

بررسی هیدرولیکی - مورفولوژیکی آثار برداشت مصالح رودخانه‌ای بر کف کنی و فرسایش کناری رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه خرم‌آباد)

بهراد جواد^{۱*}، امیر حمزه حقی‌آبی^۲ و الهه حسینیان^۳

چکیده

با توجه به رشد روزافزون پروژه‌های عمرانی در سال‌های اخیر، نیاز به استفاده از مصالح شن و ماسه برای احداث ابنیه و راه‌ها بیشتر شده است. همچنین، در دسترس بودن و سهولت برداشت و استحصال مصالح رودخانه‌ای به نسبت مصالح کوهی، منتج به برداشت بی‌رویه شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها شده است؛ که مشکلات متعددی از قبیل فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه را ایجاد کرده، پایداری سازه‌های طولی و متقاطع را در رودخانه‌ها تهدید می‌کند و منجر به افت کیفیت آب رودخانه‌ها و تأثیرات مخرب بر اکوسیستم حاکم بر آنها می‌شود. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-RAS و FLUVIAL-12 و بر اساس روابط مختلف انتقال رسوب، تغییرات هیدرولیکی و مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد بر اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که در تغییر شکل بستر، بیشترین تغییرات نسبت به بستر موجود از معادلات انتقال رسوب میر- پیتر- مولر (۱۹۴۸) و گراف (۱۹۷۰) و کمترین تغییرات مربوط به معادلات یانگ (۱۹۷۳) و انگلند و هانسون (۱۹۶۷) بود. همچنین، مشخص شد که در بازه‌هایی که مصالح بستر به علت تخلیه نخاله‌های ساختمانی و کارگاهی از نوع درشت‌دانه باشد، تمام قدرت رودخانه، صرف فرسایش کناره‌ها می‌شود و این باعث باعث تعریض بیش از پیش رودخانه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برداشت مصالح رودخانه‌ای، فرسایش کناری، لایه محافظ، HEC-RA، FLUVIAL-12

ارجاع: جواد ب. حقی‌آبی ا. ح. و حسینیان ا. ۱۳۹۸. بررسی هیدرولیکی- مورفولوژیکی آثار برداشت مصالح رودخانه‌ای بر کف کنی و فرسایش کناری رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه خرم‌آباد). مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۱-۱۰.

۱- مدیر دفتر مهندسی رودخانه، شرکت آب منطقه‌ای لرستان.

۲- استاد گروه مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۳- کارشناس بخش مهندسی رودخانه، شرکت مهندسی مشاور آساراب، تهران.

* نویسنده مسئول: b.javadi59@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۶

مقدمه

شده و عمق‌های فرسایش یافته تا حدود ۵ متر نیز مشاهده شده است. در بررسی‌های جدیدتر به این مسئله به‌طور کمی پرداخته و سعی شده است با ارائه تحلیل‌های ریاضی و تدوین روش‌های محاسباتی، فیزیک مسئله به نحوی مدل شود تا بتوان در پیش‌بینی رفتار رودخانه پس از برداشت مصالح شن و ماسه از بستر آن استفاده کرد. در این تحلیل‌ها، اصولاً به دو مسئله توجه بیشتری شده است که تهنشینی ذرات رسوبی در چاله‌های ایجادشده در اثر برداشت مصالح، یکی از موارد مهم است و دیگری، تغییر شکل چاله‌های برداشت و حرکت لبه بالایی و پایین چاله هم در طول و هم در عرض است. از جمله مهم‌ترین کارهای انجام‌شده می‌توان به روش‌های مانند روش احمدی (۱۳۷۵)، کاتن (۱۹۹۰)، گیل (۱۹۹۴) و استفاده از مدل FL12 توسط چانگ (۱۹۸۲) اشاره کرد. برنارد و همکاران (۲۰۱۳) نیز تحلیل جامعی برای گسترش دستاوردهای ارزشمند تحقیقات انتقال رسوب حاصل از پژوهش‌های پیشگامانه هیدرولیکی گیلبرت در اوایل قرن بیستم ارائه کردند.

با توجه به هندسه رودخانه خرم‌آباد در بازه مورد مطالعه، از قبیل ترانشه‌ای بودن و عرض کم کانال اصلی در قیاس با طول رودخانه، مدل یک‌بعدی جریان و رسوب برای تحلیل‌های رودخانه‌ای کفایت می‌کند. همچنین، با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی، شرایط غیرماندگار جریان رودخانه به‌صورت شبه‌ماندگار (گام‌های زمانی کوچک) مدل‌سازی می‌شود. پایه اساسی مطالعات رسوب، حل معادله پیوستگی مواد رسوبی است که در هر حال، ابتدا بایستی پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند سرعت، عمق، عرض و شیب مشخص شده و بر اساس آن پروفیل سطح آب محاسبه شود. پس از این مرحله، با حل توأم معادله پیوستگی رسوب و معادلات حمل مواد رسوبی، تغییر بستر رودخانه با کانال مشخص خواهد شد. در موارد خاصی مانند برداشت مصالح از رودخانه یا لایروبی، معادلات مزبور با ایجاد محدودیت‌ها و شرایط مرزی که بیانگر شرایط خاص مسئله هستند، حل می‌شوند. در این تحقیق با شبیه‌سازی شرایط هیدرولیک جریان رسوب در رودخانه خرم‌آباد با استفاده از مدل Fluvial-12، سعی شده است تغییرات بستر و فرسایش کناری این رودخانه و عوامل مؤثر بر آن بررسی و بازه‌های آسیب‌پذیر شناسایی شود.

برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه به‌دلیل برهم‌زدن شرایط طبیعی بستر و همچنین تغییرات آن، موجب مشکلات زیاد زیست‌محیطی و اجتماعی در رودخانه‌ها شده است؛ در این خصوص، پایین افتادن بستر رودخانه‌ها و فرسایش سازه‌های هیدرولیکی مسیر آن، فرسایش کناری و خسارات به اراضی حاشیه رودخانه، تخریب دهانه‌های آبیگری، زهکشی زمین‌های کشاورزی حاشیه رودخانه و همچنین تغییر محیط‌زیست گیاهی و جانوری، از جمله موارد قابل ذکر است. تاکنون محققان زیادی اثر زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های برداشت مصالح از کف رودخانه را بررسی کرده‌اند (رینالدی و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژیاولو، ۲۰۰۷؛ ارسکین، ۲۰۰۸؛ یکین و روهاسلینی، ۲۰۱۳؛ اسمولدر و همکاران، ۲۰۰۳؛ کندولف، ۱۹۹۷؛ وزارت محیط‌زیست و جنگل هند، ۲۰۱۶؛ و کمبوج و همکاران، ۲۰۱۷). در بررسی تغییرات مورفولوژیکی مقطع رودخانه‌ها غالباً فرض می‌شود که کناره‌های رودخانه فرسایش ناپذیرند و یا نسبت فرسایش در کناره‌ها به فرسایش بستر کم است؛ از این‌رو، عرض رودخانه ثابت در نظر گرفته می‌شود. مطالعه دقیق‌تر روند تغییرات آبرفتی رودخانه به‌ویژه با کناره‌های فرسایش‌پذیر نشان می‌دهد که عرض رودخانه در اثر پدیده برداشت مصالح با تغییرات قابل ملاحظه‌ای روبرو خواهد بود.

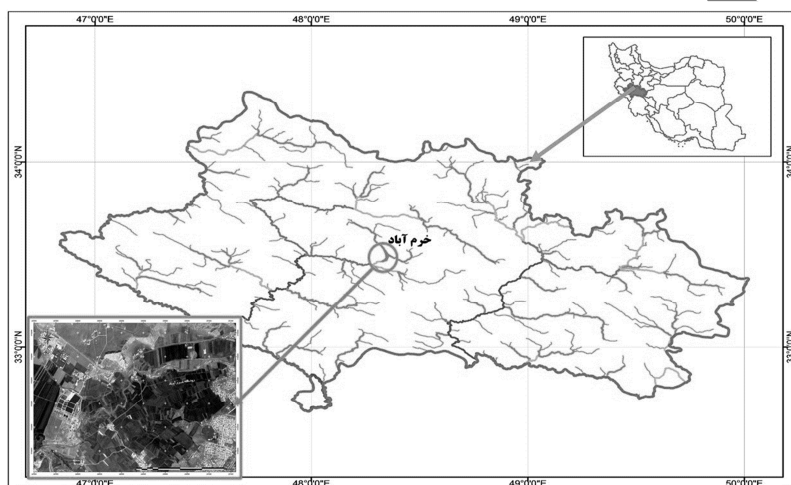
در همین راستا، پژوهش صحرایی و مدل‌های ریاضی (چانگ، ۱۹۸۸) روی رودخانه سن جوان در کالیفرنیا طی بیش از ده سال برداشت مصالح نشان داد که تغییرات ایجادشده در عرض رودخانه بسیار بیشتر از تغییرات عمق آب بوده است. این تغییرات به‌صورت عریض شدن رودخانه در پایین‌دست محل برداشت نمایان شده است؛ به نحوی که عرض رودخانه در فاصله زمانی دو ماه حدود ۶۰ متر افزایش یافته است. بنابراین، برای کاستن روند بهره‌برداری بی‌رویه و نامناسب مصالح رودخانه‌ای، انجام این پژوهش و پژوهش‌های مشابه برای صیانت از منابع ملی کشور و حفظ پویایی سیستم رودخانه و محیط‌زیست امری ضروری است. در این زمینه، گیلبرت (۱۹۱۷) مقاله‌ای در نشریه سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) به چاپ رساند. طبق گزارش او از بستر رود شری، مقادیر عظیمی شن و ماسه برای مصارف اجرایی برداشت شده است؛ به‌طوری که حوضچه بسیار بزرگی در بستر رودخانه ایجاد

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، شامل بازه‌ای از رودخانه خرم‌آباد به طول حدود ۷ کیلومتر است. در شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه در کشور و استان لرستان مشخص شده است. رودخانه خرم‌آباد در محدوده جغرافیایی ۴۷/۴۵ تا ۴۸/۳۶ طول شرقی و ۳۳/۱۰ تا ۳۳/۵۰ عرض شمالی قرار گرفته و از شاخه‌های مهم رودخانه کشکان است.

برای انجام محاسبات هیدرولیک و پروفیل سطح آب به اطلاعات و کلیه پارامترهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه، نظیر شکل آبراهه، وضعیت آبراهه، بستر رودخانه، سیلاب، شاخه فرعی، موانع، پوشش گیاهی، هندسه مقطع، شیب و ارتفاع خط داغاب در بازه‌های مختلف رودخانه نیاز است. برای تهیه هندسه رودخانه خرم‌آباد در مدل از نقشه با مقیاس ۱:۱۰۰۰ استفاده شد. در این پژوهش از تعداد ۱۳۷۲ مقطع استفاده شده است که در سال ۱۳۸۲ برداشت شده‌اند.



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعه

هندسه رودخانه خرم‌آباد و مقاطع عرضی (داده‌های مورد نیاز)

محدوده مورد مطالعه از رودخانه خرم‌آباد شامل بازه‌ای به طول حدود ۷ کیلومتر از این رودخانه قبل از محل الحاق رودخانه کاکاشرف است. رودخانه خرم‌آباد در طول این بازه، رودخانه‌ای بالغ در ناحیه دشت و با شیبی متوسطی در حدود ۱/۶ درصد و مقطع U شکل جریان است. از بازه مذکور، نقشه با مقیاس ۱:۱۰۰۰ به طول حدود ۹ کیلومتر موجود است که مطالعات هیدرولیک برای این بازه انجام گرفته است.

