ارائه راه‌بردهای فنی در مکان‌یابی نقاط مناسب به‌منظور برداشت رسوبات رودخانه‌ای

سید احمد حسینی[1]، مربی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
نصرالله جواهری، دکتری سازه‌های آبی، شرکت مهندسین مشاور آب، عمران پردیسان
مهدی حبیبی، دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۱/۲۸

چکیده

از آن‌جایی که در زمان وقوع سیلاب، فرسایش کناره‌ها و بستر رودخانه خررود واقع در استان قزوین و انتقال رسوب در آن شدید می‌باشد، لذا در این پژوهش چگونگی توزیع رسوبات در بخش‌های مختلف رودخانه و به‌دنبال آن ارائه برنامه مشخص برای برداشت مصالح رودخانه‌ای مورد مطالعه قرارگرفت. بدین منظور، پس از تهیه اطلاعات پایه مورد نیاز و اطلاعات مربوط به مواد رسوبی و دانه‌بندی رسوبات معلق و بستر رودخانه، با استفاده از مدل HEC-RAS، آورد رسوبی رودخانه و نحوه توزیع آن در طول مسیر رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. به‌طوری که پس از واسنجی مدل، رابطه Yang به‌عنوان مناسب‌ترین رابطه برآورد دبی رسوب شناسایی شد. براین اساس حجم متوسط رسوب خروجی از این رودخانه ۱/۷۵ میلیون تن در سال برآورد شد. در نهایت با استخراج میزان تغییرات در تراز کف هر یک از مقاطع رودخانه، میزان رسوب عبوری طی دوره شبیه‌سازی ۳۷ساله محاسبه شد و مطابق با روند تغییرات رسوب‌گذاری در رودخانه، مناسب‌ترین دوره زمانی برداشت رسوب از این رودخانه ماه‌های دی تا اردیبهشت توصیه شد. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، متوسط عمق برداشت رسوب از این رودخانه حدود ۴۰ سانتی‌متر برآورد شد. با توجه به نتایج مدل و براساس روند تغییرات منحنی رسوب‌گذاری در طول رودخانه، مناسب‌ترین مناطق برای برداشت رسوبات در طول مسیر رودخانه قابل شناسایی می‌باشند. بخش‌هایی از منحنی تغییرات رسوب‌گذاری رودخانه که شیب منحنی در آن افقی می‌شود، به‌عنوان مناسب‌ترین محدوده برای برداشت رسوبات توصیه شد. هم‌چنین، از آن‌جائی که مقادیر حجم آورد رسوب در هر یک از مقاطع عرضی رودخانه محاسبه شد، براساس حداکثر عمق مجاز برداشت مصالح و هم‌چنین، در نظرگرفتن عرض رودخانه و حریم مربوط به آن، طول و کروکی محل برداشت در بازه‌های مختلف رودخانه در محیط ArcGIS شناسایی شد. ضمناً با تحلیل آماری صورت گرفته، مشخص شد که مدل هیدرولیکی HEC-RAS، حدود ۶۳ درصد قضاوت‌های مهندسی اولیه انجام شده برای برداشت رسوبات را پوشش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رسوب، شبیه‌سازی، برداشت شن، مدل ریاضی، HEC-RAS، ArcGIS

مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان یک سیستم پویا همواره در پی تغییرات و دگرگونی مستمر می‌باشند. از میان مشکلات متعددی که طی فرآیندهای طبیعی فرسایش، حمل و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها وجود دارد، مسئله ته‌نشین شدن رسوبات خصوصا در رودخانه‌هایی با قابلیت رسوب‌گذاری فراوان، حائز اهمیت و مورد توجه بیش‌تر است. شناسایی محل برداشت، حدود برداشت، دوره تناوب و زمان برداشت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برداشت مصالح بدون در نظر

[1] نویسنده مسئول sahosseini@yahoo.com

گرفتن موقعیت آن ممکن است به جابه‌جایی سریع رودخانه، تخریب کناره‌ها و زمین‌های زراعی، تخریب سازه‌های آبی و در نتیجه مشکلات اجتماعی و اقتصادی منجر شود. هم‌چنین، موجب عریض شدن مجرای رودخانه شده و این تعریض به افزایش ظرفیت آب‌گذری و عبور سیلاب رودخانه کمک می‌کند که در حقیقت اثری مثبت است و تداوم آن به تخریب زمین‌های اطراف منجر خواهد شد.

صدور مجوز بهره‌برداری از مصالح رودخانه‌ای در ایران، تاکنون بدون در نظر گرفتن مبانی علمی و صرفا بر مبنای قوانین تجربی بوده است. کشور، در دو دهه گذشته با آثار سوء بهره‌برداری غیرفنی از مصالح رودخانه‌ای مواجه بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به تخریب پل‌های بزرگ بالارود، قمرود و تالار اشاره نمود. ابعاد گودال برداشت مصالح رودخانه‌ای (طول، عرض و عمق برداشت) و نیز مکان برداشت در رودخانه‌ها با یک‌دیگر متفاوت می‌باشد. لذا اتکا بر تجربه و ارائه رهنمودها و دستورالعمل‌های کلی، اغلب منجر به خسارت‌های جبران ناپذیری می‌شود. هم‌چنین، برداشت از مکان‌های مناسب و رعایت ضوابط فنی و ابعاد بهینه و روش و حجم برداشت از جمله عوامل تاثیرگذار در جلوگیری از پیامدهای منفی برداشت مصالح و هدایت بهره‌برداری مصالح رودخانه‌ای به‌سمت اثرگذاری مثبت محسوب می‌شود. مبحث برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای نه تنها در ایران، بلکه در دنیا به‌صورت یک مسئله پیچیده مطرح می‌باشد، چرا که هنوز اصول و ضوابط علمی دقیقی در این زمینه تدوین نشده است. همین موضوع باعث شده است که وضع قوانین حقوقی در حفاظت از رودخانه‌ها تاکنون به‌طور قابل توجهی موثر نباشد.

