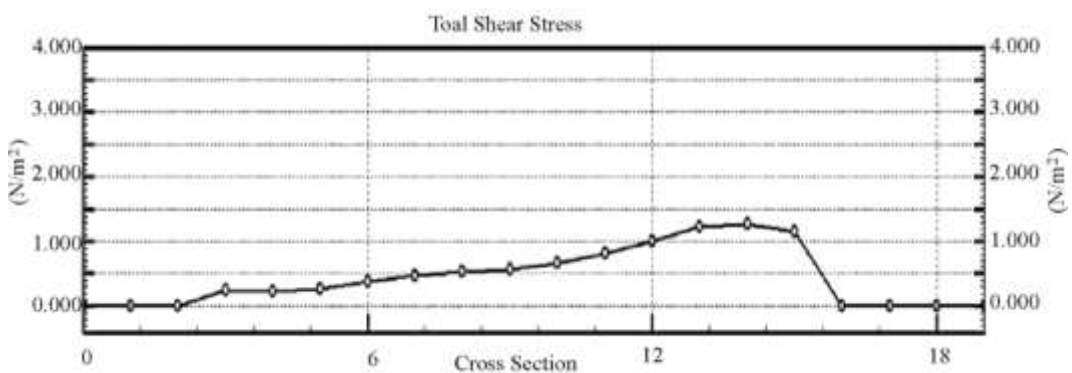
کم می‌باشد ولی از ساحل سمت چپ به سمت وسط رودخانه مقدار رسوب‌گذاری به دلیل کم بودن سرعت و تنش برشی بیشتر بوده است که در نمودار شکل (۴-۲۷) مشخص می‌باشد.



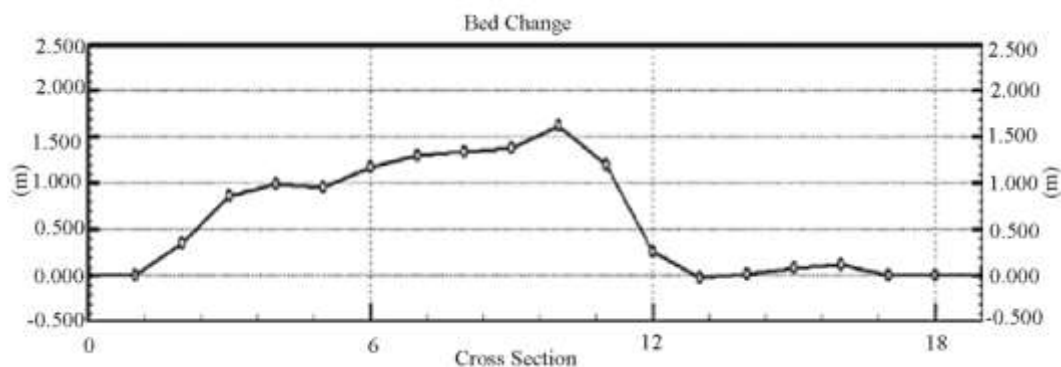
شکل (۴-۲۴): سرعت جریان (مقطع ۳)



شکل (۴-۲۵): عدد فرود (مقطع ۳)



شکل (۴-۲۶): تنش برشی (مقطع ۳)



شکل (۴-۲۷): تغییرات بستر (مقطع ۳)

#### ۴-۲-۲-۲-۲- بررسی درصد رسوب گذاری شده برای هر کلاس

در ادامه درصد رسوب گذاری شده‌ی هر کلاس در هر مقطع در جدول (۴-۲) و نیز به صورت

نمودار آورده شده است.

جدول (۴-۲): درصد کلاس بندی دانه‌های رسوب گذاری شده در مقاطع تعیین شده

| Section | Class 1<br>(mm) ۰/۰۱ | Class 2<br>(mm) ۰/۷ | Class 3<br>(mm) ۲ | Class 4<br>(mm) ۸ |
|---------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| ۱       | ۱/۴                  | ۹۷/۸                | ۰/۶               | ۰/۲               |
| ۲       | ۰/۲                  | ۸۷/۱                | ۱۱/۸              | ۰/۹               |
| ۳       | ۰/۳                  | ۹۷/۷                | ۱/۹               | ۰/۱               |

همانطور که در جدول (۴-۲) نشان داده شده است، در مقطع ۱ عمده ذرات مربوط به کلاس ۲

با قطر ۰/۷ میلی‌متر با ۹۷/۸ درصد می‌باشد. در مقطع ۲ و ۳ نیز عمده ذرات مربوط به کلاس ۲ با

۸۷/۱ و ۹۷/۷ درصد می‌باشد. با بررسی محدوده مورد مطالعه، به این نتیجه رسیده شد کلاس ۱ با

قطر ۰/۰۱ میلی‌متر به دلیل ریزدانه بودن رسوب گذاری بسیار پایینی داشته است. کلاس ۲ با قطر ۰/۷

میلی‌متر، عمده رسوب گذاری در محدوده مورد مطالعه را داشته است. کلاس ۳ با قطر ۲ میلی‌متر،

عمدتاً در خط‌القعر رودخانه رسوب گذاری کرده است. و کلاس ۴ با قطر ۸ میلی‌متر عمدتاً در ابتدای

رودخانه رسوب گذاری کرده است.

#### ۴-۲-۳- بررسی الگوی جریان و رسوب در دبی‌های سیلابی

به دلیل پایین بودن سرعت و تنش برشی در دبی‌های کمتر از ۱۵۰ متر مکعب بر ثانیه مدل برای دبی‌های بالا تا ۱۰۰۰ مترمکعب (دبی پیک سیلابی) نیز شبیه‌سازی انجام شد که نتایج این شبیه‌سازی‌ها در جدول‌های (۳-۴) و (۴-۴) آمده است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی در جدول (۳-۴) می‌توان مشاهده کرد با افزایش دبی از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه سرعت جریان از ۰/۶۵ به ۱/۳ متر برثانیه، تنش برشی از ۱/۷ نیوتن بر متر مربع به ۴/۷۲ نیوتن بر متر مربع و عدد فرود از ۰/۲۱ به ۰/۲۵ رسیده است، که از سرعت و تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) بیشتر می‌باشد و نیز با توجه به نتایج موجود در جدول (۴-۴) برای هر سه مقطع مورد نظر به دلیل بالا بودن پارامترهای سرعت و تنش برشی نسبت به حالت بحرانی آن‌ها در این سه مقطع و در کل رودخانه در محدوده مورد مطالعه برای دبی‌های سیلابی بیشتر پدیده رسوب‌گذاری را خواهیم داشت که باعث بروز پدیده فرسایش و در نهایت ایجاد تغییر در مورفولوژی رودخانه می‌شود. و همچنین باعث تخریب تاسیسات احداث شده در ساحل رودخانه می‌گردد. لذا برای جلوگیری از این پدیده به عنوان طرح پیشنهادی، استفاده از آبشکن در ساحل قوس بیرونی برای جلوگیری از فرسایش، پیشنهاد شد که در ادامه به نتایج شبیه‌سازی این طرح پیشنهادی پرداخته شد است.

جدول (۳-۴): نتایج سرعت و تنش برشی در رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه

| شبه‌سازی | دبی<br>( $m^3/s$ ) | سرعت متوسط<br>( $m/s$ ) | تنش برشی متوسط<br>( $N/m^2$ ) | عدد فرود متوسط<br>(Fr) |
|----------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|
| ۱        | ۲۰۰                | ۰/۶۵                    | ۱/۷                           | ۰/۲۱                   |
| ۲        | ۴۰۰                | ۰/۸۸                    | ۲/۶۱                          | ۰/۲۳                   |
| ۳        | ۶۰۰                | ۱/۰۵                    | ۳/۴۴                          | ۰/۲۴                   |
| ۴        | ۸۰۰                | ۱/۱۸                    | ۴/۱۲                          | ۰/۲۴                   |
| ۵        | ۱۰۰۰               | ۱/۳                     | ۴/۷۲                          | ۰/۲۵                   |

جدول (۴-۴): نتایج سرعت و تنش برشی برای سه مقطع مورد نظر در رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه

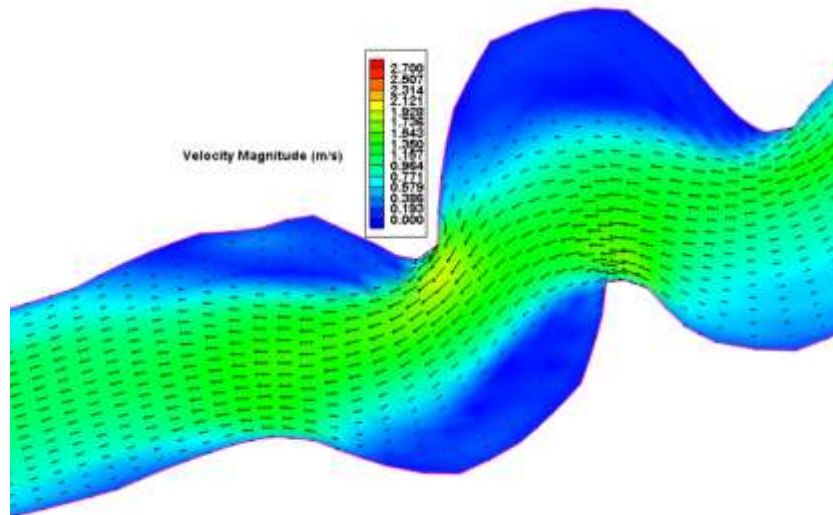
| تنش برشی<br>(N/m <sup>2</sup> ) | تنش برشی<br>بحرانی | سرعت<br>(m/s) | سرعت<br>بحرانی | عمق (m) | مقطع | دبی (m <sup>3</sup> /s) |
|---------------------------------|--------------------|---------------|----------------|---------|------|-------------------------|
| ۱/۷۲                            | ۰/۷۱               | ۰/۸           | ۰/۷۶           | ۵/۵     | ۱    | ۲۰۰                     |
| ۱/۸۱                            | ۰/۵۶               | ۰/۸۷          | ۰/۶۸           | ۵/۱۵    | ۲    |                         |
| ۲/۱                             | ۰/۵                | ۰/۹۵          | ۰/۶۵           | ۴/۵     | ۳    |                         |
| ۲/۸۷                            | ۰/۷۱               | ۰/۸۶          | ۰/۷۷           | ۶       | ۱    | ۴۰۰                     |
| ۳/۷۳                            | ۰/۵۶               | ۰/۹۹          | ۰/۶۹           | ۵/۳     | ۲    |                         |
| ۴/۷                             | ۰/۵                | ۱/۰۸          | ۰/۶۶           | ۵       | ۳    |                         |
| ۴/۹                             | ۰/۷۱               | ۰/۹۳          | ۰/۷۸           | ۶/۵     | ۱    | ۶۰۰                     |
| ۵/۵۲                            | ۰/۵۶               | ۱/۲۴          | ۰/۷۱           | ۶/۲     | ۲    |                         |
| ۶/۱                             | ۰/۵                | ۱/۵           | ۰/۶۷           | ۵/۵     | ۳    |                         |
| ۶/۲                             | ۰/۷۱               | ۰/۹۸          | ۰/۷۹           | ۷       | ۱    | ۸۰۰                     |
| ۶/۸۴                            | ۰/۵۶               | ۱/۴۵          | ۰/۷۳           | ۶/۶     | ۲    |                         |
| ۷/۳                             | ۰/۵                | ۱/۶           | ۰/۶۸           | ۵/۸     | ۳    |                         |
| ۷/۵                             | ۰/۷۱               | ۱/۱۳          | ۰/۸            | ۷/۲     | ۱    | ۱۰۰۰                    |
| ۸/۸۱                            | ۰/۵۶               | ۱/۶۶          | ۰/۷۴           | ۷       | ۲    |                         |
| ۹/۸                             | ۰/۵                | ۱/۸۱          | ۰/۶۸           | ۶/۲     | ۳    |                         |

#### ۴-۲-۲-۴- بررسی طرح پیشنهادی استفاده از آبشکن

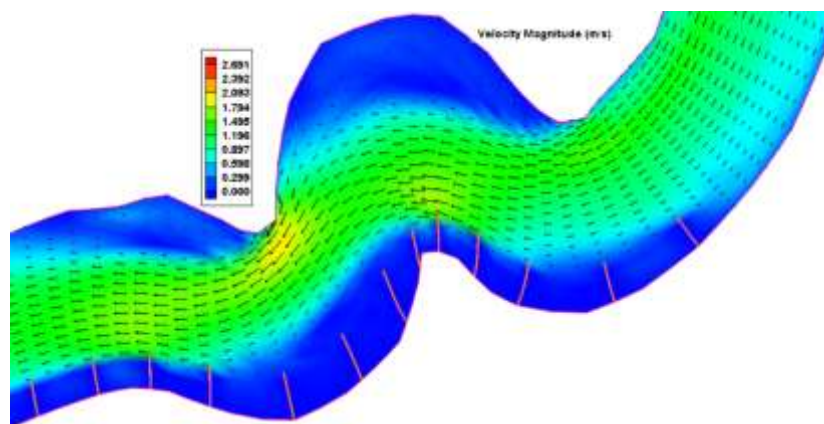
با توجه به نتایج می‌توان دریافت، غالباً پدید رسوب‌گذاری در رودخانه رخ می‌دهد ولی با افزایش دبی بالاتر از ۱۵۰ متر مکعب رودخانه، خصوصاً در ساحل بیرونی قوس‌ها پدید فرسایش رخ داده که باعث تخریب ساحل شده. بنا به ضرورت و برای جلوگیری از فرسایش ساحل در دبی‌های بالا به عنوان طرح پیشنهادی، استفاده از آبشکن توصیه می‌شود که نتایج شبیه سازی آبشکن در زیر آماده است. طول آبشکن‌ها ۲۰ درصد عرض مفید رودخانه بوده و فاصله دو آبشکن برابر ۸۰ متر می‌باشد.