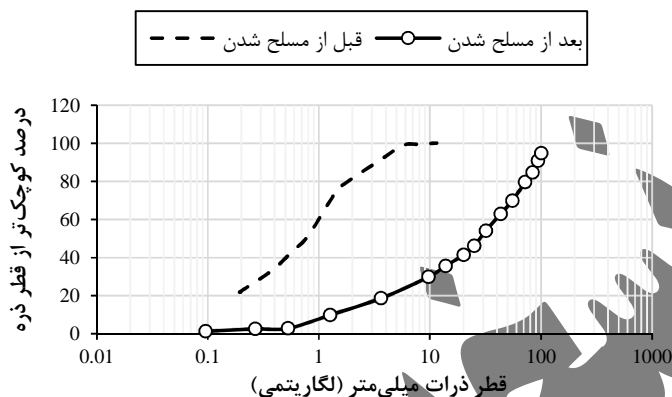
با توجه به تغییرات مقاطع در طول مسیر به دلیل احداث پل، دیوار حفاظت کناره، برداشت مصالح در رودخانه و احداث پل و تجاوزات به بستر رودخانه مرادآباد، ابتدا مقاطع مورد نیاز از نقشه توپوگرافی به کمک رابط HECGeo-RAS در محیط GIS استخراج و سپس این مقاطع در مدل HEC-RAS اصلاح شده و مقاطع نامناسب

از مدل حذف شده‌اند. با این رهیافت، مجموعاً ۵۱ مقطع عرضی برای معرفی هندسه رودخانه در بازه مورد مطالعه به مدل ریاضی HEC-RAS وارد شد. در این تحقیق با نمونه‌برداری از رسوبات بستر رودخانه خرم‌آباد در مقاطع مختلف، به اندازه‌گیری قطر ذرات و رسم نمودار دانه‌بندی رسوب اقدام شد. برای مدل‌سازی فرسایش کناری در رودخانه خرم‌آباد از آزمایش دانه‌بندی مصالح قبل و بعد از مسلح‌شدن مصالح بستر استفاده شده است. در شکل ۲، دانه‌بندی مصالح بستر در بازه مورد مطالعه در دو زمان قبل و بعد از مسلح‌شدن مشخص شده است.

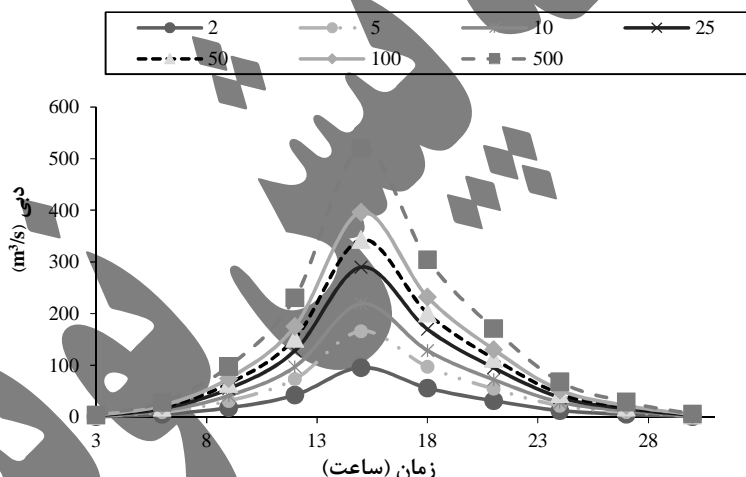
همچنین با استفاده از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه، بار معلق و میزان سیلاب‌های این رودخانه با دوره بازگشت‌های مختلف برآورد شد. ایستگاه هیدرومتری محدوده مطالعاتی، ایستگاه چمانجیر است که از نوع درجه یک، دارای تجهیزات اشل، پل تلفریک و

کرگانه در شکل ۳ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی فرسایش کناری در مدل از سیلاب با دوره برگشت ۱۰۰ ساله استفاده شده است. میزان پیک سیلاب ۱۰۰ ساله در محل مذکور برابر با ۳۹۶/۶ مترمکعب بر ثانیه است.

لیمنوگراف است؛ آماربرداری این ایستگاه از سال ۱۳۳۴ آغاز شده است. نمونه‌برداری بار معلق به‌صورت ماهانه انجام می‌شود. هیدروگراف سیلاب با دوره برگشت‌های مختلف برای رودخانه خرم‌آباد بعد از الحاق رودخانه



شکل ۲- دانه‌بندی مصالح بستر در بازه مورد مطالعه



شکل ۳- هیدروگراف سیلاب‌های با دوره برگشت مختلف در محل رودخانه خرم‌آباد بعد از الحاق رودخانه کرگانه

سواحل یا آبراهه‌های جانبی در واحد طول آبراهه؛ هر k نشانگر یک دسته دانه‌بندی و N ، مجموع دسته‌های دانه‌بندی است. معادله (۱) بسته به شدت حمل رسوب و طول انطباقی تعریف شده می‌تواند برای بار بستر، بار معلق، بار مصالح بستر یا رسوب شسته‌شده به‌کار گرفته شود. ظرفیت حمل رسوب با معادله عمومی به شرح زیر نوشته می‌شود:

$$Q_{t*k} = P_{bk} Q_{t*k} \quad (2)$$

P_{bk} ، عامل دسترسی به رسوب است که در اینجا به‌عنوان دانه‌بندی مصالح بستر در لایه مخلوط بستر آن محسوب

مدل ریاضی FLUAIAL-12

معادلات حاکم بر انتقال ذرات غیریکنواخت رسوب به‌صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(Ac_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial Q_{tk}}{\partial x} + \frac{1}{L_s}(Q_{tk} - Q_{*tk}) = q_{tk} \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

