

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

روندیابی سیل رودخانه بازفت با استفاده از مدل عددی MIKE11

نگارنده: مریم حسین زاده

استاد راهنما

جناب آقای دکتر صمد امامقلی زاده

استاد مشاور

سرکار خانم دکتر زهرا گنجی نوروزی

جناب آقای دکتر حسین صمدی

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم بہ

پیشگاہ مقدس خداوندباری تعالیٰ کہ ہستی ام از اوست

و تقدیم بہ

بہ دو عشق پاک زندگی ام : پدر و مادرم

## تشکر و قدردانی

با حمد و سپاس به درگاه ایزد منان که انسان را به قداست و زیور علم بیاراست.

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم نعمتی ارزانی‌ام داشت تا بتوانم در راه خدمت به جامعه علمی مهندسی علوم آب و بخصوص علم گسترده و پویای هیدرولیک گامی هر چند کوچک بردارم.

اکنون که در سایه الطاف و عنایات بی‌کران خداوند موفق به نگارش این پایان‌نامه شده‌ام بجاست از باب (لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقِ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقِ) سپاسگزار و قدردان زحمات عزیزانی باشم که راهنما و دستگیرم بوده‌اند.

از استاد ارجمند و گرانقدرم جناب آقای دکتر صمد امامقلی‌زاده که فراتر از یک استاد، در مسیر پرپیچ و خم زندگی و مسیر حق و حقیقت، رهنمودهایشان همواره راه‌گشای اینجانب بوده است، صمیمانه کمال تشکر و قدردانی می‌نمایم و از خداوند منان توفیقات روزافزون و طول عمر باعزت را برای ایشان خواستارم. سخاوتمندی و بزرگواری ایشان منتهی است ابدی.

از استاد مشاور عالی‌قدر و صبور سرکار خانم دکتر زهرا گنجی که همواره طی دوران تحصیلات عالی و تدوین پایان‌نامه اینجانب را یاری کرده و مرا از دانش و نصایح ارزشمندشان بهره‌مند ساخته‌اند صمیمانه تشکر می‌کنم و از خداوند متعال علو درجات و موفقیت روزافزونشان را در سنگر علم و دانش آرزومندم. از آقای دکتر حسین صمدی که همچنین مشاوره پژوهش را برعهده داشتند، سپاسگزار و قدردانم. برای ایشان آرزوی سلامتی، شادکامی و موفقیت می‌نمایم.

بر حسب وظیفه از همه‌ی آموزگاران ارجمندم از آغاز تا به امروز در طول سال‌های به یاد ماندنی شاگردیشان تشکر می‌نمایم. از خانواده گرانقدرم که با همدلی و همراهی‌هایشان مرا تا این وادی یاری نمودند خاضعانه سپاسگزارم.

از مسئولین محترم سازمان آب منطقه‌ای شهرکرد که در تهیه اطلاعات این پایان‌نامه مساعدت نمودند تشکر می‌نمایم.

در خاتمه از کلیه عزیزان و دوستانی که در انجام این پژوهش مشوق من بوده‌اند سپاسگزارم، همچنین همه‌ی بزرگواری که از نتایج علمی آن‌ها در این پایان‌نامه بهره گرفته شده است کمال تشکر را دارم. توفیق و سعادت همگان را از درگاه ایزد منان خواستارم.

## تعهد نامه

اینجانب مریم حسین زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه روندیابی سیل رودخانه بازفت با استفاده از مدل عددی MIKE11 تحت راهنمایی جناب آقای دکتر صمد امامقلی زاده به عنوان استاد راهنمای خود 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 تا کنون 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 «Shahrood 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 به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ / ۱۱ / ۱۳۹۵

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در زمینه‌ی مطالعات مهندسی رودخانه‌ها مطرح است، پیش‌بینی عمق، دبی و دیگر مشخصات جریان ناپایدار در نقاط کلیدی رودخانه‌های طبیعی است که با عنوان روندیابی سیل (Flood Routing) نامگذاری می‌شود. به عبارتی در روندیابی سیلاب هیدروگراف ناشی از سیلاب در پایین‌دست رودخانه با استفاده از هیدروگراف معلوم بالادست استخراج می‌گردند. روش‌های روندیابی به دو گروه کلی شامل روندیابی هیدرولوژیکی و روندیابی هیدرولیکی تقسیم‌بندی می‌گردند. با توجه به اهمیت این موضوع در این تحقیق دو روش ماسکینگام و موج دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت که روش اول جزء روش‌های هیدرولوژیکی و روش دوم از جمله روش‌های هیدرولیکی روندیابی سیل محسوب می‌گردند. منطقه مورد مطالعه برای این تحقیق بازه‌ای از رودخانه بازفت می‌باشد که در غرب و شمال‌غرب استان چهارمحال و بختیاری واقع گردیده است. در این بازه به طول تقریبی ۴۷ کیلومتر، اقدام به روندیابی سیلاب توسط هر یک از روش‌های مورد مطالعه گردید. برای روش ماسکینگام برنامه‌ای کامپیوتری با استفاده از تکنیک ماکرونویسی در محیط Excel تهیه گردید و جهت روندیابی سیل به روش موج دینامیک از تحلیل غیرماندگار نرم‌افزار HEC-RAS و MIKE11 استفاده شد. جهت مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مورد مطالعه، از پارامترهای  $R^2$ ، RMSE، درصد خطای اوج، درصد خطای نسبی و غیره استفاده گردید که در کلیه پارامترهای مورد مقایسه، روش موج دینامیک MIKE11 دارای بیشترین دقت بوده و روش‌های ماسکینگام و موج دینامیکی HEC-RAS در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. البته در بسیاری موارد نتایج روش ماسکینگام نزدیک به نتایج روش موج دینامیک MIKE11 بوده است. همچنین پس از تحلیل فراوانی سیلاب در بازه مورد مطالعه، اقدام به پهنه‌بندی سیلاب توسط مدل هیدرولیکی HEC-RAS با استفاده از ضمیمه HEC-GeoRAS در محیط ArcGis شد. همچنین نقشه‌ها و شکل‌های بدست آمده از شبیه‌سازی هیدرولیکی منطقه، می‌تواند ضمن شناساندن مناطق مستعد سیل‌گیر، به عنوان وسیله‌ای قانونی در مدیریت و برنامه‌ریزی‌های توسعه و مدیریت رودخانه در شرایط سیلابی و حفاظت محیط زیست مورد استفاده قرار گیرند.

**کلمات کلیدی:** روندیابی سیلاب، بازفت، ماسکینگام، HEC-RAS، GIS، MIKE11.

## لیست مقاله‌های استخراج شده از پایان نامه

۱- حسین‌زاده، م.، امامقلی‌زاده، ص.، گنجی، ز و صمدی، ح. "مقایسه روندیابی سیلاب توسط مدل‌های HEC-RAS و MIKE11 در رودخانه بازفت". پانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۲۴ و ۲۵ آذر ۱۳۹۵ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۲- حسین‌زاده، م.، امامقلی‌زاده، ص.، گنجی، ز و صمدی، ح. "پهنه‌بندی سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی تحلیل رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه بازفت- شهرستان کوه‌رنگ)". چهارمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، ۷ و ۸ دی ۱۳۹۵ دانشگاه شهید بهشتی تهران.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- ضرورت انجام تحقیق
۵	۳-۱- اهداف تحقیق
۶	۴-۱- روش انجام تحقیق
۷	۵-۱- مرور مطالب پایان نامه
۹	فصل دوم کلیات و پیشینه تحقیق
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۰	۲-۲- مفاهیم
۱۰	۱-۲-۲- سیل
۱۱	۲-۲-۲- سیلاب دشت
۱۱	۳-۲-۲- روش‌های مدیریت مهار سیلاب
۱۲	۴-۲-۲- حوضه
۱۳	۵-۲-۲- رودخانه
۱۴	۶-۲-۲- روندیابی سیل
۱۵	۷-۲-۲- هیدروگراف و مشخصات آن
۱۷	۱-۷-۲-۲- بررسی تغییرات هیدروگراف سیلاب در حین عبور از رودخانه
۱۹	۸-۲-۲- امواج در مجاری باز
۲۰	۹-۲-۲- معادلات سنت و نانت
۲۱	۱-۹-۲-۲- معادله اندازه حرکت



۲۲	..... معادله پیوستگی ۲-۹-۲-۲
۲۳	..... روش‌های حل معادلات سنت ونانت ۳-۹-۲-۲
۲۵	..... پیشینه تحقیق ۳-۲
۲۵	..... سیر اجمالی توسعه معادلات جریان غیرماندگار ۱-۳-۲
۲۷	..... مروری بر تحقیقات داخلی و خارجی مرتبط با موضوع روندیابی سیل ۲-۳-۲
۲۷	..... تحقیقات خارجی انجام شده در زمینه روندیابی سیلاب و حل معادلات جریان ۳-۳-۲
۳۵	..... تحقیقات داخلی انجام شده در زمینه روندیابی سیلاب و حل معادلات جریان ۴-۳-۲
۳۷	..... تحقیقات صورت گرفته در زمینه پهنه‌بندی سیلاب ۵-۳-۲
۴۳	..... فصل سوم مواد و روش‌ها
۴۴	..... مقدمه ۱-۳
۴۴	..... شرح منطقه مورد مطالعه ۲-۳
۴۶	..... ایستگاه‌های هیدرومتری ۱-۲-۳
۴۷	..... انواع روش‌های روندیابی سیلاب ۳-۳
۴۸	..... روش‌های روندیابی هیدرولیکی ۱-۳-۳
۴۹	..... روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی ۲-۳-۳
۵۳	..... روندیابی هیدرولوژیکی در رودخانه ۳-۳-۳
۵۴	..... روش ماسکینگام ۱-۳-۳-۳
۵۷	..... مطالعات هیدرولیک ۴-۳
۵۷	..... مقدمه ۱-۴-۳
۵۷	..... مدل ۲-۴-۳
۵۷	..... انتخاب مدل ریاضی مناسب ۳-۴-۳
۵۸	..... مدل‌های ریاضی ماندگار ۱-۳-۴-۳

۵۸	..... مدل‌های ریاضی غیرماندگار
۵۹	..... معرفی مدل‌های به کار رفته در این تحقیق
۶۰	..... نرم‌افزار HEC-RAS
۶۰	..... نرم‌افزار MIKE11
۶۱	..... نرم‌افزار ARCGIS
۶۱	..... نرم‌افزار HEC-GeoRAS
۶۲	..... روش کار با نرم‌افزار HEC-RAS
۶۲	..... ورود اطلاعات مورد نیاز
۶۷	..... پهنه‌بندی سیلاب در بازه مورد مطالعه
۶۷	..... کلیات استفاده از HEC-RAS در پهنه‌بندی سیلاب
۷۰	..... روش کار با نرم‌افزار MIKE11
۷۲	..... مدول هیدرودینامیک (HD)
۷۲	..... معادلات حاکم
۷۳	..... حل عددی معادلات سنت و نانت
۷۷	..... ارزیابی مقاومت بستر رودخانه
۸۰	..... توصیف جریان
۸۳	..... اطلاعات ورودی به مدل ریاضی MIKE11
۸۹	..... کالیبراسیون و صحت نتایج
۹۰	..... معیارهای ارزیابی مدل‌ها
۹۵	..... فصل چهارم نتایج و بحث
۹۶	..... مقدمه
۹۶	..... برآزش توزیع احتمال

۹۹.....	۳-۴- نتایج مربوط به واسنجی .....
۱۰۰ .....	۳-۴-۱- تعیین ضریب مانینگ .....
۱۰۲.....	۴-۴- هیدروگراف سیلاب مشاهداتی برای اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی .....
۱۰۲.....	۴-۵- نتایج اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی .....
۱۰۳.....	الف) مدل موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS .....
۱۰۸.....	ب) مدل عددی موج دینامیکی نرم‌افزار MIKE11 .....
۱۱۴.....	ج) روش ماسکینگام با برآورد پارامترها به کمک الگوی ترسیمی .....
۱۲۲.....	۴-۶- مقایسه نتایج سه مدل MIKE11، مدل HEC-RAS و مدل هیدرولوژیکی Muskingum در برآورد هیدروگراف خروجی ایستگاه مورز .....
۱۲۶.....	۴-۷- نتایج مربوط به پهنه‌بندی سیلاب در بازه .....
۱۳۱.....	فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات .....
۱۳۲.....	۵-۱- مقدمه .....
۱۳۲.....	۵-۲- نتایج .....
۱۳۵.....	۵-۳- پیشنهادات .....
۱۳۶.....	منابع .....

## فهرست اشکال

صفحه

- شکل ۱-۲: نمایش پهنه سیلاب در مقطع عرضی رودخانه ..... ۱۱
- شکل ۲-۲: حوضه آبریز ..... ۱۳
- شکل ۳-۲: هیدروگرافهای جریان رودخانه در مقاطع A، B و C و نحوه حرکت موج سیل ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: قسمت‌های مختلف هیدروگراف استاندارد ..... ۱۶
- شکل ۵-۲: تفاوت بین هیدروگرافهای بالادست و پایین‌دست ..... ۱۸
- شکل ۶-۲: جابجایی و تعدیل هیدروگراف جریان در فرآیند روندیابی ..... ۱۹
- شکل ۷-۲: خطوط جریان در امواج نوسانی و انتقالی ..... ۲۰
- شکل ۸-۲: روش حل معادلات جریان غیردائمی ..... ۲۴
- شکل ۱-۳: موقعیت حوضه آبریز بازفت ..... ۴۵
- شکل ۲-۳: نماهای مختلف رودخانه بازفت ..... ۴۵
- شکل ۳-۳: محل ایستگاه‌های هیدرومتری روی نقشه هیپسومتری ..... ۴۶
- شکل ۴-۳: انواع روش‌های روندیابی ..... ۴۸
- شکل ۵-۳: رابطه بین دبی و ذخیره در مخازن و رودخانه‌ها ..... ۵۱
- شکل ۶-۳: نمایش ذخیره‌های منشوری و گوه‌ای هنگام شروع و فروکش سیل ..... ۵۲
- شکل ۷-۳: نمایش مفهوم ذخیره گوه‌ای و منشوری ..... ۵۳
- شکل ۸-۳: فلوچارت روندیابی به روش ماسکینگام خطی ..... ۵۶
- شکل ۹-۳: طرح شماتیک بازه انتخابی از رودخانه بازفت با موقعیت قرارگیری مقاطع عرضی در مدل ..... ۶۳
- شکل ۱۰-۳: پنجره ورود اطلاعات مربوط به مقاطع عرضی در مدل HEC-RAS ..... ۶۳
- شکل ۱۱-۳: پنجره ورود شرایط مرزی برای مرز بالادست و پایین‌دست بازه ..... ۶۴
- شکل ۱۲-۳: پنجره تحلیل جریان غیرماندگار ..... ۶۵
- شکل ۱۳-۳: پنجره مربوط به نمایش روند محاسبات در تحلیل جریان غیرماندگار ..... ۶۶

- شکل ۳-۱۴: ورود اطلاعات مربوط به دبی جریان ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۵: پنجره تحلیل جریان ماندگار ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۶: پنجره مربوط به نمایش روند محاسبات در تحلیل جریان ماندگار ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۷: پارامترهای مورد استفاده در معادلات سنت ونانت ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۸: شبکه بندی رودخانه برای حل عددی معادلات سنت ونانت ..... ۷۶
- شکل ۳-۱۹: الگوریتم ۶ نقطه ای ابوت مربوط به معادله پیوستگی ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۰: الگوریتم ۶ نقطه ای ابوت مربوط به معادله اندازه حرکت ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۱: ترم های مختلف معادله مومنوم ..... ۸۱
- شکل ۳-۲۲: شبکه محاسباتی روش موج دینامیکی ..... ۸۳
- شکل ۳-۲۳: پلان مسیر رودخانه بازفت ..... ۸۴
- شکل ۳-۲۴: نمونه ای از ترسیم مقطع عرضی بازه مورد مطالعه در اتوكد ..... ۸۵
- شکل ۳-۲۵: ترسیم مقاطع عرضی روی TIN ساخته شده و نقشه رقومی زمین و جانمایی مقاطع عرضی ..... ۸۶
- شکل ۳-۲۶: پنجره HD پارامتر ..... ۸۸
- شکل ۳-۲۷: کار با نرم افزار MIKE11 در اجرای مدل خروجی ..... ۸۹
- شکل ۴-۱: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه شهید خدري در نرم افزار SMADA ..... ۹۷
- شکل ۴-۲: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه شهید خدري در نرم افزار EASYFIT ..... ۹۷
- شکل ۴-۳: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه هیدرومتری مورز در نرم افزار SMADA ..... ۹۸
- شکل ۴-۴: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه هیدرومتری مورز در نرم افزار EASYFIT ..... ۹۸
- شکل ۴-۵: کالیبراسیون ضریب مانینگ با منحنی دبی اشل ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۶: هیدروگراف های ورودی و خروجی مشاهده شده ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۷: ارتفاع سطح سیل گیر در دوره های بازگشت مختلف در مقطع اول بازه مورد مطالعه ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۸: ارتفاع سطح سیل گیر در دوره های بازگشت مختلف در مقطع آخر بازه مورد مطالعه ..... ۱۰۴

- شکل ۹-۴: پروفیل طولی رودخانه همراه ارتفاع سطح آب در دوره‌های بازگشت مختلف ..... ۱۰۴
- شکل ۱۰-۴: نمایی نزدیک‌تر از تراز سطح آب ..... ۱۰۵
- شکل ۱۱-۴: مشاهده هیدروگراف دبی در تحلیل جریان غیرماندگار ..... ۱۰۵
- شکل ۱۲-۴: منحنی دبی-اشل مقطع آخر در نرم‌افزار HEC-RAS ..... ۱۰۶
- شکل ۱۳-۴: شکل سه‌بعدی (3D) رودخانه بازفت در نرم‌افزار HEC-RAS ..... ۱۰۶
- شکل ۱۴-۴: هیدروگراف روندیابی شده به روش مدل HEC-RAS در مقایسه با هیدروگراف پایین‌دست ..... ۱۰۷
- شکل ۱۵-۴: مقطع بالادست رودخانه بازفت مدل شده در نرم‌افزار MIKE11 ..... ۱۰۹
- شکل ۱۶-۴: مقطع پایین‌دست رودخانه بازفت مدل شده در نرم‌افزار MIKE11 ..... ۱۰۹
- شکل ۱۷-۴: پروفیل سطح آب بین ایستگاه شهیدخدری تا ایستگاه مورز مدل شده در برنامه MIKE11 ..... ۱۱۰
- شکل ۱۸-۴: منحنی دبی-اشل در مقطع آخر بازه مورد مطالعه ..... ۱۱۱
- شکل ۱۹-۴: هیدروگراف‌های بالادست و روندیابی شده توسط مدل موج دینامیکی نرم‌افزار MIKE11 ..... ۱۱۱
- شکل ۲۰-۴: تراز سطح آب قبل از وقوع سیل در بازه مطالعاتی ..... ۱۱۲
- شکل ۲۱-۴: حداکثر تراز سطح آب در حین عبور سیلاب در بازه مطالعاتی رودخانه ..... ۱۱۲
- شکل ۲۲-۴: مشاهده همزمان خصوصیات جریان سیل توسط انیمیشن پخش مدل MIKE11 ..... ۱۱۳
- شکل ۲۳-۴: هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی MIKE11 در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی پایین‌دست ..... ۱۱۳
- شکل ۲۴-۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.1$  ..... ۱۱۵
- شکل ۲۵-۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.2$  ..... ۱۱۵
- شکل ۲۶-۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.3$  ..... ۱۱۶
- شکل ۲۷-۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.4$  ..... ۱۱۶
- شکل ۲۸-۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.5$  ..... ۱۱۷
- شکل ۲۸-۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.6$  ..... ۱۱۷

- شکل ۴-۳۰: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.45$  ..... ۱۱۷
- شکل ۴-۳۱: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.46$  ..... ۱۱۸
- شکل ۴-۳۲: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.47$  ..... ۱۱۸
- شکل ۴-۳۳: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.48$  ..... ۱۱۸
- شکل ۴-۳۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.49$  ..... ۱۱۹
- شکل ۴-۳۵: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.51$  ..... ۱۱۹
- شکل ۴-۳۶: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.52$  ..... ۱۱۹
- شکل ۴-۳۷: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.53$  ..... ۱۲۰
- شکل ۴-۳۸: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.54$  ..... ۱۲۰
- شکل ۴-۳۹: هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش ماسکینگام ترسیمی در مقایسه با هیدروگراف پایین دست ..... ۱۲۱
- شکل ۴-۴۰: هیدروگرافهای ورودی و خروجی مشاهده شده به همراه هیدروگرافهای خروجی محاسبه شده از هر یک از سه روش روندیابی ..... ۱۲۳
- شکل ۴-۴۱: پهنه‌بندی بازه مورد مطالعه در نرم‌افزار HEC-RAS ..... ۱۲۶
- شکل ۴-۴۲: پهنه‌بندی بازه مورد مطالعه حاصل از HEC-RAC و GIS ..... ۱۲۷
- شکل ۴-۴۳: پهنه‌بندی بازه مورد مطالعه در دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله ..... ۱۲۸
- شکل ۴-۴۴: مقایسه مکان حداکثر ارتفاع آب با دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰۰ ساله ..... ۱۲۸
- شکل ۴-۴۵: پهنه سیل‌گیر به ازای دبی با دوره بازگشت ۲۵ سال ..... ۱۲۹
- شکل ۴-۴۶: پهنه سیل‌گیر به ازای دبی با دوره بازگشت ۵۰۰ سال ..... ۱۲۹

## فهرست جداول

## صفحه

جدول ۱-۳: لیست نرم‌افزارهای استفاده شده	۵۹
جدول ۲-۳: مدول‌های موجود در نرم‌افزار MIKE11	۷۱
جدول ۳-۳: ویرایش‌گرهای مورد استفاده در نرم‌افزار MIKE11 جهت مدل‌سازی هیدرولیک	۷۱
جدول ۱-۴: دبی با دوره‌های بازگشت مختلف برآورد شده در بازه مورد مطالعه	۹۹
جدول ۴-۶: مقادیر دبی اوج مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط روش‌های روندیابی	۱۲۴
جدول ۴-۷: مقادیر زمان وقوع دبی اوج مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط هر یک از سه روش روندیابی بر حسب زمان از شروع سیلاب بر حسب ساعت	۱۲۴
جدول ۴-۸: نتایج معیارهای آماری مختلف در عملیات روندیابی سیل به سه روش ماسکینگام ترسیمی، موج دینامیکی MIKE11، موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS در مقایسه با سیل‌مشاهداتی	۱۲۵



# فصل اول

## کلیات

در طول تاریخ همواره عوامل مختلفی موجب به هم زدن تعادل طبیعت شده است، به ویژه امروزه به دلیل افزایش جمعیت و رشد روزافزون تکنولوژی در جهت بهره‌برداری بی حد و حصر از منابع طبیعی، این تأثیرات عمیق‌تر شده است. در این میان رودخانه‌ها به عنوان شاه‌رگ‌های زندگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند بنابراین ارزیابی و شناخت آن‌ها کاملاً ضروری است. رودخانه‌ها شریان‌های اصلی حیات محسوب می‌شوند و نیاز انسان به آب باعث شده تا اکثر تمدن‌های بشری در کنار رودخانه‌ها شکل بگیرند اما توسعه شهرنشینی و اجرای طرح‌های عمرانی، برداشت بی‌رویه مصالح از بستر رودخانه، احداث سازه‌های تقاطعی و غیره موجب تعرض به حریم رودخانه و برهم خوردن رژیم متعادل و پایدار آن شده است. رودخانه‌ها نیز در مقابل این تعارض اقدام متقابل نموده و لذا رژیم هیدرولیکی آن‌ها در یک روند برای رسیدن به تعادل مجدد قرار می‌گیرد. همه ساله در نواحی مختلف جهان بر اثر وقوع حوادث غیرمترقبه مانند سیل، خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری به جوامع بشری وارد می‌گردد. سیل یکی از پدیده‌های طبیعی است که همواره زمین‌های اطراف رودخانه‌ها را در معرض تهدید قرار می‌دهد و از دیرباز بشر شاهد وقوع آن می‌باشد. خسارات ناشی از سیلاب در پنج دهه اخیر بیش از ۵۰ درصد از کل خسارات ناشی از بلایای طبیعی در دنیا را به خود اختصاص داده است. براساس آمارهای ارائه شده توسط سازمان ملل متحد در میان بلایای طبیعی، سیل و طوفان بیشترین تلفات و خسارات را به جوامع بشری وارد کرده‌اند به طوری که تنها در یک دهه، میزان خسارات ناشی از سیل و طوفان ۲۱ میلیارد دلار در مقابل ۱۸ میلیارد دلار خسارات ناشی از زلزله بوده است (حیدری و همکاران، ۱۳۸۵، پناهی و همکاران، ۱۳۹۲).

در کشور ایران نیز سیل یکی از آشناترین لغات فرهنگ کشور به حساب می‌آید که خسارات قابل توجهی به دنبال دارد. آمار مربوط به خسارت‌های ناشی از سیلاب‌های به وقوع پیوسته و هزینه زیادی که از مهار

سیلاب‌ها بر دولت‌ها تحمیل شده است، بیانگر آن است که مهار تمامی سیلاب‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد و تنها با اتخاذ راهکارهای مدیریتی مناسب می‌توان این خسارات را به حداقل رساند. در سال‌های اخیر با بررسی اطلاعات و آمار مربوط به سیل‌های گذشته در حوضه‌های مختلف و تمهیداتی که از سوی مسئولین صورت گرفته است، امید می‌رود با ترویج نحوه صحیح بهره‌برداری از منابع طبیعی، بکارگیری روش‌های مختلف مدیریت سیل در حوضه آبریز و با ایجاد یک مدیریت جامع، میزان خسارت ناشی از سیل به حداقل مقدار خود برسد. از آنجا که رودخانه‌ها محل جمع‌آوری سیلاب‌ها هستند و عمده رفتارهای غیرطبیعی و طغیان آب در طول این مسیر صورت می‌گیرد، بررسی ویژگی‌های رودخانه‌های جاری در مناطق سیلابی به شناسایی ویژگی‌های سیل و رفتارهای هیدرولیکی آن در طول رودخانه کمک می‌کند. از این‌رو انجام مطالعات تحقیقات، تعیین دقیق حد حریم و بستر رودخانه و در پی آن انجام فعالیت‌های سازگار با طبیعت رودخانه و اقدامات مهندسی بجا، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

در دهه‌های اخیر افزایش جمعیت در مناطق سیل‌خیز به‌ویژه حاشیه رودخانه‌ها موجب افزایش تلفات جانی و خسارات مالی شده است، بنابراین پهنه‌بندی سیلاب برای مدیریت صحیح و کنترل ساخت و ساز در چنین مناطقی اهمیت زیادی دارد. پهنه‌بندی سیلاب یکی از مراحل حساس در مدیریت رودخانه‌ها می‌باشد. دشت‌های سیلابی و مناطق مجاور رودخانه‌ها که به دلیل داشتن شرایط خاص، فضاهایی مناسب برای انجام فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی محسوب می‌شوند، همواره در معرض خطرات ناشی از وقوع سیلاب‌ها قرار دارند. از این‌رو در این مناطق تعیین میزان پیشروی سیلاب و ارتفاع آن نسبت به رقوم سطح زمین و نیز تعیین خصوصیات سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف که تحت عنوان پهنه‌بندی سیلاب صورت می‌گیرد اهمیت زیادی دارد. بنابراین مطالعه رفتار سیلاب، همواره یکی از اولویت‌های پژوهشی محققین علم هیدرولوژی محسوب می‌گردد.

با توجه به آنچه در خصوص اهمیت سیل گفته شد، می‌توان اقداماتی احتیاطی مثل اصلاح مسیر رودخانه‌ها احداث تأسیساتی نظیر مقدار مخازن کنترل سیل، ساخت خاکریزها، دیوارهای سیل‌بند و غیره انجام داد. در تمامی این موارد، حرکت موج سیل و پیش‌بینی ارتفاع آب در محل‌های بحرانی مشخصی از مسیر رودخانه مهم است. پیش‌بینی تغییر ارتفاع سیل در مخزن و رودخانه از طریق روندیابی صورت می‌گیرد. هدف اصلی از روندیابی سیل در مسائل مهندسی، شناخت وضعیت سطح آب یا دبی در مسیر رودخانه یا در دریاچه پشت سد، بدون اندازه‌گیری این مقادیر در هنگام وقوع سیل است. برای پیشگیری خسارت ناشی از وقوع سیلاب، می‌بایست احتمال وقوع و بزرگی سیلاب‌های مهم را برآورد نمود و با به کارگیری روش‌های مناسب و تأسیسات خاص، اثرات سیلاب را کنترل کرد. به طور کلی روندیابی سیل در تمام پروژه‌های مرتبط با هیدرولیک جریان، ضروری است.

به عبارتی دیگر روندیابی سیلاب الفبای طراحی سازه‌های هیدرولیکی است. بررسی روند سیل از طریق روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است که در همه این روش‌ها، اطلاعات و خصوصیات رودخانه مورد نظر لازم و ضروری بوده، اما گاهی اوقات این اطلاعات فقط به وجود یک نقشه توپوگرافی از مسیر رودخانه محدود می‌شود و زمانی هم این اطلاعات شامل یک تاریخچه کامل از سیل‌ها، پروفیل‌ها و نقشه‌های مربوط به سطوح مختلف در مسیر رودخانه می‌گردد. در این پژوهش سعی شده که روش‌های مختلف روندیابی سیل و پهنه‌بندی آن با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گیرد.

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

سیلاب‌های به وقوع پیوسته در دنیا و کشورمان، خسارات مالی و جانی زیادی از خود به جای می‌گذارند. از این رو اهمیت بررسی و مهار آن‌ها بیش از پیش نمایان است. با توجه به این نکته که ایران نیز یکی از نواحی عمده سیل‌خیز جهان محسوب می‌شود و هر چند سال یکبار سیلابی مخرب، منطقه‌ای از کشور را دچار

بحران می‌کند، بررسی و توجه به شناخت این پدیده از اهمیت بسزایی برخوردار است. رودخانه‌ها به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین کننده آب برای انسان و سایر موجودات بشمار می‌آیند و بعضاً این منبع حیات، باعث نابودی و وارد شدن خسارات جبران‌ناپذیری نیز شده است. پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی رودخانه در مقابل سیلاب‌های احتمالی جهت کاهش خسارات وارده به مناطق شهری، تأسیسات در حال ساخت، مزارع و سایر کاربری‌ها در اطراف رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شناخت رفتاری رودخانه و انجام فعالیت‌های سازگار با طبیعت رودخانه و اقدامات مهندسی بجا، همواره دغدغه‌ی مهندسين درگیر در این رشته بوده است که این امر منوط به انجام عملیات روندیابی سیلاب است. روندیابی سیلاب در کانال‌ها و رودخانه‌ها یکی از نیازهای مهم مهندسين در طرح‌های ساماندهی و کنترل سیل رودخانه‌ها می‌باشد. بنابراین بررسی دقیق پدیده سیل و ارائه راه‌کارهای مؤثر برای مقابله یا پیشگیری از آن ضروری است. این بررسی‌ها ملزم به پیش‌بینی نحوه‌ی وقوع سیلاب و چگونگی تغییرات دبی و تراز آب در زمان و مکان است و باید این پدیده در حالت غیردائمی مورد بررسی قرار گرفته و خصوصیات جریان غیردائمی به کمک معادلات دیفرانسیل جزئی شرح داده شوند.

### ۱-۳- اهداف تحقیق

- شبیه‌سازی پروفیل سطح آب توسط مدل‌های هیدرولیکی
- مقایسه روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی برای انجام روندیابی سیل
- یافتن بهترین روش از لحاظ نزدیک‌ترین جواب با مقادیر مشاهداتی
- ارزیابی وضعیت سیل‌خیزی منطقه و تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی سیلاب

#### ۱-۴- روش انجام تحقیق

در این مطالعه به کمک مدل‌های ریاضی MIKE11 و HEC-RAS جریان سیلاب شبیه‌سازی شده و پس از محاسبه پروفیل جریان توسط مدل، پهنه سیل با دوره‌های بازگشت مختلف بر روی نقشه‌های توپوگرافی منتقل می‌گردد. در ادامه توضیح مختصری از روش انجام این پژوهش ارائه شده است.

اطلاعات مورد نیاز برای انجام محاسبات شامل سه دسته زیر می‌باشد:

##### الف- اطلاعات توپوگرافی

شامل پروفیل‌های طولی و عرضی رودخانه و اراضی حاشیه آن می‌باشد. مقاطع عرضی به گونه‌ای انتخاب و برداشت شدند که معرف شکل عمومی رودخانه بوده و به وسیله آن بتوان مسیر اصلی جریان در آبراهه اصلی را به مدل معرفی نمود. اطلاعات توپوگرافی رودخانه و اراضی حاشیه رودخانه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰ تهیه شدند.

##### ب- اطلاعات جریان سیل

شامل هیدروگراف ورودی سیل، هیدروگراف خروجی از رودخانه، منحنی دبی اشل در پایین دست و هیدروگراف‌های حقیقی مشاهده شده در طول رودخانه و نقاط مختلف به منظور کالیبره نمودن مدل.

##### ج- اطلاعات هیدرولیکی

اطلاعات هیدرولیکی مورد نیاز مدل بشرح زیر می‌باشند.

- ضرایب زبری که معمولاً در هر مقطع تخمین زده می‌شوند و نهایتاً پس از کالیبره کردن مدل کنترل می‌شود.

- وضعیت مسیر رودخانه از نظر وجود آبشار، پل و سایر سازه‌های تقاطعی

در این مطالعه از مدل‌های جریان ماندگار، روندیابی هیدرولوژیکی و روندیابی هیدرولیکی سیلاب با مدل

های جریان غیرماندگار استفاده شده است.

اطلاعات اولیه فوق با فرمت‌های خاص هر مدل به آن‌ها معرفی شده و خروجی مدل شامل اطلاعات مختلفی از قبیل تراز سطح آب، سرعت جریان، دبی در آبراهه اصلی و دشت سیلاب‌گیر، عمق آب در دشت سیلاب-گیر، برای هر یک از مقاطع عرضی بازه مورد نظر می‌باشد. نکته حائز اهمیت کالیبره نمودن و واسنجی مدل است و ضرورت دارد نتایج محاسبات شبیه‌سازی شده با ارقام ثبت شده در ایستگاه‌های آبسنجی کنترل و موارد اختلاف مشخص و تا حد امکان تصحیح شوند. در این صورت کارکرد مدل قابل اعتماد بوده و می‌توان از آن در بخش‌های بعدی مطالعات استفاده نمود.

#### ۱-۵- مرور مطالب پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل به شرح ذیل تدوین شده است:

فصل اول به اهداف و اهمیت موضوع مورد تحقیق اختصاص یافته است.

در فصل دوم به ذکر مواردی از تحقیقات مشابه و پیشینه تحقیق در ایران و جهان و روابط حاکم بر جریان رودخانه اشاره می‌شود.

فصل سوم به معرفی محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های هیدرومتری و آمار به کار رفته در تحقیق اختصاص یافته است.

همچنین توضیحات مختصری در خصوص تعاریف و اصطلاحات نرم‌افزارهای HEC-RAS و MIKE11، نحوه عملکرد و مراحل روش پردازش اطلاعات و مدل‌های مورد استفاده برای بررسی ماهیت روندیابی پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم به ارائه نتایج پرداخته می‌شود که این نتایج در قالب نمودار، جدول و نقشه می‌باشد.

در نهایت فصل پنجم به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته شده و پیشنهادات لازم جهت ادامه تحقیقات ارائه می‌گردد.



## فصل دوم

# کلیات و پیشینه تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مختصری در مورد مفاهیم ارائه می‌گردد سپس به بررسی تحقیقات محققان و دانشمندان در گذشته که در واقع پایه و اساسی برای تحقیقات آتی است، پرداخته شده است. شایان ذکر است که بسیاری از نرم‌افزارهایی که امروزه به کار می‌روند نیز براساس روش‌هایی که این محققان انجام داده‌اند پایه‌ریزی شده است. می‌توان گفت دلایلی که تکرار یا تجدید مطالعات هیدرولوژی در هر منطقه را موجه جلوه می‌دهد عبارتند از:

۱. افزایش طول دوره آماری موجود نسبت به زمانی که مطالعات قبلی انجام پذیرفته است.
۲. دستیابی به اطلاعات و داده‌های دقیق‌تر با گذشت زمان
۳. پدید آمدن روش‌های محاسباتی دقیق‌تر و کامل‌تر
۴. اهداف اختصاصی و نیازهای ویژه مطالعاتی طرح‌های جدید و کمبود یا عدم پرداخت مطالعات قبلی به جنبه‌های خاص و مورد نظر طرح‌های جدید

## ۲-۲- مفاهیم

### ۲-۲-۱- سیل<sup>۱</sup>

بنا به تعریف، سیل وضعیتی است که در آن دبی رودخانه به صورت غیرعادی افزایش یافته و از شرایط نرمال خود فراتر می‌رود که باعث خسارت جانی و مالی می‌گردد (علیزاده، ۱۳۹۴). از دیدگاه هیدرولوژی سیلاب یک سیکل هیدرولوژی است و به زبان ریاضی تابع خروجی ناشی از تحریک سیستم عامل به وسیله یک تابع ورودی در یک فاصله زمانی معمولاً پیوسته می‌باشد (سینگ، ۱۹۹۶).<sup>۲</sup>

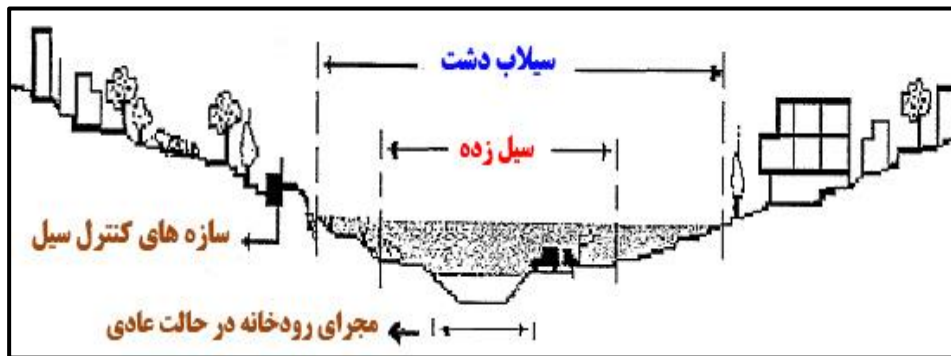
---

<sup>1</sup> Flood

<sup>2</sup> Singh

### ۲-۲-۲- سیلاب دشت<sup>۱</sup>

به اراضی مجاور یا حاشیه رودخانه‌ها، دریاها و دریاچه‌ها گفته می‌شود که عموماً در شرایط عادی، خشک و عاری از جریان بوده و در مواقع سیلابی مستغرق می‌باشد. دشت سیلابی با توجه به توپوگرافی دره رودخانه می‌تواند تمامی عرض رودخانه در مقاطع باریک و یا منطقه وسیعی در حاشیه و در طول رودخانه در دره-های مسطح و وسیع را در بر بگیرد (کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی، ۱۳۷۹)، (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: نمایش پهنه سیلاب در مقطع عرضی رودخانه

### ۳-۲-۲- روش‌های مدیریت مهار سیلاب

- روش سازه‌ای

- روش غیرسازه‌ای یا مدیریتی

۱. روش‌های سازه‌ای

روش‌های سازه‌ای و اهداف اصلی روش‌های سازه‌ای مدیریت سیلاب به شرح زیر است:

سدهای مخزنی: ذخیره سیلاب در مخزن و کاهش پیک سیلاب

سیل‌بندها: محدود کردن سیلاب

<sup>۱</sup> Flood Plain

مخازن تأخیری: کاهش پیک سیلاب و افزایش زمان تمرکز

اصلاح و ساماندهی مسیر: افزایش سرعت جریان و گذردهی رودخانه و حفاظت از کناره‌ها و بستر آن

انحراف سیلاب: کاهش میزان سیلاب در یک بازه از رودخانه

۲. روش‌های غیرسازه‌ای یا مدیریتی

روش‌های غیرسازه‌ای به مجموعه برنامه‌ها و عملیات مدیریتی که برای کاهش اثرات زیان‌بار سیلاب و

جلوگیری از گسترش و تشدید آن انجام می‌گیرد، اطلاق می‌شود. عملیات مدیریت کاهش سیلاب را می

توان در پنج دسته کلی زیر تقسیم نمود:

- آبخیزداری و مدیریت کاربری حوضه‌ها
- برنامه‌ریزی و مدیریت در مسیر رودخانه‌ها و مسیل‌ها
- پهنه‌بندی سیل و مدیریت سیلاب‌دشت و مناطق سیل‌گیر
- پیش‌بینی و هشدار سیل
- عملیات پیشگیری و حمایتی در مناطق سیل‌گیر

## ۲-۲-۴- حوضه<sup>۱</sup>

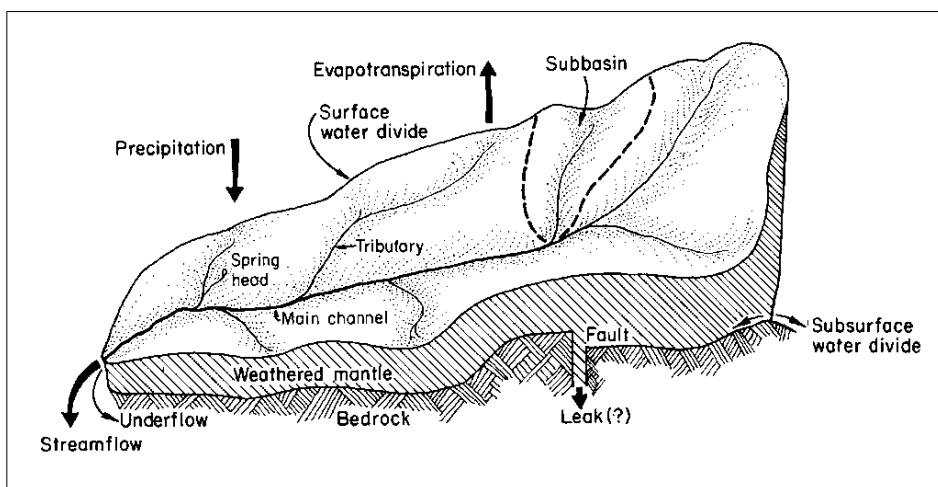
حوضه آبریز (Catchment) سطحی است که تمامی رواناب ناشی از بارش (باران، برف، تگرگ و غیره) بر

روی آن توسط رودخانه به‌طور طبیعی به یک نقطه خروجی که گودترین قسمت حوضه است، هدایت می‌شود

(شکل ۲-۲).

---

<sup>1</sup> Basin



شکل ۲-۲: حوضه آبریز

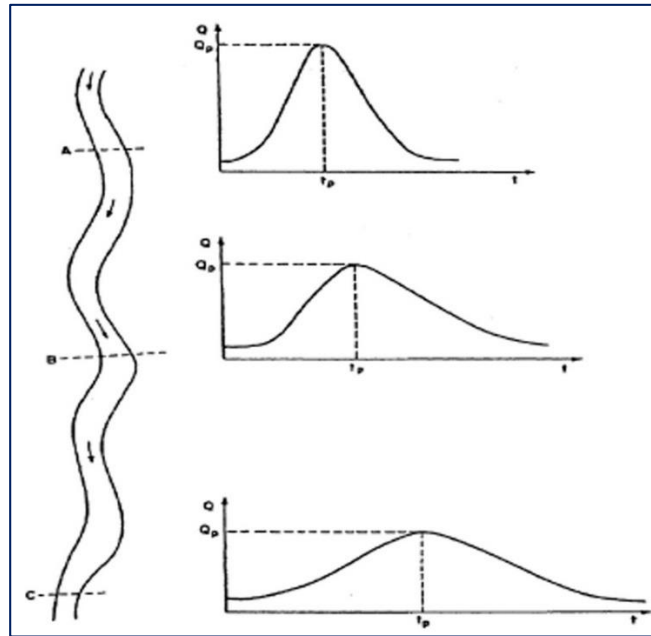
برای مشخص کردن یک حوضه آبریز از نقشه توپوگرافی با مقیاس مناسب استفاده می‌شود که معمولاً این نوع نقشه‌ها دارای مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ می‌باشد. اولین چیزی که در نقشه مدنظر قرار می‌گیرد، رودخانه اصلی می‌باشد که در ذیل این محدوده مورد نظر معرفی می‌گردد.

## ۲-۲-۵- رودخانه

شبکه رودخانه به آبراهه‌هایی گفته می‌شود که در سطح حوضه عمل تخلیه جریان‌های سطحی را انجام می‌دهد. برخی از این آبراهه‌ها به صورت رودخانه‌های دائم، برخی به صورت فصلی و بعضی دیگر مسیل‌هایی هستند که فقط در هنگام بارندگی ممکن است آب در آن‌ها جاری باشد. اگر تمام رودخانه‌های موجود در یک حوضه آبریز اعم از بزرگ، کوچک، دائم و غیردائم روی یک نقشه رسم شود وضعیت مشابه یک درخت با تنه و شاخه‌های بزرگ و کوچک به وجود می‌آید که همان شبکه آبراهه‌های حوضه است. آبراهه اصلی که معمولاً طولانی‌ترین آبراهه می‌باشد در خط‌القعر حوضه آبریز جریان داشته و رواناب زیرحوضه‌های مختلف به آن می‌ریزد.

