

بررسی اثر احداث سد بر تغییرات ریخت‌شناسی پیچان رود های پایین دست با استفاده از بسته آب پویائی CCHE2D (مطالعه‌ی موردی: رود کرخه)

علی لیاقت^۱، آرش ادیب^{۲*}، حمیدرضا غفوری^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۲۵

چکیده

برقراری تعادل در رودخانه‌ها به عوامل مختلفی وابسته بوده و ممکن است تعادل برقرار شده نیز در هر لحظه، و در هر مقطع زمانی به هم بخورد. یکی از مهمترین این عوامل احداث سد بر روی رودخانه‌ها است. در این تحقیق، هدف بررسی احداث سد کرخه بر تغییرات ریخت‌شناسی پیچان رود پایین دست است. در این راستا، شناسائی و بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ی کرخه قبل و بعد از احداث سد، تعیین میزان تغییرات طولی و عرضی خم‌های رودخانه پائین دست با توجه به تصاویر ماهواره‌ای و با استفاده از یک بسته آب پویائی CCHE2D انجام پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهند که در شرایط طبیعی، عرض بستر رود به طرف پائین دست مسیر، متناسب با کاهش شیب، افزایش می‌یابد. متوسط عرض رودخانه قبل از احداث سد حدود ۲۷۳ متر، و بعد از آن تقریباً ۶۰ متر رسیده است. با کاهش عرضی حدود ۷۸٪ عرض رودخانه تقریباً ۲۱ هکتار اراضی در هر کیلومتر از امتداد آن آزاد می‌شود. در محدوده مورد مطالعه، متوسط جابه‌جائی خط القعر رودخانه حدود ۳۴۰ متر، حداقل و حداکثر جابه‌جائی ۵۳ و ۷۶۸ متر می‌باشد. بالغ بر ۵۶٪ از جابه‌جائی‌ها به سمت راست جریان (غرب) رودخانه بوده و نزدیک بر ۵۹٪ این جابه‌جائی‌ها بیرون از بستر قدیم صورت گرفته است. به طور متوسط، سالانه حدود ۳۴ متر جابه‌جائی عرضی رودخانه در بازه‌ی مورد نظر اتفاق افتاده است، که بیانگر ناپایداری این منطقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش، سد، خم، زمین ریخت‌شناسی، بسته آب پویائی CCHE2D

^۱ دانشجوی دکتری عمران آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

Email: arashadib@yahoo.com تلفن: ۰۹۱۲۲۱۵۳۹۶۹

^۳ استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

مقدمه

پس از احداث سد، وضعیت رودخانه تغییر یافته و سامانه ی فرسایش آن دگرگون می شود. با احداث سد میزان تولید، ذخیره و حمل رسوب در سامانه تغییر می کند، که این امر موجب تغییر فرسایش، و در نتیجه دگرگونی ریخت شناسی نهر در دوره های کوتاه و بلندمدت می گردد. این امر، همچنین موجب تغییر خصائص ریخت شناسی بستر و دیواره، و در نتیجه انتقال میزان آب، بالطبع افت یا بالآمدگی بستر و گسترش مناطق سیلگیر در پیرامون رودخانه می گردد، که می توان تمام موارد فوق را برآیند تحولات ریخت شناسی به حساب آورد. تغییر مسیر خم ها یکی از بارزترین مشکلات ناپایداری است، که در واقع تهدیدی جدی برای طرح هایی نظیر مهار کردن سیلاب محسوب می شود، به طوری که با تغییر مسیر و مهاجرت خم ها سازه هایی مانند خاکریزها و تاسیسات آبیگری جانبی رودخانه ها کاربری خود را از دست می دهند (وایت و همکاران، ۱۹۸۲).

درمقاطع خم ها تغییرات زیادی در توزیع طولی سرعت از قوس داخلی به سمت قوس خارجی یک خم وجود دارد. به علت تغییرات متوالی شعاع انحنای قوس، فرا سنج های جریان درمقاطع خم ها نسبت به مقاطع مستقیم به طور قابل ملاحظه ای پیچیده ترند (پاتراوهمکاران، ۲۰۰۴).

اروین و همکاران (۲۰۰۰) بیان نمودند که مهمترین مشخصه ی ساختار جریان در خم های رودخانه ها جهت معکوس چرخش جریان ثانویه در راس قوس در قبل و بعد از وقوع سیلاب است. شدت و جهت چرخش این جریان تاثیر شدیدی بر ریخت شناسی بستر و کناره ها، و نیز توزیع عرضی و طولی سرعت، دارد.

یکی از موارد استفاده از تصاویر ماهواره ای، بررسی تغییر شکل هندسی خم ها طی یک دوره می باشد. معمولاً، هنگام طغیان رودها، بالا آمدن آب و پیشروی آن در نواحی ساحلی، و سرانجام پس از جاری شدن سیل، سطوح کوچک و بزرگی از نواحی مجاور رودخانه ها به زیر آب می روند که با بررسی تصاویر تکراری ماهواره ای، می توان تغییرات هندسی آنها را به سهولت تشخیص داد.

در این تحقیق هدف بررسی احداث سد کرخه بر تغییرات ریخت شناسی پیچان رود پایین دست است. در این راستا، شناسائی و بررسی تغییرات ریخت شناسی رودخانه ی کرخه قبل و بعد از احداث سد، تعیین میزان تغییرات طولی و عرضی خم های رودخانه پائین دست با توجه به تصاویر ماهواره ای و با استفاده از یک بسته ی آب پویائی CCHE2D انجام پذیرفته است.

افزون بر آن، اثرات احداث سد کرخه بر خصوصیات هیدرولیکی و ریخت شناسی رودخانه در پایین دست آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، تغییرات شکل هیدرولیکی رودخانه ی کرخه در حدفاصل ایستگاههای پای پل و عبدالخان (پایین دست سد کرخه) با استفاده از نرم افزار CCHE2D شبیه سازی شده و جابه جایی در (تصویر کف و مقطع) و تغییرات خصوصیات ریخت شناسی رودخانه در سالهای ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵ از طریق مقایسه تصاویر ماهواره ای تعیین شدند.

سد کرخه بزرگترین سد ایران و خاورمیانه است که بر روی رودخانه ی کرخه بنا گردیده و از سال ۱۳۸۱ مورد بهره برداری قرار گرفته است. این سد که، یکی از بزرگترین سدهای خاکی دنیا می باشد، در ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک در استان خوزستان ساخته شده است. رود کرخه پس از کارون و دز سومین رود بزرگ ایران از نظر آبدهی محسوب می شود.