که در آن: t ، زمان؛ x ، مختصات طولی؛ c_{tk} ، غلظت رسوب متوسط‌گیری‌شده در مقطع؛ Q_{tk} ، نرخ واقعی انتقال رسوب؛ Q_{*tk} ، ظرفیت انتقال رسوب یا نرخ تعادلی؛ L_s ، طول انطباقی حمل رسوب در شرایط نامتعادل؛ q_{tk} ، مقادیر دبی رسوبی و ورودی و خروجی جانبی از مرز

توپوگرافی؛ و د) ارزیابی میزان آورد رسوب و واکنش کانال به برداشت شن و ماسه (احمدی، ۱۳۷۵).
در مدل FLUVIAL-12 از تکنیک‌های رقومی و روابط فیزیکی برای تحلیل اندازه حرکت، مقاومت جریان و انتقال رسوب استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی که برای کالیبراسیون این مدل نیاز است؛ شامل ضریب زبری، معادله انتقال رسوب، فاکتور فرسایش ساحلی، فاکتور فرسایش بستر و عواملی از این قبیل است. مدل FLUVIAL-12 با داده‌های بسیاری از رودخانه‌های مختلف جهان آزمایش شده که اغلب این داده‌ها برای آزمایش و کالیبراسیون مدل‌های دیگر نیز استفاده شده است (صابری، ۱۳۸۷).

تخمین ضریب زبری رودخانه‌ها

ضریب زبری رودخانه خرم‌آباد در محدوده مطالعه با استفاده از بازدید صحرایی و قضاوت مهندسی و تکمیل چکلیست‌های روش SCS برآورد شده است. برای محاسبه مقادیر ضریب زبری مانینگ مورد استفاده در مدل هیدرولیکی HEC-RAS، مقادیر پوشش گیاهی، نامنظمی‌های مصنوعی و زبری اضافی موانع (که توسط افراد در رودخانه ایجاد شده) در محاسبات ضریب زبری رودخانه در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه و تخمین مقدار ضریب زبری مانینگ در سیلاب‌دشت‌ها و مقطع اصلی محدوده، از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و نیز بازدیدهای صحرایی استفاده شده و در جدول ۱ نتایج ارائه شده است.

می‌شود؛ Q_{tk} ، پتانسیل حمل رسوب برای دسته دانه‌بندی K است که از روابط تجربی حمل رسوب استخراج می‌شود. برای احتساب تغییرات دانه‌بندی مصالح در زمان و مکان، به‌طور معمول مصالح بستر در هر نقطه محاسباتی به چند لایه تقسیم می‌شوند. معادله (۳) برای تغییر دانه‌بندی مصالح در لایه مخلوط (سطحی بستر) استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial(\delta_m P_{bk})}{\partial t} = \left(\frac{\partial Z_b}{\partial t}\right) + P_{bk}^* \left(\frac{\partial \delta m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t}\right) \quad (3)$$

$(k = 1, 2, \dots, N)$
 P_{bk} ، دانه‌بندی مصالح بستر در لایه مخلوط؛ δm ، ضخامت لایه اختلاط که به ابعاد مصالح و ارتفاع دیون‌ها وابسته است؛ $\frac{\partial z_b}{\partial t}$ ، شدت تغییرات بستر در زمان؛ P_{bk}^* ، وقتی $\left(\frac{\partial \delta m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t}\right) \leq 0$ باشد، برابر با P_{bk} است که در این صورت P_{bk}^* مصالح بستر در زیر لایه مخلوط تبادل می‌شود و وقتی $\left(\frac{\partial \delta m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t}\right) > 0$ باشد، تبادل رسوبی لایه مخلوط و لایه زیرین را نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی هیدرولیک رسوب رودخانه خرم‌آباد در بازه مورد مطالعه از مدل FLUVIAL-12 استفاده شده است. مدل FLUVIAL-12 در سال ۱۹۷۲ توسط جانگ ارائه شد. این مدل ریاضی یک‌بعدی برای روندیابی جریان و رسوب در آبراهه‌های طبیعی و مصنوعی به‌کار می‌رود (نشریه ۳۸۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۶).

این مدل قابلیت مدل‌سازی جریان غیرماندگار را ندارد. برخی از قابلیت‌های این مدل، عبارت‌اند از: الف) روندیابی جریان و رسوب در کانال‌های طبیعی و مصنوعی؛ ب) شبیه‌سازی تأثیرات ترکیبی هیدرولیک جریان و انتقال رسوب؛ ج) شبیه‌سازی تغییرات کانال شامل فرسایش و پرشدگی بستر، تغییرات در عرض و تغییرات در

جدول ۱- محاسبات ضریب زبری مانینگ رودخانه خرم‌آباد در بازه مورد مطالعه

مشخصات بازه	مقدار پایه ضریب زبری مانینگ	زبری اضافی پوشش گیاهی	ضریب اضافی نامنظمی سطح کانال	زبری اضافی موانع	ضریب پیش‌بینی	ضریب زبری بر اساس روش چاو	ضریب زبری بر اساس روش SCS	ضریب زبری مانینگ انتخابی
کناره چپ	۰/۰۲۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۶۵	۰/۰۷۸	۰/۰۶۵
مقطع اصلی رودخانه	۰/۰۲۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۵۵	۰/۰۵۹	۰/۰۵۵
کناره راست	۰/۰۲۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۶۵	۰/۰۷۸	۰/۰۶۵

همچنین، کمترین تغییرات مربوط به معادلات یانگ و انگلند و هنسون است. با توجه به درشت‌دانه‌بودن مصالح رودخانه خرم‌آباد در بازه مورد مطالعه از معادله انتقال ایگرز- وایت برای انجام مدل‌سازی استفاده شده است. در شکل ۸، پروفیل تغییرات بستر هنگام پیک و انتهای سیلاب ۱۰۰ ساله مشخص شده است.

