

ابداع روشی برای تعیین محل تنش برشی بیشینه در خم رودخانه (صحت‌سنجی نشریه‌ی ۵۹۲ وزارت نیرو)

علی نیاقت (دانشجوی دکتری)

آرش ادیب* (استاد)

حمیدرضا غفوری (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز

در خم‌های رودخانه، شناسایی بازه‌هایی که در آن‌ها بیشینه‌ی تنش برشی رخ می‌دهد، امری ضروری است. به این دلیل در پژوهش حاضر، روشی ابداع و نتایج آن با دستورالعمل نشریه‌ی ۵۹۲ وزارت نیرو مقایسه شده است. برای مطالعه‌ی موردی در پژوهش حاضر، پایین‌دست سد کرخه انتخاب شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که برای $R/W < ۱/۵$ ، دقت دستورالعمل نشریه‌ی ۵۹۲ وزارت نیرو، ۹۰٪ است و بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی در قوس داخلی خم است، در حالی که برای $R/W > ۵$ ، دقت دستورالعمل نشریه‌ی ۵۹۲ وزارت نیرو، ۹۱٪ است و بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی در قوس خارجی خم است. بنابراین برای مقادیر کوچک R/W ، بیشینه‌ی تنش برشی در قوس داخلی خم رخ می‌دهد. با افزایش R/W ، بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی به قوس خارجی منتقل و محل آن به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود.

واژگان کلیدی: نشریه‌ی ۵۹۲ وزارت نیرو، نرم‌افزار CCHE2D، رودخانه‌ی کرخه، تنش برشی، انحنا‌ی نسبی خم.

۱. مقدمه

سرعت، فشار هیدرواستاتیکی افزایش می‌یابد و سطح آب بالا می‌آید که به آن ارتفاع اضافه می‌گویند. از سوی دیگر، در قوس مقابل (داخلی) سطح آب افت می‌کند و در این صورت یک جریان چرخشی در مقطع عرضی و در محل قوس ایجاد می‌شود که باعث گود شدن مقطع در قوس خارجی می‌شود. حال اگر کناره‌ی رودخانه، صلب باشد، فرسایش محدود به بستر خواهد شد؛ ولی اگر کناره‌ی رودخانه قابل فرسایش باشد، دیواره‌ی خارجی تحت فرسایش قرار می‌گیرد و ریزش می‌کند تا گودال ایجاد شده را پر کند. ادامه‌ی این روند، موجب فرسایش با سرعت قابل توجه در جهت قوس خارجی خواهد شد. در صورتی که بستر رودخانه صلب باشد، ولی کناره‌ها فرسایش‌پذیر باشند، فرسایش کناره‌ی متوجه قوس خارجی می‌شود و جابه‌جایی جانبی را به دنبال دارد.^[۱]

در این شرایط، بحث انقباض و انبساط جریان اهمیت دارد و عامل اصلی، وقوع فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی است. مهم‌ترین پدیده در این حالت، تغییر الگوی توزیع سرعت عرضی است، به طوری که سرعت‌های بیشینه‌ی جریان به سمت قوس داخلی و سرعت‌های کمینه به سمت قوس خارجی رودخانه متمایل می‌شوند. این پدیده مهم به دلیل تبادل شدید مومنتوم بین مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی ایجاد می‌شود.^[۲] در مقاطع متاندرها، تغییر زیادی در توزیع طولی سرعت از قوس داخلی به سمت قوس خارجی یک متاندر وجود دارد.

در یک رودخانه‌ی متاندری، جریان موجود به سمت کف مجرا با جریان چرخشی (ثانویه) ترکیب و سبب ایجاد تنش برشی بیشتر از حالت معمولی می‌شود. نتیجه‌ی تعامل جریان اصلی و ثانویه، فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی است. براساس نتایج آزمایشگاهی، بیشترین مقدار تنش برشی در راستای قوس خارجی رخ می‌دهد. در جریان‌های با دبی کم، بیشینه‌ی تنش برشی در رأس قوس خارجی رخ می‌دهد، اما با افزایش دبی جریان، محل بیشینه‌ی تنش برشی به سمت نقطه‌ی عطف پایین‌دست منتقل می‌شود. در حالت کلی محل و میزان فرسایش کناره‌ها به بده‌ی جریان و جنس مصالح کف و کناره‌ها که عامل مهمی در تعیین تنش بحرانی است، بستگی دارد. نسبت تنش برشی بیشینه‌ی ایجاد شده در قوس به تنش برشی متوسط جریان، تابعی از انحنا‌ی نسبی زبری جداره‌ها و وجود قوس در بالادست قوس موردنظر است. بیشینه‌ی تنش برشی ایجاد شده در مواردی تا ۳ برابر تنش برشی متوسط جریان است. نسبت شعاع انحنا به عرض رودخانه را انحنا‌ی نسبی گویند. انحنا‌ی نسبی یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین توزیع تنش برشی در قوس‌هاست.^[۱] در قوس خارجی رودخانه به دلیل افزایش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۲/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۶/۲، پذیرش ۱۳۹۶/۷/۴.

DOI:10.24200/J30.2018.2174.2120

Archive of SID

کرد. [26] همچنین مطالعه‌ی بر روی رودخانه‌های مختلف جهان انجام و اثر ساخت سد بر روی تغییر رژیم جریان رودخانه‌ها بررسی شده است. [27] در آرژانتین نیز اثر ساخت سد در تغییر پوشش گیاهی در اطراف خم‌ها و تغییر ریخت‌شناسی خم‌ها مطالعه شده است. [28] در مورد تغییر تنش برشی در خم‌های رودخانه، اثر عوامل مختلف ارزیابی و در پاره‌یی از مطالعات خم‌ها براساس شعاع و انحنای نسبی آن‌ها تفکیک شده‌اند. [29-31]

هدف نوشتار حاضر، تعیین بازه‌هایی در خم‌هاست که بیشینه‌ی تنش برشی در آن‌ها رخ می‌دهد. برای این منظور، رودخانه‌ی کرخه در نظر گرفته شده و محدوده‌ی انتخابی آن در پایین‌دست سد مذکور است. دلیل انتخاب محدوده‌ی پایین‌دست، تغییراتی است که ساخت سد در مورفولوژی و محل خم‌ها ایجاد می‌کند. بنابراین یکی از اهداف پژوهش حاضر، بررسی اثر ساخت سد در تعیین محل بیشینه‌ی تنش برشی سد است. برای این منظور دو سری تصاویر ماهواره‌یی مربوط به سال‌های ۱۹۹۶ (قبل از ساخت سد) و ۲۰۱۱ (بعد از ساخت سد) در نظر گرفته شد. محل و مشخصه‌های خم‌ها (مانند شعاع و پهنای خم) در دو تصویر مذکور مشخص و سپس مدل CCHE2D برای هر دو حالت اجرا شد و بازه‌هایی در خم‌ها که بیشینه‌ی تنش برشی در آن‌ها رخ می‌دهد، استخراج شد. در نهایت، نتایج مدل با دستورالعمل نشریه‌ی ۵۹۲ وزارت نیرو مقایسه شد تا احتمال صحت توصیه‌های نشریه‌ی ۵۹۲ مشخص شود.

در واقع نوآوری اصلی پژوهش حاضر، صحت‌سنجی از یکی از استانداردهای وزارت نیرو است. تاکنون برای صحت‌سنجی استانداردهای وزارت نیرو در زمینه‌ی جنبه‌های مختلف مهندسی آب، مطالعه‌ی اندکی در کشور انجام شده است و طراحان و پیمانکاران بدون بررسی علمی و عملی از استانداردهای وزارت نیرو استفاده می‌کنند. مطالعاتی از این نوع، باب جدیدی را برای بررسی علمی و عملی استانداردهای مذکور در مجامع علمی و بدنه‌ی کارشناسی صنایع آب کشور می‌گشاید. همچنین برای بررسی دقیق‌تر بند حاضر و نشان دادن کارایی آن در شرایط مختلف، یکی از مباحث عملی مهم در کشور که ساخت سدهای بزرگ بر روی رودخانه‌های کشور است، در نظر گرفته شده است. با توجه به تغییر شدید شرایط رودخانه در قبل و بعد از ساخت سد، اثبات صحت بند حاضر در قبل و بعد از احداث سد، این اطمینان را برای طراحان و پیمانکاران ایجاد می‌کند که استفاده از بند استاندارد ذکر شده در هر شرایطی قابل قبول است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. حوضه‌ی مورد مطالعه

رودخانه‌ی کرخه پس از رودخانه‌های کارون و دز، سومین رودخانه‌ی بزرگ ایران از نقطه‌نظر آبدهی محسوب می‌شود. به منظور شبیه‌سازی الگوی جریان جهت آنالیز هیدرولیکی متاندرها، بازه‌یی از رودخانه‌ی کرخه (پایین‌دست سد کرخه و ایستگاه هیدرومتری پای پل) به طول حدود ۴۰ کیلومتر انتخاب شد. شکل ۱، موقعیت بازه‌ی انتخابی رودخانه‌ی کرخه را نشان می‌دهد. متوسط بارندگی سالانه در ایستگاه هیدرومتری پای پل، ۲۹۰/۶ میلی‌متر است. متوسط، کمینه و بیشینه‌ی دمای سالانه در ایستگاه مذکور به ترتیب برابر با ۲۴/۶، ۹/۵- و ۵۳/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد است. موقعیت جغرافیایی سد کرخه ۳۲°۲۹'۲۱" شرقی و ۴۸°۷'۳۶" شمالی است. طول سد کرخه ۳/۰۳ کیلومتر، پهنای سد در تاج و پی به ترتیب ۱۲ و ۱۱۰ متر است. تعداد توربین‌های آن ۳ عدد و ظرفیت نیروگاه آن ۴۲۰ مگاوات و ظرفیت