از شکل (۴-۲۸) و (۴-۲۹) می‌توان به خوبی دریافت رودخانه در حالت طبیعی در زمان وقوع دبی پیک ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه سرعت جریان در حدود ۱/۵۷ متر بر ثانیه در محدوده آبشکن بالا رفته و تنش برشی نیز به ۷/۳ نیوتن بر متر مربع رسیده که از سرعت و تنش برشی بحرانی ( $T_c$ ) بیشتر شده بوده و دچار فرسایش شدیدی خصوصاً در ناحیه ساحل می‌شود که با نصب آبشکن در ساحل، سرعت جریان در محدوده آبشکن از ۱/۵۷ به ۰/۳۵ متر بر ثانیه رسیده که باعث جلوگیری از

پدیده فرسایش و حفاظت ساحل شده است. در ادامه به نتایج عددی سرعت و تنش برشی با دبی‌های بالاتر از  $200 \text{ (m}^3/\text{s)}$ ، در حالت طبیعی و با نصب آبشکن پرداخته شده است که نتایج آن در جدول (۴-۴) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۸): سرعت جریان در دبی  $1000 \text{ (m}^3/\text{s)}$  بدون آبشکن



شکل (۴-۲۹): سرعت جریان در دبی  $1000 \text{ (m}^3/\text{s)}$  با نصب آبشکن

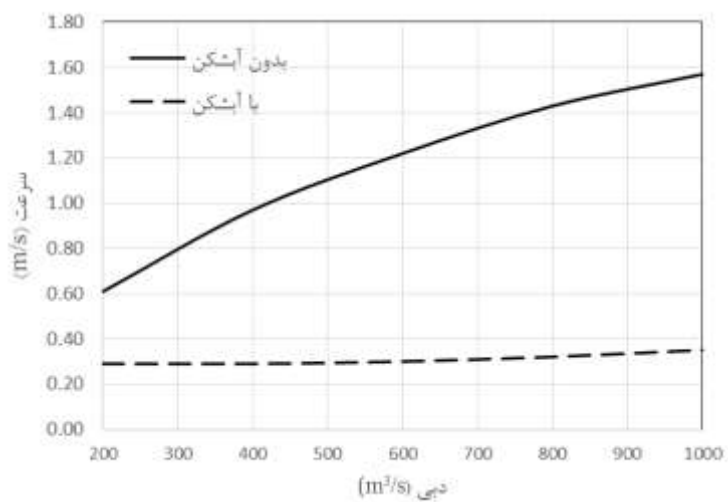
جدول (۴-۵): نتایج سرعت و تنش برشی در رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه با وجود آبشکن

| آزمایش | آبشکن | فاصله آبشکن ها<br>از هم (m) | دبی<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | سرعت جریان در<br>محدوده آبشکن<br>(m/s) | تنش برشی در<br>محدوده آبشکن<br>( $\text{N}/\text{m}^2$ ) | عدد فرود در<br>محدوده<br>آبشکن (Fr) |
|--------|-------|-----------------------------|----------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| ۱      | بدون  | -                           | ۲۰۰                              | ۰/۶۱                                   | ۱/۷۳   | ۰/۲۵                                |
| ۲      |       |                             | ۴۰۰                              | ۰/۹۷                                   | ۳/۵  | ۰/۲۹                                |
| ۳      | آبشکن |                             | ۶۰۰                              | ۱/۲۲                                   | ۵/۱  | ۰/۳۱                                |
| ۴      |       |                             | ۸۰۰                              | ۱/۴۳                                   | ۶/۴  | ۰/۳۲                                |

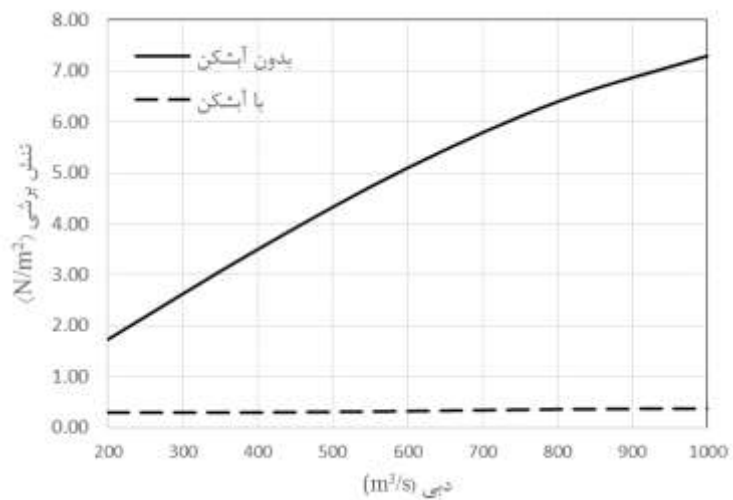


|    |               |    |      |      |      |      |
|----|---------------|----|------|------|------|------|
| ۵  |               |    | ۱۰۰۰ | ۱/۵۷ | ۷/۳  | ۰/۳۳ |
| ۶  | آبشکن<br>ساده | ۸۰ | ۲۰۰  | ۰/۲۹ | ۰/۳  | ۰/۰۵ |
| ۷  |               |    | ۴۰۰  | ۰/۲۹ | ۰/۳  | ۰/۰۶ |
| ۸  |               |    | ۶۰۰  | ۰/۳  | ۰/۳۲ | ۰/۰۶ |
| ۹  |               |    | ۸۰۰  | ۰/۳۲ | ۰/۳۵ | ۰/۰۷ |
| ۱۰ |               |    | ۱۰۰۰ | ۰/۳۵ | ۰/۳۶ | ۰/۰۷ |

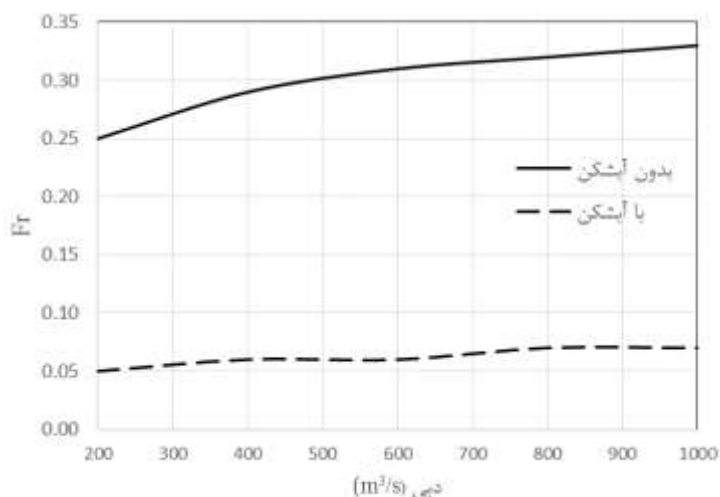
در نمودارهای شکل (۴-۳۰) تا (۴-۳۲) همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی، سرعت، تنش برشی و عدد فرود در رودخانه زیاد شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی با افزایش دبی از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه سرعت جریان از ۰/۶۱ به ۱/۵۷ متر برثانیه رسیده، تنش برشی از ۱/۷۳ نیوتن بر متر مربع به ۷/۳ نیوتن بر متر مربع رسیده و عدد فرود از ۰/۲۵ به ۰/۳۳ رسیده، که از سرعت و تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) بیشتر شده بوده و با نصب آبشکن سرعت جریان از ۰/۲۹ به ۰/۳۵، ۰/۳۵ متر برثانیه رسیده، تنش برشی از ۰/۳ نیوتن بر متر مربع به ۰/۳۶ نیوتن بر متر مربع رسیده و عدد فرود از ۰/۰۵ به ۰/۰۷ رسیده. نتایج نشان داد با نصب آبشکن سرعت جریان با ۷۸ درصد کاهش، تنش برشی با ۹۵ درصد کاهش و عدد فرود با ۷۹ درصد کاهش بیانگر اندازه محدوده تاثیر آبشکن بر جلوگیری از فرسایش ساحل قوس بیرونی می‌باشد. نتایج کاهش سرعت جریان، تنش برشی و عدد فرود با نصب آبشکن بیانگر اندازه محدوده تاثیر آبشکن بر جلوگیری از فرسایش ساحل قوس بیرونی می‌باشد. از نتایج می‌توان به خوبی دریافت در تمام دبی‌ها با نصب آبشکن سرعت جریان در حدود ۰/۳۲ متر بر ثانیه و تنش برشی در حدود ۰/۳۳ نیوتن بر متر مربع ماندگار شده و با وجود چنین سرعت و تنش برشی از فرسایش ساحل به خوبی جلوگیری می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد، به دلیل بحرانی‌تر بودن ساحل قوس بیرونی و همچنین نصب آبشکن در ساحل قوس بیرونی، نتایج سرعت، تنش برشی و ... در نزدیکی ساحل اندازه‌گیری شد تا بتوان مقایسه مناسبی را قبل و بعد از نصب آبشکن انجام نمود.



شکل (۳۰-۴): نمودار نتایج سرعت جریان (در قوس، در محدوده آبشکن) در شبیه‌سازی رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه



شکل (۳۱-۴): نمودار نتایج تنش برشی (در قوس، در محدوده آبشکن) در شبیه‌سازی رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه



شکل (۴-۳۲): نمودار نتایج عدد فرود (در قوس ، در محدوده آبشکن) در شبیه‌سازی رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه

### ۳-۴- نتایج حاصل از مطالعه تصاویر ماهواره‌ای

در این قسمت ابتدا به بررسی دقیق تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای مهم در تغییرات مورفولوژی رودخانه پرداخته شده است، سپس نتایج به تفصیل بیان شده‌اند.

### ۳-۴-۱- بررسی تغییرات مورفولوژی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای

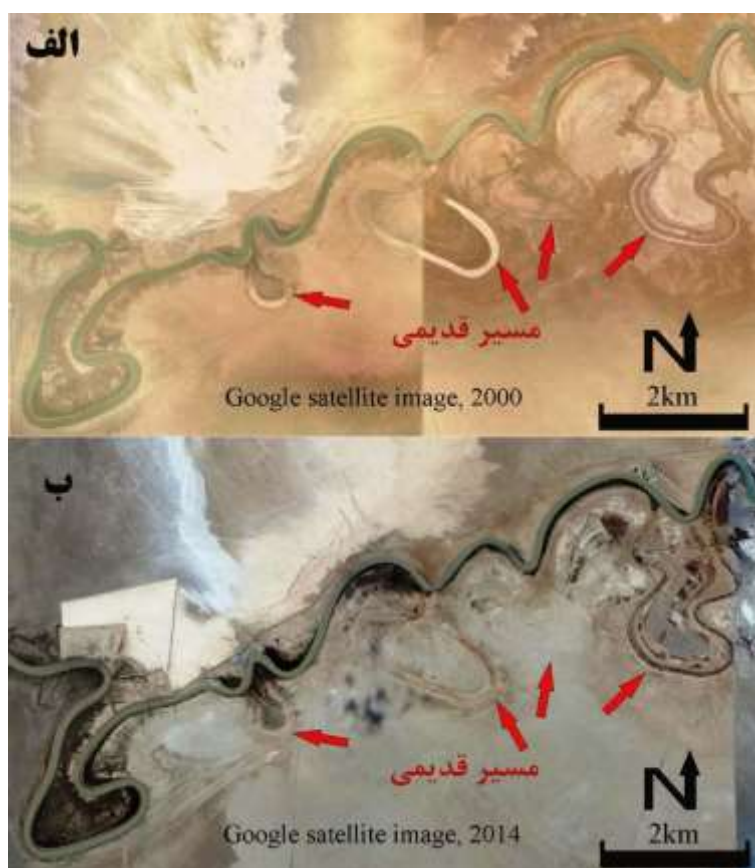
به منظور بررسی تغییرات مورفولوژی و الگوی پیچانرودی رودخانه زهره در دشت ساحلی هندیجان، تصاویر ماهواره‌ای Google Earth مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. این تصاویر در شکل (۴-۳۳) نشان داده شده‌است. بر اساس این دو تصویر مسیر قدیمی رودخانه زهره در محدوده مورد بررسی قابل شناسایی می‌باشد. همان طور که در شکل (۴-۳۳) کاملاً مشخص است، چهار میانبر<sup>۱</sup> در طول مسیر قدیمی دیده می‌شود. این مسیر قدیمی به دقت شناسایی و به همراه دو مسیر مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ میلادی مورد ترسیم قرار گرفت. مسیرهای ترسیم شده در شکل (۴-۳۴) نشان داده شده است. در مرحله بعدی برای بررسی پیچانرودی بودن و تغییرات مورفولوژی رودخانه، مسیرهای ترسیم شده از Google Earth وارد محیط GIS گردید. جهت بررسی پارامترهای مهم در تغییرات مورفولوژی رودخانه با استفاده از نرم افزار ArcMap 10.2، دایره-هایی با شعاع مناسب مماس با پیچش‌های موجود در مسیرهای ترسیم شده، رسم گردید. در مسیر

<sup>۱</sup> Cut off

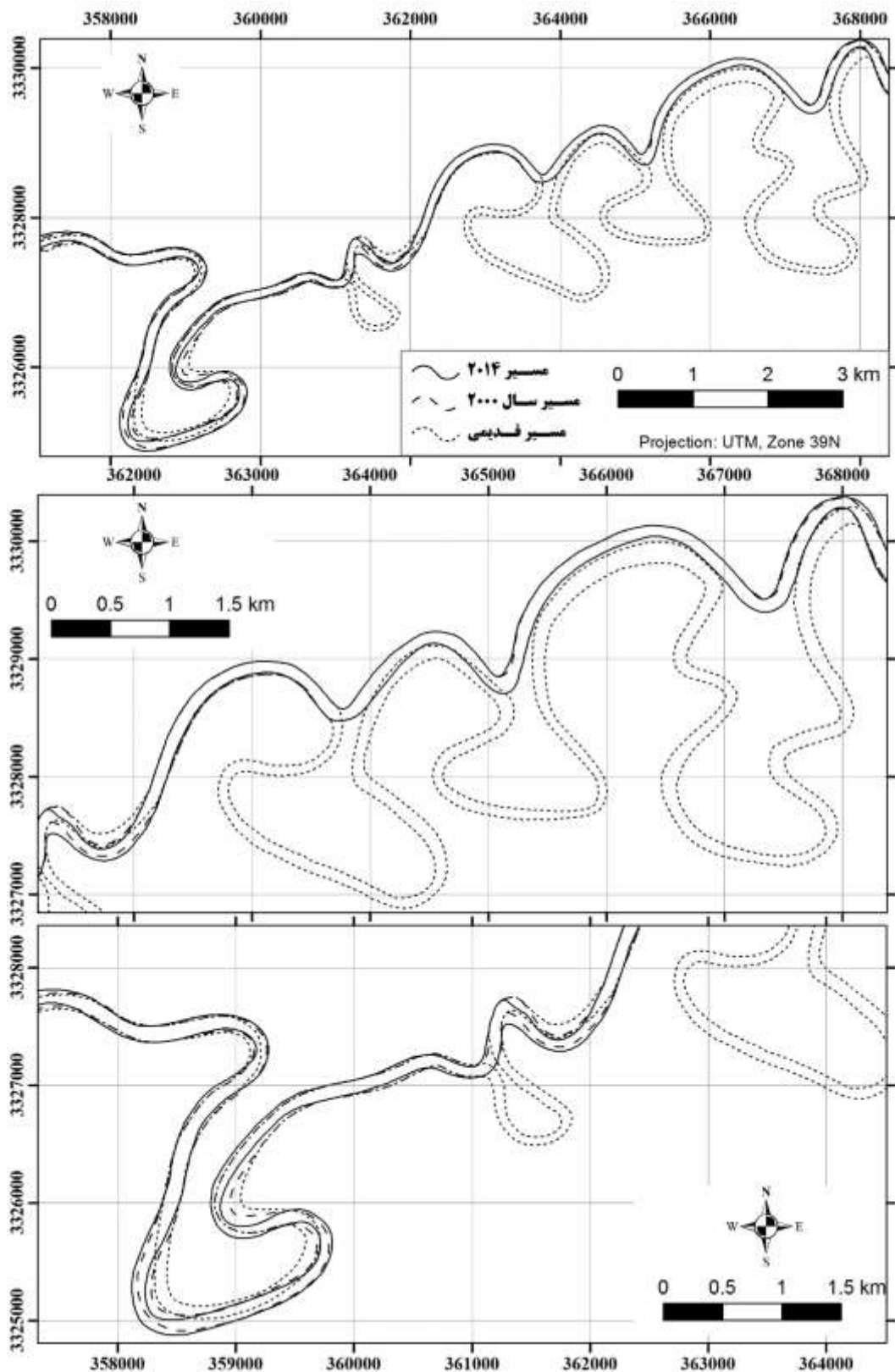
قدیمی ۳۵ پیچش و در مسیرهای مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ هر کدام ۲۱ پیچش شناسایی و مورد بررسی قرار گرفتند که در شکل (۴-۳۵) نشان داده شده‌اند. سپس پردازش و محاسبات لازم صورت گرفت. نتایج حاصل شامل ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، طول قوس، نیم طول موج، شعاع انحنا می‌باشند که در قالب جدول (۴-۶) آورده شده‌است.