مروری بر پیشینه تحقیق

میزان اثر سد کوچیتی^۴ بر ریخت شناسی رودخانه ی پایین دست، به میزان زیادی به سیاست درازمدت سد و خصوصیات آبراهه وابسته است (ریچارد و ژولین، ۲۰۰۳). تغییرات دراز مدت بستر رود ریوگرانده^۵ و اثر احداث سازه های آبی (ریچارد و همکاران، ۲۰۰۵)، تغییرات هندسه هیدرولیکی پایین دست سد هاپچئون^۶ (شن و ژولین، ۲۰۱۰)، تاثیر تغییرات بده روزانه جریان ناشی از سد بر رودخانه ی هووانگ^۷ (شن و ژولین، ۲۰۱۱)، بررسی تاثیر سد اینگل

^۶Hapcheon Dam

^۷Hwang River

^۴Cochiti Dam

^۵Rio Grande

کنستانتین وهمکاران (۲۰۱۰) ساز و کار ایجاد میانبر در طول خم های بزرگ با پستی و بلندی سیلاب دشت را بررسی و بیان کردند که عللی همچون تغییرات ناگهانی در گنجایش مقاطع، مانند ایجاد سدهای طبیعی و وقوع سیلاب های ناگهانی، میانبر را ایجاد می کنند.

گونرالپ و مارستون (۲۰۱۲)، مراحل شکل گیری خم های ریخت پویائی را مورد بررسی قرار دادند؛ همچنین در خصوص چگونگی شکل گیری خم ها بر اساس نیروهای آب پویائی و الگوی تغییرات هندسه آنها بحث نمودند.

کروسکی (۲۰۱۲) در تحقیقی، اثرات شبیه سازی نیروی کریولیس را بر ایجاد پیچان رود در آزمایشگاه، نشان داد. کرم اکر و دوتا (۲۰۱۶) از یک شبیه دو بعدی سطحی برای تعیین سرعت و عمق جریان در یک بازه ۱۲ کیلومتری رودخانه ای در هندوستان استفاده کردند. آنها تشخیص دادند که خط القعر رودخانه در دو فصل متوالی سیلابی جابه جا شده، و این نتایج منطبق با مشاهدات و تصاویر ماهواره ای بود.

ونگ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از یک نرم افزار دو بعدی سطحی به شبیه سازی جریان و رسوب در بستر رود زرد چین پرداختند. آنها میزان افزایش و کاهش کف را در رودخانه شاخه شاخه شده تعیین کردند. نتایج آنها انطباق خوبی با تصاویر ماهواره ای داشت.

هوانگ و همکاران (۲۰۱۴) یک نرم افزار دو بعدی جریان را با یک نرم افزار یک بعدی انتقال رسوب ترکیب کردند. آنها تغییر تراز نهر و نرخ فرسایش کف و کناره ها را در یک نهر پیچ و خم دار تعیین کردند. آنها فرض کردند که در بالادست سدی وجود دارد و مقدار رسوب در رود کاهش یافته است. آنها مشاهده کردند که فرسایش در پایین دست سد افزایش یافته و مقدار شیب کاهش یافته است.

حوزه ی مورد مطالعه

به منظور شبیه سازی الگوی جریان جهت تحلیل هیدرولیکی خم ها بازه ای از رودخانه ی کرخه (پایین دست سد کرخه و ایستگاه آب سنجی پای پل) انتخاب

برایت^۸ بر ریخت شناسی پایین دست (مدیریت آب ناحیه یوبا، ۲۰۱۰) و بررسی تاثیر عملکرد سد کیتسون^۹ بر ریخت شناسی رودخانه ی آرکانساس^{۱۰} (لوت و همکاران، ۲۰۱۳) نمونه هایی از مطالعات در این زمینه می باشند.

به نظر می رسد که نخستین پژوهش در زمینه تغییرات زمین ریخت شناسی ناشی از احداث سدها را، پیتزا^{۱۱} در اوآخردهه^{۱۲} ۱۹۷۰ انجام داده، که تأثیرات عمیقی بر تفکرات محققان بعدی گذاشته است (براندت، ۲۰۰۰؛ استواکس و همکاران، ۲۰۰۹).

سدها وضعیت جریان و بار رسوبی رودخانه را تحت تأثیر قرار می دهند. در بالادست آبگیر سدها سطح محلی آب زیرزمینی بالا می آید، رودخانه هایی که به آبگیر وارد می شوند بار خود را هم در بسترهایشان نزدیک به حواشی آبگیر و هم به صورت مصب در خود آبگیر ته نشین می کنند. رسوبگذاری، شیب بستر رودخانه را کاهش می دهد و بر ارتفاع بستر می افزاید، و بدین گونه خطر سیل را فزونی می بخشد. علاوه بر تغییر نیمرخ طولی و عرضی مجرای رودخانه، فرسایش در شاخه های فرعی و سرشاخه ها، تحت تأثیر تغییرات سطح پایه به شدت تشدید می شود (اوریم و همکاران، ۲۰۱۳؛ گرانت و همکاران، ۲۰۰۳؛ سوریان و دینالدی، ۲۰۰۳؛ نلسون و همکاران، ۲۰۱۳).

زامولبی و همکاران (۲۰۱۰) شکل هندسی رودخانه را انعکاسی از بده و رسوب و شرایط آب شناسی جریان تفسیر می کنند. این محققین در بررسی الگوی هندسی رودخانه تنها به نقش یک عامل توجه ویژه ای کرده و به ندرت به صورت سامانه ای، شرایط زمین ریخت شناسی و زمین شناسی مسیر رودخانه را در نظر گرفته اند.

نارینسینگ و پیزوتو (۲۰۰۹) با استفاده از کاربرد نرم افزار مهاجرت خم ها در رودخانه جنوبی ویرجینیا، پدیده ی توسعه و مهاجرت خم ها را در بازه های آبرفتی با بستر شنی و بستر سنگی با هم مقایسه نمودند. این تحقیق نشان داد که بالغ بر ۴۵٪ مناطقی که در آن نرم افزار فرسایش را پیش بینی می کرد، در مشاهدات صحرائی دیده شد.

