

ارائه روشی تلفیقی به منظور بررسی تأثیر سد مخزنی بر فرسایش، طول و عرض رودخانه

علی لیاقت¹، آرش ادیب^{2*}، حمیدرضا غفوری³

1- دانشجوی دکتری عمران آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

2- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

3- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*arashadib@yahoo.com

چکیده - شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان و تنش برشی در قوس رودخانه‌ها، دارای اهمیت زیادی بوده و در حفاظت سواحل رودخانه‌ها کاربرد دارد. تهیه نقشه مقاومت فرسایشی خاک (آبرفت) به روش معمول بسیار وقتگیر و پرهزینه است. کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و به کارگیری داده‌های سنجش از دور برای تعیین نقشه مقاومت فرسایشی خاک، روشی مناسب و مفید در جمع‌آوری اطلاعات و تصمیم‌گیری سریعتر، دقیقتر و با صرفه‌تر محسوب می‌شوند. در این تحقیق که هدف ارائه روشی تلفیقی بر مبنای تنش برشی بحرانی (آستانه حرکت) برای تعیین فرسایش‌پذیری رودخانه‌های مئاندری است، تغییر شکل هندسی رودخانه کرخه بین سال‌های 1375 تا 1390 در فاصله 40 کیلومتری پایین‌دست ایستگاه پای پل با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CCHE2D مشخص شده و پارامترهای هیدرولیکی رودخانه از جمله تنش برشی تعیین شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که قبل از احداث سد بین 30 تا 35 از ایستگاه پای پل، بسیار مساعد برای فرسایش بوده و بعد از احداث سد، بازه فرسایشی به سمت بالادست یعنی بین 25 تا 32 از ایستگاه پای پل انتقال پیدا کرده است. در قبل از احداث سد طول کل بازه فرسایشی حدوداً 1314 متر، تقریباً 3/3 درصد از کل مسیر را شامل می‌شد. بعد از احداث سد، طول کل بازه فرسایشی حدوداً 840 متر بوده که تقریباً 2 درصد کل مسیر را شامل شده است. در نتیجه به دلیل احداث سد، حدود یک درصد از طول بازه فرسایشی کاسته شده است.

کلید واژگان: نقشه مقاومت فرسایشی، خم رودخانه، GIS، مدل CCHE2D، رودخانه کرخه.

1- مقدمه

افزایش فشار آب منفذی در حالت کاملاً اشباع، گسیختگی درونی شیب به علت نشست آب به سمت رودخانه، برداشت شن و ماسه از بستر فعال رودخانه، فرسایش ناشی از ورود زه‌آب‌های کشاورزی و عوامل بسیار دیگر بر شمرده. از سوی دیگر، پایداری رودخانه نیز تحت تأثیر مؤلفه‌های درونی و خارجی سیستم رودخانه‌ای است. مؤلفه‌های خارجی شامل متغیرهای اقلیم، پوشش گیاهی، فعالیت‌های انسانی و شیوه یخ زدن و ذوب شدن است (Bertrand and Papanicolaou, 2009).

پدیده‌هایی همچون فرسایش، رسوبگذاری و تغییرات رودخانه‌ای، واکنش‌هایی هستند که رودخانه برای رسیدن به شرایط پایدار ایجاد می‌کند و این واکنش‌ها ممکن است منجر به خسارت‌های چشمگیری شوند. دلایل عمده ناپایداری سواحل و دیواره‌های رودخانه را می‌توان شسته شدن ذرات خاک در اثر جریان و امواج، شسته شدن پاشنه شیب سواحل، ریزش و گسیختگی درونی آن، افزایش شیب سواحل در اثر فرسایش آب و آبستگي،

تأسیسات کناری، نوع خسارات و ابعاد آن نیز متفاوت است (Rüther and Olsen, 2007 & Verhaar et al., 2008).

مئاندرها به طور معمول با انحناها و قوس‌های متوالی همراه هستند. شکل عمده آنها گاه شبیه به هم بوده و در مواردی نیز متفاوتند. ویژگی این اشکال با استفاده از عباراتی مانند بزرگی قوس، طول موج، شعاع انحناء و مانند اینها توصیف می‌شود. با توجه به ارتباط این پارامترها با یکدیگر، می‌توان با استفاده از آنها ویژگی‌های مئاندرها را بررسی کرد. این موضوع در مطالعات محققان زیر مورد استفاده قرار گرفته است: (Malik and Matyja 2008; Amsler et al., 2005 & Abad and Garcia, 2006).

(Briaud et al., 2001) بیان نمودند که رودخانه‌ها سیستم‌های پویایی هستند و فعالیت رواناب‌ها می‌تواند مناطق بالاتر از بستر و لبه رودخانه‌ها را تغییر داده، خصوصاً تغییر را در مکان‌های جانبی (کناره‌ها) ایجاد نماید. از آنجا که نیروی گریز از مرکز فشارهای برشی را در سطح مشترک آب و خاک افزایش می‌دهد، پیش‌بینی حرکت مئاندرها ضروری است.

در مقاطع مئاندرها تغییرات زیادی در توزیع طولی سرعت از قوس داخلی به سمت قوس خارجی یک مئاندر وجود دارد. به علت تغییرات متوالی شعاع انحنای قوس، پارامترهای جریان در مقاطع مئاندري نسبت به مقاطع مستقیم به طور قابل ملاحظه‌ای پیچیده‌ترند (Patra et al., 2004).

Zámolyi et al. (2010) شکل هندسی رودخانه را انعکاسی از دبی و رسوب و شرایط هیدرولوژیکی جریان تفسیر می‌کنند. این محققین در بررسی الگوی هندسی رودخانه به نقش یک عامل توجه ویژه ای کرده و به ندرت به صورت سیستمی، شرایط ژئومورفیک و زمین شناسی مسیر رودخانه را در نظر گرفته اند.

(Narinesingh and Pizzuto 2009) با استفاده از کاربرد مدل مهاجرت خم‌ها در رودخانه جنوبی ویرجینیا، پدیده توسعه و مهاجرت مئاندرها را در بازه‌های آبرفتی با بستر شنی و بستر سنگی با هم مقایسه نمودند. این تحقیق نشان داد بالغ بر 45% مناطقی که در آن، مدل فرسایش را پیش‌بینی می‌کرد، در مشاهدات صحرائی مشاهده شد.

(Constantine et al., 2010) مکانیزم ایجاد میانبر در طول

مؤلفه‌های درونی نیز شامل مورفولوژی رودخانه، مانند انواع الگوهای رودخانه (مئاندري، شریانی و مستقیم)، ویژگی‌های هندسی و هیدرودینامیکی قوس‌های رودخانه‌ای، 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 (Amiri-Tokaldany et al., 2007).

اگر چه، عوامل کنترل کننده فرسایش و رسوبگذاری و به دنبال آن پیش‌بینی تغییرات بستر و شکل پلان امکان‌پذیر است، ولی پیش‌بینی میزان دقیق این تغییرات و شبیه‌سازی عددی آن بسیار مشکل است. با این حال می‌توان با نظارت بر تغییرات ریخت‌شناسی که در طول رودخانه رخ می‌دهد، تدابیر ویژه ای برای جلوگیری از بروز ناپایداری بوسیله شناسایی شاخص‌های ناپایداری رودخانه اندیشید (Yu et al., 2010).

مهمترین مشخصه ساختار جریان در رودخانه‌های مئاندري، جهت معکوس چرخش سلول‌های جریان ثانویه در راس قوس در قبل و بعد از وقوع سیلاب است. شدت و جهت چرخش این سلول‌ها تأثیر شدیدی بر ریخت‌شناسی بستر و کناره‌ها و نیز توزیع عرضی و طولی سرعت دارد. (Ervin et al., 1994).

در مقاطع مستقیم، به دلیل گرادبان سریع و پله‌ای سرعت جریان بین لایه مقطع اصلی و لایه دشتهای سیلابی، یکسری گردابه قوی در طول مرز اتصال مقطع اصلی به دشتهای سیلابی تشکیل می‌شود. نتیجه این گردابه‌ها، انتقال مومنتم مجرای اصلی به دشتهای سیلابی، ایجاد تنش برشی، افت انرژی و در نهایت کاهش سرعت و دبی جریان رودخانه است (Omran, 2008).

با توجه به مسائل و مشکلاتی که رودخانه‌های مئاندري در مسیر خود پدید می‌آورند، محققان مختلف تحقیقاتی را برای گشودن راز تشکیل خم‌ها و تأثیراتی که توسعه خم‌ها می‌تواند پدید آورد، انجام داده‌اند. نتایج بررسی‌ها حاکی از این است که با توجه به ویژگی‌های محلی، عوامل مختلفی در تشکیل و توسعه خم‌ها دخیل هستند و همچنین با توجه به ویژگی‌های محلی و نوع سازندهای سطحی و

ذره به ذره)، جایگزین استفاده از دیاگرام شیلدز یا فرمول‌های تجربی موجود برای برآورد تنش برشی آستانه حرکت شده است.

همچنین استفاده از نقشه مقاومت فرسایشی خاک (آبرفت) به روش معمول برای محاسبه میزان فرسایش جانبی رودخانه بسیار وقتگیر و پرهزینه است. بنابراین کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور برای تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی برای تعیین نقشه مقاومت فرسایشی خاک، روشی مناسب و مفید برای این منظور محسوب می‌شود که در این تحقیق به کار برده شده است.

یکی از اهداف مهم این تحقیق در نظر گرفتن اثر احداث سد بر روی تغییرات طول، عرض، شیب، تراز بستر رودخانه، بازه‌های تحت تأثیر فرسایش و تنش برشی در نقاط مختلف رودخانه (خصوصاً در خم‌های رودخانه) است. بنابراین برای این منظور دو سری داده هندسی، هیدرولیکی و رسوبی در نظر گرفته شد که یکی مربوط به سال 1375 (قبل از ساخت سد) و دیگری مربوط به سال 1390 (بعد از ساخت سد) می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق که هدف ارائه روشی تلفیقی بر مبنای تنش برشی حداکثر (آستانه حرکت) برای تعیین فرسایش‌پذیری رودخانه‌های مائندری است، تنش برشی در نقاط مختلف رودخانه کرخه در حد فاصل ایستگاه پای پل و حدود 40 کیلومتری پایین‌دست این ایستگاه با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CCHE2D تعیین می‌شود و تغییرات طول و عرض رودخانه در فاصله سال‌های 1375 تا 1390 به وسیله تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین شد.

مراحل انجام این تحقیق به شرح ذیل است:

1- روندیابی هیدرولیکی و تعیین مشخصه‌های جریان در قسمت مورد نظر از رودخانه کرخه به وسیله مدل هیدرودینامیکی CCHE2D و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان (پروفیل سطح آب، سرعت عرضی و طولی، تنش برشی و ...)

مئاندرهای بزرگ با توپوگرافی سیلاب دشت را بررسی نمودند. آنها بیان کردند که عللی همچون تغییرات ناگهانی در گنجایش مقاطع، مانند ایجاد سدهای طبیعی و وقوع سیلاب‌های ناگهانی ایجاد می‌نماید.

(Güneralp and Marston 2012) مراحل شکل‌گیری مئاندرهای مورفودینامیک را مورد بررسی قرار دادند، همچنین در خصوص چگونگی شکل‌گیری مئاندرها بر اساس نیروهای هیدرودینامیک والگوی تغییرات هندسه آنها بحث نمودند.

نحوه توزیع تنش به عواملی نظیر شکل سطح مقطع، ساختار جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی در زبری کانال بستگی دارد. بطور کلی محققان در تعیین تنش برشی دو روش را بکار گرفته‌اند.

1- (Chang et al. (1996)، Chang (1983, 1985, 1994)، Chang and Hill (1977)، Chang and Stow (1989)، Yang (1996) و Amiri-Tokaldany et al. (2007) از روابط و دیاگرام‌های تنش برشی ذرات در آستانه حرکت استفاده نمودند.

2- (Wilcock (1993)، Haynes and Pender (2007)، Thoman and Niezgodá (2008)، Kean et al. (2009) و Thornton et al. (2012) از نتایج مدل فیزیکی، آزمایش‌های میدانی و صحرایی استفاده نمودند.

بر اساس مطالعات (Guo and Julien (2005) تنش برشی تابعی از شتاب ثقل و جریان‌های ثانویه و لزجت گردابی است.