جدول (۴-۶): مقادیر محاسبه شده برای سه دوره زمانی، رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه

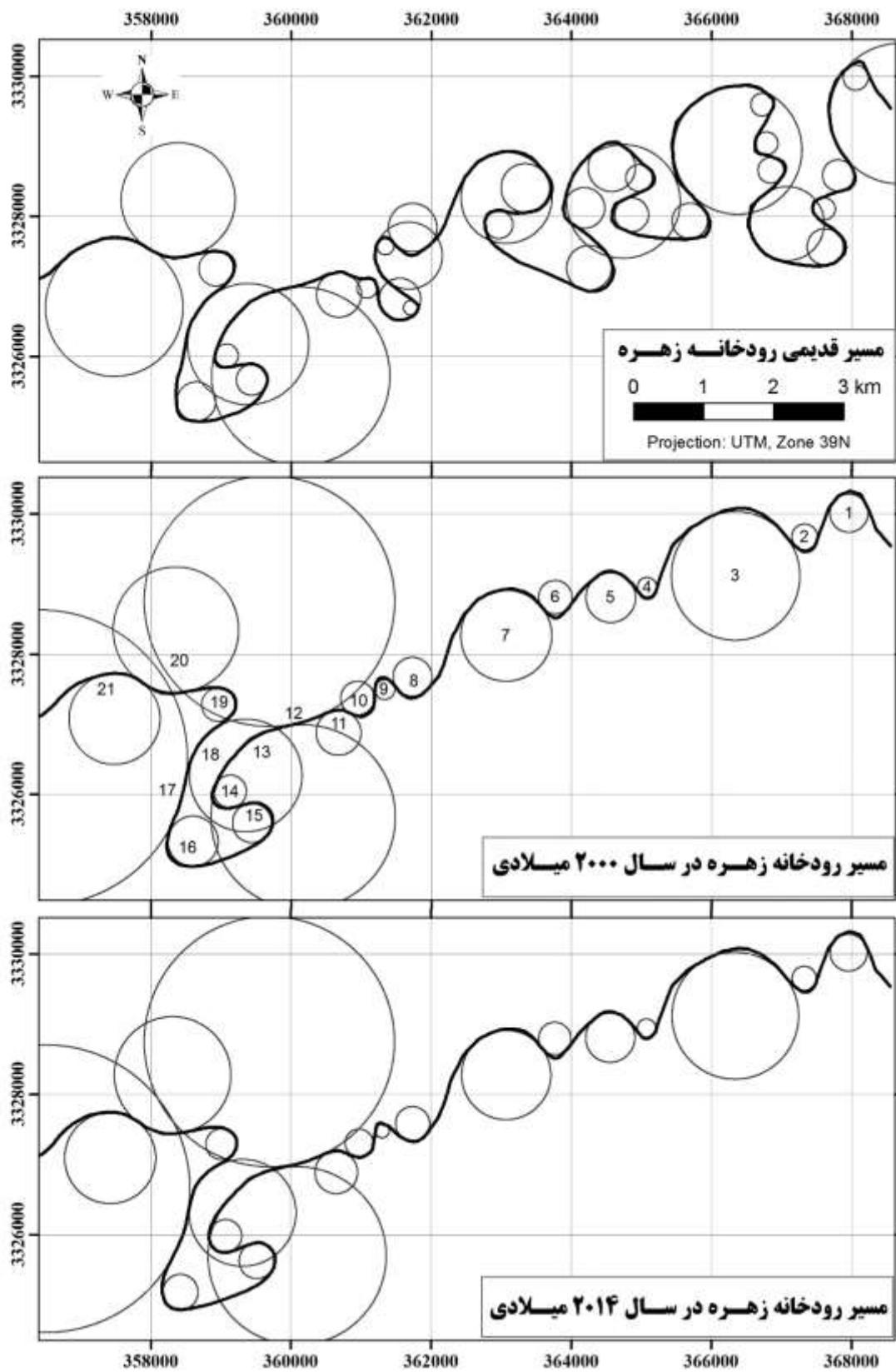
| دوره  | تعداد مئاندر | شعاع (متر) | طول قوس (متر) | نیم طول موج (متر) | زاویه مرکزی (درجه) | ضریب خمیدگی |
|-------|--------------|------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------|
| قدیمی | ۳۵           | ۴۵۰/۱      | ۱۱۹۷/۰        | ۷۴۴/۰             | ۱۹۶/۶              | ۱/۶۴        |
| ۲۰۰۰  | ۲۱           | ۶۶۱/۸      | ۱۱۱۸/۲        | ۷۴۴/۶             | ۱۶۲/۵              | ۱/۵۵        |
| ۲۰۱۴  | ۲۱           | ۶۳۲/۳      | ۱۱۵۴/۶        | ۷۳۷/۹             | ۱۹۱/۳              | ۱/۵۸        |



شکل (۴-۳۳): تصویر ماهواره ای (Google Earth الف) سال ۲۰۰۰ میلادی. (ب) سال ۲۰۱۴ میلادی.



شکل (۴-۳۴): مسیرهای رسم شده رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی



شکل (۴-۳۵): پیچش‌های رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه و دواپر مماس رسم شده در آن‌ها، برای سه دوره زمانی

#### ۴-۳-۲- ضریب خمیدگی

اندازه ضریب خمیدگی برای هر پیچش در هر دوره براساس فرمول شماره (۱) محاسبه می‌شود (L طول قوس و  $\lambda$  طول موج) معمولاً در طول یک رودخانه تعداد متعددی قوس با مشخصات گوناگون شکل گرفته و این قوس‌ها در طول زمان نیز در حال توسعه به سمت افزایش شدت و ضریب خمیدگی می‌باشد. یکی از عوامل تعیین نوع رودخانه، بررسی خم‌ها و ضریب خمیدگی آن‌ها می‌باشد. ضریب خمیدگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \frac{L}{\lambda/2} \quad (1-4)$$

ضریب خمیدگی بزرگ‌تر از  $1/4$  تا  $1/5$  بیانگر پیچشی بودن رودخانه و کم‌تر از آن مستقیم بودن رودخانه و بازه مورد نظر است (آل یاسین، ۱۳۷۹). بر اساس معیار ولفرت در مورد تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب میزان ضریب خمیدگی، چهار نوع رودخانه شامل مستقیم، سینوسی، پیچانرودی و پیچانرودی شدید معرفی شده است. این تقسیم بندی در جدول (۴-۷) نشان داده شده است. نمودار ضریب خمیدگی قوس‌های رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی مختلف و نمودار میانگین آن، به ترتیب در شکل‌های (۴-۳۳) و (۴-۳۴) نشان داده شده است.

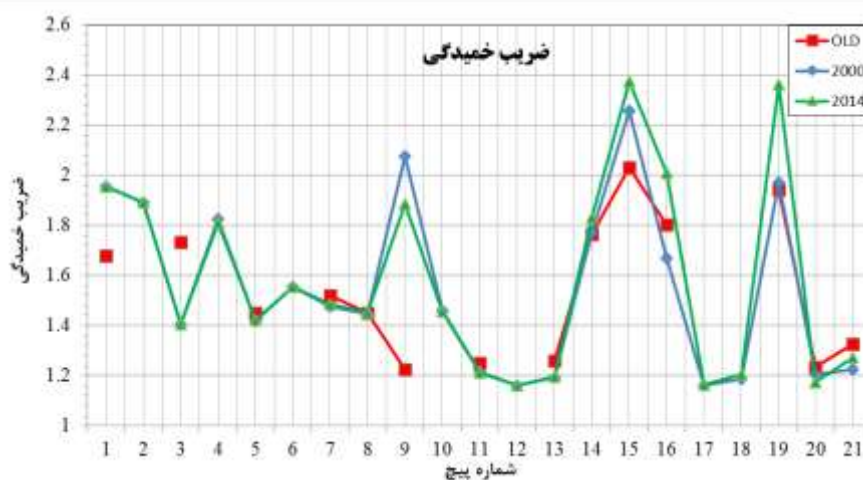
جدول (۴-۷): تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب ضریب خمیدگی (Wolfert, 2001)

| ضریب پیچشی  | ۱-۱/۰۵ | ۱/۰۶-۱/۲۵ | ۱/۲۵-۲    | > ۲            |
|-------------|--------|-----------|-----------|----------------|
| شکل رودخانه |        |           |           |                |
| نوع رودخانه | مستقیم | سینوسی    | پیچانرودی | پیچانرودی شدید |

نمودار شکل (۴-۳۷) بیانگر این است که با مقایسه مقادیر میانگین ضریب خمیدگی محاسبه شده برای هر سه دوره زمانی (جدول (۴-۶)) و تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب ضریب خمیدگی (جدول (۴-۷)) می‌توان رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه، را در دسته رودخانه‌های پیچانرودی قرار داد. نمودار شکل (۴-۳۷) نشان دهنده کاهش ضریب خمیدگی در مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ با

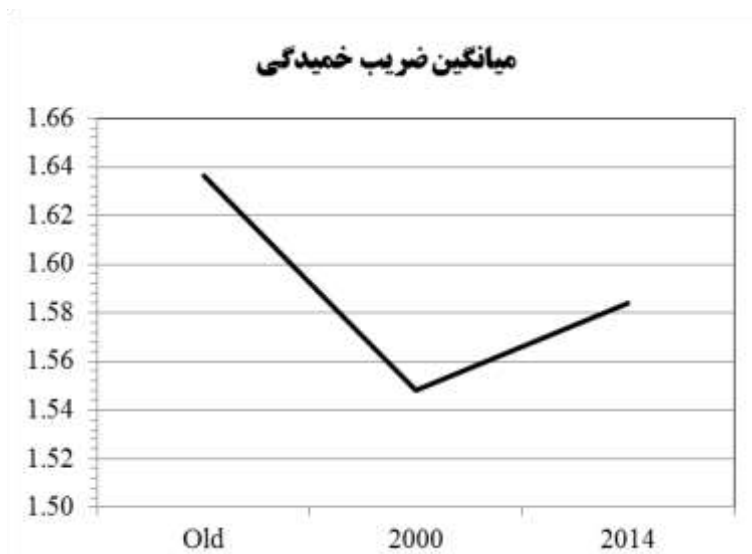
مقدار ۱/۶۴ تا ۱/۵۵ و روند افزایشی این پارامتر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ با مقدار ۱/۵۵ تا ۱/۵۸ می- باشد. میانگین ضریب خمیدگی برای سه دوره رودخانه، حالت پیچانرودی داشته است.

نمودار شکل (۴-۳۶) بیان کننده این است که ضریب خمیدگی به طور کلی در هر سه دوره در حال تغییر بوده است و در بعضی از پیچش‌ها تغییر محسوسی مشاهده نشده و در بعضی دیگر تغییرات کاملاً قابل مشاهده است. به طور کلی می‌توان گفت که به دلیل پیچانرودی بودن رودخانه، ضریب خمیدگی دائماً در حال افزایش و کاهش است. در مسیر قدیمی چهار قطع‌شدگی قابل ملاحظه‌ای، رخ داده است (شکل (۴-۳۳)) و در سایر پیچش‌ها در طول هر سه دوره تغییرات مثبت و منفی در مقدار ضریب خمیدگی صورت گرفته است. در مجموع از لحاظ آماری ضریب خمیدگی در رودخانه زهره کاهش داشته است.



شکل (۴-۳۶): نمودار ضریب خمیدگی قوس‌های رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی





شکل (۴-۳۷): نمودار تغییرات میانگین ضریب خمیدگی رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی

همان طور که در جدول (۴-۸) آورده شده است، در مسیر قدیمی، بر اساس اندازه ضریب خمیدگی، ۷۱/۴۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی، ۱۴/۳۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی شدید، ۱۴/۳۰ درصد پیچش‌ها سینوسی قرار دارند و درصدی برای رودخانه مستقیم یافت نشد. در سال ۲۰۰۰ میلادی، بر اساس اندازه ضریب خمیدگی، ۹/۵۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی شدید، ۵۷/۲۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی، ۳۳/۳۰ درصد پیچش‌ها سینوسی قرار دارند و درصدی برای رودخانه مستقیم یافت نشد. در سال ۲۰۱۴ میلادی بر اساس اندازه ضریب خمیدگی، ۱۴/۳۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی شدید، ۵۷/۲۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی، ۲۸/۵۰ درصد پیچش‌ها در حد سینوسی قرار دارند و درصدی برای رودخانه مستقیم یافت نشد.

جدول (۴-۸): نوع پیچش‌ها و درصد فراوانی آن‌ها براساس ضریب خمیدگی برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه

| نوع پیچ براساس ضریب خمیدگی | مسیر قدیمی |       | مسیر ۲۰۰۰ |       | مسیر ۲۰۱۴ |       |
|----------------------------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                            | تعداد      | درصد  | تعداد     | درصد  | تعداد     | درصد  |
| مستقیم                     | ۰          | ۰     | ۰         | ۰     | ۰         | ۰     |
| سینوسی                     | ۵          | ۱۴/۳۰ | ۷         | ۳۳/۳۰ | ۶         | ۲۸/۵۰ |
| پیچانرودی                  | ۲۵         | ۷۱/۴۰ | ۱۲        | ۵۷/۲۰ | ۱۲        | ۵۷/۲۰ |
| پیچانرودی شدید             | ۵          | ۱۴/۳۰ | ۲         | ۹/۵۰  | ۳         | ۱۴/۳۰ |

### ۴-۳-۳- زاویه مرکزی

زاویه مرکزی بین دو شعاع متصل به نقاط عطف در دو خم متوالی تشکیل می‌گردد. این زاویه میزان توسعه پیچانرودی رودخانه را نشان می‌دهد. کورنایس<sup>۱</sup> برای بیان کمی توسعه و پیشرفت پیچانرودی شدن در رودخانه‌های آبرفتی و تمایز آن‌ها از یکدیگر، با لحاظ نمودن زاویه مرکزی تقسیم بندی مشخصی مطابق با جدول (۴-۹) پیشنهاد نموده است (تلوری، ۱۳۸۳).

$$A = \frac{180L}{R\pi} \quad (۲-۴)$$

که A اندازه زاویه مرکزی و L طول قوس و R شعاع قوس می باشد.

