



شماره ۱۰۴، پاییز ۱۳۹۳

ژئوشیمی آب و نخبنداری
(پژوهش و سازندگی)

انتخاب مناسب‌ترین معادلات انتقال رسوب با مدل عددی

HEC-RAS

(مطالعه موردی: رودخانه قره‌چای استان مرکزی)

• امیر مرادی‌نژاد

سازمان آموزش و تحقیقات وزارت جهاد کشاورزی (نویسنده مسئول)

• امیر حمزه حقی‌آبی

دانشگاه لرستان

• حسن ترابی

دانشگاه لرستان

تاریخ دریافت: مرداد ماه ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: اسفند ماه ۱۳۹۳

Email: amir_24619@yahoo.com

چکیده

تخمین میزان بار رسوب کل و یا میزان انتقال آن برای استفاده بسیاری از کاربری‌ها و پروژه‌های منابع آب حیاتی است. لذا هدف این تحقیق بر آورد میزان رسوبات و محاسبه توان حمل رودخانه قره‌چای استان مرکزی از روش‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌باشد. برای این پژوهش بازه‌ای از رودخانه به طول ۳۱ کیلومتر انتخاب شد. سپس اطلاعات پایه نظیر مقاطع عرضی، شکل هندسی مسیر، ضرایب زبری بستر و کناره‌ها، جنس و دانه‌بندی رسوبات معلق و کف، تهیه شد. همچنین دبی رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS بر آورد گردید. نتایج نشان داد که معادلات انگلوند-هانسن و توفالتی در سطح ۵ درصد خطا فاقد اختلاف معنی دار با داده‌های اندازه‌گیری شده هستند. روش‌های میر-پیترو و مولر، ویلکوکس، ایگر-وایت و لارسن با مقادیر مشاهداتی اختلاف زیادی دارند و تفاوت آنها معنی‌دار است ($p > 0.05$). همچنین ظرفیت انتقال رسوب از بالا به پایین به خاطر افزایش شیب طولی، افزایش می‌یابد، به طوری که در یک سوم انتهایی بازه بیشترین تغییرات وجود دارد.

کلمات کلیدی: فرسایش، انتقال رسوب، تغییر فرم بستر، رودخانه قره‌چای، HEC-RAS 4.1.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 104 pp: 123-131

Selecting the most appropriate sediment transport equations by numerical model HEC-RAS.4.1 (Case Study: Markazi Province Qara-chai River)

By: A. Moradinezhad, Agricultural Research, Education and Extension Organization (Corresponding Author). A. H. Haghiabi, Lorestan University. H. Torabi, Lorestan University.

Estimation of total sediment load or transmission rate is one of the critical approaches in the field of water resources projects. The aim of this study is to estimate the amount of sediments and calculation of transport power of Qara-Chai River in the Markazi Province through different Methods. For this research a rich of 31 km was selected. After the basic information such as cross sections, geometrical features of path, roughness coefficients of, bed and laterals, suspended and bed sediment genus and grain size were extracted. Also, sediment discharge was estimated by HEC-RAS model. The results showed that equations of Englund-Hansen and Tuffalti don't have significant difference with measured data at 5 percent level error. Meyer-Peter and Muller, Wilcocks, Acker-White and Laursen methods significantly differed which those observed ($P < 0.05$). So sediment transport capacity increased from up to down because of increasing longitudinal slope so that in the final one third the highest changes exist.

Keywords: Erosion, Sediment transport, bed deformation, Qara-Chai River, HEC-RAS 4.1

مقدمه

رودخانه به عنوان سیستمی پویا، به طور پیوسته مکان و خصوصیات خود را برحسب زمان، عوامل طبیعی و گاه در اثر دخالت بشر تغییر می‌دهد. شناخت وضعیت جریان و رسوب و تحلیل پارامترهای هیدرولیکی جریان و رسوب در شرایط مختلف، در نهایت مبنای بررسی رفتار رودخانه‌ها و تصمیم‌گیری در خصوص اقدامات مهندسی و تأثیرگذار بر آنها است. مطالعات در زمینه فرسایش و رسوب در رودخانه‌ها به طور معمول دارای پیچیدگی‌های فراوانی بوده و استفاده عملی از نتایج مطالعات مستلزم دقت و توجه زیادی است. لذا لازم است قبل از اقدام به طراحی و اجرای پروژه‌های مهندسی بر روی رودخانه‌ها از چگونگی عملکرد آنها اطمینان حاصل شود. با توجه به پیچیدگی مسائل هیدرولیکی و رسوبی در رودخانه‌ها امکان حل معادلات به روش تحلیلی ممکن نیست و معمولاً از روش‌های عددی استفاده می‌شود. تحقیقات متعددی با استفاده از نسخه‌های مختلف مدل HEC-RAS به منظور مطالعه فرسایش و رسوب رودخانه‌ها و مخازن سدها انجام پذیرفته است. از جمله آنها مطالعات کانفیلد و همکاران (۲۰۰۵) می‌باشد که با استفاده از مدل HEC-RAS آبشستگی و تجمع رسوب در رودخانه سرو کرانده را مدل‌سازی نمودند [۹]. گیبسون و همکاران (۲۰۰۶) قابلیت مدل HEC-RAS را برای محاسبات انتقال رسوب رودخانه مورد بررسی قرار دادند و نتایج این مدل را با مدل HEC-6 مقایسه کردند. ایشان نتیجه گرفتند مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی‌ها به خوبی عمل نموده اما نتایج این مدل در مقایسه با HEC-6 در شرایط خاصی، کمی متفاوت بوده که به دلیل تفاوت در روابط هیدرولیکی مدل می‌باشد [۱۳]. جانسون و همکاران (۱۹۹۹) مدل HEC-RAS را