با توجه به مطالب ذکر شده، مقایسه دو فاکتور زیر برای تعیین مناطق فرسایش‌پذیر در رودخانه الزامی است: 1- تنش برشی بدست آمده از مدل‌های عددی 2- حداکثر تنش برشی مجاز (آستانه حرکت) با توجه به نتایج تجربی محققان و یا فرمول‌های ارائه شده آنها.

اساس این تحقیق ارائه روشی تلفیقی بر مبنای تنش برشی حداکثر (آستانه حرکت) برای تعیین فرسایش‌پذیری رودخانه‌های مائندری است. برای این منظور استفاده از ترکیب نقشه‌های مقاومت فرسایشی خاک، تنش برشی مجاز برای آبرفت‌ها و خاک‌های مختلف و تنش برشی محاسبه شده توسط مدل CCHE2D (بر اساس فرسایش

با توجه به دو بعدی بودن مدل، معادلات در دو جهت X و Y به کار گرفته شده است. لذا بخاطر محدودیت، به ذکر معادلات در راستای X پرداخته می‌شود. معادلات پیوستگی و مومنتم در راستای جریان X بصورت معادلات (1) و (2) خواهند بود (Saint-Venant, 1871):

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

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

که در آن 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 صفحات Z-X و Y-X می‌باشند. معادله (2) را می‌توان به صورت معادله (3) نوشت:

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho g S + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3)$$

معادله انتگرال حجمی متناظر با معادله (3) را می‌توان بصورت معادله (4) نوشت:

$$\int_v \left[\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \right] dv = \int_v \rho g S dv + \int_v \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dv \quad (4)$$

که در آن V معادل با حجم دلخواهی است که دارای سطح A می‌باشد. با به‌کارگیری قضیه گوس برای سمت چپ معادله و دومین انتگرال سمت راست معادله (5) نتیجه می‌دهد:

$$\int_A \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = \rho g v S + \int_A \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA \quad (5)$$

که در آن $\partial y / \partial \eta$ کسینوس زاویه بین محور Y و بردار نرمال n خروجی از حجم کنترل و به طور مشابه $\partial z / \partial \eta$ کسینوس زاویه بین محور Z و بردار نرمال n می‌باشد.

سمت چپ معادله (5) نرخ مومنتم خروجی از سطح کنترل A ، اولین ترم سمت راست مؤلفه وزن حجم کنترل و دومین ترم سمت راست نیروی برشی سطح کنترل A می‌باشد. از معادله (5) برای فرموله نمودن معادله تنش

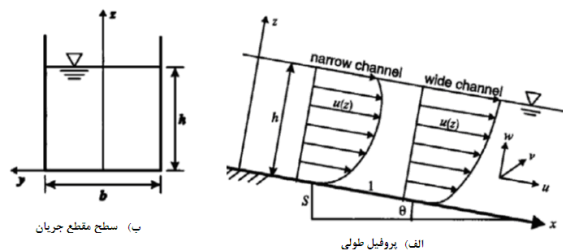
2- تهیه نقشه مقاومت فرسایشی خاک که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، مطالعات میدانی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از راه دور انجام گرفته و تعیین تنش برشی بحرانی نقاط مختلف رودخانه با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و گزارشات سازمان آب و برق خوزستان؛

3- مقایسه نتایج تنش برشی بدست آمده از شبیه‌سازی مدل هیدرودینامیکی با تنش برشی بحرانی و تشخیص قسمت‌هایی که امکان فرسایش پذیری دارند. لازم به ذکر است که مدل CCHE2D برای محاسبه میزان فرسایش، فرسایش را به صورت ذره به ذره در نظر می‌گیرد. فرسایش ذره به ذره در بستر و سواحل رودخانه به ترتیب موجب افزایش ارتفاع و زاویه سواحل می‌گردد که این دو از پارامترهای مؤثر در فرسایش سواحل می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌ها و روش ارائه شده در این تحقیق، می‌تواند امکان پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش را فراهم نماید؛

4- تعیین تغییرات طول و عرض رودخانه در اثر احداث سد به وسیله تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از راه دور.

1-2- معادلات متوسط تنش برشی بستر و جداره

یک جریان توسعه یافته ماندگار در یک کانال روباز مستطیلی مطابق شکل 1- الف در نظر گرفته می‌شود. جهت جریان در راستای محور X فرض شده و مقطع عرضی در راستای صفحه Y-Z در شکل 1- ب نشان داده شده است. مؤلفه اصلی سرعت جریان در راستای محور X با U نمایش داده می‌شود و دو مؤلفه دیگر در صفحه Y-Z به ترتیب با V و W نمایش داده می‌شوند (شکل 1).



شکل 1 سیستم مختصات در جریان کانال روباز

در سطح آب $\partial Z/\partial \eta = 1$ ، $\partial y/\partial \eta = 0$ و $v \neq 0$ و $w = 0$ می‌باشند.

باجایگذاری معادلات (6) تا (8) در معادله (9)، رابطه (10) بدست می‌آید:

$$\int_A \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = 2 \int_{CH} \rho u (vdz - wdy) \quad (10)$$

ترم ثقل در معادله (10) بصورت زیر است:

$$\rho g S v = \rho g S A_b \quad (11)$$

که در آن $v = A_b \times 1 = A_b$ سطح جریان متناظر با بستر کانال می‌باشد. ترم نیروی برشی در معادله (11) بصورت زیر است:

$$\int_A \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = \int_{BC} + \int_{CH} + \int_{HG} + \int_{GB} \quad (12)$$

که در آن:

$$\int_{BC} = \int_{BC} \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = -\bar{\tau}_b b \quad (13)$$

باتوجه به اینکه $\partial Z/\partial \eta = -1$ ، $\partial y/\partial \eta = 0$ و $\tau_{zx} = \bar{\tau}_b$ می‌باشد و متوسط تنش برشی بستر و سطح بستر کانال معادل $A = b \times 1 = b$ می‌باشد. باید توجه داشت که τ_{zx} در راستای مخالف صفحه y-x مقداری مثبت است.

$$\int_{GB} = \int_{CH} = \int_{CH} \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = \int_{CH} \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dl = \int_{CH} (\tau_{yx} dz - \tau_{zx} dy) \quad (14)$$

از آنجایی که $dz = \partial y/\partial \eta \cdot dl$ و $-dy = \partial z/\partial \eta \cdot dl$ و از طرفی:

$$\int_{HG} = \int_{HG} \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = 0 \quad (15)$$

چون در سطح آزاد جریان $\partial Z/\partial \eta = 1$ ، $\partial y/\partial \eta = 0$ و $\tau_{yx} = \tau_{zx} = 0$ می‌باشد. با جایگزینی معادلات (13) تا (14) در معادله (10):

$$\int_A \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = -\bar{\tau}_b b + 2 \int_{CH} (\tau_{yx} dz - \tau_{zx} dy) \quad (16)$$

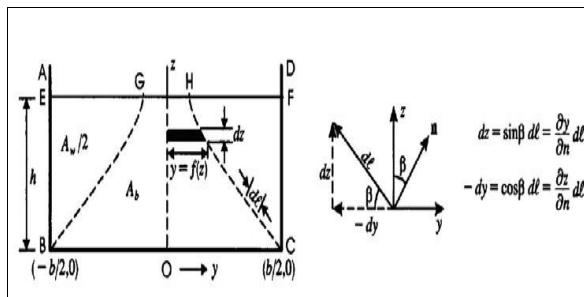
با جایگذاری معادلات (13)، (14) و (15) در معادله (16):

$$\bar{\tau}_b = \frac{\rho g S A_b}{b} - \frac{2}{b} \int_{CH} \rho u (vdz - wdy) + 2 \int_{CH} (\tau_{yx} dz - \tau_{zx} dy) \quad (17)$$

برشی مرزی استفاده شد (Guo and Julien, 2005).

جزئیات مربوط به معادله (5) و سطح و حجم کنترلی به شرح زیر است:

حجم کنترل BCHGB در شکل 2 در راستای محور X به طول واحد در نظر گرفته می‌شود. حدود BG و CH در راستای محور Z دارای تقارن هستند.



شکل 2 حجم کنترل مقطع عرضی برای تنش برشی کف و جداره‌ها (Guo and Julien, 2005)

شار مومنتم معادله (5) را می‌توان بصورت زیر تفکیک نمود:

$$\int_A \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = \int_{BC} + \int_{CH} + \int_{HG} + \int_{GB} \quad (6)$$

که در آن:

$$\int_{BC} = \int_{BC} \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = 0 \quad (7)$$

چون در بستر کانال (در شرایط غیر لغزش و غیرقابل نفوذ) $V=W=0$ و $\partial y/\partial \eta = 0$ و $\partial Z/\partial \eta = -1$ می‌باشد.

$$\int_{GB} = \int_{CH} = \int_{CH} \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = \int_{CH} \rho u \left(v \frac{\partial u}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dl = \int_{CH} \rho u (vdz - wdy) \quad (8)$$

با توجه به اینکه $dz = \partial y/\partial \eta \cdot dl$ ، $-dy = \partial z/\partial \eta \cdot dl$ ، $dA = dl \times 1 = dl$ می‌باشند، که در آن dl تغییرات فاصله در محدوده طول CH نشان داده شده در شکل 2 است و عدد یک به معنای طول واحد در راستای محور X بوده و برای انتگرال‌گیری روی منحنی GB از شرایط تقارن استفاده شده است.

$$\int_{HG} = \int_{HG} \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial \eta} + w \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) dA = 0 \quad (9)$$

از این رو که u^* بصورت ضمنی است، معادله (25) از راه تکرار بدست می‌آید. در این حالت ضریب دارسی - ویسباخ به راحتی می‌تواند پس از محاسبه u^* بدست آید. روش دوم:

روش دوم برای محاسبه مؤلفه‌های سرعت و تنش برشی بستر رودخانه، روش ضریب مانینگ می‌باشد (معادلات 27 و 28)، (Jia and Wang, 2001).

$$\tau_{bx} = \frac{1}{h^3} \rho g n^2 u U \quad (27)$$

$$\tau_{by} = \frac{1}{h^3} \rho g n^2 v U \quad (28)$$

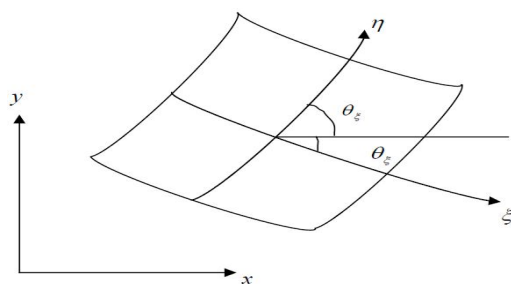
سرعت برشی نیز از معادله (29) محاسبه می‌شود.

$$u_*^2 = \frac{\tau}{\rho} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (29)$$

همچنین مدل برای محاسبه مقدار بالارفتگی یا پایین افتادگی سطح آب در طرفین قوس رودخانه از معادله (30) استفاده می‌نماید.

$$gh = gh_o + \frac{n \bar{U}_{s0}^2}{r_o} \quad (30)$$

که در آن \bar{U}_{s0} سرعت میانگین عمقی در خط مرکزی آبراهه، r_o شعاع انحناء خط مرکزی قوس، h عمق جریان در مختصه عرضی n از مرکز کانال، h_o عمق جریان در $n=0$ (در وسط مجرا) و n شماره خطوط (j) شبکه در راستای η می‌باشند (شکل 3).



شکل 3 المان جریان در خم

2-2- حوضه مورد مطالعه

رودخانه کرخه پس از رودخانه‌های کارون و دز سومین رودخانه بزرگ ایران از نقطه نظر آبدهی محسوب می‌شود. به منظور شبیه‌سازی الگوی جریان، بازه‌ای از رودخانه

که این معادله تئوری متوسط تنش برشی بستر می‌باشد. اولین ترم سمت راست، مؤلفه ثقلی را توصیف می‌کند. دومین ترم مربوط به جریان‌های ثانویه می‌باشد و ترم آخر معرف تنش برشی سطح مشترک CH می‌باشد (Guo and Julien, 2005).

در مدل عددی CCHE2D دو روش برای تعیین سرعت برشی گنجانده شده است.