¹⁰Arkansas River

¹¹Petts

⁸Englebright Dam

⁹Keystone Dam

معادلات جریان: از آنجا که اغلب جریان های مجاری باز جزء مسائل آب های کم عمق می باشند، بنابراین تاثیر حرکت قائم ذرات آب از اهمیت چندانی برخوردار نبوده، و به همین دلیل، معادلات دو بعدی متوسط گیری شده در عمق در بیشتر موارد شبیه سازی هیدرولیک جریان در رودخانه ها از دقت و کارایی مناسبی برخوردارند است. معادلات جریان متوسط گیری شده در عمق برای جریان های آشفته در نرم افزار CCHE2D به صورت زیر می باشند:

معادلات پیوستگی جریان:

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

معادله ی اندازه ی حرکت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} =$$

$$-g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{cor} u$$

در این معادلات اندازه ی حرکت (۲) رابطه اندازه حرکت

تنشهای رینولدزی را می توان با استفاده از فرض بوسینسک

به صورت زیر تخمین زد:

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

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

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

جهت گسسته سازی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر شبیه سازی در زمینه ی آب و رسوب، لازم است که با استفاده از روش های عددی محیط شبکه بندی گردد؛ بدین منظور، با استفاده از نرم افزار ایجاد شبکه CCHE2D Mesh Generator بازه منتخب را با کاربرد روش جبری و عددی شبکه بندی نمود، سپس شبکه های تولید شده را با استفاده توابع ADO و MDO ارزیابی کرد. لازم به ذکر است، که به طور کلی نرم افزار CCHE2D شامل یک زیر نرم افزار مجزا جهت

گردید. شکل (۱) موقعیت ایستگاه پای پل بر روی رودخانه ی کرخه، و شکل (۲) موقعیت بازه انتخابی رودخانه ی کرخه را نشان می دهد.

مواد و روش ها

مراحل انجام این تحقیق به شرح ذیل است:

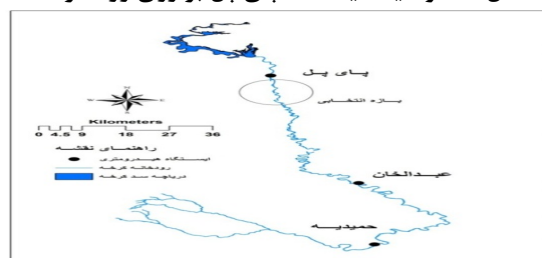
۱- روندیابی هیدرولیکی و تعیین مشخصه های جریان و شبیه سازی انتقال رسوب در رود کرخه با کاربرد نرم افزار CCHE2D و محاسبه ی فرا سنج های هیدرولیکی جریان و انتقال رسوب.

۲- مقایسه ی نتایج به دست آمده از شبیه سازی نرم افزار آب پویائی مقاطع و نقاط یکسان قبل و بعد از احداث سد (با استفاده از تصاویر ماهواره ای)، به منظور مشخص کردن اثر احداث سد.

۳- محاسبه ی طول ناپایداری رودخانه، و نشان دادن وضعیت ریخت شناسی آن قبل و بعد از احداث سد.



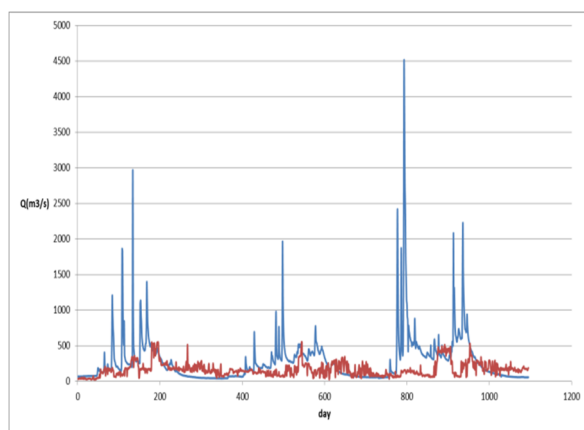
شکل ۱- موقعیت ایستگاه پای پل بر روی رود کرخه.



شکل ۲- موقعیت بازه انتخابی از رود کرخه.

تحلیل آب نگار بده ی روزانه جریان در شبیه سازی: یکی از عوامل مهم در تعیین نحوه ترکیب آب نگارهای سیل و وضعیت سامانه رودخانه ای در مواقع سیلابی، تاخیر زمانی بده ی اوج سیلابهای حاصل از حوضه های بالا و پائین دست می باشد که مستقیماً بر بده ی اوج سیلاب تاثیر می گذارد. اهمیت اوج آب نگار سیل در مسائل مربوط به مهندسی رودخانه به حدی است که در اکثر مطالعات از نظر آبگذری سیل، صرفنظر از حجم آب نگار سیل، بده ی اوج آب نگار مبنای طراحی قرار می گیرد. در این راستا تراز سطح آب رودخانه در شرایط بحرانی، که در واقع تعیین کننده ی درجه ی زیرآب رفتن منطقه است، بر اساس بده ی اوج آب نگار سیل تعیین می شود.

اما آنچه در فرسایش پذیری جداره و بستر رودخانه ها موثر است اثر طولانی مدت بده در یک بازه ی زمانی است. در این پژوهش آب نگار سه سال متوالی بده جریان، که در ایستگاه آب سنجی بالادست تهیه شده است، به عنوان ورودی نرم افزار برای قبل از احداث سد (مهر ۱۳۷۲ تا شهریور ۱۳۷۵) و برای بعد از احداث سد (مهر ۱۳۸۲ تا شهریور ۱۳۸۵) انتخاب شده اند (آویلا و همکاران، ۲۰۱۵). شکل (۴) آب نگار سه سال متوالی را قبل و بعد از احداث سد نشان می دهد.



شکل ۴- آب نگار سه سال متوالی.

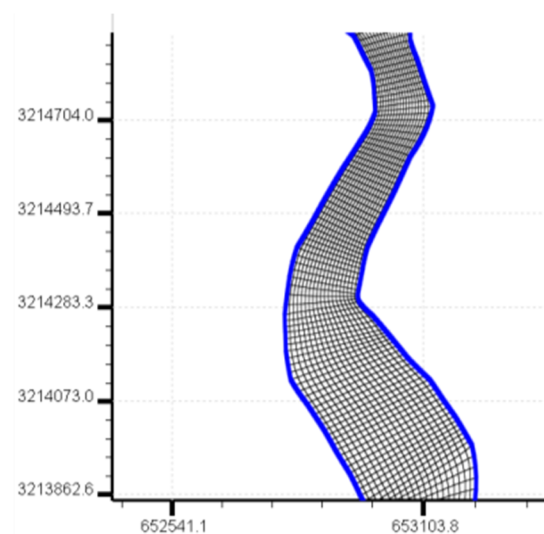
تعیین ضریب زبری مانینگ: یکی از روشهای تعیین ضریب زبری مانینگ، استفاده از d_{50} مصالح رودخانه ای در رابطه استریکلر^{۱۲} می باشد:

تهیه ی شبکه بندی رودخانه می باشد. گفتنی است که هر چه شبکه بندی دقیق تر باشد نتایج نرم افزار CCHE2D نیز دقیق تر خواهد بود. در ضمن ریزتر یا بزرگ تر بودن شبکه اصلاً ربطی به دقت شبکه تولیدی ندارد. در نرم افزار توابع، دو خطایاب (ADO و MDO) جهت ارزیابی شبکه های تولیدی وجود دارند که هر چقدر شمار آنها کمتر باشند دقت شبکه تولید شده بیشتر خواهد بود. جدول (۱) و شکل (۳) ارزیابی شبکه و توابع خطایاب را نشان می دهند.