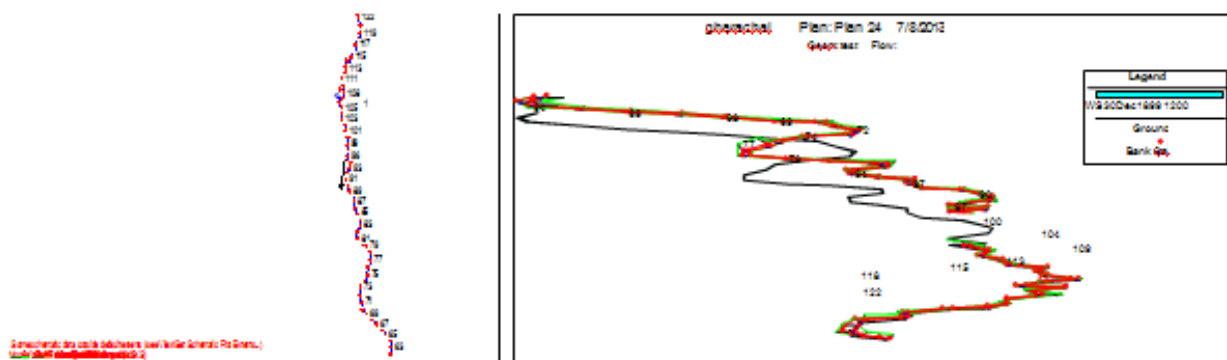
برای پیش بینی و تعیین حد اراضی مرطوب در آمریکا بکار بردند آنها با استفاده از این مدل پروفیل سطح آب رودخانه را ترسیم نمودند و معتقدند که روش فوق یک روش معتبر برای تعیین کمیت اثرات انحراف آب روی اراضی مرطوب کناره رودخانه‌ها می‌باشد. آندام برای مقایسه رژیم رودخانه‌های جنگلی و خارج از جنگل با استفاده از مدل هیدرولیکی RAS-HEC و الحاقیه GeoRAS-HEC تغییرات سرعت و عدد فرود را در این دو نوع رودخانه مورد بررسی قرار داد و تأثیر پوشش گیاهی بر رژیم و رفتار هیدرولیکی جریان را مورد مقایسه قرار داد و نتیجه گرفت که استفاده از مدل هیدرولیکی RAS-HEC می‌تواند مقادیر عددی مناسبی را جهت مطالعه رژیم و سایر خصوصیات هیدرولیکی جریان رودخانه در اختیار محققین قرار دهد [۱۲]. همچنین در مورد بررسی هیدرولیک جریان در رودخانه مطالعات مختلفی با استفاده از مدل HEC-RAS انجام شده که برای مثال می‌توان به مطالعات پاپنبرگ و همکاران [۱۲]، کوک و مروده (۲۰۰۹) اشاره نمود [۱۱]. محققین مختلفی در داخل کشور نیز از این مدل برای بررسی انتقال رسوب در رودخانه‌ها و مخازن سدها استفاده نموده‌اند. برای نمونه بهرنگی و همکاران (۱۳۸۸) با شبیه‌سازی مخزن سد لتیان در مدل عددی HEC-RAS میزان دقت و خطای مدل را برای سه معیار مهم و ضروری رسوب‌گذاری یعنی سرعت پیشروی دلتا، میزان نشست رسوبات در نقاط مختلف مخزن و نرخ بالا آمدن کف مخزن در مجاور بدنه سد و دریچه‌ها مورد بررسی قرار دادند. در نهایت، با انتخاب تابع و روش مناسب نحوه پیشرفت رسوبات در مخزن سد در سال ۱۴۰۰ پیش بینی شد [۳]. امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی به بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین‌دره با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند

وارد دریاچه نمک می‌شود. محدوده مورد مطالعه رودخانه از محل شازند در بالادست تا پایین پل دو آب در مختصات به طول جغرافیایی $49^{\circ} 24'$ و عرض $36^{\circ} 2'$ شروع و تا مختصات به طول جغرافیایی 49° و عرض $36^{\circ} 3'$ ادامه می‌یابد شکل (۱). در این تحقیق بازه‌ای به طول ۳۱ کیلومتر از محل ایستگاه هیدرومتری پل دو آب (که نشان دهنده نماینده واقعی از رودخانه و سیلاب دشت‌های آن است و دارای اطلاعات اندازه‌گیری شده مورد نیاز می‌باشد)، با استفاده از مدل HEC-RAS شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت. ضریب زبری مانینگ رودخانه با توجه به بازدیدها و جدول‌های معتبر تهیه شده توسط دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه تعیین شد [۷]. در قسمت اطلاعات رسوبی با توجه به تغییرات زیاد مواد بستر رودخانه در طول مسیر از نتایج حاصل از ۲۶ نمونه آزمایش دانه‌بندی بستر در مقاطع مختلف جهت اجرای مدل استفاده گردیده و منحنی سنج رسوب در ایستگاه پل دو آب نیز به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شد. در نهایت برای بررسی وضعیت فرسایش، رسوب‌گذاری و تعادل رودخانه از معیار هالستروم (که در آن سرعت جریان در مقابل اندازه ذره رسم شده است) با استفاده از ۱۹ نمونه رسوب بستر اخذ شده در طول رودخانه استفاده گردید. برای بدست آوردن نمونه‌ها ابتدا توسط کارشناس مجرب فاصله نمونه‌برداری‌ها با لحاظ کردن مشخصات بستر، تعیین و گمانه‌هایی در بستر فعال رودخانه حفر شد. سپس برای هر گمانه از دو عمق (۰/۵- و ۱-۰/۵) متری نمونه‌برداری گردیده و نسبت به تعیین منحنی دانه‌بندی آنها اقدام شد. به منظور بررسی دقت مدل در برآورد انتقال رسوب در رودخانه قره‌چای از آمار اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری پل دو آب استفاده شد. رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری پل دو آب ترسیم گردید. سپس رودخانه قره‌چای بر اساس شیب و توپوگرافی به سه بازه تقسیم بندی شد. بازه اول (از ابتدای بالادست رودخانه تا کیلومتر ۱۰ با شیب $0/000349$)، بازه میانی (از کیلومتر ۱۰ تا کیلومتر ۲۰ با شیب $0/000545$) و بازه انتهایی (از کیلومتر ۲۰ تا کیلومتر ۳۱ با شیب $0/000747$). مقایسه میانگین‌ها از روش آزمون آماری لون (Leven's Test) و محاسبه ضریب F فیشر انجام شد.