در زمینه رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها به‌روش‌های ساده تجربی تحقیق‌های کمی انجام شده بود که تمام انتظارات و شرایط را پوشش نمی‌داد. لذا بعد از مدتی، روش‌های ریاضی براساس حل یک سری از معادلات حاکم بر جریان و مراحل رسوب‌گذاری ارائه شد که در مقایسه با روش‌های تجربی از قابلیت اطمینان بیش‌تری برخوردارند. مدل‌های ریاضی براساس حل ریاضی تمام پدیده‌های مؤثر در انتقال، توزیع، ته‌نشینی و آب‌شستگی بنا نهاده شده‌اند. قمشی و صدق‌آمیز (۱۳۸۵) در تحقیق خود پیرامون وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه صفر، مدل HEC-6 را برای دوره‌های مختلف زمانی اجرا نمودند و نشان دادند که در یک دوره ۱۰۰ساله فاصله دلتای رسوب تا بدنه سد حدودا ۲۰ کیلومتر می‌باشد که اثری بر کارایی سد نخواهد گذاشت (قمشی و صدق‌آمیز، ۱۳۸۵).

Asada (۱۹۹۳) یک مدل ریاضی برای رودخانه‌های کوهستانی و مخازن ارائه داد که اساس آن مدل معادله خودش در انتقال رسوب بود. طرز عمل این مدل شبیه به روش‌های دیگر می‌باشد، بدین ترتیب که ابتدا پروفیل‌های برگشت آب برای شیب اولیه بستر به‌وسیله معادلات دائمی و غیر یک‌نواخت محاسبه می‌شوند، آن‌گاه میزان تغییر کف در یک محدوده زمانی با استفاده از معادلهٔ حمل رسوب و معادلهٔ پیوستگی رسوب محاسبه می‌شود. Lopez و Barragan (۲۰۰۸) مدلی را ارائه دادند که در آن، هم از تئوری Jet و هم از تئوری انتقال رسوب به‌منظور پیش‌بینی رسوب‌گذاری در مخازن استفاده شده است (Lopez و Barragan، ۲۰۰۸).

UACE[1] (۱۹۹۳) نیز یک مدل کامپیوتری به‌نام HEC-6 را برای شبیه‌سازی رسوب‌گذاری و رسوب‌برداری در رودخانه‌ها و مخازن ارائه داد. این مدل که یک مدل ریاضی یک بعدی می‌باشد و از مقبولیت نسبتاً زیادی بین محققان برخوردار است، به‌منظور پیش‌بینی حمل رسوبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل HEC-6 جریان آب و رسوب در دو فاز مختلف روندیابی می‌شود. ابتدا، جریان آب از پایین‌دست به‌سمت بالادست روندیابی می‌شود و آن‌گاه فرآیندهای مربوط به رسوب از بالادست به‌سمت پایین‌دست صورت می‌پذیرد. اداره مهندسی ارتش آمریکا در تحلیل حساسیت مدل ریاضی HEC-6 با استفاده از اطلاعات صحرائی، حساسیت این مدل را نسبت به تغییرات محدوده بستر متحرک، بسیار شدید و نسبت به تغییرات داده‌های رسوب و روش محاسبه سرعت سقوط ذرات قابل توجه دانست (USBR[2]، ۲۰۰۶).

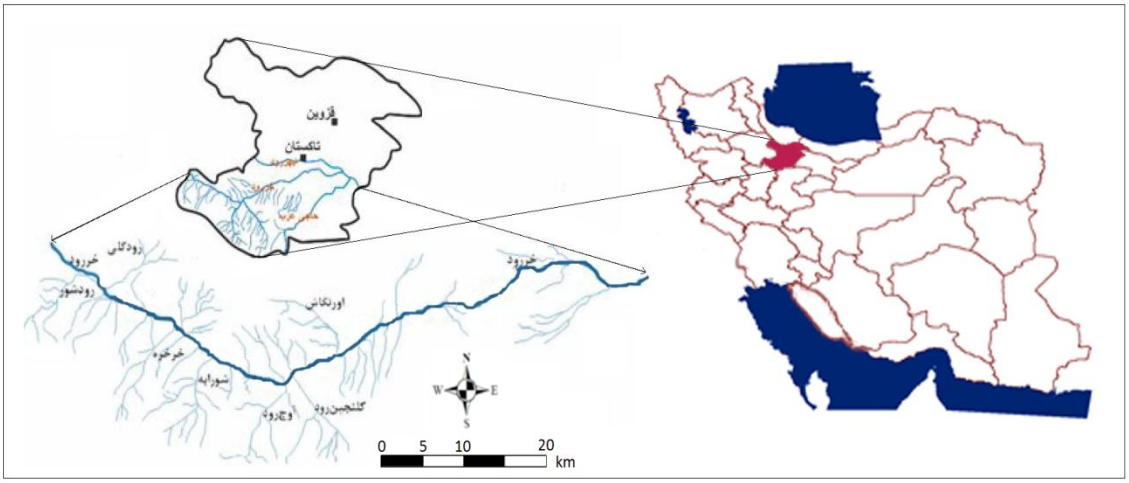
[1] Us Army Corps of Engineers
[2] United States Bureau of Reclamation

Holly و همکاران (۱۹۹۰) مدلی را برای شبیه‌سازی جریان غیر دائمی و حرکت رسوبات در شبکه کانال‌های مرکب با بستر متحرک ارائه نمودند. این مدل قادر به روندیابی هیدرولیکی و شبیه‌سازی فرآیند پوشش‌دار شده می‌باشد، اما توانایی شبیه‌سازی فرآیند رسوبات چسبنده و اثرات جریان‌های غلیظ را ندارد (Holly و همکاران، ۱۹۹۰). Haghiabi و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقی در خصوص پارامترهای موثر در جریان‌های غلیظ با استفاده از مشاهدات و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان دادند که این پدیده عمدتاً وابسته به پارامتری تحت عنوان عدد ریچاردسون و زاویه شیب کف می‌باشد (Haghiabi و همکاران، ۲۰۰۴).

