نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶ جلد ۱۱، بهمن - اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۱۱۰-۱۱۰۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 11, Feb.-Mar. 2018, p. 1100-1110

ارزیابی ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه (حوضه فرامرزی زاب)

حمزه بازیان[۱]، مهدی یاسی[۲]*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۲۸

چکیده

مهم‌ترین خصوصیات رودخانه‌ها با مواد بستری درشت‌دانه، توسعه لایه سطحی مقاوم در کف بستر در شرایط جریان‌های کم تا متوسط و افزایش درجه ناپایداری و شدت بار رسوبی در شرایط جریان‌های سیلابی است. هدف اصلی در تحقیق حاضر، ارزیابی تناسب کاربرد روش‌های هیدرومتری و هیدرولیکی در برآورد بار رسوبی (معلق، کف و کل) در سه بازه شاخص با مواد بستری درشت‌دانه در حوضه رودخانه فرامرزی زاب (دربکه، گرژال و بریسو) است. مطالعات میدانی برای تهیه نقشه و مشخصات لایه‌های سطحی و زیرسطحی بستر در سه بازه انجام شده و مدل رایانه‌ای انتقال رسوب و مدل جریان واسنجی شده، استفاده گردید. حساسیت و درجه اطمینان برآورد بار رسوبی از روش‌های مختلف نسبت به خصوصیات فیزیکی مواد بستری در شرایط مختلف جریان، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که احتساب خصوصیات دانه‌بندی لایه زیرسطحی بستر در محاسبات بار رسوبی، برآورد مطمئن‌تری ارایه می‌نماید. برآورد بار معلق از رابطه انشتین (Einstein., 1950) با متوسط خطای نسبی ۹۱٪- در هر سه بازه بهتر بود. با نبود داده‌های بار کف، بر اساس دامنه اعتبار نسبت تجربی بار کف به بار کل در رودخانه‌های بستر درشت‌دانه، ارزیابی بار رسوبی کف به ترتیب از سه رابطه شاکلینچ (Schoklitsch., 1934)، انشتین، و پارکر (Parker., 1990)؛ و برآورد بار رسوبی کل به ترتیب از سه رابطه انگلوند و هانسن (Engelund and Hansen., 1967)، کریم و کندی (Karim and Kennedy., 1990)، و انشتین نتایج قابل اعتمادتری داشتند.

واژه‌های کلیدی: انتقال رسوب، رودخانه‌های بستر درشت‌دانه، رود لاوین، رود زاب، مدل STM

مقدمه

رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه (Coarse-bed rivers) با شیب نسبتا زیاد، عمق کم و عرض زیاد عموما در حوضه میانی یا مناطق نیمه‌کوهستانی قرار دارند. در این رودخانه‌ها، توان جریان و پتانسیل حمل رسوبات ـ به‌خصوص بار کف ـ بالا بوده و برای اتلاف انرژی مازاد، جریان در آن‌ها تمایل به گستردگی دارد. ته‌نشست مواد درشت‌دانه بار کف در بازه‌های پایین‌دست، سبب توسعه بارها و جزایر رسوبی در بستر عریض و کم‌عمق رودخانه گردیده و شرایط جریانات چند رشته‌ای و شریانی شدن رودخانه را پدید می‌آورد (Przedwojski et al., 1995). از خصوصیات بارز این رودخانه‌ها، ته‌نشست مواد درشت‌دانه و غیرچسبنده (شن، قلوه سنگ و تخته سنگ) در کف و توسعه لایه سطحی بستر است. لایه سطحی بستر (Surface layer) مانند یک پوشش محافظ (Armor layer) با ضخامت کم‌تر بر روی لایه زیرسطحی (Subsurface layer) که دانه‌بندی ریزتر و یکنواخت‌تر و ضخامت بیش‌تری دارد، قرار می‌گیرد. لایه محافظ سطحی در شرایط جریانات کم به‌صورت هموار، صاف و پایدار بوده؛ ولی در شرایط جریان سیلابی جابجا شده و مواد لایه زیرسطحی را به‌طور ناگهانی در معرض فرسایش و آبشستگی قرار می‌دهد (Hey et al., 1985, Yasi et al., 2013). به همین دلیل، هیدرولیک جریان و ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه پیچیده‌تر از رودخانه‌های با مواد بستری ماسه‌ای و ریزدانه است.