روش اول:

استفاده از قانون لگاریتمی عمق یکپارچه می‌باشد که از معادله (18) محاسبه می‌شود:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{Z} \left[\frac{Z_0}{h} - 1 + \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right] \quad (18)$$

و U از معادله (19) بدست می‌آید:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (19)$$

متغیر Z_0 به ازای شرایط مختلف جریان (ارتفاع زبری سطح و لزجت سینماتیکی سیال) تفاوت داشته و از معادلات (20) تا (23) محاسبه می‌شود:

$$Z_0 = 0.11 \frac{v}{u_*} \quad u_* k_s / v \leq 5 \quad (20)$$

$$Z_0 = 0.0333 k_s \quad u_* k_s / v \geq 70 \quad (21)$$

$$Z_0 = 0.11 \frac{v}{u_*} + 0.0333 k_s \quad 5 \leq u_* k_s / v \leq 70 \quad (22)$$

$$\left(\frac{f_c}{8} \right)^{-0.5} = 6 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{k_s + 33 \frac{v}{u_*}} \right) \quad 5 < \frac{u_* k_s}{v} < 70 \quad (23)$$

مؤلفه‌های تنش برشی نهایی از معادله (24) محاسبه می‌شود.

$$\tau_{bx} = \frac{1}{8} \rho f_c u U \quad (24-الف)$$

$$\tau_{by} = \frac{1}{8} \rho f_c v U \quad (24-ب)$$

$$\left(\frac{f_c}{8} \right)^{-0.5} = 3 + 2.5 \ln \left(\frac{u_* h}{v} \right) \quad \frac{u_* k_s}{v} \leq 5 \quad (25)$$

$$\left(\frac{f_c}{8} \right)^{-0.5} = 6 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) \quad \frac{u_* k_s}{v} \geq 70 \quad (26)$$

که k_s ارتفاع زبری سطح بستر و v لزجت سینماتیکی سیال است.

$$Q_s = 0.0364Q_w^{2.357} \quad (32)$$

که در آن Q_w دبی جریان بر حسب (m^3/s) و Q_s دبی رسوب بر حسب (ton/day) می باشد.

انتقال مواد بستر در یک رودخانه ممکن است با توجه به اندازه ذرات مواد بستر و شرایط جریان، صورت بار بستر یا به صورت بار بستر به همراه بار معلق باشد. وجود انواع مختلف رسوبات (ماسه، سیلت و رس) در یک سیستم نیز حاصل فرایند انتقال انتخابی است (جور شدگی ذرات). وجود انواع مختلف رسوبات (ماسه، سیلت و رس) در یک سیستم نیز حاصل فرایند انتقال انتخابی است (جور شدگی ذرات). بطوری که این فرایند به حرکت انواع مختلف ذرات رسوبی مربوط است که آستانه حرکت آنها نزدیک تنش برشی بستر بوده و طی تنش برشی بالاتر انتقال می یابند. با این وجود از معادلات (33) و (34) برای داده های ورودی بار بستر و بار معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل در مدل CCHE2D استفاده شده است. این معادلات مربوط به قبل از احداث سد می باشند.

(Ghomeshi, 2005; Shafai Bajestan et al., 2010)

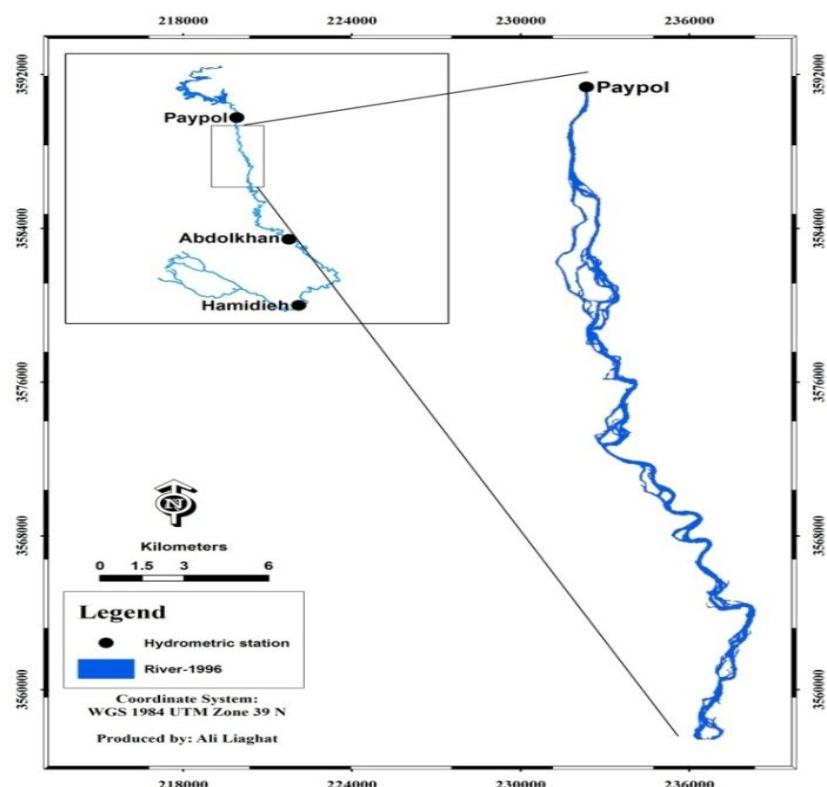
کرخه (پایین دست سد کرخه و ایستگاه هیدرومتری پای پل) انتخاب گردید. شکل 4 موقعیت بازه انتخابی رودخانه کرخه را نشان می دهد. بازه انتخابی حدود 40 کیلومتر بوده که به 6 ناحیه تقسیم بندی گردیده است. اشکال 5 و 6 تقسیم بندی بازه را در سال های 1375 و 1390 قبل و بعد از احداث سد نشان می دهد. لازم به ذکر است که شکل های 4 تا 6 در محیط GIS توسط محققان این تحقیق تهیه گردیده اند.

2-2-1- روابط همبستگی دبی جریان و دبی رسوب،

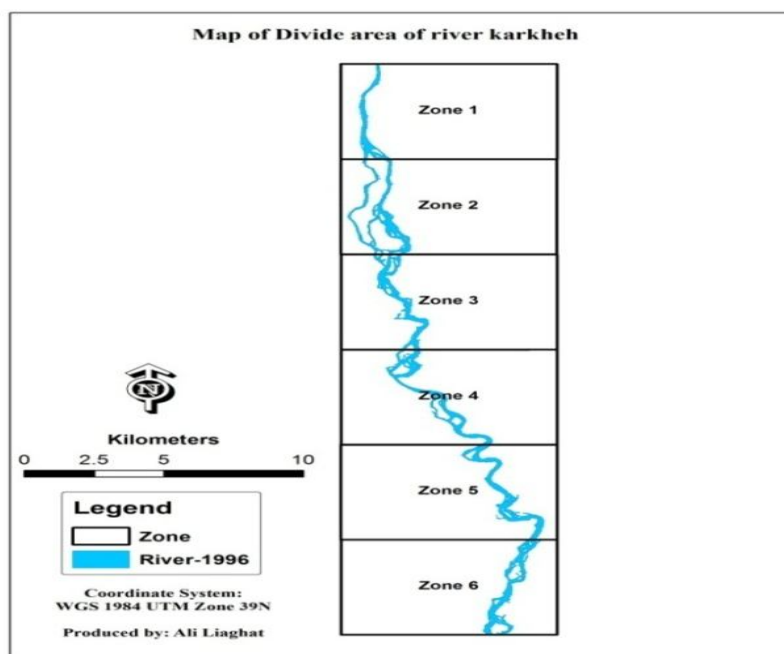
میزان بار معلق و بار بستر در مدل CCHE2D

با برآزش بهترین رابطه رگرسیون بر داده های دبی جریان- دبی رسوب در ایستگاه های جلوگیری و پای پل معادلات ذیل حاصل می گردند. از معادله (31) برای داده های رسوب قبل از احداث سد و از معادله (32) برای داده های رسوب بعد از احداث سد استفاده شده است (Ghomeshi, 2005; Shafai Bajestan et al., 2010)

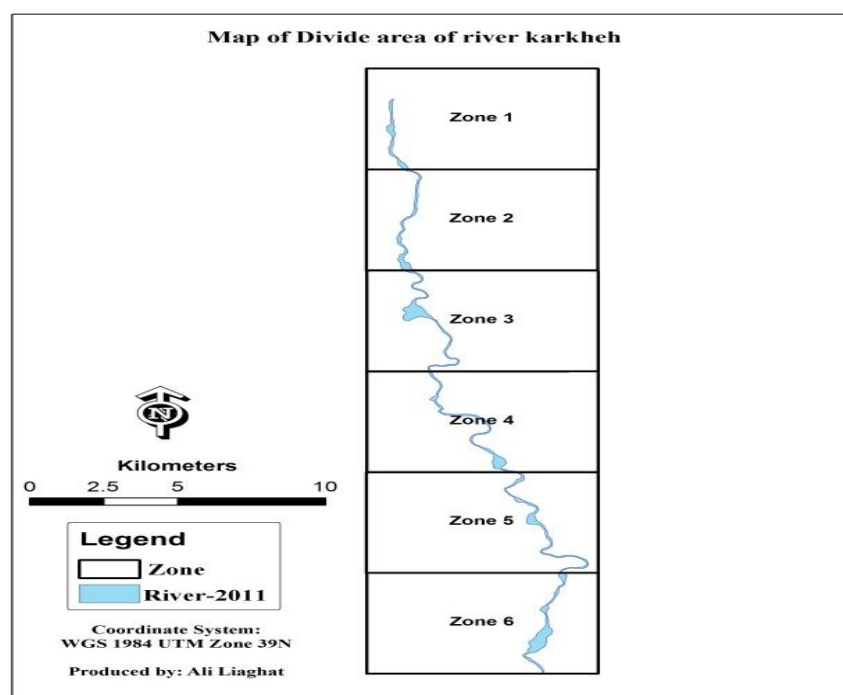
$$Q_s = 0.032Q_w^{2.4027} \quad (31)$$



شکل 4 موقعیت بازه انتخابی از رودخانه کرخه



شکل 5 ناحیه‌بندی بازه انتخابی از رودخانه کرخه قبل از احداث سد در سال 1375



شکل 6 ناحیه‌بندی بازه انتخابی از رودخانه کرخه بعد از احداث سد در سال 1390

2-2-2- استفاده از نقشه‌های مقاومت فرسایشی خاک تهیه نقشه مقاومت فرسایشی خاک (آبرفت)، یکی از مطالعات پایه در مباحث حفاظت خاک و مهندسی رودخانه به شمار می‌آید که انجام آن به روش معمول

$$Q_w = 0.1102BL + 5.7932 \quad (33)$$

$$Q_w = 48.37SL + 7.2085 \quad (34)$$

که در آن BL بار بستر و SL بار معلق رسوبات بر حسب (ton/day) می‌باشد.

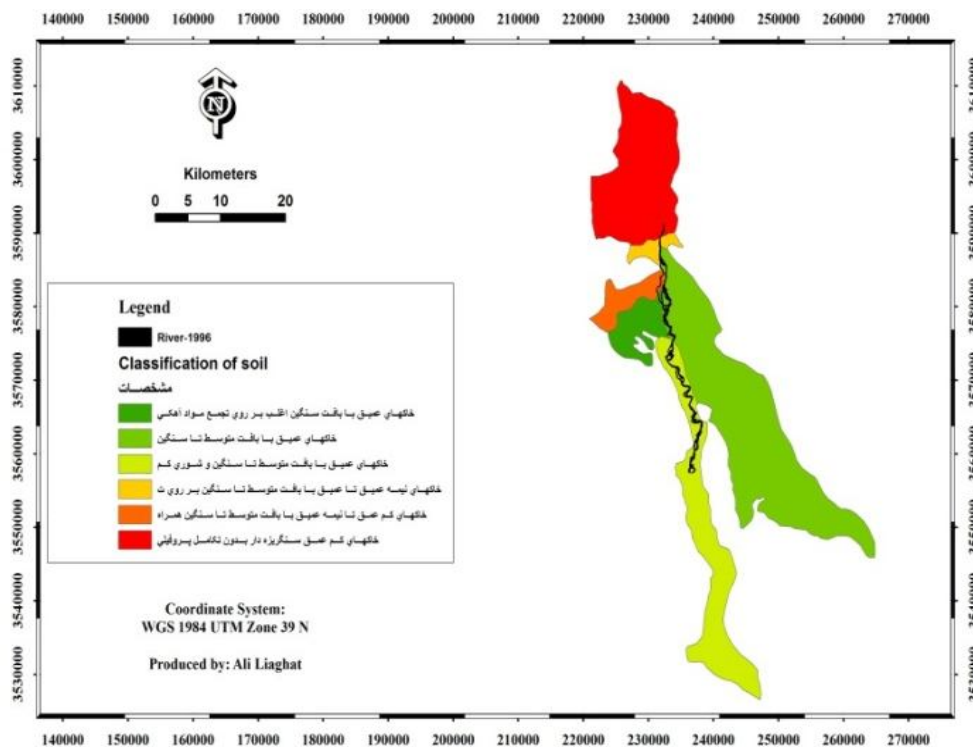
و از GIS برای تلفیق داده‌ها، تحلیل مدل و تهیه خروجی نقشه‌ها استفاده شده است.