با توجه به این‌که در زمینه تعیین میزان تغییرات در تراز کف رودخانه و هم‌چنین، تعیین مناسب‌ترین دوره زمانی برداشت رسوب از رودخانه‌ها و امکان انتقال و تدقیق نتایج حاصل از مدل‌های هیدرولیکی به محیط GIS با هدف تعیین جانمایی مکان‌های مناسب به‌منظور برداشت رسوبات اقدامی نشده است، در این تحقیق با بررسی وضعیت انتقال رسوب در رودخانه خررود، با محاسبه دبی رسوبات رودخانه‌ای و مشخص نمودن توزیع رسوب در بخش‌های مختلف رودخانه، مکان‌های مناسب و هم‌چنین، برنامه برداشت مصالح از رودخانه ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد تحقیق: محدوده رودخانه مورد مطالعه واقع در استان قزوین از نزدیکی محله قلعه عبداله‌خان در مختصات '۱۹ °۴۹ طول و '۴۷ °۳۷ عرض جغرافیایی شروع و تا محل بند انحرافی شال در طول جغرافیایی '۴۳ °۴۹ و عرض '۵۴ °۳۵ ادامه می‌یابد. طول رودخانه در محدوده مورد مطالعه حدود ۴۳ کیلومتر می‌باشد. این رودخانه قبل از اتصال به رودخانه شال و در حوالی روستای قنبرشاه به دو شاخه تقسیم و رودخانه اسفرورین از آن منشعب می‌شود. شکل ۱، موقعیت عمومی حوضه و رودخانه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت عمومی حوضه منطقه طرح و رودخانه مورد مطالعه

روش تحقیق: به‌منظور بررسی دقیق‌تر و مستندسازی مشکلات، بازدیدهای متعددی از رودخانه و کارگاه‌های برداشت شن و ماسه در منطقه به‌عمل آمد. مطابق با حجم انباشت مصالح و ارزیابی‌های کارشناسی در بازدیدهای میدانی صورت گرفته و با توجه به امکانات و تجهیزات مکانیکی موجود در هر یک از کارگاه‌های برداشت شن و ماسه منطقه و از طرفی محدودیت‌های موجود نظیر عدم تناسب بین میزان عرضه و تقاضای مصالح رودخانه‌ای، می‌توان به‌طور متوسط رقم ۵۰ هزار مترمکعب در سال را به‌عنوان معیاری اولیه در برداشت مصالح به‌وسیله هر یک از کارگاه‌ها تخمین زد. بر این اساس حدود یک میلیون تن در سال از رودخانه خررود برداشت مصالح صورت می‌گیرد.

به‌منظور برآورد آب‌دهی رودخانه مورد نظر از آمار و اطلاعات نه ایستگاه هیدرومتری که در داخل و اطراف حوضه مورد مطالعه واقع شده‌اند، استفاده شد. در این رودخانه از مقادیر دبی-اشل ایستگاه هیدرمتری رحیم‌آباد برای واسنجی ضریب مانینگ استفاده شد. به‌طوری که پس از طبقه‌بندی دبی‌های ثبت شده در هر ایستگاه، اشل متناظر آن‌ها استخراج و با قرار دادن این مقادیر دبی با ضرایب مانینگ متفاوت در برنامه HEC-RAS و مقایسه سطوح آب به‌دست آمده از مدل با سطوح ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری، بهترین ضریب زبری که منطبق‌ترین نتایج را می‌داد، انتخاب شد (جدول ۱). شایان ذکر است مقدار ضریب مانینگ براساس مشخصات مربوط به پوشش گیاهی رودخانه، اندازه و شکل مقطع رودخانه، نامنظمی سطح مقطع رودخانه و پیچش مسیر رودخانه برآورد شد. با توجه به جدول ۱، ضریب مانینگ این قسمت از رودخانه، با استفاده از روش کاون ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

جدول ۱- ارتفاع سطح آب در ایستگاه رحیم آباد، رودخانه خررود (متر)

دبی (مترمکعب در ثانیه)	ارتفاع سطح آب ثبتی در ایستگاه رحیم آباد	ارتفاع سطح آب در n=۰,۳۵	ارتفاع سطح آب در n=۰,۰۴	ارتفاع سطح آب در n=۰,۰۴۵	ارتفاع سطح آب در n=۰,۰۵	ارتفاع سطح آب در n=۰,۰۰۵
۵	۰,۷۷	۰,۶۷	۰,۶۹	۰,۷۰	۰,۷۲	۰,۷۳
۱۵	۱,۰۷	۱,۰۱	۱,۰۴	۱,۰۶	۱,۰۸	۱,۰۹
۲۹	۱,۴	۱,۳۱	۱,۳۳	۱,۳۶	۱,۳۸	۱,۴۰
۴۶	۱,۶	۱,۵۴	۱,۵۷	۱,۵۹	۱,۶۲	۱,۶۵

اطلاعات پایه مورد نیاز در برآورد رسوب رودخانه با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS، به چهار گروه مختلف به‌شرح ذیل تقسیم شد.

الف- شکل هندسی رودخانه و ضرایب زبری مقاطع مختلف: شامل مقاطع عرضی رودخانه، طول بازه‌ها، مقادیر ضرایب مانینگ رودخانه و نیز مشخصات مربوط به بستر متحرک[1] کلیه مقاطع می‌باشد که به مدل معرفی شدند. منظور از بستر متحرک در واقع قسمتی از رودخانه است که در آن امکان فرسایش و یا رسوب‌گذاری وجود دارد. هم‌چنین، عمق رسوبات کف رودخانه فاکتور بسیار مهمی است که به‌وسیله آن ضخامت لایه‌ای از کف رودخانه که قابلیت فرسایش دارد، به مدل معرفی شد. در این خصوص با توجه به مطالعات میدانی و نتایج مطالعات زمین‌شناسی رودخانه مورد مطالعه حداکثر میزان عمق فرسایش برابر با سه متر انتخاب و به مدل وارد شد. علاوه بر اطلاعات فوق، عرض محدوده بازه فرسایش‌پذیر در هر مقطع، معادل با عرض محدوده مقطع اصلی جریان که در مطالعات هیدرولیک رودخانه تعیین شده بود، انتخاب و به مدل وارد شد. اطلاعات مربوط به شکل هندسی رودخانه با استناد به نقشه‌های ۱:۵۰۰ محدوده طرح، استخراج و مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که در مطالعات هیدرولیک بازه رودخانه مورد مطالعه حدود ۵۴۸ مقطع عرضی تهیه شد.

ب- مواد رسوبی (دانه‌بندی رسوبات معلق و بستر رودخانه): اطلاعات مواد رسوبی به موارد زیر تقسیم شد.

- **مقدار رسوبات وارده به محدوده مدل در بالادست جریان و برآورد درصد ذرات مختلف رسوبی شامل (رس، سیلت و ماسه) در دبی‌های مختلف**: با توجه به اهداف مطالعات، روابط دبی-رسوب با استفاده از سه روش منحنی سنجه رسوب، FAO و پوش هم‌غلظت در هر کدام از ایستگاه‌های منطقه محاسبه شد و در نهایت روش پوش هم‌غلظت به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. به‌طوری که در اجرای مدل از مقادیر آن به‌عنوان شرایط مرزی رسوب در بالادست رودخانه استفاده شد (جدول ۲). لازم به ذکر است که شرایط مرزی در این بخش به‌صورت یک منحنی Rating که ارتباط بین دبی جریان و دبی رسوب را به‌دست می‌دهد، به مدل معرفی شد.