ارزیابی بار رسوبی (بار کف، معلق و کل) در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه، جهت مطالعات رودخانه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در منابع موجود، روش‌های متعدد تجربی و نیمه‌تجربی برای محاسبه بار رسوبی ارایه گردیده است. برای شرایط رودخانه‌ها با مواد بستری درشت‌دانه، روش‌های موجود، محدودتر و از نظر کاربردی نیز نامطمئن‌تر هستند (یعقوبی ۱۳۸۰، و حمزه‌پوری ۱۳۸۳). مروری بر پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که هنوز یک روش جامع و یا یک رابطه عمومی جهت ارزیابی بار رسوبی (کف، معلق و کل) برای شرایط رودخانه‌های مختلف ارایه و یا توصیه نشده است (یاسی و

۱- دانشجوی پیشین کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران
۲- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ایران
(*- ایمیل نویسنده مسئول: Email: m.yasi@ut.ac.ir)

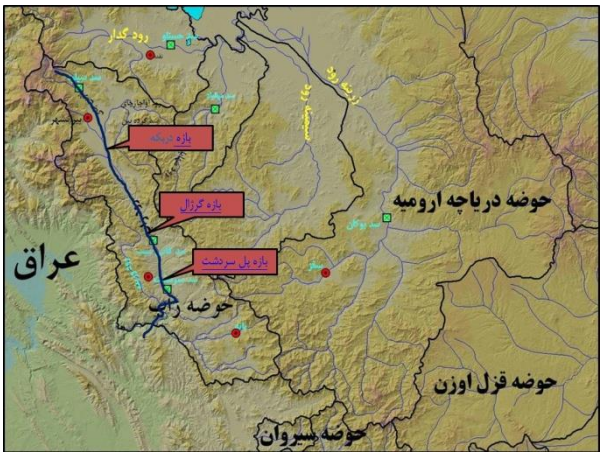
همکاران، ۱۳۹۱). خطای برآورد بار رسوبی، حتی در بهترین انطباق روش‌های هیدرولیکی با شرایط رودخانه‌ها، در دامنه ۵۰ تا ۷۰ درصد قرار دارد (van Rijn., 1993; Vanoni., 2006). آزمون انتخاب روش‌های موجود، اصلاح روش‌های برتر، و یا ارایه روش‌های جدید، برای رودخانه‌ها با مواد بستری متفاوت (ماسه‌ای، شنی، و درشت دانه-تر) هنوز ضروری به‌نظر می‌آید (Yang and Lim., 2003; Yang et al., 2006; Yang and Marsooli., 2010). احتساب خصوصیات لایه زیرسطحی بستر در ارزیابی شدت انتقال رسوب همبستگی بیش-تری را پدید آورده است (Habersack and Laronne., 2002; Almedeij and Diplas., 2003).

هدف اصلی در تحقیق حاضر، ارزیابی روش‌های مختلف موجود در برآورد بار رسوبی (بار کف، معلق و کل) در بازه‌های مختلف از رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه بوده است. منظور از رودخانه-های با مواد بستری درشت‌دانه در این بررسی، رودخانه‌هایی است که دانه‌بندی مواد لایه سطحی بستر شنی و یا درشت‌تر بوده، و اندازه متوسط مواد بستری آن‌ها بیش از دو میلی‌متر باشد. ضمن آن‌که در این تحقیق، حساسیت برآورد بار رسوبی نسبت به خصوصیات فیزیکی مواد لایه سطحی و زیرسطحی بستر و نیز در شرایط مختلف جریان نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری‌های میدانی