از مهمترین نهشته‌های رسوبی بستر رودخانه کرخه که رفتار آن راتحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌توان به رسوبات سیلابی بستر آبراهه‌ها و رسوبات ریزدانه دشت‌ها اشاره کرد. رسوبات ریزدانه که قسمت عمده دشت را می‌پوشانند، بیشتر شامل رس سیلتی و ماسه بادی ناشی از فرسایش بخش لهری سازند آغاجری است. این رسوبات ریزدانه به علت چسبندگی کمی که دارند، در مقابل فرسایش مقاومت چندانی از خود نشان نمی‌دهند و در هنگام طغیان رودخانه تحت فرسایش و تخریب قرار می‌گیرند. شکل 7 نقشه طبقه‌بندی خاک آبرفتی و کاربری اراضی رودخانه کرخه را که به روش پیش گفته استخراج شده‌اند، نشان می‌دهد.

نوع خاک اراضی که رودخانه کرخه در بازه مورد مطالعه از آن می‌گذرد با توجه به شکل 7 استخراج و در جدول 1 ارائه شده است.

بسیار وقت گیر و پر هزینه است. کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و به کارگیری داده‌های سنجش از دور، دو روش مناسب و مفید در جمع‌آوری اطلاعات و تصمیم‌گیری سریعتر، دقیقتر و با صرفه‌تر محسوب می‌شوند. مقاومت برشی خاک سطحی یکی از مهمترین ویژگی‌های مؤثر در تخمین و اندازه‌گیری فرسایش خاک بوده که تهیه نقشه آن در سطح حوضه آبخیز هزینه‌بر و وقتگیر می‌باشد. امروزه پیش‌بینی مقاومت برشی خاک سطحی و رتبه‌بندی مهمترین عوامل مؤثر بر آن، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از راه دور انجام می‌گیرد. پارامترهای شاخص نرمال شده پوشش گیاهی، کاربری اراضی، نوع سازند زمین‌شناسی، جهت شیب، ارتفاع و ... در تهیه نقشه مقاومت فرسایشی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد، مانند تحقیقات: (Avila et al., 2014; Michalik and Tekielak, 2013; Bandyopadhyay et al., 2014 & Grimaud et al., 2015)

بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده TM و نرم‌افزار ILWIS برای بدست آوردن نقشه‌های کاربری اراضی و پایه



شکل 7 نقشه طبقه‌بندی خاک آبرفت و کاربری اراضی رودخانه کرخه

طول مطالعاتی رودخانه در این تحقیق 44/2 کیلومتر بوده و تعداد مقاطع برداشت شده 34 عدد است. حداقل و حداکثر فاصله بین مقاطع به ترتیب عبارتند از 86 و 2318 متر، همچنین در محل‌هایی که قوس وجود داشته‌اند، مقاطع برداشت گردیده‌اند. لازم به ذکر است که در این تحقیق از پلان و مقاطع تهیه شده توسط سازمان آب و برق خوزستان در سال‌های 1375 و 1390 استفاده گردید. این اطلاعات توسط عملیات نقشه‌برداری تهیه گردیده‌اند و در شکل‌های 8 تا 11 نشان داده شده‌اند.

جدول 2 مقاومت فرسایشی خاک بر حسب تنش برشی مجاز (Avila et al., 2014)

$\tau(N/m^2)$	جنس مواد
3/6	ماسه ریز، کلوئیدی
7/18	سیلت آبرفتی، غیر کلوئیدی
22/02	رس سخت
3	ماسه ریز، غیر کلوئیدی
12	رس لومی
22/02	رس آبرفتی، کلوئیدی
15/32	شن ریز
32/08	شن درشت
52/67	قلوه سنگ

جدول 1 نوع رده بافتی خاک واحد اراضی حاشیه رودخانه

شماره بازه	فاصله ابتدا و انتهای محدوده از ایستگاه پای پل (m)	رده بافتی خاک
1	0-280	شنی
2	280-8050	لومی رسی
3	8050-9970	رسی
4	9970-13330	لومی رسی
5	13330-14550	رسی
6	14550-42152	لومی رسی

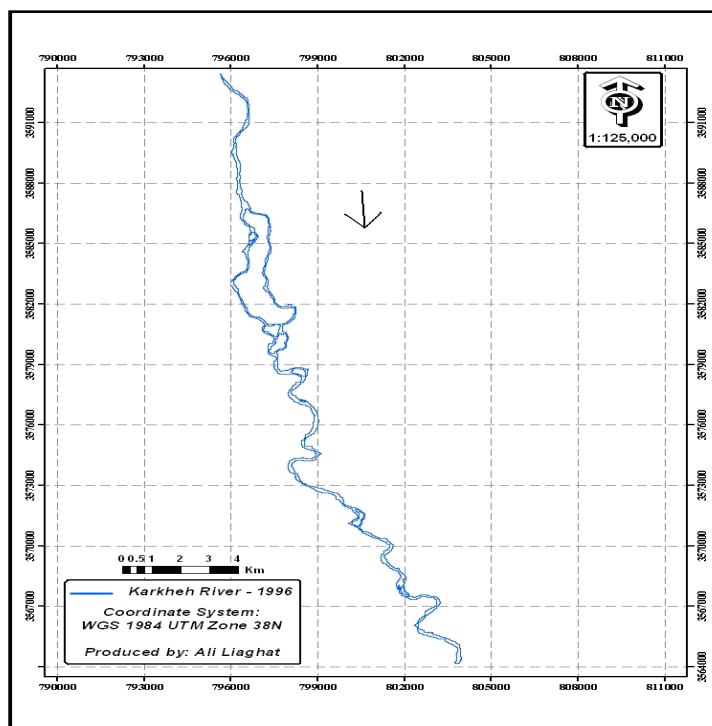
با تعیین تنش برشی مجاز خاک اراضی حاشیه رودخانه کرخه در منطقه مورد مطالعه با استفاده از جدول 2 و مقایسه آن با تنش برشی مدل در همان نقاط، نقاط فرسایش پذیر تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که مدل برای محاسبه تنش برشی و تشخیص نقاط فرسایش پذیر، فرسایش را به صورت ذره به ذره در نظر می‌گیرد.

3- نتایج و بحث

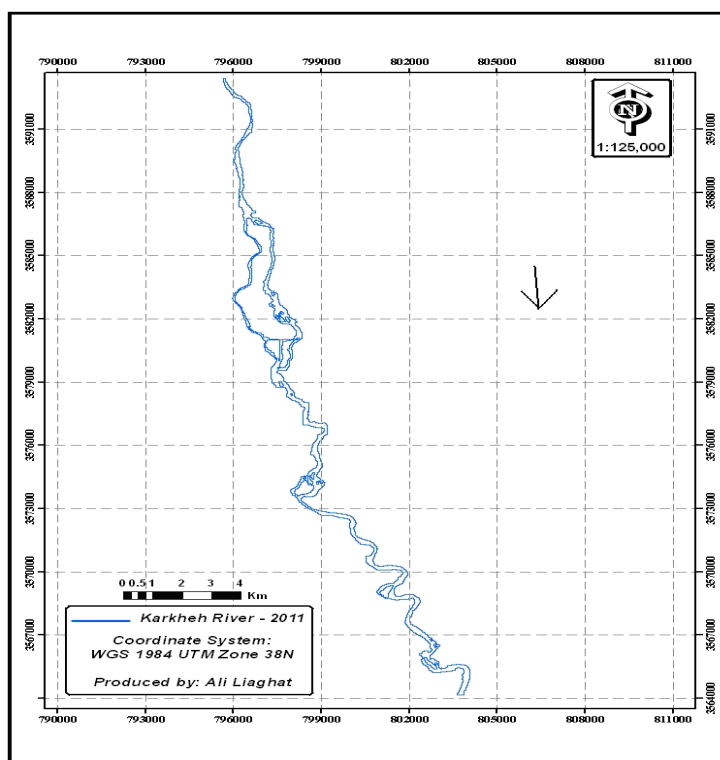
3-1- پلان و خصوصیات هندسی مقاطع معرفی

شده به مدل

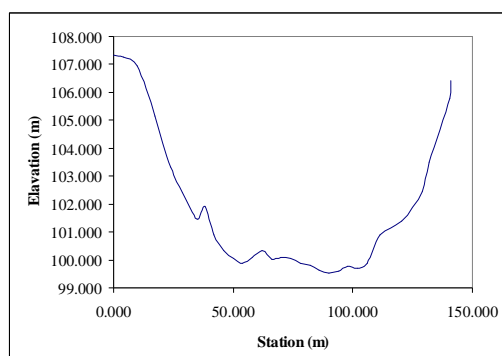
نخستین داده‌های ورودی به مدل‌های هیدرولیکی پلان و خصوصیات هندسی مقاطع رودخانه است.



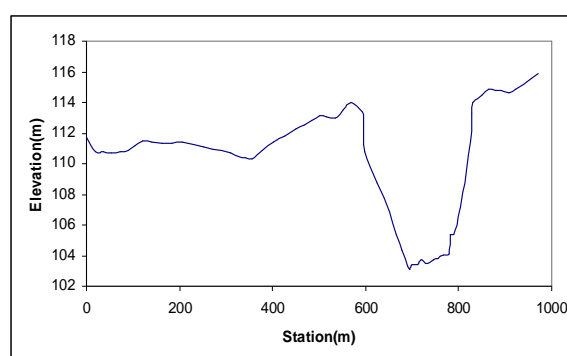
شکل 8 پلان رودخانه در سال 1375



شکل 9 پلان رودخانه در سال 1390



ب- سال 1390



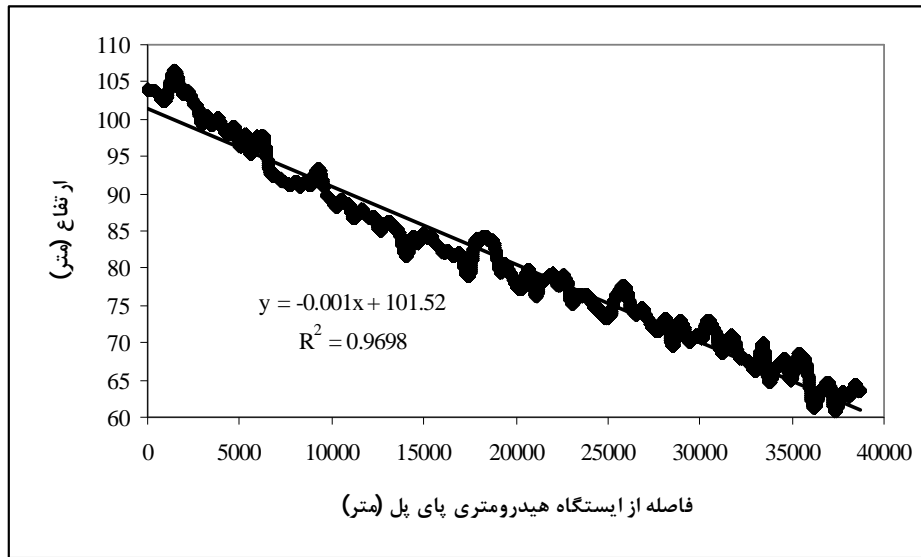
الف- سال 1375

شکل 10 مقطع رودخانه کرخه در ایستگاه هیدرومتری پای پل

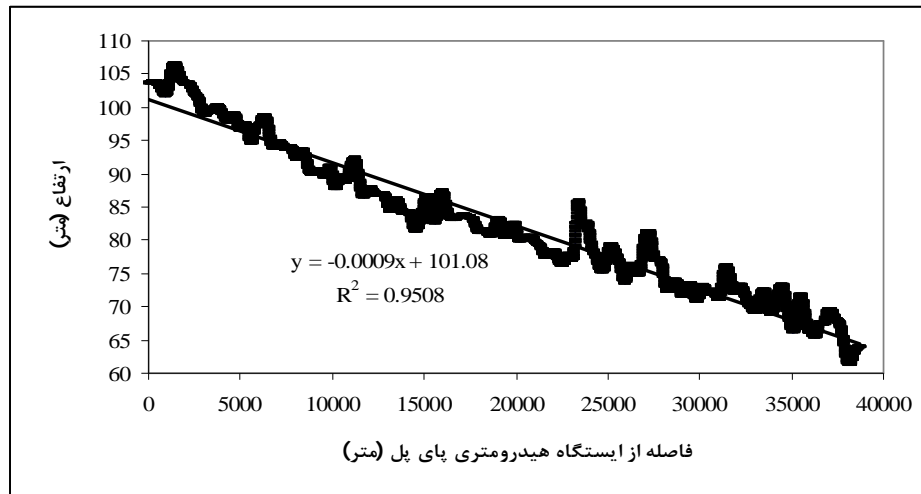
جدول 3 مقدار حداقل، متوسط و حداکثر شیب بر حسب درصد قبل از ساخت سد