به علت تغییر متوالی شعاع انحنای قوس، پارامترهای جریان در مقاطع متاندری نسبت به مقاطع مستقیم به‌طور قابل ملاحظه‌یی پیچیده‌ترند. [۵] ساختار جریان در مجاری روباز مستقیم تحت تأثیر نحوه‌ی توزیع تنش برشی در محیط مرطوب قرار دارد. تعادل جریان‌های یکنواخت به واسطه‌ی وجود تنش برشی بر روی محیط مرطوب کانال و در راستای مسیر حرکت جریان است. از طرفی غیریکنواختی توزیع تنش برشی بر روی بستر و جداری مجاری روباز، موجب خوردگی بستر در نقطه و رسوب‌گذاری در نقاط دیگر می‌شود. متاندرها معمولاً با انحنای قوس‌های متوالی همراه‌اند. شکل عمده‌ی آن‌ها گاه شبیه به هم و در مواردی نیز متفاوت‌اند. ویژگی شکل‌های مذکور با استفاده از عبارت‌هایی، مانند: بزرگی قوس، طول موج، شعاع انحناء و غیره توصیف می‌شود. با توجه به ارتباط پارامترهای ذکر شده با یکدیگر، می‌توان با استفاده از آن‌ها ویژگی‌های متاندرها را بررسی کرد. [۶-۸] مهم‌ترین مشخصه‌ی ساختار جریان در رودخانه‌های متاندری، جهت معکوس چرخش سلول‌های جریان ثانویه در رأس قوس در قبل و بعد از وقوع سیلاب است. شدت و جهت چرخش سلول‌های جریان ثانویه، تأثیر شدیدی در ریخت‌شناسی بستر و کناره‌ها و نیز توزیع عرضی و طولی سرعت دارد. در کانال‌های متاندری ساده، نیروی گریز از مرکز، عامل اصلی ایجاد جریان‌های ثانویه است؛ اما در کانال‌های متاندری مرکب علاوه بر نیروی گریز از مرکز، تنش برشی عرضی بین جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز مهم است و قدرت جریان ثانویه را تشدید می‌کند. مکانیزم مذکور، افت انرژی را افزایش و دبی جریان را کاهش می‌دهد. [۹] رودخانه‌ها سیستم‌های پویایی هستند و فعالیت رواناب‌ها می‌تواند مناطق بالاتر از بستر و لبه‌ی رودخانه‌ها را تغییر دهد، خصوصاً تغییر را در مکان‌های جانبی (کناره‌ها) ایجاد کند. از آنجا که نیروی گریز از مرکز، فشارهای برشی را در سطح مشترک آب و خاک افزایش می‌دهد، پیش‌بینی حرکت متاندرها ضروری است. [۱۰]

مؤلفه‌های درونی نیز شامل مورفولوژی رودخانه، مانند انواع الگوهای رودخانه (متاندری، شریانی و مستقیم) و ویژگی‌های هندسی و هیدرودینامیکی قوس‌های رودخانه‌یی، مواد بستر و کناره‌های رودخانه، متغیرهای هیدرولوژیکی جریان و عامل تنش برشی است که تغییر هر کدام از مؤلفه‌های درونی و خارجی، پایداری رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. [۱۱] با توجه به مسائل و مشکلاتی که رودخانه‌های متاندری در مسیر تشکیل پدید می‌آورند، پژوهشگران مختلف، مطالعاتی را برای گشودن راز تشکیل و آثاری که توسعه‌ی آن‌ها می‌تواند پدید آورد، انجام داده‌اند. نتایج بررسی‌های حاکی از آن است که با توجه به ویژگی‌های محلی، عوامل مختلفی در تشکیل و توسعه‌ی آن‌ها دخیل هستند و همچنین با توجه به ویژگی‌های محلی و نوع سازندهای سطحی و تأسیسات کناری، نوع خسارت و ابعاد آن نیز متفاوت است. [۱۲، ۱۳] نحوه‌ی توزیع تنش به عواملی، نظیر: شکل سطح مقطع، ساختار جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی در زبری کانال بستگی دارد. به‌طورکلی پژوهشگران در تعیین تنش برشی از دو روش استفاده می‌کنند:

۱. گروهی از پژوهشگران از روابط و دیاگرام‌های تنش برشی ذرات در آستانه‌ی حرکت استفاده کرده‌اند. [۱۱، ۱۲، ۲۰]

۲. گروهی دیگر از پژوهشگران از نتایج مدل فیزیکی، آزمایش‌های میدانی و صحرایی استفاده کرده‌اند. [۲۱-۲۵]

در سال‌های اخیر، پژوهشگران متعددی به بررسی اثر ساخت سد در تغییر شکل و انتقال رسوب در رودخانه‌های مختلف پرداختند. در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ی برخی پژوهشگران در مورد اثر ساخت یک سد در کانادا بر روی تغییر مقاطع رودخانه، عرض و طول رودخانه و مقدار رسوب منتقل شده در رودخانه‌ی پایین‌دست اشاره

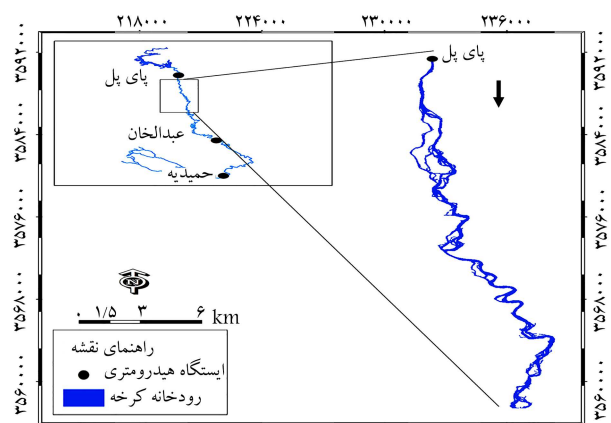
۱.۲.۲. مدل CCHE۲D

مدل CCHE۲D یک مدل دو بعدی متوسط عمقی است، که شرایط جریان در آن به صورت غیرماندگار است و می‌تواند در این حالت جریان آب و رسوب را براساس روش المان‌های محدود شبیه‌سازی کند. این مدل توسط دانشکده مهندسی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی در سال ۲۰۰۱ ابداع شد و یک مدل هیدرودینامیکی است که قادر به شبیه‌سازی انتقال رسوب چسبنده و غیرچسبنده است. مدل CCHE۲D قادر به در نظر گرفتن اثر سازه‌های هیدرولیکی احداث شده در مسیر رودخانه است و می‌تواند تغییر طولی و عرضی رودخانه و جابه‌جایی خم‌ها را شبیه‌سازی کند. قسمت هیدرودینامیکی مدل می‌تواند در حالت‌های یک، دو و سه بعدی اجرا شود و جریان‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی، ماندگار، و غیرماندگار را شبیه‌سازی کند. [۳۲] از مدل CCHE۲D برای محاسبه سرعت و تراز سطح آب در شاخه‌ی اصلی و شاخه‌های فرعی در رودخانه‌های چندشاخه، [۳۳] نشان‌دادن شکل‌های مختلف فرم بستر و نحوه‌ی تشکیل آن‌ها، [۳۴] تغییر جریان در خم رودخانه‌ها در اثر احداث سد، [۳۵] شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و انتقال آلاینده‌ها و رسوب، [۳۶] و بررسی پایداری بستر رودخانه، استفاده شده است. [۳۸]

مدل CCHE۲D برای شبکه‌بندی رودخانه از المان‌های مربعی شکل ۴ گره‌یی استفاده می‌کند. مدل مذکور جهت شبکه‌بندی رودخانه از مدلی با عنوان CCHE۲D Mesh Generator و نیز جهت تولید شبکه از شبکه‌ی ساختاریافته استفاده می‌کند. روش‌های به‌کاررفته جهت تولید شبکه در مدل CCHE۲D به ۲ دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: گروه اول، شامل روش‌های جبری تولید شبکه و گروه دوم، در برگیرنده‌ی روش‌های عددی تولید شبکه هستند. در روش‌های عددی، نحوه‌ی شبکه‌بندی با حل معادلات دیفرانسیل جزئی مرتبط تعیین می‌شود؛ در حالی که در روش‌های جبری، شبکه‌بندی رودخانه مستقیماً با استفاده از میان‌یابی انجام می‌گیرد. هدف اساسی مدل شبکه‌بندی CCHE۲D، بالا بودن کیفیت شبکه‌ی تولید شده است و برای این منظور دو معیار اساسی صاف بودن (تغییرات تدریجی) محیط شبکه‌بندی شده و برهم عمود بودن خطوط شبکه را مد نظر قرار می‌دهد. همچنین مدل CCHE۲D برای حل معادلات پیوستگی و اندازه‌ی حرکت از شبکه‌ی جابه‌جاشده استفاده می‌کند، به گونه‌ی بی‌که در رئوس المان‌های مربعی، سرعت جریان و در مرکز المان‌های مربعی، تراز سطح آب را محاسبه می‌کند.