[1] Mobile Bed

جدول ۲- نتایج روابط دبی-رسوب به‌وسیله روش پوش هم‌غلظت در هر یک از ایستگاه‌های منطقه

ارتش آباد		رحیم آباد		قروه		آب‌گرم	
بار معلق (تن در روز)	آب‌دهی (مترمکعب در ثانیه)	بار معلق (تن در روز)	آب‌دهی (مترمکعب در ثانیه)	بار معلق (تن در روز)	آب‌دهی (مترمکعب در ثانیه)	بار معلق (تن در روز)	آب‌دهی (مترمکعب در ثانیه)
۲۹۵۱۲	۲۲,۵	۱۶۲۱۸۱۰	۲۱۰	۲۵۰۰۰۰	۹۳,۱۰	۱۱۴۸۱۵۴	۱۲۲
۲۲۹۰۹	۱۷	۸۵۱۱۳۸	۱۲۶	۱۳۰۰۰۰	۵۰,۰۰	۷۵۸۵۷۸	۸۰,۶
۱۵۸۴۹	۱۱,۸۵	۳۰۹۰۳۰	۷۶	۷۰۷۹۵	۲۹,۷۳	۲۳۴۴۲۳	۳۵,۶
۸۵۱۱	۶,۳۲	۱۱۲۲۰۲	۴۵,۷۵	۲۹۵۱۲	۱۵,۶	۷۲۴۴۴	۲۲
۱۶۹۸	۳,۲	۲۱۳۸۰	۲۲,۷۵	۷۷۶۲	۸,۳	۲۱۳۸۰	۱۳,۱
۱۵۵	۱,۵	۴۰۷۴	۱۱	۵۶۲,۳	۳,۹۰	۲۰۰۰	۶,۶۹
۲۰,۳۸۷۶	۰,۸۵	۷۷۶,۲	۶,۵	۲۵,۹۴۳۰	۱,۹۱	۳۳۰,۴	۴,۰۸
۸,۶۷۳۹	۰,۶	۳۸۹,۰	۴,۷	۱۱,۱۸۰۰	۱,۲۵	۱۸۷,۶	۳,۲
۳,۴۰۷۸	۰,۴۱	۱۶۰,۳	۳,۰۳	۳,۵۳۵۷	۰,۷۰	۱۱۲,۵	۲,۵۷
۱,۱۱۴۶	۰,۲۶	۲۹,۰۱	۱,۳	۰,۹۹۷۰	۰,۳۷	۵۵,۶۷	۱,۹
۰,۲۰۳۵	۰,۱۳	۱,۲۱	۰,۲۷	۰,۴۹۴۸	۰,۲۶	۲۲,۹۹	۱,۳
۰,۰۴۴۶	۰,۰۷	۰,۱۰۴۰	۰,۰۸	۰,۳۲۳۸	۰,۲۱	۶,۵۸۱۷	۰,۷۶
۰,۰۱۷۷	۰,۰۴۸	۰,۰۴۰۲	۰,۰۵	۰,۲۱۲۹	۰,۱۷	۱,۹۴۰۷	۰,۴۵
۰,۰۰۵۶	۰,۰۳	۰,۰۱۴۳	۰,۰۳	۰,۱۰۶۶	۰,۱۲	۰,۵۴۰۵	۰,۲۶
۰,۰۰۲۱	۰,۰۲	۰,۰۰۶۳	۰,۰۲	۰,۰۱۲۰	۰,۰۴۰	۰,۰۷۲۸	۰,۱۱
۰,۰۰۰۴	۰,۰۱	۰,۰۰۱۶	۰,۰۱	۰,۰۰۲۰	۰,۰۱۶	۰,۰۰۳۵	۰,۰۳
۰,۰۰۰۴	۰,۰۱	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۷	۰,۰۰۰۸	۰,۰۱۰	۰,۰۰۰۳	۰,۰۱
۰,۰۰۰۴	۰,۰۱	۰,۰۰۰۱	۰,۰۰۳	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۶	۰,۰۰۰۳	۰,۰۱
۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۷	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	۰,۰۰۴	۰,۰۰۰۳	۰,۰۱

- **دانه‌بندی مواد بستر در هر مقطع عرضی از رودخانه:** به‌منظور ورود اطلاعات مربوط به مواد رسوبی رودخانه از نتایج آزمایش‌های مصالح بستر رودخانه خررود و مقادیر دانه‌بندی ذرات بستر در مقاطع مختلف رودخانه استفاده و به مدل معرفی شد. هم‌چنین، سرعت ته‌نشینی با توجه به اندازه و وزن مخصوص ذرات و ضریب لزجت سینماتیک سیال محاسبه شد. نظر به این‌که تفاوت اصلی فرمول‌های سرعت سقوط ذرات مربوط به میزان ذرات ریزدانه و میزان چسبندگی و کلوئیدی بودن آن ذرات می‌باشد، لذا از رابطه Ruby در تعیین سرعت سقوط و نهایتا انتقال رسوبات استفاده به‌عمل آمد.

ج- هیدرولوژی رودخانه: این اطلاعات در قالب میانگین دبی‌های روزانه مشاهده شده به همراه مدت دوام هر یک، به شکل دسته‌های معین به مدل معرفی شد. در این قسمت، همراه اطلاعات فوق درجه حرارت آب در ایام مختلف سال نیز به مدل معرفی شد تا با توجه به درجه حرارت‌های مختلف سال مدل، ضریب لزجت سینماتیکی را برای آب رودخانه در نظر گرفته و براین اساس سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبی را محاسبه نماید.

د- شرایط مرزی هیدرولیکی بالادست و پایین‌دست سیستم: از داده‌های دبی روزانه ایستگاه آب‌گرم (واقع در بالادست بازه مورد مطالعه) برای تعریف شرایط مرزی بالادست و از اطلاعات ایستگاه اندازه‌گیری رحیم آباد برای تعریف شرایط مرزی پائین‌دست استفاده شد.