و نتیجه گرفتند که در بین معادلات انتقال رسوب، تابع لارسن (کولپند) در این رودخانه نسبت به سایر توابع انتقال رسوب، برآورد بهتری دارد [۲]. همچنین پیرو و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی نشان دادند که حجم متوسط رسوب خروجی از رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS به خوبی قابل محاسبه می‌باشد [۴]. اسدی و همکاران (۱۳۹۰) نشان دادند که از بین معادلات انتقال رسوب موجود در مدل HEC-RAS معادله میر-پیتر-مولر، در رودخانه تالار، بیشترین تطابق را با واقعیت دارد و می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات مقاطع در این رودخانه مورد استفاده قرار گیرد [۱]. وروانی و همکاران (۱۳۸۶) نشان دادند که در ایستگاه پل دو آب رودخانه قره‌چای بار معلق در حدود ۹۵ درصد بار کل رسوب رودخانه است و در این پژوهش هم بار کل بر این مبنا محاسبه شد [۸]. حسینی (۱۳۸۹) با استفاده از مدل HEC-RAS، آورد رسوبی رودخانه خررود و ابهررود و نحوه توزیع آن در طول مسیر رودخانه را مورد بررسی قرار داد، با توجه به نتایج مدل و بر اساس روند تغییرات منحنی رسوب‌گذاری در طول رودخانه مناسب‌ترین مناطق برای برداشت رسوبات در طول مسیر رودخانه شناسایی شد. وی با تحلیل آماری صورت گرفته، نشان داد که مدل هیدرولیکی HEC-RAS، حدود ۶۳ درصد قضاوت‌های مهندسی اولیه انجام شده برای برداشت رسوبات را پوشش می‌دهد [۵]. بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تا به حال هیچ‌گونه پژوهشی به منظور برآورد دبی انتقال رسوب رودخانه قره‌چای انجام نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر از مدل ریاضی HEC-RAS استفاده شد و با استفاده از داده‌های صحرایی اندازه‌گیری شده توانایی مدل مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت و تغییرات برخی پارامترهای رسوبی در رودخانه قره‌چای که یکی از رودخانه‌های دائمی استان مرکزی است مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز رودخانه قره‌چای در استان‌های مرکزی، همدان و قم واقع شده و مهمترین رودخانه آن قره‌چای از شهرستان‌های آستانه، شازند، اراک، همدان، تفرش، ساوه و قم می‌گذرد. این رودخانه از ارتفاعات شازند سرچشمه گرفته و به سمت شمال جریان پیدا می‌کند و در جهت غرب به شرق تا دریاچه نمک امتداد یافته و مازاد آب آن



شکل ۱- پلان رودخانه قره چای

جدول ۱- مشخصات توابع به کار رفته در نسخه ۴ نرم افزار HEC-RAS

معادله انتقال رسوب	سال	نحوه استخراج	دانه بندی	توضیحات	شرایط استفاده از رابطه
ایکروز- وایت	۱۹۷۳	آزمایشگاهی	ماسه - شن	انتقال بار معلق (ریز دانه) تابعی از نوسانات آشفتگی جریان آب می باشد. انتقال بار بستر (درشت دانه) تابعی از تنش برشی اعمال شده بر روی رسوبات می باشد.	$0.00006 < s < 1, 0.0037 < G_s < 2.7$ $46 < T < 89 \text{ degreesF}$ $0.01 < D < 1.4 \text{ft}$, $0.23 < w < 4 \text{ft}$
انگلند- هانسن	۱۹۶۷	آزمایشگاهی	ماسه	برای رودخانه های ماسه ای که دارای بار معلق قابل توجه دارند کاربرد دارد	$0.19 < d < 0.93 \text{mm}$, $0.65 < v < 6.34 \text{ (fps)}$ $0.000055 < s < 0.019$, $45 < T < 93 \text{ egressF}$ $0.19 < D < 1.33 \text{ft}$
لارسن (کوپلند)	۱۹۸۹	آزمایشگاهی	سیلت - شن	برای رودخانه هایی که دارای بار شنی دارند کاربرد دارد	$0.011 < d < 29 \text{mm}$, $0.7 < v < 9.4 \text{ (fps)}$ $0.00025 < s < 0.25$, $0.025 < w < 6.6 \text{ft}$ $46 < T < 83 \text{ degreesF}$ $0.01 < D < 1.4 \text{ft}$
میر- پیتز و مولر	۱۹۴۸	آزمایشگاهی	ماسه - شن	برای رودخانه هایی که دارای رسوبات درشت دانه اند کاربرد دارد	$0.04 < d < 7 \text{mm}$, $1.2 < v < 9.4 \text{ (fps)}$ $0.0004 < s < 46, 0.02 < T < 89 \text{ degreesF}$ $0.03 < D < 3.9 \text{ft}, 0.5 < w < 6.6 \text{ft}$
توفالتی	۱۹۶۸	آزمایشگاهی	ماسه	برآورد دبی رسوب بر اساس محاسبه ستون های عمودی غلظت (تقسیم بندی آن به ۴ ناحیه) صورت می گیرد	$0.062 < d < 4 \text{mm}$, $0.7 < v < 7.8 \text{ (fps)}$ $0.000002 < s < 63$, $0.0011 < w < 3640 \text{ft}$ $32 < T < 9 \text{ degreesF}$ $0.095 < D < 0.76 \text{ft}$,
یانگ	۱۹۸۴ ۱۹۷۳	آزمایشگاهی	ماسه - شن	برآورد دبی رسوب بر اساس قدرت جریان استوار است	$0.15 < d < 1.7 \text{mm}$, $0.8 < v < 6.4 \text{ (fps)}$ $0.000043 < s < 0.04, 0.028 < D < 50 \text{ft}$ $32 < T < 94 \text{ degreesF}$, $0.23 < w < 4 \text{ft}$
ویلکوکس	۲۰۰۱	آزمایشگاهی	ماسه - شن $< 2 \text{mm}$ شن	برای بار بستر و پتانسیل حمل و نقل شن به کار می رود	---