شرایط مرزی در مدل CCHE۲D به ۳ دسته‌ی شرایط مرزی ورودی، خروجی، مرز مربوط به کناره‌ها و بستر رودخانه تقسیم می‌شوند. برای شرایط مرزی ورودی می‌توان از دبی در واحد عرض یا دبی کل استفاده کرد. در صورت استفاده از دبی کل، با استفاده از رابطه‌ی مانینگ دبی مذکور به دبی در واحد عرض تبدیل می‌شود. با تقسیم دبی در واحد عرض به عمق جریان، سرعت جریان در مرز ورودی به دست می‌آید و در صورت ناماندگاری جریان و معرفی هیدروگراف سیلاب در مرز ورودی با شکستن هیدروگراف به گام‌های زمانی محاسباتی و تعیین دبی میانگین در هر گام زمانی، روند ذکر شده تکرار می‌شود. در صورت عمود نبودن دبی جریان بر مرز ورودی، مدل CCHE۲D قادر است زاویه‌ی بین جریان و مرز ورودی را در نظر گیرد و آن را در جهت عمود بر مرز تصویر کند. همچنین در صورتی که نیاز به معرفی عمق جریان در مرز ورودی باشد، مدل مذکور، عمق جریان را براساس شیب نرمال رودخانه در مرز ورودی محاسبه می‌کند.

در مرز خروجی در حالت ماندگار، مدل CCHE۲D از یک عمق ثابت و در جریان‌های ناماندگار از روابط موج کینماتیکی برای تعیین سطح آب در این مرز استفاده می‌کند. همچنین مانند مرز ورودی، مدل CCHE۲D قادر است زاویه‌ی بین جریان و مرز را نیز در نظر بگیرد. در صورت استفاده از مقدار سرعت در مرز



شکل ۱. موقعیت ناحیه‌ی انتخابی از رودخانه‌ی کرخه.

تولید انرژی سالانه‌ی آن ۹۳۴ گیگاوات - ساعت است. کمینه‌ی تراز بهره‌برداری، تراز نرمال، و تراز سیلابی مربوط به بیشینه‌ی سیلاب محتمل به ترتیب عبارت‌اند از ۱۷۸، ۲۲۰ و ۲۳۰/۶ متر. حجم مرده، مفید و سیلابی برای کنترل بیشینه‌ی سیلاب محتمل به ترتیب عبارت‌اند از ۱۰۳۹، ۳۹۰۰ و ۲۳۱۵/۳ میلیون مترمکعب. مساحت دریاچه‌ی سد مربوط به کمینه‌ی تراز بهره‌برداری، تراز نرمال، و تراز سیلابی مربوط به بیشینه‌ی سیلاب محتمل به ترتیب عبارت‌اند از ۵۲/۲، ۱۶۲/۴۷ و ۲۰۲/۹ کیلومترمربع. دبی بیشینه‌ی سیلاب محتمل برابر با ۱۸۳۹۵ مترمکعب بر ثانیه و طول دریاچه در سیلاب مذکور برابر با ۶۶ کیلومتر است. متوسط دبی سالانه در ایستگاه هیدرومتری پای پل بعد از ساخت سد از ۴۳۰ به ۱۹۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته است (۵۶٪ کاهش). متوسط دبی رسوب سالانه نیز پس از ساخت سد از ۲۱۴۰۳ تن در سال به ۳۱۲۲ تن در سال کاهش یافته است (۸۵٪ کاهش).

۲.۲. روش پژوهش

در پژوهش حاضر که هدف از آن بررسی رابطه‌ی تغییر تنش برشی در طول خم با انحنای نسبی آن در یک رودخانه‌ی متاندری است، تغییرشکل هندسی رودخانه‌ی کرخه در فاصله‌ی تقریبی ۴۰ کیلومتری پایین‌دست ایستگاه پای پل (پایین‌دست سد کرخه) با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CCHE۲D، مدل شد. همچنین تغییر پارامترهای هیدرولیکی رودخانه از جمله تنش برشی در سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۹۰ تعیین شده است.

مراحل انجام پژوهش حاضر به این شرح است:

۱. تفکیک مرز آب و خشکی و تهیه‌ی پلان و پروفیل رودخانه از تصاویر ماهواره‌یی لندست با استفاده از نرم‌افزارهای سنجش از راه دور ILWIS و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS.
۲. کالیبراسیون، روندیابی هیدرولیکی و تعیین مشخصه‌های جریان در بازه‌ی موردنظر از رودخانه‌ی کرخه به وسیله‌ی مدل هیدرودینامیکی CCHE۲D و محاسبه‌ی پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند تنش برشی، سرعت عرضی، طولی و ...
۳. اندازه‌گیری شعاع و عرض خم‌ها و تعیین انحناء نسبی برای خم‌های مختلف.
۴. طبقه‌بندی خم‌ها براساس نتایج تنش برشی به دست آمده از شبیه‌سازی مدل هیدرودینامیکی و انحناء نسبی به دست آمده‌ی آن‌ها.
۵. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در نشریه‌ی ۵۹۲ وزارت نیرو.

Archive of SID

که در آن، $\partial y/\partial \eta$ کسینوس زاویه‌ی بین محور Y و بردار نرمال n خروجی از حجم کنترل و به طور مشابه، $\partial z/\partial \eta$ کسینوس زاویه‌ی بین محور z و بردار نرمال n خروجی از حجم کنترل است. سمت چپ معادله‌ی ۶: نرخ مومنتم خروجی از سطح کنترل A ، دومین ترم سمت راست: مؤلفه‌ی وزن حجم کنترل و ترم سمت راست نیروی برشی: سطح کنترل A است. برای محاسبه‌ی تنش برشی نیاز به تعیین سرعت برشی است. در مدل عددی CCHE2D، دو روش برای تعیین سرعت برشی گنجانده شده است.

-- روش اول: استفاده از قانون لگاریتمی عمق یکپارچه است که از معادله‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{Z} \left[\frac{Z_0}{h} - 1 + \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right] \quad (7)$$

که در آن، U از معادله‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

متغیر Z_0 به اِزاء شرایط مختلف جریان (ارتفاع زبری سطح و ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال) تفاوت دارد و از معادله‌های ۹ الی ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$Z_0 = 0.11 \frac{v}{u} \quad u_* k_s / v \leq 5 \quad (9)$$

$$Z_0 = 0.7 \cdot 2.33 k_s \quad u_* k_s / v \geq 70 \quad (10)$$

$$Z_0 = 0.11 \frac{v}{u_*} + 0.7 \cdot 2.33 k_s \quad 5 \leq u_* k_s / v \leq 70 \quad (11)$$

مؤلفه‌های تنش برشی نهایی از معادله‌های ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند:

$$\tau_{bx} = \frac{1}{\lambda} \rho f_c u U \quad (12)$$

$$\tau_{by} = \frac{1}{\lambda} \rho f_c v U \quad (13)$$

که در آن‌ها، f_c ضریب دارسی و واسیباخ است و از طریق معادله‌های ۱۴ الی ۱۶ محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{f_c}{\lambda} \right)^{-0.5} = 3 + 2.5 \ln \left(\frac{u_* h}{\nu} \right) \quad \frac{u_* k_s}{\nu} \leq 5 \quad (14)$$

$$\left(\frac{f_c}{\lambda} \right)^{-0.5} = 6 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) \quad \frac{u_* k_s}{\nu} \geq 70 \quad (15)$$

$$\left(\frac{f_c}{\lambda} \right)^{-0.5} = 6 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{k_s + 3.7 \frac{\nu}{u_*}} \right) \quad 5 < \frac{u_* k_s}{\nu} < 70 \quad (16)$$

که در آن‌ها، k_s ارتفاع زبری سطح بستر، ν ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال است. از این رو که u^* به صورت ضمنی است، f_c در معادله‌های ۱۴ الی ۱۶ از راه تکرار به دست می‌آید. در این حالت ضریب دارسی - واسیباخ به راحتی می‌تواند پس از محاسبه‌ی u^* به دست آید.

-- روش دوم: روش دوم برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های سرعت و تنش برشی بستر رودخانه، روش ضریب مانینگ است (روابط ۱۷ و ۱۸):

$$\tau_{bx} = \frac{1}{h^{1/3}} \rho g n^2 u U \quad (17)$$

$$\tau_{by} = \frac{1}{h^{1/3}} \rho g n^2 v U \quad (18)$$

خروجی، باید قانون بقاء جرم بین گره‌های مرز ورودی و گره‌های داخلی شبکه‌ی مجاور آن‌ها حفظ شود و جهت سرعت مانند جهت سرعت در گره‌های داخلی شبکه است، که در مجاورت مرز خروجی قرار دارند. در کناره‌ها و بستر رودخانه می‌توان ۳ حالت را در نظر گرفت: کاملاً صلب، کاملاً لغزشی و قسمتی صلب و قسمتی لغزشی. سه حالت مذکور در گام‌های زمانی مختلف به یکدیگر تبدیل می‌شوند. مدل CCHE2D در مجاورت مرزهای لغزشی از توزیع لگاریتمی سرعت استفاده می‌کند. برای جزئیات بیشتر می‌توان به نوشتاری در سال ۲۰۰۱، رجوع کرد. [۳۲]