## ۲-۲-۶- روندیابی سیل

برحسب تعریف جامعه مهندسين عمران آمریکا، در روندیابی سیل هیدروگراف خروجی جریان با استفاده از هیدروگراف جریان ورودی مشخص می‌گردد. از طرفی چون در مسیل یک رودخانه یا مخزن سد، حجم ذخیره‌ای برای جریان یا دبی ورودی وجود دارد، لذا در روندیابی سیل اثر ذخیره مسیل رودخانه یا دریاچه پشت سد در وضعیت موج سیل به طرف پایین دست نیز تعیین می‌گردد (آمین، ۱۹۷۰). در یک تعریف کلی روندیابی سیل به مجموعه عملیاتی گفته می‌شود که به وسیله آن زمان و بزرگی یک موج سیل (مشخصات هیدروگراف) را در نقطه‌ای از مسیر رودخانه با استفاده از اطلاعات فرضی یا حقیقی موجود در یک یا چند نقطه بالادست جریان به توان تعیین کرد (عباسی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). هدف از روندیابی در کارهای مهندسی بدست آوردن مقدار و زمان جریان خروجی در موقعیت‌های مختلف مکانی رودخانه می‌باشد. مسلماً هیدروگراف‌های این دو نقطه مشابه نخواهند بود زیرا خصوصیات مسیری که آب از آن گذشته یا در آن جریان دارد شکل هیدروگراف را تغییر می‌دهد. برای روشن شدن موضوع بازه‌ای از رودخانه را مشابه شکل (۲-۳) در نظر گرفته که هیدروگراف جریان  $Q-t$  در نقطه  $A$  معلوم باشد. از روندیابی می‌توان جهت محاسبه هیدروگراف خروجی در نقطه‌ی  $B$  استفاده کرد. به این نحو با در دست داشتن هیدروگراف ورودی در نقطه‌ی  $B$ ، هیدروگراف برای نقطه‌ی  $C$  محاسبه می‌گردد. به این طریق حرکت و شکل موج سیل در یک رودخانه پیش‌بینی می‌شود. شکل (۲-۳) نشان می‌دهد که هیدروگراف ورودی طی پیمودن رودخانه کاهش اوج می‌دهد و زمان پایه‌ی آن افزایش می‌یابد ولی حجم آن ثابت می‌ماند. این اثر آشکار ذخیره‌ی رودخانه یا مخزن روی هیدروگراف سیل است. در شکل (۲-۳)  $Q_p$  دبی اوج و  $T_p$  زمان تا اوج است.



شکل ۲-۳: هیدروگراف‌های جریان رودخانه در مقاطع A، B و C و نحوه حرکت موج سیل

روندیابی سیل کاربرد فراوانی در مسائل مربوط به پیش‌بینی سیل، سیستم‌های هشدار سیل، ارزیابی سیستم‌های مهار و انحراف سیل، پخش سیلاب، ساماندهی رودخانه، تعیین حریم رودخانه‌ها یا پهنه‌بندی سیلاب، بدست آوردن هیدروگراف رواناب در حوضه‌های فاقد آمار و شبیه‌سازی سیلاب حوزه آبخیز دارد. از این روش‌ها اغلب برای محاسبه ارتفاع سیل‌بندها و دیواره‌های موازی رودخانه و ابعاد سرریز انواع مختلف سدها، طراحی مخازن ذخیره، کانال‌ها و بهره‌برداری از سازه‌های متنوع هیدرولیکی استفاده می‌شود.

## ۲-۲-۷- هیدروگراف و مشخصات آن

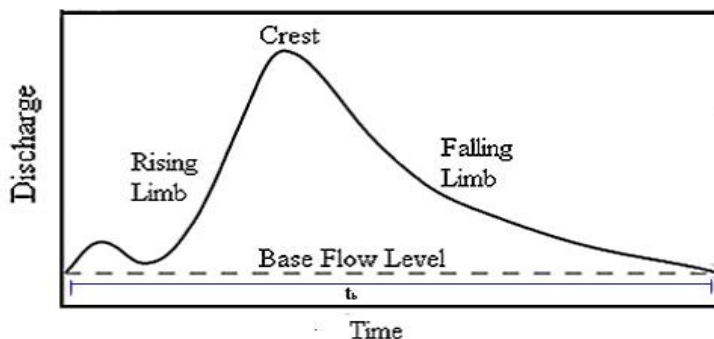
هیدروگراف سیلاب نموداری است که تغییرات دبی سیلاب را نسبت به زمان نشان می‌دهد. منحنی تغییرات مقدار جریان عبور یافته از مقطعی معین در مسیر آبراهه، جویبار یا رودخانه را نسبت به زمان هیدروگراف (Hydrograph) جریان می‌نامند (صفوی، ۱۳۹۰). در یک مقطع از مسیر آبراهه به‌دلیل تغییر دبی جریان با

عمق آب و با زمان، هیدروگراف‌ها را می‌توان توزیع زمانی دبی رودخانه‌ها نامید. به طور کلی هر هیدروگراف از سه قسمت تشکیل شده است که عبارتند از:

۱. بازوی بالارونده (Rising Limb): نشان‌دهنده شدت افزایش دبی سیل نسبت به زمان است. این قسمت نشان می‌دهد که چگونه دبی خروجی از حوضه پس از بارندگی افزایش می‌یابد. شاخه صعودی هیدروگراف بیشتر تحت تأثیر خصوصیات بارندگی و سطح حوضه می‌باشد و قاعدتاً کمی حالت محدب (Concave) دارد. این بخش از هیدروگراف به منحنی طغیان نیز معروف است.

۲. تاج هیدروگراف (Crest segment) یا اوج (Peak): بالاترین دبی است که هیدروگراف پیدا می‌کند که معمولاً یک نقطه نیست بلکه بخشی از منحنی هیدروگراف است. با این وجود هیدرولوژیست‌ها علاقه‌مند هستند که یک نقطه مشخص را به عنوان حداکثر دبی استفاده نمایند.

۳. بازوی پایین‌رونده (Falling Limb): نشان‌دهنده سرعت تخلیه سیلاب از حوضه می‌باشد. شاخه نزولی پس از قطع بارندگی شروع می‌شود. این بخش از هیدروگراف به منحنی فروکش طغیان نیز معروف است. هیدروگراف از شروع تا خاتمه مدتی را سپری می‌کند که زمان پایه هیدروگراف (Base Flow) گفته می‌شود. این مدت با  $t_b$  نشان داده شده است. قسمت‌های مختلف یک هیدروگراف در شکل (۲-۴) ارائه گردیده است (صفوی، ۱۳۹۰، علیزاده، ۱۳۹۴).



شکل ۲-۴: قسمت‌های مختلف هیدروگراف استاندارد

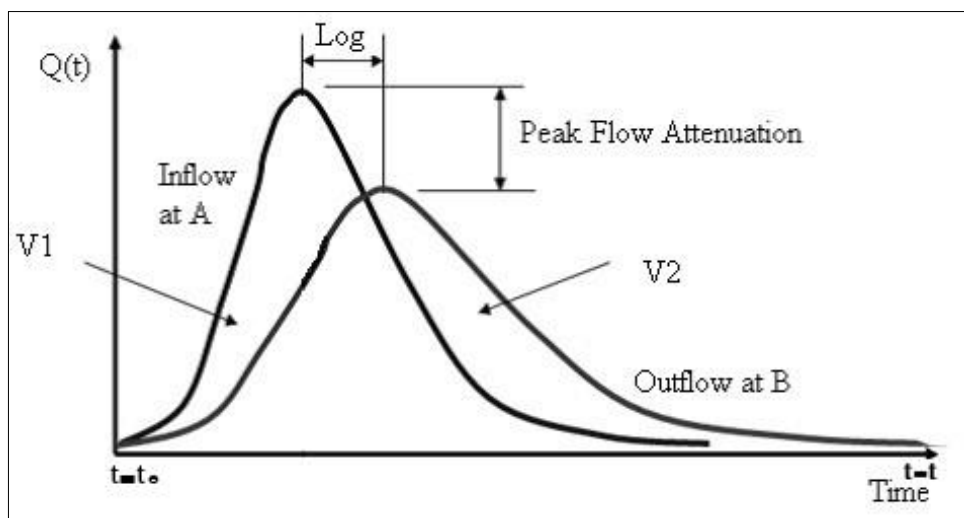


رسم هیدروگراف سیل از چند نظر حائز اهمیت است که عبارتند از:

۱. از روی هیدروگراف می‌توان زمان شروع و خاتمه سیل را نسبت به آغاز آن مشخص کرد.
۲. دبی اوج سیل و زمان وقوع آن از روی هیدروگراف قابل تشخیص است.
۳. شکل بازوی بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف مشخص کننده چگونگی افزایش و فروکش سیل است.
۴. حجم سیلاب را می‌توان از روی سطح زیر منحنی هیدروگراف سیل محاسبه کرد.
۵. تداوم سیل برابر زمان پایه هیدروگراف است (مهدوی، ۱۳۹۴).

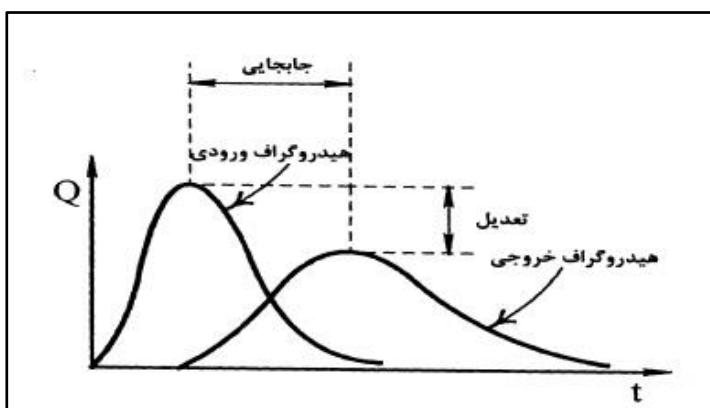
## ۲-۷-۱- بررسی تغییرات هیدروگراف سیلاب در حین عبور از رودخانه

هنگام عبور سیل هیدروگراف جریان در طی حرکت سیلاب به دلیل اختلالات کانال و زبری دچار تغییراتی می‌گردد. مطابق شکل (۲-۵) اگر مسیر کوتاه AB از یک کانال که دارای جریان یکنواخت دائمی است در نظر گرفته شود، نقاط A و B به ترتیب در بالادست (سرآب) و پایین‌دست (پایاب) واقع شده‌اند. سپس در حد فاصله زمانی  $t=t_0$  و  $t=t$  مقدار دبی در نقطه A بر اثر وقوع سیل افزایش می‌یابد، با افزایش ارتفاع آب مقداری از حجم آب وارد شده به نقطه A در کانال AB ذخیره و لذا مقدار آب خروجی و ارتفاع آب در نقطه B در هر لحظه کمتر از مقادیر مشابه در نقطه A خواهد بود. حال چنانچه مقدار شدت جریان در نقطه A شروع به کاهش نماید، دبی خروجی از نقطه B افزایش می‌یابد ولی در زمانی که مقدار دبی ورودی به منطقه و خروجی از آن مساوی یکدیگر گردیدند، از آن پس حجم آب ذخیره شده به تدریج رها شده و لذا دبی و ارتفاع در نقطه B بیشتر از مقادیر مشابه در نقطه A خواهد بود و نهایتاً در زمان  $t=t$  جریان به حالت یکنواخت دائمی برمی‌گردد.



شکل ۲-۵: تفاوت بین هیدروگراف‌های بالادست و پایین‌دست

تغییر شکلی که در انتقال هیدروگراف به سمت پایین‌دست اعم از رودخانه یا مخزن ایجاد می‌گردد، ناشی از فرآیند تبدیل ورودی به ذخیره و نهایتاً ذخیره به خروجی است که باعث می‌گردد تعدیلی در هیدروگراف ورودی صورت گیرد. این تعدیل هم در جهت دبی اوج و هم زمان اوج صورت می‌گیرد که اصطلاحاً انتقال زمان دبی اوج بین دو هیدروگراف را جابجایی و تفاوت بین دبی‌های اوج دو هیدروگراف را تعدیل گویند. در شکل (۲-۶) جابجایی و تعدیل هیدروگراف ورودی به هیدروگراف خروجی نشان داده شده است. بدیهی است اگر ورودی‌ها و خروجی‌های دیگری بین دو نقطه‌ای که روندیابی هیدروگراف بین آن‌ها انجام می‌گیرد نظیر نفوذ، تبخیر، آبراهه‌های فرعی، برداشت‌های موضعی و غیره وجود نداشته باشد آنگاه حجم رواناب یا همان سطح زیر هر دو هیدروگراف براساس قانون پیوستگی بایستی با یکدیگر برابر باشند (صفوی، ۱۳۹۰).



شکل ۲-۶: جابجایی و تعدیل هیدروگراف جریان در فرآیند روندیابی

## ۲-۲-۸- امواج در مجاری باز

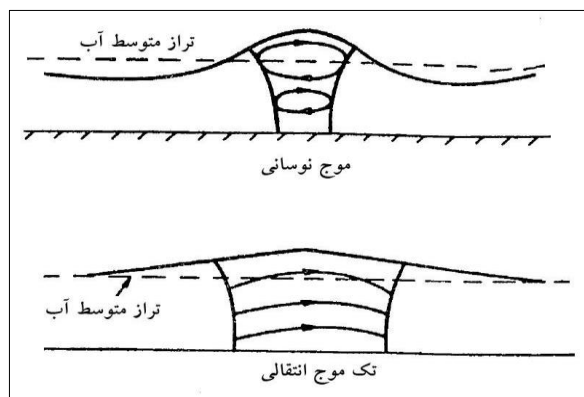
حرکت موج سیلاب در رودخانه‌ها از نوع جریان غیردائمی متغیر تدریجی می‌باشد. هر جریان غیردائمی در حقیقت عبارت است از حرکت یک موج که با تغییر مکان خود و بر حسب شرایط، عمق جریان یا دبی و یا هر دو را از مقطعی به مقطع دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر می‌دهد. در یک تعریف کلی، یک موج عبارت است از یک تغییر موقت در سطح آب که به وسیله سیال منتشر می‌گردد و سرعت آن عبارت است از سرعت انتشار چنین آشفتگی نسبت به سیال. از نقطه نظر فیزیکی امواج به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱. امواج نوسانی (Oscillatory Waves)

۲. امواج منتقل کننده (Translatory Waves)

امواج نوسانی تناوبی بوده و در آن‌ها ذرات سیال دارای حرکت موجی با مؤلفه‌های افقی و عمودی می‌باشند بدون اینکه جرمی از توده سیال با انتشار موج منتقل گردد. به بیان دیگر متوسط جرمی که در امواج نوسانی منتقل می‌گردد صفر می‌باشد. امواج دریا و یا امواجی که بر اثر انداختن یک سنگ در آب راکد به وجود می‌آیند از نوع نوسانی هستند. امواج نوسانی در هیدرولیک سواحل اهمیت زیادی را دارا می‌باشند.

در یک موج انتقالی، سیال همراه با موج در جهت حرکت آن نیز منتقل می‌گردد. به بیان دیگر حرکت موج با حرکت سیال در یک جهت همراه می‌باشد. پخش هیدرولیکی متحرک و یا موجی که بر اثر پدیده جزر و مد به وجود می‌آید، مثال‌هایی از نوع امواج انتقالی هستند. امواج انتقالی در هیدرولیک کانال‌ها، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها از اهمیت ویژه برخوردار هستند. خطوط جریان در امواج نوسانی و منتقل کننده در شکل (۲-۷) نشان داده شده است (حسینی، ۱۳۹۴).



شکل ۲-۷: خطوط جریان در امواج نوسانی و انتقالی

## ۲-۲-۹- معادلات سنت ونانت

معادلات سنت ونانت اولین بار توسط باری سنت ونانت در سال ۱۸۷۱ برای توصیف جریان غیردائمی و یک بعدی در آبراهه‌های باز مورد استفاده قرار گرفت (میرزازاده و همکاران، ۲۰۱۴). پس از آن نیز به عنوان معادلات پایه جهت تشریح چگونگی انتشار موج سیل در آبراهه‌های باز مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرضیات زیر جهت اشتقاق معادلات سنت ونانت انجام گرفته است:

الف- جریان یک بعدی بوده و لذا عمق و سرعت جریان فقط در جهت طولی کانال تغییر می‌کند. این بدان مفهوم است که در هر مقطع عمود بر راستای طولی کانال، سرعت جریان ثابت و سطح آب در عرض مقطع افقی است.

ب- فرض می‌شود جریان به صورت تدریجی در طول کانال تغییر می‌کند و توزیع فشار هیدرواستاتیک فرض شده و از شتاب قائم صرف نظر می‌گردد.

ج- راستای طولی رودخانه به طور مستقیم فرض می‌گردد.

د- شیب کف کانال کوچک و بستر کانال ثابت فرض می‌شود و لذا از فرسایش و رسوب گذاری در کانال صرف نظر می‌شود.

ه- ضرایب مقاومت برای جریان مغشوش یکنواخت و دائمی کاربرد دارد، بنابراین روابطی نظیر معادله مانینگ برای تشریح تأثیر مقاومت جریان قابل کاربرد است.

و- سیال غیرقابل تراکم و با جرم مخصوص ثابت در جهت طولی جریان فرض می‌گردد.

سنت ونانت مجموعه معادلات یک بعدی پیوستگی (Continuity Equation) و اندازه حرکت (Momentum Equation) می‌باشد (امامقلی زاده و همکاران، ۱۳۸۷).

## ۲-۹-۱- معادله اندازه حرکت

معادله اندازه حرکت مشتمل بر ترم‌های فیزیکی است که عبارتند از ترم شتاب محلی که نشانگر تغییر اندازه حرکت ناشی از تغییر سرعت در زمان است. ترم شتاب انتقالی که نشانگر تغییر اندازه حرکت ناشی از تغییر سرعت در طول کانال، ترم نیروی فشاری که متناسب با تغییر عمق آب در طول آبراهه، ترم نیروی ثقل که متناسب با شیب بستر  $S_0$  و نهایتاً ترم نیروی اصطکاک که متناسب با شیب اصطکاکی  $S_f$  است. ترم‌های شتاب محلی و انتقالی نشانگر تأثیرات نیروهای اینرسی روی جریان هستند در رابطه‌های (۱-۲) و (۲-۲) ترم‌های مذکور آورده شده است.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{Q^2}{A} \right] + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (1-2)$$

در این معادله  $\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$  ترم شتاب محلی،  $\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{Q^2}{A} \right]$  ترم شتاب انتقالی،  $g \frac{\partial y}{\partial x}$  ترم نیروی فشاری،  $S_0$  ترم نیروی ثقل و  $S_f$  ترم نیروی اصطکاک می باشد.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial X} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2-2)$$

در این معادله  $\frac{\partial Q}{\partial t}$  تغییرات دبی بر حسب زمان،  $\frac{\partial V}{\partial t}$  تغییرات سرعت بر حسب زمان،  $S_0$  شیب بستر،  $S_f$  شیب خط انرژی،  $\frac{\partial V}{\partial X}$  تغییرات سرعت نسبت به مکان،  $\frac{\partial Y}{\partial t}$  تغییرات عمق نسبت به زمان و  $g$  شتاب ثقل است.

### ۲-۲-۹-۲- معادله پیوستگی

فرم نهایی معادله پیوستگی در حالت یک بعدی به صورت معادله (۳-۲) به فرم مانا است. این معادله برای هر دو نوع کانال‌های منشوری و غیرمنشوری در هر مقطع عرضی آبراهه قابل کاربرد است. در برخی روش‌های حل معادلات سنت و نانت از فرم غیرمانای معادله پیوستگی استفاده می‌گردد که در آن سرعت متوسط جریان ( $V$ ) یک متغیر وابسته به جای  $Q$  است این فرم از معادله پیوستگی برای واحد عرض آبراهه با فرض صرف نظر کردن از دبی جریان عرضی بدست می‌آید که به صورت معادله (۴-۲) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3-2)$$

$$V \frac{\partial Y}{\partial X} + Y \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial Y}{\partial t} = 0 \quad (4-2)$$

در این معادلات:

$\frac{\partial Q}{\partial x}$  تغییرات دبی نسبت به مکان،  $\frac{\partial A}{\partial t}$  تغییرات سطح مقطع نسبت به زمان، Q دبی،  $\frac{\partial Y}{\partial X}$  تغییرات عمق

نسبت به مکان،  $\frac{\partial V}{\partial X}$  تغییرات سرعت نسبت به مکان،  $\frac{\partial Y}{\partial t}$  تغییرات عمق نسبت به زمان است (درخشان

علمدارلو، ۱۳۹۳).

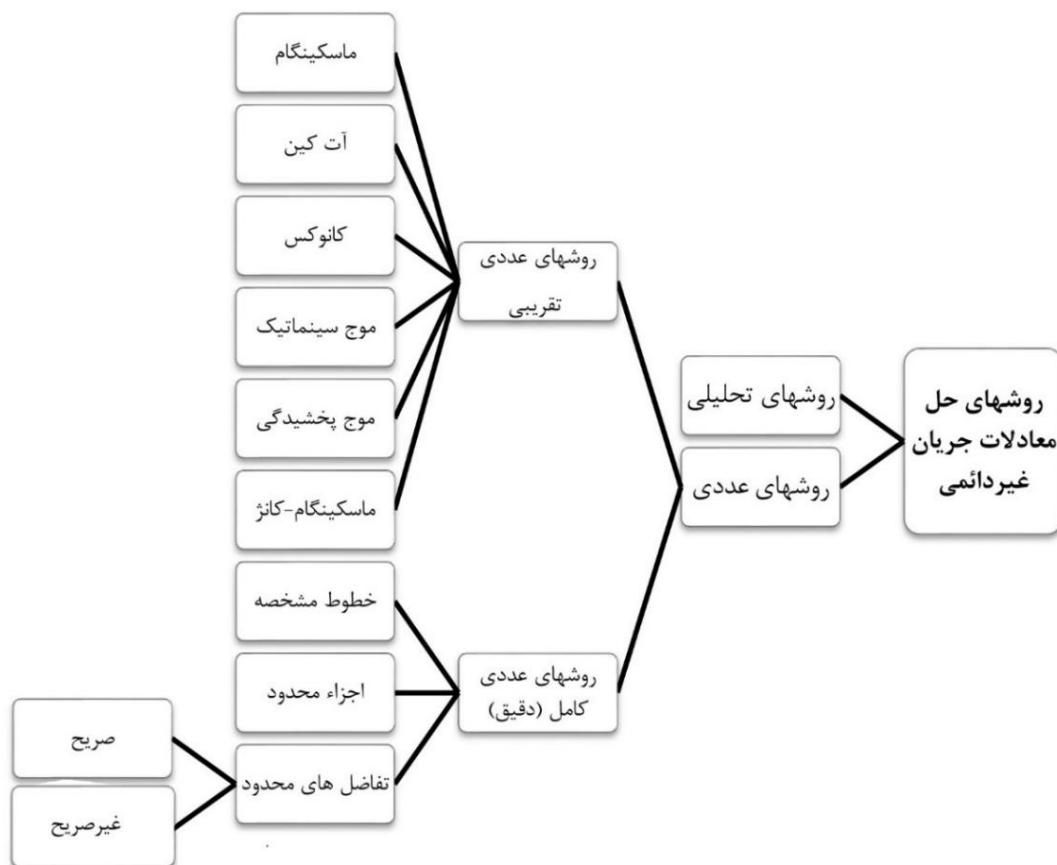
## ۲-۹-۳- روش‌های حل معادلات سنت و نانت

به‌طور کلی می‌توان روش‌های حل معادلات سنت و نانت را به دو روش حل تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی نمود (شکل ۲-۸). روش تحلیلی را به‌جز در موارد ساده شده خاصی نمی‌توان برای حل معادلات سنت و نانت به کار برد. در حالت کلی این معادلات دیفرانسیلی باید با روش‌های عددی حل گردند.

برای حل معادلات سنت و نانت به روش عددی، تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که هر یک از نقطه‌نظر ثبات دقت و راندمان، امتیازات مخصوص به خود را داشته و می‌توانند به‌شکل زیر طبقه‌بندی شوند.

۱. روش‌های تقریبی: این روش‌ها بر روی معادله پیوستگی و معادله خلاصه شده اندازه حرکت پایه‌ریزی شده‌اند. از جمله این موارد می‌توان روندیابی مخزن، روش ماسکینگام، موج سینماتیک و روش موج پخشیدگی را نام برد که در ادامه در مبحث مربوط به روش‌های روندیابی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲. روش‌های عددی کامل: که در واقع هدف این روش‌ها حل معادلات کامل پیوستگی و اندازه حرکت از طریق عددی می‌باشد که در مبحث روندیابی موج دینامیکی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است (براتی و همکاران، ۱۳۸۹).



شکل ۲-۸. روش حل معادلات جریان غیردائمی



## ۲-۳- پیشینه تحقیق

### ۲-۳-۱- سیر اجمالی توسعه معادلات جریان غیرماندگار

به منظور آشنایی بیشتر با نحوه پیشرفت معادلات مربوط به جریان غیرماندگار در مجاری طبیعی و تغییرات صورت گرفته در این معادلات به منظور استفاده‌های کاربردی، سیر اجمالی توسعه معادلات و روش‌های حل مختلف معادلات در ادامه آورده می‌شود.

بر اساس گزارش آکادمی فرانسه، اولین بار سنت ونانت معادله دیفرانسیل جریان غیرماندگار را ارائه نمود. این معادله به اتفاق معادله پیوستگی جریان، تشکیل یک دستگاه معادلات غیرخطی و از نوع هیپربولیک می‌دهند که حل تحلیلی آن بدون در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده با مشکلاتی مواجه است، لذا تاکنون حل تحلیلی کاملی از این معادلات ارائه نگردیده است. برای اولین بار سنت ونانت (۱۸۷۱) که مردی مبتکر بود با نادیده گرفتن شیب خط انرژی و شیب بستر جریان، مبادرت به حل تحلیلی این دستگاه معادلات نمود. پس از او در سال‌های بعد، به دلیل بکارگیری این معادلات در تجزیه و تحلیل مسائل جریان غیرماندگار خصوصاً روندیابی سیل، این دستگاه معادلات مورد توجه اندیشمندان و صاحب نظران هیدرولیک واقع گردید، لذا به منظور حل غیرتحلیلی این معادلات تلاش‌های فراوانی صورت گرفت. ماسائو (۱۹۰۵) تلاش نمود که معادلات فوق را به طریق گرافیکی حل نماید. مک‌کارتی (۱۹۳۵) به منظور روندیابی سیل در رودخانه ماسکینگام جهت اهداف نظامی ارتش ایالات متحده، با فرض یک ارتباط خطی میان ذخیره رودخانه و عوامل هیدرولیکی دیگر شامل دبی جریان ورودی و دبی جریان خروجی، از این دستگاه معادلات استفاده نمود که بعدها ابتکار او به روش ماسکینگام معروف گردید. فرض خطی بودن رابطه میان ذخیره رودخانه و عوامل هیدرولیکی دیگر دقیق نبوده، لذا روش را دچار خدشه می‌کند. کانز (۱۹۷۴) تلاش نمود که روش ماسکینگام را با استفاده از روش تفاضل‌های محدود بهبود بخشد. حاصل کار او ساده نمودن محاسبه ضرایب معادله ماسکینگام و حذف

کالیبراسیون از روش نامبرده بود، لذا طرح کانژ جهت روندیابی سیل از اطلاعات مرز پایین دست بی نیاز است. استوکر (۱۹۵۷) به روش خطوط مشخصه روی آورد. روش او در حل معادلات جریان غیرماندگار دارای دقتی از مرتبه اول بود. لاکس و وندروف (۶۰-۱۹۵۷) به روش حل عددی صریح روی آوردند. روش اخیر دارای دقتی از مرتبه دوم بود و به زمان حساسیت نشان می داد، لذا پایداری این روش تحت تأثیر مقادیر مربوط به گام‌های زمانی بود. پریزمان (۱۹۶۰) به واسطه حساسیت روش صریح به زمان، به روش غیرصریح روی آورد. در سال‌های قبل اولین بار ریت مایر (۱۹۵۷) از روش عددی غیرصریح، جهت تحلیل مسائل حرارت استفاده نمود. روش غیرصریح پریزمان، اشکال پایداری روش صریح را کمتر دارا بود. ابداع روش‌های صریح، غیرصریح به کارگیری معادلات جریان غیرماندگار را رونق بخشید و موجب شد که اندیشمندان و محققین روش‌های فوق‌الذکر را توسعه داده و روش‌های جدیدتری مبتنی بر این روش‌ها ابداع کنند. درنکر و وندروف نیز روش دیگری در قالب حل عددی غیرصریح معادلات جریان غیرماندگار ارائه نموده‌اند. این روش نسبت به روش قبلی آن‌ها حساسیت کمتری به زمان نشان داد. روش غیرصریح آبوت (۷۰-۱۹۶۷) نیز یکی دیگر از این روش‌هاست که به کوشش جمعی از محققین به سرپرستی آبوت در دانشگاه دلفت هلند ساخته شد.

با ظهور و پیشرفت سریع رایانه‌ها از اواخر دهه ۶۰ میلادی، مدل‌های ریاضی در مهندسی هیدرولیک گسترش فوق‌العاده‌ای داشته و هم اکنون در حال پیشرفت است. مدل‌های ریاضی در واقع توابعی می‌باشند که همراه با شرایط مرزی و اولیه که در ادامه بیشتر توضیح داده خواهند شد، معرف یک سیستم فیزیکی هستند و می‌توان آن‌ها را با ماشین حساب و یا رایانه حل نمود. امروزه تعداد زیادی مدل ریاضی تجاری برای مسائل مختلف هیدرولیک به صورت بسته‌های نرم‌افزاری رایانه‌ای در بازار موجود می‌باشد. به عنوان نمونه برای مطالعه هیدرولیک جریان و محاسبات نیمرخ سطح آب در رودخانه‌ها و کانال‌ها در شرایط دائمی می‌توان از مدل‌های HEC-2، HEC-RAS، ISIS نام برد. همچنین برای مطالعه شرایط جریان در حالت غیردائمی و

روندیابی در آبراهه‌ها می‌توان از مدل‌های HEC-6، HEC-RAS، MIKE، FLUVIAL-12، Gstars-2، ISIS و Faster-1 و غیره استفاده نمود.

هر یک از مدل‌های مذکور، فرآیندهای مرتبط یک سیستم هیدرولیکی را در قالب معادلات حاکم همراه با روابط تجربی یا نیمه‌تجربی و چگونگی محاسبات لازم، به صورت یک برنامه رایانه‌ای نشان می‌دهد.

### ۲-۳-۲- مروری بر تحقیقات داخلی و خارجی مرتبط با موضوع روندیابی سیل

تحقیقات صورت گرفته مرتبط با موضوع و هدف اصلی این تحقیق را می‌توان در قالب دو بخش معرفی و ارائه نمود. در بخش اول مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد و استفاده روش‌های مختلف روندیابی و همچنین روش‌های مختلف حل معادلات در دو بخش معادلات داخلی و خارجی و به ترتیب ارائه در سال‌های متمادی آورده می‌شود. در بخش دوم به ارائه و معرفی برخی مطالعات انجام شده در زمینه پهنه‌بندی و تعیین حریم رودخانه به وسیله تکنیک‌های مختلف ریاضی و ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداخته شده است. همان‌طور که در تاریخچه مربوط به معادلات جریان در مجاری طبیعی آورده شد، اساس و پایه روش‌ها و معادلات جدید در واقع همان معادلات سنت و نانت می‌باشد که در مبحث کلیات تحقیق به تفصیل معرفی و شرح داده شده‌اند، در سال‌های اخیر نیز مطالعات متعددی در زمینه استفاده از روش‌های مختلف روندیابی سیلاب همراه با روش‌های مختلف حل معادلات مربوطه صورت گرفته است که در ادامه به بعضی از این مطالعات به صورت مختصر و چکیده و در قالب دو بخش مطالعات داخلی و خارجی اشاره می‌شود.

### ۲-۳-۳- تحقیقات خارجی انجام شده در زمینه روندیابی سیلاب و حل معادلات جریان

وودینگ<sup>۱</sup> (۱۹۶۵) در مطالعه‌ای به ارائه روش‌های حل تحلیلی برای یک مدل هیدرولیکی روندیابی به وسیله

---

<sup>1</sup> Wooding

روش خصوصیات پرداخت. این روش ابتدا برای جریان فوقانی حوضه و سپس برای جریان خروجی از حوضه مورد استفاده قرار گرفت. از مزیت‌های این روش ساده‌تر شدن آن به دلیل دخیل بودن تنها چهار پارامتر می‌باشد که شامل دو پارامتر بی‌بعد در معادلات اندازه حرکت برای حوضه و جریان آبراهه‌ای، یک پارامتر برای بارش و یک پارامتر بی‌بعد دیگر است.

براکنسیک و کومر<sup>۱</sup> (۱۹۶۵) در تحقیقی با استفاده از حل عددی بر مبنای تفاضلات محدود به روندیابی سیل در بازه‌هایی به طول ۲۵ و ۵۰ مایل و با فواصل زمانی ۴۸،۲۴،۱۲ ساعت پرداختند و نتیجه گرفتند تغییرات اوج محاسبه شده برای ترکیبات مختلفی از  $\Delta x$  و  $\Delta t$  پرمعنی بوده و سایر خصوصیات مربوط به روش‌های روندیابی کم‌اثر هستند.

کاندزویکز<sup>۲</sup> (۱۹۸۳) در مطالعه‌ای روش‌های مختلف تعیین تقریبی و هیدرودینامیکی پارامترهای مربوط به مدل‌های خطی روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی را مورد بررسی قرار داد. مطالعات نشان داد مقادیر مربوط به این پارامترها که از روش‌های مختلف تشریح فیزیکی بدست آمده‌اند به همدیگر نزدیک هستند و با توجه به اینکه استفاده از این روش‌ها معمولاً کم هزینه‌تر می‌باشد، در مواردی که دقت بالایی مورد انتظار نیست می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

تانگ<sup>۳</sup> (۱۹۸۵) در تحقیقی با اشاره به این نکته که در مدل ماسکینگام رابطه‌ای خطی بین ذخیره و دبی جریان برقرار می‌باشد به مدل‌سازی غیرخطی روش ماسکینگام پرداخت و برای کالیبراسیون پارامترهای مدل از تکنیک‌های مختلف برازش منحنی استفاده نمود. نتایج نشان داد که مدل غیرخطی ماسکینگام دقیق‌تر و برتر از مدل خطی آن است.

---

<sup>1</sup> Brakensiek and Comer

<sup>2</sup> Kundzewicz

<sup>3</sup> Tung

ناویوگری<sup>۱</sup> (۱۹۸۶) در تحقیق خود یک مدل تک‌بعدی جزء محدود برای شبیه‌سازی جریان سیل در رودخانه‌های پرشیب ارائه کرد. برای حل معادلات مربوطه از روش نیوتن رافسون استفاده گردید و در نهایت یک برنامه کامپیوتری توسط زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شد. مدل موج سینماتیک در بررسی جریان مربوط به رودخانه الینوس واقع در ایالات اکلاهما آمریکا استفاده گردید و صحت نتایج برنامه اثبات شد.

ناویوگری (۱۹۸۷) در تحقیقی برخی مدل‌های صریح و ضمنی برای بررسی جریان آبراهه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور روش‌های عددی تفاضل محدود گالرکین (Galerkin) و روش حل تکراری نیوتن-رافسون و مدل‌های موج سینماتیکی و موج پخشیدگی برای مقایسه انتخاب گردید و تأثیر مقادیر بزرگ گام زمانی ( $\Delta t$ ) و فاکتور وزنی  $\theta$  برای مدل‌های صریح و ضمنی بررسی گردید. در نهایت نتیجه شد که مدل‌های ضمنی برای مقادیر بزرگ  $\theta$  (۱-۰.۵۵) بدون شرط پایدار بوده و پایداری مدل‌های صریح کاملاً وابسته به انتخاب مقدار گام زمانی می‌باشد.

سینها و همکاران (۱۹۹۵) در تحقیقی با هدف مقایسه‌ی روش‌های حل تفاضلات محدود و روش طیفی جهت روندیابی سیل یک روش طیفی برای کل معادلات جریان‌های سطحی و کم عمق یک بعدی ارائه کردند. در این تحقیق دو روش مذکور با توزیع لوگ پیرسون نوع ۳ برای هیدروگراف مربوط به یک کانال عریض بکار برده شد. روش طیفی بهتر از روش پریزمان بود به شرطی که خطای مربوط به گام‌های زمانی در نظر گرفته نشوند و نتیجه نهایی اینکه در روش حل عددی برای سیلاب‌های سریع‌الوقوع، دقت در انتخاب گام‌های زمانی مهم‌تر از انتخاب گام‌های مکانی می‌باشد.

هیکس<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) در تحقیقی متذکر گردید؛ مدل‌های روندیابی هیدرولیکی علی‌رغم پیش‌بینی دقیق‌تر از روند سیل نیازمند داده‌های هندسی وسیع‌تری از بازه مورد مطالعه می‌باشند که این جزء عوامل بازدارنده‌ی

---

<sup>1</sup> Nwaogazie

<sup>2</sup> Hicks

این روش‌ها محسوب می‌گردد، لذا در این مطالعه قابلیت اعتماد مدل‌های روندیابی هیدرولیکی سیل بر مبنای داده‌های هندسی محدودی از مقاطع عرضی برای بازه‌ای از رودخانه پیسه واقع در کلمبیا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد توسعه یک مدل روندیابی هیدرولیکی سیل با استفاده از داده‌های میدانی محدود و تکمیلی توسط نقشه‌های توپوگرافی امکان‌پذیر می‌باشد.

جین و فرد<sup>۱</sup> (۱۹۹۷) در تحقیقی به توسعه یک روش حل عددی صریح در ترکیب با روش غیرصریح برای مدل‌سازی جریان ناپایدار یک‌بعدی در رودخانه‌های طبیعی با استفاده از مدل روندیابی دینامیکی سیل پرداختند. روش صریح جدید از تطبیق‌پذیری و دقت خوبی در مورد امواج مربوط به شکست سدهای بزرگ و سایر جریان‌ات ناپایدار با رژیم نزدیک به بحرانی برخوردار می‌باشد. در نهایت یک روش مضاعف صریح-غیرصریح برای کاربرد مدل روندیابی موج دینامیکی جهت ترکیب مزایای استفاده از هر دو روش معرفی گردید.

بلکبورن و هیکز<sup>۲</sup> (۲۰۰۲) در تحقیقی به معرفی یک مدل هیدرولیکی جهت روندیابی جریان‌های متغیر پرداختند و متذکر شدند که در این مدل هندسه کامل مقاطع عرضی مورد نیاز بوده و در ضمن مزیت این مدل نسبت به سایر مدل‌ها تعیین روند سیل همراه با تعیین و پیش‌بینی سطح سیلاب می‌باشد که می‌توان از آن جهت مدل‌سازی وقایع دینامیکی سیل که توسط روش‌های سنتی مدل‌سازی هیدرولوژیکی قابل پیش‌بینی نیستند، بهره جست.

بریک‌هد و جمیز<sup>۳</sup> (۲۰۰۲) در تحقیق خود با بیان این نکته که مدل روندیابی ماسکینگام بر مبنای یک ارتباط قوی بین ذخیره کانال و مراحل رودخانه عمل کرده و تنها قادر به محاسبه ذخیره کانال می‌باشد، به معرفی

---

<sup>1</sup> Jin and Fread

<sup>2</sup> Blackburn and Hicks

<sup>3</sup> Birkhead and James

یک روش محاسبه صریح برای مدل ماسکینگام که بتواند بین جریان کانال و ذخیره ساحلی و کناره‌ها ارتباط برقرار کند، پرداختند. این روش همچنین جهت تعیین پارامترهای روندیابی برای یک بازه طولانی از رودخانه سابی در آفریقای جنوبی مورد استفاده قرار گرفت.

جین و سینگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۵) به مدل‌سازی رواناب سطحی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و معادله‌ی موج پخشیدگی پرداختند. در این مطالعه سطح حوضه به‌صورت یک شبکه سلولی در نظر گرفته شد و خصوصیات فیزیکی هر سلول مانند توپوگرافی، نوع کاربری، نوع خاک و غیره از نقشه‌های موجود توسط ابزار GIS استخراج گردید و جریان سطحی نیز توسط حل عددی معادله‌ی موج پخشیدگی مشتق شده از معادلات سنت و نانت توصیف شد و نتایج نشان داد مدل توانایی مطلوبی در پیش‌بینی هیدروگراف رواناب دارا می‌باشد. رینا<sup>۲</sup> (۲۰۰۵) در مطالعه‌ای به توسعه یک مدل روندیابی سلول به سلول برای حوضه رودخانه برازوس پرداخت. که در واقع از یک عمق رواناب یکسان در غیاب داده‌های مشاهده‌ای استفاده گردید و جهت ارزیابی و کالیبراسیون پارامترهای مدل از جریان مشاهده‌ای و عمق رواناب اندازه‌گیری شده در رودخانه‌ی وادکرکیک شهر آستین، ایالات تگزاس استفاده گردید.

نبل<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۵) با تلفیق مدل‌های HEC-HMS و HEC-RAS در حوزه سن آنتونیو واقع در ایالات تگزاس آمریکا مدل منطقه‌ای برای سیلاب ارائه نمودند و کارایی مدل را در پیش‌بینی وقوع سیلاب متذکر شدند.

چونگ و کانگ<sup>۴</sup> (۲۰۰۶) در پژوهشی به‌معرفی یک ترم اضافی جدید برای معادله‌ی سنتی ماسکینگام پرداختند و سپس آن را به مفهوم اولیه گیل مرتبط کردند که این سبب شد تا پیش‌بینی دقیق‌تری از جریان

---

<sup>1</sup> Jain and Singh

<sup>2</sup> Raina

<sup>3</sup> Knebl

<sup>4</sup> Chung and Kang

خروجی بدست آید. ترم جدید توسط انتگرال حلقه و با کاربرد تبدیل لاپلاس برای مدل ماسکینگام مورد استفاده قرار گرفت و برای نتیجه‌گیری روندیابی توسط مدل سنتی ماسکینگام، روش گیل و الگوریتم توسعه یافته‌ی جدید، بازه‌ای از یک کانال طویل به طول ۹۰ کیلومتر جهت آزمایش کارایی هر مدل انتخاب گردید. الحامود و ایسن<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای به بررسی دو روش تقریبی نسبتاً ساده جهت تخمین پارامترهای  $X$  و  $K$  مربوط به روش ماسکینگام کانژ پرداختند. در روش اول به محاسبه شیب هیدروگراف‌های ورودی و خروجی در نقطه تلاقی‌شان پرداختند و در روش دوم هیدروگراف‌های ورودی و خروجی را در دو نقطه معین محاسبه نمودند. با بکارگیری هر دو روش در سه نقطه مختلف نتیجه گرفتند روش اول تخمین قابل قبول‌تری از این دو پارامتر روش ماسکینگام بدست می‌دهد.

وانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۶) جهت کاربرد معادلات کامل سنت و نانت، از روش تفاضل محدود چهار نقطه‌ای برای حل معادلات دیفرانسیلی غیرخطی مرتبه اول استفاده کردند و در ادامه به یک فرم جبری غیرخطی که ساختاری مشابه مدل سنتی ماسکینگام داشت، رسیدند. همچنین روش جدید توسط مثال‌های عددی و وقایع مشاهده‌ای تست گردید و نتایج آن با روش‌های لامبدا و مشخصه‌ها مقایسه شد که نتایج این روش با روش‌های مذکور بسیار نزدیک بود.

شالتز<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی با هدف ارزیابی کاربرد استفاده از تکنیک موج سینماتیکی جهت مدل‌سازی توزیعی هیدرولوژیکی به توسعه مدل‌های توزیعی برای حوزه‌های مستطیلی مصنوعی و یک حوزه‌ی آبریز واقعی پرداختند. توزیع بارندگی با یک فرم از وقایع طوفانی ثابت برای حوزه‌های انتخاب شده بکار بسته شد و روش موج سینماتیک برای روندیابی جریان در سطح حوزه و کانال اصلی مورد استفاده قرار گرفت و با

---

<sup>1</sup> Al-Humoud and Esen

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Shultz



مقایسه‌ی میزان جریان اوج و شکل کلی هیدروگراف، مشاهده گردید اختلاف محسوسی بین نتایج حاصله وجود ندارد.

شولتس<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) به بررسی تأثیر ترمیم کانال و دشت سیلابی بر روی تقلیل شدت سیلاب و کاهش انرژی موج سیل پرداخت، لذا بدین منظور از یک مدل روندیابی دینامیکی سیل با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS در بازه‌هایی از مناطق شهری-روستایی واقع در کارولینای شمالی استفاده نمود و نتیجه گرفت کاهش شیب و افزایش زبری دشت سیلابی و کانال تأثیر بیشتری بر روی افت قدرت امواج سیل دارد و همچنین سیلاب‌ها با دوره بازگشت ۲ تا ۵ سال بیشتر تحت تأثیر این ترمیم قرار دارند.