حداکثر شیب	متوسط شیب	حداقل شیب	فاصله از ایستگاه پای پل (km)
1/831	0/153	0/011	10-0
1/671	0/143	0/01	20-10
1/703	0/146	0/012	30-20
1/974	0/169	0/014	40-30
1/7948	0/1528	0/0118	کل بازه

مقدار حداقل، متوسط و حداکثر شیب در بازه‌های 10 کیلومتری رودخانه قبل و بعد از احداث سد در جدول‌های 3 و 4 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مدل برای محاسبه شیب رودخانه، خط القعر رودخانه در مقاطع مختلف رودخانه را در نظر می‌گیرد و به وسیله اختلاف ارتفاع بین خط القعر مقاطع متوالی و فاصله بین آنها، شیب رودخانه در فاصله بین دو مقطع را مشخص می‌نماید.



الف- قبل از احداث سد



ب- پس از احداث سد

شکل 11 پروفیل بستر رودخانه

3-2- شرایط مرزی ورودی به مدل CCHE2D

دومین داده‌های ورودی به مدل‌های هیدرولیکی، شرایط مرزی مدل می‌باشند.

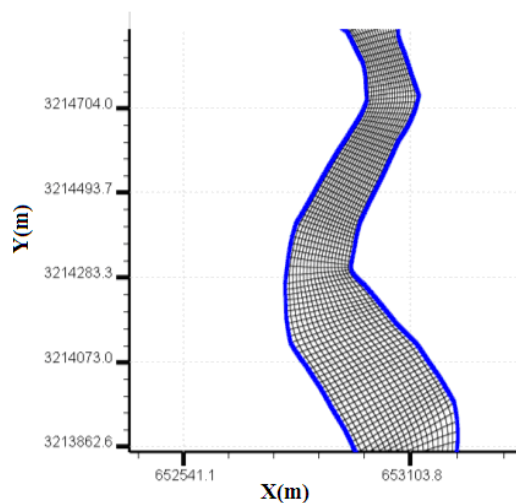
در فرسایش‌پذیری جداره و بستر رودخانه‌ها اثر طولانی مدت دبی رودخانه در یک بازه زمانی مؤثر است و تأثیر دبی متوسط رودخانه در دراز مدت به مراتب بیش از تأثیر یک سیلاب زودگذر است. به این دلیل در این پژوهش هیدروگراف سه سال متوالی دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری بالادست تهیه شده، به عنوان ورودی مدل انتخاب می‌گردد (Avila et al., 2014).

جدول 4 مقدار حداقل، متوسط و حداکثر شیب بر حسب درصد

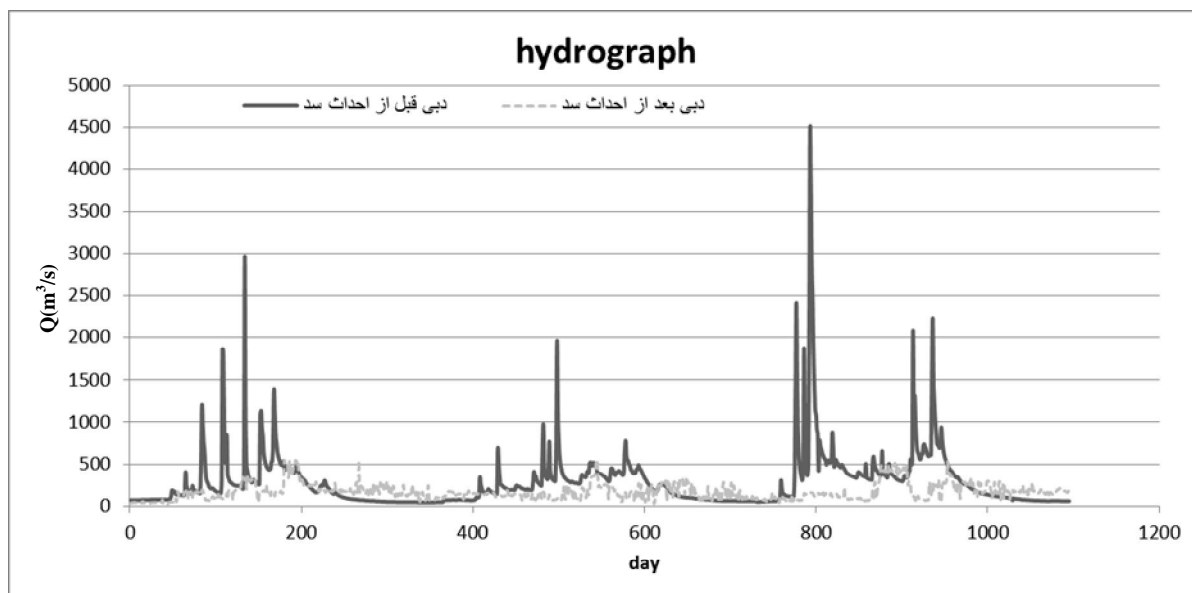
فاصله از ایستگاه پای پل (km)	حداکثر شیب	متوسط شیب	حداقل شیب	بعد از ساخت سد
10-0	1/794	0/15	0/0107	
20-10	1/687	0/144	0/0101	
30-20	1/686	0/144	0/0118	
40-30	1/981	0/17	0/0141	
کل بازه	1/787	0/152	0/0117	

همچنین شبکه‌بندی قسمتی از رودخانه در مدل CCHE2D به عنوان نمونه در شکل 12 نشان داده شده است.

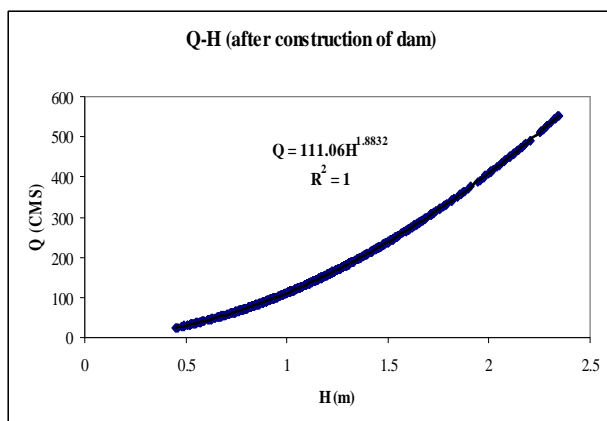
برای قبل از احداث سد، دبی‌های مهر 1372 تا شهریور 1375 و برای بعد از احداث سد، از مهر 1387 تا شهریور 1390 انتخاب شده است. شکل 13 هیدروگراف سه سال متوالی قبل و بعد از احداث سد را نشان می‌دهد. شکل 13 هیدروگراف‌های ورودی جریان به مدل CCHE2D را نشان می‌دهد. این هیدروگراف‌ها به عنوان شرایط مرزی بالادست به مدل معرفی می‌گردند. همچنین برای شرط مرزی پایین‌دست منحنی‌های دبی - اشل در آخرین مقطع رودخانه به مدل معرفی گردیدند. برای این منظور دو منحنی اشل-دبی مربوط به قبل و بعد از ساخت سد تهیه گردید که در شکل‌های 14 و 15 نشان داده شده‌اند.



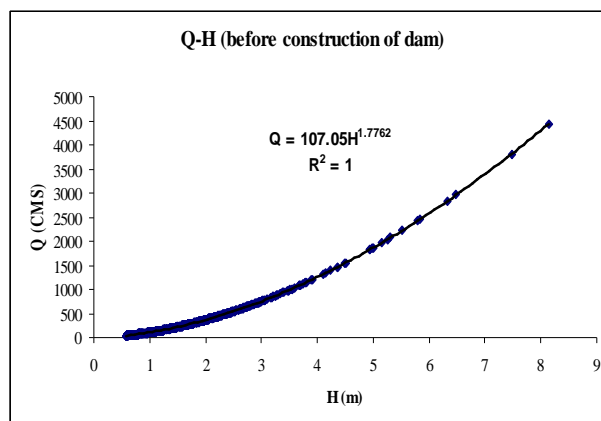
شکل 12 شبکه‌بندی قسمتی از رودخانه کرخه در مدل CCHE2D



شکل 13 هیدروگراف سه سال متوالی



شکل 15 منحنی دبی - اشل در مرز پایین‌دست بعد از ساخت سد



شکل 14 منحنی دبی - اشل در مرز پایین‌دست قبل از ساخت سد

در کلیه قسمت‌های رودخانه به میزان 1، 5 و 10 درصد کاهش و افزایش داده شد و نتایج حاصل در جداول 5 و 6 نشان داده شده است.

جدول 5 نتایج آنالیز حساسیت نسبت به ضریب مانینگ (قبل از احداث سد)

از احداث سد	حداکثر درصد تغییرات تراز سطح آب نسبت به حالت کالیبره شده (دبی مربوطه بر حسب CMS)	حداکثر تغییرات تراز سطح آب درصد تغییرات ضریب مانینگ
1	6 (76)	34 (4440)
5	7/41 (1210)	54 (4440)
10	13 (76)	88 (4440)
-1	5/55 (4440)	-48 (4440)
-5	7/4 (4440)	-64 (4440)
-10	9/36 (4440)	-81 (4440)

جدول 6 نتایج آنالیز حساسیت نسبت به ضریب مانینگ (بعد از احداث سد)

از احداث سد	حداکثر درصد تغییرات تراز سطح آب نسبت به حالت کالیبره شده (دبی مربوطه بر حسب CMS)	حداکثر تغییرات تراز سطح آب درصد تغییرات ضریب مانینگ
1	6/33 (21)	9 (181,159)
5	10/13 (21)	16 (159)
10	12/8 (159)	24 (181)
-1	6/98 (18)	-17 (181)
-5	9/93 (120)	-20 (181)
-10	14/32 (18)	-26 (181)

3-3- کالیبراسیون و آنالیز حساسیت مدل CCHE2D

به وسیله کالیبراسیون مدل CCHE2D مقدار ضریب مانینگ برای بازه‌های مختلف رودخانه کرخه قبل و بعد از ساخت سد مشخص گردید. برای این منظور رودخانه به 4 بازه تقسیم گردید. بازه اول از ایستگاه پای پل شروع می‌شود و به 12/3 کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌گردد. بازه دوم از انتهای بازه یک شروع و به 20/1 کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌گردد. بازه سوم از انتهای بازه دو شروع و به 30/5 کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌گردد. بازه چهارم از انتهای بازه سه شروع و به 44/2 کیلومتری پایین دست ایستگاه ختم می‌گردد. در قبل از احداث سد با استفاده از 9 مقدار دبی مشاهداتی که بین 63 تا 4440 مترمکعب بر ثانیه بودند، با کالیبراسیون مدل نتایج زیر حاصل شد:

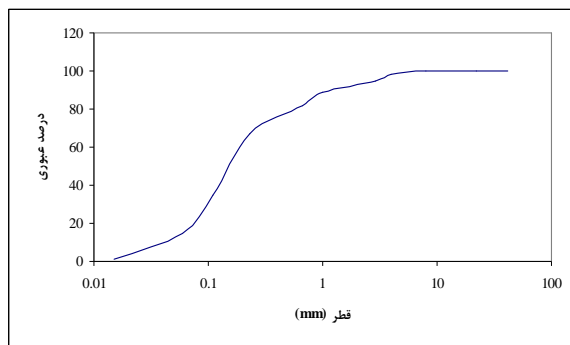
مقدار ضریب مانینگ در بازه اول 0/039 تا 0/042، در بازه دوم 0/037 تا 0/039، در بازه سوم 0/036 تا 0/038 و در بازه چهارم 0/034 تا 0/036 بدست آمد. بیشترین مقدار خطای نسبی 2/2 درصد، بیشترین اختلاف بین اشل محاسباتی و مشاهداتی 10 سانتی متر و مقدار RMSE 4/24 سانتی متر بدست آمد.