واسنجی مقادیر رسوب مدل: به‌منظور واسنجی مدل، از کلیه داده‌های دبی کلاسه جریان و منحنی سنجه رسوب، در ایستگاه آب‌گرم استفاده شد، به‌طوری که داده‌ها به‌صورت لگاریتمی به مدل وارد شد. لازم به‌ذکر است که میزان بار کف براساس قضاوت مهندسی ۲۰ درصد بار معلق درنظر گرفته شد. هم‌چنین، به‌منظور واسنجی مدل، شرایط متفاوت مدنظر قرار گرفت. از آن‌جایی که حدود هفت رابطه برآورد رسوب نظیر ایکرز و وایت، توفالتی و یانگ در مدل HEC-RAS وجود دارد، لازم بود نتایج حاصل از اجرای هر یک از این روابط با نتایج رسوبات اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه اندازه‌گیری رحیم‌آباد (واقع در میانه مسیر مورد مطالعه)، مورد مقایسه قرار گیرد تا رابطه مناسب که نزدیک‌ترین جواب را در برآورد رسوب با ایستگاه داشت، انتخاب شود. تحلیل نتایج حاصل از مدل HEC-RAS، نشان داد که برآورد رسوب معلق در ایستگاه اندازه‌گیری رحیم‌آباد، ۱/۶۶ میلیون تن در سال می‌باشد که با احتساب ضریب ۲۰ درصد بار کف به آن، بار کل رسوب خروجی (Qst) از این ایستگاه ۱/۹۹ میلیون تن در سال تخمین زده شد.

در محل ایستگاه رحیم‌آباد نزدیک‌ترین رابطه برآورد بار رسوب کل در مدل، مربوط به رابطه یانگ با رسوبی برابر با ۱/۴۵ میلیون تن در سال است که نزدیک‌ترین جواب به داده‌های تحلیل ایستگاهی بود. بر این اساس رابطه Yang (Yang و Simoes، ۲۰۰۵) به‌عنوان مناسب‌ترین رابطه در برآورد رسوب مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۳).

جدول۳- نتایج حاصل از روابط مختلف به‌منظور کالیبره نمودن مدل در خررود

ردیف	نام روش	بارکل رسوب خروجی (میلیون تن در سال)
۱	آمار (تحلیل) ایستگاهی	۱,۹۹۲۰۰
۲	Ackers_White	۰,۰۰۰۴
۳	England_Hansen	۸,۵۳۵۰۰
۴	Laursen	۱۴,۱۹۴۰۰
۵	Meyer peter & Muler	۰,۳۴۷۰۰
۶	Toffaletti	۰,۶۷۲۰۰
۷	Yang	۱,۴۵۰۰۰
۸	Wilcock	۰,۱۹۲۰۰

نتایج و بحث

دسته‌بندی داده‌های دبی: به‌منظور برآورد رسوب رودخانه خررود و برنامه‌ریزی برداشت رسوب از بستر آن لازم بود که مدل واسنجی شده براساس داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های منطقه شبیه‌سازی شود. برای این منظور، ابتدا کلیه مقادیر متوسط آب‌دهی در ایستگاه مورد نظر براساس داده‌های دبی روزانه دسته‌بندی شد. نتایج حاصل از دسته‌بندی داده‌ها برای یک دوره ۳۷ساله که به‌عنوان شرایط مرزی بالادست در ایستگاه آب‌گرم، به‌صورت منحنی سری‌های زمانی جریان[1] به مدل وارد شد، در جدول ۴ ارائه شده است.

برآورد رسوب خروجی: نتایج شبیه‌سازی در طی یک دوره ۳۷ساله نشان داد که حجم متوسط رسوب خروجی از این رودخانه ۱/۷۵ میلیون تن در سال بود. لازم به‌ذکر است که مدل مورد استفاده حجم رسوب خروجی در هر مقطع از رودخانه را ارائه می‌دهد و در نهایت مقدار رسوب حاصله در مقطع آخر بیان‌گر میزان رسوب خروجی از رودخانه می‌باشد.

میزان تغییرات در تراز کف رودخانه خررود: براساس نتایج مدل حداکثر تغییرات در رقوم بستر این رودخانه طی یک دوره شبیه‌سازی ۳۷ساله، استخراج شد. به‌طور کلی روند تغییرات در رقوم بستر رودخانه خررود در شکل ۲-راست، نشان داده شده است. همان‌طوری که از این شکل بر می‌آید حداکثر میزان تغییرات در رقوم بستر رودخانه ۱/۵ متر و

[1] Flow Series

مربوط به بازه‌ای در فواصل ۱۰ و ۱۵ کیلومتری بازه مورد مطالعه نسبت به بالادست می‌باشد. مقدار متوسط میزان تغییرات در رقوم بستر رودخانه نیز ۰/۴ متر در طول مسیر رودخانه است. براین اساس، مشخص شد که کم‌ترین میزان تغییرات در ۰/۰۲ متر و مربوط به بازه‌ای در فواصل ۲۲ تا ۳۳ کیلومتری بازه مورد مطالعه نسبت به بالادست می‌باشد.

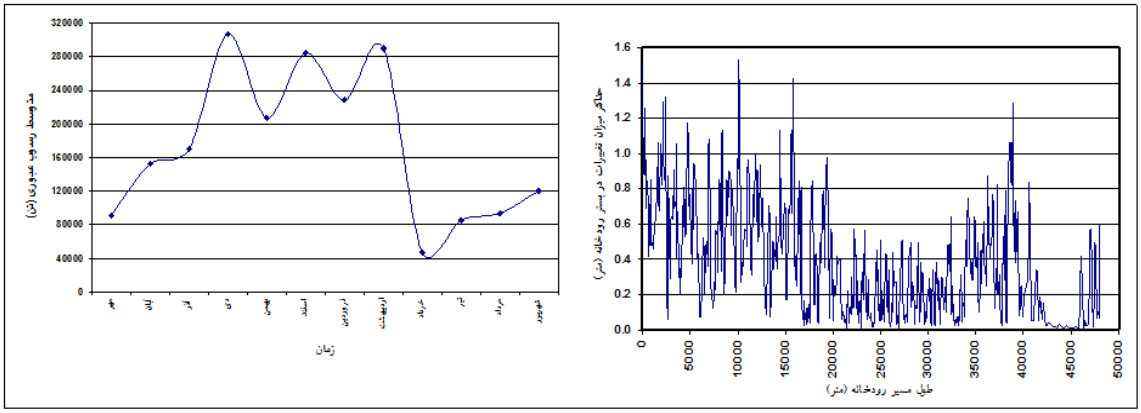
جدول۴- نتایج دسته‌بندی مقادیر دبی‌های روزانه مشاهداتی در قالب مقادیر شرایط مرزی بالادست مدل (در ایستگاه آب‌گرم خررود)