لیو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی به توسعه یک مدل توسعه سیلاب به همراه مدل یک بعدی جریان‌های ناپایدار برای رودخانه دانشویی در شمال تایوان پرداختند. بدین منظور داده‌های دو طوفان در سال ۲۰۰۰ جهت ارزیابی قابلیت مدل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل نشان داد جهت پیش‌بینی زمان واقعی سیلاب مدت زمان ۱ تا ۳ ساعت برای زمان پیش‌فرض مدل، بهترین زمان بوده و مدل توسعه یافته می‌تواند برای پیش‌بینی سیل در سیستم‌های پیچیده‌ی رودخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

ان<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) به بررسی روش ماسکینگام کانز به منظور روندیابی سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار پرداخت. پس از تعیین پارامترهای  $X$  و  $K$ ، سرعت جریان اوج محاسبه شده از روش ماسکینگام با مقادیر واقعی از لحاظ ریشه میانگین مربع خطا مقایسه گردید. نتایج نشان داد هیدروگراف محاسبه شده از روش ماسکینگام، اوج جریان را بالاتر از مقدار واقعی بدست می‌دهد، البته این اختلاف زیاد نبوده و می‌توان از این روش به‌منظور روندیابی سیلاب در کانال‌های طبیعی جهت برآورد جریان اوج استفاده کرد.

---

<sup>1</sup> Sholtes

<sup>2</sup> Liu

<sup>3</sup> Enn

دلفی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) روندیابی سیل در بازه ملاثانی اهواز از رودخانه کارون را به روش موج پخشیدگی بررسی کردند. بدین منظور معادلات سنت ونانت با حذف ترم اینرسی از معادله اندازه حرکت به روش‌های تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی تحلیل گردید. آن‌ها نتایج حاصل از روندیابی به روش موج پخشیدگی با هر سه روش حل معادلات را رضایت بخش ارزیابی نمودند و این روش را به عنوان یک روش ساده تر به منظور تخمین نحوه انتشار سیلاب در رودخانه کارون پیشنهاد کردند.

فنتون<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) در تحقیقی به بررسی صحت روندیابی سیل به روش ماسکینگام کانژ برای استفاده در مورد پیش‌بینی روند امواج سیلاب در مسافت طولانی پرداخت. وی دریافت پخشیدگی عددی روش ماسکینگام کانژ به چه صورت و در چه زمانی باعث کاهش صحت نتایج مربوط به تغییرات سطح آب در پایین دست برای آبراهه‌ها با شیب ملایم و جریان‌ات با نوسان سریع می‌شود.

میرزاده<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳) به مدل سازی جریان سیلاب توسط نرم افزار MIKE11 در آبراهه‌های طبیعی به سه روش (ضمنی، صریح لاکس<sup>۴</sup>، پرایزمن<sup>۵</sup>) پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده از این پژوهش روش تفاضل محدود ضمنی پرایزمن با نتایج خروجی نرم افزار MIKE11 مطابقت داشتند.

شوای<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۳) با هدف بررسی میزان تعدیل سیلاب محاسباتی با مقادیر مشاهداتی به عملیات روندیابی سیل در رودخانه دگو در چین پرداختند. نتایج حاکی از دقت بالای مدل موج دینامیکی در عملیات روندیابی سیل در بازه مطالعاتی رودخانه مذکور بود به نحوی که میزان خطای محاسباتی کمتر از ۱۰ درصد برآورد گردید.

---

<sup>1</sup> Delphi

<sup>2</sup> Fenton

<sup>3</sup> Mirzazadeh

<sup>4</sup> Lacks

<sup>5</sup> Prayzmn

<sup>6</sup> Shuai

تیمبادیا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) مدل یک بعدی هیدرودینامیکی سیل و هیدروگراف سیلاب رودخانه تاپی<sup>۲</sup> واقع شده در هند را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور آن‌ها با در نظر گرفتن چهار ایستگاه هیدرومتری (کاکراپور، منداوی، قلا و ایستگاه پل نهرو) بزرگترین سیلاب به وقوع پیوسته بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ را انتخاب نمودند. سپس با تعریف مقاطع عرضی مساحی شده به نرم‌افزار MIKE11 به کمک مدل موج دینامیکی، به شبیه‌سازی جریان سیلاب پرداختند. نتایج آنان حاکی از برتری مشهود مدل حداقل مربعات در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی سیل بود.

## ۲-۳-۴- تحقیقات داخلی انجام شده در زمینه روندیابی سیلاب و حل معادلات جریان

فتحیان و همکاران (۱۳۸۳) در تحقیقی به‌منظور میزان تأثیر تغییر پروفیل بستر بر روند سیلاب، چند کانال شبیه‌سازی شده از رودخانه با هندسه‌ی یکسان و دبی رسوبی متفاوت را در نظر گرفتند و با بکارگیری مدل عددی، هیدروگراف سیل خروجی برای تمام کانال‌ها روندیابی و با یکدیگر مقایسه شد و نتایج نشان داد تغییرات بستر رودخانه در تغییر روند سیلاب در طول رودخانه قابل ملاحظه می‌باشد.

معقول و همکاران (۱۳۸۴) در مطالعه‌ی خود به روندیابی هیدرولوژیکی رواناب جاری در شبکه‌ی رودخانه‌ی خشک با بهره‌گیری از مدل غیرخطی ماسکینگام اصلاح شده و الگوریتم ژنتیک پرداختند. سپس با واسنجی و ارزیابی کنترل اعتبار دریافتند روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک ابزار توانمندی به‌منظور تعیین پارامترهای بهینه مطلق محسوب می‌شود و مدل تطبیقی مورد استفاده می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب جهت تعیین سیستم‌های هشدار سیل تلقی گردد.

---

<sup>1</sup> Timbadiya

<sup>2</sup> Tapie

حقیقی و اشرفی (۱۳۸۵) مقایسه‌ای بین روش‌های موج دینامیک و سینماتیک در روندیابی سیل در رودخانه انجام دادند، بدین منظور پارامترهای مؤثر در نتیجه روندیابی سیل با استفاده از موج سینماتیک در مقایسه با موج دینامیک را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند و حدود مناسب شیب بستر را به منظور تحلیل سینماتیک بجای دینامیک، با توجه به درصد خطای ساده‌سازی معادلات، پیشنهاد کردند.

اکبرپور و معتمدی (۱۳۸۶) در تحقیقی به روندیابی جریان رودخانه‌ی کارون در بازه‌ی اهواز ملاثانی با استفاده از مدل HEC-HMS پرداختند و نتیجه گرفتند مدل پس از کالیبراسیون، دبی را در مواقع سیلابی با دقت قابل قبولی تخمین می‌زند.

فتوحی و فغور مغربی (۱۳۸۷) در تحقیقی روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام کانژ را با پارامترهای ثابت و متغیر به کار برده و با هم مقایسه کردند و نتیجه گرفتند روش ماسکینگام کانژ با پارامترهای متغیر نسبت به پارامترهای ثابت به روش روندیابی دینامیکی نزدیکتر است و بیشترین اختلاف دو روش در شیب‌های کم اتفاق می‌افتد. بنابراین در کاربرد روش ماسکینگام کانژ در شیب‌های کم باید احتیاط نمود.

قبادیان (۱۳۸۷) در تحقیقی به روندیابی هیدرولیکی سیلاب در رودخانه‌ی قره‌سو با استفاده از حل معادلات جریان غیرماندگار پرداخت. وی به منظور صحت‌سنجی مدل بازه‌ای از رودخانه‌ی قره‌سو به طول ۱۸/۳ کیلومتر با ۶۰ مقطع عرضی را برای سیلاب ۲۵ ساله شبیه‌سازی کرد و دریافت هیدروگراف‌های دبی و اشل محاسبه شده در مقاطع مختلف بازه مذکور با مقادیر محاسبه شده توسط مدل HEC-RAS تطابق بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد.

رحیمی دهاقانی و همکاران (۱۳۸۸) در تحقیقی با هدف مقایسه مدل‌های هیدرولیکی MIKE11 و HEC-RAS به شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان در بازه‌ای از رودخانه‌ی لردگان به طول ۶/۵ کیلومتر توسط مدل‌های مذکور پرداختند و در نهایت نتایج هر مدل نشان داد که در شرایط یکسان مدل HEC-RAS سطح

آب را بالاتر از مدل MIKE11 برآورد می‌نماید.

کریمیان و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل موج سینماتیکی و نرم‌افزار HEC-RAS به روندیابی هیدرولیکی سیلاب در بازه رودخانه دوآب صمصامی پرداختند. نتایج عملیات روندیابی سیل و مقایسه نتایج با پارامتر RMSE که توسط آنان انجام شد حاکی از برتری مشهود نرم‌افزار HEC-RAS در شبیه‌سازی حرکت سیل در رودخانه مذکور می‌باشد.

درخشان علمدارلو و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی روندیابی سیلاب در آبراهه‌ها توسط نرم‌افزار MIKE11 پرداختند. آنان با بررسی موردی رودخانه قره‌آغاج در استان فارس، همخوانی قابل قبولی بین نتایج خروجی عددی نرم‌افزار MIKE11 با مقادیر ثبت شده مشاهده نمودند.

### ۲-۳-۵- تحقیقات صورت گرفته در زمینه پهنه‌بندی سیلاب

همان‌طور که در معرفی اهداف تحقیق حاضر آورده شد، پیش‌بینی سیل از لحاظ مقدار دبی جریان به ازای دوره‌های بازگشت مختلف و تعیین پهنه سیل‌گیر مربوط به مقدار جریان مشخص، به‌عنوان هدف جانبی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه از مدل‌های ریاضی و ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی در سالیان اخیر به وفور در زمینه تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب استفاده گردیده است و همچنین در این تحقیق نیز از این تکنیک استفاده شده لذا در ادامه به صورت مختصر و چکیده به برخی مطالعات و پژوهش‌های خارجی و داخلی انجام گرفته مرتبط با موضوع پهنه‌بندی سیلاب در رودخانه‌ها اشاره می‌شود.

تیت<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۹) در مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه تکزاس، اقدام به انجام تحقیقی برای تلفیق نرم‌افزارهای ArcView و HEC-RAS و بررسی حریم بستر رودخانه وادر کریک در شهر آستین آمریکا کردند

---

<sup>1</sup> Tate

و در نهایت نتیجه گرفتند که این روش قابلیت بسیار زیادی در بررسی هیدرولیکی سازه‌های کنترل سیل در طول رودخانه دارد.

حسین‌زاده و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیقی به تعیین پهنه‌های سیل‌گیر و تخمین خسارت ناشی از آن در رودخانه لایین‌سو واقع در شمال خراسان پرداختند که در این ارتباط از نرم‌افزار HEC-RAS و Arc View استفاده نمودند و ضمن تأکید بر کارایی و قدرتمند بودن نرم‌افزارهای فوق توصیه کردند برای سایر مطالعات مشابه در این رودخانه بهتر است فصل تابستان برای معیار طراحی از روش SCS جهت تعیین ضریب زبری مانینگ انتخاب گردد.

نبل<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS و استفاده از تخمین بارش راداری (NEXRAD) در حوضه سن‌آنتونیو تگزاس در آمریکای مرکزی، مدلی منطقه‌ای برای سیلاب ارائه کردند و مدل را با سیلاب تابستان سال ۲۰۰۲ مقایسه نمودند. نتیجه گرفتند که این مدل کارایی زیادی در پیش‌بینی سیلاب در مقیاس منطقه‌ای دارد.

جب و آگاروال<sup>۲</sup> (۲۰۰۸) در تحقیقی به مدل‌سازی خطر سیل‌گیری رودخانه کادونا واقع در نیجریه پرداختند و بدین منظور از توزیع گامبل جهت تعیین فرکانس سیل در دوره‌های بازگشت مختلف و از ابزار سنجش از دور و GIS جهت تجزیه و تحلیل داده‌های سیل و تعیین میزان خطر سیل استفاده نمودند و دریافتند دشت سیلابی رودخانه‌ی کادونا تحت تأثیر خطرات سیل‌گیری شدیدی به ازای دوره‌های بازگشت مختلف می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Knebl

<sup>2</sup> Jeb and Aggarwal

فرناندز و لوتز<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) پهنه‌بندی سیلاب شهری را با استفاده از GIS انجام دادند به این منظور از اطلاعات شیب، ارتفاع، کاربری اراضی زمین، ارتفاع سطح ایستابی و فاصله از آبراهه‌ها به‌عنوان لایه‌های اطلاعاتی ورودی به نرم‌افزار استفاده کردند که نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری از مدل حاصل شد.

جی‌چاموا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) برای استخراج مقاطع عرضی در بخشی از رودخانه تیزا واقع در مجارستان از تلفیق دو مدل HEC-RAS و HEC-GeoRAS استفاده کردند و نتیجه گرفتند که تلفیق این دو مدل برای شبیه‌سازی سیلاب مناسب است. آن‌ها همچنین عنوان کردند که بهترین روش برای تولید مقاطع عرضی رودخانه در مناطقی که کمبود داده‌های توپوگرافی دارند استفاده از مدل رقومی ارتفاعی است.

عاشوری<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از HEC-RAS و GIS به بررسی تغییر مورفولوژی بستر رودخانه قبل و بعد از احداث سد، در پایین‌دست سد ستارخان اهر پرداختند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که با احداث سد به دلیل جلوگیری از جریان یافتن سیلاب‌های بزرگ، بستر رودخانه تقریباً پایدار و دبی طی سال‌ها ثابت بوده است.

میدویی و همکاران (۲۰۱۵) با ادغام دو نرم‌افزار GIS و HEC-RAS مدل‌سازی سیلاب‌های رودخانه Ouergha در شمال مراکش را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل هیدرولیکی و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند کمک قابل توجهی در مدیریت سیلاب و تصمیم‌گیری بهتر در کاربری‌های مختلف انجام دهد.

زیویی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به مطالعه‌ی تأثیر سیلاب بر سازه‌های شهری در شهر ساحلی بمبئی در هند پرداختند. با استفاده از نقشه‌های تغییرات پوشش سطح زمین و کاربری اراضی، نقشه‌ی خطر سیل برای

---

<sup>1</sup> Fernandz and Lutz

<sup>2</sup> Gichamo

<sup>3</sup> Ashouri

<sup>4</sup> Zope

کاربری‌های اراضی مختلف را با مدل هیدرولیکی HEC-RAS تهیه نمودند. نتایج نشان داد که نقشه‌های پهنه‌بندی سیل توسط مدل HEC-RAS برای برآورد سیلاب و خطر سیل بسیار مؤثر است.

ختاک<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) برای برآورد میزان سیل‌گرفتنی در حاشیه‌های مختلف رودخانه کابل از نرم‌افزارهای GIS و HEC-RAS استفاده کردند. همچنین برای بررسی دقت شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای GIS و HEC-RAS دبی سیل ۲۰۱۰ افغانستان را به‌عنوان ورودی به مدل معرفی نمودند و با مقایسه نتایج مدل با تصاویر ماهواره‌ای از سیل ۲۰۱۰، دقت مدل تأیید شد.

زینی‌وند و همکاران (۱۳۸۵) با هدف پهنه‌بندی سیل در دشت سیلابی سیلاخور بروجرد بعد از تجزیه و تحلیل آمار هیدرولوژیکی و روندیابی سیل به روش ماسکینگام‌کانژ با به‌کارگیری نرم‌افزار HEC-RAS، اقدام به تهیه نقشه پهنه‌های سیل‌گیر با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ در دوره‌های بازگشت مختلف نمودند و در نهایت متذکر شدند که با روندیابی سیل و کوتاه گرفتن طول بازه‌ها نقشه‌های حاصل از دقت و صحت خوبی برخوردار خواهند بود.

موسوی و همکاران (۱۳۸۵) در تحقیق خود به بررسی کاربرد GIS در کنترل سیلاب شهری پرداختند بدین منظور پس از تهیه‌ی اطلاعات توپوگرافی، نقشه‌ی کاربری اراضی تهیه و با استفاده از فرمول استدلالی مقادیر سیلاب هر یک از حوزه‌های شهری محاسبه گردید. این مطالعه نشان داد ترکیب GIS با مدل‌های بارش-رواناب در طراحی شبکه سیلاب روی شهرها می‌تواند در کاهش زمان و هزینه بسیار مؤثر باشد.

کاویانپور و رزمخاموش (۱۳۸۶) با استفاده از ابزار GIS و مدل ریاضی HEC-RAS به مدل‌سازی سیلاب شهری منطقه مسیل باختر و منوچهری تهران پرداختند. در ادامه پهنه‌بندی سیلاب برای مناطق مجاور

---

<sup>1</sup> Khattak



مشخص گردید و روش‌هایی برای کاهش خطرات سیلاب با توجه به رژیم رودخانه و شرایط توپوگرافی و کاربری اراضی معرفی گردید.

مسجدی و همکاران (۱۳۸۷) با هدف معرفی روشی برای پهنه‌بندی سیلاب به تلفیق نتایج حاصل از مدل‌های ریاضی با نرم‌افزارهای سیستم‌های جغرافیایی پرداختند. بدین منظور مدل هیدرولیکی MIKE11 برای بازه‌ای از رودخانه بشار واقع در شهرستان یاسوج اجرا گردید و سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcView نقشه پهنه‌های سیل‌گیر برای دوره‌های بازگشت ۲، ۲۵، ۲۰۰ سال تهیه گردید.

اعلمی و مصطفی‌پور (۱۳۸۷) به پهنه‌بندی حریم و بستر رودخانه‌ی قرنقو واقع در دامنه کوه سهند پرداختند. بدین منظور از تلفیق نرم‌افزارهای HEC-RAS و ArcView استفاده کردند و در نهایت به تعیین کاربری اراضی با استفاده از نتایج پرداختند.

بیرانوند و همکاران (۱۳۹۳) پهنه‌بندی سیلاب رودخانه کشکان را با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS انجام دادند. در این تحقیق توانایی مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی رودخانه تأیید شد و همچنین نتایج حاصل از این پژوهش توانایی سیستم اطلاعات جغرافیایی در ارائه نتایج خروجی از HEC-RAS به صورت بصری، افزایش دقت، سرعت و کاهش هزینه‌های مطالعاتی طرح‌های سازماندهی رودخانه را نشان می‌دهد.



# فصل سوم

## مواد و روش‌ها

### ۳-۱- مقدمه

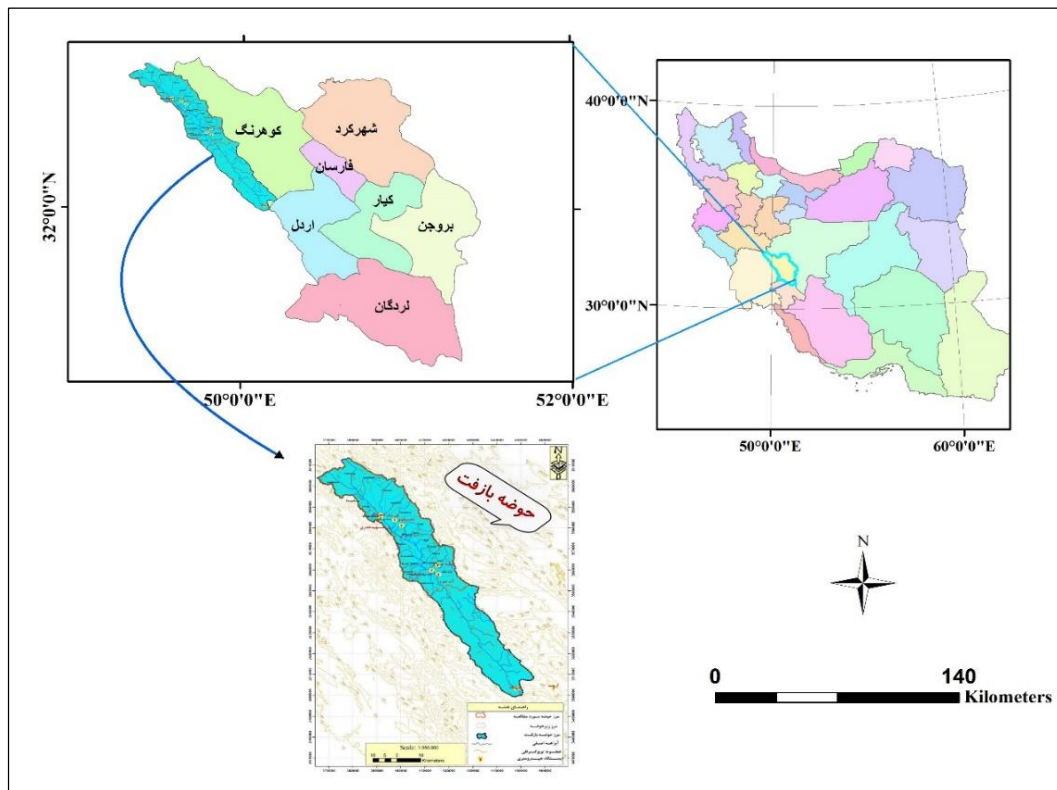
روندیابی سیلاب یکی از مهم‌ترین عوامل در مهندسی رودخانه می‌باشد که از این طریق می‌توان وضعیت دبی و ارتفاع آب را در زمان‌های مختلف بر حسب نیاز بدست آورد. کاربرد نتایج حاصل از روندیابی سیلاب را می‌توان در ابعاد مختلف کارهای مهندسی هیدرولیک جستجو نمود، از جمله پیش‌بینی مسائلی مانند سیلابی شدن تراس‌های رودخانه‌ای و غرقاب شدن اراضی کشاورزی و نقاط مسکونی و شهرها، ایجاد دریاچه‌های مصنوعی، توسعه و اصلاح مسیر رودخانه‌ها و غیره را می‌توان نام برد. در این فصل پس از معرفی خصوصیات منطقه مورد مطالعه، شرح انواع روش‌های روندیابی سیلاب به تفصیل آورده شده است. مراحل کار نیز به منظور روندیابی سیلاب با استفاده از روش ماسکینگام و مدل‌های عددی MIKE11 و HEC-RAS شرح داده شده و در نهایت پهنه سیلاب‌گیر رودخانه به ازای دبی با دوره‌های بازگشت مختلف توسط نرم‌افزار HEC-RAS ارائه می‌گردد.

### ۳-۲- شرح منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بازفت یکی از زیرحوضه‌های کارون بزرگ می‌باشد. این حوضه با مساحت ۱۲۵۲ کیلومترمربع در غرب و شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری و در دامنه‌های غربی زاگرس، بین طول‌های جغرافیایی  $32^{\circ} 50'$  تا  $34^{\circ} 49'$  شرقی و عرض‌های  $31^{\circ} 37'$  تا  $32^{\circ} 39'$  شمالی قرار دارد. پست‌ترین نقطه حوضه در محل خروجی آن با ارتفاع ۱۳۹۸ متر و بلندترین نقطه حوضه با ارتفاع ۴۱۳۶ متر در مجاورت قله اصلی زردکوه واقع شده است. این حوضه از شمال غرب به حوضه آبریز دز، از شمال، شمال شرق و شرق به حوضه آبریز کوه‌رنگ و از غرب و جنوب غرب به حوضه آبریز کارون میانی منتهی می‌شود. منطقه مورد مطالعه شامل بخشی از رودخانه بازفت به طول تقریبی ۴۷ کیلومتر از ایستگاه هیدرومتری شهیدخدری در بالادست تا ایستگاه هیدرومتری موز در پایین‌دست آن می‌باشد که به دلیل موقعیت جغرافیایی و ارتفاعی مناسب مورد

بررسی قرارگرفت. شکل (۱-۳) موقعیت حوضه آبریز بازفت و شکل (۲-۳) نماهایی از رودخانه بازفت را نشان

می‌دهد.



شکل ۱-۳: موقعیت حوضه آبریز بازفت



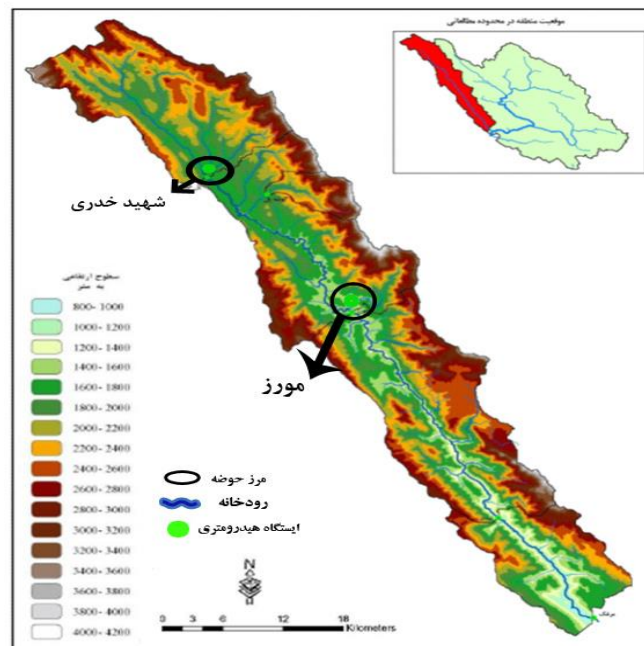
شکل ۲-۳: نماهای مختلف رودخانه بازفت

### ۳-۲-۱- ایستگاه‌های هیدرومتری

در محدوده مورد مطالعه دو ایستگاه هیدرومتری وجود دارد.

- ایستگاه مورز: این ایستگاه در حد فاصل روستای مورز و محل پیوستن آب نازی به بازفت بر روی رودخانه‌ی بازفت واقع شده است. این ایستگاه با وجود آن‌که از سال ۱۳۸۵ به آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری واگذار شده، در چارچوب سیستم هشدار سیل کارون فعال است. داده‌های به‌دست آمده از این ایستگاه شامل قرائت اشل و اندازه‌گیری دبی در روستای مورز موجود می‌باشد. ایستگاه مورز در طول دوره آماری بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ دارای آمار سیلاب می‌باشد.

- ایستگاه شهید خدری: این ایستگاه کنار روستای کوشکا یا شهرک شرمک در پایین‌دست پل شهید خدری و در کنار جاده‌ی اصلی بازفت- مسجد سلیمان واقع شده و آمار روزانه‌ای از سال آبی ۸۳ در دسترس است. در شکل (۳-۳) موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری نسبت به یک‌دیگر نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: محل ایستگاه‌های هیدرومتری روی نقشه هیپسومتری

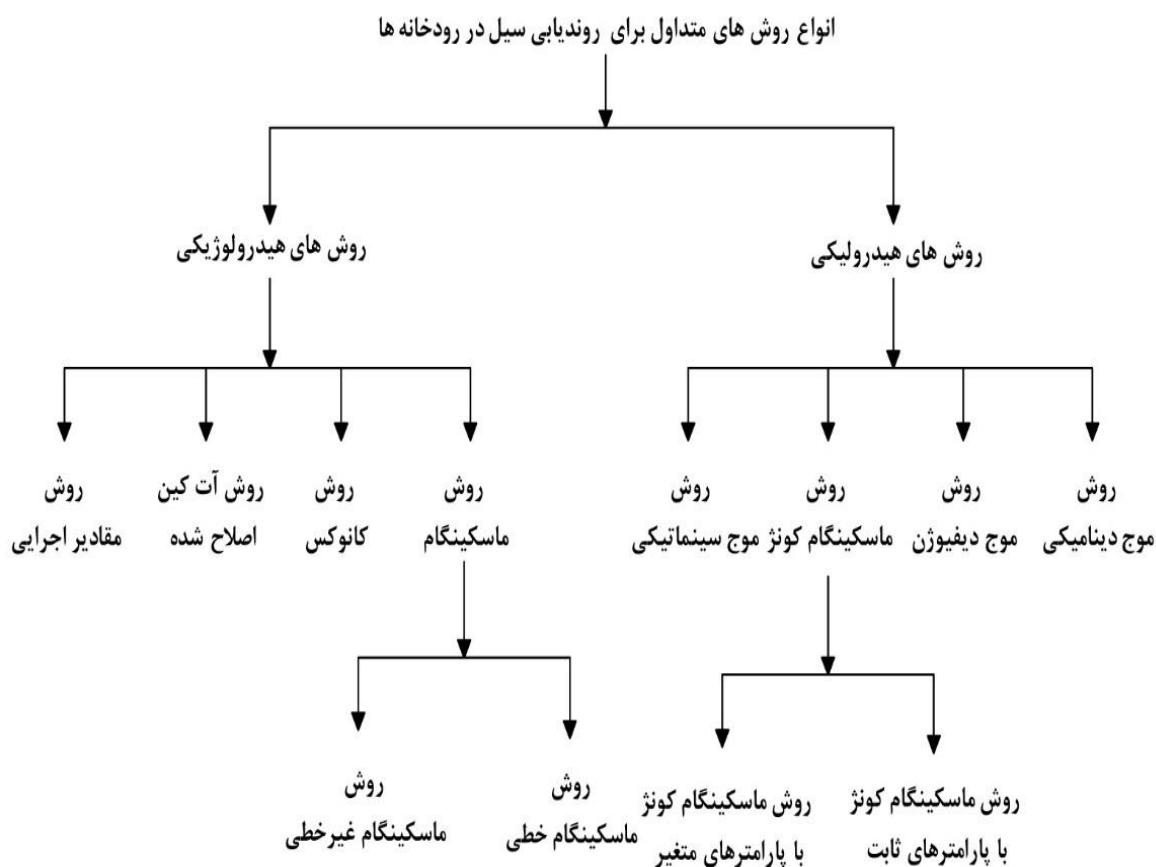
### ۳-۳- انواع روش‌های روندیابی سیلاب

به طور کلی روش‌های روندیابی را به دو دسته روندیابی یکپارچه و روندیابی جریان توزیعی تقسیم می‌کنند. معمولاً روندیابی یکپارچه مترادف با روندیابی هیدرولوژیکی است و روندیابی توزیعی را در بسیاری از موارد روندیابی هیدرولیکی می‌نامند. در روندیابی هیدرولوژیکی که جریان تابعی از زمان در یک محل معین از رودخانه و یا مخزن است، از معادله پیوستگی و یک رابطه بین ذخیره و جریان در سیستم استفاده می‌شود. در روندیابی هیدرولیکی که جریان تابعی از زمان لحظه‌ای در چند سطح مقطع از جریان است، از معادله پیوستگی و معادله حرکت استفاده می‌شود (مرادی و همکاران، ۱۳۸۶).

محاسبات فرایند روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی سیلاب بر پایه‌ی اصول زیر می‌باشد.

- حل مسائل با استفاده از روش مقادیر جزئی
- حل مسائل با استفاده از معادله پیوستگی
- حل مسائل با استفاده از ارتباط گرافیکی هیدروگراف ورودی و خروجی
- حل مسائل با استفاده از تئوری هیدروگراف واحد
- حل مسائل با استفاده از ارتباط تجربی بین دبی پیک ورودی و خروجی
- حل مسائل با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی

انتخاب نوع روش در روندیابی سیل به ماهیت مسأله و داده‌های موجود بستگی دارد. انواع روش‌های روندیابی سیل در رودخانه در شکل (۳-۴) ارائه شده است.



شکل ۳-۴: انواع روش های روندیابی

### ۳-۳-۱- روش های روندیابی هیدرولیکی

اگر روندیابی جریان به صورت تابعی از زمان و مکان در طول سیستم مدنظر باشد، این روش به نام روندیابی هیدرولیکی یا روندیابی توزیعی شناخته می شود (چاو، ۱۹۸۸). در روش های توزیعی یا هیدرولیکی، از معادله پیوستگی جریان و معادله اندازه حرکت استفاده شده و اساس آن بر تئوری جریان های غیردائمی استوار است. این معادلات که به معادلات سنت ونانت موسوم هستند، به طور هم زمان به صورت تحلیلی یا عددی حل می شوند تا هیدروگراف خروجی در هر فاصله ای در پایین دست از هیدروگراف ورودی به دست آید. بدین



مفهوم که در هر فاصله و هر زمان مقدار دبی مشخص می‌گردد، لذا روش‌های توزیعی روندیابی جریان عمدتاً در رودخانه‌ها کاربرد دارد که بتوان در هر فاصله‌ای در پایین‌دست و در هر زمان مقدار دبی را تعیین نمود. مدل‌های توزیعی می‌توانند برای روندیابی جریان‌های کم، نظیر دبی جریان در تأسیسات آبیاری که از سیستم رودخانه‌ای منشعب می‌گردد نیز بکار برده شوند. این نوع روندیابی، دقیق بوده ولی مشکل اصلی آن دشواری حل معادلات مربوطه می‌باشد که استفاده از رایانه را اجتناب‌ناپذیر کرده و اطلاعات وسیعی را طلب می‌کند. پیچیدگی نسبی روابط و مشکل بودن استفاده از آن‌ها و طولانی بودن رسیدن به جواب و نیاز فراوان این روش‌ها به فنون محاسبات و کیفیت و کمیت داده‌های ورودی، بازدهی و اجرای عملی آن‌ها را محدود می‌کند. ولی هنگامی که اثر برگشت آب وجود داشته و یا رودخانه خیلی پرشیب و یا خیلی کم‌شیب باشد اثرات دینامیکی ممکن است قابل ملاحظه بوده و در چنین حالاتی استفاده روندیابی هیدرولیکی بهتر از روندیابی هیدرولوژیکی می‌باشد.

### ۳-۳-۲- روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی

اگر جریان آب فقط به صورت تابعی از زمان در محلی مشخص روندیابی گردد، این نوع روش، روندیابی هیدرولوژیکی و یا سیستم روندیابی متمرکز یا توده‌ای نامیده می‌شود. در روش‌های متمرکز، هیدروگراف جریان در طی فرآیند روندیابی فقط در یک نقطه واقع در پایین‌دست محاسبه و لذا دبی جریان نسبت به زمان در یک فاصله ثابت از محل هیدروگراف بالادست استخراج می‌گردد که البته در روندیابی جریان در مخازن عمدتاً هدف همین است، که با توجه به هیدروگراف ورودی به مخزن، یک هیدروگراف و آن هم از خروجی مخزن که می‌تواند خروجی از انواع سرریزها باشد، به دست آید.

در این روش معادلات دیفرانسیل جریان‌های غیردائمی مستقیماً کاربرد نداشته بلکه اصل پیوستگی جریان و رابطه دبی-ذخیره آب با فرض یکنواخت بودن جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد که با توجه به تقریب‌ها و

فرض‌های یاد شده، هم روش ساده‌تر می‌شود و هم جواب‌های بدست آمده از دقت کمتری برخوردار می‌شوند ولی در هر حال این جواب‌ها برای استفاده در کارهای عملی و طرح‌های آبی از دقت لازم برخوردار بوده و می‌توانند با اطمینان کافی به کار گرفته شوند.

روش‌های هیدرولوژیکی هم در مورد روندیابی در مخازن و هم روندیابی در رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این روش‌ها می‌توان به روش گرافیکی، پالس، ماسکینگام، کانوکس، آت کین و ماسکینگام کانژ اشاره کرد.

شکل تابع ذخیره به طبیعت سیستمی بستگی دارد که مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در ادامه دو نوع سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۱. در سیستم اول، تابع ذخیره به صورت تک متغیره بوده که متغیر مستقل آن دبی خروجی  $Q$  است و به

فرم زیر نوشته می‌شود:

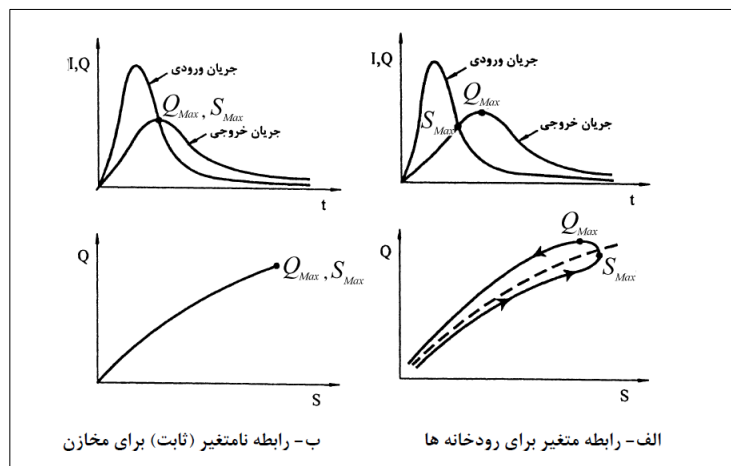
$$S = f(Q) \quad (1-3)$$

در این رابطه مقدار ذخیره می‌تواند تابع غیرخطی از  $Q$  هم باشد. این فرم تابع ذخیره عملاً در مخازن سدهای بزرگ به دلیل طبیعت سیستم ذخیره و خروجی آن‌ها کاربرد دارد. یعنی دبی خروجی از سد فقط تابع ذخیره سد است و کمتر تحت تأثیر دبی ورودی به سد می‌باشد. لذا در روندیابی هیدرولوژیکی یا متمرکز سدها یا مخازن بزرگ از این فرم تابع ذخیره استفاده می‌گردد. روش روندیابی با این فرم تابع ذخیره را روش مخزن تراز می‌نامند که عملاً سطح آب در مخزن افقی یا تراز بوده و دبی خروجی از آن تحت تأثیر جریان ورودی نیست و فقط تابع حجم آب ذخیره شده یا رقوم سطح آب است.

۲. در سیستم دوم، تابع ذخیره دارای رابطه‌ی خطی بین  $I$  و  $Q$  است که نشانگر تأثیرپذیری سریع خروجی از ورودی است. طبیعت این سیستم به رودخانه‌ها نزدیک است، بدین مفهوم که چون حجم ذخیره آب در

رودخانه‌ها کم بوده و عموماً سطح آب در آن‌ها دارای شیب بوده و تراز نیست، لذا خروجی هم تابع ذخیره و هم تابع ورودی است.

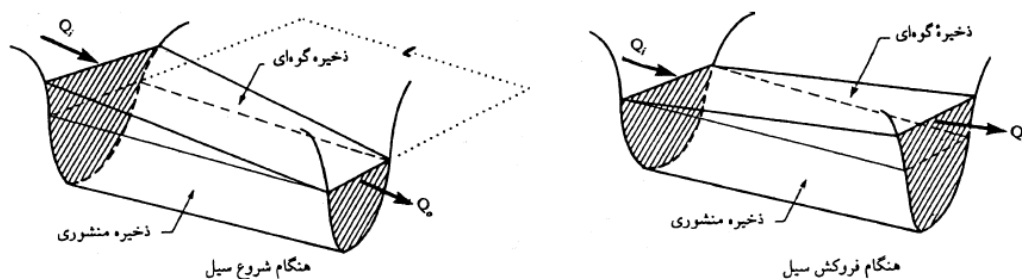
از طرفی دیگر در یک سیستم هیدرولوژیکی رابطه‌ی بین خروجی و ذخیره، تأثیر زیادی در روندیابی جریان دارد. این رابطه مطابق شکل (۳-۵) می‌تواند متغیر یا نامتغیر باشد. یک تابع ذخیره‌ی نامتغیر با معادله‌ای نظیر (۳-۱) را وقتی می‌توان بکار برد که سطح آب در مخزن افقی باشد. چنین مخازنی عمیق و عریض بوده و سرعت حرکت آب در آن‌ها در جهت طولی بسیار کم است. برای این که بتوان تابع ذخیره را متغیر فرض نمود، لازم است که همواره دبی ثابتی به ازاء رقوم خاصی از مخزن خارج گردد، یعنی رابطه‌ی یکتایی بین خروجی و ذخیره وجود داشته باشد و این بدان مفهوم است که خروجی مخزن بدون کنترل و یا اگر توسط دریچه کنترل گردد، در رقوم خاصی تثبیت شده و مانور ندارد.



شکل ۳-۵: رابطه بین دبی و ذخیره در مخازن و رودخانه‌ها

در رودخانه‌های کوچک، ذخیره موقتی آب با توجه به مورفولوژی آن‌ها (شیب زیاد و عرض کم) ناچیز بوده و در طراحی‌ها نادیده گرفته می‌شود. در رودخانه‌های بزرگ، ذخیره رودخانه‌ای اهمیت بیش‌تری یافته و تأثیر روند سیل در طراحی‌ها، باید در نظر گرفته شود. در مورد ذخیره موقتی آب در مخزن سد، سطح آب

افقی فرض شده و حجم ذخیره شده فقط شامل منشور آب می‌شود (ذخیره منشوری)، ولی در بازه‌ای از رودخانه و هنگام عبور یک موج سیلاب، علاوه بر ذخیره منشوری، ذخیره گوه‌ای روی آن قرار داشته که توسط سطح آب محدود می‌گردد. شکل‌های (۳-۶) و (۳-۷) این موضوع را نمایش داده‌اند. بنابراین ذخیره در رودخانه برخلاف مخازن، فقط تابعی از جریان خروجی نمی‌باشد.

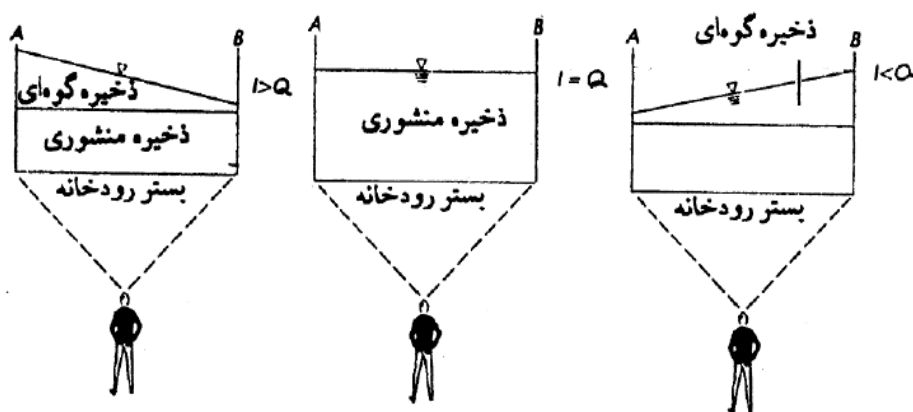


شکل ۳-۶: نمایش ذخیره‌های منشوری و گوه‌ای هنگام شروع و فروکش سیل

اگر فقط ذخیره منشوری وجود می‌داشت باید دبی ورودی به مسیر (I) و دبی خروجی از آن (O) برابر باشند ولی چون این دو مساوی نیستند لذا ذخیره تیغه‌ای به وجود می‌آید و مقدار آن تابع تفاوت بین دبی ورودی و خروجی (I - O) است. از نظر ذخیره تیغه‌ای سه حالت ممکن است اتفاق افتد. اگر دبی ورودی بیشتر از دبی خروجی از مسیر باشد (I > O) یعنی ارتفاع آب در ابتدای بازه بیشتر از انتهای بازه بوده، ذخیره تیغه‌ای مثبت بوده و به ذخیره منشوری اضافه می‌شود. اگر سطح آب افقی باشد مقدار ذخیره تیغه‌ای صفر است و اگر سیل به پایان برسد یعنی دبی ورودی کمتر از مقدار دبی خروجی باشد (I < O) (فروکش سیل) در این صورت ذخیره تیغه‌ای منفی و جهت محاسبه ذخیره کل، باید ذخیره تیغه‌ای را از ذخیره منشوری کم کرد. اگر ذخیره منشوری را که فقط تابع O می‌باشد  $S_1 = f_1(O)$  با ذخیره گوه‌ای  $S_2 = f_2(I - O)$  جمع کنیم ذخیره کل به دست می‌آید:

$$S = S_1 + S_2 = f_1(O) + f_2(I - O)$$

البته باید به علامت  $f_2$  نیز بسته به حالات سه گانه فوق توجه شود.



شکل ۳-۷: نمایش مفهوم ذخیره گوه‌ای و منشوری

### ۳-۳-۳- روندیابی هیدرولوژیکی در رودخانه

روندیابی سیل در رودخانه کمی مشکل‌تر و پیچیده‌تر از روندیابی سیل در مخازن است. در روندیابی مخزن رقوم سطح آب همیشه افقی می‌شود. ذخیره‌ی مخزن و جریان خروجی هر دو فقط تابعی از ارتفاع آب پشت سد فرض می‌شوند. به عبارت دیگر، ذخیره و جریان خروجی تابع یکدیگر می‌شوند. در رودخانه‌ها سطح آب به موازات بستر رودخانه نیست و شیب میانگین سطح آزاد آب بیش‌تر از شیب بستر در مرحله‌ی اوج‌گیری و کمتر از شیب بستر طی مرحله‌ی فروافتادن سیل است. بنابراین رابطه‌ی بین ذخیره و جریان خروجی در کانال‌ها پیچیده‌تر از مخزن است و تفاوت روش‌های متعدد ارائه شده برای روندیابی رودخانه در مکانیزم برقرار کردن این رابطه است. روش‌های متعددی نظیر کانوکس، آت‌کین، ماسکینگام، ماسکینگام کانژ و غیره برای روندیابی در رودخانه معرفی شده است که در اینجا به روش ماسکینگام که یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای روندیابی سیل در مجاری رودخانه‌ها است اشاره می‌شود (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۵).