رودخانه زاب در جنوب‌غربی استان آذربایجان‌غربی، در محدوده شهرستان‌های پیران‌شهر و سردشت واقع شده است. از لحاظ جغرافیایی این حوضه در محدوده $44^{o}51'$ الی $45^{o}42'$ طول شرقی و $36^{o}06'$ الی $36^{o}55'$ عرض شمالی قرار دارد و بخشی از حوضه آبریز مرزی غرب در مجاورت کشور عراق می‌باشد. رودخانه زاب از رودخانه‌های مشترک مرزی ایران - عراق با جریان دایمی است. شکل ۱ سیمای کلی حوضه رودخانه زاب را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی بار رسوبی از روش‌های مختلف، سه بازه در حوضه رودخانه فرامرزی زاب (بازه دربکه از رود لاوین، و دو بازه گرژال و بریسو از رود زاب) انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. جانمایی بازه-های مطالعاتی در شکل ۱ نمایش داده شده است. در محدوده هریک از این بازه‌ها، ایستگاه هیدرومتری قرار داشته، که از نوع درجه ۱ و ۲ بود، که از کیفیت آماری خوبی برخوردار بود. از اطلاعات هم‌زمان اندازه‌گیری (بده- بار معلق). در دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (۱۳۹۱-۱۳۶۰) استفاده شده است. تعداد داده‌های هم‌زمان (بده- بار معلق) در سه بازه دربکه، گرژال و بریسو به‌ترتیب ۴۲۲، ۳۶۰ و ۳۶۴ بود که برای استخراج معادلات سنجه رسوب معلق استفاده شده است. داده-های بار کف در این سه بازه برداشت نمی‌گردد. هندسه مقاطع عرضی بازه‌ها (حداقل ۸ مقطع عمود بر راستای جریان) برداشت گردید. نمونه‌برداری از مواد لایه سطحی به روش شبکه- شمارش و از لایه زیرسطحی به روش حجمی انجام شد (یاسی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ که نتایج آن در جدول ۱ ارایه شده است. هیدرولیک جریان در این بازه‌ها با کاربرد مدل HEC-RAS محاسبه گردید. از منحنی سنجه (بده- تراز سطح آب) ایستگاه‌های هیدرومتری در هر بازه برای واسنجی و تنظیم مدل HEC-RAS استفاده گردید تا نتایج هیدرولیکی قابل اعتماد باشد. متوسط وزنی پارامترهای جریان در طول بازه در جدول ۲ گزارش شده است. مشخصات سه بازه در حوضه رود زاب به شرح زیر است.



شکل ۱- سیمای حوضه رودخانه فرامرزی زاب، و سه بازه مطالعاتی

بازه دربکه- رودخانه لاوین: این بازه به طول ۲۵۰ متر و نسبتا مستقیم و تغییرات مقاطع عرضی در طول آن به‌صورت تدریجی بود.

در این بازه، هشت مقطع عرضی، عمود بر راستای جریان برداشت گردیده است. خصوصیات فیزیکی لایه زیرسطحی و سطحی بستر در محدوده بازه در جدول ۱ ارایه شده است. بر این اساس، متوسط اندازه مواد در لایه سطحی و لایه زیرسطحی بستر به ترتیب ۵۳/۵ و ۸ میلی‌متر است، که بر اساس طبقه‌بندی AGU به ترتیب در گروه "شن خیلی درشت"و "شن متوسط" قرار دارد. مواد آبرفتی از جنس کوارتز با چگالی نسبی ۲/۶۵ است. مطابق جدول ۲، برای سیلاب متوسط سالیانه (۴۸/۸ مترمکعب بر ثانیه)، عرض متوسط بازه ۳۲/۴ متر، عمق متوسط آن ۱/۱۵ متر و شیب عمومی بازه معادل ۰/۸ درصد است. جریان در بازه عموما زیربحرانی است.