با توجه به وسعت دامنه‌ی کاربرد مدل CCHE2D در رودخانه‌های مختلف جهان، می‌توان نتیجه گرفت که روش به کار رفته در پژوهش حاضر و نتایج حاصل از آن، قابل تعمیم به سایر رودخانه‌های کشور و جهان است. شبیه‌سازی جریان آب براساس حل معادله‌های متوسط عمقی ناویراستوکس است. تنش برشی متلاطم با استفاده از تخمین بوسینیسک محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی جریان رسوب نیز در مدل CCHE2D با استفاده از مدل‌های انتقال غیرتعدادی انجام می‌گیرد. معادله‌های حاکم بر جریان در مدل CCHE2D، مطابق روابط ۱ الی ۳ هستند:

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g S + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g S + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3)$$

معادله‌ی ۱، معادله پیوستگی و معادله‌های ۲ و ۳، معادله‌های اندازه‌ی حرکت در جهت‌های x و y هستند که در آن‌ها ρ جرم مخصوص آب، g شتاب ثقل، S شیب کانال و τ_{yx} و τ_{zx} به ترتیب تنش‌های برشی در راستای محور X در صفحه‌های $Y - X$ و $Z - X$ هستند. τ_{xy} و τ_{zy} به ترتیب تنش‌های برشی در راستای محور Y در صفحه‌های $Y - X$ و $Z - Y$ هستند. u ، v و w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت جریان در راستای محورهای X ، Y و Z هستند. به‌عنوان مثال معادله‌ی ۲ را می‌توان به صورت معادله‌ی ۴ نوشت:

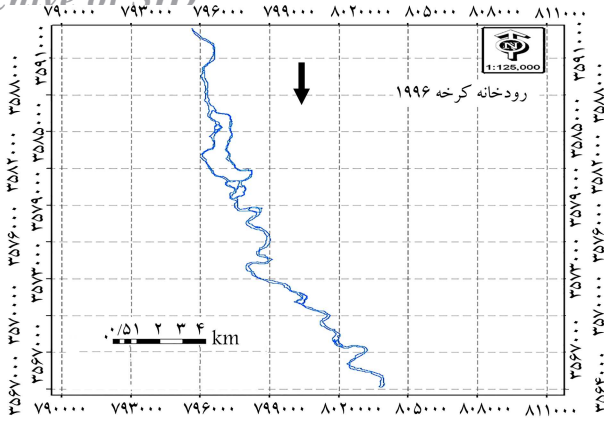
$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho g S + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4)$$

معادله‌ی انتگرال حجمی متناظر با معادله‌ی ۴ را می‌توان به صورت معادله‌ی ۵ نوشت:

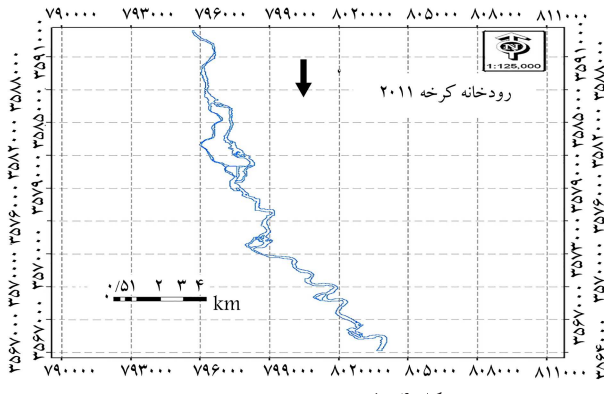
$$\int_v \left[\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \right] dv = \int_v \rho g S dv + \int_v \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dv \quad (5)$$

که در آن معادل با v حجم کنترلی است که دارای سطح A است. با به‌کارگیری قضیه‌ی گوس برای سمت چپ معادله و انتگرال سمت راست معادله‌ی ۵، معادله‌ی ۶ به دست می‌آید:

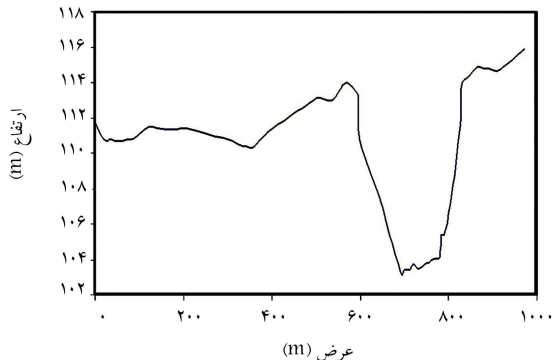
$$\int_A \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = \rho g v S + \int_A \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA \quad (6)$$



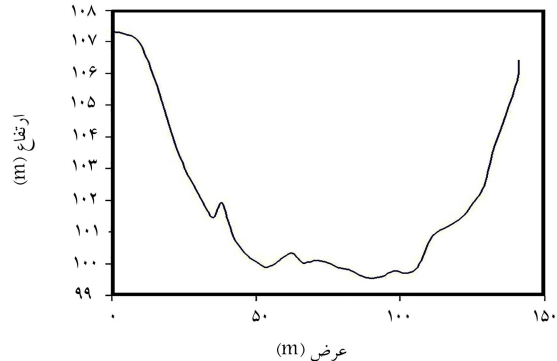
شکل ۳. پلان رودخانه در سال ۱۳۷۵.



شکل ۴. پلان رودخانه در سال ۱۳۹۰.

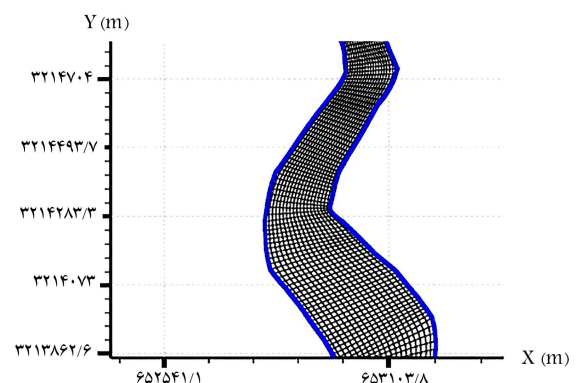


الف) سال ۱۳۷۵؛ عرض (م)



ب) سال ۱۳۹۰؛ عرض (م)

شکل ۵. مقطع رودخانه‌ی کرخه در ایستگاه هیدرومتری پای پل.



شکل ۲. نمونه‌یی از شبکه‌بندی ناحیه‌ی انتخابی رودخانه.

سرعت برشی نیز از معادله‌ی ۱۹ محاسبه می‌شود:

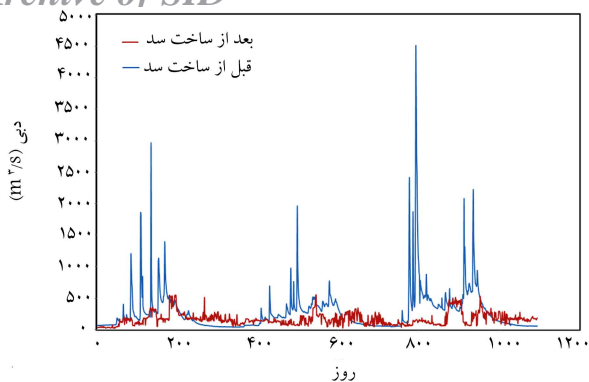
$$u_* = \frac{\tau}{\rho} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (19)$$

در پژوهش حاضر از روش دوم استفاده شده است. در مطالعه‌ی رودخانه‌یی که دسترسی به داده‌های جریان و بستر و کناره‌های رودخانه مشکل است، از روش دوم استفاده می‌شود؛ ولی در مطالعه‌ی آزمایشگاهی که داده‌های مربوط به جریان و بستر و کناره‌های کانال دقیقاً اندازه‌گیری می‌شوند، از روش اول استفاده می‌شود.

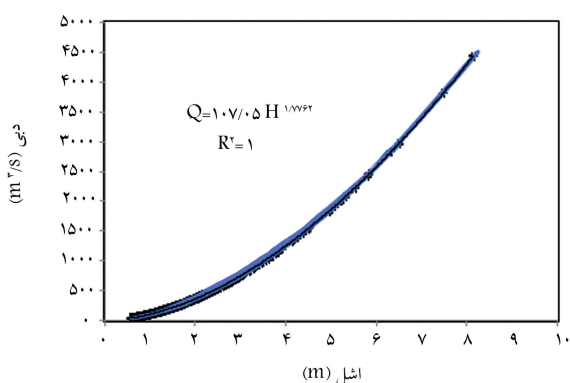
مدل CCHE2D برای شبیه‌سازی انتقال رسوب معلق به حل معادله‌ی پخش - جابه‌جایی می‌پردازد و برای محاسبه‌ی مقدار رسوب کف از معادله‌ی ابداع شده‌ی وان راین (۱۹۹۳)، استفاده می‌کند.^[۲۹] مهم‌ترین خصوصیت‌های جریان آب هنگام شبیه‌سازی، در مدل CCHE2D به این صورت است: قانون بقای جرم در مدل CCHE2D از طریق کاربرد دیدگاه حجم کنترل دقیقاً رعایت می‌شود. تشخیص نقاط ترو خشک در طول شبیه‌سازی براساس عمق مشخصی (معمولاً مقدار آن بسیار اندک است، مثلاً ۰/۱ سانتی‌متر) که کاربر به مدل معرفی می‌کند، انجام می‌شود. در طول شبیه‌سازی، نقاطی که عمقی کمتر از عمق مشخص ذکر شده داشته باشند، به‌عنوان نقاط خشک در نظر گرفته می‌شوند. این مشخصه به‌خصوص هنگامی که شرایط جریان غیرماندگار است، اهمیت پیدا می‌کند. شکل ۲، نمونه‌یی از شبکه‌بندی بازه‌ی انتخابی رودخانه در مدل CCHE2D را نشان می‌دهد.