### ۳-۳-۳-۱- روش ماسکینگام

روش ماسکینگام از جمله روش‌های هیدرولوژیکی است که در روندیابی رودخانه کاربرد گسترده‌ای دارد. روش ماسکینگام توسط مک‌کارتی (۱۹۳۸)، به همراه گروه مهندسی ارتش آمریکا به منظور تحقیقات روی بستر رودخانه ماسکینگام در اوهایو<sup>۱</sup> جهت کنترل سیل پیشنهاد و ارائه گردید، رابطه بین ذخیره و دبی در این روش می‌تواند به صورت خطی و یا غیرخطی مدنظر قرار بگیرد که انتخاب نوع آن به خصوصیات منطقه مورد مطالعه بستگی دارد. در این روش، از معادله‌ی پیوستگی و معادله‌ی ذخیره-دبی به صورت رابطه‌های (۲-۳) و (۳-۳) استفاده می‌شود.

$$\frac{ds}{dt} = I - Q \quad (۲-۳)$$

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (۳-۳)$$

ضرایب K و X پارامترهای روندیابی هستند. در این روش، فرض می‌شود که در آن  $t=0$ ،  $I=Q$  باشد. از نظر فیزیکی، K معادل زمان پیمایش قطعه‌ی رودخانه در نظر گرفته می‌شود و از دید تئوری X ضریبی است که برای وزن دادن به اثر ورودی و خروجی در ذخیره‌ی رودخانه استفاده می‌شود. با نوشتن معادله‌ی (۲-۳) به صورت تفاضل محدود و قرار دادن در معادله‌ی (۳-۳) معادله‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$\left[ \frac{I_t + I_{t+\Delta t}}{2} \right] \Delta t - \left[ \frac{Q_t + Q_{t+\Delta t}}{2} \right] \Delta t = k [x(I_{t+\Delta t} - I_t) + (1-x)(Q_{t+\Delta t} - Q_t)] \quad (۴-۳)$$

---

<sup>1</sup> Ohio

با مرتب کردن معادله‌ی (۳-۴) و حل آن برای  $Q_{t+\Delta t}$  معادله‌ی روندیابی ماسکینگام بدست می‌آید.

$$Q_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 Q_t \quad (۳-۵)$$

که در آن  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  ضرایب روش ماسکینگام هستند که جمع این ضرایبها برابر یک می‌باشد و یا:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (۳-۶)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2kx}{2k - 2kx + \Delta t} \quad (۳-۷)$$

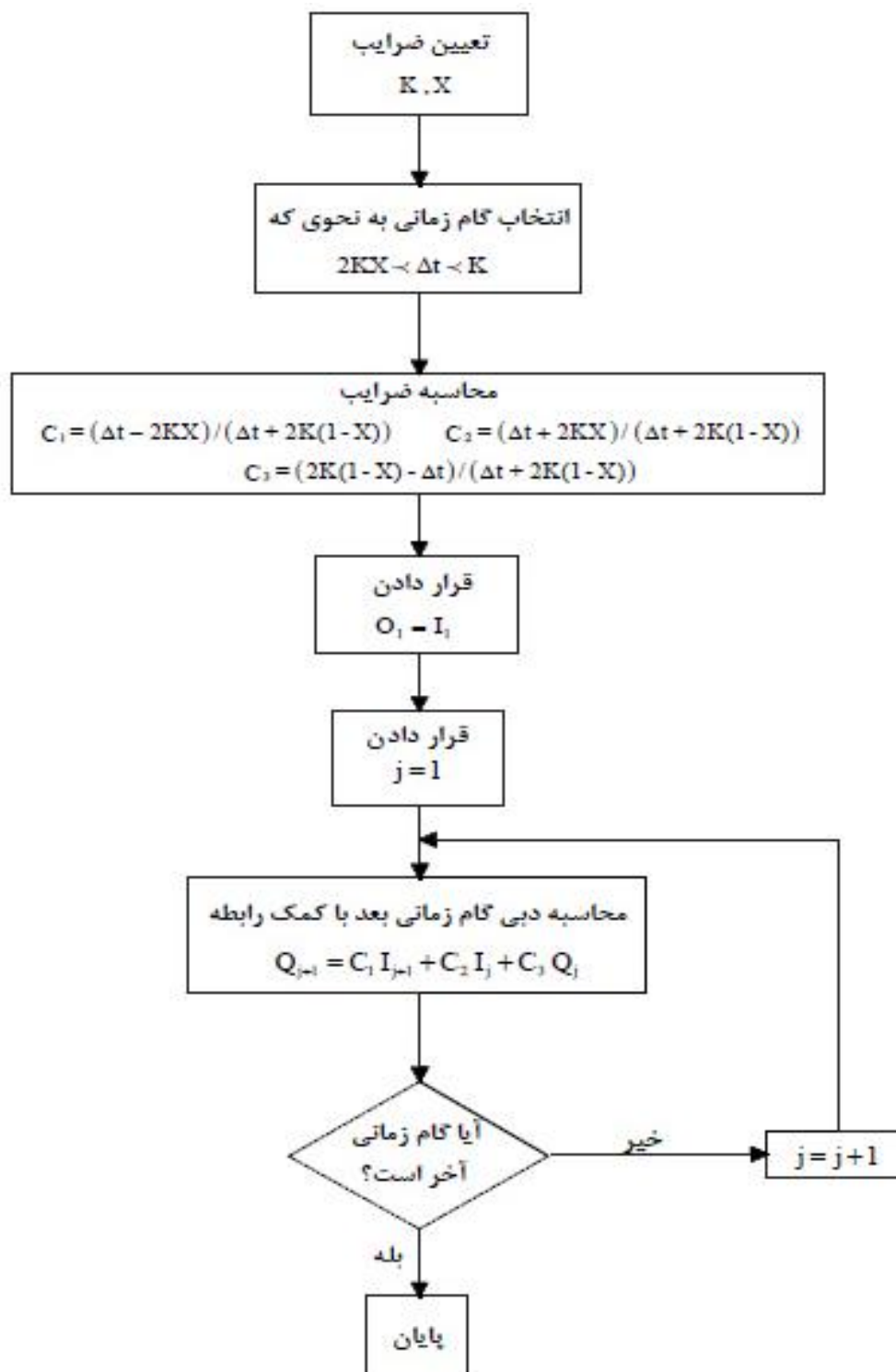
$$C_2 = \frac{2Kx + \Delta t}{2k - 2kx + \Delta t} \quad (۳-۸)$$

$$C_3 = \frac{2K - 2KX - \Delta t}{2k - 2kx + \Delta t} \quad (۳-۹)$$

در عمل، می‌توان ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  را حساب کرده و سپس از رابطه  $C_3 = 1 - (C_1 + C_2)$  مقدار  $C_3$  را بدست آورد. دامنه مناسب برای  $\Delta t$  نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{K}{3} \leq \Delta t \leq K \quad (۳-۱۰)$$

البته چاو (۱۹۶۴) مقدار مناسب آن را بین  $2Kx \leq \Delta t \leq K$  می‌داند. فلوجارت روندیابی به روش ماسکینگام خطی در شکل (۳-۸) ارائه شده است.



شکل ۳-۸: فلوجارت روندیابی به روش ماسکینگام خطی



## ۳-۴- مطالعات هیدرولیک

### ۳-۴-۱- مقدمه

هدف از مطالعات هیدرولیک تهیه یک مدل ریاضی مناسب است که نتایج حاصل از آن متناسب با رفتار رودخانه بوده و همچنین توانایی پیش‌بینی رفتار رودخانه در شرایط مختلف را دارا باشد تا بتوان از آن به عنوان ابزاری مناسب و کارآمد در جهت انجام مطالعات تعیین حد بستر و حریم رودخانه استفاده کرد. برای تهیه مدل ریاضی ابتدا نیاز به شناخت کافی از سیستم رودخانه و سپس استفاده از یک مدل ریاضی مناسب جهت مدل کردن سیستم رودخانه کاملاً مشهود می‌باشد. لذا در ادامه ابتدا به معرفی مدل و سپس مدل‌های ریاضی بکار رفته در این مطالعه متناسب با مطالعات هیدرولیک می‌پردازیم.

### ۳-۴-۲- مدل

کلمه مدل معمولاً به ابزاری گفته می‌شود که بتواند آینده را پیش‌بینی کند. از این رو، ابزار "مدل" در علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه کاربرد فراوانی دارد. آن دسته از پدیده‌های هیدرولیکی که روابط ریاضی حاکم بر آنها به وجود آمده و روش‌های حل این روابط تا کنون شناخته شده‌اند، را اصطلاحاً با "مدل‌های ریاضی" می‌توان پیش‌بینی کرد. حل معادلات در بعضی از پدیده‌ها ممکن است ساده باشد، به طوری که می‌توان با روش‌های معمولی آن را حل کرد. در پدیده‌هایی هم حل این معادلات پیچیده می‌باشند، که در آن صورت حل آنها تنها با روش‌های عددی و استفاده از کامپیوتر امکان‌پذیر خواهد بود (شفاعی بجستان مبنای و کاربرد مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی، ۱۳۸۴).

### ۳-۴-۳- انتخاب مدل ریاضی مناسب

برای انتخاب مدل کامپیوتری جهت شبیه‌سازی جریان بایستی موارد زیر بررسی شود.

#### ۱- شرایط هیدرولیکی رودخانه

۲- محدودیت‌های مدل کامپیوتری

۳- محدودیت‌های اطلاعات در منطقه‌ای طرح

جهت پیش‌بینی رفتار رودخانه به هنگام وقوع سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های مختلف نیاز به تهیه مدل ریاضی رودخانه می‌باشد، به‌نحوی که مدل مذکور پروفیل سطح آب رودخانه را در محدوده طرح محاسبه نماید. در این راستا در اولین گام باید مدل ریاضی متناسب با شرایط طرح انتخاب گردد. یکی از مسائل مهم در انجام مطالعات هیدرولیک انتخاب مدل ریاضی متناسب با نوع رفتار رودخانه و اهداف مطالعات می‌باشد چرا که انتخاب و بکارگیری مدل نامناسب سبب می‌گردد تا نتایج بدست آمده دور از ذهن و واقعیت باشد. مدل‌های ریاضی موجود برای محاسبه پروفیل سطح آب به دو دسته عمده مدل‌های ماندگار و غیرماندگار تقسیم می‌شوند که در ادامه به تشریح هر یک از آن‌ها می‌پردازیم.

### ۳-۴-۱- مدل‌های ریاضی ماندگار

این نوع از مدل‌های ریاضی بر این فرض استوار می‌باشند که خصوصیات جریان با گذشت زمان ثابت باقی خواهند ماند یا به عبارت دیگر دبی عبوری و عمق جریان یک مقطع مشخص با گذشت زمان تغییر نخواهد کرد. محاسبات پروفیل سطح آب براساس روش گام استاندارد و با توجه به شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست و نوع جریان انجام می‌گیرد. معروف‌ترین مدل ریاضی ماندگار مدل HEC-RAS می‌باشد که توسط گروه مهندسين ارتش ایالات متحده تهیه و ارائه گردیده است.

### ۳-۴-۲- مدل‌های ریاضی غیرماندگار

در این روش فرض بر این است که با گذشت زمان خصوصیات جریان تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در یک مقطع خاص دبی و عمق جریان ثابت نبوده و با گذشت زمان تغییر می‌نماید. البته در این حالت رابطه بین دبی و اشل رابطه‌ای یگانه نخواهد بود و به ازای یک دبی مشخص با توجه به شرایط هیدروگراف که در شاخه

صعودی یا نزولی باشد، مقدار اشل متفاوت خواهد بود. در این روش با در نظر گرفتن شرایط مرزی بالادست و پایین دست پروفیل سطح آب محاسبه می گردد. بدیهی است که پروفیل محاسبه شده ثابت نبوده و با گذشت زمان تغییر می نماید. از جمله مدل های معروف در این زمینه می توان مدل MIKE11 را نام برد که توسط DHI (انستیتو هیدرولیک دانمارک) تهیه و ارائه شده است. با استفاده از این نرم افزار می توان جریان غیرماندگار را در آبراهه مدل نمود. از جمله شرایط غیرماندگار می توان شرایط جزر و مد یا سیل را نام برد. در رودخانه هایی که زمان تداوم بیشینه سیلاب قابل توجه باشد فرض جریان به صورت ماندگار نتایج قابل قبولی می دهد و باعث صرفه جویی در وقت می شود و برعکس در رودخانه های جزر و مدی و یا شبکه های رودخانه ای که شاخه ها با هیدروگراف های مختلف به یکدیگر ملحق می شوند، کاربرد مدل غیرماندگار، غالباً نتایجی با ضریب اطمینان بالا را ارائه می نماید.

با توجه به شرایط پیچیده هیدرولیکی سیستم رودخانه بازفت و توانایی های فوق العاده نرم افزارها در جدول (۱-۳) به معرفی نرم افزارهای به کار رفته در این پژوهش پرداخته می شود.

### ۳-۴-۴- معرفی مدل های به کار رفته در این تحقیق

جدول ۱-۳: لیست نرم افزارهای استفاده شده

نرم افزار	کاربرد
EASYFIT ،SMADA	محاسبه دوره بازگشت و تعیین توزیع تابع آماری
ArcGIS10.3	پردازش و ذخیره سازی داده ها- تهیه نقشه ها با استفاده از دستورالعمل های مختلف
MIKE11	مدل سازی و محاسبه مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرودینامیک
HEC-RAS	آنالیز رودخانه- نمایش پلان و شکل سه بعدی سیستم رودخانه
HEC-GeoRAS	تجزیه و تحلیل داده های مکانی- ارتباط GIS و HEC-RAS

### ۳-۴-۱-۴-۳ نرم افزار HEC-RAS

مدل HEC-RAS مدل جریان یک بعدی است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی انجمن مهندسی ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته و در طرح‌های مهندسی رودخانه در سطح جهان از اعتبار و اطمینان کافی برخوردار است. مدل HEC-RAS در سال ۱۹۹۳ جایگزین مدل HEC-۲ گردید، در حال حاضر قابلیت شبیه‌سازی جریان پایدار و جریان ناپایدار در شرایط بستر ثابت و متحرک را داراست. در این مدل، روش حل معادلات در حالت جریان پایدار، روش گام به گام استاندارد و در حالت ناپایدار روش تفاضل محدود ضمنی می‌باشد. مدل می‌تواند جریان زیربحرانی، فوق‌بحرانی و یا ترکیبی، پارامترهای جریان و پروفیل سطح آب را محاسبه کند. این مدل توانایی تحلیل هیدرولیکی پل، کالورت، سرریز، دیواره‌های ساحلی و سازه‌های متقاطع دیگر، همچنین قابلیت محاسبه آبستگي پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل و دیگر سازه‌ها را دارد. در طرح‌های مهندسی رودخانه از جمله پهنه‌بندی سیل، بررسی وضعیت جریان و تعیین پروفیل سطح آب در شرایط مختلف ساماندهی رودخانه کاربرد دارد. در بازه‌های مارپیچ رودخانه، مقاطع عرضی باید به هم نزدیک باشند تا پلان بازه در مدل واقعی‌تر معرفی شده و دقت محاسبات مدل افزایش یابد. عمومیت کاربرد مدل درجه اعتماد به نتایج آن، سادگی کاربردی مدل، ارزانی و سهولت دسترسی به مدل و راهنمای کاربری آن از امتیازات مدل می‌باشد.

### ۳-۴-۲-۴-۳ نرم افزار MIKE11

مدل یک بعدی MIKE11 توسط انستیتو هیدرولیک دانمارک (DHI) جهت شبیه‌سازی جریان آب و انتقال رسوب در رودخانه‌ها و مجاری آبرفتی توسعه یافته است. این مدل برای جریان پایدار و ناپایدار جریان‌های زیربحرانی، فوق‌بحرانی و مختلط، شرایط بستر ثابت و متحرک می‌تواند بکار رود. مدل با وجودی که یک بعدی است اما در رودخانه‌های سیلاب‌دشتی با مقاطع مرکب به صورت شبه دو بعدی

پارامترهای هیدرولیکی را محاسبه می‌کند. مدل همچنین قادر است محاسبات انتقال رسوبات چسبنده و غیرچسبنده را انجام داده و اثرات سازه‌های مختلف در مسیر آبراهه را در نظر گیرد. این برنامه از روش اختلاف محدود برای حل یک بعدی معادلات حاکم جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب استفاده می‌کند. سابقه کاربری و درجه اعتماد عمومی به مدل خوب ولی نسخه اصلی آن بسیار گران است.

### ۳-۴-۴-۳ نرم‌افزار ARCGIS

سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مجموعه‌ای از سخت‌افزار، نرم‌افزار، داده‌های جغرافیایی و منابع انسانی است که قابلیت جمع‌آوری، ذخیره، تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات جغرافیایی مکانی را دارد. هدف نهایی این سیستم، پشتیبانی جهت تصمیم‌گیری‌های پایه‌گذاری شده بر اساس داده‌های مکانی می‌باشد و عملکرد اساسی آن بدست آوردن اطلاعاتی است که از ترکیب لایه‌های متفاوت داده‌ها با روش‌های مختلف و با دیدگاه‌های گوناگون بدست می‌آیند. مدل GIS برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۶۰ در کانادا مطرح و از آن تاریخ به بعد روز به روز بر طرفداران آن افزوده شد تا در دهه ۱۹۸۰ جنبه جهانی پیدا کرد. در این مدل عکس‌های هوایی، اطلاعات کشاورزی، جنگل‌داری، خاک، زمین‌شناسی و نقشه‌های مربوطه مورد استفاده قرار گرفتند. این سامانه علاوه بر اطلاعات توصیفی، قابلیت ورود اطلاعات پیکسلی و یا برداری را از منابع مختلفی از قبیل نقشه، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای، GPS و تجهیزات نقشه‌برداری دارا می‌باشد و می‌تواند نتایج تجزیه و تحلیل‌ها را در قالب نقشه، گزارش، جدول و نمودار ارائه نماید.

### ۳-۴-۴-۴ نرم‌افزار HEC-Geo-RAS

این نرم‌افزار الحاقیه‌ای در بسته نرم‌افزاری ArcView GIS است که برای پردازش داده‌های زمینی در سیستم تحلیل رودخانه (HEC-RAS) طراحی شده است. این افزونه با همکاری مشترک ESRI و مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC) تولید شده و به کاربران امکان تهیه لایه‌های ورودی به HEC-RAS در محیط ArcView

GIS را می‌دهد. این لایه‌ها شامل اطلاعات استخراج شده از لایه TIN (شبکه نامنظم مثلثی) مانند مشخصات رودخانه، بازه‌ها، خطوط مقاطع عرضی و طول بازه پایین‌دست برای ساحل چپ، کانال اصلی و ساحل راست می‌باشد. بنابراین استفاده از این الحاقی در GIS می‌تواند جهت رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده و پهنه‌بندی سیلاب مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳-۴-۵- روش کار با نرم‌افزار HEC-RAS

در این تحقیق به منظور معرفی هیدروگراف سیل و روندیابی از نرم‌افزار HEC-RAS 4.1 استفاده شد. در ادامه اطلاعات مورد نیاز مدل و نحوه معرفی آن‌ها به ترتیب مورد بررسی قرار گرفته و سپس نحوه اجرا و انجام محاسبات توسط مدل شرح داده شده است.

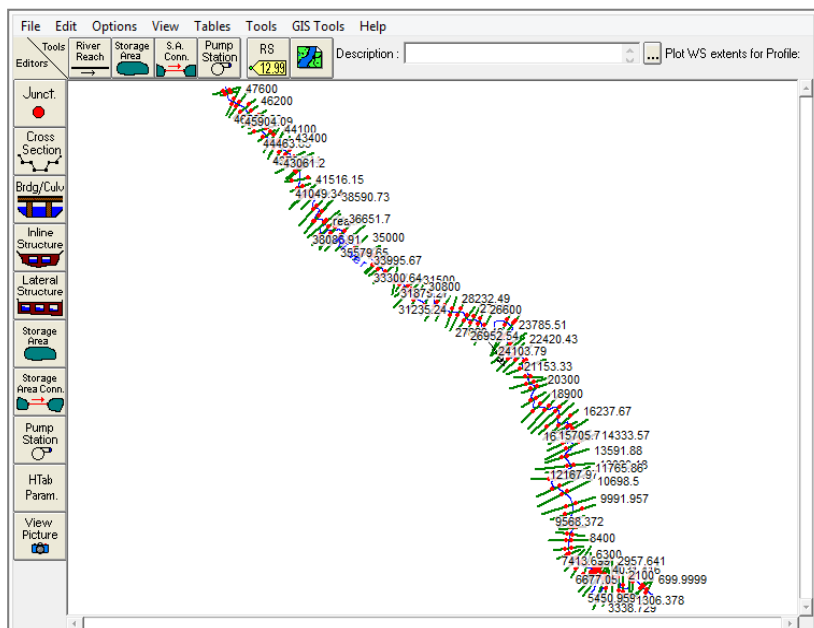
### ۳-۴-۵-۱- ورود اطلاعات مورد نیاز

اطلاعات مورد نیاز جهت تحلیل جریان در حالت غیرماندگار توسط مدل HEC-RAS را می‌توان در حالت کلی به دو بخش داده‌های هندسی و داده‌های جریان تقسیم نمود. در ذیل مراحل ورود اطلاعات به صورت گام به گام شرح داده شده است.

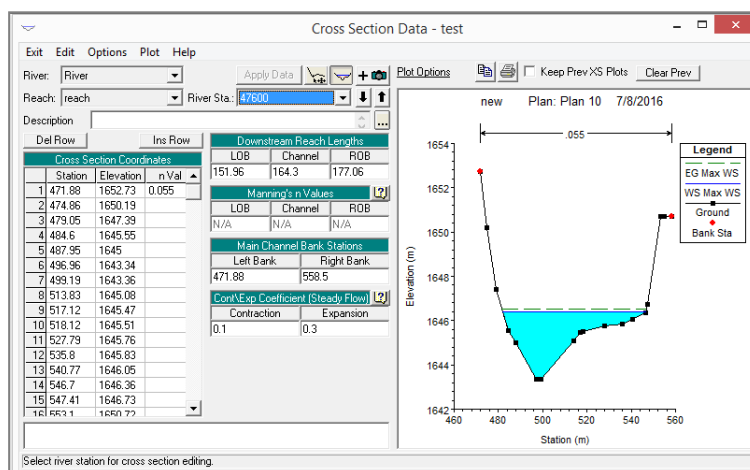
#### ۱) وارد کردن داده‌های هندسی

در نرم‌افزار HEC-RAS این قابلیت فراهم است که پس از اجرای مدل، اطلاعات ژئومتری رودخانه از جمله موقعیت نقاط برداشت شده از مقاطع عرضی، فاصله مقاطع از یکدیگر، موقعیت کانال اصلی و سواحل چپ و راست برای هر مقطع، مقادیر ضریب زبری مانینگ و ضرایب تنگ شدگی و بازشدگی رودخانه در محل مقطع را مورد استفاده قرار داد. در این تحقیق تعداد ۱۱۰ مقطع عرضی برداشت شده همراه با خصوصیات لازم برای هر یک به مدل معرفی شد. شکل شماتیک بازه انتخابی از رودخانه بازفت به همراه موقعیت

قرارگیری مقاطع عرضی در شکل (۳-۹) و همچنین پنجره ورود اطلاعات مربوط به مقاطع عرضی در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۳-۹: طرح شماتیک بازه انتخابی از رودخانه بازفت با موقعیت قرارگیری مقاطع عرضی در مدل HEC-RAS

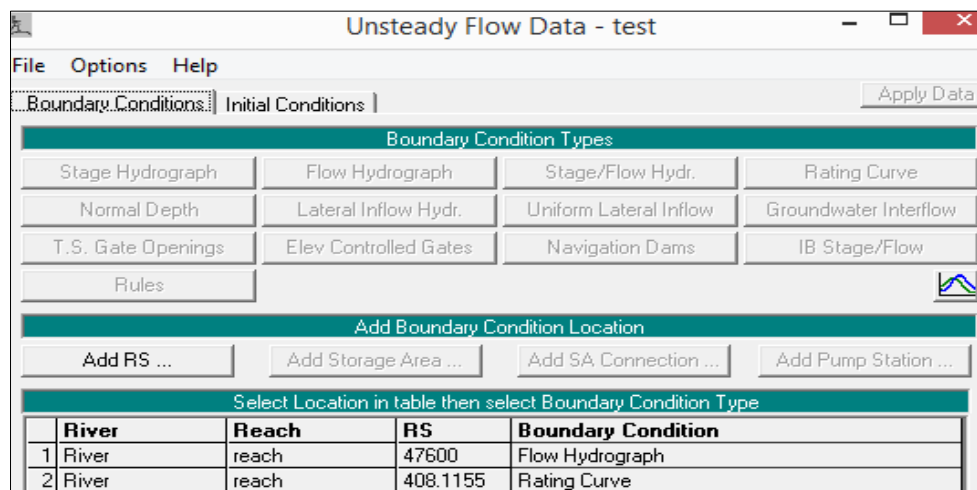


شکل ۳-۱۰: پنجره ورود اطلاعات مربوط به مقاطع عرضی در مدل HEC-RAS

## ۱) وارد کردن داده‌های جریان و شرایط مرزی

پس از وارد کردن داده‌های هندسی، داده‌های جریان به مدل معرفی می‌گردد. نوع داده‌های جریان ورودی بستگی به نوع تحلیل مورد نظر دارد. در این تحقیق با توجه به هدف اصلی که در واقع مقایسه روش‌های روندیابی سیلاب می‌باشد، از تحلیل جریان غیرماندگار استفاده گردید. چرا که در این حالت می‌توان با ورود هیدروگراف ورودی در بالادست، آن را در پایین‌دست روندیابی نمود. مراحل ورود اطلاعات مربوط به جریان به شرح زیر می‌باشد:

در صفحه مربوط به شرایط مرزی می‌بایست برای هر دو مقطع بالادست و پایین‌دست هر بازه، شرایط مرزی مربوطه را به مدل معرفی کرد. چندین نوع مختلف از شرایط مرزی وجود دارد که البته انتخاب نوع شرط مرزی بستگی به موقعیت مقطع در رودخانه و اطلاعات موجود دارد. در این مطالعه برای مقطع بالادست هیدروگراف ورودی ثبت شده از سیلاب‌های رخ داده معرفی گردید و برای شرط مرزی پایین‌دست رابطه دبی اشل استخراج شده مربوط به مقطع خروجی به مدل معرفی شد. صفحه ورود شرایط مرزی در شکل (۱۱-۳) آورده شده است.



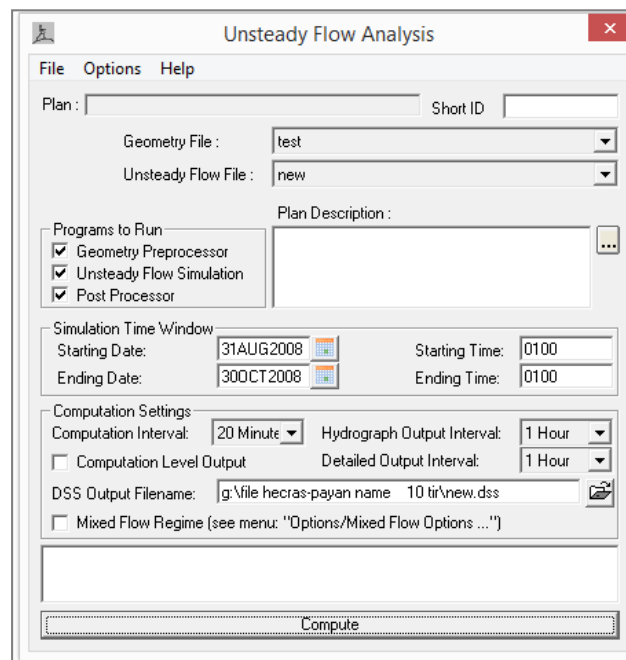
شکل ۱۱-۳: پنجره ورود شرایط مرزی برای مرز بالادست و پایین‌دست بازه



جهت معرفی شرایط اولیه به مدل می‌بایست مقادیر دبی جریان در شروع محاسبات برای هر یک از مقاطع وارد گردد. در این مطالعه با توجه به وجود ایستگاه هیدرومتری دبی جریان با دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه گردید و به مدل معرفی شد. با معرفی اطلاعات هندسی و داده‌های جریان مدل جهت اجرا آماده است. در ادامه اجرای مدل و همچنین مشاهده خروجی‌های حاصل از تحلیل توضیح داده شده است.

## ۲) روش اجرای مدل

به‌منظور اجرای مدل و انجام محاسبات جریان غیرماندگار، پنجره‌ای همانند شکل (۳-۱۲) پدیدار خواهد شد.

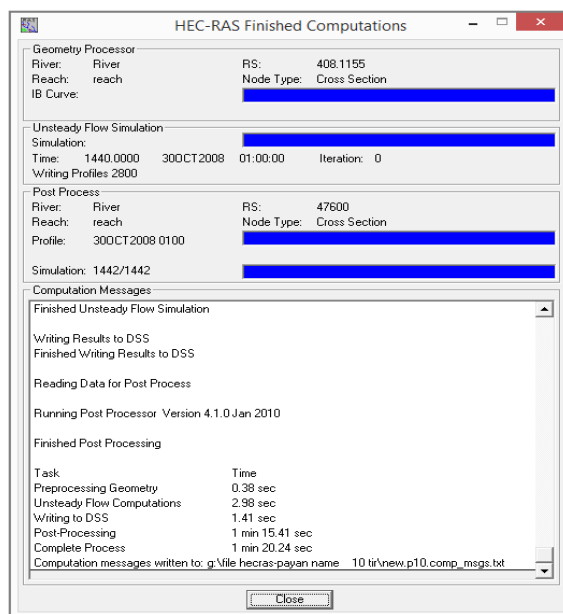


شکل ۳-۱۲: پنجره تحلیل جریان غیرماندگار

سه مؤلفه در HEC-RAS وجود دارد که عبارتند از یک پیش‌پردازنده داده‌های هندسی (Geometry Preprocessor)، شبیه‌ساز جریان غیرماندگار (Unsteady Flow Simulation) و یک پس‌پردازنده خروجی (Post Processor)، که از آن‌ها در انجام تحلیل غیرماندگار استفاده می‌شود. در قسمت مربوط به پنجره زمان شبیه‌سازی، می‌بایست ابتدا و انتهای دوره شبیه‌سازی تعریف گردد. در صفحه اصلی تحلیل جریان غیرماندگار

قسمت مربوط به تنظیمات محاسباتی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل بوده که در انتخاب این مقدار باید دقت فراوانی شود چرا که با کمترین تغییر در مقدار آن، پایداری مدل در حل معادلات جریان غیرماندگار دچار نوسان شدید می‌شود.

با تعریف موارد فوق می‌توان مدل را اجرا کرد. این امر با فشردن دکمه Compute آغاز شده و پس از چند ثانیه با نمایش پنجره‌ای مشابه شکل (۳-۱۳) اتمام می‌پذیرد.



شکل ۳-۱۳: پنجره مربوط به نمایش روند محاسبات در تحلیل جریان غیرماندگار

#### (۴) مشاهده نتایج

پس از اجرای موفقیت‌آمیز مدل به منظور تحلیل جریان غیرماندگار، می‌توان نتایج خروجی را در قالب هیدروگراف‌های دبی و اشل، تصاویر سه بعدی از جریان سیل در بازه رودخانه، منحنی‌های سنجه برای هر مقطع، پروفیل‌های سرعت و سطح آب، جداول مربوط به خصوصیات هیدرولیکی جریان و سایر اطلاعات مشاهده نمود.

### ۳-۴-۶- پهنه‌بندی سیلاب در بازه مورد مطالعه

نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب در مطالعات مدیریت سیلاب‌دشت کاربرد وسیعی دارد. امروزه این نقشه‌ها یکی از اطلاعات پایه و مهم در مطالعات طرح‌های عمرانی در دنیا محسوب شده و قبل از هرگونه سرمایه‌گذاری و یا اجرای طرح‌های توسعه، بررسی آن در دستور کار سازمان‌های ذیربط قرار دارد. همانطور که در معرفی اهداف تحقیق آورده شد، یکی دیگر از اهداف مورد بررسی در این مطالعه، پیش‌بینی سیل در بلندمدت و تعیین پهنه‌های سیل‌گیر به ازای دبی با دوره‌های بازگشت مختلف می‌باشد. بدین منظور روش استفاده از مدل‌های ریاضی انتخاب گردید و از بین مدل‌های رایج و ارائه شده، مدل هیدرولیکی HEC-RAS با توجه به قابلیت‌های مدل در تحلیل جریان‌ات ماندگار و غیرماندگار و همچنین جنبه جهانی استفاده از این مدل در تحقیقات مرتبط انتخاب گردید. در ادامه نحوه ورود اطلاعات مورد نیاز، انجام محاسبات و همچنین مشاهده فایل‌های خروجی توضیح داده شده است.

### ۳-۴-۶-۱- کلیات استفاده از HEC-RAS در پهنه‌بندی سیلاب

همان‌گونه که قبلاً نیز عنوان گردید، مدل HEC-RAS می‌تواند انواع تحلیل جریان ماندگار و غیرماندگار را در حالت یک بعدی انجام دهد. با توجه به اینکه هدف ما در واقع محاسبه سطح آب و پهنه سیل‌گیر به ازای مقادیر دبی با دوره‌های بازگشت مختلف می‌باشد، از تحلیل ماندگار این نرم‌افزار استفاده گردید. در این نوع تحلیل، کاربر قادر خواهد بود با معرفی داده‌های هندسی و همچنین مقادیر دبی جریان، پس از اجرای مدل اطلاعاتی نظیر رقوم سطح آب و سایر اطلاعات هیدرولیکی جریان را در بازه مورد مطالعه از رودخانه و در محل مقاطع عرضی مشاهده و استخراج نماید. مراحل کار برای مطالعه موردی معرفی شده در تحقیق از ورود اطلاعات تا مشاهده نتایج خروجی در ادامه آورده شده است.

## ۱) وارد کردن داده‌های هندسی

جهت معرفی داده‌های هندسی مربوط به رودخانه مورد مطالعه، به همان روشی که در مبحث (۳-۴-۵-۱) مربوط به ورود اطلاعات هندسی برای تحلیل جریان در حالت غیرماندگار شرح داده شد، عمل می‌شود.

## ۲) ورود اطلاعات مربوط به دبی جریان

پارامتر دبی جریان با در دست داشتن آمار حداکثر سالانه ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه و بکارگیری نرم‌افزارهای آماری نظیر SMADA و EASYFIT تحلیل شده و دبی جریان با دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه می‌شود.

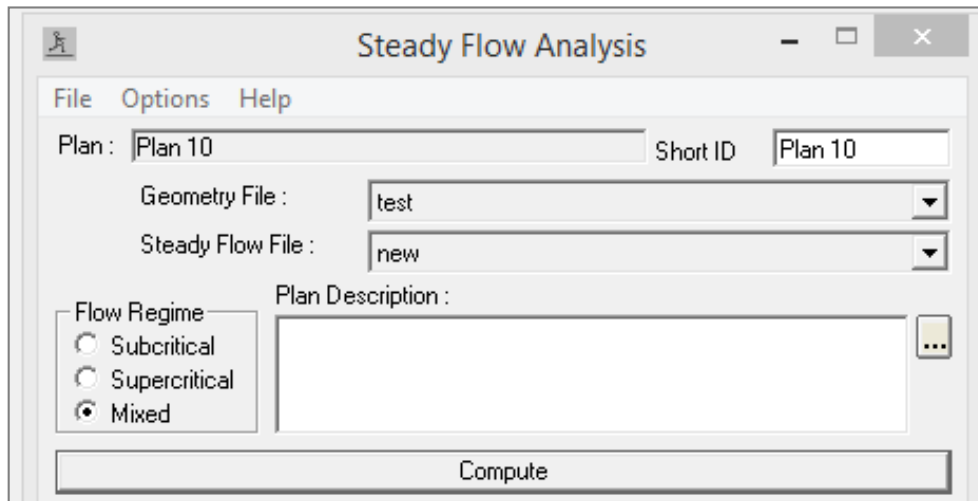
نحوه ورود دبی‌های مربوط به دو دوره بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله در نرم‌افزار HEC-RAS در شکل (۳-۱۴) آورده شده است. در قسمت Reach Boundary Conditions، شرایط مرزی جریان برای بازه مورد مطالعه معرفی می‌گردد.

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates	
River	Reach	RS	Q25	Q500
1 River	reach	47600	1000	1250

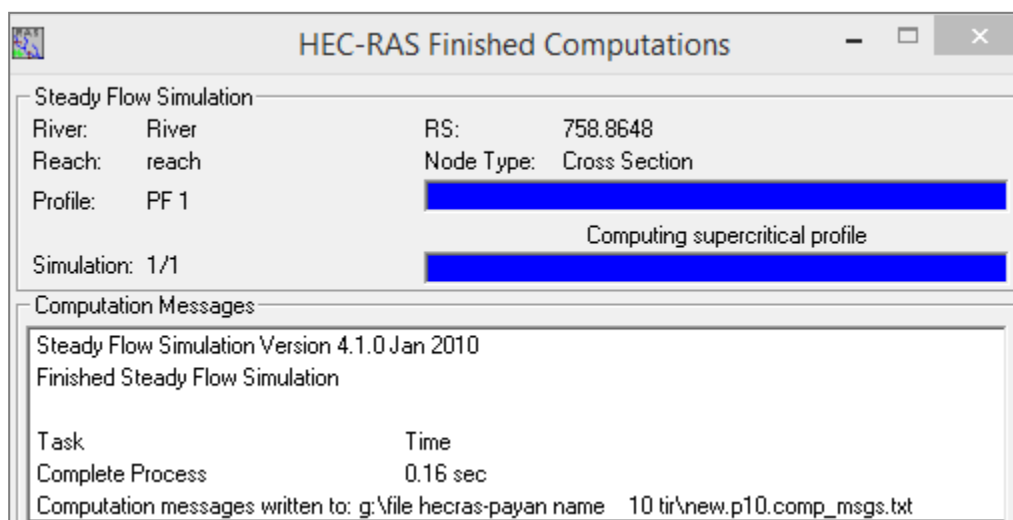
شکل ۳-۱۴: ورود اطلاعات مربوط به دبی جریان

## ۱) اجرای مدل و ارائه رقوم سطح آب

محاسبات پروفیل سطح آب بر مبنای جریان متغیر تدریجی انجام می‌گیرد. با توجه به تغییر مشخصات هندسی مقاطع در مسیر جریان، از مجموعه روش‌های عددی و روش گام به گام استاندارد که اساس آن بر معادله انرژی استوار است و در رودخانه‌ها مناسب می‌باشد، در تعیین سرعت جزئی، شیب خط انرژی استفاده می‌شود. شکل (۳-۱۵) با قرار دادن اشاره‌گر موس روی Compute، محاسبات مربوط به پروفیل سطح آب با دوره‌های بازگشت انتخابی در بازه مورد نظر آغاز شده و پس از چند لحظه با نمایش پنجره‌ای مشابه شکل (۳-۱۶) محاسبات پایان می‌پذیرد. سپس می‌توان نتایج را مشاهده نمود. این نتایج شامل نمودارهای مقاطع عرضی، نمودارهای پروفیل، نمودارهای منحنی‌سنجه آب، نمودارهای سه بعدی، خروجی جدولی در موقعیت‌های گوناگون به صورت جداول خروجی مفصل (جداول خلاصه پروفیل‌ها) می‌باشد.



شکل ۳-۱۵: پنجره تحلیل جریان ماندگار



شکل ۳-۱۶: پنجره مربوط به نمایش روند محاسبات در تحلیل جریان ماندگار

نتایج مربوط به تحلیل جریان ماندگار، شامل عمق آب در محل مقاطع عرضی و همچنین پهنه‌های سیل‌گیر به ازای دبی با دوره‌های بازگشت مختلف در فصل نتایج و بحث آورده شده است و توانایی و دقت مدل در تعیین پهنه‌های سیل‌گیر از بازه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۴-۷- روش کار با نرم‌افزار MIKE11

در پژوهش حاضر به منظور بررسی شرایط هیدرولیکی رودخانه بازفت از نرم‌افزار MIKE11 استفاده شده است. لذا قبل از هر چیز لازم است در مورد مبانی تئوری آن مطالبی ارائه گردد.

این برنامه از روش اختلاف محدود برای حل یک بعدی معادلات حاکم بر جریان آب استفاده می‌کند. مدل هیدرودینامیکی در واقع عنصر زیربنایی سیستم مذکور است و پایه‌ای برای سایر مدل‌های موجود در برنامه نظیر پخش و انتشار، کیفیت آب و حمل رسوبات می‌باشد. این برنامه دارای ۴ ویرایشگر بوده که همه‌ی آنها در بهره‌گیری از یک مدول مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدول‌ها به صورت مستقل از هم عمل کرده و این باعث می‌شود اجرای برنامه کاربر پسندتر شده و انعطاف آن بیشتر شود. هر یک از مدول‌ها عملیات

خاصی را انجام می‌دهند. در جداول (۲-۳) و (۳-۳) توضیح مختصری در مورد هر یک از ویرایشگرها آورده شده است.

جدول ۲-۳: مدول‌های موجود در نرم‌افزار MIKE11

عملکرد	علامت	مدول
محاسبه دبی و تراز آب در شبکه‌های سری و حلقه‌ای شامل رودخانه‌ها، خورها، دریاچه، مخازن	HD	هیدرودینامیک Hydrodynamics
محاسبه غلظت یک ماده به صورت معلق یا محلول	AD	فرارفت- پراکنش Advection- Dispersion
محاسبه پارامترهای کیفی آب مانند اکسیژن محلول، BOD و غیره	WQ	کیفیت آب Water Quality
محاسبه هیدروگراف‌ها، رطوبت خاک و غیره	RR	رواناب و بارندگی Rainfall- Runoff
محاسبات مربوط به فرآیند فرسایش و رسوبگذاری	ST	حمل رسوب Sediment Transport
پیش‌بینی سیلاب، مدل‌سازی تجهیزات کنترل سیلاب	FF	پیش‌بینی سیلاب Flood Forecasting

جدول ۳-۳: ویرایشگرهای مورد استفاده در نرم‌افزار MIKE11 جهت مدل‌سازی هیدرولیک

عملکرد	ویرایشگر
شبیه‌سازی	شبیه‌سازی (Simulation)
تعریف شبکه رودخانه‌ای	شبکه رودخانه‌ها (Rivers Network)
تعریف مقاطع عرضی، محاسبه سطح مقطع و ...	سطح مقطع‌ها (Cross Sections)
تعیین شرایط مرزی	شرایط مرزی (Boundary Conditions)
تعیین پارامترهای هیدرولیکی	پارامترهای هیدرولیکی (HD Parameter)

### ۳-۴-۷-۱- مدول هیدرودینامیک (HD)

مدول هیدرودینامیک (HD) به عنوان هسته اصلی نرم افزار MIKE11، با استفاده از روش عددی Abbott-Ionescu (روش تفاوت‌های محدود) و به صورت ضمنی معادلات پیوستگی- اندازه حرکت را در حالت غیردائمی حل می‌کند و محاسبات جریان غیردائمی در آبراهه‌ها را انجام می‌دهد.

همچنین این مدول از روش گام به گام استاندارد برای حل معادلات پیوستگی- انرژی در جریان دائمی استفاده می‌کند. این مدول با روش عددی بکار رفته است که بسته به شرایط محل جریان (در مکان و زمان) تغییر می‌کند و توانایی توصیف شرایط جریان فوق بحرانی را همانند جریان زیر بحرانی داراست.

### ۳-۴-۷-۲- معادلات حاکم

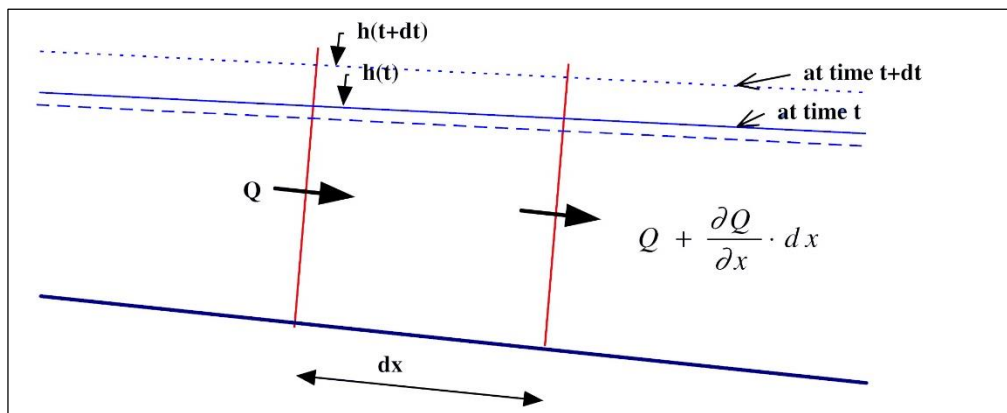
معادلات سنت و نانت در حالت یک بعدی غیرماندگار و در محاسبات مدل هیدرودینامیک به شرح زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (۱۱-۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (۱۲-۳)$$

پارامترهای معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) در شکل (۱۷-۳) نشان داده شده است.





شکل ۳-۱۷: پارامترهای مورد استفاده در معادلات سنت ونانت

### ۳-۴-۷-۳- حل عددی معادلات سنت ونانت

در مدل هیدرودینامیک ابتدا معادلات سنت ونانت به روش اختلاف محدود و به فرم منقطع نوشته شده و سپس معادلات گسسته شده بر روی یک شبکه نقاط در طول و در زمان‌های مختلف حل می‌گردند. به این منظور مطابق شکل (۳-۱۸) گره‌های  $h$  و  $Q$  انتخاب می‌شوند. نقاط  $h$  در واقع گره‌های عمق بوده و برنامه در گام‌های زمانی مختلف در این نقاط تراز سطح آب را محاسبه می‌نماید. نقاط فوق در واقع همان نقاط مقاطع عرضی بوده و استفاده کننده می‌تواند در صورت لزوم بین مقاطع معرفی شده نیز گره‌های عمق معرفی نماید. در این صورت برنامه بین مقاطع ارائه شده درونیابی خطی نموده و مقطع مورد نظر را محاسبه می‌نماید. نقاط  $Q$  گره‌هایی هستند که در آن‌ها دبی در گام‌های زمانی مختلف محاسبه می‌گردد. نقاط  $Q$  توسط خود برنامه و در وسط دو نقطه  $h$  مجاور همدیگر انتخاب می‌شوند. با توجه به نقاط فوق معادلات منقطع شده نوشته شده و توسط الگوریتم نقطه‌ای ابوت حل می‌گردند. در اشکال (۳-۱۹) و (۳-۲۰) شبکه نقاط محاسباتی برای دو حالت منقطع نمودن معادله پیوستگی و منقطع نمودن معادله اندازه حرکت نشان داده شده است. در حالت منقطع نمودن معادله پیوستگی گره‌های  $-1$  و  $z+1$  مربوط به  $Q$  و گره  $z$  مربوط به  $h$  می‌باشد در این حالت معادله پیوستگی حول نقطه  $h$  منقطع شده است، در حالت دوم گره‌های  $-1$  و  $z+1$

مربوط به Q خواهد بود، در این حالت معادله اندازه حرکت حول نقطه Q منقطع می‌گردد. همچنین با توجه به اینکه در هر دو حالت، جملات معادلات منقطع شده مربوط به زمان‌های n و n+1 می‌باشد، لذا در هر دو حالت برآیند جملات حول n+1/2 خواهد بود (مرکزیت زمانی).