بازه گرژال- رودخانه زاب: بازه هیدرولیکی «گرژال» به طول تقریبی ۲۶۰ متر، به‌نسبت مستقیم و تغییرات هشت مقطع عرضی در طول آن تدریجی می‌باشد. مواد آبرفتی از جنس کوارتز با چگالی نسبی ۲/۶۵ است. بر اساس جدول ۱، متوسط اندازه مواد در لایه سطحی و لایه زیرسطحی بستر به ترتیب ۵۰/۵ و ۴/۶ میلی‌متر است، که دانه‌بندی آن در طبقه‌بندی AGU، به ترتیب در گروه "شن خیلی درشت"و "شن ریز" قرار دارد. مطابق جدول ۲، شیب عمومی بازه (۰/۰۰۶۳) بوده، و برای سیلاب متوسط سالیانه (۳۱۴ مترمکعب بر ثانیه) دارای عرض متوسط سطح آب ۳۷ متر و عمق متوسط ۳/۴ متر می‌باشد.

بازه بریسو- رودخانه زاب: این بازه دارای طول تقریبی ۲۸۰ متر، شیب طولی کف آبراهه (۰/۲۶ درصد) و برای سیلاب متوسط سالیانه (۳۲۳ مترمکعب بر ثانیه) دارای عرض متوسط سطح آب ۹۳ متر و عمق متوسط ۲/۹۹ متر می‌باشد (جدول ۲). بر اساس جدول ۱، مواد آبرفتی از جنس کوارتز با چگالی نسبی ۲/۶۵ است. متوسط اندازه مواد در لایه سطحی و لایه زیرسطحی بستر به ترتیب ۴۲ و ۳/۹ میلی‌متر است، که بر اساس طبقه‌بندی AGU، دانه‌بندی آن در گروه "شن خیلی درشت" و "شن خیلی ریز" قرار دارد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی مواد رسوبی بستر در بازه‌های مورد مطالعه

بازه (رودخانه)	مواد بستری	S_g	σ_g	C_u	D_{100} mm	D_{90} mm	D_{84} mm	D_{65} Mm	D_{50} mm	D_{16} mm	D_{10} mm
دربکه	سطحی	۲/۶۵	۱/۶۴	۲/۵۱	۲۰۰	۹۵	۷۹/۱	۶۷/۳	۵۳/۵	۲۹/۴	۲۳/۱
(لاوین)	زیرسطحی	۲/۶۵	۴/۱	۱۶/۶۷	۴۰	۲۸	۲۵	۱۶	۸	۱/۵	۰/۹
گرژال	سطحی	۲/۶۵	۱/۶۸	۲/۴	۱۹۰	۹۳	۷۸	۶۴/۲	۵۰/۵	۲۷/۶	۲۲/۵
(زاب)	زیرسطحی	۲/۶۵	۴/۱	۱۳/۶۷	۳۸,۱	۲۵	۲۰	۱۰/۱	۴/۶	۱/۲	۰/۶
بریسو	سطحی	۲/۶۵	۱/۷۵	۲/۱۲	۱۸۵	۹۱	۷۷	۵۰/۱	۴۲	۲۵/۲	۲۱/۸
(زاب)	زیرسطحی	۲/۶۵	۵/۱۴	۱۴/۸۸	۳۷/۳	۲۲/۵	۱۷/۲	۷/۸	۳/۹	۰/۶۵	۰/۴۱

D_s= شاخص اندازه مواد بستری؛ S_g= چگالی نسبی مواد بستری؛ C_u= ضریب یکنواختی؛ σ_g= انحراف معیار هندسی