برای اطلاعات بعد از احداث سد با استفاده از 9 مقدار دبی مشاهداتی که بین 18 تا 181 مترمکعب بر ثانیه بودند، با کالیبراسیون مدل نتایج زیر حاصل شد:

مقدار ضریب مانینگ در بازه اول 0/039 تا 0/042، در بازه دوم 0/037 تا 0/039، در بازه سوم 0/036 تا 0/038 و در بازه چهارم 0/034 تا 0/036 بدست آمد. به عبارتی تغییری در ضریب مانینگ قبل و بعد از احداث سد حاصل نشد. بیشترین مقدار خطای نسبی 2 درصد، بیشترین اختلاف بین اشل محاسباتی و مشاهداتی 4 سانتی متر و مقدار RMSE 2/02 سانتی متر بدست آمد.

با آنالیز حساسیت، تغییرات تراز سطح آب در ایستگاه پای پل نسبت به تغییرات ضریب مانینگ در رودخانه محاسبه گردید و نتایج زیر مشاهده شد:

قبل از احداث سد برای 9 دبی مختلف (از 63 تا 4440 مترمکعب بر ثانیه) و بعد از احداث سد نیز برای 9 دبی مختلف (از 18 تا 181 مترمکعب بر ثانیه) ضریب مانینگ



شکل 19 منحنی دانه بندی در فاصله 30 تا 40 کیلومتری ایستگاه پای پل (1 درصد شن، 84 درصد ماسه و 15 درصد رس و لای)

برای تهیه اطلاعات مربوط به روابط بار معلق و بار بستر با دبی رودخانه، توسط سازمان آب و برق خوزستان در نقاط مختلف رودخانه نمونه‌گیری‌های متعددی در طی سالیان مختلف انجام گردیده است و با تحلیل این داده‌ها روابط ذیل در این تحقیق حاصل گردید:

جدول 7 روابط بار معلق با دبی رودخانه

فاصله از ایستگاه پای پل (km)	رابطه بار معلق با دبی
0-10 (قبل از احداث سد)	$Q_w=48.37SL+7.2085$
0-10 (بعد از احداث سد)	$Q_w=55.62SL+8.2898$
10-20 (قبل از احداث سد)	$Q_w=48.27SL+7.1969$
10-20 (بعد از احداث سد)	$Q_w=55.51SL+8.2764$
20-30 (قبل از احداث سد)	$Q_w=48.21SL+7.1854$
20-30 (بعد از احداث سد)	$Q_w=55.44SL+8.2632$
30-40 (قبل از احداث سد)	$Q_w=48.14SL+7.1738$
30-40 (بعد از احداث سد)	$Q_w=55.36SL+8.2499$

جدول 8 روابط بار بستر با دبی رودخانه

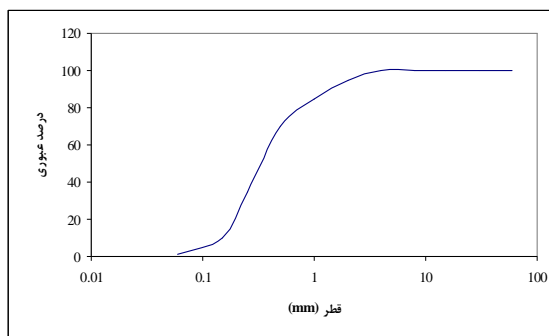
فاصله از ایستگاه پای پل (km)	رابطه بار بستر با دبی
0-10 (قبل از احداث سد)	$Q_w=0.1102BL+5.7932$
0-10 (بعد از احداث سد)	$Q_w=0.1256BL+6.6042$
10-20 (قبل از احداث سد)	$Q_w=0.11BL+5.7839$
10-20 (بعد از احداث سد)	$Q_w=0.1253BL+6.5936$
20-30 (قبل از احداث سد)	$Q_w=0.1096BL+5.7747$
20-30 (بعد از احداث سد)	$Q_w=0.1249BL+6.5831$
30-40 (قبل از احداث سد)	$Q_w=0.1094BL+5.7654$
30-40 (بعد از احداث سد)	$Q_w=0.1247BL+6.5725$

در جداول 8، Q_w دبی جریان بر حسب (m^3/s) و BL بار بستر و SL بار معلق رسوبات بر حسب (ton/day) می‌باشد.

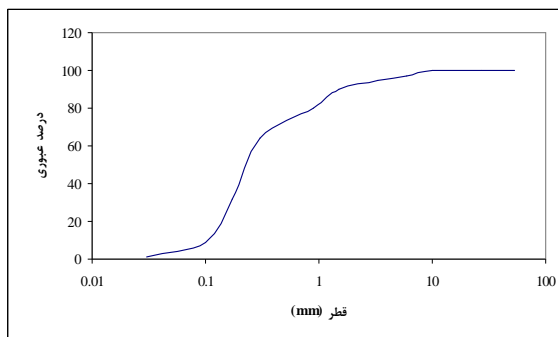
3-4- داده‌های معرفی شده مربوط به دانه بندی

رسوبات به مدل CCHE2D

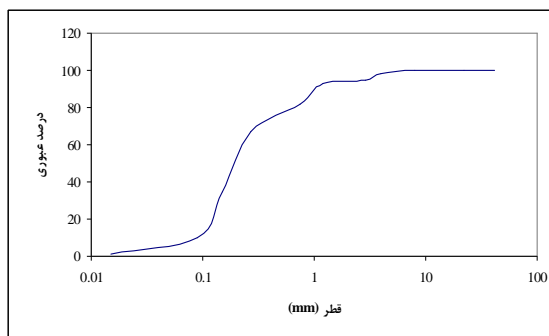
سومین داده ورودی برای محاسبه تنش برشی و فرسایش در مدل‌های هیدرولیکی، اطلاعات مربوط به رسوبات رودخانه می‌باشد. دانه‌بندی و درصد شن، ماسه، لای و رس و روابط دبی جریان و بار معلق و بار بستر برای قسمت‌های مختلف رودخانه در شکل‌های 16 تا 19 و جدول‌های 7 و 8 نشان داده شده‌اند. این اطلاعات توسط سازمان آب و برق خوزستان تهیه شده‌اند.



شکل 16 منحنی دانه بندی در فاصله 0 تا 10 کیلومتری ایستگاه پای پل (5 درصد شن، 93 درصد ماسه و 2 درصد رس و لای)



شکل 17 منحنی دانه‌بندی در فاصله 10 تا 20 کیلومتری ایستگاه پای پل (3/5 درصد شن، 90 درصد ماسه و 6/5 درصد رس و لای)



شکل 18 منحنی دانه بندی در فاصله 20 تا 30 کیلومتری ایستگاه پای پل (3 درصد شن، 89/5 درصد ماسه و 7/5 درصد رس و لای)

و نوع خاک آبرفت‌های کناره رودخانه کرخه در این بازه برای بعضی نقاط ذکر گردیده بود که با جدول 2 همخوانی داشت.

با اندازه‌گیری عرض و طول رودخانه در فواصل مختلف از مسیر در نواحی 6 گانه، با استفاده از شکل 20 نتایج ذیل حاصل شد.

جدول‌های 9 و 10 حداقل و حداکثر عرض رودخانه و اختلاف آنها را در 6 ناحیه تقسیم‌بندی شده نشان می‌دهد.

جدول 9 حداقل، حداکثر و متوسط عرض رودخانه قبل و بعد از احداث سد (مربوط به عرض مقطع پر)

ناحیه	سال 1375		سال 1390	
	حداقل عرض (m)	حداکثر عرض (m)	حداقل عرض (m)	حداکثر عرض (m)
1	141	903	46	288
2	545	1879	51	350
3	161	1038	50	901
4	122	1135	56	505
5	213	709	62	388
6	202	1151	26	554
متوسط	231	1136	49	498

جدول 10 اختلاف حداقل و حداکثر عرض رودخانه قبل و بعد از احداث سد

ناحیه	اختلاف عرض سال‌های 1375 و 1390	
	حداقل عرض (m)	حداکثر عرض (m)
1	95	615
2	494	1529
3	111	137
4	66	630
5	151	321
6	176	597
متوسط	182	638

بررسی جداول 9 و 10 نشان می‌دهد که:

- 1- قبل از احداث سد، عرض رودخانه حداقل 141 متر در ناحیه 1 و حداکثر 1879 متر در ناحیه 2 بوده است.
- 2- بعد از احداث سد، عرض رودخانه حداقل 26 متر در ناحیه 6 و حداکثر 901 متر در ناحیه 3 بوده است.

3-5- تعیین تغییرات طول، عرض، تنش برشی در قسمت‌های مختلف رودخانه و تشخیص بازه‌های فرسایش‌پذیر رودخانه

برای محاسبه تغییرات طول، عرض، تنش برشی در قسمت‌های مختلف رودخانه و تشخیص بازه‌های فرسایش‌پذیر رودخانه در این تحقیق از روند زیر استفاده می‌شود:

1- تهیه پلان و مقاطع عرضی رودخانه و تعیین خصوصیات خم‌های رودخانه، مانند شعاع و عرض آنها با استفاده از عملیات نقشه‌برداری، عکس‌های هوایی و نساویر ماهواره‌ای، قبل و بعد از احداث سد؛

2- تهیه اطلاعات مربوط به هیدرولیک جریان و رسوب با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و نمونه‌گیری در نقاط مختلف رودخانه، قبل و بعد از احداث سد؛

3- تهیه نقشه‌های خاکشناسی با استفاده از عکس‌های هوایی و نساویر ماهواره‌ای، قبل و بعد از احداث سد؛

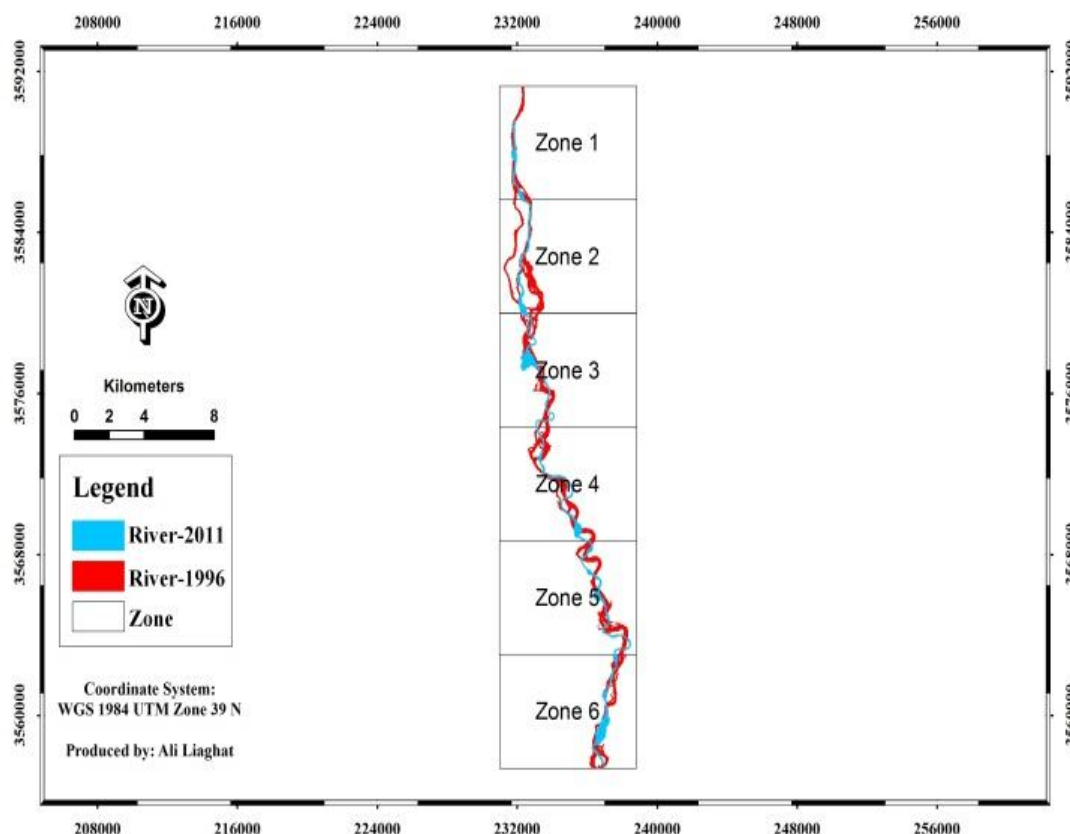
4- تعیین تغییرات طول، عرض، تنش برشی در قسمت‌های مختلف رودخانه در اثر احداث سد و تشخیص بازه‌های فرسایش‌پذیر رودخانه با استفاده از داده‌های تهیه شده و اجرای مدل CCHE2D.