ردیف	دبی (مترمکعب درثانیه)	تداوم دبی (ساعت)	نمو شمارگری (ساعت)	ردیف	دبی (مترمکعب درثانیه)	تداوم دبی (ساعت)	نمو شمارگری (ساعت)
۱	۱,۸۳	۲۸۸	۱۲	۲۵	۳,۶۵	۲۴۰	۱۰
۲	۲,۴۸	۲۸۸۰	۱۲۰	۲۶	۲,۶۵	۲۲۰۸	۹۲
۳	۱۴,۹۰	۲۴	۱	۲۷	۱۵,۸۴	۸۶۴	۳۶
۴	۲,۸۴	۱۵۱۲	۶۳	۲۸	۲۰,۴۱	۶۷۲	۲۸
۵	۱۲,۷۰	۲۴	۱	۲۹	۱۳,۷۸	۳۳۶	۱۴
۶	۲,۸۶	۶۲۴	۲۶	۳۰	۴,۸۶	۱۹۲	۸
۷	۳۳,۲۶	۴۸	۲	۳۱	۲,۵۰	۷۱۵۲	۲۹۸
۸	۰,۴۸	۳۷۴۴	۱۵۶	۳۲	۳۱,۳۵	۲۴	۱
۹	۱۴,۰۹	۲۴	۱	۳۳	۱۱,۸۱	۹۶	۴
۱۰	۳,۳۲	۴۸	۲	۳۴	۵,۹۲	۱۹۲	۸
۱۱	۱۲,۱۷	۴۸	۲	۳۵	۴,۹۸	۷۲۰	۳۰
۱۲	۲,۰۳	۲۶۴	۱۱	۳۶	۱۹,۸۳	۲۴	۱
۱۳	۱۰,۷۰	۲۴	۱	۳۷	۷,۸۳	۱۲۰	۵
۱۴	۱,۵۳	۱۳۵۳۶	۵۶۴	۳۸	۰,۶۲	۱۸۹۶	۷۹
۱۵	۱۱,۵۰	۲۴	۱	۳۹	۱۱,۰۵	۲۴	۱
۱۶	۱,۶۳	۱۹۲	۸	۴۰	۲,۵۶	۶۵۰۴	۲۷۱
۱۷	۹,۵۳	۷۲	۳	۴۱	۴۱,۰۶	۷۲	۳
۱۸	۴۳,۱۰	۴۸	۲	۴۲	۱۲,۰۷	۲۶۴	۱۱
۱۹	۱۵,۱۴	۱۲۰	۵	۴۳	۸۲,۸۱	۲۴	۱
۲۰	۳۰,۲۰	۲۴	۱	۴۴	۲۴,۵۳	۲۴	۱
۲۱	۶,۸۱	۱۴۴	۶	۴۵	۳,۷۱	۱۴۴	۶
۲۲	۰,۸۴	۳۸۴۰	۱۶۰	۴۶	۱,۷۴	۷۰۵۶	۲۹۴
۲۳	۹۰,۱۰	۲۴	۱	۴۷	۱۳,۴۴	۱۹۹۲	۸۳
۲۴	۱۹,۷۰	۲۴	۱	۴۸	۱,۳۷	۱۶۸۰	۷۰

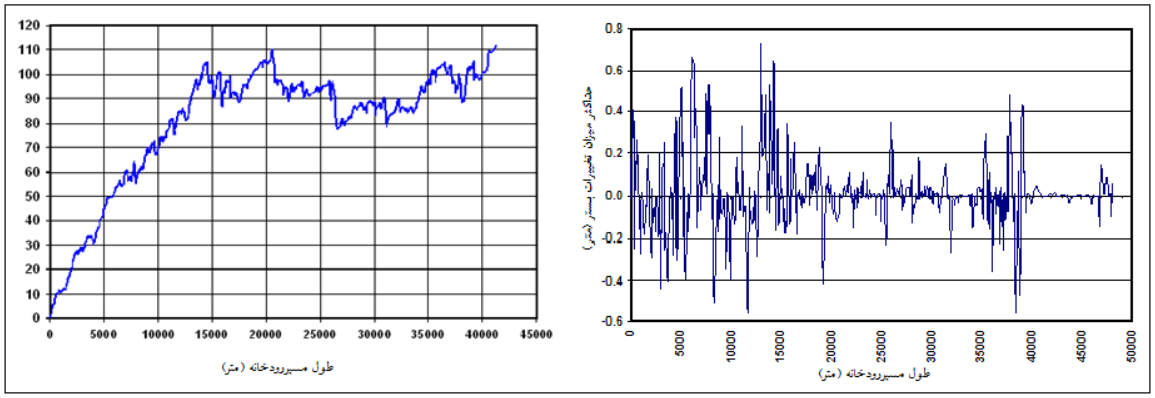
برآورد میزان رسوب عبوری طی زمان: متوسط مقادیر رسوب ماهانه عبوری از رودخانه خررود طی دوره شبیه‌سازی ۳۷ساله در شکل ۳ ارائه شده است. براساس شکل ۲-چپ مشخص شد که حداکثر حجم رسوب عبوری از رودخانه خررود در طی دوره ۳۷ساله شبیه‌سازی شده ۰/۳۱ میلیون تن و مربوط به دی‌ماه می‌باشد. مطابق با روند تغییرات رسوب‌گذاری در رودخانه، مناسب‌ترین دوره زمانی برداشت رسوب از این رودخانه عمدتا به ماه‌های دی تا اردیبهشت محدود می‌شود.

عمق متوسط برداشت رسوب: براساس نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی مشخص شد که متوسط عمق برداشت رسوب از این رودخانه به ۴۰ سانتی‌متر محدود می‌باشد. هم‌چنین، مطابق با شکل ۳-راست حداکثر ارتفاع رسوب‌گذاری در این رودخانه ۷۳ سانتی‌متر می‌باشد که این مقدار حداکثر در کیلومتر ۱۳ (نسبت به ابتدای بازه مورد مطالعه از بالادست) اتفاق می‌افتد.