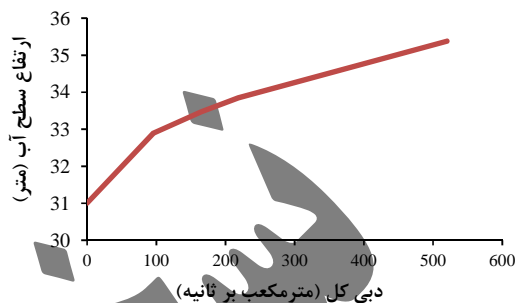
بررسی فرسایش کناری و صحت‌سنجی نتایج

برای شبیه‌سازی اثر مسلح شدن مصالح بستر بر پدیده فرسایش کناری مدل‌سازی هیدرولیک رسوب در مدل FLUVIAL 12 با استفاده از دانه‌بندی مصالح قبل و بعد از مسلح‌شده مصالح بستر استفاده شد. در شکل ۹، فرسایش کناری در یکی از مقاطع به‌عنوان نمونه ارائه می‌شود. زمان ۱۵/۲۶ در شکل ۹ مشخص‌کننده ساعت وقوع پیک سیلاب و زمان ۲۹/۶۶ ساعت پایان سیلاب در مدل Fluvial-12 است. نتایج این بررسی نشان داد که درشت‌دانه شدن مصالح بستر در تمامی مقاطع منجر به کاهش فرسایش بستر شده و در برخی از مقاطع باعث افزایش و توسعه فرسایش کناری می‌شود؛ علت این امر، تفاوت در شکل مقطع و در نتیجه سطح مقطع جریان، سرعت و تنش برشی است.

شکل ۹- الف) تغییرات مقطع عرضی ۴۶۱۱ هنگام پیک و انتهای سیلاب ۱۰۰ ساله قبل از مسلح‌شدن مصالح بستر را نشان می‌دهد و شکل ۹- ب) تغییرات مقطع عرضی ۴۶۱۱ هنگام پیک و انتهای سیلاب ۱۰۰ ساله بعد از مسلح‌شدن مصالح بستر را نشان می‌دهد. کاهش فرسایش بستر و توسعه فرسایش کناری بعد از آرمورینگ برای کنترل نتایج و صحت‌سنجی مدل نسبت به نقشه‌برداری مقطع شماره ۱۳۸۶ در موقعیت $x=247960$ $Y=3704370$ است. در شکل ۱۰، خروجی مدل Fluvial-12 با مقطع نقشه‌برداری شده در وضعیت موجود مقایسه شد. نتایج نشان داد که خروجی مدل هیدرولیکی تطابق خوبی با وضعیت موجود رودخانه در ساحل راست و بستر دارد؛ اما فرسایش کناری در ساحل چپ با نتایج مدل انطباق خوبی ندارد. با توجه به بازدید میدانی انجام شده از محل مقطع موردنظر، مشخص شد که فرسایش ایجاد شده در ساحل چپ، ناشی از فروریختن دیواره به‌علت لغزش شیروانی در اثر آبشستگی پاشنه ساحل چپ است که مدل‌های هیدرولیکی قابلیت مدل‌سازی آن را ندارند.

شرایط مرزی مدل HEC-RAS

از منحنی دبی اشل تهیه شده از مدل‌سازی جریان ماندگار در نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شد. در شکل ۴، منحنی دبی- اشل در مقطع پایین‌دست بازه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۴- منحنی دبی- اشل در مقطع پایین‌دست بازه مورد مطالعه

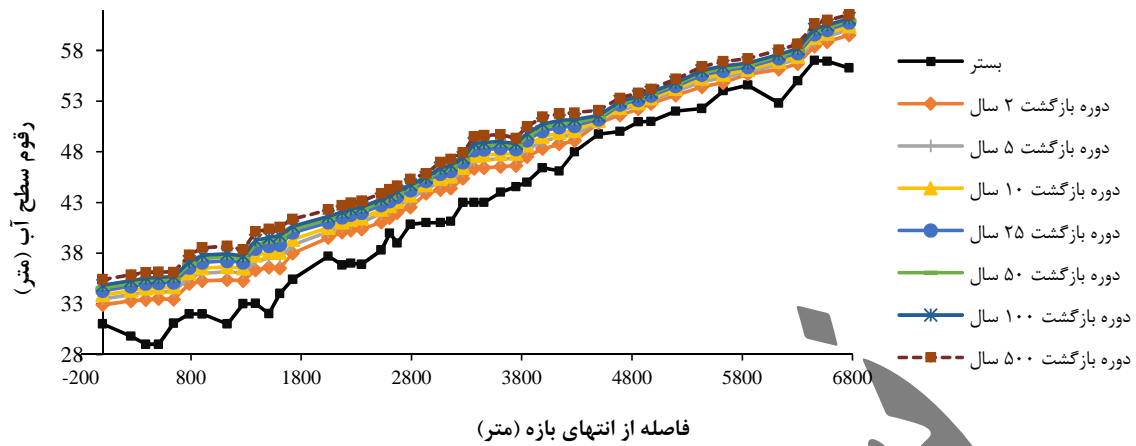
معادلات انتقال رسوب

شبیه‌سازی انتقال رسوب از توابع موجود در این مدل با معادله انتقال رسوب گراف (۱۹۷۰)، معادله توان واحد جریان یانگ (۱۹۷۲-۱۹۸۶)، معادله انگلند و هانسین (۱۹۷۶)، معادله پارکر و همکاران برای شن (۱۹۸۲)، معادله رسوب اکرز و وایت، معادله میر- پیتر و مولر برای بار بستر انجام شده است (شفاعی بجستان، ۱۳۸۴).