پس از انجام واسنجی و ارزیابی شبکه مشخص شد که شبکه ای با تعداد $i=30$ و $z=200$ دارای خطای کمتری نسبت به تعداد i و z های دیگر است. جدول (۱) دقت شبکه بندی را نشان می دهد. به طور کلی، هر چه مقدار توابع ADO و MDO کمتر باشد دقت شبکه تولید شده بیشتر خواهد بود.

جدول ۱- ارزیابی شبکه های تولید شده.

ردیف	تعداد i	تعداد z	تابع ADO	تابع MDO
۱	۲۰	۲۰۰	۹/۴۶	۸/۲۳
۲	۱۵	۳۰۰	۵/۳۲	۶/۳۰
۳	۳۰	۲۰۰	۱/۱۲	۲/۴۰



شکل ۳- نمونه ای از شبکه بندی بازه ی انتخابی رودخانه.

¹²Strickler

روابط بده ی جریان با بده ی رسوب، میزان بار معلق و بار بستر در شبیه سازی: معادله حاصل از برازش بهترین منحنی منطبق بر داده های بده ی جریان- بده رسوب ایستگاههای جلوگیر و پای پل به صورت معادله ی ذیل می باشد. از معادله ی (۸) جهت داده های رسوب قبل از احداث سد و از معادله ی (۹) جهت داده های رسوب بعد از احداث سد استفاده شده است:

$$Q_s = 0.032 Q_w^{2.4027} \quad (۸)$$

$$Q_s = 0.0364 Q_w^{2.357} \quad (۹)$$

که در آن Q_w بده جریان بر حسب (m³/s) و Q_s بده رسوب بر حسب (ton/day) می باشد.

انتقال مواد بستر در یک رودخانه ممکن است به صورت بار بستر یا به صورت بار بستر به همراه بار معلق باشد، که در این صورت بستگی به اندازه ذرات مواد بستر، و شرایط جریان دارد. وجود انواع مختلف رسوبات (ماسه، لای و رس) در یک سامانه نیز حاصل فرایند انتقال انتخابی است (جورشدگی ذرات). به طوری که این فرایند به حرکت انتخابی انواع مختلف ذرات رسوبی مربوط است، که آستانه ی حرکت آنها نزدیک تنش برشی پایین بستر بوده، طی تنش برشی بالاتر انتقال می یابند. علی هذا از رابطه های (۱۰) و (۱۱) برای داده های ورودی بار بستر و بار معلق در نرم افزار CCHE2D استفاده شده است:

$$Q_w = 0.1102BL + 5.7932 \quad (۱۰)$$

$$Q_w = 48.37SL + 7.2085 \quad (۱۱)$$

که در آنها Q_w بده جریان بر حسب (m³/s) و BL بار بستر (Bed load) و SL بار معلق (Suspended load) رسوبها بر حسب (ton/day) می باشند.

دانه بندی بار بستر در شبیه: جهت تعیین رابطه دانه بندی ذرات با شرایط هیدرولیکی جریان از نمودار بده جریان در مقابل درصد ذرات بار بستر در سه رده شن، ماسه و ریزدانه ها، و همچنین رسم نمودار بده جریان در مقابل ذرات بستر استفاده شده است. نتایج تحلیل دانه بندی درصد ذرات باربستر در محدوده مورد مطالعه رودخانه ی کرخه به صورت ماسه ۹۳/۲۶٪، شن ۴/۶۳٪ و ریز دانه شامل (لای+رس) ۲/۰۸٪ مشخص شد. در شکل (۵) منحنی دانه بندی متوسط

$$n = 0.047 d_{50}^{-\frac{1}{6}} \quad (۷)$$

۱- که در آن n: ضریب مانینگ d_{50} : قطر متوسط ذرات بر حسب متر است. برای واسنجی و ارزیابی شبیه سازی از تراز سطح آب استفاده شد. برای انطباق بده ی رسوب محاسباتی با مشاهداتی فرض گردید که ضریب مانینگ به دست آمده از واسنجی تراز سطح آب برای این مرحله نیز صحیح بوده، و مشاهده گردید که نتایج حاصل با مشاهدات انطباق نسبتاً خوبی دارد. لازم به ذکر است که به منظور صحت سنجی نرم افزار CCHE2D، ابتدا بر اساس یک جریان غیر ماندگار (آب نگار سیل در تاریخی مشخص) شبیه سازی جریان برای رود کرخه اجرا گردید و سرعت و عمق آب در نقاط مختلف رودخانه مشخص شد. در همان روز (متناظر با زمان آب نگار) نیز نتایج شبیه سازی با داده های واقعی عمق و سرعت جریان آب در چند نقطه در طول رودخانه ی کرخه مقایسه گردید.

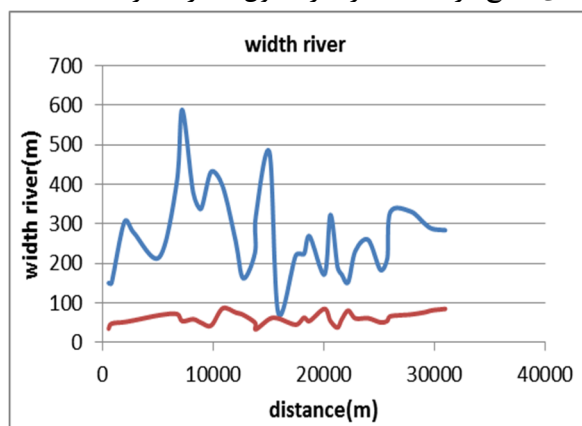
با مقایسه ی سرعت و عمق آب حاصل از شبیه سازی با داده های واقعی، میزان خطای شبیه سازی محاسبه شد، بدین ترتیب که حداکثر خطای شبیه سازی برای برآورد عمق ۶ درصد، و برای سرعت نیز ۸ درصد بود، که این میزان خطا قابل قبول تشخیص داده شد. ضمناً، از آمار دو ایستگاه پای پل (در شروع بازه ی مطالعاتی) و عبدالخان (حدود ۳۰ کیلومتر پایین دست بازه ی مطالعاتی) با داشتن بالغ بر ۴۰ سال آمار آب سنجی و منحنی بده - تراز سطح آب جهت واسنجی و صحت سنجی مدل استفاده شده است. جدول (۲) ضریب مانینگ مدل را در بازه های مختلف نشان می دهد.