روش مورد استفاده برای حل عددی معادلات، روش شش نقطه‌ای ابوت (Abbott) است. جزئیات حل معادلات سنت و نانت (شامل معادله پیوستگی و معادله‌ی مونتم) به شرح زیر می‌باشد:

### (۱) حل عددی معادله پیوستگی

معادله پیوستگی نیز با استفاده از روش شش نقطه‌ای ابوت مفصل می‌گردد که در شکل (۳-۱۹) جزئیات این روش ارائه شده است. شکل کلی معادله مونتم به شرح زیر است:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial h}{\partial t} = q \quad (۱۲-۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{(Q_{j+1}^{n+1} + Q_{j+1}^n) - (Q_{j-1}^{n+1} + Q_{j-1}^n)}{2 \Delta 2x_j} \quad (۱۳-۳)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{(h_j^{n+1} - h_j^n)}{\Delta 2X_j} \quad (۱۴-۳)$$

$$b_s = \frac{A_{0j} + A_{0j+1}}{\Delta 2X_j} \quad (۱۵-۳)$$

$$\alpha_j Q_{j-1}^{n+1} + \beta_j h_j^{n+1} + \gamma_j Q_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (۱۶-۳)$$

که در آن:

$$A_{0j} = \text{مساحت سطح آب در پلان بین دو مقطع } ۱- \text{ و } ۰ \text{ زو } j$$

$$A_{0j+1} = \text{مساحت سطح آب در پلان بین دو مقطع } ۰ \text{ زو } j+1$$

$$\Delta (2x_j) = \text{فاصله بین دو مقطع } ۱- \text{ و } ۰ \text{ زو } j+1$$

$$Q_j^n = \text{دبی در مقطع } z \text{ و سطح زمانی } n$$

$\alpha, \beta, \gamma =$  توابعی بر حسب  $b$  و  $\delta$  هستند و بستگی دارند به  $h$  در سطح زمانی  $n$  و  $Q$  در سطوح زمانی  $n$  و  $n+1$ .

## ۲) حل معادله مومنتم

معادله مومنتم نیز با استفاده از روش شش نقطه‌ای ابوت منفصل می‌گردد که در شکل (۳-۲۰) جزئیات این روش ارائه شده است. شکل کلی معادله مومنتم به شرح زیر است:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (۳-۱۷)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{(Q_j^{n+1} - Q_j^n)}{\Delta t} \quad (۳-۱۸)$$

$$\frac{\partial \left[ \alpha \frac{Q^2}{A} \right]}{\partial x} = \frac{\left[ \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)_{j+1}^{n+1/2} - \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)_{j-1}^{n+1/2} \right]}{\Delta 2X_j} \quad (۳-۱۹)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\frac{(h_{j+1}^{n+1} + h_{j+1}^n)}{2} - \frac{(h_{j-1}^{n+1} + h_{j-1}^n)}{2}}{\Delta 2X_j} \quad (۳-۲۰)$$

به منظور جلوگیری از بروز اشتباه در مواقعی که در یک گام زمانی جهت جریان معکوس می‌شود می‌توان  $Q^2$  را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$Q^2 = fQ_j^{n+1}Q_j^n - (f-1)Q_j^nQ_j^n \quad (21-3)$$

با کاربرد روابط فوق و قرار دادن آنها در معادله‌ی حرکت نهایتاً خواهیم داشت:

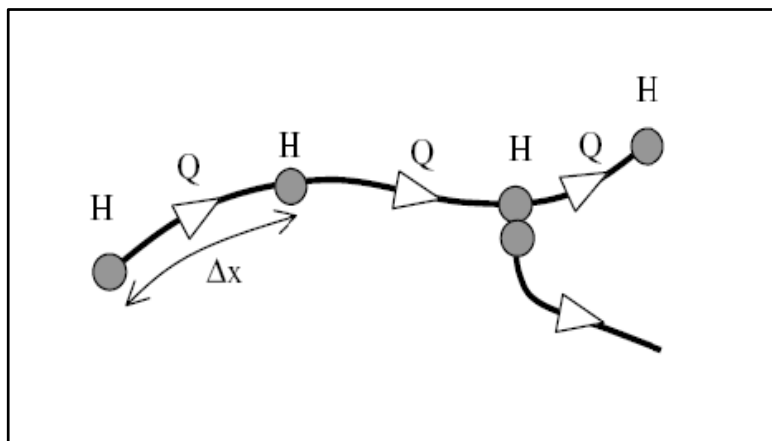
$$\alpha_j h_{j-1}^{n+1} + \beta_j Q_j^{n+1} + \gamma_j h_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (22-3)$$

$$\alpha_j = f(A) \quad (23-3)$$

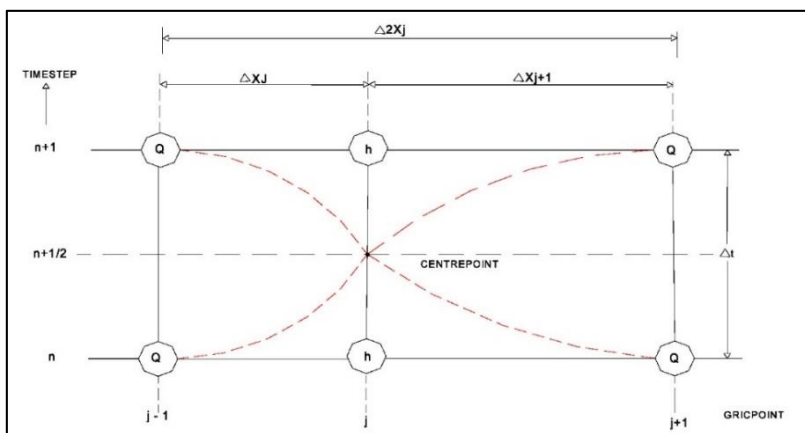
$$\beta_j = f(Q_j^n, \Delta t, \Delta x, C, A, R) \quad (24-3)$$

$$\gamma_j = f(A) \quad (25-3)$$

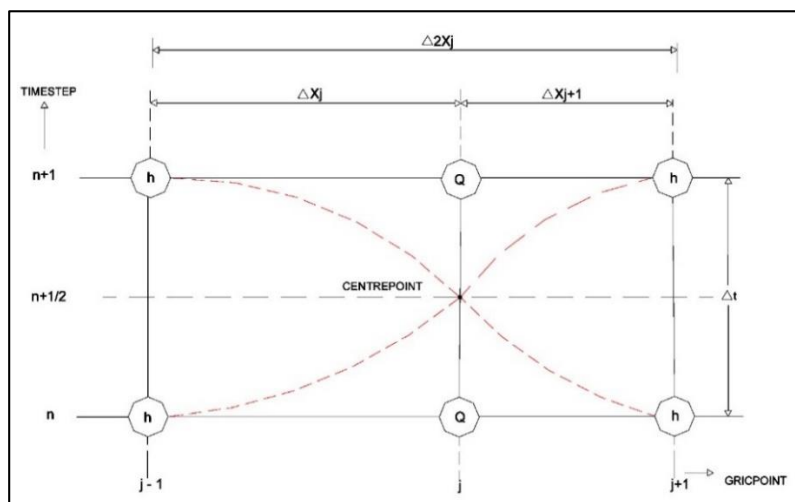
$$\delta_j = f(A, \Delta x, \Delta t, \alpha, q, v, \phi, h_{j-1}^n, Q_{j-1}^{n+1/2}, Q_j^n, h_{j+1}^n, Q_{j+1}^{n+1/2}) \quad (26-3)$$



شکل ۳-۱۸: شبکه‌بندی رودخانه برای حل عددی معادلات سنت ونانت



شکل ۳-۱۹: الگوریتم ۶ نقطه‌ای ابوت مربوط به معادله پیوستگی



شکل ۳-۲۰: الگوریتم ۶ نقطه‌ای ابوت مربوط به معادله اندازه حرکت

### ۳-۴-۷-۴- ارزیابی مقاومت بستر رودخانه

اگر چه فرضیات ساده کننده در مدل MIKE11 موجب خطا می شود ولی با ارزیابی صحیح مقاومت جریان به عنوان یک عامل اصلی و تعیین کننده الگوی جریان، می توان به طور قابل ملاحظه‌ای بر دقت نتایج افزود. به طور کلی در مدل MIKE11 مقاومت بستر رودخانه با استفاده از ضرایب مانینگ و شزی به صورت زیر دخالت داده می شود:

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} \quad (27-3)$$

$$S_f = \frac{Q |Q|}{C^2 AR} \quad (28-3)$$

که در آن  $S_f$  شیب خط انرژی،  $Q$  دبی جریان،  $C$  و  $n$  به ترتیب ضرایب شزی و مانینگ،  $A$  سطح مقطع جریان و  $R$  شعاع هیدرولیکی جریان می باشد.

محدوده‌ی تغییرات ضریب مانینگ  $0/01$  (برای کانال‌های خیلی صاف) تا  $0/1$  (کانال‌های زبر با پوشش گیاهی زیاد) می باشد و ضریب شزی بر حسب ضریب مانینگ مطابق رابطه (29-3) محاسبه می شود.

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (29-3)$$

اگر چه ضرایب مانینگ یا شزی در مدل MIKE11 با انجام کالیبراسیون تعیین می شوند ولی در مواقعی که جریان رودخانه به دشت‌های سیلابی سرایت می کند و یا برای کانال‌های با مقاطع مرکب گاهاً مقدار  $R$  خطاهای زیادی وارد محاسبات می کند. در مدل MIKE11 می توان شعاع هیدرولیکی را به دو صورت شعاع هیدرولیکی مقطع ( $R_h$ ) یا شعاع هیدرولیکی مقاومت ( $R^*$ ) تعریف نمود.

### (1) شعاع هیدرولیکی مقاومت ( $R^*$ )

$R^*$  با توجه به رابطه‌ی زیر محاسبه می شود:

$$\sqrt{R^*} = \frac{1}{A} \int_0^B y^{3/2} \quad (30-3)$$

که در آن  $y$  عمق آب جریان در هر فاصله از ساحل،  $A$  سطح مقطع جریان و  $B$  عرض سطح آب در رقوم مورد نظر.

معادله فوق باعث می‌شود که ضریب مانینگ در مقاطع مرکب وابسته به عمق جریان باشد، با توجه به اینکه ممکن است مقاومت بستر در قسمت‌های یک مقطع عرضی ثابت نباشد لذا می‌توان بر مبنای تغییرات مقاومت بستر، سطح مقطع جریان را اصلاح نمود:

$$A_e = \sum_{i=1}^{N_s} \left( \frac{A_i}{r_{ri}} \right) \quad (31-3)$$

که در آن  $N$  تعداد زیر مقطع،  $A_e$  سطح مقطع مؤثر (اصلاح شده) که بایستی در معادله  $R^*$  به جای  $A$  بکار رود و  $Ir$  نسبت ضریب مقاومت هر نقطه از بستر به میانگین مقاومت بستر.

در مقطعی که جریان به سیلاب‌دشت سرایت می‌کند، به ازای یک افزایش کوچک در عمق، مقدار شعاع هیدرولیکی دچار کاهش زیاد می‌شود زیرا به ازای یک افزایش کوچک در عمق، سطح مقطع افزایش کمی دارد ولی چون جریان به دشت‌سیلابی وارد می‌شود محیط خیس شده به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و این امر باعث کاهش  $R_h$  می‌شود که قابل قبول نبوده و موجب خطا در محاسبه دبی می‌شود. در این مورد اگر از  $R^*$  استفاده شود، اصلاحات لازم قابل اعمال بوده و خطای محاسبه شعاع هیدرولیکی کاهش می‌یابد بنابراین برای مقطعی که جریان ممکن است به دشت‌سیلابی سرایت کند بایستی از  $R^*$  استفاده گردد.

## ۲) شعاع هیدرولیکی مقطع ( $R_h$ )

در صورتی که مقطع عرضی رودخانه دارای زبری‌های مختلف باشد، می‌توان شعاع هیدرولیکی مقطع را با استفاده از فاکتور انتقال ( $K$ ) بدست آورد که در این صورت خواهیم داشت:

$$R_h = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \frac{A_i^{5/3}}{r_{ri} P_i^{2/3}}}{A} \right]^{3/2} \quad (32-3)$$

که در آن  $P_i$  محیط خیس شده هر یک از زیر مقطع‌ها (البته در محدوده جریان مرز مشترک دو مقطع شامل محیط خیس شده نمی‌باشد)،  $A_i$  مساحت هر زیر مقطع،  $N$  تعداد زیر مقطع‌ها،  $\Gamma_r$  نسبت مقاومت برای دخالت دادن تغییرات مقاومت بستر در محاسبه  $R_h$ .

در صورتی که جنس بستر در مقطع همگن باشد می‌توان شعاع هیدرولیکی مقطع را برابر نسبت سطح مقطع جریان به محیط خیس شده کل مقطع در نظر گرفت. برای مقاطعی که گود هستند اگر از  $R^*$  استفاده شود مقادیر بدست آمده از مقادیر واقعی بزرگتر خواهد بود و موجب خطا خواهد شد. در چنین مقاطعی استفاده از  $R_h$  موجب افزایش دقت در محاسبات می‌شود.

### ۳-۴-۷-۵- توصیف جریان

مدل هیدرودینامیک نرم‌افزار MIKE 11 این قابلیت را دارد که معادله مومنتوم را با در نظر گرفتن ترم‌های مختلف آن در چهار حالت زیر حل کند. در شکل (۳-۲۱) ترم‌های مورد استفاده معادله اندازه حرکت در هر کدام از روش‌های حل نشان داده شده است.

#### ۱) روش موج کاملاً پویا با مرتبه بالا (High Order Fully Dynamic Wave)

در این روش تمام عبارات‌های معادله اندازه حرکت بکار رفته و در جایی استفاده می‌شود که تغییرات شتاب با گذشت زمان و مکان از اهمیت برخوردار باشد، مانند جریان جزر و مدی یا در سیستم‌های رودخانه‌ای که شیب سطح آب، بستر و نیروهای مقاومت بستر کم باشند، همچنین در این روش نیمرخ فرا آب نیز محاسبه می‌شود.

#### ۲) روش موج کاملاً پویا (Fully Dynamic Wave)

این روش مانند روش اول است اما روش قبل اجازه می‌دهد شبیه‌سازی در گام‌های زمانی بزرگتری انجام شود.



### ۳) روش موج پخش شونده (Diffusive Wave)

این روش اصطکاک کف، نیروهای ثقلی و فشار معادله اندازه حرکت را در نظر گرفته و از عبارت شتاب صرف نظر می کند. بنابراین امکان در نظر گرفتن شرایط مرزی پایین دست و در نتیجه شبیه سازی اثرات فرا آب ممکن بوده و برای مکانی مناسب است که نیروی اصطکاک غالب بوده و حرکت موج پیش رونده کند می باشد.

### ۴) روش موج جنبشی (Kinematic Wave)

در این روش معادله اندازه حرکت بر پایه فرض تعادل بین نیروهای ثقلی و اصطکاک محاسبه می شود. برای رودخانه هایی با شیب نسبتاً تند مناسب می باشد، اما قادر به شبیه سازی اثرات فرا آب نیست.

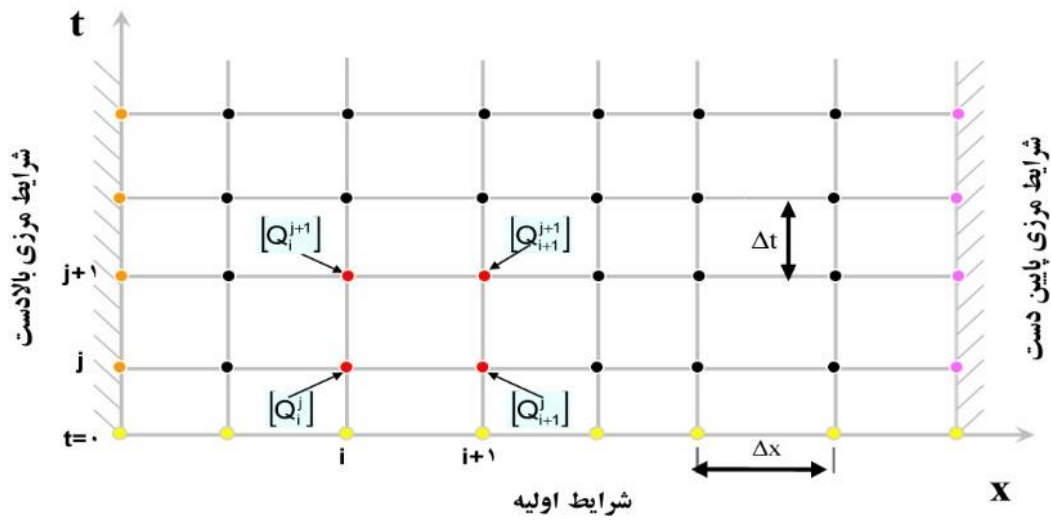
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ}{C^2 A} \frac{|Q|}{R} = 0$$

شکل ۳-۲۱: ترم های مختلف معادله مومنوم

استفاده از روش موج کاملاً پویا برای تمامی موارد توصیه می شود، مگر در مواردی که نشان داده شود، روش موج پخش شونده یا جنبشی کفایت می کند؛ زیرا روش موج جنبشی و پخش شونده در حقیقت حالت ساده شده روش موج کاملاً پویا می باشند و برای راحتی محاسبه از آنها استفاده می شود، ولی باید فقط وقتی از

آن‌ها استفاده شود که عبارات حذف شده تأثیر چندانی بر روی نتایج نداشته باشند. در صورت هر گونه شک، بهتر است ابتدا از روش موج کاملاً پویا استفاده شود.

برای کاربرد روش عددی موج دینامیکی کامل، باید کانال را به تعدادی بازه جریان تقسیم کنیم. همچنین متغیر زمان نیز گسسته‌سازی شده و حل‌ها فقط در بازه‌های زمانی گسسته جستجو گردند. این موضوع با استفاده از شبکه محاسبات نشان داده شده در شکل (۳-۲۲) میسر می‌گردد. خطوط قائم شبکه محاسباتی اختلاف موقعیت در طول کانال و خطوط افقی تقسیم‌بندی زمان را در یک حل عددی بیان می‌کنند. هم‌گام مکانی  $\Delta x$  و هم‌گام زمانی  $\Delta t$  می‌توانند به صورت متغیر در نظر گرفته شوند. با این وجود ممکن است آن‌ها را برای سادگی به صورت ثابت در نظر بگیریم. تقاطع‌های خطوط افقی و قائم در گره‌های شبکه محاسباتی می‌باشد و حل عددی در این گره‌ها صورت می‌گیرد. خط افقی صفر بیان‌کننده زمان آغازین و شرایط جریان در تمامی گره‌های این خط از شرایط آغازین جریان، معلوم است. خط قائم  $N, 1$  به ترتیب بیان‌کننده بالادست و پایین‌دست کانال هستند. شرایط مرزی در گره‌های این خطوط به کار می‌روند. شرایط در مرحله زمانی صفر شناخته شده‌اند، گام اول محاسبات مشخص کردن شرایط جریان در همه گره‌های خط افقی 1 (مرحله زمانی 1) در گام  $t = (1)(\Delta t)$  است. پس از تعیین شرایط در مرحله زمانی 1، محاسبات برای مرحله زمانی 2 صورت می‌گیرد. روش مشابهی برای مراحل زمانی باقی مانده استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر، زمانی که ما شرایط جریان را در مرحله زمانی  $n+1$  محاسبه می‌کنیم، شرایط در مرحله زمانی  $n$  از طریق شرایط آغازین یا محاسبات گام زمانی قبلی معلوم هستند.

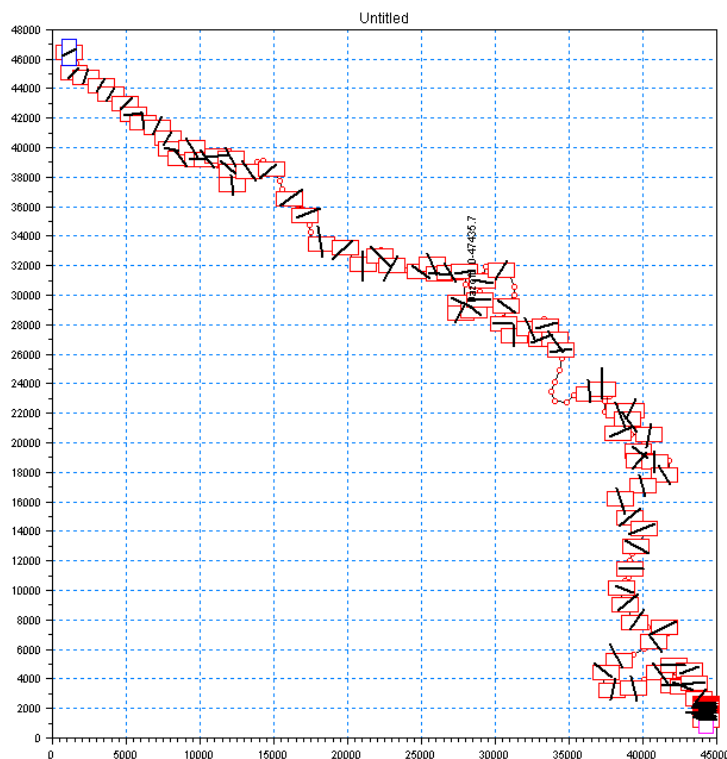


شکل ۳-۲۲: شبکه محاسباتی روش موج دینامیکی

### ۳-۴-۷-۶- اطلاعات ورودی به مدل ریاضی MIKE11

#### ۱. پلان مسیر رودخانه

با ترسیم پلان مسیر رودخانه در واقع شکل کلی مسیر به همراه پیچ و خم‌های رودخانه به مدل معرفی می‌گردد. شکل (۳-۲۳) طرح شماتیک رودخانه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۳: پلان مسیر رودخانه بازفت

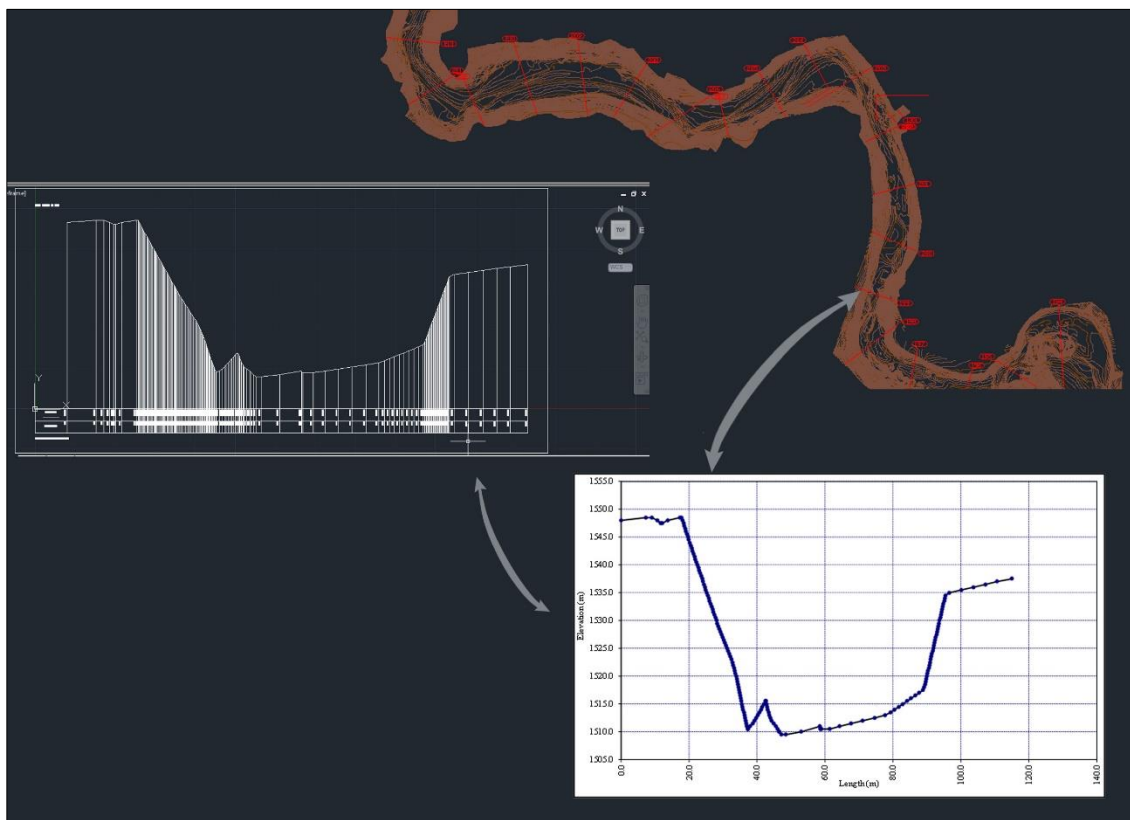
## ۲. وارد کردن مقاطع عرضی رودخانه

همان گونه که در مبانی تئوری MIKE11 گفته شد، معادلات سنت و نانت برای هر حجم کنترل حل می‌گردد و حجم کنترل حدفاصل دو مقطع عرضی رودخانه است که به فاصله  $\Delta x$  از همدیگر قرار گرفته اند. بنابراین اولین گام در اجرای مدل HD وارد کردن مشخصات مقاطع عرضی رودخانه می‌باشد.

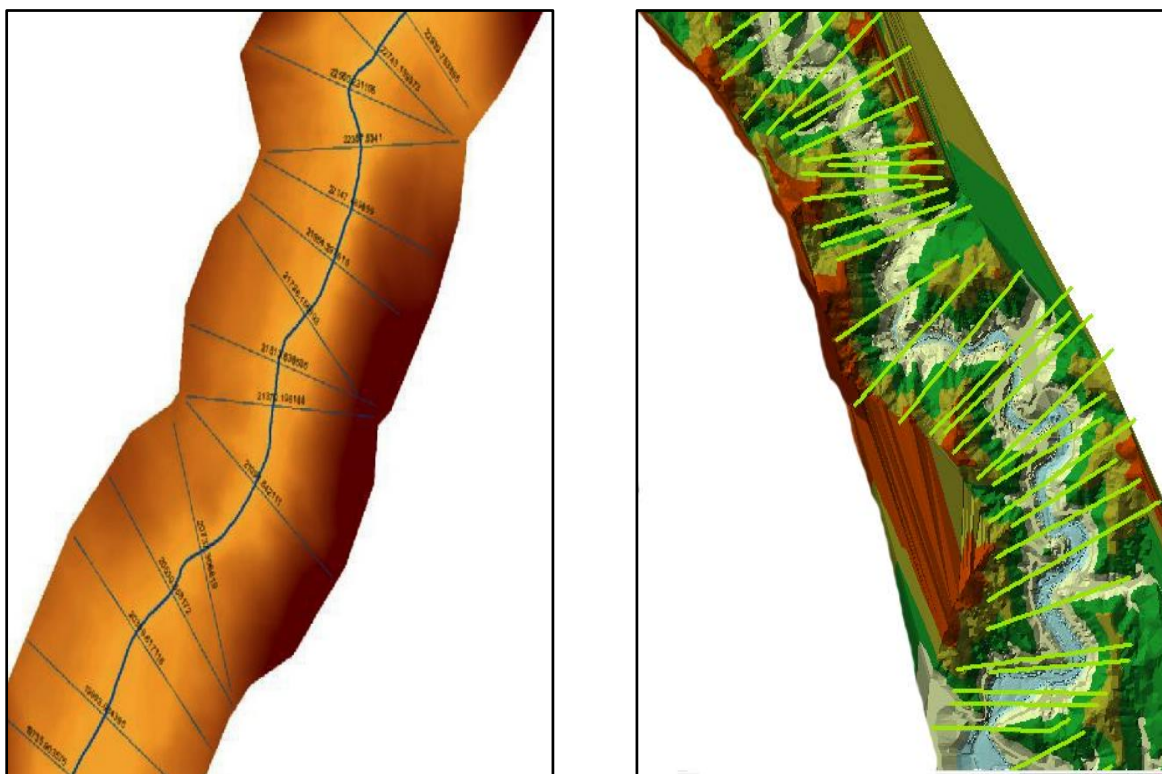
مقاطع عرضی توسط نقاطی بصورت زوج مرتب (X و Z) به مدل معرفی می‌شود که X فاصله افقی از یک نقطه ثابت (معمولاً نقطه‌ای در کرانه چپ) و Z تراز بستر مربوط به یک خط مبنا می‌باشد. در ستون مجاور X و Z ضریب II (مقاومت نسبی) به مدل معرفی می‌شود. مقاطع عرضی رودخانه به صورت مختصات فاصله-عمق داده می‌شود و همچنین کیلومتر از مقطع نسبت به مبدأ نیز بایستی وارد شود.

در این پژوهش تهیه مقاطع عرضی به سه طریق صورت گرفت.

(۱) استفاده از نرم‌افزار اتوکد (۲) استفاده از نقشه TIN ساخته شده (۳) استفاده از DEM منطقه جهت تهیه مقاطع عرضی، اطلاعات توپوگرافی (منحنی‌های تراز و نقاط تراز) مورد استفاده قرار گرفت و پس از تهیه اطلاعات فاصله-تراز مقاطع، این اطلاعات به عنوان بخشی از اطلاعات هندسی وارد مدل‌های ریاضی شد. از نرم‌افزار AutoCad برای استخراج مقاطع عرضی برداشت شده از بازه مورد مطالعه استفاده شد. مقاطع عرضی از روی TIN که در محیط ArcGIS با استفاده از اطلاعات توپوگرافی تهیه شد برداشت شد. مقاطع عرضی از روی نقشه رقومی ارتفاع (DEM) که بر اساس نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ شهرکرد تهیه شده برداشت شد که جانمایی مقاطع عرضی در شکل (۳-۲۴) و (۳-۲۵) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۴: نمونه‌ای از ترسیم مقطع عرضی بازه مورد مطالعه در اتوکد



شکل ۳-۲۵: الف) ترسیم مقاطع عرضی روی TIN ساخته شده ب) نقشه رقومی زمین و جانمایی مقاطع عرضی

### ۳. شرایط مرزی

مدل MIKE11 بدون تعریف دقیق و صحیح شرایط مرزی قادر به شبیه‌سازی درست مسئله نمی‌باشد. مرزهای بیرونی جریان رودخانه، شامل مرزهای بالادست و پایین‌دست است به طوری که به شاخه دیگری متصل نبوده و جریان از آن مقاطع شروع شود و یا به آنها خاتمه یابد.

در مرزهای پایین‌دست ممکن است شرایط مرزی منطبق بر یکی از حالات زیر باشد:

- سطح آب ثابت (ورود جریان به یک توده عظیم آب مثل دریاچه)

- سطح آب با تغییرات پرریودیک (مانند جزر و مد)

- رابطه دبی-اشل در رودخانه‌ها

- مقادیر  $h$  و  $Q$  که با زمان تغییر می‌کند (نظیر خروجی از سدهای تنظیمی)

در مرزهای بالادست نیز ممکن است شرایط مرزی یکی از حالات زیر باشد:

- دبی ثابت از یک مخزن (جریان دائمی)

- دبی متغیر با زمان مربوط به یک واقعه هیدرولوژی نظیر سیلاب (جریان غیردائمی)

نوع شرایط مرزی جریان بستگی به فیزیک مسئله دارد و باید با در نظر گرفتن شرایط رودخانه و اهداف مورد نظر در انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی، با دقت شرایط مرزی انتخاب شود.

بهترین شرایط مرزی جهت معرفی به مدل ریاضی MIKE11، برای بالادست هیدروگراف سیل با دوره‌های بازگشت مختلف و برای پایین‌دست رابطه دبی-اشل یا اشل-زمان می‌باشد.

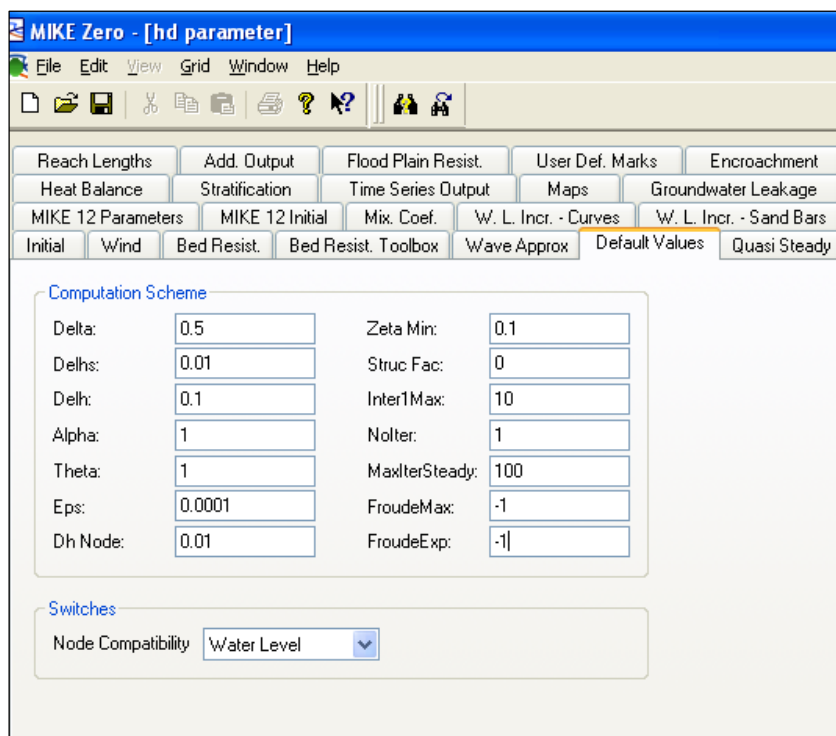
شرایط مرزی در نظر گرفته شده جهت معرفی به مدل ریاضی به شرح زیر می‌باشد:

#### الف: شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست

بنابراین در این مطالعه لازم بود که در دو محل (دو مرز ورودی و خروجی) شرایط مرزی محاسبه شود. در این پژوهش جهت محاسبات هیدرولیکی و محاسبه پروفیل سطح آب، برای شرایط مرزی بالادست هیدروگراف و برای شرط مرزی پایین‌دست، دبی اشل ایستگاه مورز بر روی رودخانه بازفت در نظر گرفته شد.

#### ۴. هیدرودینامیک (HD)

برای تنظیمات تکمیلی اطلاعات شبیه‌سازی از قسمت HD استفاده می‌شود. مطابق شکل (۳-۲۶) این پنجره سربرگ‌های زیادی دارد که پارامترهای این ویرایشگر به اندازه کافی به دقت لازم برای رسیدن به شبیه‌سازی دلخواه را دارند. که برای بدست آوردن شبیه‌سازی دلخواه، به دقت کافی برای محاسبه پارامترهای این ویرایشگر نیاز است.

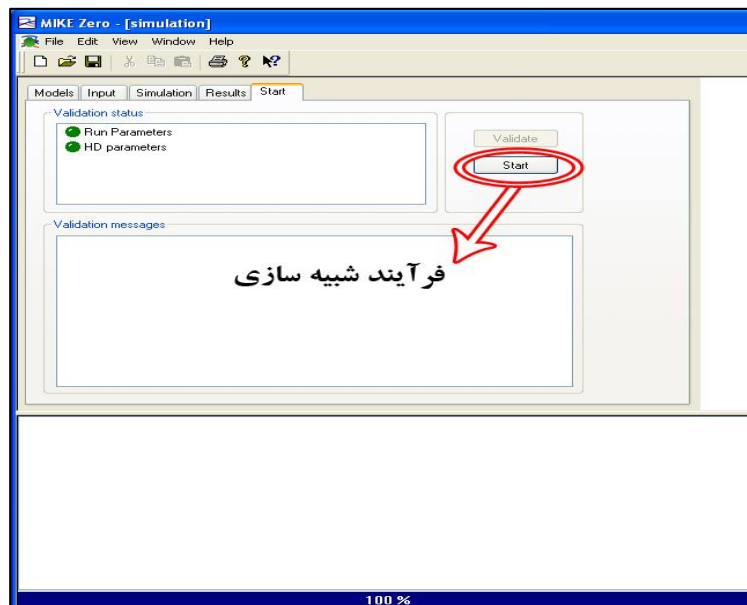


شکل ۳-۲۶: پنجره HD پارامتر

## ۵. شبیه‌سازی

پس از تنظیمات برنامه از جمله تنظیم شرایط اولیه جریان، تنظیم پارامترهای هیدرودینامیک مدل، شرایط مرزی ورودی و خروجی، به اجرای مدل پرداخته می‌شود. برای مشاهده نتایج نهایی پس از اجرای مدل مطابق تصویر (۳-۲۷) که آخرین مرحله از اجرای شبیه‌سازی است می‌توان به استخراج نتایج پرداخت.





شکل ۳-۲۷: کار با نرم‌افزار MIKE11 در اجرای مدل خروجی

### ۳-۴-۸ - کالیبراسیون و صحت نتایج

مهم‌ترین قسمت در استفاده از یک مدل ریاضی کالیبراسیون و اطمینان از صحت نتایج مدل است. به عبارت دیگر به هنگام استفاده از مدل می‌باید به این اطمینان رسید که نتایج خروجی از مدل به واقعیت نزدیک باشد. در مدل‌های بکار گرفته شده MIKE11 و HEC-RAS کالیبراسیون با تغییر مقادیر ضریب مانینگ قابل اعمال است. این ضریب یک پارامتر بسیار مهم است که در محاسبات هیدرولیکی اثر به‌سزایی دارد و به نام‌های ضریب زبری و ضریب اصطکاک نیز معروف است. ضریب مانینگ شرایط طبیعی و کیفی محیط را برای انجام محاسبات هیدرولیکی به مدل ریاضی معرفی می‌کند. در این محاسبات عواملی مانند تغییر جنس مصالح بستر و سواحل رودخانه، پوشش گیاهی کناره، پیچ و خم‌ها و شکل هندسی مقاطع عرضی رودخانه باعث تغییراتی در سرعت و ارتفاع سطح آب می‌گردند. اثر این عوامل فیزیکی در محاسبات هیدرولیک توسط ضریب زبری منظور می‌گردد. هدف از کالیبراسیون، کالیبره نمودن مدل ریاضی به هنگام

سیلاب است. به عبارت دیگر در هر محل می‌توان مقطع رودخانه را به دو قسمت بستر رودخانه‌ها و سیلابگاه‌ها (Flood Plain) تفکیک نمود. ضریب زبری در بستر و سیلابگاه‌ها با یکدیگر متفاوت هستند که یکی از مهم‌ترین دلایل آن رویش گیاهان و درختچه‌ها در سیلابگاه‌ها است. پس در کالیبراسیون باید هیدروگرافی را در نظر گرفت که هنگام وقوع سیل بستر رودخانه و سیلابگاه‌ها را در بر گیرد. از طرفی هیدروگراف در نظر گرفته شده نباید به نحوی باشد که سبب پخش سیلاب در منطقه گردد. چون پخش سیلاب سبب خواهد شد که ایستگاه‌های اندازه‌گیری اعداد نادرست را ثبت نمایند. بنابراین در شرایط کاملاً مشخص با معرفی هیدروگراف (با مشخصات ذکر شده) به‌عنوان شرط مرزی بالادست به مدل ریاضی انتظار می‌رود که نتایج محاسبه شده در صورت کالیبره صحیح به نتایج اندازه‌گیری شده تا حد مطلوب نزدیک باشد. بنابراین از میان ضرایب حدس زده شده عددی انتخاب خواهد شد که نتایج حاصل از محاسبات آن با نتایج اندازه‌گیری شده حداقل تفاوت را داشته باشد.

از دیگر معیارهای آماری که برای واسنجی و تست مدل‌ها در این تحقیق استفاده شده به‌شرح زیر است.

### ۳-۴-۹- معیارهای ارزیابی مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی میزان انطباق (Goodness-of-Fit) نتایج مدل‌های روندیابی سیلاب با هم و همچنین با مقادیر مشاهداتی از چندین معیار آماری استفاده شده است که به‌شرح زیر می‌باشد:

۱. معیار اختلاف بین دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده (DPO):

$$DPO = |Q_{po} - Q_{pc}| \quad (۲-۴)$$

در این رابطه  $Q_{po}$  دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی و  $Q_{pc}$  دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی را نشان می‌دهند. مقدار مطلوب برای معیار اختلاف بین دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده صفر است.

۲. معیار اختلاف بین زمان دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده (DPOT):

$$DPOT = \frac{|T_{Po} - T_{Pc}|}{\Delta t} \quad (3-4)$$

در این رابطه  $T_{Po}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی،  $T_{Pc}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی و  $\Delta t$  گام زمانی را نشان می‌دهند. مقدار مطلوب برای معیار اختلاف بین زمان دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده صفر است.

۳. معیار میزان پایین افتادگی (تعدیل) دبی اوج (۴):

$$\varepsilon(\%) = \left(1 - \frac{Q_{Po}}{Q_{Pi}}\right) \times 100 \quad (4-4)$$

دبی اوج هیدروگراف در پایین دست در حالتی که جریان ورودی دیگری در میانه بازه وجود نداشته باشد کمتر از دبی اوج هیدروگراف در بالادست می‌باشد که این حالت را پایین افتادگی یا فروکش دبی اوج می‌گویند. رابطه فوق درصد فروکش سیل را نشان می‌دهد. در این حالت میزان فروکش سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند که در این رابطه  $Q_{Po}$  دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی یا محاسباتی و  $Q_{Pi}$  دبی اوج هیدروگراف ورودی است.

۴. معیار میزان تأخیر دبی اوج (۵):

می‌توان گفت زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف پایین دست دیرتر از زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف بالادست می‌باشد. رابطه (۴-۵) درصد این تأخیر زمانی را نشان می‌دهد. در این حالت میزان تأخیر سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند.

$$\xi(\%) = \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_{po}}\right) \times 100 \quad (5-4)$$

در این رابطه  $T_{po}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی یا مشاهداتی و  $T_{pi}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند.

### ۵. درصد خطای دبی اوج

برای ارزیابی اوج جریان مربوط به هیدروگراف‌هایی که مدل‌ها ارائه می‌دهند از فاکتور (PEP) درصد خطای دبی اوج استفاده می‌شود که نحوه محاسبه آن عبارت است از:

$$PEP = \left| \frac{Q_{ps} - Q_{po}}{Q_{po}} \right| \times 100 \quad (6-4)$$

که در آن  $Q_{ps}$  عبارت است از دبی اوج هیدروگراف حاصل از اجرای مدل و  $Q_{po}$  دبی اوج در هیدروگراف مشاهده شده می‌باشد.

### ۶. درصد خطای زمان تا اوج

برای ارزیابی زمان به اوج رسیدن هیدروگراف حاصل از اجرای مدل‌ها، فاکتور (TEP) درصد خطای زمان تا اوج پیشنهاد می‌شود و نحوه محاسبه آن به صورت زیر می‌باشد:

$$TEP = \left| \frac{T_{ps} - T_{po}}{T_{po}} \right| \times 100 \quad (7-4)$$

که در آن  $T_{ps}$  و  $T_{po}$  هر یک به ترتیب زمان به اوج رسیدن هیدروگراف حاصل از اجرای مدل و هیدروگراف مشاهده‌ای می‌باشد.

## ۷. پارامتر RMSE

برای بررسی شکل هیدروگراف‌های محاسبه شده از فاکتور RMSE یا ریشه میانگین مربعات خطا استفاده می‌شود. روش محاسبه به شکل زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_c)^2} \quad (۸-۴)$$

در این فرمول  $Q_c$  مقادیر دبی محاسبه شده و  $Q_o$  مقادیر مشاهده‌ای دبی می‌باشد.  $n$  نیز تعداد زوج دبی‌های مشاهده‌ای و محاسبه شده از هر مدل می‌باشد.

## ۸. معیار متوسط درصد خطای نسبی (E):

$$E = \frac{1}{M} \times \sum_{j=1}^M \frac{|O_j - \hat{Q}_j|}{O_j} \times 100 \quad (۹-۴)$$

در رابطه فوق  $O_j$ ،  $\hat{Q}_j$  به ترتیب مقادیر دبی مشاهده شده و محاسباتی در مرحله زمانی  $j$ ام و  $M$  تعداد داده‌ها می‌باشند. مقدار مطلوب برای معیار متوسط درصد خطا صفر است.