تعیین محدوده‌های مناسب برداشت مصالح: روند تغییرات رسوب‌گذاری در طول بازه مورد مطالعه از رودخانه خررود در طول دوره شبیه‌سازی در شکل ۳-چپ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، براساس سیرصعودی منحنی تغییرات رسوب‌گذاری، رودخانه از ابتدای بازه تا حدود ۱۵ کیلومتر ابتدایی تحت تاثیر فرسایش می‌باشد و برداشت رسوب در این ناحیه قابل توصیه نمی‌باشد. لذا این محدوده مناسب‌ترین قسمت برای احداث سازه‌های آب‌گیری و یا احداث ایستگاه پمپاژ می‌باشد. در محدوده کیلومتر ۱۵ تا ۲۰ که شیب منحنی نسبتا کم‌تر می‌شود، به‌عنوان مناسب‌ترین محدوده برای احداث سازه‌های تقاطعی نظیر پل می‌باشد. هم‌چنین، در کیلومتر ۲۰ تا ۴۰ با توجه به افقی شدن شیب منحنی، به‌عنوان مناسب‌ترین محدوده برای برداشت رسوبات توصیه می‌شود. کاهش شیب منحنی مدنظر بدین مفهوم می‌باشد که هر مقدار رسوبی که از بالادست وارد این محدوده می‌شود، در حال انتقال بوده و براین اساس می‌تواند مورد برداشت قرار گیرد.



شکل ۲- حداکثر میزان تغییرات در رقوم بستر در طول مسیر رودخانه خررود طی دوره شبیه‌سازی ۳۷ساله (راست)، متوسط رسوب ماهانه عبوری از رودخانه خررود براساس نتایج دوره شبیه‌سازی ۳۷ساله (چپ)



شکل ۳- حداکثر میزان تغییرات در رقوم بستر در طول مسیر رودخانه خررود طی دوره ۳۷ساله (راست)، روند تغییرات رسوب‌گذاری درطول بازه موردمطالعه از رودخانه خررود در طی دوره شبیه‌سازی (چپ)

تعیین مکان‌های دقیق جهت برداشت رسوب از خررود: با توجه به نتایج مدل و تغییرات رسوب‌گذاری اتفاق افتاده در طول بازه مورد مطالعه و با استناد به این‌که تنها مکان‌هایی برای برداشت رسوب مدنظر قرار گیرند که در طول دوره شبیه‌سازی حداقل ۲۰ سانتی‌متر دارای ترسیب رسوب بوده‌اند. بدین ترتیب، می‌توان نقاط مناسب را به‌ترتیب اولویت برای این منظور پیشنهاد نمود. از آن‌جائی‌که مقادیر حجم آورد رسوب در هر یک از مقاطع عرضی رودخانه مشخص می‌باشد، با توجه به توصیه‌های قبلی ارائه شده و لحاظ شرایط فنی و اجرایی و براساس حداکثر عمق

مجاز برداشت مصالح برابر با یک متر و هم‌چنین، در نظرگیری عرض رودخانه و حریم مربوط به آن، مکان‌های مناسب برای برداشت رسوب و طول برداشت در هر مقطع عرضی به‌شرح جدول ۵، تعیین شد.

جدول۵- اولویت و مکان‌های مناسب جهت برداشت رسوب از خررود

شماره اولویت	فاصله مقطع از بالادست (متر)	ارتفاع رسوب‌گذاری (متر)	عرض برداشت با لحاظ حریم اطراف (متر)	طول برداشت (متر)
۱	۳۹۰۹۳	۰,۹۵	۶۰۰	۶۸۸
۲	۳۷۲۸۳	۰,۴۷	۶۳۰	۱۸۲۳
۳	۴۱۰۲۸	۰,۳۹	۷۴۰	۱۶۶۹
۴	۱۲۶۴۷	۰,۲۶	۶۶۰	۱۸۵۱
۵	۳۶۸۳۵	۰,۲۱	۵۰۰	۶۰۱

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با بررسی‌ها و پتانسیل‌یابی انجام شده به‌صورت میدانی، برای تعیین مکان‌های مناسب برداشت مصالح در رودخانه خررود مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از برآورد رسوب و تحلیل‌های آماری صورت گرفته روی آن نشان داد که مکان‌های مختلف تعیین شده برای برداشت رسوبات از خررود با استفاده از مدل HEC-RAS حدود ۶۳ درصد قضاوت‌های مهندسی اولیه برای برداشت رسوبات را پوشش داده و علاوه بر آن، این مدل قابلیت شناسایی مکان‌های مناسبت‌تر دیگر را هم دارا می‌باشد. براین اساس استفاده توامان از قضاوت‌های کارشناسی و به‌کارگیری مدل هیدرولیکی فوق، نقش مهم و موثری در شناسایی دقیق مکان‌های مناسب به‌منظور برداشت رسوبات خواهد داشت. نتایج حاصل از بررسی‌های این تحقیق با نتایج به‌دست آمده از بررسی راندمان تله‌اندازی و محاسبه کل رسوبات ورودی به مخزن سد کرخه صفر که به‌وسیله قمشی و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از مدل کامپیوتری HEC-6 صورت گرفته بود، مشخص نمود که محاسبه و تعیین حجم متوسط رسوب خروجی از رودخانه‌ها و حجم رسوبات ورودی به مخزن سدها، مشروط به تدقیق شرایط مرزی و اولیه مدل، امکان‌پذیر بوده و نتایج مناسبی به‌دست می‌دهد.

در راستای تحقیق انجام شده و با توجه به نتایج محاسبات و تحلیل‌های صورت گرفته امکان احداث کارگاه‌های برداشت شن و ماسه و فعالیت‌های مختلف عمرانی در حاشیه و محدوده سیلاب دشت رودخانه به این شرح قابل جمع‌بندی است. براساس روند تغییرات منحنی رسوب‌گذاری در طول رودخانه، مناسب‌ترین مناطق برای برداشت رسوبات، احداث سازه‌های آب‌گیری و یا احداث پل قابل شناسایی می‌باشند. در نواحی که تغییرات منحنی رسوب‌گذاری، دارای سیرصعودی می‌باشد، به مفهوم این است که بخش مدنظر تحت تاثیر فرسایش بوده و برداشت رسوبات در این ناحیه قابل توصیه نمی‌باشد. اما این محدوده از رودخانه، مناسب‌ترین قسمت برای احداث سازه‌های آب‌گیری و یا احداث ایستگاه پمپاژ می‌باشد. در بخش‌هایی از منحنی تغییرات رسوب‌گذاری که شیب منحنی نسبتاً کم‌تر می‌شود از آن‌جائی که پدیده فرسایش و یا رسوب‌گذاری کم‌تر اتفاق می‌افتد، می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین محدوده برای احداث سازه‌های تقاطعی نظیر پل اقدام شود.