مدل سازی هیدرولیک جریان رودخانه

به منظور استفاده از این مدل برای شبیه سازی هیدرولیک جریان و رسوب، اطلاعات رودخانه شامل داده های هندسی، هیدرولیکی و رسوبی بکار گرفته شد. در بخش هندسی پلان عمومی رودخانه، تعداد ۶۲ مقطع عرضی در طول ۳۱ کیلومتر رودخانه تهیه و به مدل معرفی گردید. به دلیل اینکه دبی طراحی در مناطق کشاورزی با دوره بازگشت ۲۵ ساله می باشد، دبی بیشینه لحظه ای متوسط با دوره بازگشت ۲۵ ساله نیز برابر با ۱۳۳ متر مکعب بر ثانیه وارد مدل گردید. برای اجرای مدل نیاز به معرفی شرایط مرزی در بالا دست و پایین دست بود که بدین منظور برای شرایط مرزی بالادست از عمق نرمال و برای شرایط مرزی پایین دست از رابطه دبی-اشل ایستگاه هیدرومتری پل دواب استفاده گردید. پس از شبیه سازی، تغییرات پروفیل طولی تراز انرژی جریان رودخانه، میزان سرعت، تنش برشی، قدرت جریان، عدد فرود، ظرفیت حمل رسوب در مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به مواردی شامل هیدرولیک رسوب، مقایسه خروجی های مدل با داده های اندازه گیری شده در مقطع پل دواب پرداخته شد.

مدل سازی هیدرولیک رسوب رودخانه

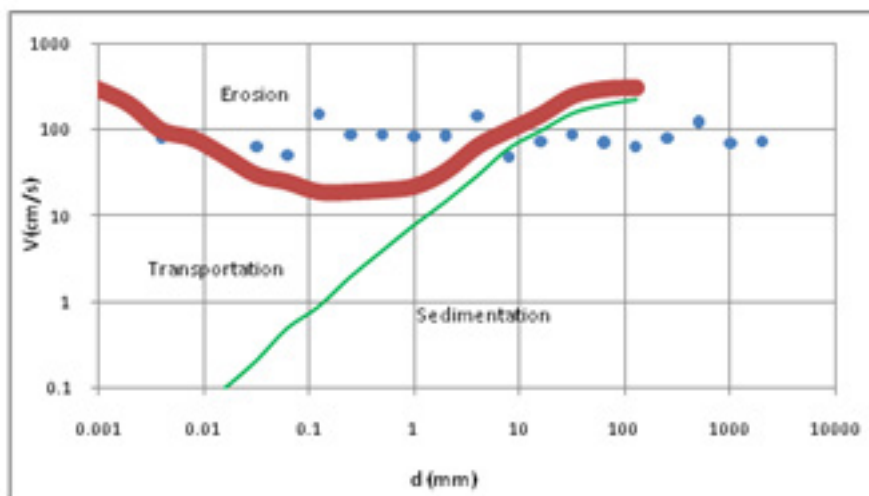
به منظور ورود اطلاعات مربوط به مواد رسوبی، ابتدا در طول رودخانه نمونه گیری از رسوبات بستر انجام و پس از تعیین دانه بندی، به مدل معرفی شدند (شکل ۲). شرط مرزی رسوب بصورت یک منحنی سنج رسوب، که ارتباط بین دبی جریان و دبی رسوب است برای مدل تعریف شد. از رابطه رابی در تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات استفاده شد [۱۷]. همچنین ضرایب همگرایی و واگرایی برای ارزیابی افت انرژی، که به علت وجود بازشدگی و تنگ شدگی در جریان رخ می دهد مورد استفاده قرار گرفتند. این ضرایب در تغییرات بار سرعت از یک مقطع عرضی تا مقطع عرضی بعدی ضرب می شوند تا افت های بین آن مقاطع در محاسبات لحاظ شود. با توجه به تغییرات طبیعی مقاطع رودخانه قره-چای و با توجه به مقادیر ضرایب همگرایی (Cc) و واگرایی (Ce) مقطع که برای شرایط مختلف به وسیله انجمن مهندسان ارتش آمریکا پیشنهاد شده است [۱۶]، در مطالعه حاضر ضرایب همگرایی و واگرایی به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ در نظر گرفته شد. افت انرژی در طولی مسیر رودخانه که ناشی از زبری بوده و نقش مؤثری در تراز آب و سرعت جریان در هر مقطع

متمایز شده‌اند. همچنان‌که بیان شد برای تحقیق حاضر، از ۱۹ نمونه رسوب اخذ شده در طول رودخانه استفاده گردید. ترسیم ۱۹ نقطه بر روی منحنی هالستروم نشان می‌دهد، در بعضی از مقاطع وضعیت جریان به گونه‌ای است که رودخانه در وضعیت فرسایش قرار دارد و در بعضی مقاطع در حال رسوب‌گذاری می‌باشد.