جدول ۲- ضریب مانینگ شبیه سازی در قبل و بعد از

احداث سد.

شماره ی بازه	فاصله از ایستگاه (Km)	ضریب مانینگ	ضریب مانینگ
۱	۱۲.۳	۰.۰۳۴	۰.۰۳۵
۲	۲۰.۱	۰.۰۳۹	۰.۰۳۹
۳	۳۰.۵	۰.۰۳۸	۰.۰۰۴
۴	۴۴.۲	۰.۰۰۴	۰.۰۰۴۱

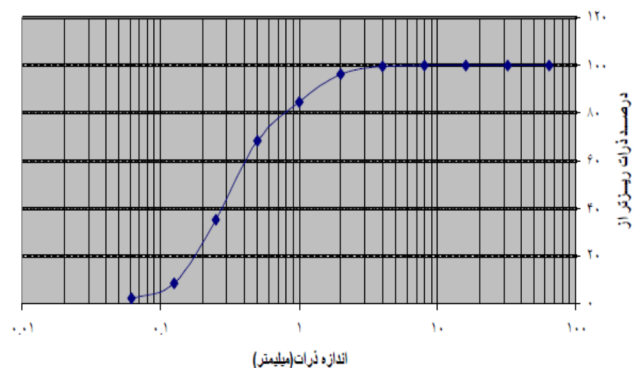
متناسب با کاهش شیب، افزایش می‌یابد. شکل (۶) و جدول (۳) نشان می‌دهند که عرض رودخانه، به علت احداث سد، به شدت کاهش یافته است. بازه‌ی کل مورد مطالعه رودخانه‌ی کرخه در این تحقیق تقریباً ۳۱ کیلومتر بود، که در هر کیلومتر در این محدوده یک مقطع در نظر گرفته شد. جمع‌بندی نتایج در قالب ۶ بازه در جدول (۳) ارائه گردیده است.



شکل ۶- تغییرات عرض رودخانه قبل و بعد از احداث سد. جدول ۳- متوسط عرض رودخانه در قبل و بعد از احداث سد.

شماره مقطع	فاصله از ایستگاه (m)	عرض قبل از احداث سد (m)	عرض بعد از احداث سد (m)
۱	۵۳۷	۱۵۰.۲	۳۴.۶
۲	۷۹۹	۱۵۰.۰	۴۷.۲
۳	۱۹۵۵	۳۰۳.۹	۵۱.۲
۴	۲۸۲۰	۲۷۷.۰	۵۵.۵
۵	۵۱۳۸	۲۱۶.۱	۶۸.۶
۶	۶۶۹۹	۴۰۵.۱	۷۱.۶
۷	۷۱۹۵	۵۸۸.۷	۵۳.۵
۸	۸۱۷۷	۳۷۹.۶	۵۸.۴
۹	۸۸۸۸	۳۳۸.۲	۴۹.۷
۱۰	۹۸۱۰	۴۳۱.۷	۴۲.۶
۱۱	۱۰۸۵۲	۳۹۵.۲	۸۶.۰
۱۲	۱۲۰۲۵	۲۵۶.۲	۷۵.۴
۱۳	۱۲۶۹۹	۱۶۲.۱	۶۹.۶
۱۴	۱۳۷۷۰	۲۲۶.۵	۴۹.۸
۱۵	۱۳۸۵۶	۳۲۰.۶	۳۳.۰

ذرات رسوب در منطقه‌ی مورد مطالعه رودخانه‌ی کرخه نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی دانه بندی متوسط ذرات رسوب بار بستر. در حوضه‌ی مورد مطالعه این پژوهش، مقاطع عرضی رودخانه‌ی کرخه بسیار متنوع بوده، و در بعضی قسمت‌ها بسیار عریض (دارای سیلاب دشت)، و در دیگر قسمت‌ها نیز دارای دیواره‌های بلند می‌باشد؛ لذا، در بسیاری از مواقع ممکن است سیلاب‌های بزرگ به علت خارج شدن از مسیر رودخانه در ایستگاه‌های پایین دست اندازه‌گیری و ثبت جریان را با خطا همراه سازند. جهت حل موضوع محدوده‌ی عرضی زیادی که سیلاب دشت رودخانه را نیز شامل می‌شود انتخاب گردید که شبیه با این شرایط کاملاً به صورت دو بعدی قادر به ارائه جوابهای واقعی و منطقی بود.

نتایج و بحث

رودخانه‌ها تحت تاثیر عوامل و متغیرهای مختلف از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در حال تغییر هستند. این تغییرات دارای بعد زمانی و مکانی بوده و متأثر از بده جریان و رسوب، مشخصات رسوب ورودی به سامانه، دانه بندی مصالح بستر (کف و کناره‌ها) و ... می‌باشد. ممکن است تغییر پذیری در رودخانه‌ها در دراز مدت تدریجی و پیوسته بوده و در کوتاه مدت، یا تحت شرایطی خاص، ناپیوسته و ناگهانی باشد. نتایج این تغییرات در این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد.

۱- تغییرات عرض رودخانه: با اندازه‌گیری عرض بستر رودخانه حاصل از نتایج شبیه‌سازی در فواصل مختلف از مسیر، روند تغییرات عرض بستر حاصل می‌گردد. در شرایط طبیعی، عرض بستر رودخانه به طرف پایین دست مسیر،

جدول ۴- جا به جایی خط القعر رودخانه در قبل وبعد از احداث سد.