بنابراین برای تهیه نتایج این تحقیق استفاده از دو ابزار ذیل مورد نیاز است:

الف) عملیات نقشه‌برداری، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، قبل و بعد از احداث سد و سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور برای پردازش داده‌ها و نمایش خروجی‌های مدل عددی؛

ب) مدل عددی CCHE2D برای تعیین تغییرات طول، عرض، تنش برشی در قسمت‌های مختلف رودخانه در اثر احداث سد و تشخیص بازه‌های فرسایش‌پذیر رودخانه.

همچنین برای تعیین تنش برشی مجاز نقاط مختلف رودخانه علاوه بر استفاده از عکس‌های هوایی و نساویر ماهواره‌ای قبل و بعد از احداث سد و سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، و در نهایت تهیه نقشه خاک منطقه از روش دیگری نیز استفاده شد. در روش دوم به تهیه نمونه‌های آبرفتی از کناره‌های رودخانه پرداخته شد و مقاومت برشی مجاز این نمونه‌ها مشخص گردید. همچنین در گزارش‌های سازمان آب و برق خوزستان مقاومت برشی



شکل 20 مقایسه مسیر بازه انتخابی از رودخانه در سال‌های 1375 و 1390

غالب رده بافتی خاک اراضی اطراف رودخانه از نوع لومی رسی (بالغ بر 91%) و باقیمانده بافت رسی (حدود 7%) می‌باشد. با استفاده از نتایج مدل CCHE2D بازه‌های فرسایش‌پذیر رودخانه که در آنها تنش برشی بیش از تنش برشی مجاز است، مشخص شد. جدول‌های 13 و 14 بازه‌های فرسایش‌پذیر اراضی حاشیه رودخانه را در سال‌های 1375 و 1390 نشان می‌دهند. لازم به توضیح است که در این بازه‌ها مقاطع مختلفی وجود دارند و در هر مقطع تنش برشی متغیر است. مبنای فرسایش در این بازه‌ها این است که در کلیه مقاطع آنها تنش برشی حداکثری که مشاهده می‌شود، بیش از تنش برشی مجاز باشد. برای تهیه جداول 13 و 14 از مقادیر تنش برشی حداکثر محاسبه شده توسط مدل در مقاطع مختلف بازه، متوسط‌گیری شده است و در جداول نشان داده شده است. همچنین ساحلی از رودخانه در هر بازه که تنش برشی حداکثر رخ داده در آن بیش از تنش برشی مجاز است، در این جداول مشخص شده است.

3- بیشترین تغییرات عرض در ناحیه 2 اتفاق افتاده که بین حداقل 494 متر و حداکثر 1529 متر می‌باشد. این نشان‌دهنده این است که ناحیه 2 دارای بیشترین جابجایی عرضی است.

نمونه‌ای از تغییرات عرض رودخانه برای تعدادی از مقاطع رودخانه به دلیل احداث سد در جدول 11 نشان داده شده است:

جدول 12 طول رودخانه را در 6 ناحیه تقسیم‌بندی شده نشان می‌دهد.

بررسی جدول 12 نشان می‌دهد که:

1- قبل از احداث سد، طول رودخانه حداکثر 8394 متر در ناحیه 4 و حداقل 3398 متر در ناحیه 1 می‌باشد.

2- بعد از احداث سد، طول رودخانه حداکثر 8865 متر در ناحیه 5 و حداقل 4181 متر در ناحیه 1 می‌باشد.

3- بیشترین تغییرات با افزایش طول 1685 متر در ناحیه 3 و کمترین تغییرات با کاهش طول 41 متر در ناحیه 6 اتفاق افتاده است.

جدول 11 تغییرات عرض رودخانه برای تعدادی از مقاطع

رودخانه به دلیل احداث سد

فاصله از ایستگاه پای پل (m)	عرض قبل از احداث سد (m)	عرض بعد از احداث سد (m)
536/8	150/2	34/6
798/7	150	47/2
1954/6	303/9	51/2
2820/4	277	55/5
5137/9	216/1	68/6
6698/8	405/1	71/6
7194/5	588/7	53/5
8177/2	379/6	58/4
8888	338/2	49/7
9810/5	431/7	42/6
10851/6	395/2	86
12025/1	256/2	75/4
12698/9	162/1	69/6
13770/3	226/5	49/8
13856/4	320/6	33
15085/2	479/9	59/2
15868/9	75/3	60/5
17450/7	219/3	44/7
18202/9	223/5	62
18720/3	267/9	54/2
20060/3	172/1	84/8
20597/5	322/6	53/9
21234/6	190/8	37/3
21614/9	171/7	57/9
22200/5	152/5	80/2
22853	231/4	60/6
24011	259/2	61
25111/3	183/4	50/5
25737/1	212/2	54/1
26015/2	329/9	65/8
27840	331/2	70/5
29065/6	301/7	75/6
29800/6	287/4	80/9
30981/5	283/8	84/7

فرسایش قرار گرفته است.

جدول 12 طول رودخانه قبل و بعد از احداث سد

ناحیه	طول رودخانه (m)	
	سال 1390	سال 1375
اختلاف 1390 با 1375		
1	4181	3398
2	6295	6622
3	8191	6506
4	8312	8394
5	8865	7986
6	6299	6340
مجموع	42143	39246

جدول 13 بازه‌های فرسایش پذیر اراضی حاشیه رودخانه در

سال 1375

ناحیه	فاصله ابتدا و انتهای محدوده از ایستگاه پای پل (m)	طول بازه فرسایشی (m)	متوسط حداکثر تنش برشی در بازه فرسایشی (N/m ²)	ساحل تحت تأثیر
2	9092-9270	178	18/44	راست
3	10190-10346	156	16/44	راست
5	31660-31925	265	29/60	راست
6	33350-33660	310	21/83	چپ
6	33660-33940	280	23/87	راست
6	35665-35790	125	13/42	چپ

جدول 14 بازه‌های فرسایش پذیر اراضی حاشیه رودخانه

در سال 1390

ناحیه	فاصله ابتدا و انتهای محدوده از ایستگاه پای پل (m)	طول بازه فرسایشی (m)	متوسط حداکثر تنش برشی در طول بازه فرسایشی (N/m ²)	ساحل تحت تأثیر
2	9095-9265	170	16/45	راست
3	14070-14100	30	12/27	چپ
3	16330-16430	100	14/54	چپ
4	25390-25670	280	29/31	چپ
5	32730-32990	260	26/10	چپ

در سال 1375 بطور کل 6 بازه تحت فرسایش متوسط تا زیاد بوده و طول کل بازه فرسایشی حدوداً 1314 متر بوده که تقریباً 3% کل مسیر را شامل شده است. حدود 67% ساحل سمت راست و 33% ساحل سمت چپ تحت تأثیر

در سال 1390 بازه تحت فرسایش متوسط تا زیاد بوده و طول کل بازه فرسایشی حدوداً 840 متر بوده که تقریباً

می‌دهد. به این منظور در نقاط مختلف رودخانه با استفاده از عملیات نقشه برداری در سال‌های مختلف تغییرات بستر رودخانه بررسی شد و نتایج زیر حاصل گردید:

جدول 15 تراز خط القعر رودخانه در سالیان مختلف

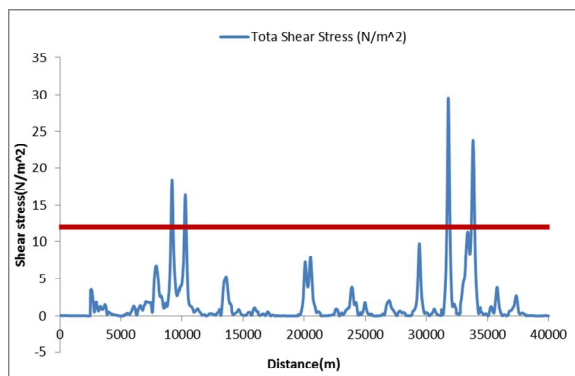
فاصله مقطع از ایستگاه پای پل (km)	تراز خط القعر (متر) در سال	تراز خط القعر (متر) در سال	تراز خط القعر (متر) در سال
0	1375	1380	1390
20	77/84	77/6	103/67
40	63/75	63/87	63/98

جدول 15 نشان می‌دهد که در ایستگاه پای پل اثرات سد بسیار شدید است. در سال‌های ابتدایی ساخت سد، به دلیل اینکه جریان عبوری از سد رسوب اندکی دارد، قدرت فرسایش آن زیاد است و فرسایش شدیدی رخ می‌دهد. در سال‌های بعد، به دلیل رسیدن بستر رودخانه به لایه زرهی مقدار فرسایش کاهش یافته و به دلیل عمیق شدن رودخانه سرعت جریان در این قسمت کاهش یافته و ته‌نشینی رخ می‌دهد تا رودخانه به شرایط تعادلی برسد. در 20 کیلومتری ایستگاه پای پل تغییرات کاهش می‌یابد و در ابتدا فرسایش و سپس ته‌نشینی رسوبات رخ می‌دهد. به عبارتی در سال‌های اخیر مواد فرسایش یافته در بالادست در این قسمت ته‌نشین می‌شوند. در فاصله 40 کیلومتری ایستگاه پای پل مشاهده می‌گردد که تغییرات ناشی از احداث سد بسیار اندک می‌باشد.

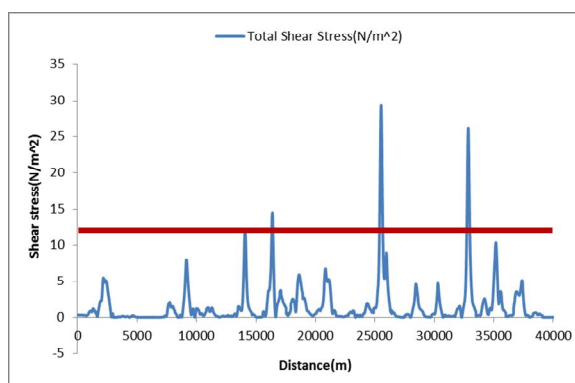
بعد از احداث سد، مسیر رودخانه در بسیاری از مقاطع، مقدار زیادی جابه‌جا شده است. همچنین قسمت‌هایی از رودخانه به صورت شاخه شاخه در آمده است؛ به این دلیل بسیاری از کشاورزان برای دسترسی آسانتر به رودخانه مجبور به جابه‌جایی مزارع خود گردیده‌اند. بنابراین زمان برای بررسی اثرات مزارع کشاورزی بر روی مورفولوژی رودخانه کافی نمی‌باشد. توصیه می‌گردد که در آینده اثرات مزارع کشاورزی (مانند اثرات زهکشها، کانال‌های آبیاری و حفاری کناره‌های رودخانه برای پمپاژ آب به مزارع) بر روی تغییرات هندسه و تنش برشی رودخانه بررسی گردد. همچنین شبکه‌های آبیاری و زهکشی

2% کل مسیر را شامل شده است. حدود 20% ساحل سمت راست و 80% ساحل سمت چپ تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته است.