جدول ۲- خصوصیات جریان در بازه‌های مورد مطالعه

بازه (رودخانه)	τ N/m^2	Fr –	S_f %	R M	D M	B m	V m/s	Q m^3/s
دربکه (لاوین)	۳۳	۰/۷۴	۱/۴۴	۰/۲۷	۰/۵۳	۱۴	۱/۰۷	۶/۶
	۴۶	۰/۶۶	۰/۹۳	۰/۵۱	۱/۱۵	۳۲	۱/۴۶	۴۹
	۴۸	۰/۶۵	۰/۸۸	۰/۵۴	۱/۳۴	۴۰	۱/۵	۷۳
گرژال (زاب)	۹۴	۰/۵۶	۱/۲۱	۰/۸۵	۱/۴۱	۲۰	۱/۶	۴۴
	۲۱۶	۰/۶۱	۱/۱۳	۲/۰۴	۳/۴	۳۷	۲/۷۲	۳۱۴
	۲۵۲	۰/۶۱	۱/۱۵	۲/۳۸	۴/۱۵	۴۲	۲/۹۳	۴۷۲
بریسو (زاب)	۵۸	۰/۴۴	۱/۷	۰/۷۹	۱/۲۸	۶۱	۱	۴۴/۴
	۹۳	۰/۳۸	۰/۶۲	۱/۷۵	۲/۹۹	۹۳	۱/۵۴	۳۲۳
	۱۰۳	۰/۳۷	۰/۵۵	۲/۰۴	۳/۷۶	۱۱۵	۱/۶۲	۵۰۸

V= سرعت متوسط؛ B= عرض سطح آب؛ D= عمق متوسط؛ R= شعاع هیدرولیکی؛ S_f= شیب انرژی؛ Fr = عدد فرود؛ τ= متوسط تنش برشی بستر

در مدل‌های موجود (نظیر: FLUVIAL، BRI-STAR، MIKE-11، HEC-RAS و HEC-6) از روش‌های همسان در ارزیابی بار رسوبی استفاده نگردیده است. در این بررسی از مدل انتقال رسوب STM (STM: Sediment Transport Model) استفاده

شده است (یاسی و همکاران، ۱۳۹۱). محاسبات هیدرومتری داده‌های رسوب‌سنجی از پنج روش بسط منحنی سنجه رسوب مورد آزمون قرار گرفت. بهترین برازش آماری به‌صورت منحنی متوسط و منحنی‌های پوش با سطح اطمینان ۹۰ ٪ تعیین گردید. از میان روش‌های مختلف هیدرولیکی، تعداد ۲۴ رابطه که با شرایط رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه متناسب هستند، در جدول ۳ مورد نظر قرار گرفته‌اند. شرح و مرجع هر یک از این ۲۴ روش توسط یاسی و همکاران (۱۳۹۱) ارائه شده است. در این بررسی، مقادیر برآورد بار رسوبی از روش‌های هیدرولیکی با مقادیر نظیر از تحلیل هیدرومتری داده‌های بده- رسوب مقایسه گردیده‌اند. سرانجام روش برتر از مقایسه میزان برآورد هیدرولیکی بار رسوبی با محدوده قابل قبول آن در تحلیل هیدرومتری، انتخاب و پیشنهاد گردیده است.

جدول ۳- روش‌های مناسب برآورد بار رسوبی در رودخانه‌های با بستر درشت‌دانه (نقل از یاسی و همکاران، ۱۳۹۱)