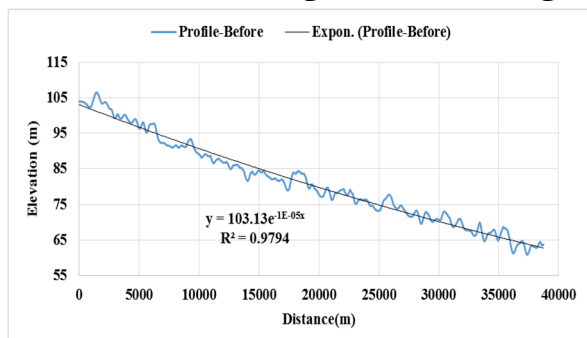
شماره مقطع	فاصله از ایستگاه (م)	میزان جابجایی عمودی (م)	جهت نسبت به بستر اولیه	وضوح
۱	۵۳۷	۵۳.۷	راست	بیرون از بستر قدیم
۲	۷۹۹	۵۶.۰	چپ	داخل بستر قدیم
۳	۱۹۵۵	۵۲.۸	راست	داخل بستر قدیم
۴	۲۸۲۰	۷۷.۹	راست	داخل بستر قدیم
۵	۵۱۳۸	۱۰۱.۸	چپ	بیرون از بستر قدیم
۶	۶۶۹۹	۶۰۰.۶	راست	داخل بستر قدیم
۷	۷۱۹۵	۵۷۲.۴	راست	داخل بستر قدیم
۸	۸۱۷۷	۵۳۷.۴	راست	داخل بستر قدیم
۹	۸۸۸۸	۷۹.۱	چپ	داخل بستر قدیم
۱۰	۹۸۱۰	۵۴۶.۴	چپ	داخل بستر قدیم
۱۱	۱۰۸۵۲	۱۱۵.۰	راست	داخل بستر قدیم
۱۲	۱۲۰۲۵	۲۹۳.۱	چپ	بیرون از بستر قدیم
۱۳	۱۲۶۹۹	۲۳۳.۰	راست	بیرون از بستر قدیم
۱۴	۱۳۷۷۰	۴۷۴.۸	چپ	بیرون از بستر قدیم
۱۵	۱۳۸۵۶	۶۸۵.۵	راست	بیرون از بستر قدیم
۱۶	۱۵۰۸۵	۹۸.۳	راست	داخل بستر قدیم
۱۷	۱۵۸۶۹	۳۰۸.۴	چپ	بیرون از بستر قدیم
۱۸	۱۷۴۵۱	۴۷۷.۲	چپ	بیرون از بستر قدیم
۱۹	۱۸۲۰۳	۴۱۰.۷	راست	داخل بستر قدیم
۲۰	۱۸۷۲۰	۴۲۶.۸	راست	داخل بستر قدیم
۲۱	۲۰۰۶۰	۵۲۹.۵	راست	بیرون از بستر قدیم
۲۲	۲۰۵۹۷	۲۵۰.۴	چپ	بیرون از بستر قدیم
۲۳	۲۱۲۳۵	۳۵۷.۸	راست	بیرون از بستر قدیم
۲۴	۲۱۶۱۵	۷۶۸.۰	راست	بیرون از بستر قدیم
۲۵	۲۲۲۰۱	۴۲۳.۵	چپ	بیرون از بستر قدیم
۲۶	۲۲۸۵۳	۱۳۸.۶	راست	بیرون از بستر قدیم
۲۷	۲۴۰۱۱	۲۶۳.۵	چپ	بیرون از بستر قدیم
۲۸	۲۵۱۱۱	۴۰۹.۴	راست	بیرون از بستر قدیم
۲۹	۲۵۷۳۷	۳۴۱.۴	چپ	بیرون از بستر قدیم

۱۶	۱۵۰۸۵	۴۷۹.۹	۵۹.۲
۱۷	۱۵۸۶۹	۷۵.۳	۶۰.۵
۱۸	۱۷۴۵۱	۲۱۹.۳	۴۴.۷
۱۹	۱۸۲۰۳	۲۲۳.۵	۶۲.۰
۲۰	۱۸۷۲۰	۲۶۷.۹	۵۴.۲
۲۱	۲۰۰۶۰	۱۷۲.۱	۸۴.۸
۲۲	۲۰۵۹۷	۳۲۲.۶	۵۳.۹
۲۳	۲۱۲۳۵	۱۹۰.۸	۳۷.۳
۲۴	۲۱۶۱۵	۱۷۱.۷	۵۷.۹
۲۵	۲۲۲۰۱	۱۵۲.۵	۸۰.۲
۲۶	۲۲۸۵۳	۲۳۱.۴	۶۰.۶
۲۷	۲۴۰۱۱	۲۵۹.۲	۶۱.۰
۲۸	۲۵۱۱۱	۱۸۳.۴	۵۰.۵
۲۹	۲۵۷۳۷	۲۱۲.۲	۵۴.۱
۳۰	۲۶۰۱۵	۳۲۹.۹	۶۵.۸
۳۱	۲۷۸۴۰	۳۳۱.۲	۷۰.۵
۳۲	۲۹۰۶۶	۳۰۱.۷	۷۵.۶
۳۳	۲۹۸۰۱	۲۸۷.۴	۸۰.۹
۳۴	۳۰۹۸۲	۲۸۳.۸	۸۴.۷

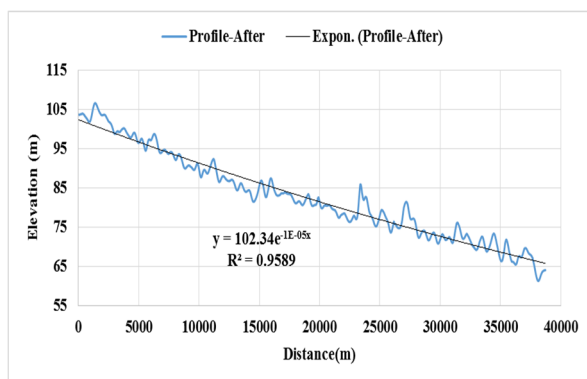
متوسط عرض رودخانه قبل از احداث سد حدود ۲۷۳ متر، حداکثر و حداقل عرض ۵۸۹ و ۷۵ متر، و متوسط عرض رودخانه بعد از احداث سد تقریباً ۶۰ متر، حداکثر و حداقل عرض ۸۶ و ۳۰ متر بوده اند. با کاهش حدود ۷۸٪ عرض رودخانه تقریباً ۲۱ هکتار اراضی در هر کیلومتر از امتداد رودخانه آزاد گشته، که این مقدار مربوط به سیلاب با دوره بازگشت دو ساله (مقطع پر) می باشد.

۲- تغییرات نمای کف رودخانه و جابه جایی عرضی: در صورتی که در میزان جریان و بار رسوبی یک پیچان رود تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد شود، به دنبال آن نمای کف رودخانه طی این مدت زمان مشمول تغییرات زیادی خواهد شد. در جدول (۴) جابه جایی خط القعر رودخانه، جهت و وضعیت آن نسبت به بستر اولیه نشان داده شده است. در محدوده ی مورد مطالعه، متوسط جابه جایی خط القعر رودخانه حدود ۳۴۰ متر، حداقل و حداکثر آن به ترتیب ۵۳ و ۷۶۸ متر می باشد.