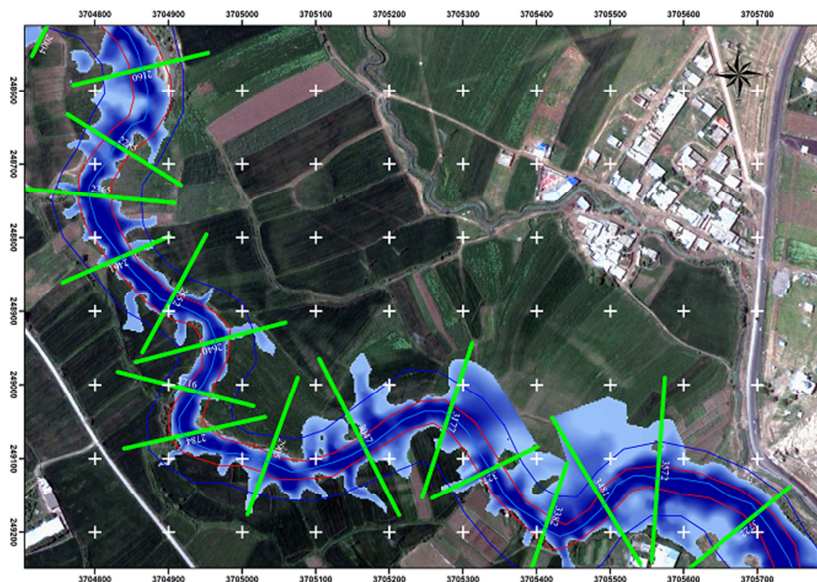
نتایج و بحث

تغییرات پروفیل سطح آب، سطح مقطع جریان، عمق هیدرولیکی، عدد فرود، سرعت و تنش برشی به ازای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ سال محاسبه شد. در شکل ۵، پروفیل سطح آب و در شکل ۶، پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله مربوط به کیلومتر ۲ تا ۳/۷ نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که هرچه کف رودخانه زبرتر بوده یا دبی سیلابی بزرگ‌تری رخ دهد، آبشستگی و فرسایش کناری رودخانه بیشتر است.

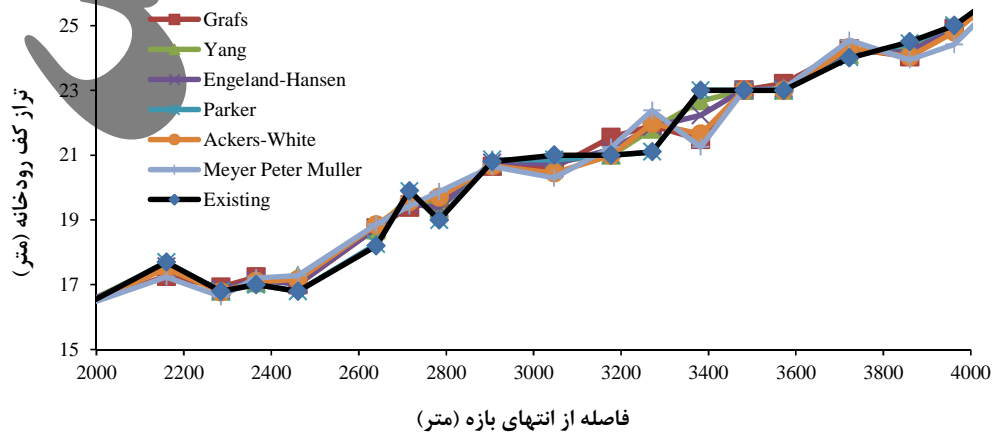
مقایسه پروفیل تغییرات بستر پس از شبیه‌سازی سیلاب ۱۰۰ ساله با استفاده از معادلات مختلف انتقال رسوب در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرات نسبت به بستر موجود از معادلات انتقال رسوب میر- پیتر- مولر و گراف منتج شده است.



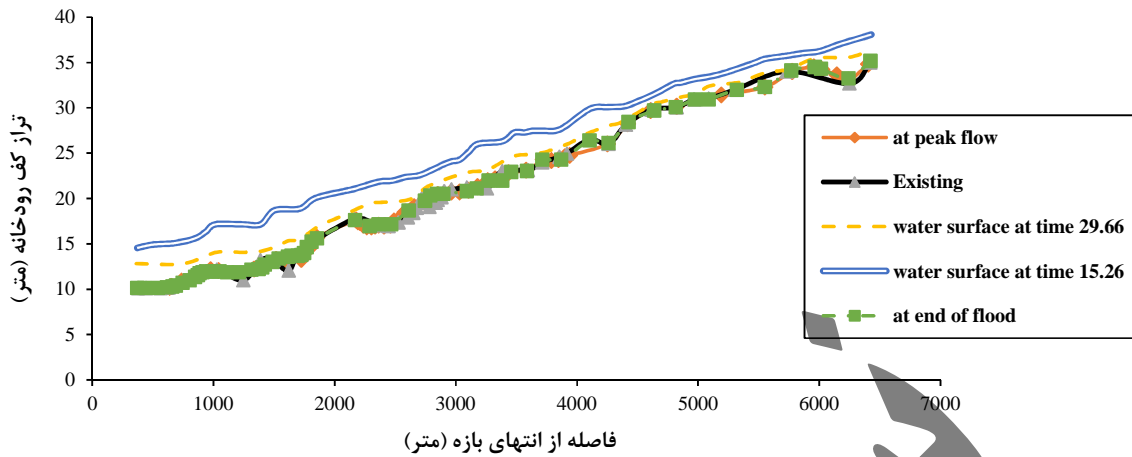
شکل ۵- تغییرات پروفیل سطح آب به ازای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ سال