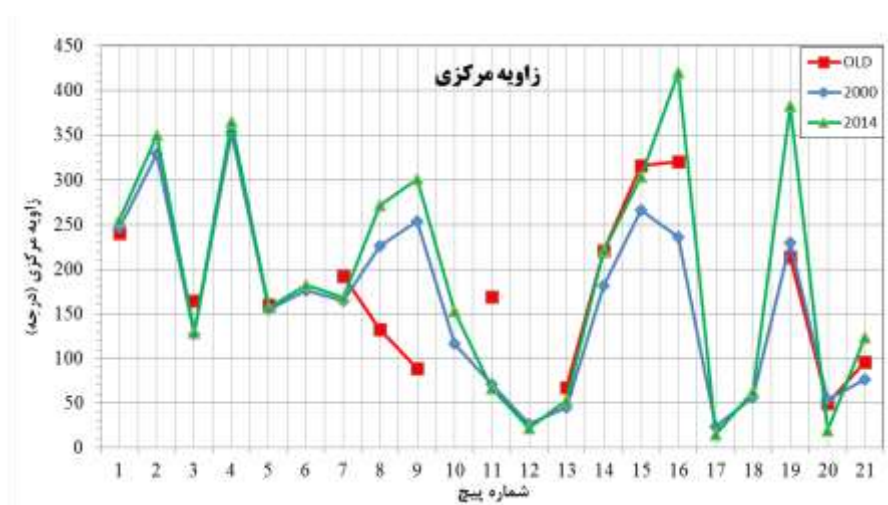
جدول (۴-۹): میزان توسعه خم رودخانه بر مبنای زاویه مرکزی

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

نمودار شکل (۴-۳۸) نشان می‌دهد که به طور متناوب در هر سه دوره تغییرات مثبت و منفی در مقادیر زوایای مرکزی در هر سه دوره زمانی وجود داشته است. نمودار شکل (۴-۳۹) نشان دهنده میانگین زوایای مرکزی انحنای رودخانه برای محدوده مورد مطالعه است. مطابق با شکل (۴-۳۹)، میانگین زاویه مرکزی از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ میلادی روند کاهشی و از سال ۲۰۰۰ میلادی تا سال ۲۰۱۴ میلادی روند افزایشی داشته است. در هر سه بازه زمانی براساس طبقه بندی ارائه شده در جدول (۴-۹) و مقادیر به دست آمده از این تحقیق در جدول (۴-۶) و جدول (۴-۱۰)، رودخانه زهره در جلگه هندیجان رودخانه پیچانرود توسعه یافته تا بیش از حد توسعه یافته محسوب می‌شود.

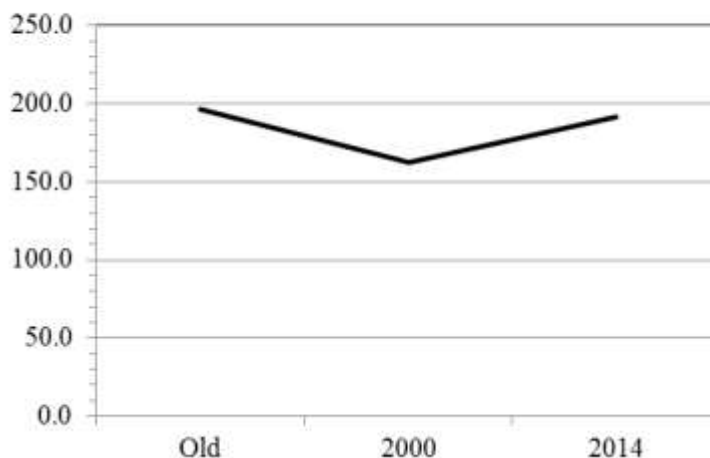
<sup>۱</sup> Kornis

نمودار شکل (۴-۳۹) نشان می‌دهد که میانگین زاویه مرکزی از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ روند کاهشی و از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ روند افزایشی داشته است. در ۶۴ درصد پیش‌ها بین مسیر قدیمی و سال ۲۰۰۰ میلادی کاهش زاویه مرکزی و در ۳۶ درصد پیش‌ها نیز افزایش زاویه مرکزی رخ داده است. بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ میلادی در ۱۹ درصد پیش‌ها کاهش زاویه مرکزی و در ۸۱ درصد پیش‌ها افزایش زاویه مرکزی مشاهده می‌شود (شکل (۴-۳۵)). بیشترین تغییرات به ترتیب در پیش‌های ۱۶، ۱۹ و ۹ اتفاق افتاده که البته این روند افزایشی بوده است.



شکل(۴-۳۸): نمودار زاویه مرکزی انحنای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه در سه دوره زمانی

#### میانگین زاویه مرکزی



شکل(۴-۳۹): نمودار میانگین زاویه مرکزی برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی

جدول (۴-۱۰) نشان دهنده درصد فراوانی پیچش‌ها براساس زاویه مرکزی طبق تقسیم بندی کورنایس، برای سه دوره زمانی در رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه است. در مجموع از لحاظ آماری مطابق با نتایج موجود در جدول (۴-۱۰) زاویه مرکزی در رودخانه زهره کاهش داشته است. در مسیر قدیمی، بر اساس اندازه زوایای مرکزی، ۵۷/۱۴ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرود بیش از حد توسعه یافته، ۱۴/۳۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی توسعه یافته، ۱۱/۴۲ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرود توسعه نیافته، ۱۷/۱۴ درصد در حد شاخ گاوپیست و درصدی برای پیچش‌های شبه پیچانرود یافت نشد. در سال ۲۰۰۰ میلادی، بر اساس اندازه زوایای مرکزی، ۴۲/۸۶ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرود بیش از حد توسعه یافته، ۱۴/۳۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی توسعه یافته، ۲۳/۸۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرود توسعه نیافته، ۹/۵۲ درصد پیچش‌ها در حد شبه پیچانرود و ۹/۵۲ درصد در حد شاخ گاوپیست. در سال ۲۰۱۴ میلادی بر اساس اندازه زوایای مرکزی، ۲۳/۸۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرود بیش از حد توسعه یافته، ۱۹ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرودی توسعه یافته، ۱۴/۳۰ درصد پیچش‌ها در حد پیچانرود توسعه نیافته، ۱۴/۳۰ درصد پیچش‌ها در حد شبه پیچانرود و ۲۸/۶۰ درصد در حد شاخ گاوپیست.

جدول (۴-۱۰): نوع پیچش‌ها و درصد فراوانی آن‌ها براساس زاویه مرکزی برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه

| نوع پیچ براساس زاویه مرکزی | مسیر قدیمی |       | مسیر ۲۰۰۰ |       | مسیر ۲۰۱۴ |       |
|----------------------------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                            | تعداد      | درصد  | تعداد     | درصد  | تعداد     | درصد  |
| شبه پیچانرود               | ۰          | ۰     | ۲         | ۹/۵۲  | ۳         | ۱۴/۳۰ |
| پیچانرود توسعه نیافته      | ۴          | ۱۱/۴۲ | ۵         | ۲۳/۸۰ | ۳         | ۱۴/۳۰ |
| پیچانرود توسعه یافته       | ۵          | ۱۴/۳۰ | ۳         | ۱۴/۳۰ | ۴         | ۱۹    |
| پیچانرود خیلی توسعه        | ۲۰         | ۵۷/۱۴ | ۹         | ۴۲/۸۶ | ۵         | ۲۳/۸۰ |
| شاخ گاوی                   | ۶          | ۱۷/۱۴ | ۲         | ۹/۵۲  | ۶         | ۲۸/۶۰ |

#### ۴-۳-۴- دیگر خصوصیات هندسی لازم برای مطالعه مئاندرها

شعاع انحنا: شعاع دایره‌ای که به قسمت عمده انحنای مئاندر مماس باشد.

طول قوس: طول خط مرکزی رودخانه از یک نقطه عطف تا نقطه عطف انحنای بعدی.

طول موج مئاندر: فاصله افقی بین دو نقطه عطف در پلان هر مئاندر.

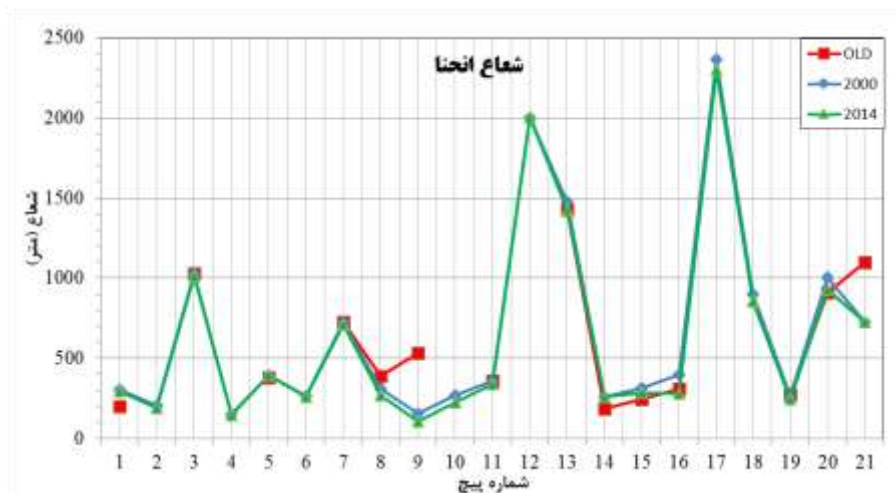
#### ۴-۳-۴-۱- شعاع انحنا

نمودار شکل (۴-۴۰) نشان می‌دهد که شعاع انحنا در طول مسیر رودخانه برای سه دوره زمانی

دائماً در حال تغییر بوده است و با مقایسه نمودار شعاع انحنا (شکل (۴-۴۰)) و نمودار زاویه مرکزی

(شکل (۴-۳۸)) می‌توان دریافت که با افزایش شعاع، زاویه مرکزی کاهش و با کاهش آن زاویه مرکزی

افزایش می‌یابد. در قسمت‌هایی نیز تطابق تقریبی شعاع در سه دوره زمانی مشهود است.



شکل (۴-۴۰): شعاع انحنا برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه در سه دوره زمانی

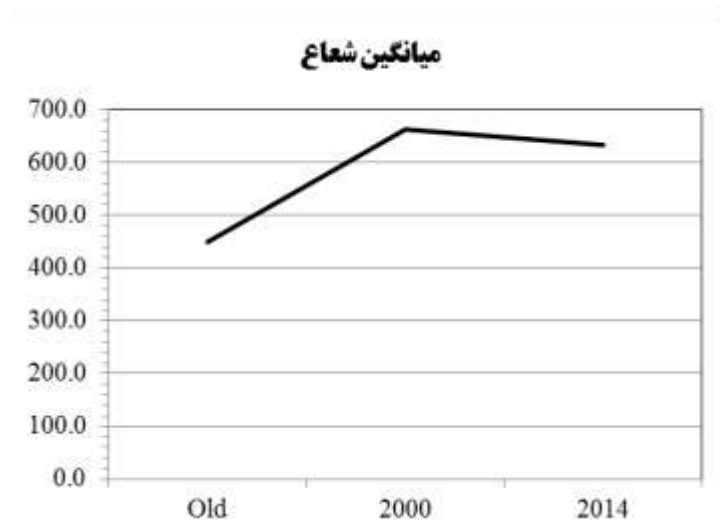
نمودار شکل (۴-۴۱) نشان دهنده تغییرات میانگین شعاع در مسیر رودخانه در سه دوره

زمانیست. طبق این نمودار میانگین شعاع در مسیر قدیمی از ۴۵۰/۱ تا ۶۶۱/۸ در سال ۲۰۰۰ افزایش

و از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۴ به مقدار ۶۳۲/۳ کاهش داشته است در کل این پارامتر در طول سه

دوره زمانی روند افزایش داشته است. در نهایت مقادیر به دست آمده برای این پارامتر نشان از

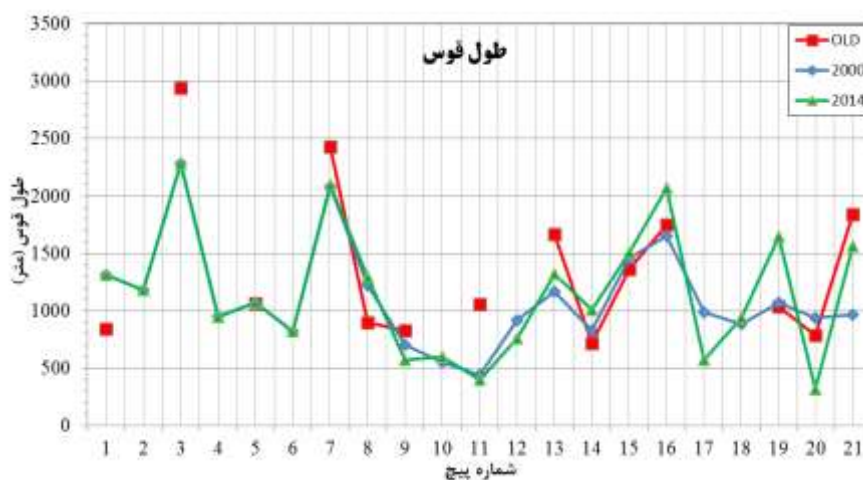
پیچانرودی بودن رودخانه و تغییرات مورفولوژی رخ داده در این سه دوره می‌باشد.