دارد نیز لحاظ گردید.

نتایج و بحث

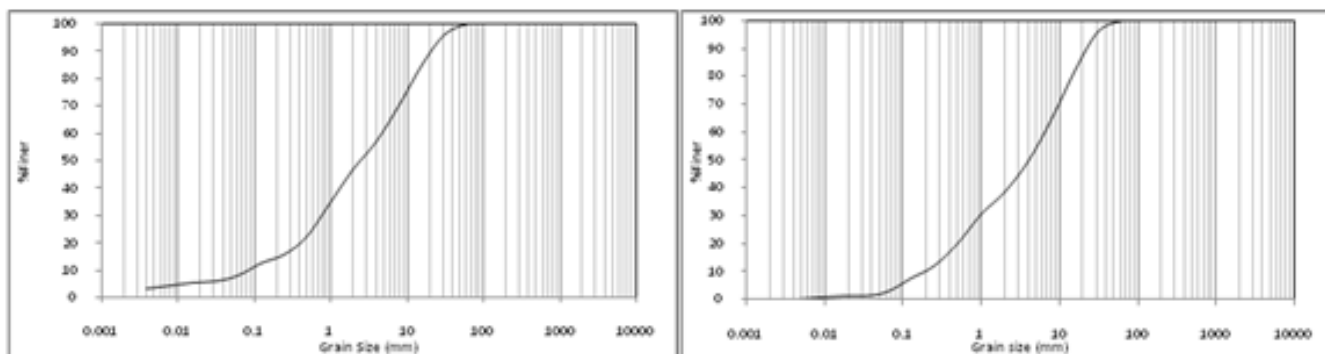
بررسی وضعیت فرسایش، رسوب‌گذاری و تعادل رودخانه قره‌چای شکل (۲) نقاط ترسیم شده را بر روی منحنی هالستروم نشان می‌دهد. در این منحنی سه ناحیه فرسایش، رسوب‌گذاری و تعادل از یکدیگر



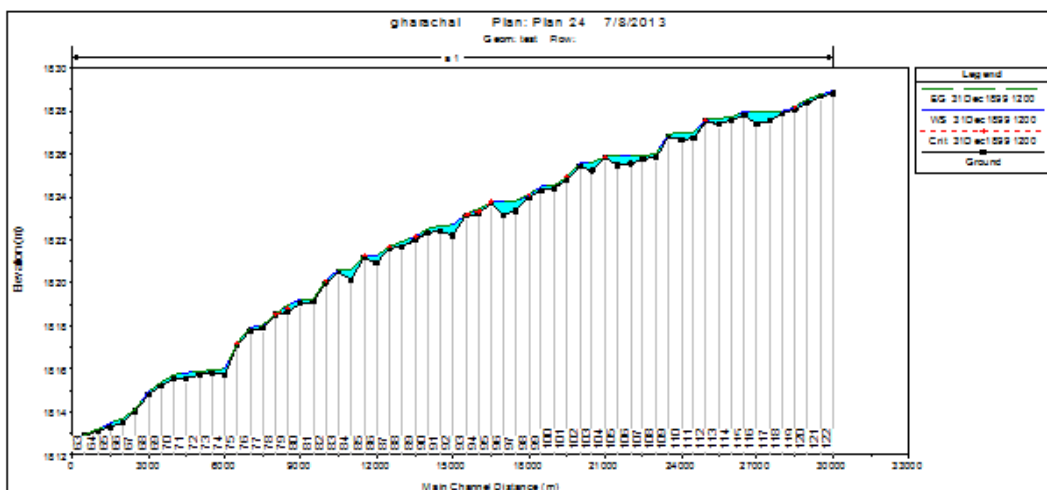
شکل ۲- وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری دانه‌های رسوبی در رودخانه قره-چای با استفاده از معیار هالستروم

پارامترها در طول مسیر تغییرات قابل تحلیلی ندارند و تقریباً به صورت یکنواخت می‌باشند. در جدول (۲) نیز مقادیر حداکثر، متوسط و حداقل پارامترهای شیب انرژی، سطح مقطع، عرض فوقانی جریان، قدرت جریان، سرعت جریان، عدد فرود و تنش برشی را در طول رودخانه برای دبی با دور برگشت ۲۵ ساله درج شده است. با توجه به جدول فوق شیب انرژی، قدرت جریان، عدد فرود و تنش برشی با حرکت از بازه بالا به سمت بازه پایین افزایش یافته‌اند.