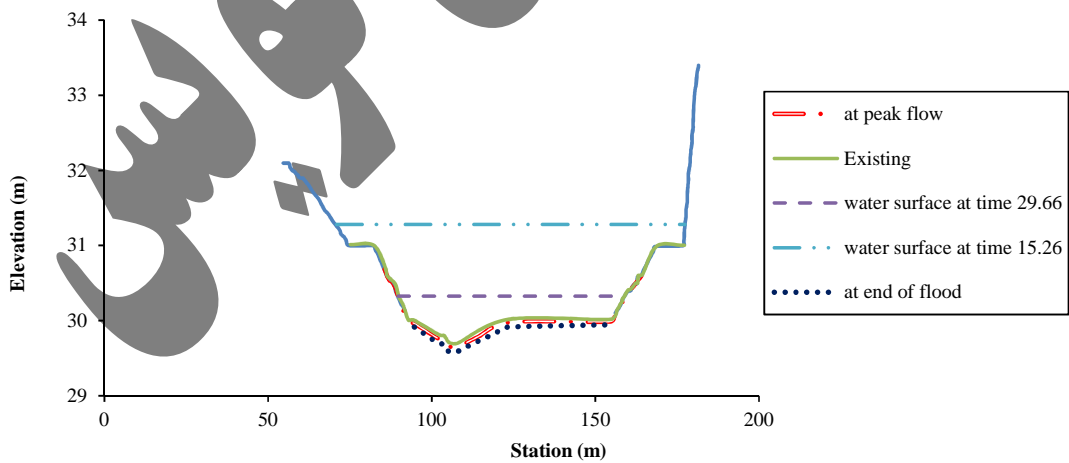
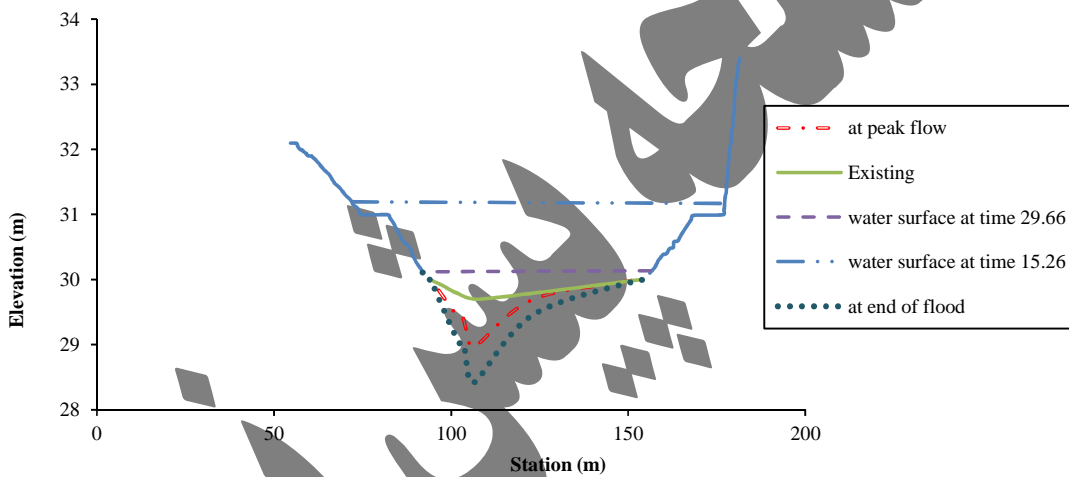
شکل ۶- پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله از کیلومتر ۲۰۰۴ تا ۳۷۲۲ (منظور کیلومتر از جهت پایین دست به سمت بالادست رودخانه است)



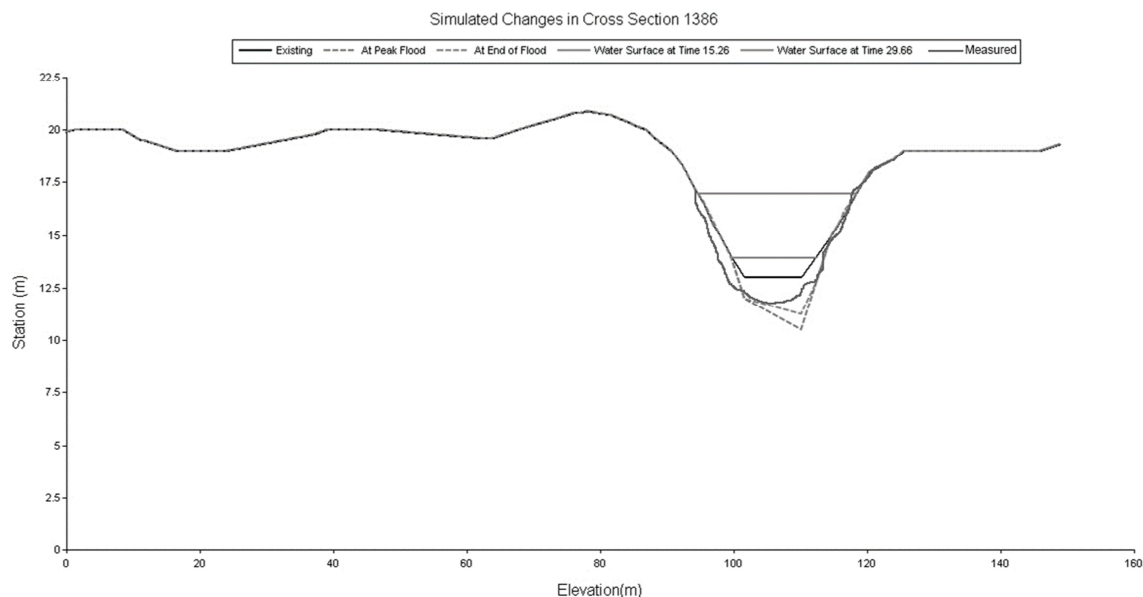
شکل ۷- مقایسه پروفیل تغییرات بستر پس از شبیه سازی سیلاب ۱۰۰ ساله



شکل ۸- پروفیل تغییرات بستر هنگام پیک و انتهای سیلاب ۱۰۰ ساله



شکل ۹- تغییرات مقطع عرضی بعد از مسلح شدن مصالح بستر



شکل ۱۰- مقایسه خروجی مدل Fluvial-12 با پروفیل برداشت‌شده از مقطع شماره ۱۳۸۶ در وضعیت موجود

نتیجه‌گیری

۳. در مقطعی که شکل مقطع و شیب رودخانه باعث ایجاد مقطع پایدار شده است، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در فرسایش و رسوب‌گذاری قبل و بعد از آرمورینگ اتفاق نمی‌افتد.