شکل (۴-۴۱): نمودار تغییرات میانگین شعاع در مسیر رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی

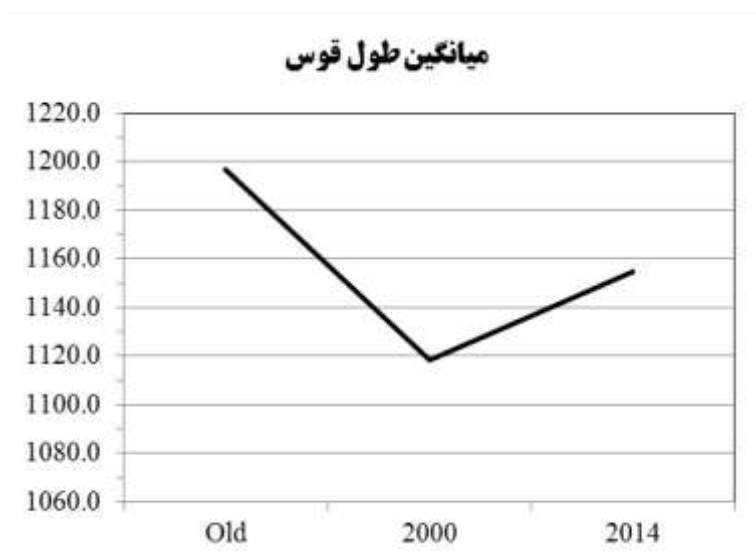
#### ۴-۳-۲- طول قوس‌ها و تعداد آن

نمودار شکل (۴-۴۲) بیانگر تغییرات طول قوس در طول مسیر رودخانه برای سه دوره زمانی است. همان طور که در نمودار دیده می‌شود طول قوس دائما در حال کاهش و افزایش بوده و در فواصل این سه دوره زمانی دارای تغییراتی بوده است. با مقایسه نمودار طول قوس (شکل (۴-۴۲)) با دو نمودار زاویه مرکزی (شکل (۴-۳۸)) و ضریب خمیدگی (شکل (۴-۳۶)) می‌توان یافت که با افزایش طول قوس زاویه مرکزی و ضریب خمیدگی افزایش و با کاهش آن، این دو پارامتر کاهش می‌یابند.

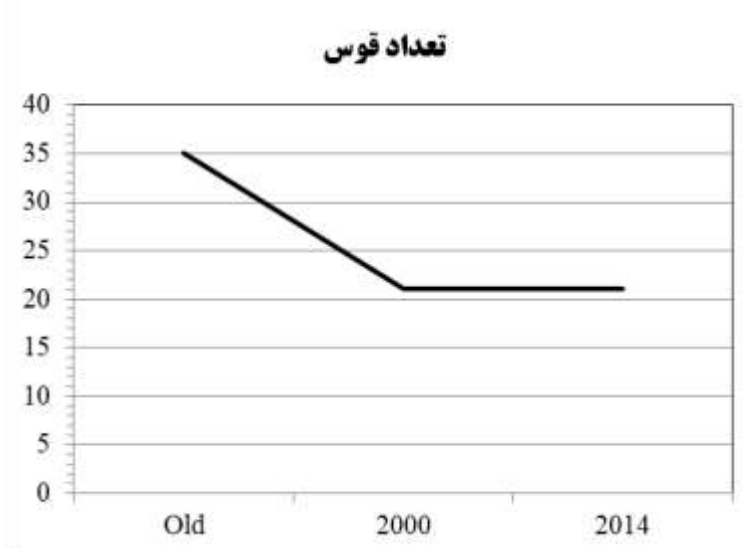


شکل (۴-۴۲): طول قوس در برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه در سه دوره زمانی

نمودارهای آورده شده در اشکال (۴۳-۴) و (۴۴-۴) نشان دهنده میانگین طول قوس و تعداد قوس‌ها در مسیر رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی می‌باشند. همان طور که در نمودار شکل (۴۰-۴) مشخص است میانگین طول قوس در مسیر قدیمی از مقدار ۱۱۹۷/۰ تا ۱۱۱۸/۲ در سال ۲۰۰۰ کاهش و از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۴ به مقدار ۱۱۵۴/۶ افزایش داشته است. تعداد قوس‌ها (شکل (۴۱-۴)) نیز در مسیر قدیمی ۳۵ بوده و تا سال ۲۰۰۰ به دلیل ایجاد چهار میانبر طبیعی و تغییرات مورفولوژیکی در رودخانه به تعداد ۲۱ کاهش داشته است، و این تعداد تا سال ۲۰۱۴ ثابت باقی مانده است اما در عین حال تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پیچش‌ها در این دوره رخ داده است. کاهش و افزایش تعداد پیچش‌ها تغییرات بستر و مورفولوژی رودخانه مورد مطالعه را نمایان می‌کند.



شکل (۴۳-۴): نمودار تغییرات میانگین طول قوس در مسیر رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی



شکل (۴-۴۴): نمودار تغییرات تعداد قوس در مسیر رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی

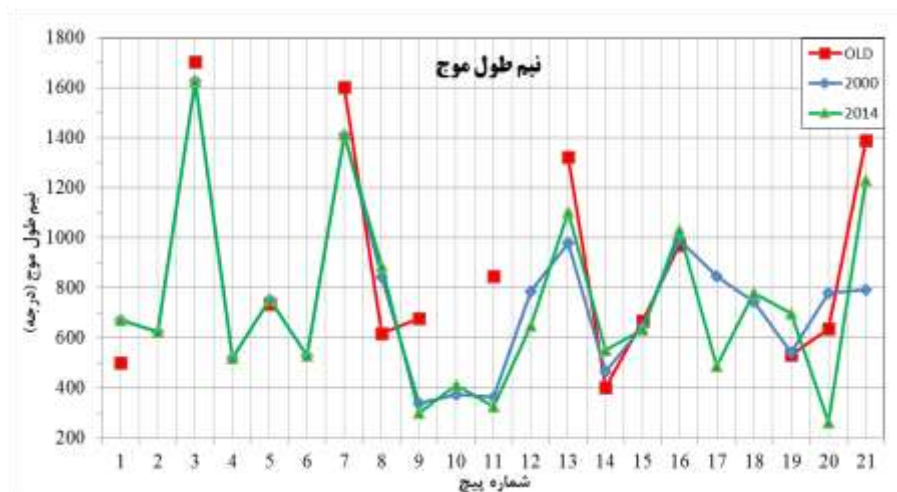
#### ۴-۳-۴- نیم طول موج

نمودار شکل (۴-۴۵) نیم طول موج برای سه دوره زمانی در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این نمودار بیان کننده این است که نیم طول موج و به تبع آن طول موج دائما در حال تغییر بوده است. با مقایسه این نمودار با نمودار ضریب خمیدگی، رابطه عکس این دو پارامتر مشخص می‌شود که با افزایش نیم طول موج، ضریب خمیدگی کاهش و با کاهش آن، ضریب خمیدگی افزایش می‌یابد. نمودار شکل (۴-۴۶) نشان دهنده میانگین نیم طول موج در طول مسیر رودخانه برای سه دوره زمانیست. همان طور که از این نمودار مشخص است، نیم طول موج از مقدار ۷۴۴ در مسیر قدیمی به ۷۴۴/۶ در سال ۲۰۰۰ افزایش و از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۴ به مقدار ۷۳۷/۹ کاهش داشته است. با مقایسه نمودار میانگین نیم طول موج (شکل (۴-۴۶)) با نمودار میانگین ضریب خمیدگی نیز، ارتباط عکس این دو پارامتر مشهود است.

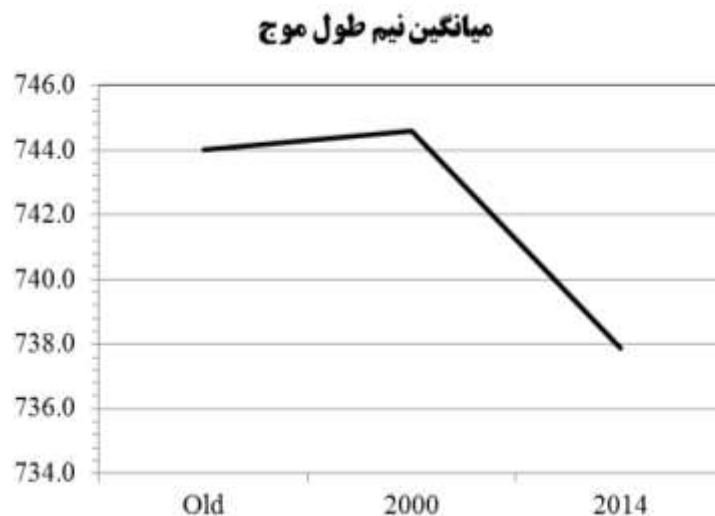
قسمت اول نمودار شکل (۴-۴۶) روند افزایشی تغییرات طول موج از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ را نشان می‌دهد که این امر دلیل بر افزایش فاصله پیچانرودهای متوالی نسبت به هم و کاهش تراکم پیچانرودها در واحد طول و در نهایت کاهش تعداد قوس‌ها از ۳۵ به ۲۱ بوده است. در قسمت



دوم نمودار شکل (۴-۴۶) روند کاهشی طول موج در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ را نشان می-دهد. که نشان دهنده کاهش فاصله پیچانرودهای متوالی نسبت به هم است. که با وجود ثابت بودن تعداد پیچانرودها، باعث تغییر در شکل آن‌هاست.



شکل (۴-۴۵): نیم طول موج برای رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه در سه دوره زمانی

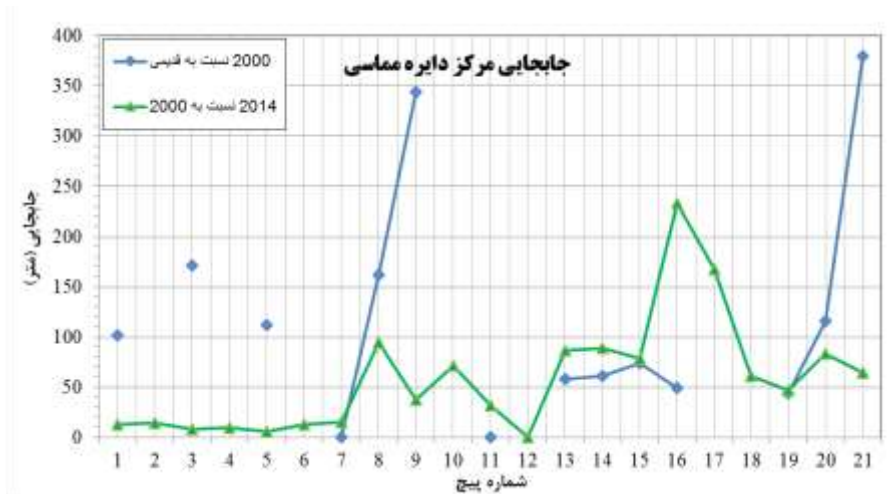


شکل (۴-۴۶): نمودار تغییرات میانگین نیم طول موج در مسیر رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی

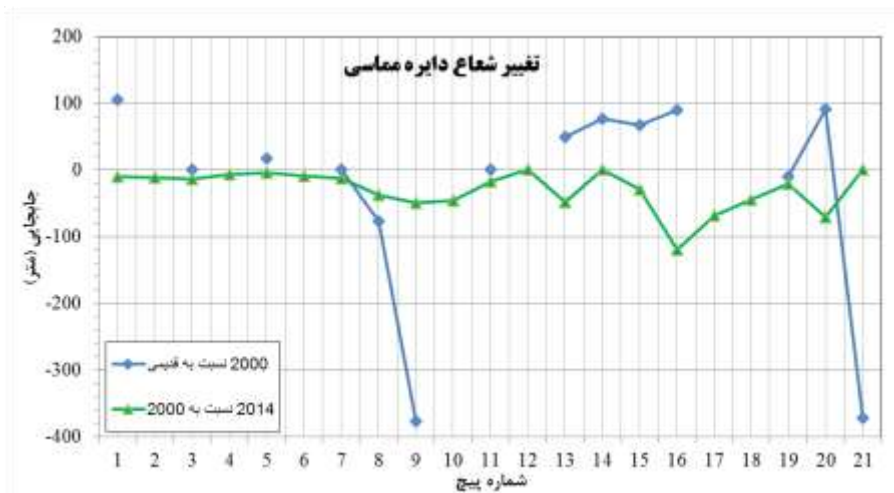
#### ۴-۳-۴- جابجایی مرکز و تغییر شعاع دایره‌های مماسی

دو شکل (۴-۴۷) و (۴-۴۸) که در زیر آمده است به ترتیب نشان دهنده نمودارهای جابجایی مرکز دایره‌های مماسی و تغییر شعاع دایره‌های مماسی مربوط به رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای سه دوره زمانی می‌باشد. این نمودارها بیان کننده میزان و نحوه جابجایی این دایره‌ها

متناسب با تغییرات مورفولوژی رخ داده در طول مسیر رودخانه برای سه دوره زمانیست. شکل (۴-۴۹) نیز تغییرات اندازه و جهت حرکت این دایره‌ها را نیز در طول مسیر رودخانه نشان می‌دهد. برای پرهیز از شلوغی، دواير مماسی مسیر قدیمی که در مسیر ۲۰۱۴ وجود ندارند نمایش داده نشده‌اند. با دقت در سه شکل نام برده می‌توان نحوه تغییرات اندازه و جهت حرکت دایره‌ها را بهتر متوجه شد.

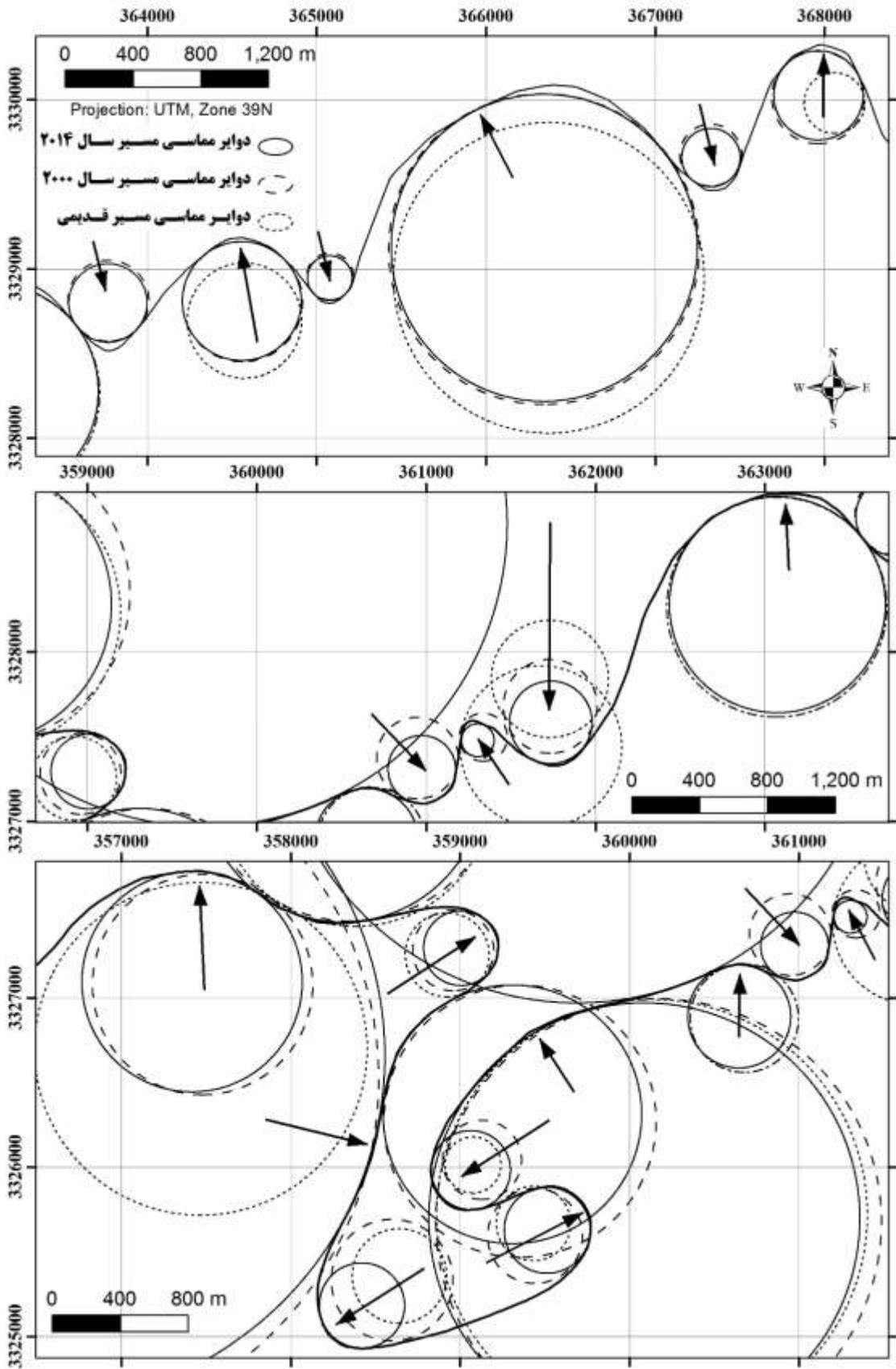


شکل (۴-۴۷): نمودار جابجایی دواير رسم شده در مسیر رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای فواصل زمانی بین سه دوره