۳. نتایج

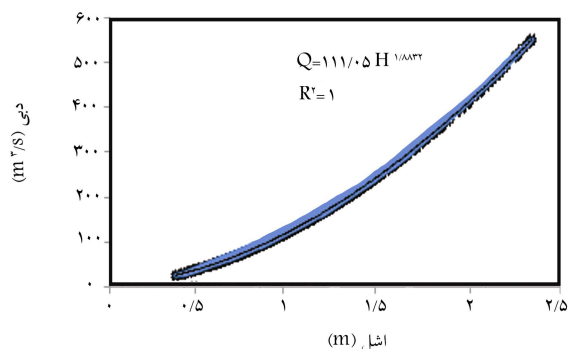
روندبایی هیدرولیکی جریان غیرماندگار و تعیین مشخصه‌های آن در بازه‌ی موردنظر از رودخانه‌ی کرخه به وسیله‌ی مدل هیدرودینامیکی CCHE2D انجام شد. برای این منظور در ابتدا مشخصه‌های هندسی بازه‌ی موردنظر شامل پلان و مقاطع رودخانه به مدل معرفی شد. طول مطالعاتی رودخانه در پژوهش حاضر، ۴۴/۲ کیلومتر و تعداد مقاطع برداشت شده برابر با ۳۴ عدد بود. کمینه و بیشینه‌ی فاصله بین مقاطع به ترتیب عبارت‌اند از: ۸۶ و ۲۳۱۸ متر. همچنین در محل‌هایی که قوس وجود داشته‌است، مقاطع برداشت شده‌اند. این تذکر لازم است که در پژوهش حاضر از پلان و مقاطع تهیه شده توسط سازمان آب و برق خوزستان در سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۹۰ استفاده شد. این اطلاعات توسط عملیات نقشه‌برداری تهیه شده‌اند و در شکل‌های ۳ الی ۶ مشاهده می‌شوند.



شکل ۷. هیدروگراف ۳ سال متوالی.

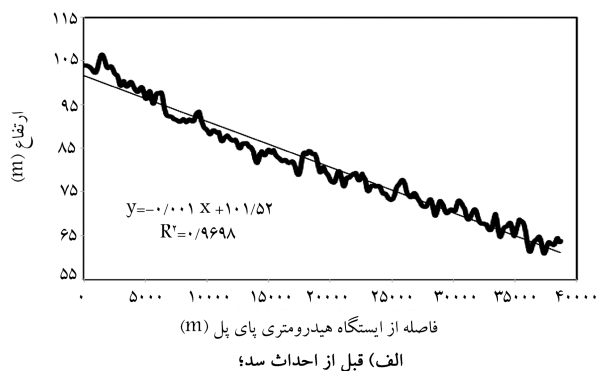


شکل ۸. منحنی دبی - اشل در مرز پایین دست قبل از ساخت سد.

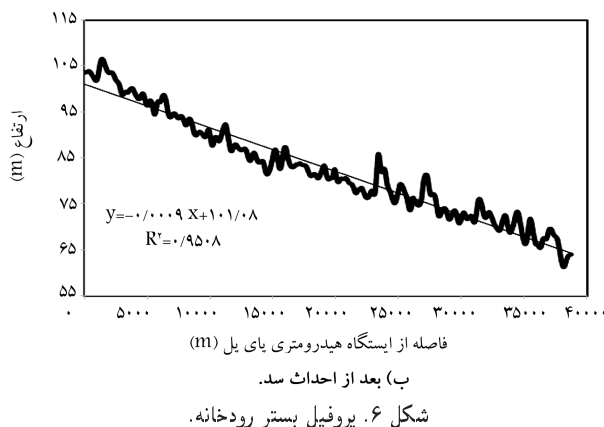


شکل ۹. منحنی دبی - اشل در مرز پایین دست بعد از ساخت سد.

زمانی مؤثر است و تأثیر دبی متوسط رودخانه در درازمدت به مراتب بیش از تأثیر یک سیلاب زودگذر است. به این دلیل در پژوهش حاضر، هیدروگراف ۳ سال متوالی دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری بالادست تهیه و به عنوان ورودی مدل انتخاب شده است. برای قبل از احداث سد، دبی‌های مهر ۱۳۷۲ تا شهریور ۱۳۷۵ و برای بعد از احداث سد، از مهر ۱۳۸۷ تا شهریور ۱۳۹۰ انتخاب شده است. شکل ۷، هیدروگراف ۳ سال متوالی قبل و بعد از احداث سد و همچنین هیدروگراف‌های ورودی جریان به مدل CCHE2D را نشان می‌دهد. هیدروگراف‌های مذکور به عنوان شرایط مرزی بالادست به مدل معرفی می‌شوند. همچنین برای شرط مرزی پایین دست، منحنی‌های دبی - اشل در آخرین مقطع رودخانه به مدل معرفی شدند. برای این منظور، دو منحنی اشل - دبی مربوط به قبل و بعد از ساخت سد تهیه شد که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شوند.



الف) قبل از احداث سد؛



ب) بعد از احداث سد.
شکل ۶. پروفیل بستر رودخانه.

جدول ۱. مقدار کمیته، متوسط و بیشینه‌ی شیب بر حسب درصد قبل از ساخت سد.

فاصله از ایستگاه پای پل (km)	شیب	
	متوسط	بیشینه
۱۰-۰	۰٫۱۵۳	۱٫۱۸۳
۲۰-۱۰	۰٫۱۴۳	۱٫۶۷۱
۳۰-۲۰	۰٫۱۴۶	۱٫۷۰۳
۴۰-۳۰	۰٫۱۶۹	۱٫۹۷۴
کل بازه	۰٫۱۵۲۸	۱٫۷۹۴۸

جدول ۲. مقدار کمیته، متوسط و بیشینه‌ی شیب بر حسب درصد بعد از ساخت سد.

فاصله از ایستگاه پای پل (km)	شیب	
	متوسط	بیشینه
۱۰-۰	۰٫۱۰۷	۱٫۷۹۴
۲۰-۱۰	۰٫۱۰۱	۱٫۶۸۷
۳۰-۲۰	۰٫۱۱۸	۱٫۶۸۶
۴۰-۳۰	۰٫۱۴۱	۱٫۹۸۱
کل بازه	۰٫۱۱۷	۱٫۷۸۷

مقدار کمیته، متوسط و بیشینه‌ی شیب در بازه‌های ۱۰ کیلومتری رودخانه قبل و بعد از احداث سد در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. این تذکر لازم است که مدل برای محاسبه‌ی شیب رودخانه، خط‌القدر رودخانه در مقاطع مختلف رودخانه را در نظر می‌گیرد و به وسیله‌ی اختلاف ارتفاع بین خط‌القدر مقاطع متوالی و فاصله‌ی بین آن‌ها، شیب رودخانه در بین دو مقطع را مشخص می‌کند. دومین نوع داده‌های ورودی به مدل هیدرولیکی، شرایط مرزی مدل است. در فرسایش‌پذیری جداره و بستر رودخانه‌ها، اثر طولانی مدت دبی رودخانه در یک بازه‌ی

جدول ۳. نتایج آنالیز حساسیت نسبت به ضریب مانینگ (قبل از احداث سد).

درصد تغییر ضریب مانینگ	بیشینه‌ی تغییر تراز سطح آب (cm)	نسبت به حالت کالیبره شده (دبی مرتبط بر حسب CMS)
۱	۳۴	۶
	(۴۴۴۰)	(۷۶)
۵	۵۴	۷٫۴۱
	(۴۴۴۰)	(۱۲۱۰)
۱۰	۸۸	۱۳
	(۴۴۴۰)	(۷۶)
-۱	-۴۸	۵٫۵۵
	(۴۴۴۰)	(۴۴۴۰)
-۵	-۶۴	۷٫۴
	(۴۴۴۰)	(۴۴۴۰)
-۱۰	-۸۱	۹٫۳۶
	(۴۴۴۰)	(۴۴۴۰)

جدول ۴. نتایج آنالیز حساسیت نسبت به ضریب مانینگ (بعد از احداث سد).

درصد تغییر ضریب مانینگ	بیشینه‌ی تغییر تراز سطح آب (cm)	نسبت به حالت کالیبره شده (دبی مرتبط بر حسب CMS)
۱	۹	۶٫۳۳
	(۱۸ و ۱۵۹)	(۲۱)
۵	۱۶	۱۰٫۱۳
	(۱۵۹)	(۲۱)
۱۰	۲۴	۱۲٫۸
	(۱۸۱)	(۱۵۹)
-۱	-۱۷	۶٫۹۸
	(۱۸۱)	(۱۸)
-۵	-۲۰	۹٫۹۳
	(۱۸۱)	(۱۲۰)
-۱۰	-۲۶	۱۴٫۳۲
	(۱۸۱)	(۱۸)

جدول ۵. نمونه‌ی نتایج تنش برشی مدل CCHE2D برای چند نقطه از شبکه‌ی جریان.