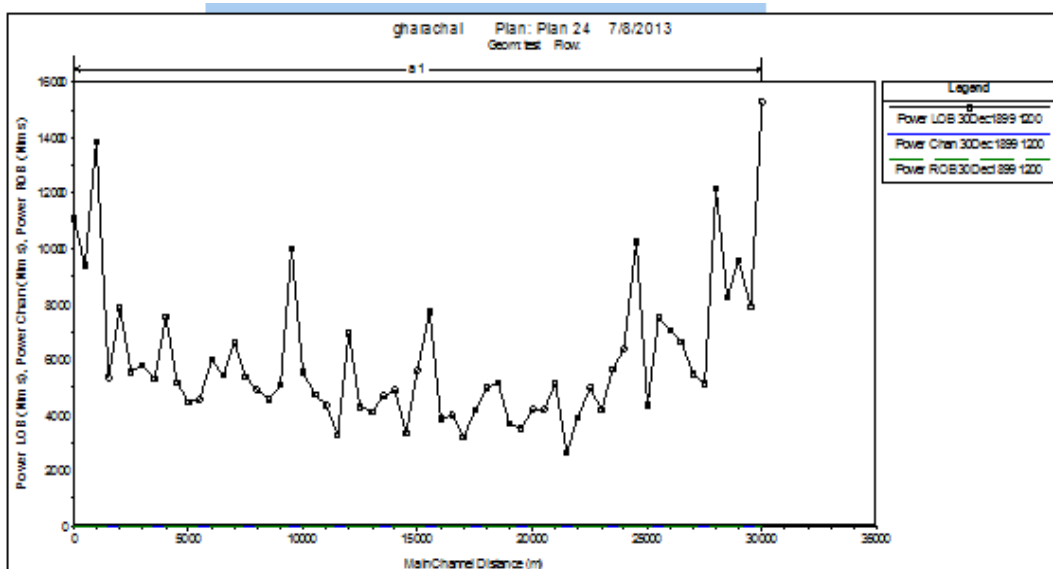
شکل (۳) دو نمونه منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی بستر معرفی شده به مدل و شکل (۴) نیمرخ طولی بازه رودخانه مورد مطالعه در مدل HEC-RAS را نشان می‌دهد. در این شکل حدود بازه‌ها و شیب نشان داده شده است. شکل (۵) پروفیل تنش و قدرت جریان در طول مسیر و شکل (۶) عدد فرود، سرعت جریان، ظرفیت انتقال رسوب، قدرت جریان، عرض فوقانی سطح آب و تنش برشی را در مقاطع مختلف رودخانه نشان می‌دهد. از شکل‌های فوق نتیجه می‌شود که



شکل ۳- دو نمونه منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی بستر معرفی شده به مدل



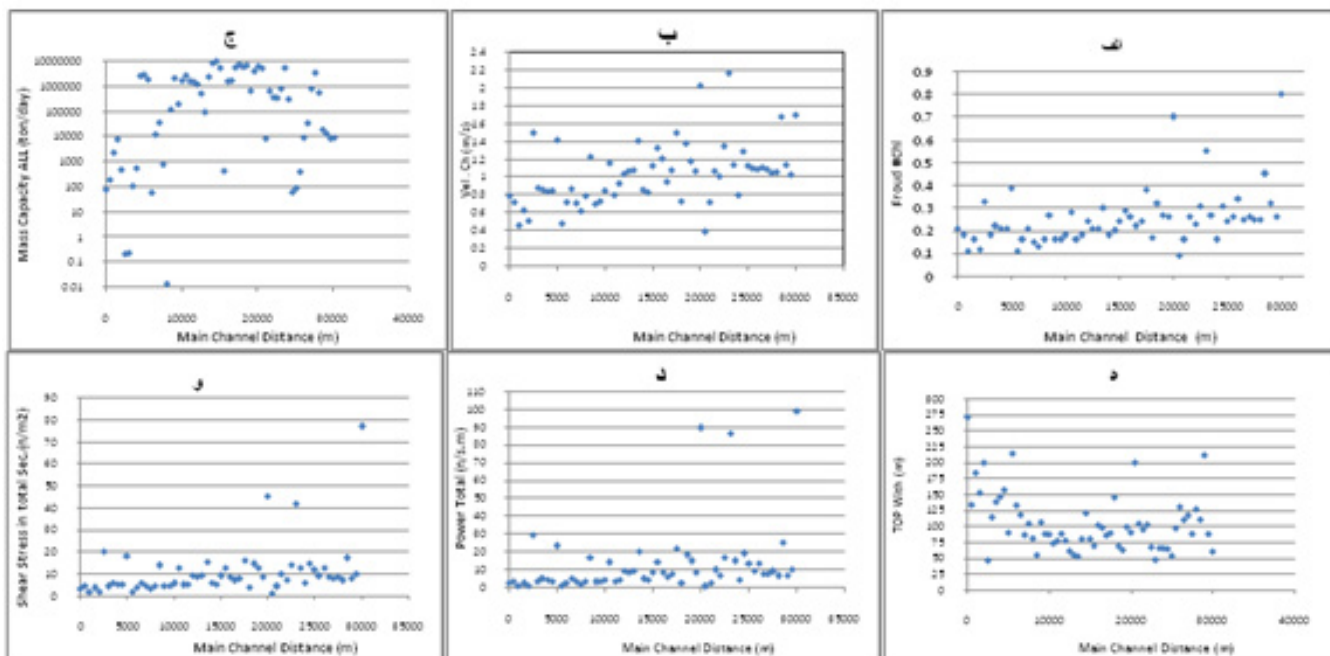
شکل ۴- پروفیل طولی رودخانه قره‌چای در بازه مورد مطالعه



شکل ۵- پروفیل تنش و قدرت جریان در طول مسیر

جدول ۲- مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط پارامترها در مقاطع مختلف رودخانه