## ۹. معیار مجموع مربع باقی‌مانده‌ها (SSQ):

$$SSQ = \sum_{j=1}^M [O_j - \hat{Q}_j]^2 \quad (۱۰-۴)$$

در رابطه فوق  $O_j$ ،  $\hat{Q}_j$  به ترتیب مقادیر دبی مشاهده شده و محاسباتی در مرحله زمانی  $j$ ام و  $M$  تعداد داده‌ها می‌باشند. مقدار مطلوب برای معیار مجموع مربع باقی‌مانده‌ها صفر است.

۱۰. معیار واریانس باقی مانده بین دبی مشاهده شده و روندیابی شده (RV):

$$RV = \frac{\sum_{j=1}^M [q_j - \hat{q}]^2}{(M-1)} \quad (11-4)$$

در رابطه فوق  $0_j$ ،  $\hat{Q}_j$  به ترتیب مقادیر دبی مشاهده شده و محاسباتی در مرحله زمانی  $j$ ام و  $M$  تعداد داده‌ها می‌باشند. مقدار مطلوب برای معیار واریانس باقی مانده‌ها بین دبی مشاهده شده و روندیابی شده صفر است.

۱۱. مقدار ضریب همبستگی ( $R^2$ ):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \hat{q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q}_i)^2} \quad (12-4)$$

در این رابطه  $\hat{Q}_i$  نشان‌دهنده‌ی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل ریاضی در زمان مشخص و  $Q_i$  داده‌های مشاهداتی در رودخانه در همان زمان می‌باشد. هر چه شاخص  $R^2$  به عدد یک نزدیکتر باشد، به این معنی است که عدد مانینگ فرض شده به واقعیت نزدیکتر است.

# فصل چهارم

## نتایج و بحث

#### ۴-۱- مقدمه

هدف اصلی از روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها، پیش‌بینی و تعیین هیدروگراف سیل در نقطه یا نقاط پایین- دست رودخانه مورد نظر می‌باشد تا به‌وسیله آن بتوان زمان وقوع سیلاب و همچنین تغییرات خصوصیات جریان شامل مقدار دبی و ارتفاع آب را در هر فاصله از محل بالادست بدست آورد.

مدل‌سازی جریان رودخانه در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب دارای اهمیت ویژه‌ای است که امروزه کاربرد نرم‌افزارهای کامپیوتری به‌منظور شبیه‌سازی جریان غیردائمی متداول می‌باشد. از این میان برای انجام این تحقیق نرم‌افزار HEC-RAS و نرم‌افزار MIKE11 انتخاب گردید. بازه بین دو ایستگاه هیدرومتری شهید- خدروی و مورز از رودخانه بازفت که دارای شرایط سیلابی است، به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و جریان سیلاب اسفندماه سال ۱۳۹۳ در این بازه، در دو نرم‌افزار با شرایطی مشابه مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا به نتایج حاصل از شیوه انتخاب دوره بازگشت طراحی برای محاسبه دبی پرداخته می‌شود.

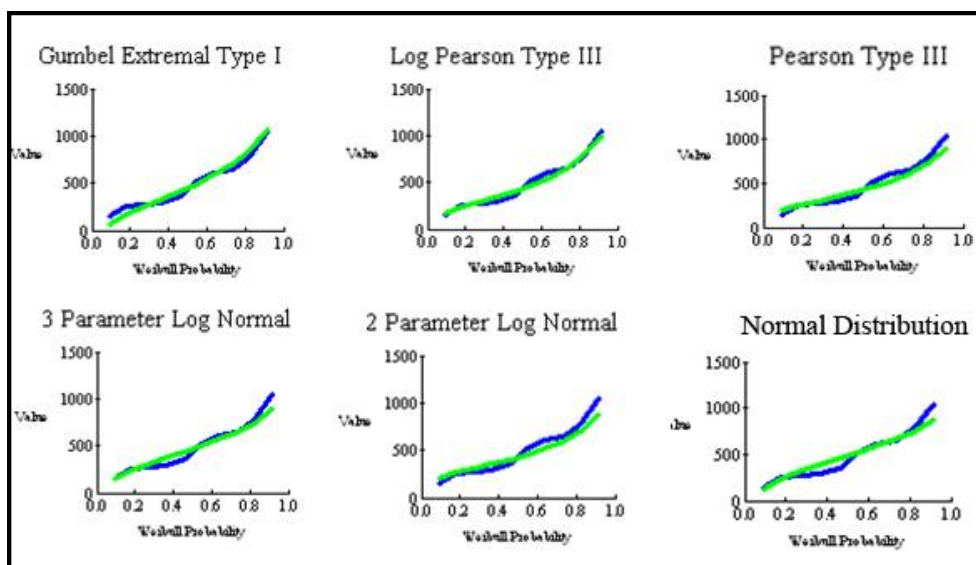
#### ۴-۲- برازش توزیع احتمال

به‌منظور برازش بهترین توزیع احتمال داده‌های دبی ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه از نرم‌افزارهای Smada و Easyfit استفاده شده است. در روش گرافیکی (نرم‌افزار Smada) خط توزیع تجربی (رابطه ویبول) با خط توزیع تئوری (بر اساس توزیع مورد نظر) مقایسه می‌شود و هر توزیعی که بیشترین انطباق دو خط را نشان دهد به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع فراوانی انتخاب می‌گردد. در این روش پس از وارد کردن داده‌های دبی به نرم‌افزار، بهترین توزیع آماری مشخص شد. برای دستیابی به بهترین برازش، داده‌های مربوط به ایستگاه‌ها در طی سال‌های آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ به نرم‌افزار وارد شدند و بهترین توزیع‌ها مشخص گردید. شکل (۴-۱) برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه شهید خدروی در نرم‌افزار Smada و شکل (۴-۲) برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه این ایستگاه را در نرم‌افزار Easyfit و شکل (۴-۳) برازش توزیع آماری دبی

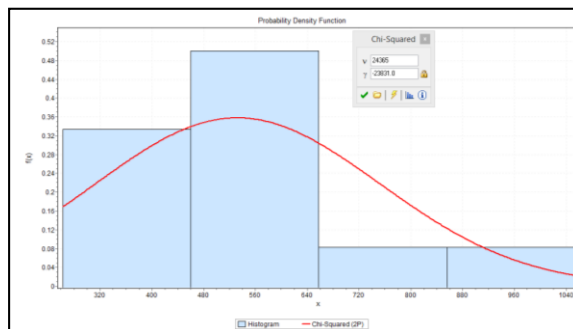


حداکثر سالانه ایستگاه مورز در نرم افزار Smada و شکل (۴-۴) برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه این ایستگاه را در نرم افزار Easyfit نشان می دهد.

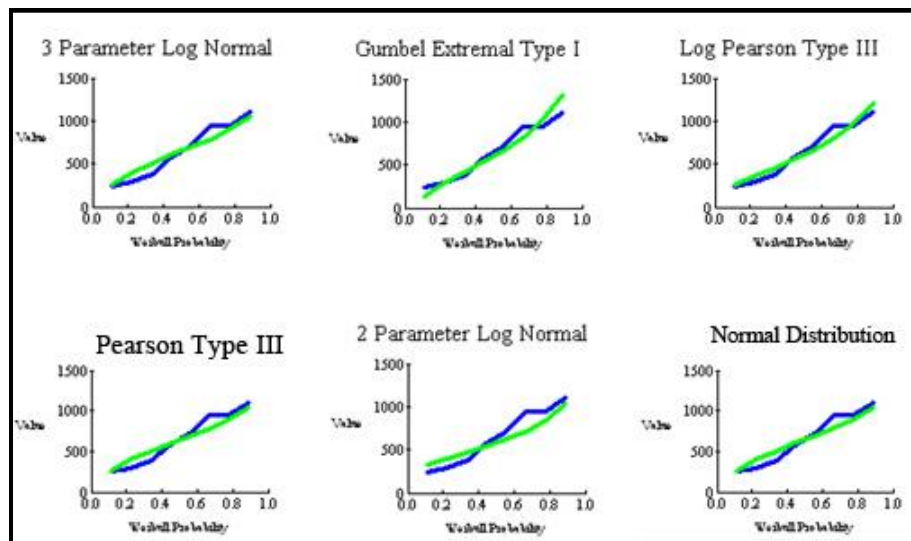
بر اساس تحلیل های بدست آمده در نرم افزار Smada، بهترین توزیع ها در هر دو ایستگاه هیدرومتری توزیع لوگ پیرسون تپ سه و بهترین برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه در نرم افزار Easyfit توزیع Chi-Squared در ایستگاه شهید خدردی و توزیع Johnson SB Distribution در ایستگاه مورز می باشند.



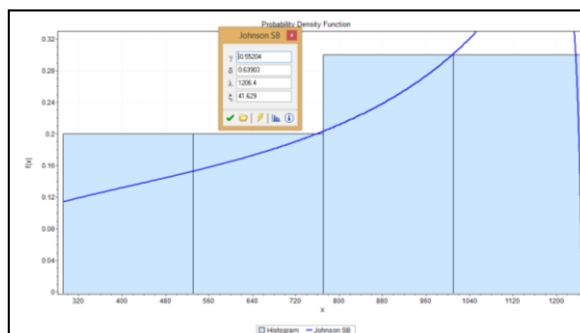
شکل ۴-۱: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه هیدرومتری شهید خدردی در نرم افزار Smada



شکل ۴-۲: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه هیدرومتری شهید خدردی در نرم افزار Easyfit



شکل ۴-۳: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه هیدرومتری مورز در نرم افزار Smada



شکل ۴-۴: برازش توزیع آماری دبی حداکثر سالانه ایستگاه هیدرومتری مورز در نرم افزار Easyfit

از آن جایی که Smada نرم‌افزاری گرافیکی بوده و امکان خطای دید را برای کاربر به وجود می‌آورد، جهت کنترل این خطا از نرم‌افزار Easyfit استفاده گردید. استفاده از دو نرم‌افزار Easyfit و Smada معایب و مزایای خود را دارند. از معایب نرم‌افزار Smada می‌توان به تشخیص بهترین برازش با چشم و از مزایای آن به مرسوم‌تر بودن توزیع‌های آماری در هیدرولوژی و کاهش خطا در پیش‌بینی دبی سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف اشاره نمود. تنوع زیاد توزیع‌های آماری و مرسوم نبودن آن‌ها در هیدرولوژی از معایب نرم‌افزار Easyfit و عدم وجود خطای چشم در تشخیص بهترین برازش از مزایای این نرم‌افزار به حساب می‌آیند.

پس از محاسبه و تعیین دبی با دوره‌های بازگشت مختلف، از دو دوره بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله برای شبیه‌سازی و پهنه‌بندی سیل استفاده گردید.

نتایج تحلیل‌های آماری برای تعیین دوره‌های بازگشت مختلف در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول ۴-۱: دبی با دوره‌های بازگشت مختلف برآورد شده در بازه مورد مطالعه

دوره بازگشت (سال)	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰
دبی (m <sup>3</sup> /s)	۸۱۷,۵۹	۹۷۹,۵	۱۰۰۱,۹	۱۱۲۵,۶	۱۲۲۷,۹	۱۲۳۴,۸	۱۲۴۹,۴

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، در این مطالعه تعداد ۱۱۰ مقطع عرضی برداشت شده که مختصات جغرافیایی کلیه مقاطع همراه با خصوصیات لازم به‌منظور معرفی مسیر آبراهه به مدل‌ها وارد گردید. سپس شرایط مرزی برای نقاط ابتدا و انتهای بازه مورد مطالعه به‌منظور اجرای مدل‌ها در قسمت هیدرولیک معرفی گردید که از مهم‌ترین قسمت‌های مسئله انتخاب و معرفی نوع جریان آب در رودخانه و تحلیل بر اساس آن می‌باشد. شرایط مرزی بالادست شامل معرفی هیدروگراف سیلاب مورد نظر و شرط مرزی پایین‌دست نیز معرفی منحنی دبی اشل با توجه به سیلاب عبوری بوده است. همچنین اطلاعاتی از قبیل نوع تحلیل جریان، نوع روش حل معادلات تحلیل جریان غیردائمی و زبری مقاطع به مدل‌ها معرفی گردید. یکی از پارامترهای اساسی که در این بخش باید به مدل معرفی گردد ضریب زبری می‌باشد که تغییرات زبری جریان در هر مقطع به‌صورت ثابت و یکنواخت وارد گردید.

#### ۴-۳- نتایج مربوط به واسنجی

اعتماد به نتایج هر برنامه کامپیوتری مستلزم کالیبره کردن و مشخص نمودن صحت نتایج آن می‌باشد. آزمایش و کالیبراسیون، گام‌های مهمی است که برای استفاده مؤثرتر از یک مدل باید انجام شود. به دلیل

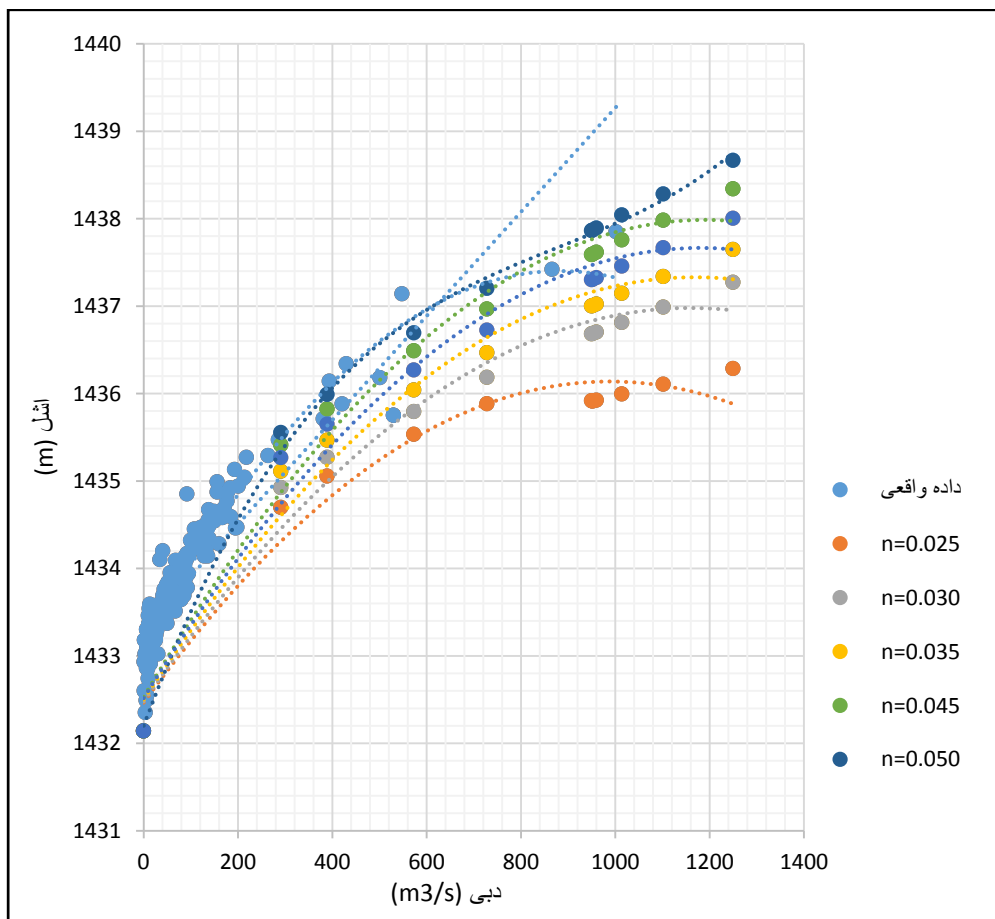
تفاوت در حساسیت نتایج شبیه‌سازی به هر رابطه یا ضریب تجربی، باید به پارامترهایی که نتایج حساسی تولید می‌کنند توجه بیشتری شود. موارد اصلی که نیازمند کالیبراسیون هستند را می‌توان در دو گروه طبقه‌بندی نمود:

- پارامترهای مؤثر در هیدرودینامیک مدل، مانند ضریب زبری
- پارامترهای مؤثر در انتقال رسوبات مدل اعم از ضریب پخشیدگی، ضریب فرسایش‌پذیری، تنش برشی بحرانی، معادلات انتقال رسوب

که در این قسمت مورد اول بررسی شده است.

#### ۴-۳-۱- تعیین ضریب مانینگ

جهت روندیابی سیلاب توسط مدل‌های کامپیوتری باید ضریب مانینگ تخمین زده و کالیبره شود. در این تحقیق با توجه به منحنی دبی اشل در ایستگاه مورز و آزمون سعی و خطا، عدد مانینگ که مدل‌ها بیشترین حساسیت را نسبت به آن دارند بدست آمد که در شکل (۴-۵) نشان داده شده، به این‌گونه که عددهای مانینگ مختلف فرض شده، سپس ضریب زبری رودخانه که تمامی مقاومت‌های در مقابل جریان را در خود مستتر دارد به میزان  $0/05$  به دست آمد.

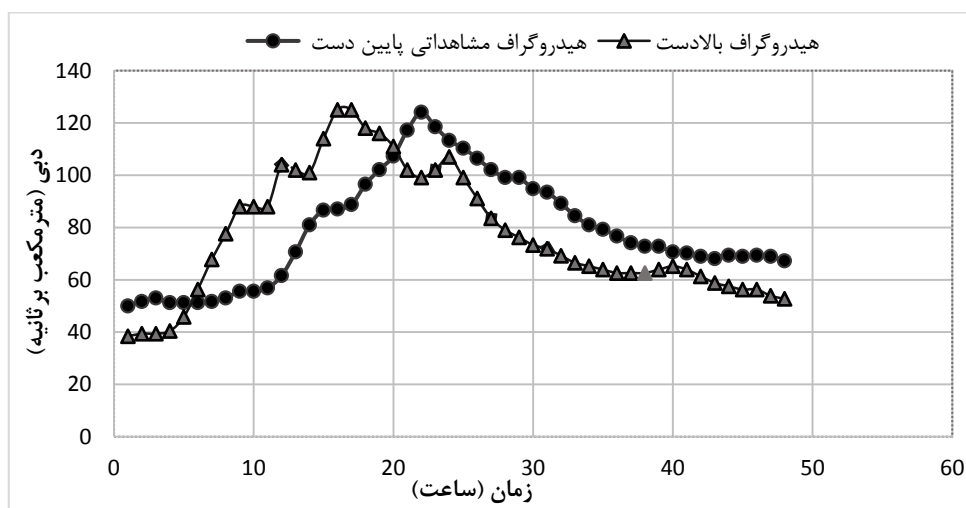


شکل ۴-۵: کالیبراسیون ضریب مانینگ با منحنی دبی اشل

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به محدودیت اطلاعات در رابطه با ضریب زبری مقاطع از یک ضریب زبری ثابت در تمام مسیر استفاده گردید. جهت کالیبره کردن مدل‌ها لازم بود که داده‌های مشاهده‌ای سیلاب در ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست در اختیار باشد. روش کار بدین شکل است که ابتدا مدل‌ها با ضرایب زبری مختلف اجرا می‌شوند، نتایج بدست آمده در هر مورد با آمار مشاهداتی مقایسه می‌شود. هر کدام از نتایج که تطابق بیشتری با آمار واقعی داشته باشد، ضریب زبری مربوط به آن، مناسب‌ترین ضریب برای تحلیل و شبیه‌سازی جریان می‌باشد. برای رسیدن به این عدد مانینگ، ضرایب زبری مختلفی جهت کالیبره کردن مدل‌ها بکار گرفته شد. مناسب‌ترین مقدار ضریب زبری به میزان  $0.05$  بدست آمد.

#### ۴-۴- هیدروگراف سیلاب مشاهداتی برای اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی

در این پژوهش برای انجام مقایسه دقت مدل‌های MIKE11، HEC-RAS و ماسکینگام در برآورد سیلاب از آمار و اطلاعات سیلاب اسفندماه ۹۳ (در تاریخ ۹۳/۱۲/۰۱ و ۹۳/۱۲/۰۲) که در ایستگاه هیدرومتری بازه اندازه‌گیری شده، استفاده گردیده است. شکل (۴-۶) هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و برآورد شده را نشان می‌دهد.



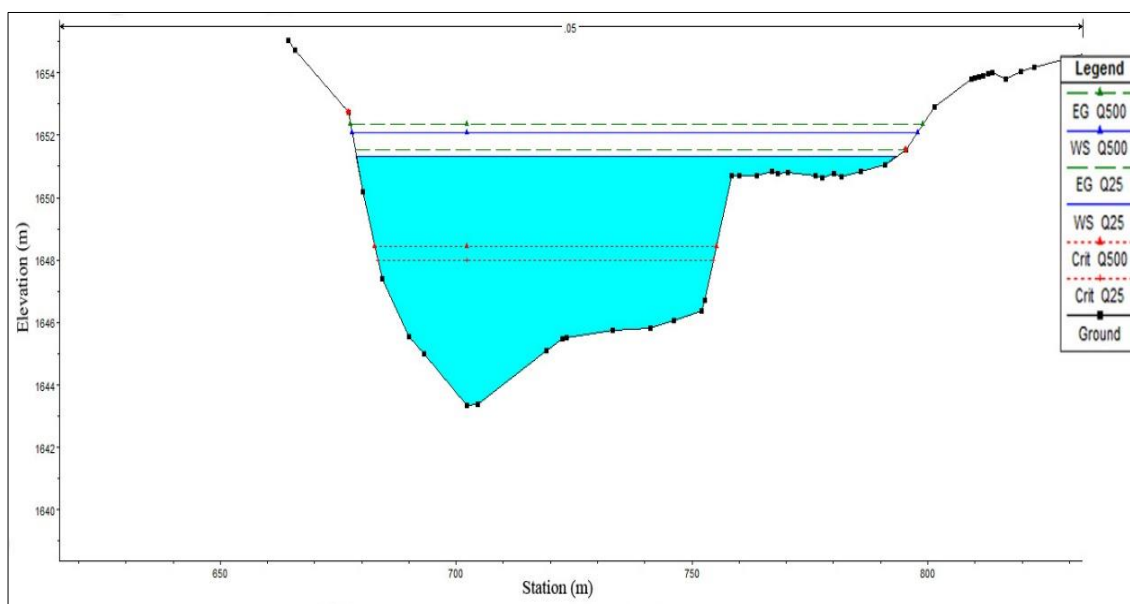
شکل ۴-۶: هیدروگراف‌های ورودی و خروجی مشاهده شده

#### ۴-۵- نتایج اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی

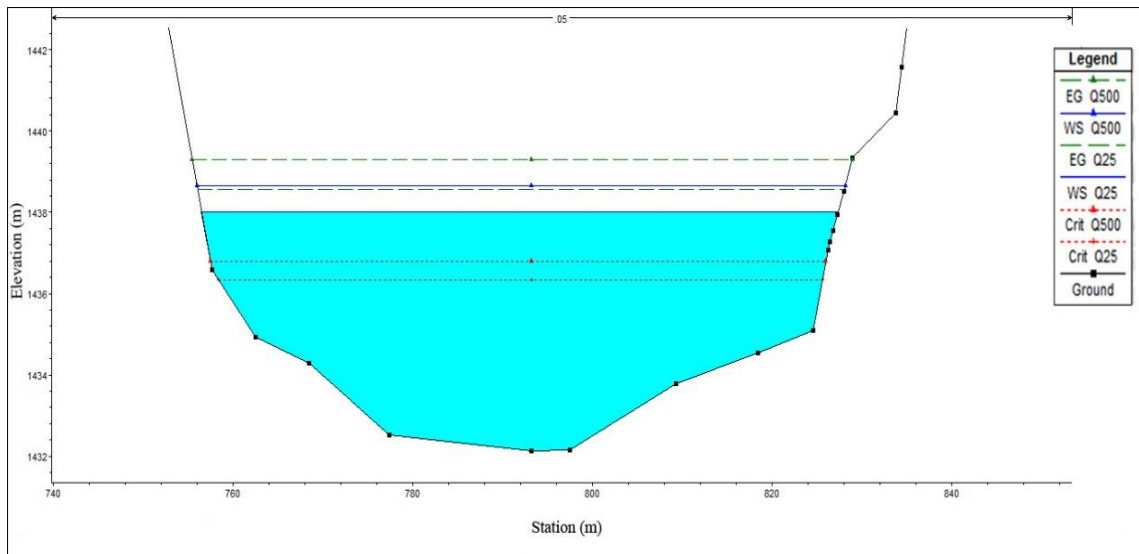
نتایج دربرگیرنده‌ی یک الگوی مدل هیدرولوژیکی و دو الگوی مدل هیدرولیکی می‌باشد که شامل روش‌های ماسکینگام با برآورد پارامترها بر اساس روش ترسیم، مدل موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS و مدل موج دینامیکی نرم‌افزار MIKE11 می‌باشد.

## الف) مدل موج دینامیکی نرم افزار HEC-RAS

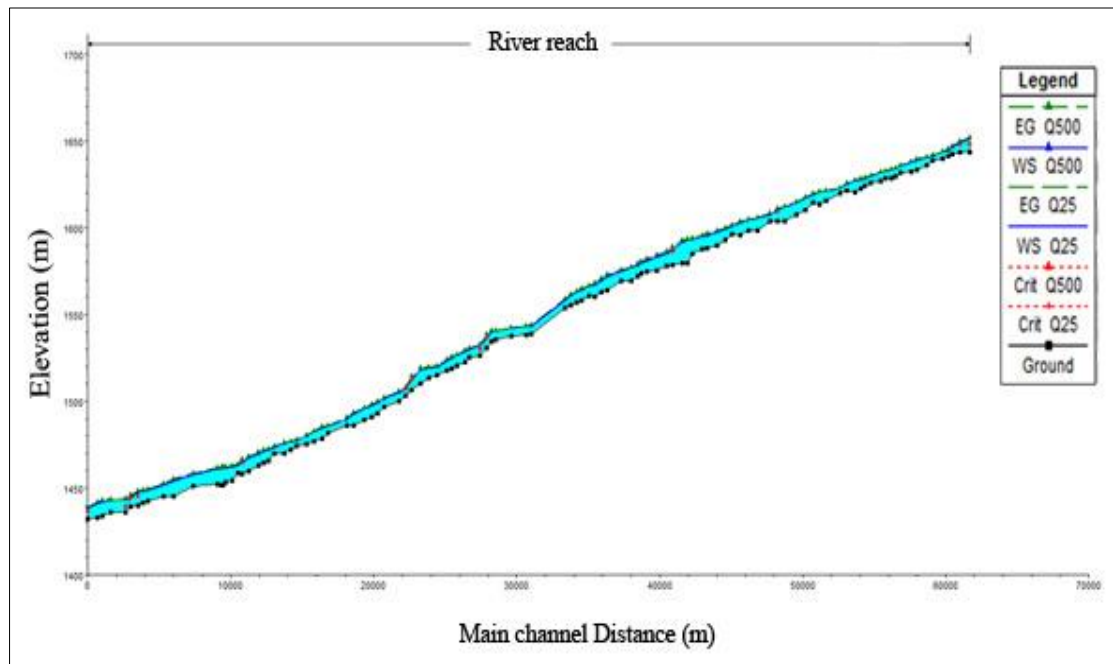
در این پژوهش پس از تهیه‌ی مدل هندسی و همچنین معرفی کلیه‌ی پارامترهای مورد نیاز در مدل، شرایط هیدرولیکی رودخانه بازفت در بازه‌ی مورد نظر برای سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS شبیه‌سازی شد. در شکل‌های زیر برخی از نتایج اخذ شده از مدل‌سازی با HEC-RAS نشان داده شده است. شکل (۷-۴) نمایی از مقطع عرضی ابتدای بازه و شکل (۸-۴) نمایی از مقطع عرضی انتهایی بازه به همراه تراز آب رودخانه به ازای دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله را در نرم‌افزار HEC-RAS نشان می‌دهد. شکل (۹-۴) و (۱۰-۴) نیز تراز سطح آب را در طول افقی رودخانه در دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰۰ ساله نشان می‌دهد.



شکل ۷-۴: ارتفاع سطح سیل‌گیر در دوره‌های بازگشت مختلف در مقطع اول بازه مورد مطالعه

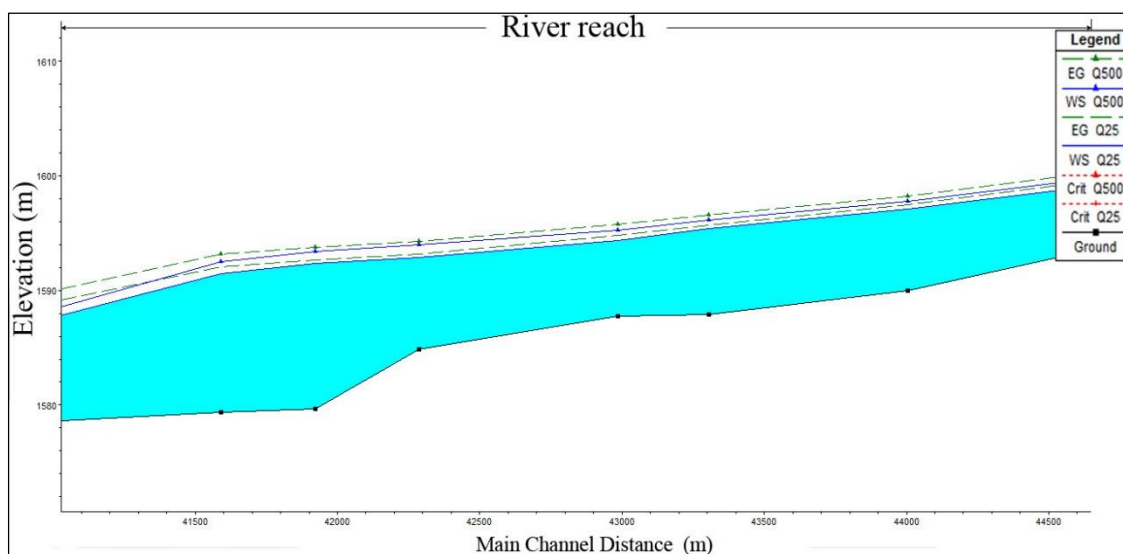


شکل ۴-۸: ارتفاع سطح سیل گیر در دوره‌های بازگشت مختلف در مقطع آخر بازه مورد مطالعه



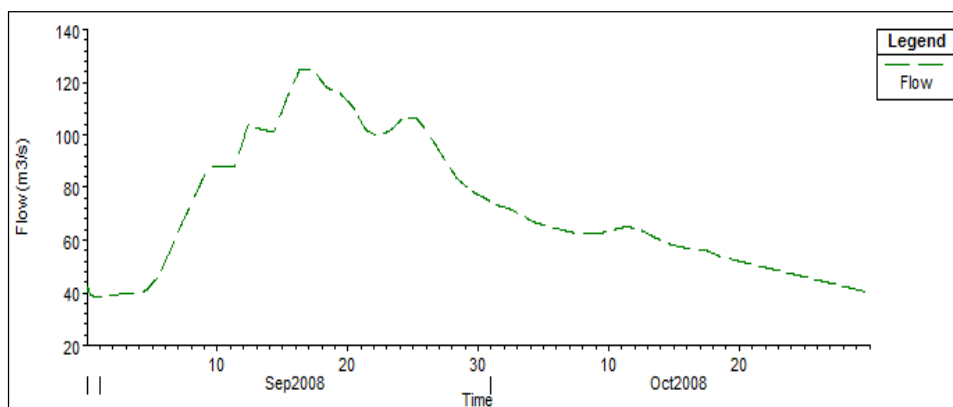
شکل ۴-۹: پروفیل طولی رودخانه همراه ارتفاع سطح آب در دوره‌های بازگشت مختلف



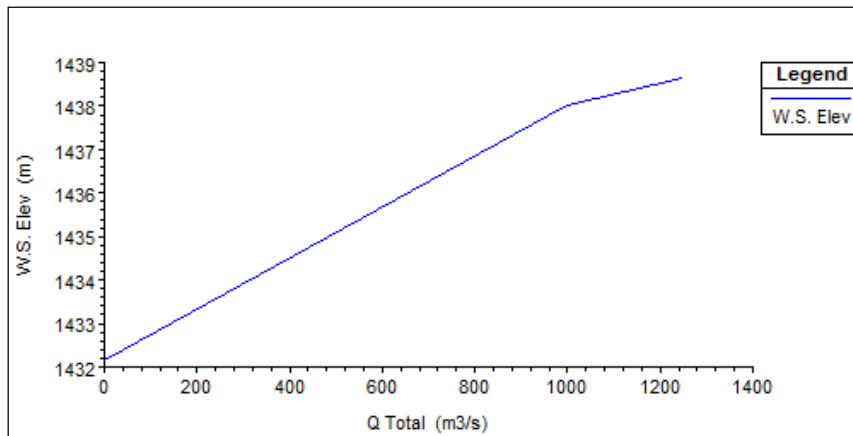


شکل ۴-۱۰: نمایی نزدیک تر از تراز سطح آب

نیمرخ‌های طولی و عرضی تراز سطح آب مهم‌ترین خروجی‌های مدل HEC-RAS و نشان‌دهنده‌ی تغییرات سطح آب برای سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف‌اند. از این اطلاعات می‌توان برای ساماندهی حد حریم و بستر رودخانه، تعیین میزان و وسعت آب‌گرفتگی استفاده نمود. پس از شبیه‌سازی جریان در این نرم‌افزار در ایستگاه پایین‌دست بازه، هیدروگراف دبی خروجی و منحنی دبی-اشل محاسباتی به دست آمدند. شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نشان‌دهنده مقادیر محاسباتی است. شکل سه‌بعدی (Z,Y, X) جریان نیز در شکل (۴-۱۳) نمایش داده شده است.

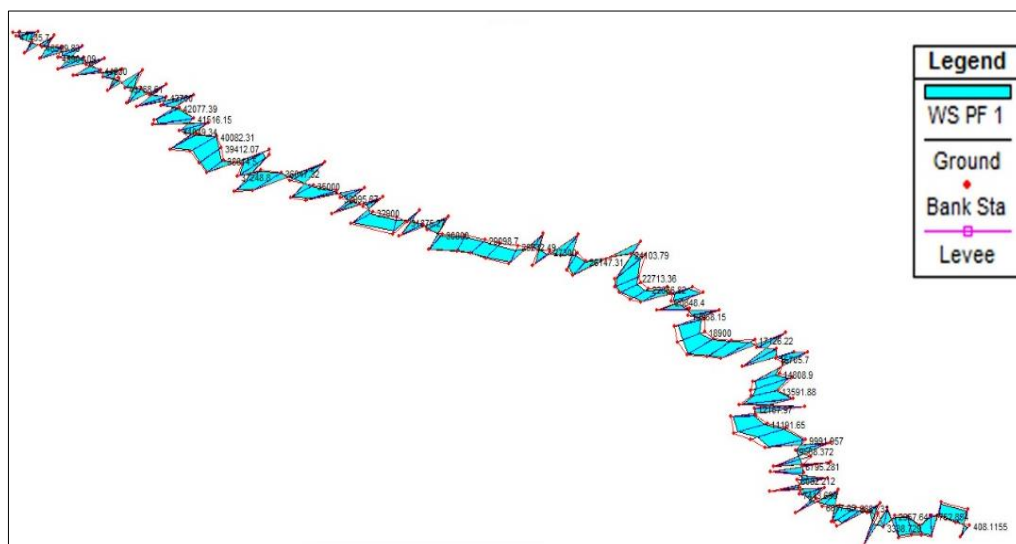


شکل ۴-۱۱: مشاهده هیدروگراف دبی در تحلیل جریان غیرماندگار



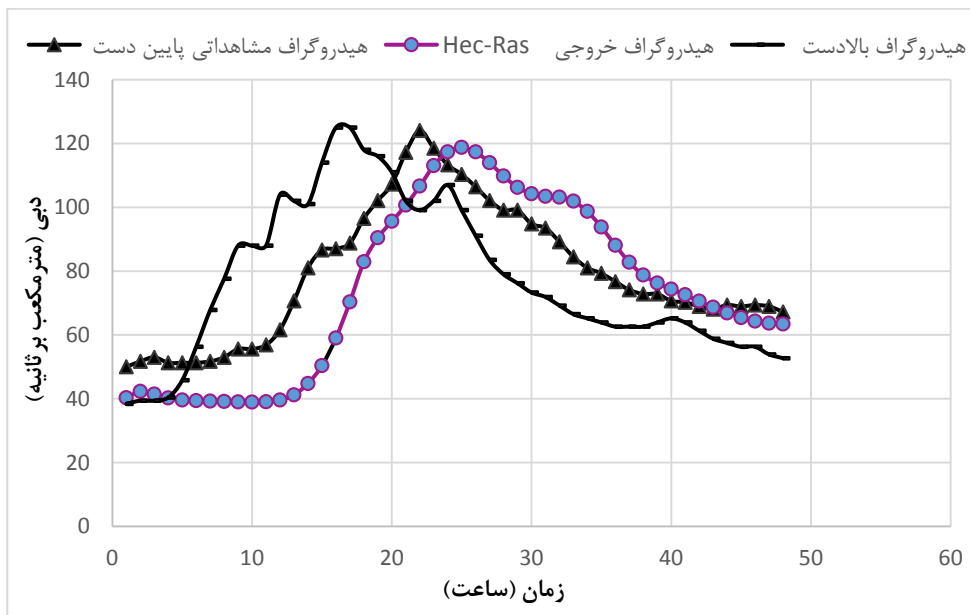
شکل ۴-۱۲: منحنی دبی- اشل مقطع آخر در نرم افزار HEC-RAS

با وجود ایستگاه اندازه گیری در پایین دست و با توجه به سیلاب عبوری، منحنی دبی اشل توسط نرم افزار HEC-RAS محاسبه گردید. رابطه دبی- اشل در رودخانه یک پدیده بسیار پیچیده در علم هیدرولوژی است که شناخت آن از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل سازی این فرآیند می تواند ضریب اطمینان بالایی در طراحی سازه های هیدرولیکی، ساماندهی رودخانه و برنامه ریزی برای سیستم های هشدار سیل را ممکن نماید.



شکل ۴-۱۳: شکل سه بعدی (3D) رودخانه بازفت در نرم افزار HEC-RAS

در شکل (۴-۱۴) هیدروگراف روندیابی شده سیلاب توسط مدل HEC-RAS همراه با مقدار مشاهده‌ای در مقطع خروجی آورده شده است.



شکل ۴-۱۴: هیدروگراف روندیابی شده به روش مدل HEC-RAS در مقایسه با هیدروگراف مشاهده‌ای پایین دست

تحلیل نتایج روش عددی موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS مطابق شکل (۴-۱۴) نشان می‌دهد که در زمان قبل از وقوع سیل مقدار دبی پایه در رودخانه بازفت  $38/4$  مترمکعب بر ثانیه بوده است. پس از  $16/5$  ساعت از وقوع سیل دبی با مقدار  $125$  مترمکعب بر ثانیه در بالادست به حداکثر مقدار خود می‌رسد. نتایج مشاهده‌ای در پایین دست نشان می‌دهد که دبی اوج سیلاب در پایین دست پس از  $22$  ساعت به وقوع می‌پیوندد و مقدار آن  $124/104$  مترمکعب بر ثانیه بوده است؛ یعنی دبی اوج سیلاب در بالادست با تأخیر زمانی معادل  $5/5$  ساعت به پایین دست رسیده است و مقدار دبی اوج در پایین دست با استهلاک (تعدیل) معادل  $0/896$  مترمکعب بر ثانیه همراه بوده است. این در حالی است که روش عددی موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS دبی حداکثر در پایین دست را  $118/77$  پیش‌بینی نموده است. یعنی میزان دبی اوج

پایین دست را با استهلاک کمتری پیش‌بینی نموده و میزان استهلاک را ۵/۳۳۴ مترمکعب بر ثانیه تخمین زده است. همچنین این روش میزان تأخیر را نیز معادل ۳ ساعت و در زمان ۲۵ ساعت پس از وقوع سیلاب پیش‌بینی نموده است. در نتیجه می‌توان گفت روش عددی موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS میزان تعدیل و تأخیر سیل را کمتر از واقعیت پیش‌بینی نموده است.

### ب) مدل عددی موج دینامیکی نرم‌افزار MIKE11

به‌منظور مدل کردن جریان مطالعه موردی در نرم‌افزار MIKE11 و مقایسه نتایج با نرم‌افزار HEC-RAS لازم است تا شبیه‌سازی در شرایط کاملاً یکسان انجام شود. در این قسمت به بررسی نتایج شبیه‌سازی مطالعه موردی در این نرم‌افزار پرداخته می‌شود.

با استفاده از مدل کامپیوتری MIKE11 و با اعمال شرایط مرزی در بالادست و پایین‌دست، محاسبات پروفیل سطح آب رودخانه بازفت برای سیلاب مشاهداتی به وقوع پیوسته در این بازه انجام گردید که شامل نتایج زیر است:

- مشاهده پروفیل سطح آب در طول مسیر و پروفیل طولی رودخانه

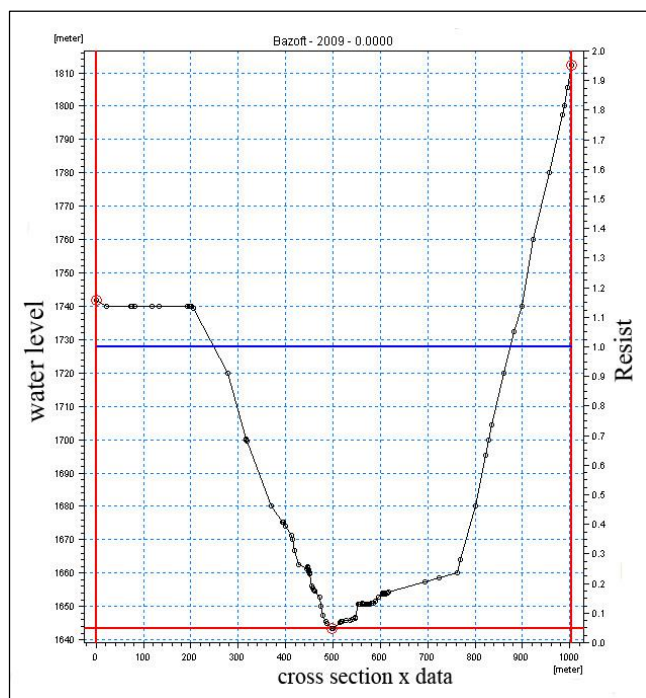
- تغییرات تراز آب در حین عبور سیلاب از بازه مطالعاتی

- شکل شماتیک از نحوه پخش سیلاب در محدوده مطالعاتی رودخانه بازفت

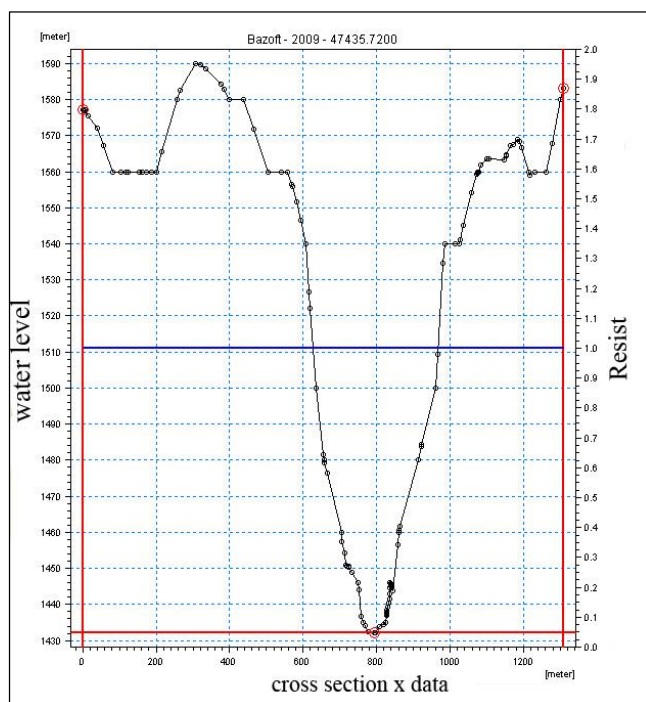
اطلاعات مقاطع نیز مانند نرم‌افزار HEC-RAS در بخش ویرایش مقاطع عرضی وارد می‌شود؛ که شکل (۴-۴)-

(۱۵) و (۴-۱۶) مقاطع مدل‌سازی شده نرم‌افزار MIKE11 در محل شرایط مرزی ورودی و خروجی را نشان

می‌دهد.