تنش برشی (Nm^{-2})		مختصات در محور (m)	
کل	در محور Y	X	Y
۷٫۴۴	-۳٫۲۴	۲۲۹۹۷۴٫۰۶	۳۵۸۳۹۶۳٫۰۲
۴٫۶۲	-۳٫۰۵	۲۳۰۲۱۱٫۳۴	۳۵۷۶۱۱۶٫۲۶
۲٫۲۴	-۱٫۶۶	۲۳۲۵۱۳٫۰۷	۳۵۸۳۴۳۷٫۷۸

ریخت‌شناسی رودخانه‌ها نشریه‌ی ۵۹۲ از لحاظ تنش برشی در متاندرها و تعیین نواحی فرسایش‌پذیر در آن‌ها با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل دو بعدی CCHE2D است. انحنای نسبی، یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین توزیع تنش برشی در خم‌هاست. برای یک خم با انحنای نسبی بیش از ۳٫۵، توزیع تنش برشی تقریباً در ناحیه‌ی ورودی خم، یکنواخت است و یک ناحیه‌ی تنش برشی قوی در

در ادامه، به وسیله‌ی کالیبراسیون مدل CCHE2D، مقدار ضریب مانینگ برای بازه‌های مختلف رودخانه‌ی کرخه قبل و بعد از ساخت سد مشخص شد. این تذکر لازم است که برای کالیبراسیون مدل از تراز مشاهداتی سطح آب در ایستگاه پای پل استفاده و با تغییر دادن ضریب مانینگ در قسمت‌های مختلف رودخانه، در نهایت برای هر قسمت ضریب مانینگ انتخاب شد که تراز محاسباتی سطح آب در ایستگاه پای پل، بهترین انطباق را با تراز مشاهداتی داشته باشد. برای بررسی میزان انطباق بین تراز مشاهداتی و محاسباتی از معیار خطا RMSE استفاده شد. برای این منظور رودخانه به ۴ بازه تقسیم شد. بازه اول از ایستگاه پای پل شروع و به ۱۲٫۳ کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌شد. بازه دوم از انتهای بازه اول شروع و به ۲۰٫۱ کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌شد. بازه سوم از انتهای بازه دوم شروع و به ۳۰٫۵ کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌شد. بازه چهارم از انتهای بازه سوم شروع و به ۴۴٫۲ کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌شد. در قبل از احداث سد با استفاده از ۹ مقدار دبی مشاهداتی، که بین ۶۳ تا ۴۴۰ مترمکعب بر ثانیه بودند، با کالیبراسیون مدل، این نتایج حاصل شد: در بازه اول، مقدار ضریب مانینگ ۰٫۳۹ تا ۰٫۴۲، در بازه دوم مقدار ضریب مانینگ ۰٫۳۶ تا ۰٫۳۸ و در بازه سوم مقدار ضریب مانینگ ۰٫۳۴ تا ۰٫۳۸ به دست آمد. بیشترین مقدار خطای نسبی ۲٫۲٪، بیشترین اختلاف بین اشل محاسباتی و مشاهداتی ۱۰ سانتی‌متر و مقدار RMSE ۴٫۲۴ سانتی‌متر به دست آمد.

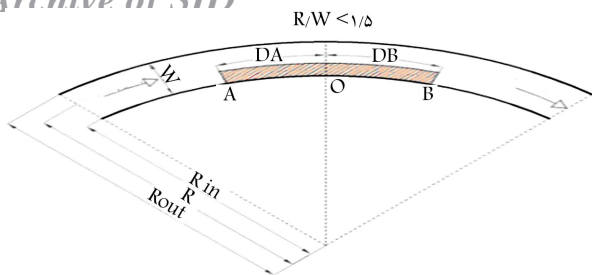
در بعد از احداث سد با استفاده از ۹ مقدار دبی مشاهداتی، که بین ۱۸ تا ۱۸۱ مترمکعب بر ثانیه بودند، با کالیبراسیون مدل، این نتایج حاصل شد: در بازه اول، مقدار ضریب مانینگ ۰٫۳۹ تا ۰٫۴۲، در بازه دوم مقدار ضریب مانینگ ۰٫۳۶ تا ۰٫۳۸ و در بازه سوم مقدار ضریب مانینگ ۰٫۳۴ تا ۰٫۳۶ به دست آمد. به عبارتی دیگر، تغییری در ضریب مانینگ قبل و بعد از احداث سد حاصل نشد. بیشترین مقدار خطای نسبی ۲٪، بیشترین اختلاف بین اشل محاسباتی و مشاهداتی ۴ سانتی‌متر و مقدار RMSE ۲٫۰۲ سانتی‌متر به دست آمد.

دلیل کاهش ضریب مانینگ از بالادست به پایین دست، کاهش قطر و زبری مواد رسوبی کف و کناره‌های رودخانه به سمت پایین دست رودخانه است. افزایش درصد رس و لای و کاهش درصد ماسه به سمت پایین دست نیز عاملی دیگر در جهت کاهش ضریب مانینگ است. همچنین در پژوهش حاضر، آنالیز حساسیت نسبت به تغییر ضریب مانینگ برای قبل و بعد از احداث سد انجام و نتایج حاصل در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. پس از کالیبراسیون مدل، مدل به محاسبه‌ی تنش برشی در نقاط مختلف شبکه‌ی جریان پرداخت. نمونه‌ی نتایج برای چند نقطه از شبکه‌ی جریان (تنش برشی) در جدول ۵ ارائه شده است. در مرحله‌ی بعد، اندازه‌گیری شعاع و عرض خم‌ها و تعیین انحنای نسبی برای آن‌ها انجام شد. در شکل ۱۰، نقشه‌ی دایره‌های محاط شده در خم‌ها در سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۹۰ مشاهده می‌شوند.

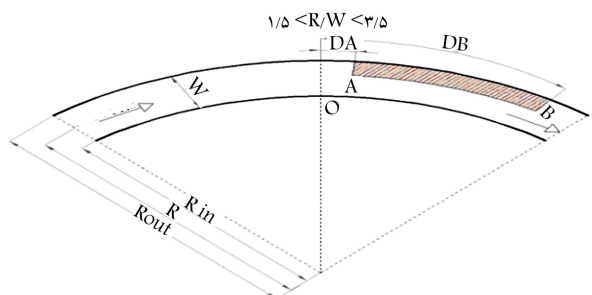
تقسیم‌بندی موجود در استاندارد وزارت نیرو (راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها: نشریه‌ی ۵۹۲) ۳ قسمت دارد که بررسی‌ها فقط به صورت کیفی ارائه شده است. شکل ۱۱، روند تغییر تنش برشی بیشینه در طول قوس با شعاع انحنای مختلف در نشریه‌ی ۵۹۲ را نشان می‌دهد (صفحه‌ی ۱۳۹، بخش ۴-۶-۳، نشریه‌ی ۵۹۲ با عنوان پیش‌بینی روند تغییر شکل خم‌ها). این تذکر لازم است که بخش حاضر از نشریه، از مراجع^[۲۱] هستند.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی صحت استاندارد وزارت نیرو (راهنمای مطالعات

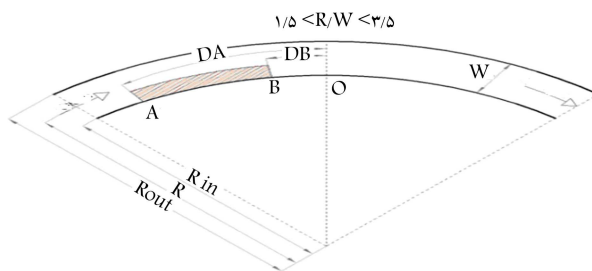
Archive of SID



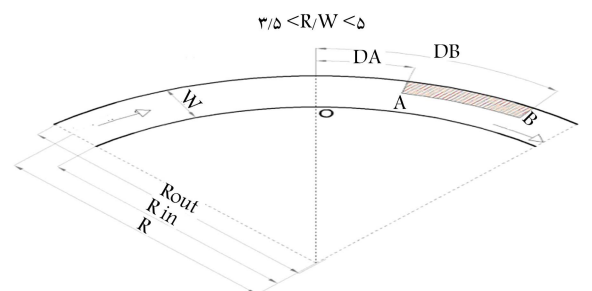
شکل ۱۲. بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی در خم‌هایی با $R/W < 1/5$.



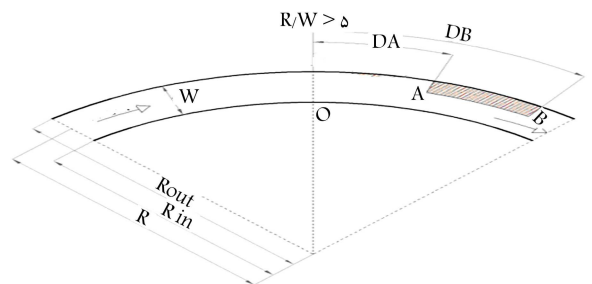
شکل ۱۳. بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی در خم‌هایی با $1/5 < R/W < 3/5$ (قوس خارجی).



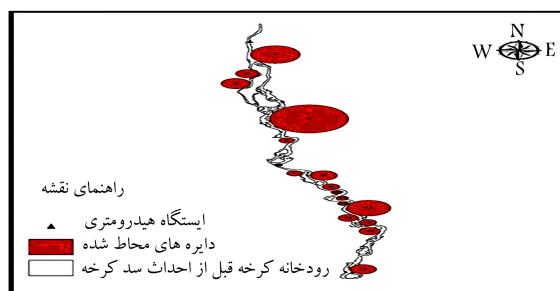
شکل ۱۴. بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی در خم‌هایی با $1/5 < R/W < 3/5$ (قوس داخلی).