روش	کاربرد	محاسبه بار رسوبی		
		بارکل	بارمعلق	بارکف
Schoklitsch (1934)	در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه، اندازه ذرات (۵-۰/۳) میلی‌متر			*
Schoklitsch (1943)	در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه، اندازه ذرات (۵-۰/۳) میلی‌متر			*
Meyer-Peter-Muller (1948)	رودخانه‌های درشت‌دانه با اندازه ذرات رسوبی: (۳۰-۰/۳) میلی‌متر			*
Rottner (1959)	بر اساس همبستگی آماری و نتایج آزمایشگاهی و با کاربرد وسیع			*
Parker et.al.(1982)	برای رودخانه‌های بستر شنی با لایه سطحی محافظ			*
Bagnold (1966)	برای رودخانه‌های که دارای فرم بستر می‌باشند	*	*	*
Einstein (1950)	برای رودخانه‌های بستر شنی و ماسه غیریکنواخت، بار معلق و با فرم بستر.	*	*	*
Engelund (1965)	در رودخانه‌های مختلف و بر اساس بده‌های مختلف به‌دست آمده است.		*	*
Engelund and Hansen (1967)	در رودخانه‌های مختلف (ولی بیشتر برای بستر ماسه ای درشت) است.	*		
Samaga (1985)	برای رودخانه‌ها با فرم بستری مختلف، برای جریان و اندازه‌های رسوبات مختلف		*	
Ackers and White (1990)	برای انواع فرم بستر و جریان زیر بحرانی	*		
Yang (1982)	در رودخانه‌های درشت‌دانه، فرم بسترهای مختلف و برای حالات مختلف جریان	*		
Garde and Alberston (1963)	برای رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای و شنی.	*		
Karim and Kennedy (1990)	برای رودخانه‌های مختلف	*		
Laursen (1958)	برای داده‌های آزمایشگاهی با اندازه مواد بستری (۴/۱-۰/۰۱) میلی‌متر	*		
Yalin (1977)	در رودخانه‌های ماسه‌ای و شنی با جریان کامل متلاطم			*
Zanke (1987)	کاربرد در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه			*
Parker (1990)	برای رودخانه‌های بستر شنی با لایه سطحی محافظ			*
Sun and Donahue (2000)	برای رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه و برای ذرات (۱۰-۲) میلی‌متر			*
Cheng (2002)	قابل کاربرد برای رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه			*
Wilcock and Crowe (2003)	رودخانه‌های درشت‌دانه با مواد رسوبی در محدوده (۸۲- ۰/۵) میلی‌متر			*
Brownlie (1981)	بر اساس محدوده وسیعی از داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی	*		
Karim (1998)	برای رودخانه‌های مختلف بدون لایه سپری در بستر	*		
Graf et al (1968)	بر اساس فرضیات انیشتین و مطالعات تجربی است.	*		

نتایج و بحث

ارزیابی بار رسوبی معلق

نتایج تحلیل هیدرومتری منحنی سنجه رسوب با برازش آماری داده‌های بار رسوبی (Qs: ton/day) و بده جریان (Qw: m^3/s) در سه بازه دربکه، گرژال، و بریسو به ترتیب به‌صورت معادلات ۱ تا ۳ ارایه گردیده است. برازش منحنی سنجه رسوب و محدوده اطمینان ۹۰٪ داده‌ها برای بازه گرژال (بازه بالادست رود زاب) به‌صورت (شکل ۲) نمایش داده شده است.

$$Q_s = ۱۴/۴۹ Q_w^{۱/۲۷۹} \quad R^2 = ۸۲٪$$

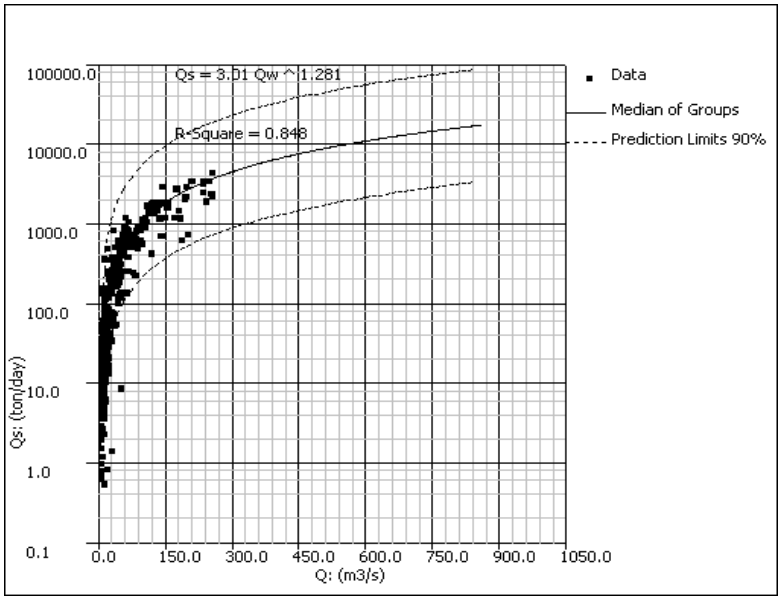
$$Q_s = ۳/۰۱ Q_w^{۱/۲۸۱} \quad R^2 = ۸۵٪$$