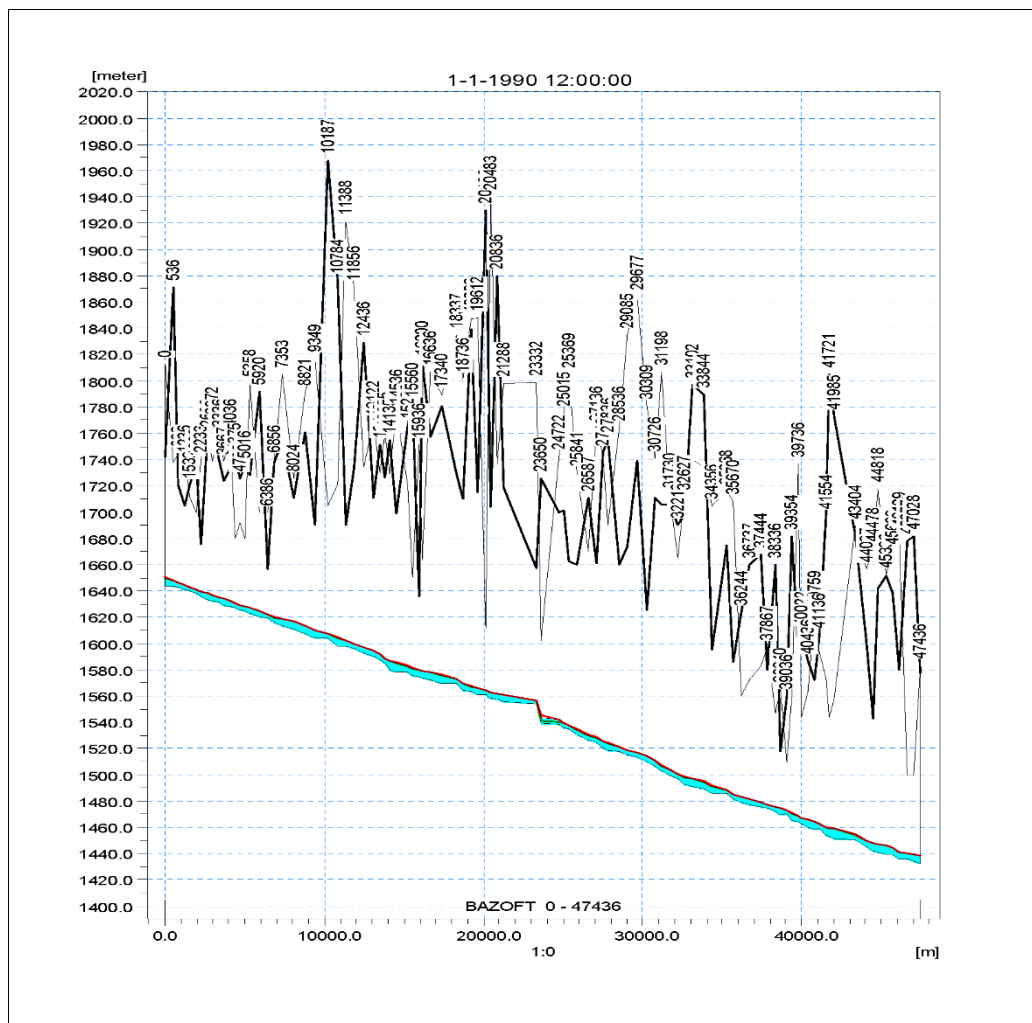


شکل ۴-۱۵: مقطع بالادست رودخانه بازفت در محل ایستگاه شهید خدیری مدل شده در نرم افزار MIKE11

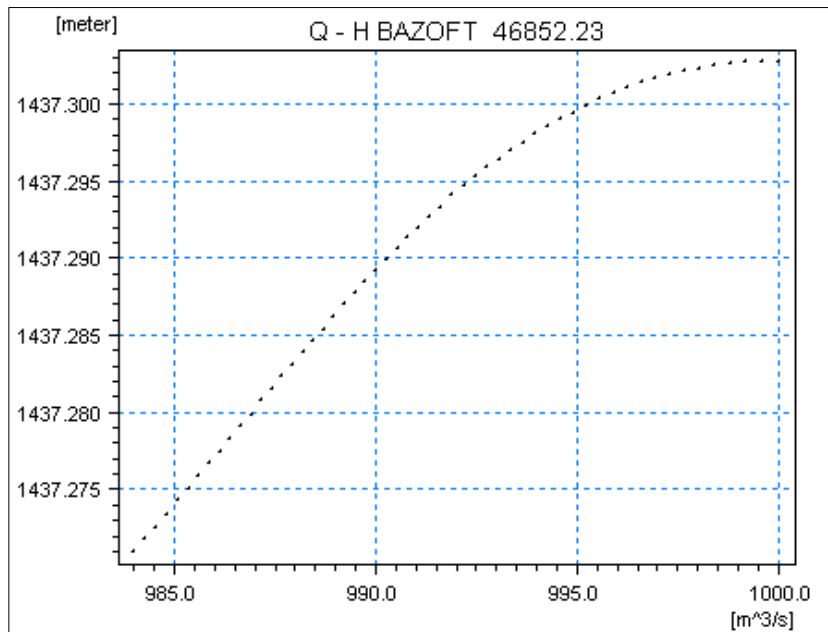


شکل ۴-۱۶: مقطع پایین دست رودخانه بازفت در محل ایستگاه مورز مدل شده در نرم افزار MIKE11

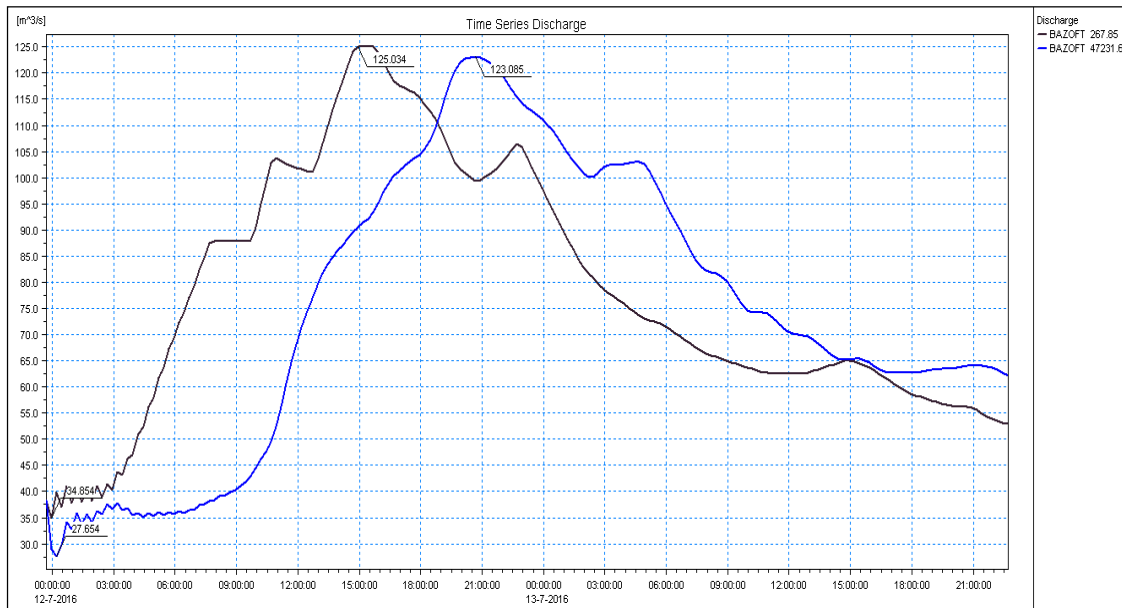
نتایج خصوصیات جریان سیل شامل هیدروگراف‌های سیلاب ورودی و روندیابی شده، منحنی دبی اشل، مقدار پروفیل طولی جریان قبل و در حین وقوع سیلاب در رودخانه که توسط نرم‌افزار MIKE11 استخراج شده، در شکل‌های (۴-۱۷) تا (۴-۲۳) آورده شده است.



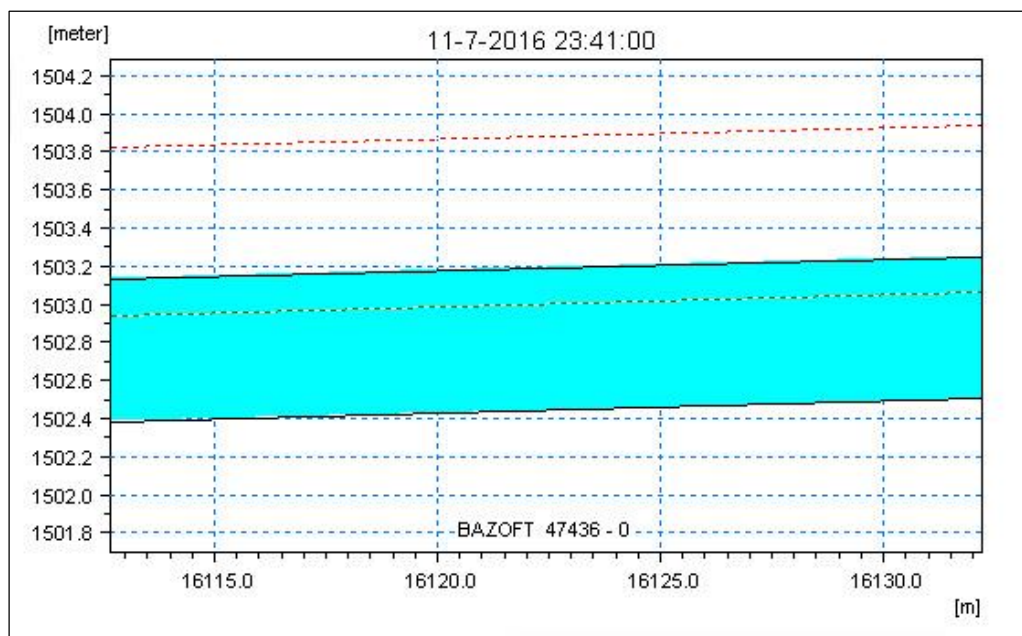
شکل ۴-۱۷: پروفیل سطح آب بین ایستگاه شهیدخدری تا ایستگاه مورز مدل شده در برنامه MIKE11



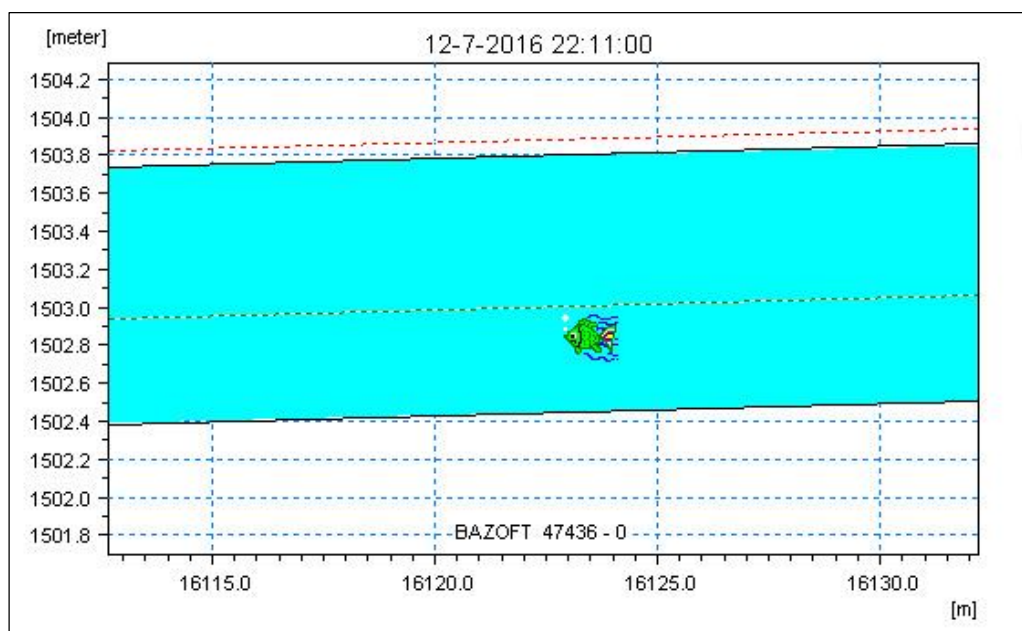
شکل ۴-۱۸: منحنی دبی - اشل در مقطع آخر بازه مورد مطالعه



شکل ۴-۱۹: هیدروگرافهای بالادست و روندیابی شده توسط مدل موج دینامیکی نرم افزار MIKE11

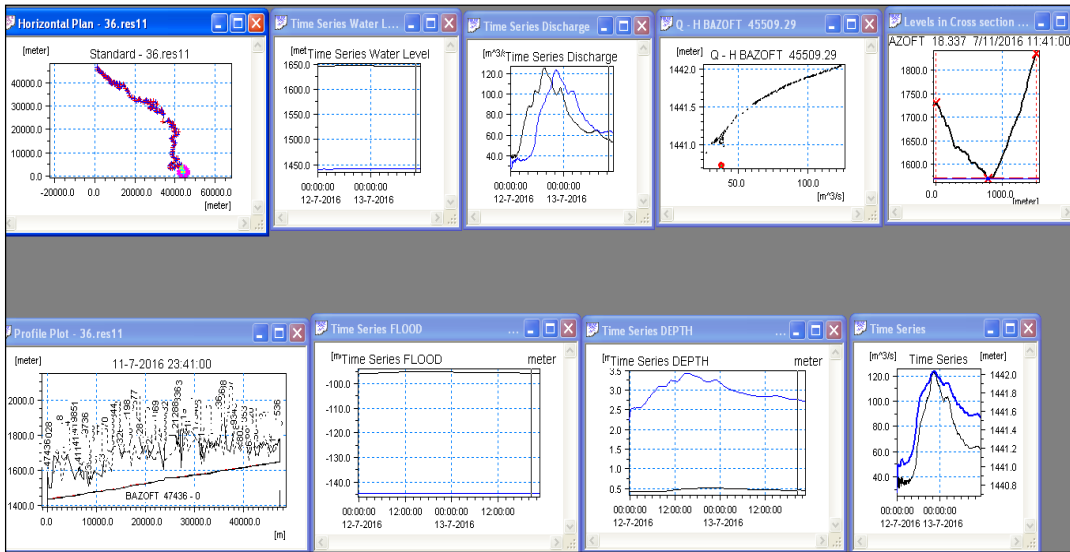


شکل ۴-۲۰: تراز سطح آب قبل از وقوع سیل در بازه مطالعاتی رودخانه



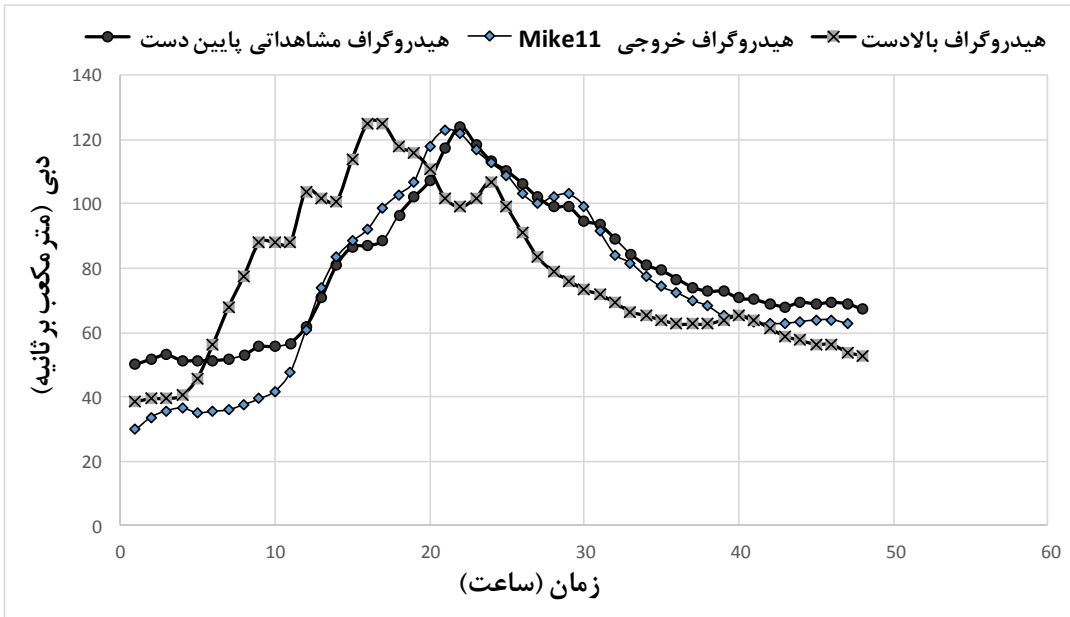
شکل ۴-۲۱: حداکثر تراز سطح آب در حین عبور سیلاب در بازه مطالعاتی رودخانه





شکل ۴-۲۲: مشاهده همزمان خصوصیات جریان سیل توسط انیمیشن پخش مدل MIKE11

در شکل (۴-۲۳) هیدروگراف روندیابی شده توسط مدل MIKE11 همراه با مقدار مشاهده‌ای در مقطع خروجی برای سیلاب آورده شده است.



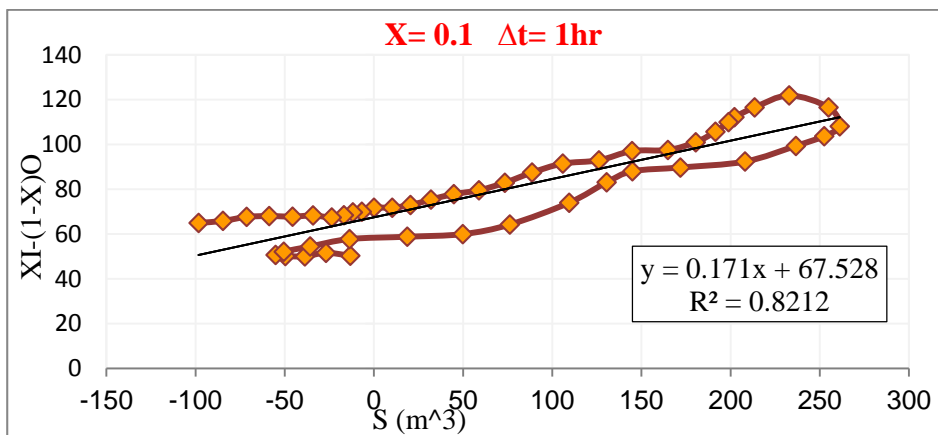
شکل ۴-۲۳: هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی MIKE11 در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی

تحلیل نتایج روش عددی موج دینامیکی نرم افزار MIKE11 مطابق شکل (۴-۲۳) نشان می دهد که در زمان قبل از وقوع سیل مقدار دبی پایه در رودخانه بازفت ۳۸/۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است. پس از ۱۶/۵ ساعت از وقوع سیل دبی با مقدار ۱۲۵ مترمکعب بر ثانیه در بالادست به حداکثر مقدار خود می رسد. نتایج مشاهداتی در پایین دست نشان می دهد که دبی اوج سیلاب در پایین دست پس از ۲۲ ساعت به وقوع می پیوندد و مقدار آن ۱۲۴/۱۰۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است؛ یعنی دبی اوج سیلاب در بالادست با تأخیر زمانی معادل ۵/۵ ساعت به پایین دست رسیده است و مقدار دبی اوج در پایین دست با استهلاک (تعدیل) معادل ۰/۸۹۶ مترمکعب بر ثانیه همراه بوده است. این در حالی است که روش عددی موج دینامیکی نرم افزار MIKE11 دبی حداکثر در پایین دست را ۱۲۳/۰۳۹ پیش بینی نموده است. یعنی میزان دبی اوج پایین دست را با دقت بالایی پیش بینی نموده و میزان استهلاک را ۱/۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه تخمین زده است. همچنین این روش میزان تأخیر را نیز معادل ۱ ساعت و در زمان ۲۱ ساعت پس از وقوع سیلاب با دقتی مطابق با نتایج واقعی پیش بینی نموده است. در نتیجه می توان گفت روش عددی موج دینامیکی نرم افزار MIKE11 میزان تعدیل و تأخیر سیل را به نحو بسیار مطلوبی نزدیک به واقعیت پیش بینی نموده است.

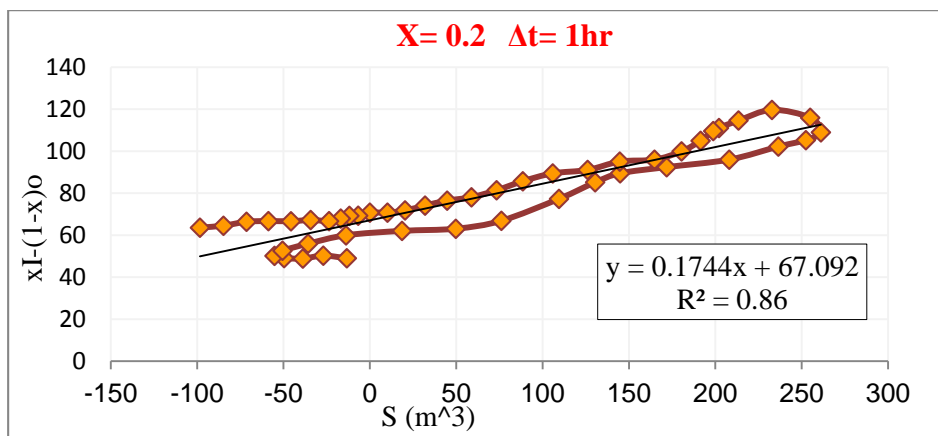
### ج) روش ماسکینگام با برآورد پارامترها به کمک الگوی ترسیمی

دقت نتایج روش ماسکینگام تابع برآورد صحیح پارامترهای  $X$  و  $K$  در محاسبه ضرایب  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  می باشد که در فصل سوم به اجمال توصیف گردید. در برآورد این پارامترها به کمک الگوی ترسیمی نخست مقداری برای  $X$  انتخاب می گردد، بر این اساس مقادیر دبی وزنی،  $W_f = XI + (1-X)O$  در مقابل ذخیره تجمعی در نموداری رسم می شود. چنانچه نمودار رسم شده به یک خط راست نزدیک باشد یا به عبارت دیگر بسته ترین حلقه ایجاد شود، مقدار  $X$  حدس زده شده صحیح است و  $K$  نیز از روی شیب این خط قابل محاسبه می باشد، در غیر این صورت مقدار  $X$  را تغییر داده و تا رسیدن به یک خط تقریباً راست (بسته ترین حلقه) در نمودار

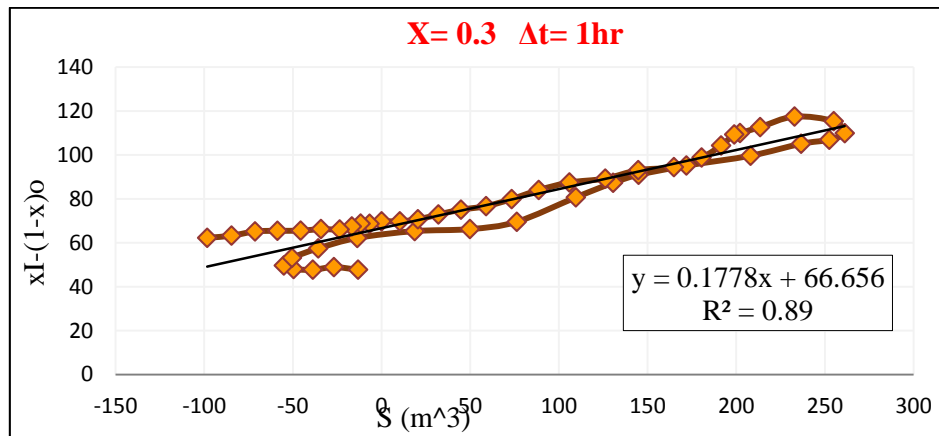
مزبور مراحل تکرار می‌شود. پس از محاسبه مقادیر ذخیره تجمعی، بهترین دبی وزندار از روی نمودارهای ترسیم شده انتخاب می‌شود تا بتوان ضرایب  $X$  و  $K$  را تخمین زد. برای محاسبه دبی وزندار مطابق آنچه گفته شد طبق اشکال (۲۴-۴) تا (۲۹-۴) نمایش هندسی ذخیره  $S$  در مقابل دبی وزنی  $W_f$  رسم می‌گردد.



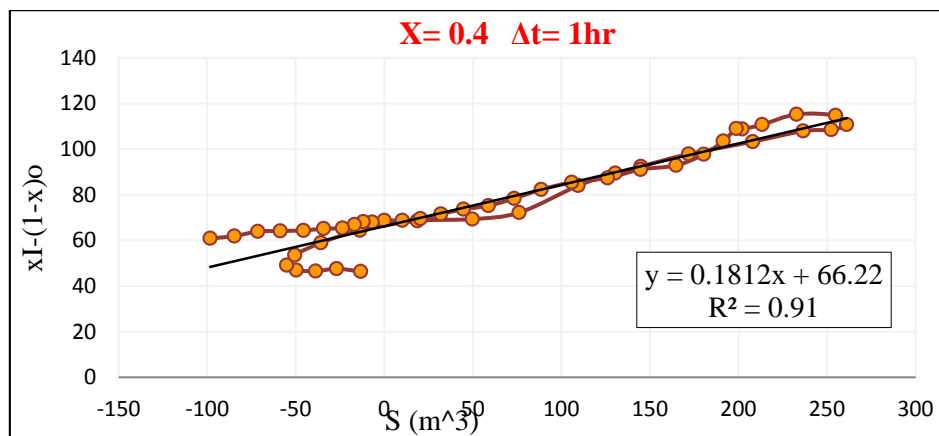
شکل ۴-۲۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.1$



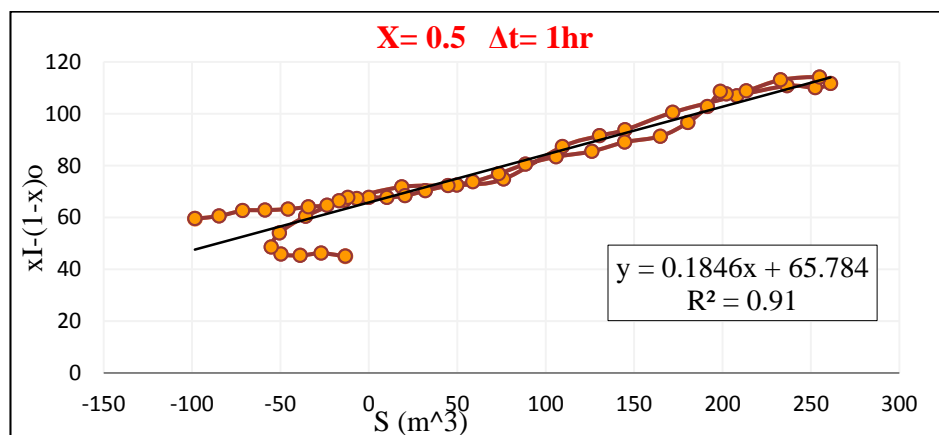
شکل ۴-۲۵: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.2$



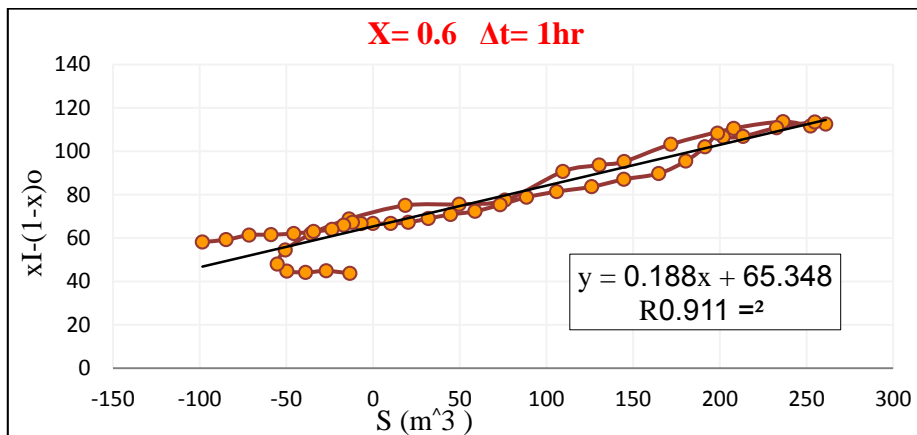
شکل ۴-۲۶: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای X=0.3



شکل ۴-۲۷: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای X=0.4

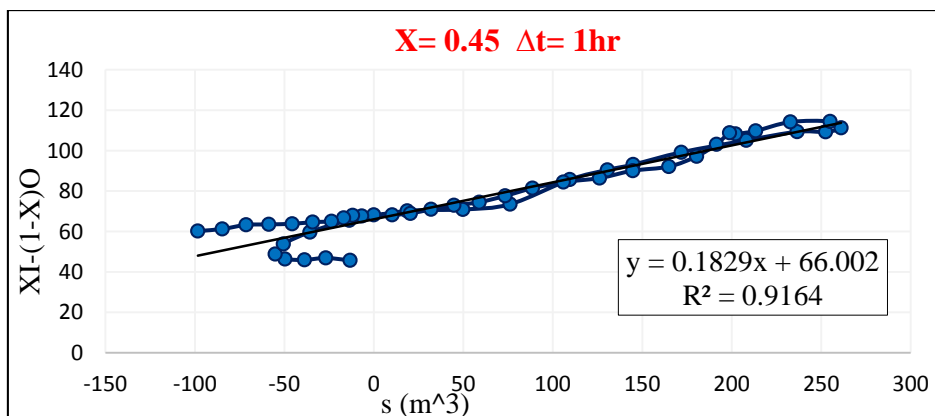


شکل ۴-۲۸: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای X=0.5

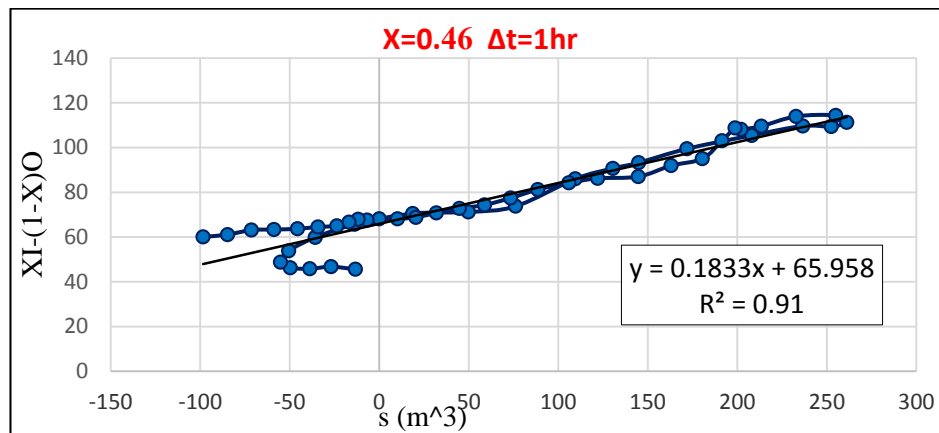


شکل ۴-۲۹: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.6$

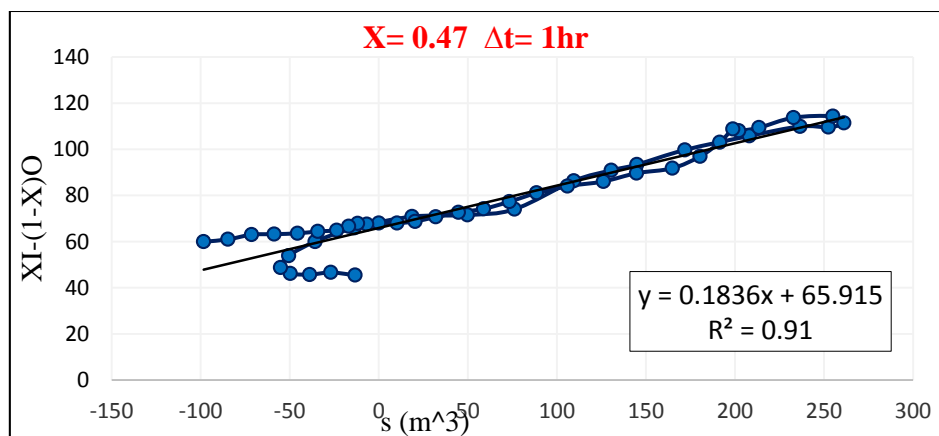
در بررسی اولیه با توجه به اینکه تغییرات قابل امکان برای پارامتر بی بعد  $X$  بین صفر تا  $0.6$  می باشد، مطابق اشکال (۴-۲۴) تا (۴-۲۹) بهترین نمودار مربوط به  $x=0.5$  می باشد که در آن بسته ترین حلقه وجود داشته و رگرسیون ذخیره تجمعی در مقابل دبی وزندار به خط راست نزدیک تر است. از این رو باید اعداد قبل و بعد از  $0.5$  مورد کنکاش قرار گیرد تا بسته ترین حلقه و بهترین خط مشخص شود. در این راستا در ادامه نمودارهای مختلف به ازای  $x=0.45$  تا  $x=0.54$  که با اختلاف یک گام (برحسب صدم) با مقدار نمودار  $0.5$   $x=$  فاصله دارند مورد بررسی قرار گیرند.



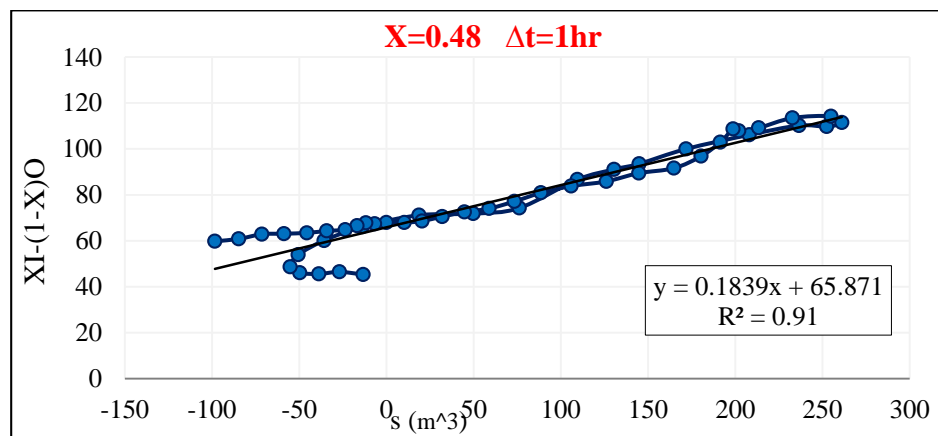
شکل ۴-۳۰: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.45$



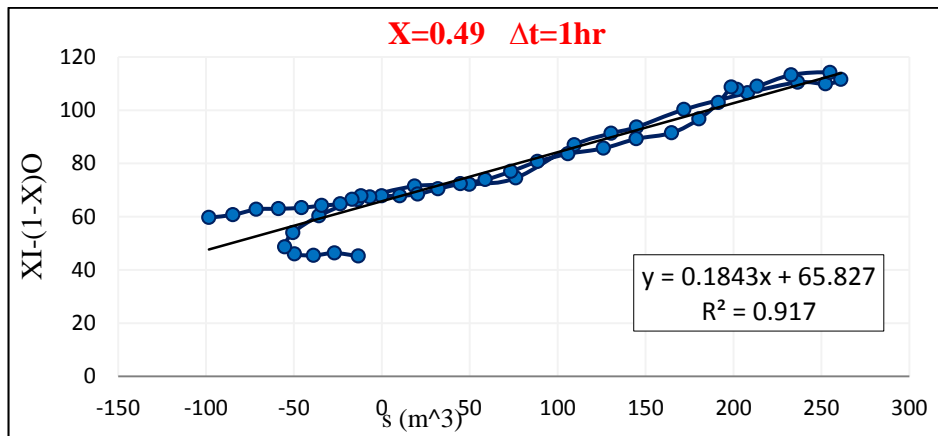
شکل ۴-۳۱: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.46$



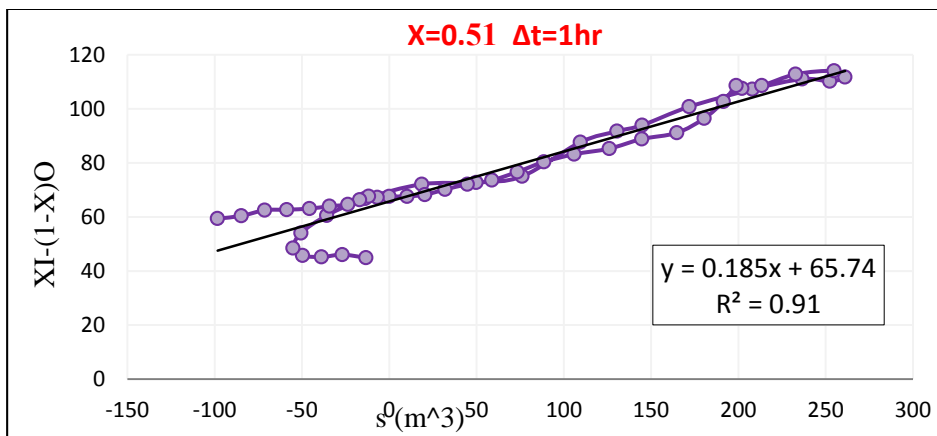
شکل ۴-۳۲: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.47$



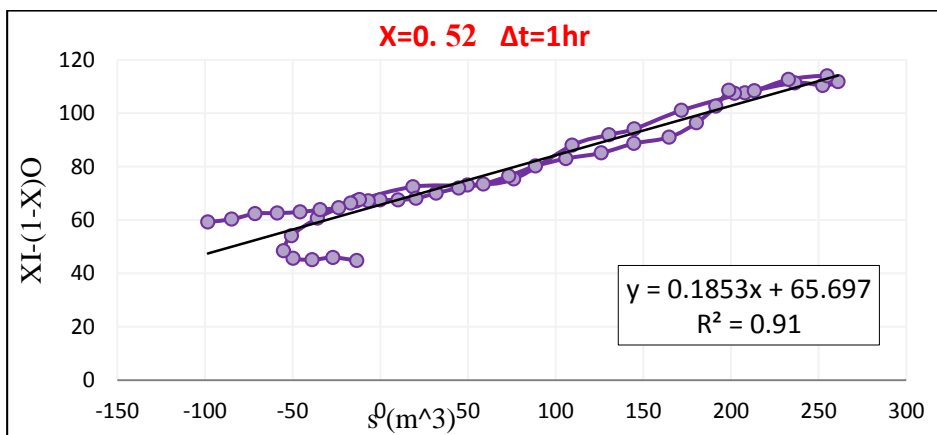
شکل ۴-۳۳: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.48$



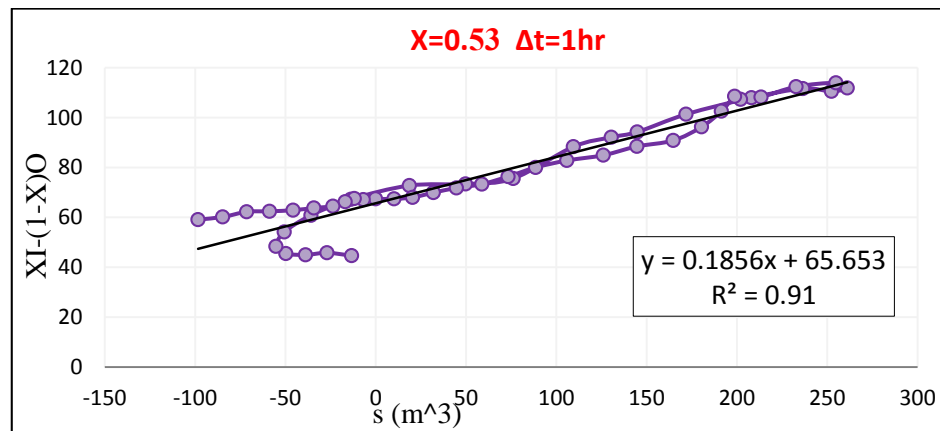
شکل ۴-۳۴: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.49$



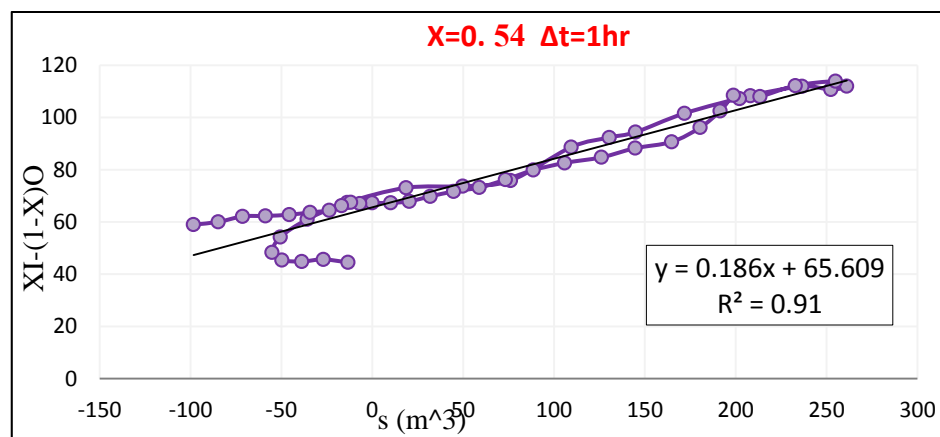
شکل ۴-۳۵: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.51$



شکل ۴-۳۶: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.52$



شکل ۴-۳۷: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.53$



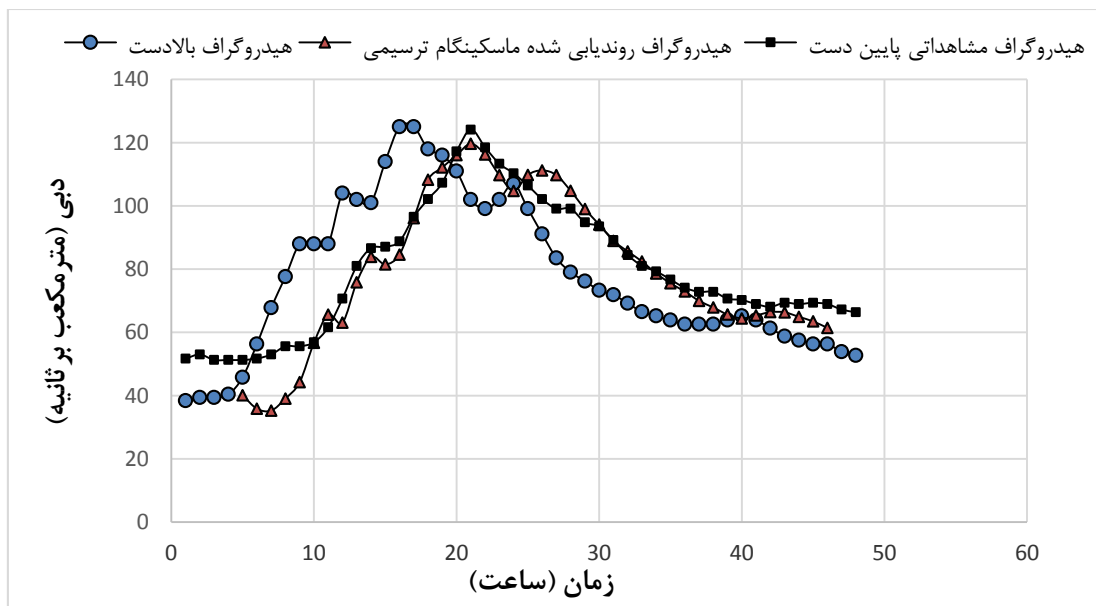
شکل ۴-۳۸: نمایش هندسی ذخیره در مقابل دبی وزنی به ازای  $X=0.54$

مطابق اشکال (۴-۳۰) تا (۴-۳۸) بسته‌ترین حلقه مربوط به  $X=0.45$  با شیب خط  $0.1829 \text{ day}$  در شکل (۴-۳۰) می‌باشد. از این‌رو در الگوی ترسیمی مقدار پارامتر بی بعد  $X$  را  $0.45$  و مقدار پارامتر زمانی  $k$  را  $5/467$  لجاظ می‌کنیم. با در نظر گرفتن این پارامترها و با استفاده از روش ماسکینگام ضرایب  $C_1, C_2, C_3$  به ترتیب برابر با  $+0.844103$ ،  $-0.55897$  و  $+0.714865$  خواهد بود. از این‌رو رابطه نهایی روندیابی سیلاب در روش ماسکینگام ترسیمی طبق فرمول (۴-۱) عبارت است از:



$$o_{j+1} = 0.844103I_{j+1} - 0.55897I_j + 0.714865O_j \quad (1-4)$$

در شکل (۳۹-۴) هیدروگراف روندیابی شده توسط روش ماسکینگام همراه با مقدار مشاهده‌ای در مقطع خروجی برای سیلاب آورده شده است.



شکل ۳۹-۴: هیدروگراف ورودی و روندیابی شده به روش ماسکینگام ترسیمی در مقایسه با هیدروگراف پایین دست

تحلیل نتایج روش ماسکینگام ترسیمی مطابق شکل (۳۹-۴) نشان می‌دهد که در زمان قبل از وقوع سیل مقدار دبی پایه در رودخانه بازفت ۳۸/۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است. پس از ۱۶/۵ ساعت از وقوع سیل دبی با مقدار ۱۲۵ مترمکعب بر ثانیه در بالادست به حداکثر مقدار خود می‌رسد. نتایج مشاهداتی در پایین دست نشان می‌دهد که دبی اوج سیلاب در پایین دست پس از ۲۲ ساعت به وقوع می‌پیوندد و مقدار آن ۱۲۴/۱۰۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است؛ یعنی دبی اوج سیلاب در بالادست با تأخیر زمانی معادل ۵/۵ ساعت به پایین دست رسیده است و مقدار دبی اوج در پایین دست با استهلاک (تعدیل) معادل ۱/۸۹۶ مترمکعب بر ثانیه همراه بوده است. این در حالی است که روش ماسکینگام ترسیمی دبی حداکثر در پایین دست را

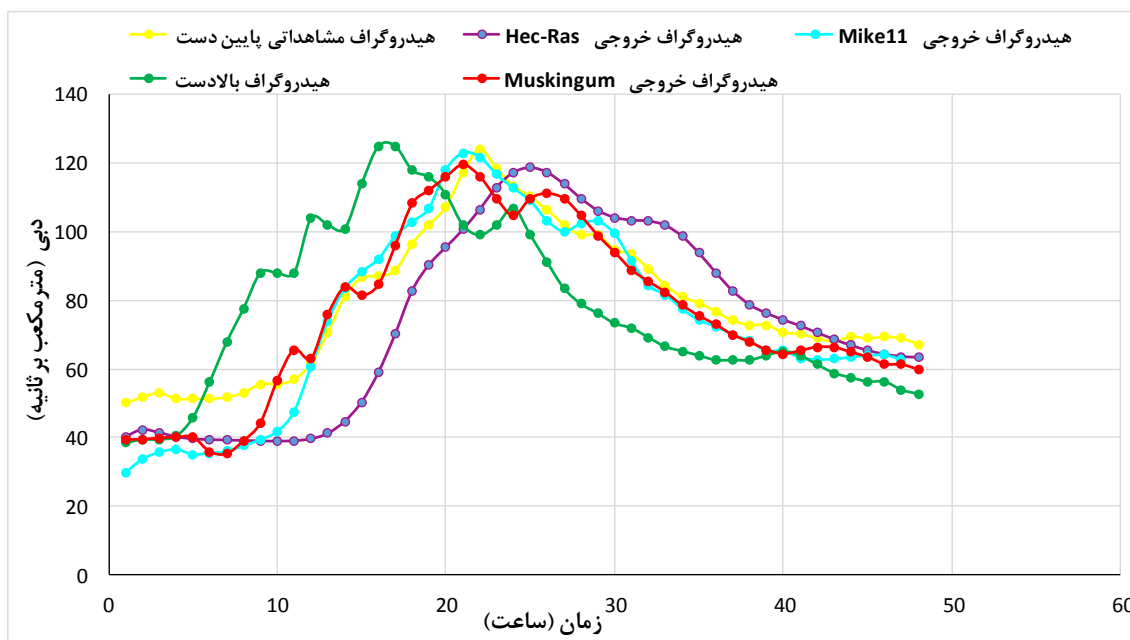
۱۱۹/۶۴۱۸ پیش‌بینی نموده است؛ یعنی میزان دبی اوج پایین‌دست را با دقت بالایی پیش‌بینی نموده و میزان استهلاک را ۴/۴۶۲۲ مترمکعب بر ثانیه تخمین زده است. همچنین این روش میزان تأخیر را نیز معادل ۱ ساعت و در زمان ۲۱ ساعت پس از وقوع سیلاب پیش‌بینی نموده است. در نتیجه می‌توان گفت روش ماسکینگام میزان تعدیل و تأخیر سیل را نزدیک به واقعیت پیش‌بینی نموده است.