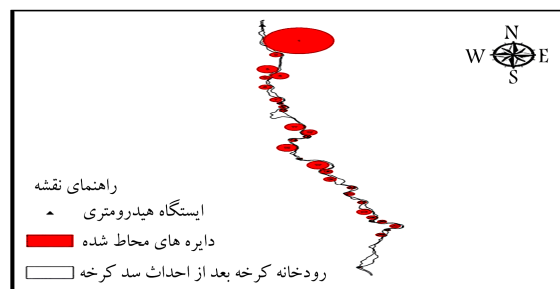
شکل ۱۵. بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی در خم‌هایی با $3/5 < R/W < 5$.



شکل ۱۶. بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی در خم‌هایی با $R/W > 5$.

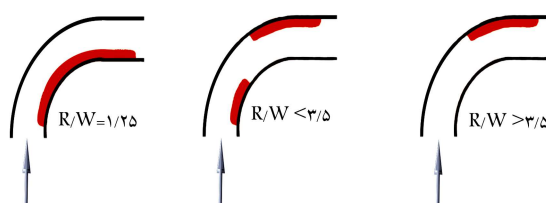


الف) در سال ۱۳۷۵



ب) در سال ۱۳۹۰

شکل ۱۰. نقشه‌ی دایره‌های محاط‌شده در خم‌ها.



ناحیه با تنش برشی بالا

شکل ۱۱. بازه‌هایی با تنش برشی بالا در خم رودخانه با شعاع انحنای مختلف.

نزدیکی انتهای قوس خارجی اتفاق می‌افتد. با کاهش مقدار انحنای نسبی خم از مقدار $3/5$ ، دو منطقه‌ی تنش برشی قوی در قسمت انتهایی قوس خارجی و در قسمت ابتدای قوس داخلی رخ می‌دهد. هنگامی که مقدار انحنای نسبی قوس تا حدود $1/5$ کاهش یابد، یک ناحیه‌ی تنش برشی خیلی قوی در تمام قسمت داخلی قوس به وقوع می‌پیوندد. [۴]۱۴۰

نتایج حاصل از پژوهش حاضر به صورت شکل‌های ۱۲ الی ۱۶ جمع‌بندی شده‌اند؛ که در آن‌ها، R شعاع متوسط خم، W عرض متوسط خم، D فاصله‌ی نقطه‌ی موردنظر در بازه‌ی وقوع بیشینه‌ی تنش برشی تا رأس قوس (نقطه‌ی O)، و $\bar{\tau}/\tau_0$: نسبت متوسط تنش برشی در بازه‌ی که بیشینه‌ی تنش برشی در آن رخ می‌دهد، به تنش برشی رأس خم است.

۱. شکل ۱۲: بازه‌ی $R/W < 1/5$ (بازه‌ی که در آن بیشینه‌ی تنش برشی رخ می‌دهد): قبل از احداث سد، تعداد خم‌ها ۴ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/W و D/R به ترتیب برابر $0/56$ و $0/45$ و در نقطه‌ی B ، مقدار D/W و D/R به ترتیب برابر $0/48$ و $0/41$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 100% (۴ خم) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $1/51$ است.

بعد از احداث سد، تعداد خم‌ها ۶ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/W و

دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $3/85$ است. بعد از احداث سد، تعداد خم‌ها ۹ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/11$ و $0/11$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $2/7$ و $0/62$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 89% (خم ۸) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $4/47$ است. به طور متوسط برای خم‌های ذکر شده، در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/41$ و $0/09$ و در نقطه‌ی B مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $2/4$ و $0/56$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 91% با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $4/35$ است.

۵. شکل ۱۶: بازه‌ی $R/W > 5$ (بازه‌ی که در آن بیشینه‌ی تنش برشی رخ می‌دهد): قبل از احداث سد، تعداد خم‌ها ۴ عدد بود، که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/23$ و $0/2$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/94$ و $0/3$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 100% (خم ۴) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $2/69$ است.

بعد از احداث سد، تعداد خم‌ها ۷ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $5/33$ و $0/88$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $7/84$ و $1/31$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 86% (خم ۶) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $7/14$ است.

به طور متوسط برای خم‌های مذکور در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $3/69$ و $0/6$ و در نقطه‌ی B مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $5/48$ و $0/9$ هستند. در خم‌های ذکر شده نیز محل بازه با احتمال 91% با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $3/22$ است. این تذکر لازم است که قبل از احداث سد، مجموعاً ۲۴ خم بررسی و مشاهده شد که نتایج مدل CCHE2D به طور متوسط در $87/5\%$ (۲۱ خم) از خم‌ها، توصیه‌های نشریه‌ی ۵۹۲ را تأیید می‌کنند. بعد از احداث سد، مجموعاً ۴۲ خم بررسی و مشاهده شد که نتایج مدل CCHE2D به طور متوسط در 81% (۳۴ خم) از خم‌ها، توصیه‌های نشریه‌ی ۵۹۲ را تأیید می‌کنند.

همچنین محل بازه‌هایی که در آن‌ها بیشینه‌ی تنش برشی رخ داده است، نکاتی را به این شرح از لحاظ هیدرولیکی تأیید می‌کنند: در خم‌ها در قوس خارجی، فشار بیشتر و سرعت کمتر است. بنابراین در قوس خارجی، تنش برشی کمتر است و عمده‌ی فرسایش در قوس داخلی رخ می‌دهد. این امر در خم‌هایی که شعاع کمتر و یا به عبارتی R/W کمتری دارند، بیشتر مشاهده می‌شود، چون گرادیان فشار بین قوس‌های داخلی و خارجی بیشتر است و سرعت در قوس داخلی افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای بازه‌ی $R/W < 1/5$ ، بیشینه‌ی تنش برشی در قوس داخلی مشاهده می‌شود. با افزایش شعاع بازه، بیشینه‌ی تنش برشی به قوس خارجی منتقل می‌شود، که دلیل آن تبدیل خم با افزایش شعاع به سمت بازه‌ی مستقیم است. همچنین در بازه‌ی $R/W < 3/5$ و $1/5 < R/W < 3/5$ ، بازه‌ی مذکور در هر دو قوس داخلی و خارجی مشاهده می‌شود و با افزایش R/W ، بازه‌ی ذکر شده فقط در قوس خارجی مشاهده و به سمت پایین دست منتقل می‌شود.

D/R به ترتیب برابر $0/74$ و $0/6$ و در نقطه‌ی B مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/74$ و $0/67$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 86% (خم ۵) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $1/3$ است. به طور متوسط برای خم‌های مذکور در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/66$ و $0/53$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/63$ و $0/56$ هستند. در خم‌های ذکر شده، محل بازه با احتمال 90% با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $1/38$ است.

۲. شکل ۱۳: بازه‌ی $1/5 < R/W < 3/5$ (قوس خارجی) (بازه‌ی که در آن بیشینه‌ی تنش برشی رخ می‌دهد).

قبل از احداث سد، تعداد خم‌ها ۷ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/5$ و $0/5$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/6$ و $0/8$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 86% (خم ۶) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $2/2$ است. بعد از احداث سد، تعداد خم‌ها ۱۰ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/42$ و $0/69$ و در نقطه‌ی B مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $3/25$ و $1/41$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 80% (خم ۸) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $3/23$ است.

به طور متوسط برای خم‌های مذکور در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/23$ و $0/61$ و در نقطه‌ی B مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $2/53$ و $1/15$ هستند. در خم‌های ذکر شده، محل بازه با احتمال 82% با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $2/78$ است.

۳. شکل ۱۴: بازه‌ی $1/5 < R/W < 3/5$ (قوس داخلی) (بازه‌ی که در آن بیشینه‌ی تنش برشی رخ می‌دهد).

قبل از احداث سد، تعداد خم‌ها ۷ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/25$ و $0/53$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/55$ و $0/22$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 71% (خم ۵) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $1/99$ است.

بعد از احداث سد، تعداد خم‌ها ۱۰ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $2/92$ و $1/11$ و در نقطه‌ی B مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/21$ و $0/09$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 70% (خم ۷) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $1/98$ است.

به طور متوسط برای خم‌های مذکور، در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $2/22$ و $0/87$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/35$ و $0/14$ هستند. در خم‌های مذکور محل بازه با احتمال 71% با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق دارد و مقدار $\bar{\tau}/\tau_0$ برابر $1/98$ است.