پدیده‌ی فرسایش و تخریب تغییر پیدا می‌کند، تا در نهایت به اندازه‌ی ای برسد که شیب، مجموع اثرهای جریان آب، پستی و بلندی و زمین‌شناسی باشد.



شکل ۹- نیمرخ طولی (بازه‌ی مورد مطالعه) قبل از احداث سد.



شکل ۱۰- نیمرخ طولی (بازه‌ی مورد مطالعه) بعد از احداث سد.

معادله‌ی نیمرخ طولی بازه‌ی مورد مطالعه قبل و بعد از احداث سد به ترتیب به صورت رابطه (۱۲) و (۱۳) می‌باشد، که در آنها ارتفاع بستر (m)، D، فاصله تا ایستگاه پای پل بر حسب متر است.

$$EL = 103.13 e^{-1E-05 D} \quad (12)$$

$$R^2 = 0.9794$$

$$EL = 102.34 e^{-1E-05 D} \quad (13)$$

$$R^2 = 0.9589$$

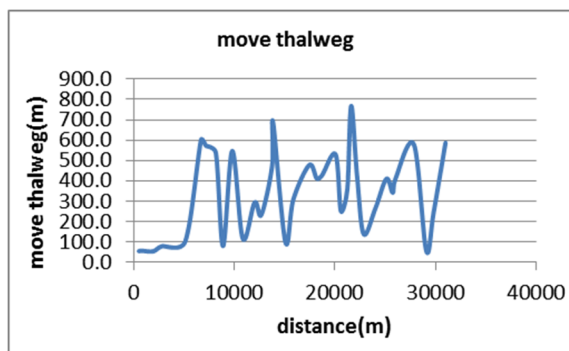
۴- تغییرات نیمرخ سطح آب: برای ترسیم نیمرخ سطح آب نتایج اجرای نرم افزار برای قبل و بعد از احداث سد به صورت متناظر استخراج گردیدند. با مقایسه نیمرخ سیلاب در دوره‌ی قبل و بعد از احداث سد مشخص گردید که ارتفاع سطح آب با احداث سد در اکثر مقاطع پایین افتاده است.

بیرون از بستر قدیم	راست	۴۱۰.۴	۲۶۰۱۵	۳۰
بیرون از بستر قدیم	راست	۵۷۸.۵	۲۷۸۴۰	۳۱
داخل بستر قدیم	چپ	۵۶.۴	۲۹۰۶۶	۳۲
بیرون از بستر قدیم	چپ	۲۴۲.۹	۲۹۸۰۱	۳۳
داخل بستر قدیم	چپ	۵۸۶.۶	۳۰۹۸۲	۳۴

در شکل (۷) تصویر ماهواره‌ای تغییرات نمای کف و جابه‌جایی عرضی بازه مورد مطالعه، و در شکل (۸) نمودار جابه‌جایی خط القعر رودخانه نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نزدیک ۵۱٪ از جابه‌جایی‌ها به سمت راست جریان (غرب) رودخانه بوده، و بالغ بر ۵۸٪ آنها بیرون از بستر قدیم صورت گرفته است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که به طور متوسط، سالانه حدود ۳۴ متر جابه‌جایی عرضی رودخانه در بازه مورد نظر اتفاق افتاده است که بیانگر ناپایداری این منطقه می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات نمای کف و جابه‌جایی عرضی بازه مورد مطالعه.



شکل ۸- نمودار جابه‌جایی خط القعر رودخانه.

۳- تغییرات نیمرخ طولی و تراز بستر: شیب رودخانه، ابتدا با توجه به شرایط و مشخصه‌های پستی و بلندی و زمین‌شناسی حوضه‌ی آبخیز نظارت، سپس به آهستگی بر اثر

- با کاهش حدود ۷۸٪ عرض رودخانه، تقریباً ۲۱ هکتار اراضی در هر کیلومتر از امتداد رودخانه آزاد می شود. این مقدار مربوط به سیلاب هائی با دوره ی بازگشت دو ساله (مقطع پر) می باشد.

- در محدوده ی مورد مطالعه، متوسط جا به جایی عرضی خط القعر رودخانه حدود ۳۴۰ متر، حداقل و حداکثر جابه جایی ۵۳ و ۷۶۸ متر می باشد. نتایج نشان می دهند که بالغ بر ۵۱٪ از جابه جایی ها به سمت راست جریان (غرب) رودخانه بوده، و نزدیک ۵۸٪ این جابه جایی ها بیرون از بستر قدیم صورت گرفته است.

- به طور متوسط، سالانه حدود ۳۴ متر جابه جایی عرضی رودخانه در بازه ی مورد نظر اتفاق افتاده است که بیانگر ناپایداری این منطقه می باشد.

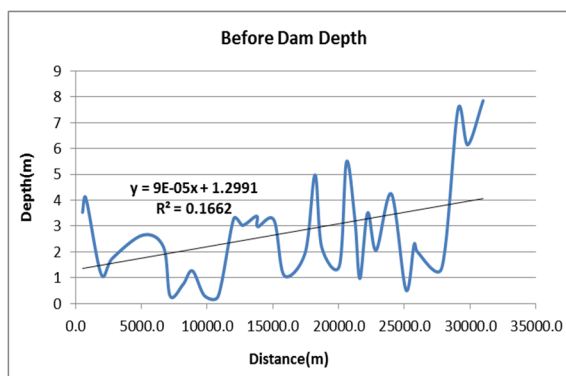
- با توجه به بررسی نتایج شبیه سازی، نیمرخ کف رودخانه به یک ثبات نسبی رسیده است. و شیب آبراهه در دهه ی ۸۵-۷۵ تفاوت چندانی نکرده، و بنابراین، اثر سد تاثیر قابل ملاحظه ای بر تغییرات کلی شیب بستر نسبت به قبل از بنای سد نداشته است.

- معادله ی نیمرخ طولی بازه مورد مطالعه قبل و بعد از احداث سد به صورت دو تابع نمائی با ضریب $R^2 = 0.98$ و $R^2 = 0.96$ می باشد، که نشان دهنده ی کاهش شیب به سمت پائین دست است، و با رابطه شولیتز^{۱۳} برای تغییرات شیب در طول مسیر همخوانی کامل دارد.