شکل (۴-۴۸): نمودار تغییر شعاع دواير مماسی در مسیر رودخانه زهره در محدوده مورد مطالعه برای فواصل زمانی بین سه دوره

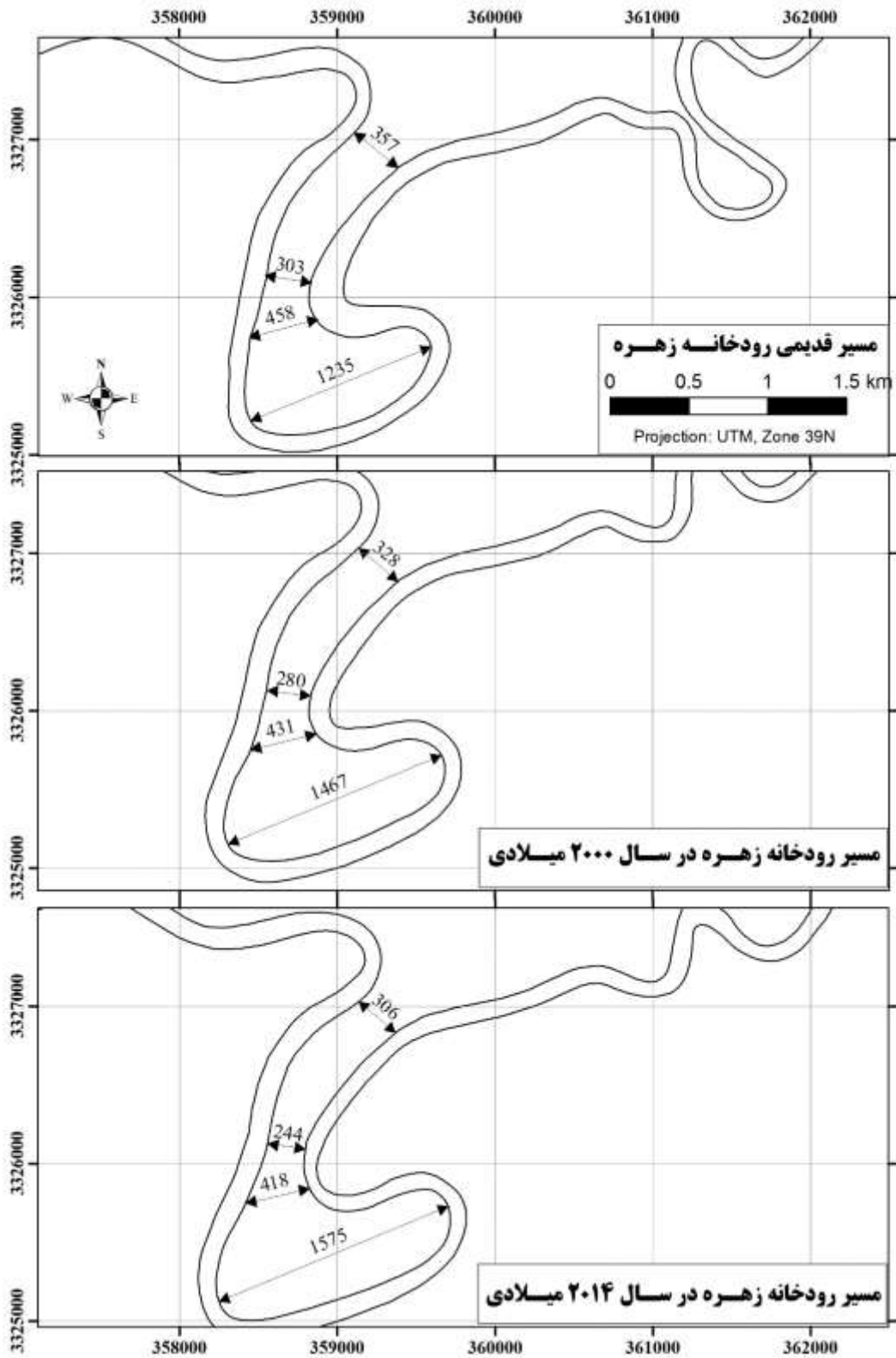
همان طور که در شکل (۴-۴۹) نشان داده شده است، روند کلی حرکت در پیچش‌ها به گونه‌ای بوده است که دایره‌ها مماسی به سمت درون پیچش‌ها در طول زمان در حال حرکت بوده‌اند ضمن اینکه شعاع آن‌ها نیز در فاصله زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴، روند کاهشی داشته است.



شکل (۴-۴۹): نحوه جابجایی دایره‌های مماسی رسم شده برای سه دوره زمانی نسبت به یکدیگر

#### ۴-۳-۵- پیش بینی

همان طور که مطابق با شکل (۴-۳۳) در طول این سه دوره زمانی از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۱۴ میلادی چهار میانبر و سایر تغییرات قابل توجه موفولوژیکی، رخ داده است طبق آنچه که در سه شکل (۴-۴۹)، (۴-۳۵) و (۴-۵۰) قابل مشاهده است، پیش‌بینی می‌شود که در محل پیچش شماره ۱۸ در محل گلوگاه موجود، در آینده قطع شدگی رخ دهد که باعث از بین رفتن پیچش‌های شماره ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ و ایجاد پیچش جدید، شود. چرا که در این سه دوره مطابق با شکل (۴-۵۰) فاصله گلوگاهی به مرور کاهش پیدا کرده است که این صحت پیش‌بینی انجام شده را تایید می‌کند.



شکل (۴-۵): تغییرات مسیر و پیشروی پیچانرودی رودخانه زهره (در محدوده مورد مطالعه) از پیش شماره ۱۳ تا ۱۸ برای سه دوره زمانی مورد مطالعه

فصل پنجم

نتیجه گیری

## ۵-۱- مقدمه

در فصول قبل این تحقیق به معرفی نرم افزار CCHE2D و رودخانه زهره پرداخته شد. همچنین نحوه شبیه‌سازی این رودخانه، کالیبره کردن مدل، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و نحوه مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای جهت بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره به تفصیل بیان شد. در فصل چهار نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها به همراه یک طرح پیشنهادی (آبشکن)، و نیز نتایج حاصل از مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای تفسیر و ارائه شد. در این فصل نتایج به صورت خلاصه به نگارش در آمده که در ادامه آمده است.

## ۵-۲- خلاصه نتایج

در این بخش نتایج به دو صورت نتایج مربوط به مدل CCHE2D و نتایج مربوط به مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای آورده شده‌اند.

### ۵-۲-۱- نتایج مربوط به مدل CCHE2D

(۱) با توجه به داده‌های بدست آمده می‌توان مشاهده کرد که سرعت متوسط در رودخانه  $0/2$  متر بر ثانیه در دبی‌های پایین تر از  $150$  مترمکعب بر ثانیه بوده و در زمان سیلابی به  $1/57$  متر بر ثانیه رسیده که این امر در دبی‌های  $150$  به پایین بیشتر باعث پدیده رسوب‌گذاری و در دبی‌های سیلابی (بیشتر از  $200$ ) باعث پدیده فرسایش کناره‌های ساحلی و بستر رودخانه می‌شود. در واقع با توجه به اینکه در بیشتر مواقع سال دبی رودخانه کمتر از  $150$  متر مکعب بر ثانیه بوده، بنابراین سرعت جریان کمتر از سرعت بحرانی است، پس بیشتر پدیده رسوب‌گذاری در رودخانه مشاهده می‌شود و در مواقع سیلابی (سرعت بالا) فرسایش اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن در طول زمان تغییراتی در مورفولوژی رودخانه و شکل بستر رخ می‌دهد. در این نرم افزار با توجه به جهت و اندازه فلش‌های سرعت به خوبی می‌توان جریان‌های گردابه‌ای و برگشتی را مشاهده نمود که این شبیه‌سازی، دقت مدل را نشان می‌دهد.



۲) با توجه به داده‌های بدست آماده می‌توان مشاهده کرد تنش برشی در رودخانه ۱/۲ نیوتن بر متر مربع در دبی‌های پایین تر از ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه بوده و در زمان سیلابی به ۷/۳ نیوتن بر متر مربع رسیده که این امر در دبی‌های ۱۵۰ به پایین بیشتر باعث پدیده رسوب‌گذاری و در دبی‌های سیلابی (بیشتر از ۲۰۰) باعث پدیده‌ی فرسایش کناره‌های ساحلی و بستر رودخانه می‌شود. در واقع با توجه به اینکه در بیشتر مواقع سال دبی رودخانه کمتر از ۱۵۰ متر مکعب بر ثانیه بوده، بنابراین تنش برشی کمتر از تنش برشی بحرانی می‌باشد، پس بیشتر پدیده رسوب‌گذاری در رودخانه مشاهده می‌شود و در مواقع سیلابی (تنش برشی بالاتر از تنش برشی بحرانی) فرسایش اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن در طول زمان تغییراتی در مورفولوژی رودخانه و شکل بستر رخ می‌دهد. براساس مقایسه نتایج تنش برشی با سرعت جریان، الگوی توزیع تنش برشی وارده بر بستر بسیار مشابه سرعت جریان می‌باشد. به این معنی که افزایش و کاهش تنش برشی رابطه‌ی مستقیمی با افزایش و کاهش سرعت دارد.

۳) با بررسی محدوده مورد مطالعه، این نتیجه حاصل شد که کلاس ۱ با قطر ۰/۰۱ میلی‌متر به دلیل ریز دانه بودن رسوب‌گذاری بسیار پایینی داشته است. کلاس ۲ با قطر ۰/۷ میلی‌متر، عمده رسوب‌گذاری در محدوده مورد مطالعه را داشته است. کلاس ۳ با قطر ۲ میلی‌متر، عمدتاً در خط‌القدر رودخانه رسوب‌گذاری کرده است. و کلاس ۴ با قطر ۸ میلی‌متر عمدتاً در ابتدای رودخانه رسوب‌گذاری کرده است.

۴) با افزایش دبی، سرعت و تنش برشی در رودخانه زیاد شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دبی از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه سرعت جریان از ۰/۶۱ به ۱/۵۷ متر بر ثانیه و تنش برشی از ۱/۷۳ نیوتن بر متر مربع به ۷/۳ نیوتن بر متر مربع رسیده است و با نصب آبشکن سرعت جریان از ۰/۲۹ به ۰/۳۵ متر بر ثانیه و تنش برشی از ۰/۳ نیوتن بر متر مربع به ۰/۳۶ نیوتن بر متر مربع تغییر کرده است که هر دو پارامتر با نصب آبشکن روند کاهشی داشته‌اند. نتایج کاهش سرعت جریان و تنش برشی با نصب آبشکن بیانگر اندازه محدوده تاثیر آبشکن، بر

جلوگیری از فرسایش ساحل قوس بیرونی می‌باشد. از لحاظ آماری نتایج نشان داد، با نصب آبشکن سرعت جریان با ۷۸ درصد کاهش، تنش برشی با ۹۵ درصد کاهش و عدد فرود با ۷۹ درصد کاهش بیانگر اندازه محدوده تاثیر آبشکن بر جلوگیری از فرسایش ساحل قوس بیرونی می‌باشد. از نتایج می‌توان به خوبی دریافت در تمام دبی‌ها با نصب آبشکن سرعت جریان در حدود  $0/32$  متر بر ثانیه و تنش برشی در حدود  $0/33$  نیوتن بر متر مربع ماندگار شده و با وجود چنین سرعت و تنش برشی از فرسایش ساحل به خوبی جلوگیری می‌شود.

### ۵-۳- نتایج مربوط به مطالعه و بررسی تصاویر ماهواره‌ای

۱) میانگین ضریب خمیدگی از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ با مقدار  $1/64$  تا  $1/55$  کاهش داشته و در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ با مقدار  $1/55$  تا  $1/58$  افزایش داشته است. در مسیر قدیمی، بر اساس اندازه ضریب خمیدگی،  $71/40$  درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی،  $14/30$  درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی شدید،  $14/30$  درصد پیش‌ها سینوسی قرار دارند و درصدی برای رودخانه مستقیم یافت نشد. در سال ۲۰۰۰ میلادی، بر اساس اندازه ضریب خمیدگی،  $9/50$  درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی شدید،  $57/20$  درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی،  $33/30$  درصد پیش‌ها سینوسی قرار دارند و درصدی برای رودخانه مستقیم یافت نشد. در سال ۲۰۱۴ میلادی بر اساس اندازه ضریب خمیدگی،  $14/30$  درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی شدید،  $57/20$  درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی،  $28/50$  درصد پیش‌ها در حد سینوسی قرار دارند و درصدی برای رودخانه مستقیم یافت نشد. در کل مقادیر به دست آمده از محاسبه این پارامتر این برای هر سه دوره زمانی بیانگر پیچانرودی بودن رودخانه زهره در جلگه هندیجان و وجود تغییرات موفولوژی رودخانه در این بازه زمانیست.