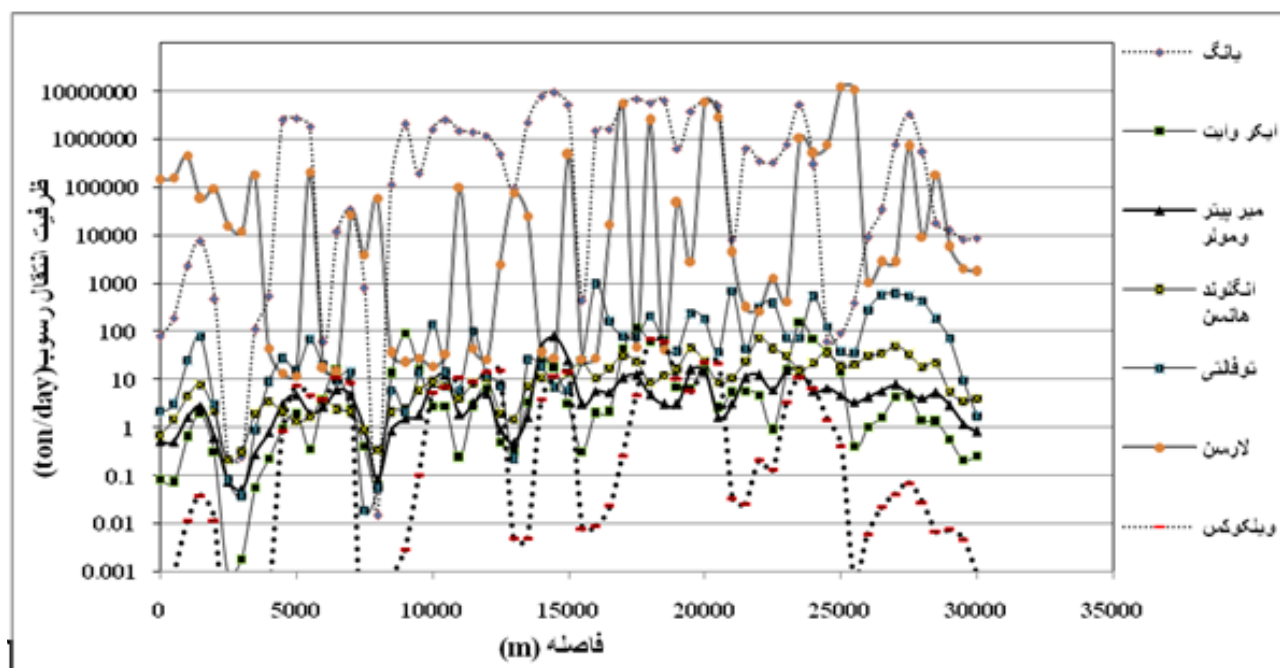
پارامترها	شیب انرژی	سرعت	مساحت مقطع	عرض فوقانی	عدد فرود	قدرت جریان	تنش برشی
واحد	(m/m)	(m/s)	m ²	m	-----	(N/m.s)	(N/m ²)
متوسط بازه بالا	۰/۰۰۰۴۱۲	۰/۸۱۷	۱۹۳/۷	۱۲۹/۲۴	۰/۱۹	۵/۷۵	۶/۰۲
متوسط میانی	۰/۰۰۰۸۹	۱/۱۳۸	۱۳۵/۸۲	۸۴/۳۱	۰/۲۶۵	۱۳/۹	۱۱/۱۵
متوسط پایین	۰/۰۰۱۵۰	۱/۱۵۶	۱۳۹	۱۰۰/۶۸	۰/۳۰۱	۱۸/۴۵	۱۴/۵
متوسط کل	۰/۰۰۰۹۲۸	۱/۰۳۳۶۰۷	۱۵۶/۸۰۸۹	۱۰۵/۱۴۵۴	۰/۲۵۱۴۷۵	۱۲/۵۸۷۸۷	۴۸/۱۹۷
حداکثر	۰/۰۱۳۲۲۷	۲/۱۷	۳۷۰/۳	۲۷۱/۱۹	۰/۸	۹۹	۷۷
حد اقل	۰/۰۰۰۰۶۸	۰/۳۹	۴۷/۶۲	۴۶/۹۵	۰/۰۹	۰/۴۴	۱/۲۲



شکل ۶- تغییرات پارامترهای جریان در طول مسیر (الف) عدد فرود، (ب) سرعت متوسط جریان، (ج) ظرفیت انتقال، (د) قدرت جریان، (ه) عرض فوقانی سطح آب، (و) تنش برشی

با انتخاب توابع انتقال رسوب موجود در مدل، مدل HEC – RAS با هفت تابع انتقال رسوب (ایکز - وایت، انگلوند، هانسن، لارسن، کوپلند)، میر - پیتر و مولر، توفالتی، یانگ و ویلکوکس) اجرا شد.

بررسی وضعیت انتقال رسوب کل رودخانه قره‌چای
یکی از قابلیت‌های مدل HEC – RAS برآورد توان انتقال رسوب رودخانه در طول مسیر می‌باشد. برای بازه مورد مطالعه پس از ورود داده‌های جریان شبه غیرماندگار و اطلاعات رسوب کل رودخانه،



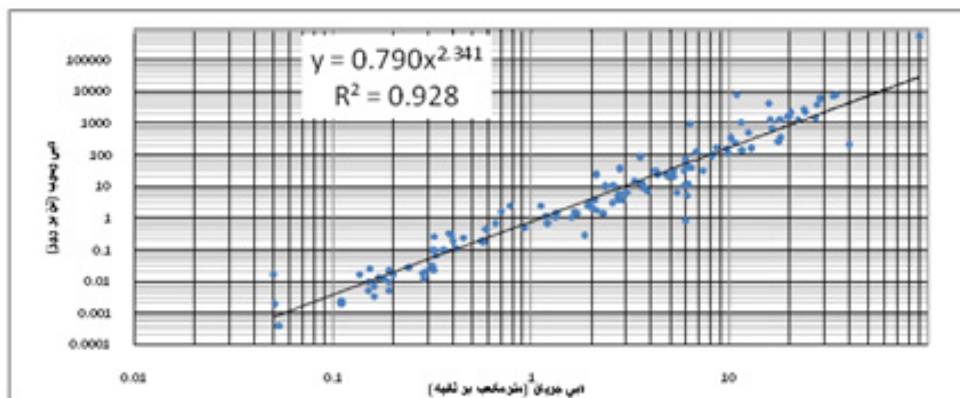
شکل ۷- ظرفیت انتقال رسوب کل در طول مسیر رودخانه از هفت روش مختلف