#### ۴-۶- مقایسه نتایج سه مدل MIKE11، مدل HEC-RAS و مدل هیدرولوژیکی Muskingum در

#### برآورد هیدروگراف خروجی ایستگاه مورز

هدف اصلی از مقایسه روش‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انتخاب روشی است که هیدروگراف حاصل از عملیات روندیابی از نظر خصوصیات شکل هیدروگراف شامل زمان تا اوج و مقدار دبی اوج با هیدروگراف مشاهده شده بسیار نزدیک باشد و زمان به اجرا گذاشتن نیز در حداقل ممکن باشد. به همین دلیل جهت انتخاب بهترین مدل، با مقایسه مدل‌ها می‌بایست از روشی که کلیه جوانب شرح داده شده را بتواند دربر بگیرد، استفاده شود.

به‌منظور مقایسه هیدروگراف‌های حاصل از اجرای مدل‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی روندیابی سیل، از روشی که توسط ASCE (جامعه مهندسين سازه ایالات متحده) در بخش مهندسی آبیاری و زهکشی ارائه شده است استفاده گردید. طراحان این روش استفاده از آن را خصوصاً برای مدل‌هایی که به تجزیه و تحلیل جریان متغیرتدریجی (هیدروگراف‌های سیلابی) می‌پردازند، پیشنهاد می‌دهند. عموماً در مدل‌های طراحی شده سه فاکتور پیک جریان، زمان به اوج رسیدن و شکل هیدروگراف مدنظر است. در شکل (۴-۴۰) هیدروگراف‌های روندیابی شده به وسیله هر سه روش همراه با مقادیر مشاهده‌ای در مقطع خروجی برای سیلاب آورده شده است.



شکل ۴-۴: هیدروگراف‌های ورودی و خروجی مشاهده شده به همراه هیدروگراف‌های خروجی محاسبه شده از هر یک از سه روش روندیابی

یکی از مهم‌ترین موارد استفاده از روندیابی سیل در رودخانه‌ها، محاسبه ارتفاع آب در نقطه مشخصی از طول رودخانه می‌باشد. تعیین ارتفاع آب در تشخیص پهنه‌هایی از رودخانه که در معرض سیلاب قرار می‌گیرند بسیار حائز اهمیت است، چرا که تصمیمات مدیریتی در احداث یا عدم احداث تأسیسات، مناطق مسکونی و یا اراضی زراعی، کاملاً وابسته به میزان پیشروی سیلاب در پهنه سیل‌گیر می‌باشد. در جدول (۴-۶) مقادیر دبی اوج محاسبه شده توسط هر یک از روش‌های روندیابی مورد استفاده به همراه مقدار مشاهده‌ای در مقطع خروجی آورده شده است.

جدول ۴-۶: مقادیر دبی اوج مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط روش‌های روندیابی بر حسب مترمکعب بر ثانیه

سیلاب	روش محاسبه
۱۲۳/۰۳۹	روش مدل عددی MIKE11
۱۱۸/۷۷	روش مدل عددی Hec-Ras
۱۱۹/۶۴۱۸	روش Muskingum (ترسیمی)
۱۲۴/۱۰۰۴	مشاهده مستقیم

یکی دیگر از پارامترهای مهم حاصل از عملیات روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها، زمان وقوع دبی اوج بر اساس زمان از شروع هیدروگراف سیل می‌باشد (جدول ۴-۷). با پیش‌بینی دقیق این زمان در نقطه پایین‌دست، می‌توان اقدامات مدیریتی و اجرایی مورد نیاز را در مدت زمان مناسب‌تری انجام داد.

جدول ۴-۷: مقادیر زمان وقوع دبی اوج مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط هر یک از ۳ روش روندیابی براساس زمان از شروع سیلاب بر حسب ساعت

زمان (ساعت)	روش محاسبه
۲۱	روش مدل عددی MIKE11
۲۵	روش مدل عددی Hec-Ras
۲۱	روش Muskingum (ترسیمی)
۲۲	مشاهده مستقیم

در این تحقیق از دیگر معیارهای آماری برای واسنجی و تست مدل‌ها استفاده شده که نتایج این معیارهای ارزیابی در جدول (۴-۸) آورده شده است.

جدول ۴-۸: نتایج معیارهای آماری مختلف در عملیات روندیابی سیل به سه روش ماسکینگام ترسیمی، موج دینامیکی MIKE11، موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS در مقایسه با سیل مشاهده‌اتی

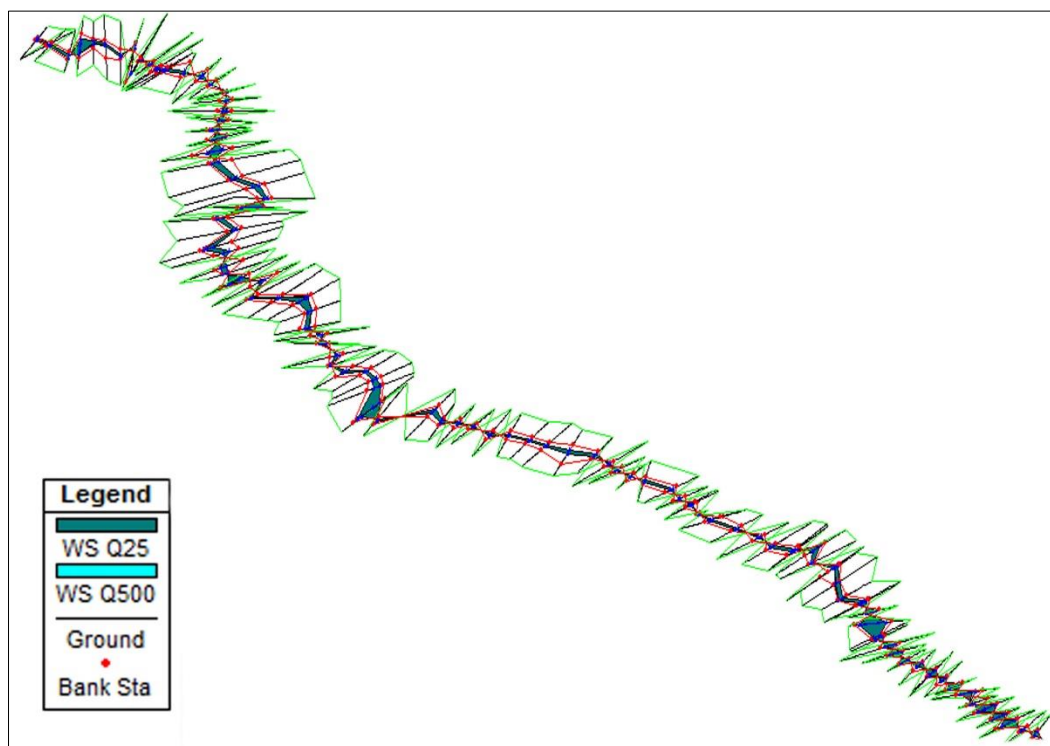
Model	HEC-RAS	MIKE11	Muskingum
R <sup>2</sup>	۰.۹۶۸	۰.۹۸۸	۰.۹۷۶
DPO	۵.۳۳۰	۱.۰۶۱	۴.۴۵۹
DPOT	۳	۱	۱
ε (%)	۴.۹۸۴	۱.۵۶۹	۴.۲۸۷
ξ (%)	۳۲.۰۰۰	۱۹.۰۴۸	۱۹.۰۴۸
PEP	۴.۲۹۵	۰.۸۵۵	۳.۵۹۳
TEP	۱۳.۶۳۶	۴.۵۴۰	۴.۵۴۰
RMSE	۲.۲۱۸	۲.۰۹۹	۲.۲۳۴
RV	۲۱۷.۴۱۶	۷۹.۰۱۹	۱۶۳.۷۱۲
E	۱۶.۳۱۶	۱۱.۰۲۳	۱۲.۹۲۲
SSQ	۱۰۲۱۸.۵۳۰	۳۷۱۳.۸۷۴	۷۶۹۴.۴۷۱

به‌منظور بررسی بیشتر و تحلیل بهتر نتایج حاصل از کلیه مدل‌ها با استفاده از فاکتورهایی که در بررسی مدل‌ها شرح داده شد، استفاده گردید. به شکلی که فاکتور ضریب همبستگی برای مدل MIKE11، مدل HEC-RAS و روش ماسکینگام به ترتیب ۰/۹۸۸، ۰/۹۶۸ و ۰/۹۷۶ و درصد خطای دبی اوج به ترتیب ۰/۸۵۵، ۴/۲۹۵، ۳/۵۹۳ و درصد خطای زمان تا اوج برای دو روش MIKE11 و ماسکینگام برابر ۴/۵۴۰ است. چون در یک زمان هیدروگراف به نقطه اوج رسیده است و برای HEC-RAS این معیار برابر ۱۳/۶۳۶ است. معیار RMSE نیز برای هر سه روش روندیابی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده گردید که مقادیر آن به ترتیب ۲/۰۹۹، ۲/۲۱۸، ۲/۲۳۴ می‌باشد. دیگر نتایج این مقایسه در جدول (۴-۵) ارائه شده است. با دقت در

این اعداد مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده از نرم‌افزار MIKE11 در مقایسه با نتایج بدست آمده از روش ماسکینگام و نرم‌افزار HEC-RAS به واقعیت نزدیک‌تر است.

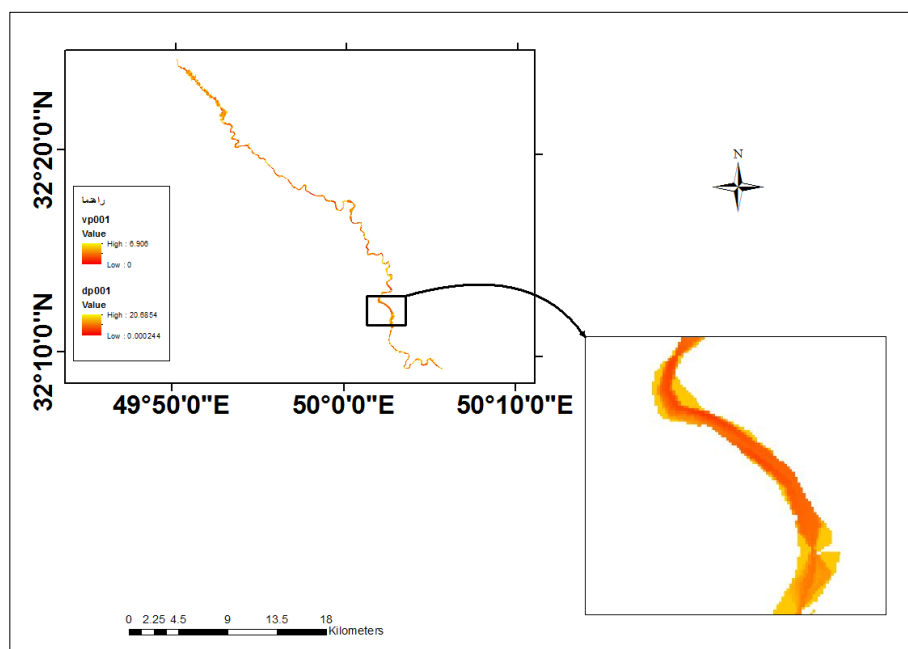
#### ۴-۷- نتایج مربوط به پهنه‌بندی سیلاب در بازه

پس از اجرای موفقیت‌آمیز مدل HEC-RAS به منظور پهنه‌بندی سیل و تحلیل جریان ماندگار در بازه مورد مطالعه، می‌توان نتایج حاصل را در قالب اشکال و جداول مختلف برای هر یک از پروفیل‌های تعیین شده استخراج نمود و جهت بررسی بیشتر مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. پهنه‌بندی بازه در محیط HEC-RAS در شکل (۴-۴۱) آورده شده است.

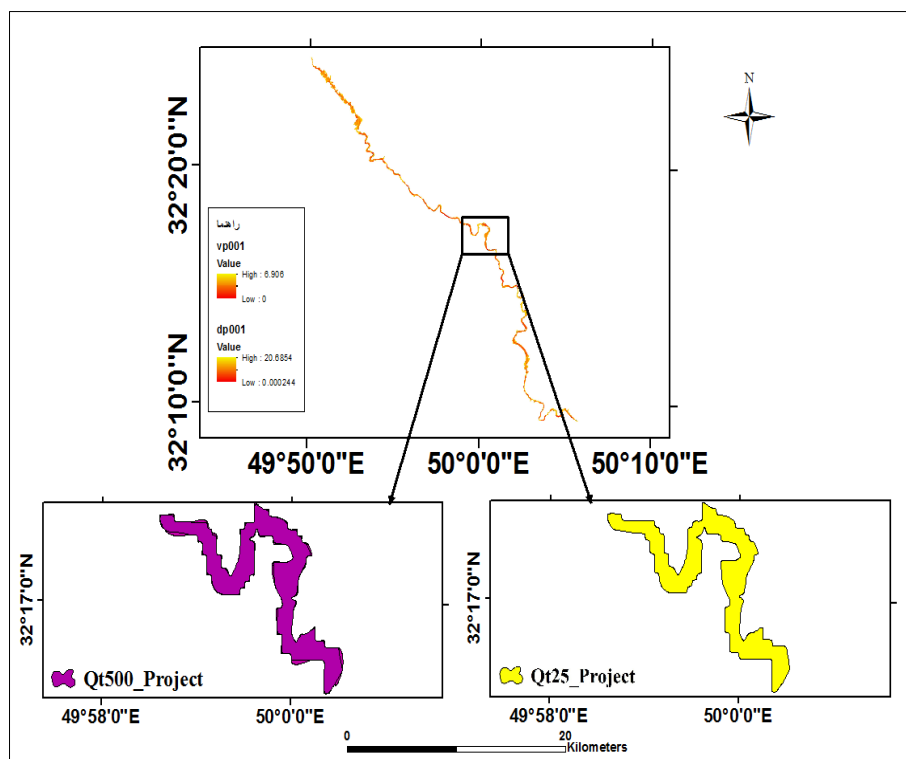


شکل ۴-۴۱: پهنه‌بندی بازه مورد مطالعه در نرم‌افزار HEC-RAS

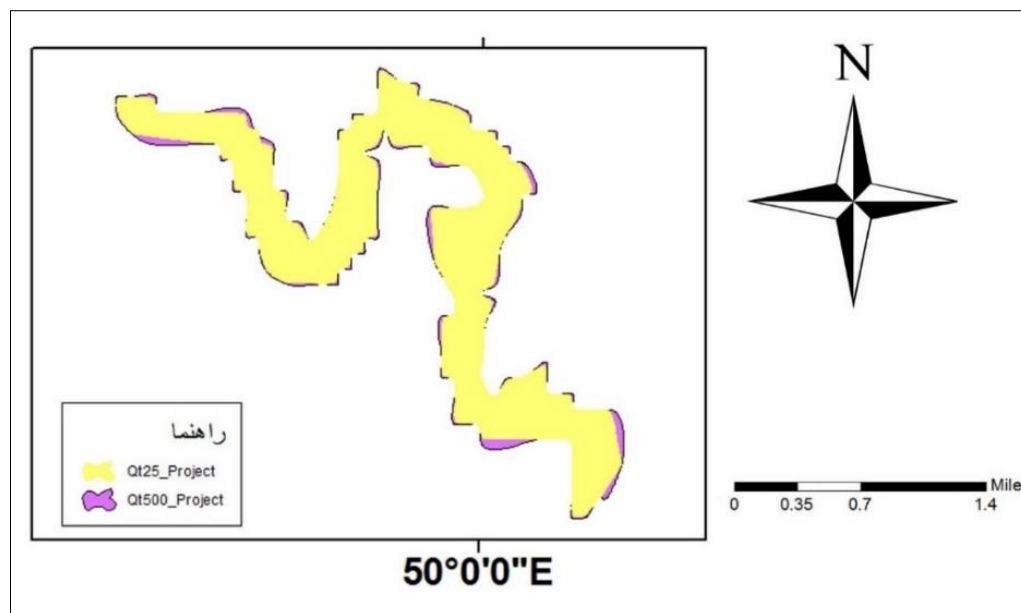
به منظور تکمیل پهنه‌بندی سیلاب از نتایج خروجی نرم‌افزار HEC-RAS در نرم‌افزار GIS استفاده شد (شکل ۴-۴۲). سپس با توجه به اطلاعات موجود، مکانی که بیشترین ارتفاع آب را دربرگرفته بود شناسایی و با دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰۰ ساله پهنه‌بندی گردید (شکل ۴-۴۳). پس از محاسبه پهنه سیل در دوره بازگشت‌های مختلف مشاهده می‌شود که به ازای دوره بازگشت بالاتر مقدار ناچیزی پهنه سیل مورد توجه قرار گرفته است به این دلیل که رودخانه مورد مطالعه دارای مقاطع به صورت دره عمیق است و جزء رودخانه‌های کوهستانی محسوب می‌شود (شکل ۴-۴۴).



شکل ۴-۴۲: پهنه‌بندی بازه مورد مطالعه حاصل از HEC-RAS و GIS



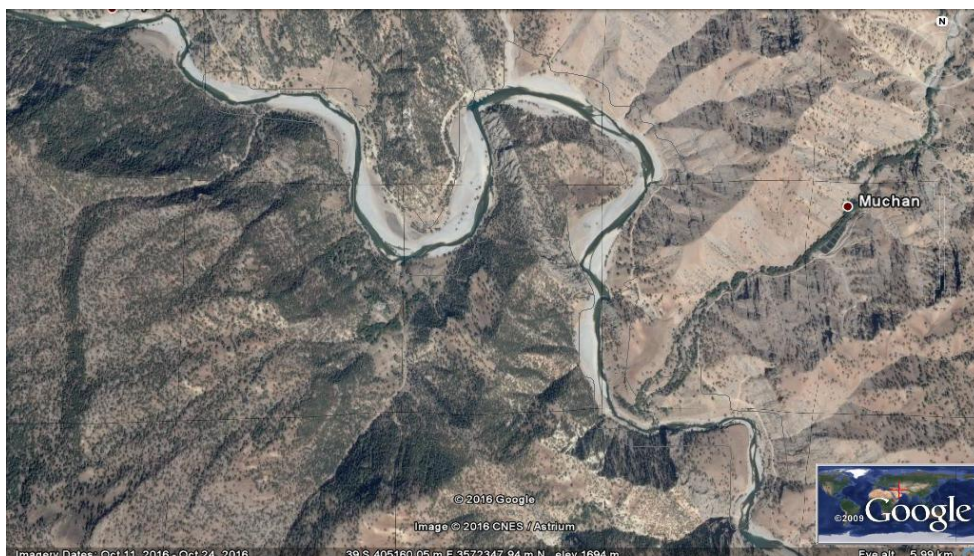
شکل ۴-۴۳: پهنه‌بندی بازه مورد مطالعه در دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله



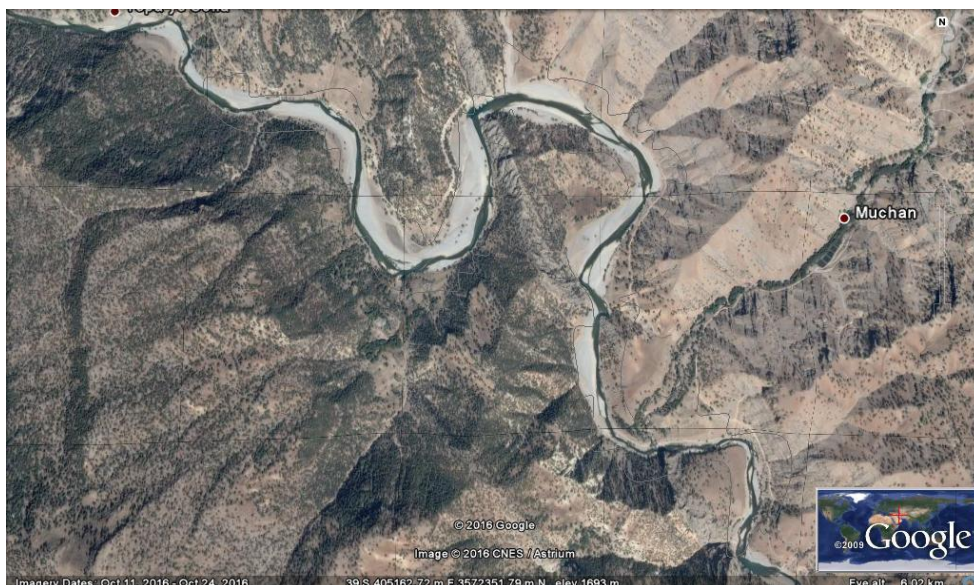
شکل ۴-۴۴: مقایسه مکان حداکثر ارتفاع آب با دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله



به منظور تعیین پهنه‌های در معرض سیلاب در بازه مورد مطالعه به ازای دبی با دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰۰ ساله، نتایج حاصل بر روی تصاویر گوگل ارث از بازه انتخابی انتقال داده شد. این نتایج در شکل‌های (۴۵-۴) و (۴۶-۴) آورده شده است.



شکل ۴-۴۵: پهنه سیل گیر به ازای دبی با دوره بازگشت ۲۵ سال



شکل ۴-۴۶: پهنه سیل گیر به ازای دبی با دوره بازگشت ۵۰۰ سال

با توجه به تحلیل‌های هیدرولیکی نرم‌افزار HEC-RAS برای پهنه‌بندی رودخانه بازفت، می‌توان بر اساس این خروجی‌ها طرح‌های مناسب ساماندهی رودخانه، محل مناسب ایجاد زمین کشاورزی و شناسایی محل‌های پرخطر برای کنترل سیل را ارائه نمود.

## فصل پنجم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل به بیان خلاصه‌ای از نتایج و دست‌آوردهای حاصل از این پایان‌نامه پرداخته می‌شود. همچنین جهت ادامه پژوهش در آینده، پیشنهادهایی در این زمینه ارائه شده است. براساس آنچه در فصول قبل مطرح شد، نتایج زیر حاصل می‌شود.

## ۵-۲- نتایج

روندیابی سیلاب یکی از مهم‌ترین مسائل در ارتباط با پدیده سیل می‌باشد. با توجه به اهمیت پدیده سیل پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب روندیابی شده در پایین‌دست یکی از مهم‌ترین نیازها می‌باشد. امروزه افزایش تراکم جمعیت، تأسیسات و صنایع در حاشیه رودخانه‌ها باعث افزایش ضرورت شناخت رفتار رودخانه گشته به طوری که روندیابی سیل و به دنبال آن تعیین نقاط با ریسک‌پذیری مختلف به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزار مدیریت مواجهه با سیل و جلوگیری از خسارات ناشی از آن محسوب می‌شود. در مطالعه حاضر پس از آشنایی با مبانی هیدرولیکی جریان غیردائمی و روندیابی سیلاب و نحوه کاربرد دو نرم‌افزار HEC-RAS و MIKE11، جریان غیردائمی سیلاب در رودخانه بازفت شبیه‌سازی شد. با انتخاب بازه‌ای از رودخانه بازفت به بررسی روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی روندیابی سیلاب شامل مدل‌های ماسکینگام و مدل‌های عددی موج دینامیکی و همچنین مطالعاتی بر پهنه‌بندی و عرض سطح جریان سیل به کمک نرم‌افزارهای HEC-RAS، MIKE11 و EXCEL پرداخته شد. نتایج حاصل از روندیابی هیدروگراف‌های سیل توسط هر سه روش با مقادیر مشاهده‌ای با استفاده از معیارهای آماری مختلفی مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به مقایسه نتایج دو نرم‌افزار HEC-RAS و MIKE11 که در هر دو نرم‌افزار از روش هیدرولیکی برای روندیابی سیلاب استفاده گردید، روش عددی موج دینامیکی نرم‌افزار HEC-RAS دبی

حداکثر در پایین دست را با میزان تأخیر ۳ ساعت معادل ۱۱۸/۷۷ پیش بینی نموده، در حالی که روش عددی موج دینامیکی نرم افزار MIKE11 دبی حداکثر در پایین دست را با میزان تأخیر ۱ ساعت معادل ۱۲۳/۰۳۹ محاسبه نموده است. با در نظر گرفتن مقدار دبی اوج هیدروگراف سیلاب مشاهداتی در پایین دست که معادل ۱۲۴/۱۰۴ مترمکعب بر ثانیه می باشد، نرم افزار HEC-RAS میزان دبی اوج پایین دست را با استهلاك معادل ۵/۳۳۴ مترمکعب بر ثانیه بررسی نموده و در نرم افزار MIKE11 این میزان استهلاك معادل ۱/۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است. در مدل ماسکینگام نیز که به عنوان یک روش هیدرولوژیکی روندیابی سیلاب مورد بررسی قرار گرفت تطابق خوبی با مقدار مشاهداتی نمایش داده شد. روش ماسکینگام ترسیمی دبی حداکثر در پایین دست را با میزان تأخیر ۱ ساعت معادل ۱۱۹/۶۴۱۸ مترمکعب بر ثانیه پیش بینی نموده و میزان استهلاك را معادل ۴/۴۶۲۲ مترمکعب بر ثانیه تخمین زده است. نتایج حاکی از برتری مشهود مدل موج دینامیکی نرم افزار MIKE11 می باشد. این مدل عددی دقیق ترین شبیه سازی جریان سیلاب را انجام داده و دارای کمترین خطا در مقایسه با سایر روش های روندیابی سیلاب است. دلیل این نتیجه گیری را می توان در نتایج آزمون ارزیابی معیارها نیز جستجو کرد. بنابر نتایج به دست آمده، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای مدل MIKE11، مدل HEC-RAS و روش ماسکینگام به ترتیب ۰/۹۸۸، ۰/۹۶۸ و ۰/۹۷۶ مشاهده شد. با توجه به نتایج ذکر شده، مشاهده می شود که روش ماسکینگام پس از MIKE11 رتبه دوم را دارد و با تقریبی خوب، نتایجی بهتر نسبت به نرم افزار HEC-RAS نشان می دهد. با مطالعه هر دو فاز عملیات روندیابی سیلاب و عملیات پهنه بندی سیل که در این پایان نامه به صورت مجزا انجام گردید، پدیده روندیابی (کاهش دبی اوج سیلاب و تأخیر زمانی دبی اوج) در مطالعه موردی به خوبی در نتایج سه مدل مشهود می باشد. همچنین نتایج حاصل از پهنه بندی سیلاب در بازه مورد مطالعه، مؤید توانایی بالای مدل HEC-RAS به عنوان یک مدل هیدرولیکی جهت شبیه سازی جریان در رودخانه ها و

همچنین تعیین خصوصیات جریان در مقاطع مختلف رودخانه بوده به طوری که قادر به تعیین این خصوصیات به طور جداگانه در کانال اصلی و سواحل چپ و راست رودخانه نیز می باشد. همچنین می توان به این نتیجه مهم رسید که چنانچه اطلاعات هندسی، فیزیکی و هیدرولیکی مقطع در دسترس نبوده و تنها اطلاعات موجود سابقه تاریخی سیلاب های گذشته باشد، توصیه می شود از روش ماسکینگام استفاده شود تا بهترین نتیجه در مقایسه با مقادیر مشاهداتی و عددی حاصل شود.

### ۵-۳- پیشنهادات

جهت تحقیقات آینده، مطالب زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. از تحقیق حاضر در برنامه‌ریزی‌های آینده منطقه مورد مطالعه از قبیل بیمه سیل، احداث سازه‌هایی نظیر پل و آب‌گذر می‌توان استفاده کرد.
۲. با توجه به این که روندیابی هیدرولوژیکی توسط روش ماسکینگام صورت گرفته است پیشنهاد می‌شود از روش‌های دیگر هیدرولوژیکی نیز استفاده شود و با روش‌های هیدرولیکی مقایسه گردد.
۳. مدل‌های یک بعدی با مدل‌های دو بعدی و سه بعدی مقایسه شود.
۴. کاربرد ترکیبی مدل‌های ریاضی و فیزیکی برای بهینه‌سازی مطالعات صورت گیرد.
۵. تحقیقی مشابه بر روی رودخانه‌هایی که از مناطق مهم و حساس شهری عبور می‌کنند انجام شود.
۶. پیشنهاد می‌شود شبیه‌سازی کیفیت آب در رودخانه بازفت توسط مدل‌های مختلف از جمله MIKE11 انجام شود و نتایج آن‌ها تحلیل گردد.
۷. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده اثرات هم‌زمان آب و رسوبات در طی حرکت موج به سمت پایین‌دست مورد بررسی قرار گیرد. حرکت رسوبات می‌تواند اثرات مهمی بر جریان سیلاب داشته باشد به نحوی که در بعضی از رودخانه‌ها نمی‌توان اثرات حرکت رسوب را نادیده گرفت و می‌بایست معادلات حاکم را به صورت اصلاح شده مورد استفاده قرار داد.

## منابع

- آذر، ع.، پناهی، ع و شریفی، ر. (۱۳۹۲). کاهش خسارت سیل از طریق تعیین حریم و بستر رودخانه مهران رود تبریز. فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی امداد و نجات، سال ششم، شماره دوم، ۸ صفحه.
- اعلمی، م. ت.، مصطفی‌پور، ه. (۱۳۸۷). پهنه‌بندی حریم و بستر و تعیین کاربری اراضی (مطالعه موردی رودخانه قرنقو). سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، ۸ صفحه.
- اکبرپور. م.، معتمدی، ع. (۱۳۸۶). روندیابی جریان رودخانه کارون در بازه اهواز- ملاتانی با استفاده از مدل HEC- HMS. سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۷ صفحه.
- امامقلی‌زاده، ص.، جهانی، ح. (۱۳۸۷). بررسی هیدرولیک جریان در رسوبشویی تحت فشار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، چهارمین کنگره‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۸ صفحه.
- براتی، ر.، اکبری، غ و وحدت، ا. (۱۳۸۹). حل عددی روندیابی موج دینامیکی سیلاب به کمک شماهای صریح، ضمنی و روش مشخصات. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۹ صفحه.
- بیرانوند، س.، حسین‌زاده، م. (۱۳۹۳). پهنه‌بندی رودخانه کشکان با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و سیستم اطلاعات جغرافیایی. اولین کنفرانس ملی توسعه پایدار در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و شهرسازی تهران، ۹ صفحه.
- حسینی، س. م.، ابریشمی، ج. (۱۳۹۴). هیدرولیک کانال‌های باز (چاپ پانزدهم)، مشهد- دانشگاه امام رضا (ع)، ۶۱۳ صفحه.



- حقیقی، ع.، اشرفی، م. (۱۳۸۵). بررسی مقایسه‌ای موج دینامیک و سینماتیک در روندیابی سیل در مطالعات مهندسی رودخانه. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۹ صفحه.
- حیدری، ع.، امامی، ک. (۱۳۸۵). پیش‌بینی و هشدار سیل. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره انتشار ۱۰۲، ۲۸۷ صفحه.
- درخشان علمدارلو، پ.، اکبری، غ.، (۱۳۹۳). بررسی روندیابی سیلاب در آبراهه‌ها توسط نرم‌افزار MIKE11 (مطالعه موردی رودخانه قره آغاج بازه روستای علی‌آباد خفر- استان فارس). هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۸ صفحه.
- درخشان علمدارلو، م. (۱۳۹۳). کاربرد روش‌های روندیابی در دریاچه و آبراهه‌های بالادست و پایین‌دست سد (مطالعه موردی رودخانه قره آغاج-سد سلمان فارسی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۵۰ صفحه.
- رحیمی دهاقانی، ن.، فضل‌اولی، ر.، نبویان پور، م و همکاران. (۱۳۸۸). مقایسه نتایج مدل‌های HEC-RAS و MIKE11 در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه لردگان). هشتمین کنگره بین-المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۸ صفحه.
- زینی‌وند، ح.، ضیاء تبار احمدی. م و تلوری، ع. (۱۳۸۵). پهنه‌بندی سیل با بکارگیری نرم‌افزار HEC-RAS در دشت سیلابی سیلاخور بروجرد، مجله منابع طبیعی ایران، سال پنجاه و نهم، شماره ۱، صفحه ۱-۱۴.
- شفاعی بجستان، م.، (۱۳۸۴). مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۲۸۶ صفحه.

- صفوی، ح. (۱۳۹۰). هیدرولوژی مهندسی، انتشارات ارکان دانش، ۷۱۲ صفحه.
- عباسی‌زاده، م.، مهدوی، م و سلاجقه، ع. (۱۳۸۹). ارزیابی کارایی روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی سیل در رودخانه دز. فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال سوم، شماره ۹، صفحه ۶۳-۷۶.
- علیزاده، ا. (۱۳۹۴). اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۹۴۲ صفحه.
- فتحیان، ح.، کشاورز، ا و رستمی، ر. (۱۳۸۳). مقایسه روندیابی سیلاب در کانال‌های فرسایشی و غیرفرسایشی. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۶ صفحه.
- فتوحی، م.، فغورمغربی، م. (۱۳۸۷). مقایسه روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام کانژ. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، ۸ صفحه.
- قبادیان، ر. (۱۳۸۷). مدل ریاضی روندیابی هیدرولیکی سیلاب در رودخانه قره‌سو با استفاده از حل عددی معادلات جریان غیرماندگار. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق، ۹ صفحه.
- کاویانپور، م. ر.، رزم‌خاموش صوفیانی، ح. (۱۳۸۶). مدل‌سازی و مدیریت سیلاب شهری مسیل باختر و منوچهری تهران با استفاده از GIS. سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۹ صفحه.
- کریمیان کالکی، ر.، هنریخش، ا و سامانی، ا. (۱۳۹۰). روندیابی هیدرولیکی سیلاب با استفاده از مدل موج سینماتیک و HEC-RAS (مطالعه موردی رودخانه دوآب صمصامی)، چهارمین کنفرانس منابع آب ایران، دانشگاه امیرکبیر، ۱۲ صفحه.

- کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران و کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی. (۱۳۷۹). راهنمای روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب، نشریه شماره ۴۰، ۳۳۶ صفحه.
- محمودیان شوستری، م.، (۱۳۸۵)، اصول جریان در مجاری باز، جلد دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران، ۵۲۸ صفحه.
- مرادی، ح.، وفاخواه، م و باویل، ع. (۱۳۸۶). مقایسه روندیابی سیل با دو روش ماسکینگام و ماسکینگام-کانز در بخشی از رودخانه ليقوان، نشریه علوم آب و خاک- علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال یازدهم، شماره چهل و دوم. صفحه ۳۳۵-۳۴۲.
- مسجدی، ع.، موسوی جهرمی، ح و بردبار، ا. (۱۳۸۷). بررسی پهنه‌بندی سیلاب با دوره برگشت‌های مختلف در حوضه‌های آبریز. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۷ صفحه.
- معقول، پ.، ابوالقاسمی، ح.، کوهکن، م. ر. و همکاران. (۱۳۸۴). روندیابی هیدرولوژیکی رواناب جاری در شبکه رودخانه با بهره‌گیری از مدل غیرخطی تطبیقی ماسکینگام اصلاح شده و الگوریتم ژنتیک. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۷ صفحه.
- مهدوی، م.، (۱۳۹۴). هیدرولوژی کاربردی (جلد اول)، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۶۰ صفحه.
- موسوی، س. ع.، حبیبی، ل و قویدل‌فر، س. (۱۳۸۵). کاربرد GIS در کنترل سیلاب شهری، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸ صفحه.
- Al-Humoud, J. M., & Esen, I. I. (2006). Approximate methods for the estimation of Muskingum flood routing parameters. *Water resources management*, 20(6), 979-990.

- Amein, M., & Fang, C. S. (1970). Implicit flood routing in natural channels. *Journal of the Hydraulics Division. Amer. Soc. of Civ. Engrs*, 96(2), pp. 2481-2500, 1970.
- Ashouri, M., Rezaei Moghaddam, M.H., Piry, Z. (2013). Morphologic Change Assessment of Riverbed Before and after Dam Construction Using HEC RAS Model and GIS (Case Study: Downstream of Satarkhan Dam). *Physical Geography Research Quarterly*, 45(1): 87-100.
- Birkhead, A., & James, C. (2002). Muskingum river routing with dynamic bank storage. *Journal of Hydrology*, 264(1), 113-132.
- Blackburn, J., & Hicks, F. (2002). Combined flood routing and flood level forecasting. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(1), 64-75.
- Brakensiek, D., & Comer, G. (1965). A re-examination of a flood routing method comparison. *Journal of Hydrology*, 3(3-4), 225-230.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw-Hill: New York. ISBN 0-07-010810-2. xiii, 572 pp.
- Chung, W., & Kang, Y. L. (2006). Flood routing in long channels: Alleviation of inconsistency and discharge dip in Muskingum-based models. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 29(1), 23-35.
- Delphi, M., Shooshtari, M. M., & Zadeh, H. H. (2010). Application of Diffusion Wave Method for Flood Routing in Karun River. *International Journal of Environmental Science and Development*, 1(5), P. 432.
- Enn c.c. (2010). *Flood Routing in Ungauged Cathments Using Muskingum Method*. A thesis submitted to the Faculty of Civil Engineering University Teknologi Malaysia for the degree of Bachelor of Civil Engineering.

- Fenton, J. D. (2011). Accuracy of Muskingum-Cunge flood routing. *Alternative Hydraulic paper 3*, p. 8.
- Fernandez, D., & Lutz, M. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1), 90-98.
- Gichamo, T. Z., Popescu, I., Jonoski, A., & Solomatine, D. (2012). River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. *Environmental Modelling & Software*, 31, 37-46.
- Hicks, F. E. (1996). Hydraulic flood routing with minimal channel data: Peace River, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23(2), 524-535.
- HosseinZadeh, A., Ahmadi, M., Sharifi, M., & Masoudian, M. (2005). Flood zoning using the HEC-RAS hydraulic model in a GIS environment. *Journal of Environmental Hydrology*, 13.1058-3912.
- Jain, M. K., & Singh, V. P. (2005). DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation. *Journal of Hydrology*, 302(1), 107-126.
- Jeb, D., & Aggarwal, S. (2008). Flood inundation hazard modeling of the River Kaduna using remote sensing and geographic information systems. *Journal of applied sciences research*, 4(12), 1822-1833.
- Jin, M., & Fread, D. (1997). Dynamic flood routing with explicit and implicit numerical solution schemes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(3), 166-173.
- Khattak, M. S., Anwar, F., Saeed, T. U., Sharif, M., Sheraz, K., & Ahmed, A. (2016). Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: a case study of Kabul River. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1375-1390.
- Knebl, M., Yang, Z.-L., Hutchison, K., & Maidment, D. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336.

- Kundzewicz, Z. (1983). Hydrodynamic determination of parameters of linear flood routing models. XVIIIth IUGG General Assembly, 149-160.
- Liu, W.-C., Chen, W.-B., Hsu, M.-H., & Fu, J.-C. (2010). Dynamic routing modeling for flash flood forecast in river system. *Natural Hazards*, 52(3), 519-537.
- Midaoui, A. B., Lahrah, A. R., Chaoui, A. A., Bourak, A., Benaabidate, L. (2015). Integration of GIS and HEC-RAS in floods modeling of the Ouergha river, Northern Morocco. *European Scientific Journal*, 11(2), 1857-7881.
- Mirzazadeh, P., & Akbari, G. (2013). A case study of flood dynamic wave simulation in natural waterways using numerical solution of unsteady flows. *Computational Methods in Civil Engineering*, 3(2), 67-77.
- Mirzazadeh, P., & Akbari, G. H. (2014). The Case Study of Muskingum-Cunge Method Application of Different Schemes in Flood Routing. *Journal Homepage: www. cjasr. com*, 3(5), 21-31.
- Nwaogazie, I. L. (1986). Kinematic-wave simulation program for natural rivers. *Advances in Engineering Software* (1978), 8(1), 32-45.
- Nwaogazie, I. L. (1987). Comparative analysis of some explicit-implicit streamflow models. *Advances in water resources*, 10(2), 69-77.
- Raina, R. (2005). Development of a cell-based stream flow routing model. Texas A&M University, p. 151.
- Sholtes, J. (2009). Hydraulic analysis of stream restoration on flood wave propagation. University of North Carolina at Chapel Hill ,p. 111.

- Shuai, S., Xilai, Z., Fadong, L., Shoubo, T., & Guoqing, L. (2013). Flood routing simulation and system customization for a high-leakage River Channel in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 656-663.
- Shultz, J., Crosby, C., & McEnery, A. (2008). Kinematic wave technique applied to hydrologic distributed modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed. *Hydrology Days*, 116-126.
- Singh, V. P. (1996). *Kinematic wave modeling in water resources, surface-water hydrology*: John Wiley & Sons, p. 1395.
- Sinha, J., Eswaran, V., & Bhallamudi, S. M. (1995). Comparison of spectral and finite-difference methods for flood routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), 108-117.
- Tate, E. C., & Maidment, D. R. (1999). *Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcView GIS*. University of Texas at Austin. Report No.99-1, 215.
- Timbadiya, P., Patel, P., & Porey, P. (2014). One-dimensional hydrodynamic modelling of flooding and stage hydrographs in the lower Tapi River in India. *Current Science*, 105(5), 708-716.
- Tung, Y.-K. (1985). River flood routing by nonlinear Muskingum method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), 1447-1460.
- Wang, G.-T., Yao, C., Okoren, C., & Chen, S. (2006). 4-Point FDF of Muskingum method based on the complete St Venant equations. *Journal of Hydrology*, 324(1), 339-349.
- Wooding, R. A. (1965). A hydraulic model for the catchment-stream problem: I. Kinematic-wave theory. *Journal of Hydrology*, 3(3), 254-267.
- Zope, P., Eldho, T., & Jothiprakash, V. (2015). Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India. *Natural Hazards*, 75(1), 887-908.

## **Abstract**

One of the most important issues in the river engineering studies is the estimation of water depth, discharge and other characteristics of unstable flow in the key areas of natural rivers which is called "Flood Routing". Indeed in the flood routing the hydrograph caused by flooding in lower part of the river by using obvious hydrograph of upper part is extracted. Methods of flood routing include two main groups of hydrologic and hydraulic methods. Due to significance of this issue, Muskingum method and dynamic wave method were applied in this research, which the first method is a hydrological and the second one is a hydraulic method of flood routing. The study area of this research is a reach of Bazoft River, where is located in north and North west of Chaharmahal-o-Bakhtiari province. Approximately, 47 km length of this river considered for flood routing. For execute the Muskingum method, a computer program in excel using Microsoft technique was prepared and for dynamic wave method two models of MIKE11 and HEC-RAS were used.

To compare the results, the statistical parameters namely  $R^2$  and RMSE, the peak mistakes percent, proportional mistake percent and etc were used. Results show that dynamic wave method of MIKE11 had the most accuracy and Muskingum and dynamic wave HEC-RAS were located in second and third places. Of course, in many cases Muskingums results were almost the same as MIKE11. After analyzing the abundance of flooding in considering span, the width of flooding will be considered by using Hydraulic model HEC-RAS and by using appendix of HEC-GeoRAS in ArcGis Environment.

Also the maps and the shapes obtained from the hydraulic study, in addition to introduce the floodgate zone can be used as a useful instrument to control and manage the territories and to develop plans and manage the rivers in case of flooding and environmental protection.

**Keywords:** Flood Routing, Bazoft, Muskingum, HEC-RAS, GIS, MIKE11.





Shahrood University of Technology  
faculty of Agriculture

M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering

Flood routing of Bazoft River using Numerical model of MIKE11

By: Maryam Hosseinzadeh

Supervisor:

Dr. Samad Emamgholizadeh

Advisor:

Dr. Zahra Ganji

Dr. Hossein Samadi

January 2017