$$Q_s = ۳/۴۴ Q_w^{۱/۳۳۳} \quad R^2 = ۷۶٪$$

برآورد هیدرولیکی بار رسوبی معلق از چهار رابطه منتخب از جدول ۳ : انشتین (Einstein., 1950)، بگنولد (Bagnold., 1966)، ساماگا (Samaga., 1985) و انگلند (Engelund., 1965) ارزیابی

گردید (به نقل از یاسی و همکاران، ۱۳۹۱). بار معلق برای شرایط مختلف جریان، در هر یک از سه بازه، و به تفکیک بر حسب خصوصیات مواد بستری در لایه سطحی و زیرسطحی بستر محاسبه گردید. نمونه محاسبات مقادیر بار معلق متوسط و محدوده اطمینان ۹۰٪ آن در بده‌های منتخب جریان، برای بازه گرژال- رود زاب در جدول ۴ ارایه شده است. در این جدول، مقادیر برآورد هیدرولیکی بار معلق از چهار روش با مقادیر نظیر هیدرومتری (مقادیر متوسط، و محدوده اطمینان ۹۰٪ و محدوده پوش فیزیکی داده‌ها) مقایسه گردیده‌اند. شکل ۳ نتایج ارزیابی برآورد روش‌های فوق را برای نمونه بازه گرژال، بر حسب مواد زیرسطحی بستر، نشان می‌دهد. روش یا روش‌های برتر هیدرولیکی از مقایسه برآوردها با دامنه پوش منحنی‌های سنجه رسوب در محدوده اطمینان ۹۰٪ در شکل نظیر ۳، و با محاسبه عددی خطای نسبی برآوردها تشخیص داده شده‌اند. نمونه محاسبات خطای نسبی برآورد از دو رابطه برتر انشتین و بگنولد بر حسب مواد لایه زیرسطحی بستر، برای بازه گرژال در جدول ۵ ارایه شده است. نمونه نتایج تحلیلی خطای نسبی برآورد بار معلق برای دو لایه سطحی و زیرسطحی بستر از رابطه انشتین در سه بازه مورد مطالعه در جدول ۶ مقایسه گردیده است.