اختلاف زیادی دارد و این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار است. اما مقایسه روش‌های انگلوند - هانسن و توفالتی نسبت به مقادیر برآوردی از منحنی سنج رسوب نشان می‌دهد که در سطح ۹۵٪ از نظر آماری اختلاف معنی‌دار نیست. همچنین محاسبه شاخص‌های جذر میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق درصد خطای اندازه‌های (MAPE) و میانگین خطای مطلق (MAE) اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که روش‌های انگلوند-هانسن و توفالتی نسبت به سایر روش‌ها به مقادیر محاسباتی نزدیکتر هستند (جدول ۳). البته وجود این اختلاف در بین روش‌های متفاوت دارای دلایل مختلفی است که بیشتر می‌توان به خطای اندازه‌گیری، خطای محاسباتی و ساده‌سازی‌های موجود در ساختار خود مدل‌ها اشاره کرد. همچنین یانگ در این زمینه اظهار می‌دارد کلیه توابع انتقال رسوب و معادلات ارائه شده فقط به منظور تخمین نرخ انتقال رسوب و تعیین غلظت مواد رسوبی در یک حالت موازنه (تعادل) و بدون در نظر گرفتن هیچ‌گونه تهنشین یا فرسایش ارائه شده‌اند. لذا در صورتی که بار شسته شده یا غلظت ذرات ریزدانه بالا باشد، حالت تعادل ذکر شده به هم می‌خورد و این یکی از دلایلی است که بار رسوبی محاسبه شده توسط این توابع با آنچه که به واقع در رودخانه مشاهده می‌شود متفاوت است (که در واقع همان عدم توجه به ذرات ریز معلق است). شکل (۸) رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پل دوآب را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از حل روابط فوق نشان می‌دهد که ظرفیت حمل رسوب در بازه مورد بررسی بر اساس توابع مختلف در نظر گرفته شده متغیر می‌باشد. شکل (۷) نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال رسوب در طول رودخانه با استفاده از رابطه انتقال رسوب لارسن بالاترین مقدار است و بیشینه ظرفیت انتقال رسوب این رودخانه در بازه سوم کیلومتر (۲۰-۳۰)، ۱۲/۱ میلیون تن در روز می‌باشد. محاسبات حاصل از اجرای مدل با دبی ۲۵ ساله و با استفاده از رابطه لارسن (کوپلند) نشان می‌دهد که ظرفیت حمل رودخانه از بالادست به سمت پایین دست افزایش می‌یابد که علت آن افزایش شیب بستر رودخانه و در نتیجه افزایش قدرت جریان برای فرسایش رسوبات بستر می‌باشد. بررسی مقدار تنش برشی در بازه‌های مذکور نیز نشان می‌دهد که از بالا به پایین این مقدار افزایش می‌یابد، بطوریکه مقدار تنش برشی متوسط به ترتیب ۶/۰۲، ۱۱/۵ و ۱۴/۵ نیوتن بر متر مربع می‌باشد. همچنین متناسب با آن مقدار متوسط قدرت جریان نیز افزایش می‌یابد. مقدار متوسط قدرت جریان در بازه ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر با ۵/۷۵، ۱۳/۹ و ۱۸/۴۵ نیوتن بر مترمربع می‌باشد. مقدار شیب انرژی، عدد فرود و سرعت جریان نیز از بالا به پایین افزایش می‌یابد.

مقایسه خروجی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده

مطابق جدول (۳)، مقدار میانگین برآوردی از روش‌های میر-پیتر و مولر، ویلکوکس، یانگ، ایگر-وایت و لارسن با مقادیر مشاهداتی



شکل ۸- رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری پل دوآب

جدول ۳- محاسبه شاخص‌های آماری بار رسوب کل از روش‌های مختلف (تن در روز)

شاخص‌ها	لارسن	ویلکوکس	توفالتی	یانگ	ایگر-وایت	میر-پیتر و مولر	انگلوند-هانسن	مقدار برآوردی
Mean	۲۷۰۹۵۸۱	۴۸۱۳۸۸۶	۴۱۹۳۱۶۱۲	۵۴۳۱۰۱۲	$۳/۳۷ \times 10^{۲۹}$	۳۸۱۸۲۹۴۵۱	۱۰۷۰/۸۰۱۶	۱۵۶۸/۳۴۴
Sig-F	۰/۰۰۷-۱۰/۴۵	۰/۰۳۹-۵/۳۸	۰/۱۵۱-۲/۳۵	۰/۰۰۷-۱۰/۷۷	۰/۰۳۴-۵/۷۶	۰/۰۴۱-۵/۲۴	۰/۲۲۹-۱/۶۰۸	-
RMSE	۴۸۱۴۶۰۴	۲۹۸۰/۰۸۴	۳۸۶۰/۶۰۴	۷۷۱۴۳۸۴	$۸/۹۲ \times 10^{۲۹}$	۲۹۴۴/۲۲۷	۱۷۵۱/۶۱	-
MAPE	۰/۹۹۹۴	۱۹۹۴/۶۷	۰/۶۴۷۴	۰/۹۹۹۸	۱	۲۳/۷۸۰	۰/۶۴۴۳۲	-
MAE	۲۷۰۸۰۱۲	۱۵۶۷/۸۶	۲۶۲۵/۲۶۸	۵۴۲۹۴۴۴	$۳/۳۷ \times 10^{۲۹}$	۱۵۲۹/۵۱	۸۷۵/۴۴	-