۲) میانگین زاویه مرکزی از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ با مقدار  $196/6$  تا  $162/5$  کاهش داشته و در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ با مقدار  $162/5$  تا  $191/3$  افزایش داشته است. در مسیر قدیمی، بر اساس اندازه زوایای مرکزی،  $57/14$  درصد پیش‌ها در حد پیچانرود بیش از حد توسعه

یافته، ۱۴/۳۰ درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی توسعه یافته، ۱۱/۴۲ درصد پیش‌ها در حد پیچانرود توسعه نیافته، ۱۷/۱۴ درصد در حد شاخ گاوپیست و درصدی برای پیش‌های شبه پیچانرود یافت نشد. در سال ۲۰۰۰ میلادی، بر اساس اندازه زوایای مرکزی، ۴۲/۸۶ درصد پیش‌ها در حد پیچانرود بیش از حد توسعه یافته، ۱۴/۳۰ درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی توسعه یافته، ۲۳/۸۰ درصد پیش‌ها در حد پیچانرود توسعه نیافته، ۹/۵۲ درصد پیش‌ها در حد شبه پیچانرود و ۹/۵۲ درصد در حد شاخ گاوپیست. در سال ۲۰۱۴ میلادی بر اساس اندازه زوایای مرکزی، ۲۳/۸۰ درصد پیش‌ها در حد پیچانرود بیش از حد توسعه یافته، ۱۹ درصد پیش‌ها در حد پیچانرودی توسعه یافته، ۱۴/۳۰ درصد پیش‌ها در حد پیچانرود توسعه نیافته، ۱۴/۳۰ درصد پیش‌ها در حد شبه پیچانرود و ۲۸/۶۰ درصد در حد شاخ گاوپیست. در کل مقادیر به دست آمده از محاسبه این پارامتر این برای هر سه دوره زمانی بیانگر پیچانرودی بودن رودخانه زهره در جلگه هندیجان و وجود تغییرات موفولوژی رودخانه در این بازه زمانیست.

۳) میانگین طول قوس از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ با مقدار ۱۱۹۷ تا ۱۱۱۸/۲ کاهش داشته و در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ با مقدار ۱۱۱۸/۲ تا ۱۱۵۴/۶ افزایش داشته است. در کل این پارامتر در طول این سه دوره زمانی روند کاهشی داشته است. در کل مقادیر به دست آمده از محاسبه این پارامتر این برای هر سه دوره زمانی بیانگر پیچانرودی بودن رودخانه زهره در جلگه هندیجان و وجود تغییرات موفولوژی رودخانه در این بازه زمانیست.

۴) میانگین نیم طول موج از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ با مقدار ۷۴۴ تا ۷۴۴/۶ افزایش داشته و در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ با مقدار ۷۴۴/۶ تا ۷۳۷/۹ کاهش داشته است قسمت اول نمودار شکل (۴-۴۳) روند افزایشی تغییرات طول موج از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ را نشان می‌دهد که این امر دلیل بر افزایش فاصله پیچانرودهای متوالی نسبت به هم و کاهش تراکم پیچانرودها در واحد طول و در نهایت کاهش تعداد قوس‌ها از ۳۵ به ۲۱ بوده است. در قسمت دوم نمودار شکل (۴-۴۳) روند کاهشی طول موج در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد.

که نشان دهنده کاهش فاصله پیچانوردهای متوالی نسبت به هم است. که با وجود ثابت بودن تعداد پیچانوردها، باعث تغییر در شکل آنهاست. در کل مقادیر به دست آمده از محاسبه این پارامتر این برای هر سه دوره زمانی بیانگر پیچانوردی بودن رودخانه زهره در جلگه هنديجان و وجود تغییرات مورفولوژی رودخانه در این بازه زمانیست.

۵) میانگین شعاع انحنا از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ با مقدار ۴۵۰/۱ تا ۶۶۱/۸ افزایش داشته و در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ با مقدار ۶۶۱/۸ تا ۶۳۲/۳ کاهش داشته است که این پارامتر در کل برای هر سه دوره زمانی روند افزایشی داشته است و در کل مقادیر بدست آمده برای این پارامتر پیچانوردی بودن رودخانه را تایید می‌کند. بنابراین تغییرات حاصل از بررسی این پارامتر نیز دلیل بر تغییرات مورفولوژی رودخانه زهره در جلگه هنديجان در طول سه دوره زمانیست.

۶) تعداد قوس‌ها از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۰۰ از مقدار ۳۵ تا ۲۱ کاهش داشته و در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ تعداد پیچش‌ها ثابت باقی مانده است با این وجود، پیچش‌ها تغییراتی نیز داشته‌اند. این پارامتر، باعث تغییر در طول قوس، شعاع مرکزی، ضریب خمیدگی، طول موج و در نهایت نیم طول موج می‌باشد. بنابراین یکی از پارامترهای مهم در تغییرات مورفولوژی رودخانه محسوب می‌شود.

#### ۵-۴- نتایج نهایی بررسی مورفولوژیکی رودخانه زهره

با در نظر گرفتن مطالعات صورت گرفته با نرم افزار CCHE2D و تصاویر ماهواره‌ای می‌توان گفت، با توجه به اندازه ذرات رسوبی موجود و پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده‌ی موثر در فرسایش مانند: سرعت و تنش برشی، می‌توان فرسایش دیواره‌های رودخانه زهره واقع در جلگه هنديجان، و رسوب‌گذاری در سدهای حاشیه و مناطق با سرعت کم و نیز با توجه به محاسبه پارامترهای مهم در تغییرات مورفولوژی رودخانه مانند: ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، طول قوس و شعاع انحنا، پیچانوردی بودن و در نهایت تغییرات مورفولوژی رودخانه را توجیح کرد.

## ۵-۵- پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی ایجاد شده در آینده

همان‌طور که در طول این سه دوره زمانی از مسیر قدیمی تا سال ۲۰۱۴ میلادی ایجاد چهار میانبر و سایر تغییرات ایجاد شده قابل توجه مورفولوژیکی، رخ داده است طبق آنچه که در سه شکل (۴-۳۲)، (۴-۴۶) و (۴-۴۷) قابل مشاهده است، پیش‌بینی می‌شود که در محل پیچش شماره ۱۸ در محل گلوگاه موجود، در آینده قطع شدگی رخ دهد که باعث از بین رفتن پیچش‌های شماره ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ و ایجاد پیچش جدید، خواهد شد. چرا که در این سه دوره مطابق با شکل (۴-۴۷) فاصله گلوگاهی به مرور کاهش پیدا کرده است که این صحت پیش‌بینی انجام شده را تایید می‌کند. برای جلوگیری از تخریب بیش از حد سواحل و بستر رودخانه و به منظور ایجاد شرایط مناسب‌تر جهت کشاورزی، کشتیرانی و ماهیگیری بهتر است در این محل یک میانبر (Cut off) مصنوعی ایجاد کرد.

## ۵-۶- جمع بندی مطالب

با توجه به داده‌های آماری بدست آمده می‌توان مشاهده کرد که سرعت متوسط در رودخانه ۰/۲ متر بر ثانیه در دبی‌های پایین تر از ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه بوده و در زمان سیلابی به ۱/۵۷ متر بر ثانیه رسیده که این امر در دبی‌های ۱۵۰ به پایین بیشتر باعث پدیده رسوب‌گذاری و در دبی‌های سیلابی (بیشتر از ۲۰۰) باعث پدیده فرسایش و تخریب ساحل بیرونی قوس‌ها و بستر رودخانه می‌شود. از آنجا که در بیشتر مواقع سال دبی رودخانه کمتر از ۱۵۰ متر مکعب بر ثانیه بوده پس بیشتر پدیده رسوب‌گذاری را خواهیم داشت و در مواقع سیلابی فرسایش اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن در طول زمان تغییراتی در مورفولوژی رودخانه و شکل بستر رخ می‌دهد. فرسایش در دبی‌های سیلابی را می‌توان با نصب آبشکن کنترل کرد. نصب آبشکن در قوس باعث پایین آوردن سرعت و در نتیجه آن پایین آوردن تنش برشی و در نهایت باعث جلوگیری از فرسایش و در نتیجه تثبیت ساحل می‌شود. با در نظر گرفتن مطالعات صورت گرفته با نرم افزار CCHE2D و تصاویر ماهواره‌ای می‌توان گفت، با توجه به اندازه ذرات رسوبی موجود و پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده موثر در فرسایش مانند:

سرعت و تنش برشی، می‌توان فرسایش دیواره‌های رودخانه زهره واقع در جلگه هندیجان، و رسوب-گذاری در سدهای حاشیه و مناطق با سرعت کم و نیز با توجه به محاسبه پارامترهای مهم در تغییرات مورفولوژی رودخانه مانند: ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی، طول قوس و شعاع انحنا، پیچانرودی بودن و در نهایت تغییرات مورفولوژی رودخانه را توجیح کرد.

#### ۵-۷- ارائه پیشنهادات

(۱) با توجه به هزینه کم شبیه‌سازی با مدل ریاضی و اینکه نتایج حاصل از مدل ریاضی با واقعیت همخوانی دارد بنابراین پیشنهاد می‌شود که جهت بررسی پدیده‌های هیدرولیکی با استفاده از یک مدل ریاضی، گزینه‌های مختلف از طرح‌ها مورد بررسی قرار گرفته و بهترین گزینه از میان آن‌ها انتخاب شود.

(۲) محققین دیگر، می‌توانند شبیه‌سازی فرسایش و رسوب گذاری را در سایر رودخانه‌ها با وجود آبشکن مورد مطالعه قرار دهند.

(۳) تأثیر استفاده از چند آبشکن با فواصل مختلف بصورت همزمان بررسی گردد.

(۴) استفاده از مدل‌های سه بعدی به جای مدل‌های دوبعدی.

(۵) بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها با نرم افزار ARC- GIS برای سایر رودخانه‌ها.

(۶) مقایسه نتایج به دست آمده با نرم افزارهای شبیه‌سازی دیگر مانند SSIM.

## فهرست منابع

۱. آذرنگ، ف. ۱۳۸۸. بررسی شرایط جریان و رسوب در رودخانه کارون بازه اهواز با استفاده از مدل ریاضی CCHE1D. پایان نامه کارشناسی ارشد چاپ شده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان.
۲. آل یاسین، ا. ۱۳۷۹. کاربرد مهندسی رودخانه در رودخانه های دز و کارون. کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.
۳. ارشد، ص.، مرید، س.، میر ابوقاسمی، ه. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها با استفاده از سنجش از دور مطالعه موردی رودخانه کارون از گتوند تا فارسیات. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد چهاردهم، شماره ششم، صفحات ۱-۱۵.
۴. اسماعیل نژاد، م. ۱۳۸۱. بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان ورودی به آبگیرهای سد انحرافی حمیدیه با استفاده از میکرومدل. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تأسیسات آبیاری، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۵. امیدبخش، پ.، حسونی‌زاده، ه. ۱۳۸۸. بررسی اثرات هیدرولیکی برداشت مصالح از رودخانه‌ها با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS مطالعه موردی رودخانه اعلاء - خوزستان. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۶. تائبی، ح.، شفاعی بجستان، م.، کاهه، م. ۱۳۸۸. شبیه سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدل CCHE2D. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران.
۷. تلوری، ع. ۱۳۸۳. اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه، پژوهشکده حفاظت خاک و آب خیزداری، وزارت جهاد کشاورزی.
۸. تلوری، ع. ۱۳۷۴. عوامل مختلف فرسایش رودخانه‌ای و بررسی اجمالی چگونگی تاثیر آن‌ها، کارگاه آموزشی تخصصی کنترل فرسایش در رودخانه‌ها، انجمن هیدرولیک ایران، طرح نهایی تحقیقاتی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.
۹. تلوری، ع. ۱۳۷۳. رودخانه‌ها و مشخصات هندسی آن‌ها، تحقیقات جهاد کشاورزی.
۱۰. چورلی، ریچارد جی، شوم، استانی، سودن، دیوید ای (۱۳۸۰): ژئومورفولوژی، جلد اول (دیدگاه‌ها)، ترجمه احمد معتمد و ابراهیم مقیمی، تهران: انتشارات سمت. چاپ دوم.
۱۱. حسین زاده، م.، نوحه گر، ا.، صدوق، ح.، غلامی، ع. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات ژئومورفولوژیک رودخانه مهران بر روی دلتا با استفاده از سنجش از دور و سیستم های اطلاعات جغرافیایی (استان هرمزگان، بندر لنگه). پژوهش های فرسایش محیطی، جلد ۱، شماره ۲، صفحات ۵۳-۶۸.
۱۲. خسروی، غ. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی عددی جریان و رسوب توسط مدل CCHE2D (مطالعه موردی: پیچانرود پایین دست میناب). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هرمزگان.
۱۳. خضری نژاد، م.، ظهیری، ع.، مفتاح، م.، حسام، و. ۱۳۸۹. شبیه سازی الگوی رسوب گذاری در مخزن سد گرشا با استفاده از مدل ریاضی CCHE2D، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
۱۴. حقی آبی، ا.، امامقلی‌زاده، ص. ۱۳۹۴. پیش‌بینی فرسایش کناری بخش‌های پیچانرودی رودخانه کشکان. فصلنامه جغرافیا و توسعه، سال سیزدهم، شماره ۴۰، صفحات ۱-۱۳.
۱۵. رضائی مقدم، م.، ثروتی، م.، اصغری سراسکانرود، ص. ۱۳۹۱. بررسی تغییرات شکل هندسی رودخانه قزل اوزن با تاکید بر عوامل ژئومورفولوژیک و زمین شناسی، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحات ۱-۱۴.
۱۶. روغیان، س. ۱۳۸۹. بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون با استفاده از مدل CCHE2D. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان.

۱۷. شرکت مهندسين مشاور جاماب ۱۳۷۸. طرح جامع آب کشور، حوزه آبريز زهره، وزارت نیرو، ۳۶۴ صفحه.
۱۸. شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۹. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۹. عباسی، م.، مرادی، ا.، برزکار، م. ۱۳۹۳. بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی رودخانه زاب با استفاده از RS و GIS. نخستین همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش از دور و GIS) در آمایش سرزمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد.
۲۰. عزیزیان، ا.، امیری تکلدانی، ا.، رستمی، م. ۱۳۹۰. بررسی روند حرکت گودال های برداشت مصالح رودخانه ای با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، انجمن هیدرولیک ایران. دانشگاه گیلان، ۶ صفحه.
۲۱. علائی طالقانی، م.، حاصلی، ف.، احمدی ملاوردی، م. ۱۳۹۲. ارزیابی نقش انسان در فرسایش کناره ای و گسترش جانبی مئاندرهای رودخانه ی گاماسیاب در دشت بیستون، مجله جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۶. صفحات ۱۲۰-۱۰۷.
۲۲. علینقی‌زاده بهبهانی، ه. ۱۳۸۳. بررسی شرایط هیدرولیکی جریان در آبگیرهایی با زاویه ی انحراف ۹۰ و ۷۵ درجه با استفاده از مدل فیزیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تأسیسات آبیاری، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲۳. فاطمی عقدا، م.، فیاضی، ف.، علیپور، د.، ۱۳۸۰. بررسی زمین شناسی مهندسی بخشی از رودخانه کرخه (روستای عبدالخان تا روستای الهایی). نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، جلد ۱، شماره ۳ و ۴، صفحات ۱۶۳-۱۷۸.
۲۴. فتحی، م. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در بازه‌ای از یک پیچان‌رود طبیعی به کمک نرم افزار CCHE2D. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد.
۲۵. فروغی، ع.، بنی رضی، م.، بنی حبیب، م.، شفاعی بجستان، م.، ساجدی سابق، م. ۱۳۸۰. کاربرد صفحات مستغرق برای ساماندهی و تثبیت رودخانه‌های فصلی. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.
۲۶. فقیه الاسلام جهرمی، ع.، موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و رسوب حول آبشکن در قوس ۱۸۰ درجه با نرم افزار CCHE2D. هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲۷. کمان‌بدست، ا.، ۱۳۸۵. بررسی فرسایش برای تعیین عمق فونداسیون پنجه و نوک آبشکن در چند طرح اجرا شده (کرخه، زهره و کشکان) جهت حفاظت سواحل رودخانه. هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
۲۸. کمان بدست، ا.، ۱۳۸۹. کتاب راهنمای نرم افزار CCHE2D، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز.
۲۹. کمان‌بدست، ا.، ۱۳۹۰. آموزش نرم‌افزار CCHE2D (راهنمای تشکیل و شبیه‌سازی رسوب و الگوی جریان). دانشگاه آزاد اسلامی اهواز. ۳۰۸ صفحه.
۳۰. کمان بدست، ا.، و بهشتی، ع. ۱۳۹۰. تحلیل عددی پارامترهای هیدرولیکی در رودخانه‌ها. اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاههای برق آبی، تهران، ۹ صفحه.
۳۱. مغربی، م.، ۱۳۹۰. شبیه سازی عددی اثر زاویه آگیری بر الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه به کمک نرم افزار CCHE2D، اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و برق آبی.