در بخش‌هایی از منحنی تغییرات رسوب‌گذاری که شیب منحنی افقی می‌شود، به‌عنوان مناسب‌ترین محدوده برای برداشت رسوبات توصیه می‌شود. افقی شدن منحنی‌مدنظر، بدین مفهوم می‌باشد که هر مقدار رسوبی که از بالادست وارد می‌شود، در حال انتقال بوده و براین اساس می‌تواند مورد برداشت قرار گیرد. از آن‌جایی‌که مقادیر حجم آورد رسوب در هر یک از مقاطع عرضی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS قابل محاسبه می‌باشد، با توجه به حداکثر عمق مجاز برداشت مصالح و هم‌چنین، درنظرگیری عرض رودخانه و حریم مربوط به آن، طول و کروکی محل برداشت و احداث کارگاه‌های برداشت شن و ماسه در بازه‌های مختلف از رودخانه قابل تعیین و شناسایی می‌باشد. محاسبه و تعیین حجم متوسط رسوب خروجی از رودخانه‌ها در مقاطع مختلف با استفاده از مدل HEC-RAS امکان‌پذیر است.

تعیین و استخراج میزان تغییرات در تراز کف هر یک از مقاطع رودخانه در شرایط قبل و پس از شبیه‌سازی رسوب و تعیین متوسط عمق برداشت رسوب از رودخانه قابل انجام می‌باشد. امکان تعیین مناسب‌ترین دوره زمانی برداشت رسوب از رودخانه‌ها، مطابق با روند تغییرات رسوب‌گذاری در رودخانه، با استفاده از مدل HEC-RAS میسر می‌باشد. استفاده توامان از قضاوت‌های کارشناسی و به‌کارگیری مدل‌های هیدرولیکی، نقش مهم و موثری در شناسایی دقیق مکان‌های مناسب برای برداشت رسوبات خواهند داشت. براین اساس، مدل هیدرولیکی HEC-RAS، حدود ۶۳ درصد قضاوت‌های مهندسی انجام شده به‌منظور برداشت رسوبات را پوشش داده و علاوه بر آن، این مدل قابلیت شناسایی مکان‌های مناسبت‌تر دیگر را نیز دارا می‌باشد. امکان انتقال و تدقیق نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی HEC-RAS، به نرم‌افزارهای GIS، به‌منظور ارائه مناسب‌تر نتایج و خروجی‌ها، به‌منظور برداشت رسوبات رودخانه‌ای میسر می‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. قمشی، م. و ع. صدق‌آمیز. ۱۳۸۵. پیش‌بینی وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه صفر. مجله علمی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، ۲۹(۳): ۳۶-۲۳.

2. Asada, H. 1993. Prediction of sediment bed profile in reservoir and river bed formation: A practical method and some examples of calculation. Proceedings of 11th International Congress on Large Dams, Madrid, Spain, 1: 381-402.
3. Haghiabi, A.H., M. Ghomeshi and S.M. Kashefipour. 2004. On hydrodynamics of a density current on an incline. Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 2(1): 1-8.
4. Holly, F.M., J.C. Yang, P. Schwarz, J. Schaefer, S.H. Hsu and R. Einhelling. 1990. Charima: Numerical simulation of unsteady water and sediment movement in multiply connected networks of mobile-bed channels. Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, 203 pages.
5. Lopez, R. and J. Barragan. 2008. Equivalent roughness of gravel-bed rivers. Journal of Hydraulic Engineering, 134(6): 847–851.
6. Us Army Corps of Engineers. 1993. HEC-6: Scour and deposition in rivers and reservoirs user's manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (Software for Simulation of Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs), 164 pages.
7. United States Bureau of Reclamation. 2006. Erosion and sedimentation manual. Technical service center, sedimentation and river hydraulics group, Denver, Colorado, USA, 524 pages.
8. Yang, C.T. and F.J. Simoes. 2005. Wash load and bed-material load transport in the yellow river. Journal of Hydraulic Engineering, 131(5): 413-418.

Development of technical methods to locate the appropriate reaches for river sand mining

Seyed Ahmad Hosseini[1]**,** Scientific Board, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran
Nasrolah Javaheri, PhD, AB Omran Pardisan Consulting Engineers, Iran
Mehdi Habibi, Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran

Received: 10 October 2011 Accepted: 16 April 2012

Abstract

This study investigated the status of sediment transport and deposition in Khar-rud River, Qazvin province, Iran. The aim was to determine the possibility of construction of sand and gravel mining workshops in the margin of Khar-rud Flood-plain. Here with calculating sediment transport rate and specifying the distribution of sediment deposits in various parts of the river, an applied program for sand harvesting from the river bed, is developed. In this project, after preparing the basic information, such as information about river geometrical shape, roughness coefficients of different sections, information related to size gradation of suspended sediments and bed material, river hydrology data and boundary conditions of downstream hydraulic system, using HEC-RAS model, sediment loads and its distribution along the river was simulated. Simulation was done based on classified data from daily flow discharges during a 37-year period. After calibrating the HEC-RAS model and selecting Yang sediment transport equation as the closest relationship to the sedimentary data measured by regional Hydrometric stations, the average volume of sediment yield from the river was estimated 1.75 million tons per year. Finally, considering the changes in the river bed elevation for each cross-section, the amount of sediment passing during simulated 37-year was calculated. Using the results of the model and sedimentation changes along the study reaches, the volume of sediment transport in each river cross section, the river width and its private region and considering the maximum permissible depth of bed-material removal equal to 1 m, the most suitable mining length and period in the different reaches of river was determined, discussed and showed in ARC-GIS environment. Based on simulation results, the average depth of sand which can be taken safely from the river-bed was estimated to be 40cm and the most suitable period of time for sand mining along the river was recommended from January to May. It was determined that HEC_RAS hydraulic model, covers about %63 of initial engineering judgments for the amount and location of sand mining.

Key words: Mathematical model, Sand mining, Sediment, Simulation, ArcGIS, HEC-RAS

[1] Corresponding author: sahosseini@yahoo.com