در شکل‌های 21 و 22 تغییرات تنش برشی متوسط مقاطع مختلف رودخانه در طول رودخانه در قبل و بعد از احداث سد نشان داده شده اند:



شکل 21 تغییرات تنش برشی متوسط مقاطع مختلف رودخانه در سال 1375 (قبل از احداث سد)



شکل 22 تغییرات تنش برشی متوسط مقاطع مختلف رودخانه در سال 1390 (بعد از احداث سد)

3-6- بررسی فرسایش رودخانه تحت تأثیر احداث سد و عوامل دیگر

با توجه به اینکه در این تحقیق دو بازه زمانی قبل و بعد از احداث سد مد نظر قرار گرفته است، در تعیین میزان فرسایش در قسمت‌های مختلف رودخانه باید عوامل متعددی به غیر از تنش برشی در نظر گرفته شود. مهمترین عامل احداث سد و تغییراتی است که در شرایط جریان و رسوب رودخانه در سالیان پس از احداث سد رخ

سیستم اطلاعات جغرافیایی، تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات میدانی تهیه شده است) است، می‌تواند قسمت‌هایی از رودخانه که ممکن است در آینده تحت فرسایش قرار گیرند را مشخص نماید. در این قسمت‌ها تنش برشی بیش از تنش برشی مجاز می‌باشد. بنابراین باید تمهیداتی در این قسمت‌ها برای پایداری جداره رودخانه و حفظ حریم و بستر رودخانه اندیشید.

5- فهرست علائم

BL	بار بستر رسوبات (tonday^{-1})
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
h	عمق جریان (m)
h_0	عمق جریان در $n=0$ (در وسط مجرا)
n	شماره خطوط (j) شبکه در راستای η
k_s	ارتفاع زبری سطح بستر (m)
Q_s	دبی رسوب (tonday^{-1})
Q_w	دبی جریان (m^3s^{-1})
r_o	شعاع انحناء خط مرکزی قوس
S	شیب کانال
SL	بار معلق رسوبات (tonday^{-1})
u^*	سرعت برشی (ms^{-1})
u, v, w	مؤلفه‌های سرعت در جهات x, y, z (ms^{-1})
\bar{U}_{so}	سرعت میانگین عمقی در خط مرکزی آبراهه
ρ	جرم مخصوص آب (kgm^{-3})
τ_{yx} و τ_{zx}	به ترتیب تنش‌های برشی در راستای محور X در صفحات Y-X و Z-X ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
V	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
η	راستای Y

6- منابع

- Abad, J.D. and Garcia, M.H. (2006). "RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams". *Comput. Geosci.* 32(1), pp. 92-101.
- Amiri-Tokaldany, E.; Darby, S.E. and Tossell, P. (2007). "Coupling bank stability and bed deformation models to predict equilibrium bed topography in river bends". *J. Hydraulic Eng.* 133(10), pp. 1167-1170.
- Amsler, M.L.; Ramonell, C.G. and Toniolo, H.A. (2005). "Morphologic changes in the Paraná River

احداث شده توسط وزارت نیرو به دلیل عدم ساخت کانال‌های کوچک، تاکنون مورد بهره‌برداری قرار نگرفته‌اند. از جمله می‌توان به یک کانال آبیاری بزرگ در نزدیکی ایستگاه هیدرومتری پای پل و در ساحل راست رودخانه اشاره نمود که در صورت بهره‌برداری قادر است تغییرات زیادی در هندسه و مورفولوژی رودخانه ایجاد نماید. بنابراین قسمت اعظم تغییرات هندسه و مورفولوژی رودخانه به دلیل شرایط جریان و اثرات احداث سد می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

- بطور کلی احداث سد کاهش قابل توجهی در عرض رودخانه پایین‌دست داشته است، به گونه‌ای که حداقل و حداکثر عرض بعد از احداث سد حدود 21% و 44% عرض‌های قبل از احداث سد می‌باشد.

- در دوره آماری 15 ساله بررسی شده، طول رودخانه حدود 2897 متر افزایش یافته است.

- بررسی‌ها نشان می‌دهد که قبل از احداث سد بین کیلومتر 30 تا 35 از ایستگاه پای پل بسیار مساعد برای فرسایش بوده و اگرچه بعد از احداث سد این بازه تعدیل یافته، اما هنوز تحت تأثیر فرسایش قرار دارد.

- بعد از احداث سد بازه فرسایشی بسمت بالا دست، یعنی بین کیلومتر 25 تا 32 از ایستگاه پای پل انتقال پیدا کرده است. علت این مورد نیز پتانسیل بالای جریان بدون رسوب یا کم رسوب برای فرسایش مناطق بالادست می‌باشد.

- محاسبات و نتایج مدل نشان می‌دهد که احداث سد باعث کاهش 36% در طول فرسایشی بازه مورد مطالعه شده است.

- با توجه به اینکه غالب رده بافتی خاک اراضی اطراف رودخانه از نوع لومی رسی و رسی بوده و مقاومت این بافت در مقابل فرسایش نسبتاً خوب است، لذا تنها 2 تا 3% بازه فرسایش پیدا کرده است.

در جمع‌بندی نهایی می‌توان گفت نتایج این روش که تلفیقی از یک مدل دو بعدی هیدرودینامیک و یک نقشه خاکشناسی و نوع مواد آبرفتی (این نقشه با استفاده از

- channels". W.R. White and J. Watts (eds), Proc. 2nd International Conference on River Flood Hydraulics. H.R. Wallingford Ltd. and John Wiley & Sons, Chichester, UK, pp. 459-469.
- Ghomeshi, M. (2005). Result of Sedimentation types analysis (case study: Kharkhe river. Khuzestan Water & Power Authority (KWPA), Technical Report.
- Grimaud, J.L.; Chardon, D.; Metelka, V.; Beauvais, A. and Bamba, O. (2015). "Neogene cratonic erosion fluxes and landform evolution processes from regional regolith mapping (Burkina Faso, West Africa)". *Geomorphology* 241, pp. 315-330.
- Güneralp, İ. and Marston, R.A. (2012). "Process-form linkages in meander morphodynamics: Bridging theoretical modeling and real world complexity". *Prog. Phys. Geog.* 36(6), pp. 718-746.
- Guo, J. and Julien, P.Y. (2005). "Shear stress in smooth rectangular open-channel flows". *J. Hydraulic Eng.* 131(1), pp. 30-37.
- Haynes, H. and Pender, G. (2007). "Stress history effects on graded bed stability". *J. Hydraulic Eng.* 133(4), pp. 343-349.
- Jia, Y. and Wang, S.S.Y. (2001). *CCHE2D*: Two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flows over loose bed. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1.
- Kean, J.W.; Kuhnle, R.A.; Smith, D.; Alonso, C.V. and Langendoen, E.J. (2009). "Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress". *J. Hydraulic Eng.* 135(7), pp. 588-601.
- Malik, I. and Matyja, M. (2008). "Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bílá Opava River—Czech Republic)". *Geomorphology* 98(1-2), pp. 126-142.
- Michalik, L.B.A. and Tekielak, T. (2013). "The relationship between bank erosion, local aggradation and sediment transport in a small Carpathian stream". *Geomorphology* 191, pp. 51-63.
- Narinesingh, P. and Pizzuto, J.E. (2009). "Applying a model of curvature-driven bend migration developed for alluvial rivers to a gravel-bedded river with reaches of exposed bedrock". Proc. AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, California, USA, 1, pp. 0885.
- Omran, M. (2008). "New developments in predicting stage-discharge curves, velocity and channel (Argentina) in the light of the climate variability during the 20th century". *Geomorphology* 70(3-4), pp. 257-278.
- Avila, H.; Vargas, G. and Daza, R. (2014). "Susceptibility analysis of river bank erosion based on exposure to shear stress and velocity combined with hydrologic and geomorphologic variables". Proc. World Environmental and Water Resources Congress (EWRI), ASCE., Portland, Oregon, USA.
- Bandyopadhyay, S.; Ghosh, K. and De, S.K. (2014). "A proposed method of bank erosion vulnerability zonation and its application on the River Haora, Tripura, India". *Geomorphology* 224, pp. 111-121.
- Bertrand, F. and Papanicolaou, A.N. (2009). "Effects of freezing and thawing processes on bank stability". Proc. World Environmental and Water Resources Congress of ASCE., Kansas City, Missouri, United States, pp. 1-9.
- Briaud, J.L.; Chen, H.C.; Edge, B.; Park, S. and Shah, A. (2001). Guidelines for bridges over degrading and migrating streams. Part 1: Synthesis of existing knowledge, Texas Transportation Institute, Report No. TX-01/2105-2.
- Chang, H.H. (1983). "Energy expenditure in curved open channels". *J. Hydraulic Eng.* 109(7), pp. 1012-1022.
- Chang, H.H. (1985). "Water and sediment routing through curved channels". *J. Hydraulic Eng.* 111(4), pp. 644-658.
- Chang, H.H. (1994). "Selection of gravel-transport formula for stream modeling". *J. Hydraulic Eng.* 120(5), pp. 646-651.
- Chang, H.H.; Harrison, L.L.; Lee, W. and Tu, S. (1996). "Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs". *J. Hydraulic Eng.* 122(7), pp. 381-388.
- Chang, H.H. and Hill, J.C. (1977). "Minimum stream power for rivers and deltas". *J. Hydraulics Div.* 103(HY12), pp. 1375-1389.
- Chang, H.H. and Stow, D. (1989). "Mathematical modeling of fluvial sand delivery". *J. Waterway Port C.* 115(3), pp. 311-326.
- Constantine, J.A.; McLean, S.R. and Dunne, T. (2010). "A mechanism of chute cutoff along large meandering rivers with uniform floodplain topography". *Geol. Soc. Am. Bull.* 122(5-6), pp. 855-869.
- Ervine, D.; Sellin, R.J. and Willetts, B.B. (1994). "Large flow structures in meandering compound

- and Abt, S.R. (2012). "Evaluating boundary shear stresses in natural-shaped channel bendways: Proc. World Environmental and Water Resources Congress 2012, ASCE., Albuquerque, New Mexico, United States, pp. 1366-1375.
- Verhaar, P.M.; Biron, P.M.; Ferguson, R.I. and Hoey, T.B. (2008). "A modified morphodynamic model for investigating the response of rivers to short-term climate change". *Geomorphology* 101(4), pp. 674-682.
- Wilcock, P.R. (1993). "Critical shear stress of natural sediments". *J. Hydraulic Eng.* 119(4), pp. 491-505.
- Yang, C.T. (1996). *Sediment transport: theory and practice*. McGraw-hill. New York, 396 p.
- Yu, M.; Wei, H.; Liang, Y. and Hu, C. (2010). "Study on the stability of noncohesive river bank". *Int. J. Sediment Res.* 25(4), pp. 391-398.
- Zámolyi, A.; Székely, B.; Draganits, E. and Timár, G. (2010). "Neotectonic control on river sinuosity at the western margin of the Little Hungarian Plain". *Geomorphology* 122(3-4), pp. 231-243.
- boundary shear stress distributions in open channel flow". *Water Environ. J.* 22(2), pp. 131-136.
- Patra, K.C.; Kar, S.K. and Bhattacharya, A.K. (2004). "Flow and velocity distribution in meandering compound channels". *J. Hydraulic Eng.* 130(5), pp. 398-411.
- Rüther, N. and Olsen, N.R.B. (2007). "Modelling free-forming meander evolution in a laboratory channel using three-dimensional computational fluid dynamics". *Geomorphology* 89(3-4), pp. 308-319.
- Shafai Bajestan, M.; Hassanzadeh, H. and Nasre Esfahani, M. (2010). Investigation of sedimentology and estimation of yearly sediment yield in Karkheh river. Khuzestan Water & Power Authority (KWPA), Technical Report, 274 P.
- Thoman, R.W. and Niezgoda, S.L. (2008). "Determining erodibility, critical shear stress, and allowable discharge estimates for cohesive channels: Case study in the Powder River basin of Wyoming". *J. Hydraulic Eng.* 134(12), pp. 1677-1687.
- Thornton, C.I.; Ursic, M.E.; Baird, D.C.; Sin, K.S.