با توجه به موارد مذکور، اهمیت مطالعه و کنترل بحث برداشت مصالح رودخانه‌ای روشن می‌شود. هر رودخانه‌ای بسته به میزان آبدهی دارای ظرفیت انتقال رسوب مشخصی است. مقدار ظرفیت انتقال با اندازه دانه‌های تشکیل‌دهنده بستر رودخانه نسبت عکس دارد؛ به گونه‌ای که دانه‌های درشت، دارای ظرفیت انتقال کمتری نسبت به دانه‌های کوچک‌تر هستند. بنابراین، تعیین ظرفیت انتقال رودخانه، تعیین نقاط مناسب برای برداشت با توجه به بازه‌های رسوب‌گذار رودخانه و تعیین حجم مناسب برداشت با توجه به آورد بار بستر رودخانه نیازمند انجام مطالعات جامع در خصوص پتانسیل‌یابی برداشت مصالح رودخانه‌ای در بخش‌های مختلف کشورمان است. همچنین با توجه به فعالیت‌های غیرمجاز معادن رودخانه‌ای در سال‌های گذشته، انجام مطالعات ساماندهی رودخانه‌ها بر اساس مدل‌سازی وضعیت موجود آنها و ارائه طرح‌های حفاظتی امری ضروری است.

برای بررسی اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای بر تغییر شکل رودخانه و مدل‌سازی فرسایش کناری از مدل ریاضی Fluvial-12 استفاده شد. بدین منظور، رودخانه خرم‌آباد در بازه‌ای به طول ۷ کیلومتر بالاتر محل الحاق شاخه کاکاشرف مورد ارزیابی و مدل‌سازی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی نشان داد که درشت‌دانه شدن مصالح بستر در اکثر مقاطع منجر به کاهش فرسایش بستر شده و در برخی از مقاطع باعث افزایش و توسعه فرسایش کناری می‌شود. علت این امر را می‌توان به تفاوت در شکل مقطع و در نتیجه سطح مقطع جریان، سرعت و تنش برشی نسبت داد. در شکل‌های ۹ و ۱۰، کاهش فرسایش بستر و توسعه فرسایش کناری بعد از آرمورینگ نشان داده شد. بنابراین، می‌توان نتایج مدل‌سازی را با شرح زیر دسته‌بندی کرد:

۱. در مقطعی که شکل مقطع به صورت V شکل بوده و ابعاد کانال اصلی در مقطع کوچک است، در صورت بروز مسلح‌شدن مصالح بستر، توسعه فرسایش کناری مشاهده می‌شود.
۲. در مقطعی که شکل مقطع به صورت U شکل بوده و ابعاد کانال اصلی در مقطع بزرگ‌تر است، در صورت بروز مسلح‌شدن مصالح بستر، کاهش فرسایش بستر و توسعه ناچیز فرسایش کناری مشاهده می‌شود.

14. Kondolf G. M. 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*. 21: 533-551.
15. Ministry of Environment and Forest. 2016. Sand Mining. ENVIS center, Indian Institute of Technology (ISM), Dhanbad
16. Parker G. P. C. Klingeman and D. G. McLean. 1982. Bed load and size distribution in paved gravel-bed streams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 108(4): 544-571.
17. Peck yen T and Rohasliney H. 2013. Status of water quality subject to sand mining in Kelantan River, Kelantan. *Tropical life sciences research*. 24(1): 19-34.
18. Rinaldi M. Wyzga B. and Surian N. 2005. Effects of sediment mining on channel morphology and environment in alluvial rivers. *River Research and Application*. 21: 805-828.
19. Smolder AJP. Lock RAC. Van der velde G. Medina Hoyos RI. and Roelfos JGM. 2003. Effect of mining activities on heavy metals concentration in water, sediment and macroinvertebrates in different reaches of the Pilcomayo river, south America. *Arch. Environ. Contam. Toxicol*. 44: 314-323.

منابع

۱. احمدی ح. و ملک‌شاهی ر. ۱۳۶۹. برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه. اولین سمینار مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۸۶. راهنمای فرسایش و رسوب در ساماندهی رودخانه‌ها. شماره ۳۸۳. چاپ اول. ۱۷۵ ص.
۳. شفافی بجستان م. ۱۳۸۴. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران. چاپ سوم. ۱۴۱ ص.
۴. صابری ا. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی رودخانه‌های آبرفتی با استفاده از مدل FLUVIAL-12. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی. ۱۹۸ ص.
5. Barnard P. Schoellhamer D. Jaffe B. and McKee L. 2013. Sediment transport in the San Francisco Bay Coastal System. *Marine Geology*. 345: 3-17.
6. Chang H. 1982. Mathematical Model for Erodible Channels. *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*. 108(HY5): 678-689.
7. Chang H. 1988. *Fluvial processes in River Engineering*. John Wiley & sons New York. 325-359.
8. Cotton G. Ottozawa- chatupron V. 1990. Longitudinal channel response due to in-stream mining. *Proceedings Of The National Conference, BOSTON, MA, (USA)*: 957-962.
9. Erskine W. D. 2008. Channel incision and sand compartmentalization in an Australian sandstone drainage basin subject to high flood variability. In: *Proceedings of a symposium held in Christchurch, New Zealand. Sediment dynamics in changing environments. IAHS Publication*. 325: 1-8.
10. Gil M. A. 1994. Hydrodynamics of mining pits in erodible bed under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 120: 1337-1348.
11. Gilbert G. K. 1917. *Hydraulic-mining debris in the Sierra Nevada*. U.S. Geological Survey Professional Paper. 154 p.
12. Jia L. and Luo Z. 2007. Impacts of a large amount of sand mining on river bed morphology and tidal dynamics in lower reaches and delta of the Dongjiang River. *Journal of Geographical Science*. 17: 197-211.
13. Kamboj V. Kamboj N. and Sharma Sh. 2017. Environmental Impact of River Bed Mining- A Review. *IJSRR*. 7(1): 504-520.