۳۲. مقصودی، م.، شرفی، س.، مقامی، ی. ۱۳۸۹. روند تغییرات الگوی مورفولوژیکی رودخانه خرم آباد با استفاده از RS.GIS و Auto Cad. مجله مدرس علوم انسانی - برنامه ریزی و آمایش فضا، دوره چهاردهم، شماره ۳.
۳۳. میرزاوند، م.، قاسمیه، ه.، نظری سامانی، ع.، ولی، ع.، ساداتی نژاد، ج. ۱۳۹۴. بررسی الگوی پیچانرود رودخانه‌ها با استفاده از شاخص‌های لئوپولد و کورنایس (مطالعه مورد: رودخانه بابلرود و سجادرود)، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال ششم، شماره ۱۱، صفحات ۱۶۱-۱۵۲.
۳۴. نجفی پور، ف.، ساکی، ع. ۱۳۸۵. طرح ساماندهی پیچان‌رودهای با جداره ناپایدار جهت کنترل مسیرو کاهش فرایند رسوب‌گذاری. هفتمین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳۵. نشریه سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور "فرسایش و رسوب گذاری در محدوده آبشکن‌ها" نشریه شماره ۲۸۴.
۳۶. نشریه سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، راهنمایی طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای، نشریه شماره ۵۱۶.
۳۷. نوحه گر، ا.، حسین زاده، م.، افشار، ط. ۱۳۸۹. تغییرات ژئومورفولوژیک نیمرخ طولی و عرضی علیای رودخانه میناب (از سد تا پل میناب). جغرافیا (فصلنامه علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، دوره جدید، سال هشتم، شماره ۲۴.
۳۸. نوحه گر، ا. ۱۳۸۰. ژئومورفولوژی رودخانه میناب و مدیریت آن، پایان نامه دکترا.
۳۹. نوحه گر، ا. ۱۳۸۲. بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچانرود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب. مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۱.
۴۰. نیکنام، ع. ۱۳۹۱. شبیه سازی الگوی رسوب‌گذاری در مخزن سد دز با استفاده از نرم افزار CCHE2D. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران - ساری.
۴۱. یمانی، م. ۱۳۷۸. علل تغییر مسیر دوره‌ای رودخانه‌ها در روی دلتاهای شرق جلگه ساحلی مکران، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳.
۴۲. یمانی، م.، شرفی، س. ۱۳۹۰. ژئومورفولوژی و عوامل موثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان. مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی سال ۲۳، پیاپی ۴۵، شماره ۱، صفحات ۱۵-۳۲.
۴۳. یمانی، م.، نوحه گر، ا. ۱۳۸۵. بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچانرود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین دست میناب)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۱، صفحات ۶۸-۶۵.

44. Biedenharn et. al. 1997. The Wes strem investigation and streambank stabilization, hand book. U.S. Army Engineering.
45. Barkdoll, B, Robert Ettema, Members, ASVE, and A. Joob Odgaard. 1999. "Sediment Control at Lateral Diversion: Limits and Enhancements To Vane Use", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.122 (7) pp.862-870.
46. Brige, J., S., 2008. Rivers and Flood Plains. Translated by Rezaee Moghadam, M.H., and Saghafi, M., First Edition, Samt Press, Tehran.
47. Campuzano, F.J, Lettao, P.C, Gong, M.I, Alves, V., and Tironi, A. 2011. Hydrodynamical Vertical 2D model for the Aysen FJord, perspectives on integrated coastal zone management in Sourth America, IST Press.
48. Chang, H.H. 1984. Analysis of river meanders, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110 (1) pp. 37-50.

49. Davinroy, R. 1999. River Replication. *Journal of Civil Engineering*, pp. 60-63.
50. Davis, G., Nicholas, M.D., Hannigan, T.M. 2003. Effects of Project Operations on Geomorphic Processes Downstream of Oroville Dam, Oroville Facilities Relicensing No. 2100, pp. 1-60.
51. Doll, B.A., Haman, G.D., Jennings B., and Wis, D.E. 2003. *Stream Restoration: A natural channel design handbook*, NC Stream Restoration Institute, NC State University, pp. 128.
52. Duan, G.H. and Nanda, S.K. 2005. Two-dimensional depth-averaged model Simulation of Suspended Sediment Concentration Distribution in groyne field. *Journal of Hydrology*, 327, 426-437.
53. Fares, Y.R., Herbertson, J.G. 1993. Behaviour of Flow in a Channel Bend a Side Overflow (flood relief) Channel. *Journal of Hydraulic Research. IAHR*, Vol. 31 (3) pp. 383-402.
54. Ferguson, R.I. 1984. The threshold between Meandering and Braiding, *Proceeding of the first International Conference on Hydraulic Design*, Springer Verlag, Newyork, pp. 15-29.
55. Brierley, G., and Fryirs, K. A. 2005. *Geomorphology and River Management*. Blackwell Publishing.
56. Garbrecht, J., Kuhnle, R. and Alonso, C. 1995. A sediment transport capacity formulation for application to large channel networks. *J. of Soil and Water Conservation*, 50(5), 527-529.
57. Hasan, Z., Ghani, A., and Zakaria, N. 2007. Application of 2-D Modeling for Muda River Using CCHE2D. 2<sup>nd</sup> International Conference on managing River Basins, Juan 6-8, 2007.
58. Hussein, A.S.A. and Smith, K.V.H. 1986. Flow and Bed Deviation Angle in Curved Open Channels. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 24 (2) pp. 93-108.
59. Jansen, p.p. 1983. *Principle of River Engineering*. Pitman, Pub.co., London.
60. Jia, Y., Zhang, Y., Wang, S., Raible, A. 2006. Numerical Simulations of channel Response to river in Structures in Arkansas river. *The 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering ICHE-2006*. Philadelphia, USA. Sep. 10 – Sep. 13.
61. Johnson, P.A., Hey, R.D., Tessier, M., and Rosgen, D.L. 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 12 (79) pp. 772-778.
62. Khawaja, B.A., Sanchez, M. 2008. Sedimentation Processes, River Morphology and Reservoir Modeling, Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Sophia Antipolis, Doi: 10/5150/jngcgc, PP.739-749.
63. Leopold L.B. 1965. *Fluvial Processes in Geomorphology*, W.H Freeman and Company Sanfransico.
64. Leopold, L.B. and Wolman, M.G. 1957. *River Channel Pattern braided, meandering and straight*. USGS. Professional paper. 282.B.
65. Marelius, F., Sinha, S.K. 1998. Experimental Investigation of Flow Past Submerged Vanes" *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 124 (5) pp. 542-545.
66. Millar, R.G., and Quik, M. 1993. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers, *Journal of Hydraulic Engineering- asce*, Vol. 119 (12) pp. 1343-1363.
67. Nakato, T., Ogden, F.L. 1998. Sediment control at Water Intakes Along Sand- Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 124 (6) pp. 589-596.
68. Nakato, T., Kennedy, J.F. and Bauerly, D. .1990., Pump-Station Intake – Shoaling Control with Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116 (1) pp. 119-128.

69. National Park Service Intermountain Support Office Denver\_Colorado. 1998. Green River FLO-2D Discharge Routing Model Flaming Gorge Dam to Colorado River Confluence. FLO Engineering, Inc. Breckenridge, Colorado.
70. Neill, C.R. Evans, B.J., 1997. Disusion by Sediment Control at Water Intake. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122 (7) pp. 670-671.
71. Novak, P. and Cabelka, J. 1981. Models in Hydraulic Engineering. Pitman Advanced Publishing Program, 459 pp.
72. Odgaard, A.J. and Wang, Y. 1991. Sediment Management with Submerged Vanes. I: Theory, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117 (3) pp. 267-283.
73. Odgaard, A.J. and Wang, Y. 1991. Sediment Management with Submerged Vanes, II: Application, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117 (3) pp. 284-301.
74. Orfeo, O., and Stevaux, J. 2002. Hydraulic and morphological characteristics of middle and upper reaches of the Parana´ River (Argentina and Brazil). Geomorphology, Vol. 44, pp. 309–322.
75. Proffit, G.T. and Sutherland, A.J. 1983. Transport of nonuniform sediment. J. of Hydraulic Research, Vol. 21(1), 33-43.
76. Rangzan, K.M, Toolae Nezhad, M. and Piraste, S. 2002. Study the effects of rivers migration civil structure in Khuzestan Plain using satellite data. Proc. Of 6<sup>th</sup> International Conference of River Engineering in Ahvaz. 169-181.
77. Richard, G., Julien, P. 2003. Dam Impacts on and Restoration of an Alluvial River– Rio Grande, New Mexico, International Journal of Sediment Research, Vol. 18 (2) pp. 89-96.
78. Rinaldi. M., Wyzga B., and Surian N. 2005. Sediment mining in alluvial channels: Physical effects and management perspectives. River Research and Applications, Vol. 21 (7) pp. 805-828.
79. Rodi, W., and Leschziner, A. 1978. Calculation of strongly curved open channel flow. Journal of the Hydraulic Division, 105 (HY10).
80. Shafieefar, M. 2001. Migration pattern of final bends of Zohreh River case study of a yong river. Proc. Of XXIX IAHR Hydraulic. 413-422.
81. Shukry, A., 1950. Flow around bends in an open flume, Transactions, ASCE. 115.
82. Surian, N., M, Rinaldi. 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Geomorphology, Vol. 50, pp. 307–326.
83. Thorne, C.R. 2002. Geomorphic analysis of large alluvial rivers. Journal of Geomorphology. Vol. 44 (5) 203-219.
84. Viessman, J.R., 1972. Introduction to Hydrology. Pergamon Press, New York.
85. Wolfert, H.P. 2001. Geomorphologic Change and River Rehabilitation, Case Studies on Lowland Fluvial Systems in the Netherlands. Alterra Green World Research, Wageningen.
86. Wu, W., Rodi, W. and Wenka, Th. 2000. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 126(1), 4-15.
87. Wu, W. and Vieira, D.A. 2000. One-dimensional channel network model CCHE1D 2.0 Technical manual. Technical Report No. NCCHE-TR-2000-1, National center for computational Hydrosections and Engineering, The University of Mississippi.
88. Yeh, K., Wang, S., Chen, H., Liao, CH., Jia, Y., Zhang, Y. 2010. Numerical Simulation of Sediment Transport and Morphological Change of Upstream and Downstream Reach of Chi-Chi Weir, Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics, pp. 312-326.
89. Zhang, Y., 2005. CCHE2D-GUI – Graphical User Interface for the CCHE2D Model, User’s Manual – Version 2.2, Technical Report No. NCCHE-TR-2005-03. The University of Mississippi.

90. Zorkeflee, H. 2007. Application of 2-D Modelling for Muda River Using CCHE2D, International conference on managing Rivers in the 21 Century Solution Towards Sustainable.

## Abstract

In general, factors of erosion and sedimentation which lead to morphologic variations appear in the alluvial rivers. In fact, the science of the morphology of alluvial rivers can be defined as the study of shape and surface structure of the earth influenced by water flow. One of the most important factors related to the morphology of rivers is erosion and sedimentation, especially river bank erosion in the outer bank which is caused by secondary flows. In this study, the morphology variations of the Zohreh River with length of 23 km which located in the Hendijan plain between latitude of  $49^{\circ}30'E$ -  $49^{\circ}38'E$  and  $30^{\circ}6'N$ -  $30^{\circ}2'N$  is investigated. The 30-year data of Dehmola hydrometric station which located on the Zohreh River was used. The maximum, average, and maximum discharge of this hydrometric station are 145, 90, and  $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectively. The scrutiny of the morphology variations of the Zohreh River was implemented in two parts.

In the first part, hydraulic simulation of the Zohreh River for discharge less than  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  and also for flood discharge were done and the results analyzed. Regarding this point that, for about 80 percent of a year, the Zohreh River has discharge less than  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , results indicate that in most times sedimentation occurs in the Zohreh River, and only in the discharge rates higher than  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  erosion happens which is the cause of long-term morphology variation of the Zohreh River. In the second part, based on the satellite images for three time periods of "old course", "2000 Am", and "2014 AM", the morphology variation of the Zohreh River is studied. So, the satellite images are processed and analyzed with GIS model, and important indexes of morphology variations such as curvature index, central angle, arc length and etc are calculated. The results indicate that in the past, 4 times cutoff occurred in this river, and in the future one more is going to happen. The number of meanders through this three time periods reduced from 35 to 21. Meanders also have been experiencing changes. The average of curvature index changes from 1.64 to 1.58. This value for curvature radius, changes from 450.1 to 632.3. For central angle the average value varies from 196.2 to 193.3. The average of arc length changes from 1197 m to 1154.6 m. According to the classification of Velfort based on the curvature index, and the classification of Kornis based on the central angle, the Zohreh River in the Hendijan plain is categorized as meanderer to sever meander rivers. Finally, in order to prevention of more erosion, designing a groyne as a river structure is suggested. The results show considerable effect in controlling the erosion.

**Keywords:** Erosion, CCHE2D mathematical model, Groin, Morphology, Satellite images, Sedimentation, Simulation, Zohreh river



Faculty of Agriculture  
MSe Thesis in Water Structures

Investigation of morphology changes of Zohreh river using CCHE2D  
model

By: Fatemeh darvishzadeh

Supervisors:

Dr. Khalil Azhdary

Dr. Samad Emamgholizadeh

Advisor:

Dr. Mohammad Sayari

September 2016