۴. شکل ۱۵: بازه‌ی $3/5 < R/W < 5$ (بازه‌ی که در آن بیشینه‌ی تنش برشی رخ می‌دهد): قبل از احداث سد، تعداد خم‌ها ۲ عدد بود که در نقطه‌ی A مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $0/13$ و $0/4$ و در نقطه‌ی B، مقدار D/R و D/W به ترتیب برابر $1/19$ و $0/31$ هستند. در خم‌های مذکور، محل بازه با احتمال 100% (خم ۲) با محل پیشنهادی نشریه‌ی ۵۹۲ انطباق

۴. نتیجه‌گیری

شناسایی بازه‌هایی که در خم‌ها، مقدار تنش برشی بیشینه است، امر بسیار مهمی برای مهندسان رودخانه است؛ زیرا در بازه‌ها بیشینه‌ی فرسایش رخ می‌دهد و حتی‌الامکان نباید در آن قسمت‌ها، سازه‌های آبی ایجاد شود. اما محل بازه‌های ذکر شده به عوامل متعددی، مانند پهنا و شعاع خم بستگی دارد و مهم‌ترین عامل در تعیین محل آن‌ها، انحنا‌ی نسبی یا R/W است. برای این منظور استانداردهایی توسط وزارت نیرو مانند نشریه‌ی ۵۹۲ تهیه شده است. مهم‌ترین هدف پژوهش حاضر، صحت‌سنجی بند مربوط به این موضوع در نشریه بود، که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی، GIS و نرم‌افزار CCHE2D صحت بند مذکور اثبات شد. بنابراین طراحان و مهندسان

Archive of SID

رودخانه می‌توانند در طراحی‌های خود از بند مورد نظر استفاده کنند. برای این منظور ایشان باید با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی و عکس‌های هوایی، محل خم‌ها را مشخص و سپس مقدار R/W آن‌ها را محاسبه و با استفاده از نشریه‌ی ۵۹۲، محل تنش برشی بیشینه در خم را مشخص کنند. در محل‌های مذکور به دلیل وقوع فرسایش شدید، از احداث سازه‌هایی مانند آبگیرها، پل‌ها، و غیره باید خودداری کرد. همچنین پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بعد از احداث سد، تعداد خم‌های رودخانه تقریباً ۲ برابر شده است، ولی درصد صحت توصیه‌های نشریه‌ی ۵۹۲ تغییری نکرده است. این موضوع نشان می‌دهد که هر چند احداث سد تغییر شدیدی در شکل، مورفولوژی، شرایط هیدرولیکی و رسوبی رودخانه ایجاد می‌کند، ولی در محل ایجاد تنش‌های برشی بیشینه در خم‌های رودخانه تغییری حاصل نمی‌شود.

منابع (References)

1. Leschziner, M.A. and Rodi, W. "Calculation of strongly curved open channel flow", *Journal of Hydraulic Division*, **105**(HY10), pp. 1297-1314 (1979).
2. Bridge, J.S. "A revised model for water flow, sediment transport, bed topography and grain size sorting in natural river bends", *Water Resources Research*, **28**(4), pp. 999-1013 (1992).
3. Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R.H.J. "Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, **126**(9), pp. 653-669 (2000).
4. Shiono, K. and Muto, Y. "Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow", *Journal of Fluid Mechanics*, **376**, pp. 221-261 (1998).
5. Patra, K.C., Kar, S.K. and Bhattacharya, A.K. "Flow and velocity distribution in meandering compound channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(5), pp. 398-411 (2004).
6. Abad, J.D. and Garcia, M.H. "RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams", *Computers & Geosciences*, **32**(1), pp. 92-101 (2006).
7. Amsler, M.L., Ramonell, C.G. and Toniolo, H.A. "Morphologic changes in the Parana river channel (Argentina) in the light of the climate variability during the 20th century", *Geomorphology*, **70**(3-4), pp. 257-278 (2005).
8. Malik, I. and Matyja, M. "Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bila Opava River-Czech Republic)", *Geomorphology*, **98**(1-2), pp. 126-142 (2008).
9. Ervine, D., Sellin, R.J. and Willetts, B.B. "Large flow structures in meandering compound channels", *9th Int. Conf. on River Flood Hydraulics. W.R. White and J. Watts (eds)*, pp. 459-469, H.R. Wallingford Ltd. and John Wiley & sons, Chichester, UK (1994).
10. Briaud, J.L., Chen, H.C., Edge, B. and et al. "Guidelines for bridges over degrading and migrating streams", Report No. TX-01/2105-2, Part 1, Synthesis of existing knowledge, Texas Transportation Institute (2001).
11. Amiri-Tokaldany, E., Darby, S.E. and Tossell, P. "Coupling bank stability and bed deformation models to predict equilibrium bed topography in river bends", *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(10), pp. 1167-1170 (2007).
12. Rütther, N. and Olsen, N.R.B. "Modelling free-forming meander evolution in a laboratory channel using three-dimensional computational fluid dynamics", *Geomorphology*, **89**(3-4), pp. 308-319 (2007).
13. Verhaar, P.M., Biron, P.M., Ferguson, R.I. and et al. "A modified morphodynamic model for investigating the response of rivers to short-term climate change", *Geomorphology*, **101**(4), pp. 674-682 (2008).
14. Chang, H.H. "Energy expenditure in curved open channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(7), pp. 1012-1022 (1983).
15. Chang, H.H. "Water and sediment routing through curved channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, **111**(4), pp. 644-658 (1985).
16. Chang, H.H. "Selection of gravel-transport formula for stream modeling", *Journal of Hydraulic Engineering*, **120**(5), pp. 646-651 (1994).
17. Chang, H.H., Harrison, L.L., Lee, W. and et al. "Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, **122**(7), pp. 381-388 (1996).
18. Chang, H.H. and Hill, J.C. "Minimum stream power for rivers and deltas", *Journal of Hydraulic Division*, **103**(HY12), pp. 1375-1389 (1977).
19. Chang, H.H. and Stow, D. "Mathematical modeling of fluvial sand delivery", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **115**(3), pp. 311-326 (1989).
20. Yang, C.T., *Sediment Transport: Theory and Practice*, McGraw-hill. New York, 396 p. (1996).

21. Haynes, H. and Pender, G. "Stress history effects on graded bed stability", *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(4), pp. 343-349 (2007).
22. Kean, J.W., Kuhnle, R.A., Smith, D. and et al. "Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress", *Journal of Hydraulic Engineering*, **135**(7), pp. 588-601 (2009).
23. Thoman, R.W. and Niezgod, S.L. "Determining erodibility, critical shear stress, and allowable discharge estimates for cohesive channels: Case study in the Powder River basin of Wyoming", *Journal of Hydraulic Engineering*, **134**(12), pp. 1677-1687 (2008).
24. Thornton, C.I., Ursic, M.E., Baird, D.C. and et al. "Evaluating boundary shear stresses in natural-shaped channel bendways", World Environmental and Water Resources Congress 2012, ASCE., pp. 1366-1375, Albuquerque, New Mexico, United States (2012).
25. Wilcock, P.R. "Critical shear stress of natural sediments", *Journal of Hydraulic Engineering*, **119**(4), pp. 491-505 (1993).
26. Smith, N.D., Morozova, G.S., Perez-Arluca, M. and et al. "Dam-induced and natural channel changes in the Saskatchewan river below the E.B. Campbell Dam, Canada", *Geomorphology*, **269**, pp. 186-202 (2016).
27. Haghghi, A.T., Marttila, H. and Klove, B. Development of a new index to assess river regime impacts after dam construction", *Global and Planetary Change*, **122**, pp. 186-196 (2014).
28. Casado, A., Peiry, J.L. and Campo, A.M. "Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated by a large dam, Sauce Grande River, Argentina", *Geomorphology*, **268**, pp. 21-34 (2016).
29. Termini, D. "Experimental analysis of the effect of vegetation on flow and bed shear stress distribution in high-curvature bends", *Geomorphology*, **274**, pp. 1-10 (2016).
30. Wei, M., Blanckaert, K., Heyman, J. and et al. "A parametrical study on secondary flow in sharp open-channel bends: Experiments and theoretical modelling", *Journal of Hydro-environment Research*, **13**, pp. 1-13 (2016).
31. Jing, H., Li, C., Guo, Y. and et al. "Modelling of sediment transport and bed deformation in rivers with continuous bends", *Journal of Hydrology*, **499**, pp. 224-235 (2013).
32. Jia, Y. and Wang, S.S.Y. "CCHE2D: Two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flows over loose bed", Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1, School of Engineering, The University of Mississippi, University, MS 38677 (2001).
33. Khan, A.A., Cadavid, R. and Wang, S.S.Y. "Simulation of channel confluence and bifurcation using the CCHE2D model", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering*, **142**(2), pp. 97-102 (2000).
34. Duan, J.G., Wang, S.S.Y. and Jia, Y. "The applications of the enhanced CCHE2D model to study the alluvial channel migration processes", *Journal of Hydraulic Research*, **39**(5), pp. 469-480 (2001).
35. Kim, Y.S., Jang, C.L., Lee, G.H. and et al. "Investigation of flow characteristics of sharply curved channels by using CCHE2D model", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **10**(5), pp. 125-133 (2010).
36. Nassar, M.A. "Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile river", *Journal of Hydro-Environment Research*, **5**(3), pp. 187-195 (2011).
37. Hasan, Z.A., Lee, K.H., Azamathulla, H.M. and et al. "Flow simulation for lake Harapan using CCHE2D- a case study", *International Journal of Modelling and Simulation*, **31**(1), pp. 85-89 (2011).
38. Jang, E.K., Ji, U., Kwon, Y.S. and et al. "Investigation for bed stabilization methods in the upstream channel of haman weir using CCHE2D model", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, **33**(6), pp. 2211-2221 (2013).
39. Van Rijn, L.C. "Principles of sediment transport in rivers estuaries and coastal seas", Aqua Publications, The Netherlands (1993).
40. Brice, J.C. "Stream channel stability assessment", Report No. FHWA-RD-82-021, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., U.S.A., 45 p. (1982).
41. Cramer, M.L. "Stream habitat restoration guidelines", Co-published by the Washington Departments of Fish and Wildlife, Natural Resources, Transportation and Ecology, Washington State Recreation and Conservation Office, Puget Sound Partnership, and the U.S. Fish and Wildlife Service, Olympia, Washington (2012).