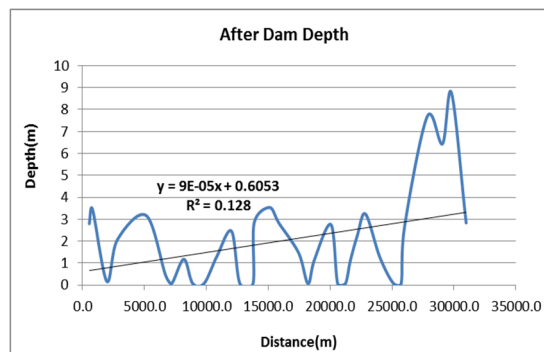
- تغییرات عمق نسبت به فاصله از ایستگاه به صورت نوسانی در حال تغییر بوده، اما در هر دو وضعیت نرخ افزایشی داشته است.

- نتایج بیانگر این امرند که منطقه ی مورد مطالعه رودخانه ی کرخه، از نزدیک پای پل تا فاصله حدود ۴۰ کیلومتری، ناپایدار است، بنابراین، می توان انتظار داشت که در آینده تغییراتی در این قسمت رودخانه رخ دهد. نتایج مربوط به جابه جایی مقاطع مختلف رودخانه نیز مؤید این مطلب است.

نمودارهای (۱۱) و (۱۲) نشان می دهند که در هر دو حالت، قبل و بعد از احداث سد، اگرچه تغییرات عمق نسبت به فاصله از ایستگاه به صورت نوسانی در حال تغییر بوده، اما در هر دو وضعیت نرخ افزایشی داشته است. یکی از علل این افزایش، کاهش شیب و رسوبگذاری در پائین دست بازه می باشد.



شکل ۱۱-نیمرخ سطح آب (بازه ی مورد مطالعه) قبل از احداث سد.



شکل ۱۲-نیمرخ سطح آب (بازه ی مورد مطالعه) بعد از احداث سد.

نتیجه گیری

- ممکن است تغییرپذیری در رودخانه ها در دراز مدت تدریجی و پیوسته بوده، و در کوتاه مدت یا تحت شرایط خاص ناپیوسته و ناگهانی باشد.

- در شرایط طبیعی، عرض بستر رودخانه به طرف پایین دست مسیر، متناسب با کاهش شیب، افزایش می یابد. متوسط عرض رودخانه قبل از احداث سد حدود ۲۷۳ متر و بعد از آن تقریباً ۶۰ متر رسیده است.

on the Snake River downstream from Jackson Lake dam, Wyoming. *Geomorphology* 200: 132-142.

13) 13. Overeem, I., Kettner, A.J., and Syvitski, J.P.M. 2013. Impacts of humans on river fluxes and morphology. *Treatise of Geomorphology* 9: 828-842.

14) 14. Patra, K.C., Kar, S.K., and Bhattacharya, A.K. 2004. Flow and velocity distribution in meandering compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering- ASCE* 130: 398-411.

15) 15. Richard, G.A., and Julien, P.Y. 2003. Dam impacts on and restoration of an alluvial river Rio Grande, New Mexico. *International Journal of Sediment Research* 18: 89-96.

16) 16. Richard, G.A., Julien, P.Y., and Baird, D.C. 2005. Case study: modeling the lateral mobility of the Rio Grande below Cochiti Dam, New Mexico. *Journal of Hydraulic Engineering- ASCE* 131: 931-941.

17) 17. Shin, Y.H., and Julien, P.Y. 2010. Changes in hydraulic geometry of the Hwang River below the Hapcheon Re-regulation Dam, South Korea. *International Journal of River Basin Management* 8: 139-150.

18) 18. Shin, Y.H., and Julien, P.Y. 2011. Effect of flow pulses on degradation downstream of Hapcheon Dam, South Korea. *Journal of Hydraulic Engineering- ASCE* 137: 100-111.

19) 19. Stevaux, J.C., Martins, D.P., and Meurer, M. 2009. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology* 113: 230-238.

20) 20. Surian, N., and Rinaldi, M. 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology* 50: 307-326.

21) 21. Wang, G., Xia, J., and Wu, B. 2008. Numerical simulation of longitudinal and lateral channel deformations in the braided reach of the Lower Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering- ASCE* 134: 1064-1078.

22) 22. White, W.R., Bettis, R., and Paris, E. 1982. Analytical approach to river regime. *Journal of the Hydraulics Division- ASCE* 108: 1179-1193.

23) 23. Yuba County Water Agency. 2010. Channel morphology downstream of Englebright Dam, FERC Project No. 2246 p.1-10.

24. 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: 231-243.

منابع

1) Avila, H., Vargas, G., and Daza, R. 2015. Susceptibility analysis of river bank erosion based on exposure to shear stress and velocity combined with hydrologic and geomorphologic variables. In *World Environmental and Water Resources Congress 2014@ sWater Without Borders*. ASCE.

2) Brandt, S.A. 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena* 40: 375-401.

3) Constantine, J.A., McLean, S.R., and Dunne, T. 2010. A mechanism of chute cutoff along large meandering rivers with uniform floodplain topography. *Geological Society of America Bulletin* 122: 855-869.

4) Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., and Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *Journal of Hydraulic Engineering- ASCE* 126: 653-669.

5) Grant, G.E., Schmidt, J.C., and Lewis, S.L. 2003. A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. *Water Science and Application: A Peculiar River* 7: 203-219.

6) Güneralp, İ., and Marston, R.A. 2012. Process-form linkages in meander morphodynamics: Bridging theoretical modeling and real world complexity. *Progress in Physical Geography* 36: 718-746.

7) Huang, J., Greimann, B.P., and Randle, T.J. 2014. Modelling of meander migration in an incised channel. *International Journal of Sediment Research* 29: 441-453.

8) Karmaker, T., and Dutta, S. 2016. Prediction of short-term morphological change in large braided river using 2D numerical model. *Journal of Hydraulic Engineering- ASCE* 142: 0001167.

9) Kurowski, M. 2012. Procedural generation of meandering rivers inspired by erosion. *Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland* (00-661).

10) Lott, C.A., Wiley, R.L., Fischer, R.A., Hartfield, P.D., and Scott, J.M. 2013. Interior least tern (*Sterna antillarum*) breeding distribution and ecology: Implications for population-level studies and the evaluation of alternative management strategies on large, regulated rivers. *Ecology and Evolution* 3: 3613-3627.

11) 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. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*.

12) Nelson, N.C., Erwin, S.O., and Schmidt, J.C. 2013. Spatial and temporal patterns in channel change