از نتایج تحلیل بار رسوبی معلق در سه بازه منتخب از رود زاب، می‌توان نتیجه گرفت که: ۱- کاربرد خصوصیات فیزیکی مواد لایه زیرسطحی بستر و شرایط جریان پرآبی، سبب افزایش دقت در محاسبات بار رسوبی معلق می‌گردد. بزرگی اندازه مواد در لایه سطحی بستر عموما منجر به برآورد بسیار ناچیز و غالبا غیر منطقی بار رسوبی می‌گردد. مشابه این نتایج در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Habersack and Laronne., 2002; Yasi et al., 2013; Almedeij and Diplas., 2003)؛ ۲- رابطه ساماگا مقادیر بار معلق را حتی در محدوده دبی‌های کم و با احتساب خصوصیات لایه سطحی بستر بسیار زیاد برآورد می‌کند. ۳- برآورد دو رابطه انگلند و بگنولد در هر سه بازه به یکدیگر نزدیک‌تر بوده، و به شرایط مختلف جریان نیز حساس است. ولی رابطه انگلند مقادیر بار معلق را در لایه سطحی بستر خیلی کم‌برآورد کرده و مناسب به نظر نمی‌رسد. ۴- رابطه انشتین به اندازه مواد بستری حساس است، و میزان بار معلق را برای لایه درشت‌تر سطحی بستر، کم‌تر برآورد می‌کند. ۵- برآورد حاصله از تمام روش‌ها کم‌تر از مقادیر متناظر مشاهداتی، (به‌ویژه در بده‌های زیادتر) است. ۶- کاربرد رابطه انشتین، با احتساب خصوصیات مواد لایه زیرسطحی بستر، بهتر از دیگر روش‌ها است. خطای نسبی برآورد این روش برای جریان‌های سیلابی در محدوده ۷۹٪- تا ۸۲٪- بوده و متوسط آن معادل ۹۱٪- می‌باشد (جدول ۶). ۷- بر اساس مطالعات پیشین، دامنه مناسب برآورد بار رسوبی در رودخانه‌ها از ۷۷-٪ تا ۲۰۰+٪ گزارش شده است (Yasi et al., 2013). از این‌رو برآورد رابطه انشتین، با احتساب خطای تقریبا ۲ برابر کم‌تر از مقدار واقعی، نسبت به دیگر روش‌های موجود، مناسب‌تر است. به‌هرحال باید توجه داشت که بخشی از برآورد کم‌تر مربوط به سهم بار شسته (Wash Load) است که در نمونه‌برداری بار معلق حضور دارد ولی در تئوری و روابط هیدرولیکی نادیده گرفته می‌شود (van Rijn., 1993). به‌هرحال، سهم بار شسته از بار معلق و یا از بار کل رسوبی در رودخانه‌ها معین نبوده و تابع خصوصیات لایه سطحی و شدت فرسایش ورقه‌ای در سطح حوضه بالادست است.



شکل ۲- توسعه منحنی سنجه رسوب معلق در بازه گرژال، رود زاب

جدول ٤- نتایج محاسبات بار معلق (Q_s: ton/day) از روش‌های مختلف در بازه گرژال ـ رودخانه فرامرزی زاب

لایه بستر	روش	بده جریان آب (m^3/s)							
		۸٦۰	۷۷۸	٦۹۲	٦۲٥	٥۷۲	٤۷۲	۳۸۹	۳۱٤	٤٤
سطحی	Einstein (1950)	۶۸۴	۵۸۴	۴۸۱	۴۰۳	۳۴۸	۲۴۸	۱۷۶	۱۱۵	۱
	Engelund (1965)	۱۷	۱۴	۱۱	۱۰	۸	۵	۴	۲	۰/۱
	Bagnold (1966)	۱۹۱	۱۶۷	۱۴۳	۱۲۵	۱۱۳	۹۰	۷۲	۵۵	۵
	Samaga (1985)	۴۱۲۸	۴۰۲۷	۳۹۱۸	۳۸۲۹	۳۷۴۶	۳۴۹۵	۳۱۹۳	۳۰۶۸	۲۷۱۳
زیرسطحی	Einstein (1950)	۳۱۴۶	۲۸۲۲	۲۵۱۴	۲۲۵۸	۲۰۳۹	۱۶۴۷	۱۲۹۹	۱۰۰۷	۶۹
	Engelund (1965)	۲۰۰۳	۱۶۷۸	۱۳۶۸	۱۱۴۳	۹۶۳	۶۴۹	۴۳۲	۲۸۰	۸
	Bagnold (1966)	۶۳۱	۵۵۳	۴۷۴	۴۱۵	۳۷۳	۲۹۷	۲۳۷	۱۸۱	۱۶
	Samaga (1985)	۳۴	۳۶	۳۵	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۲۶
متوسط برآورد از رابطه سنجه رسوب		۱۷۳۰۹	۱۵۲۱۳	۱۳۱۰۰	۱۱۵۰۸	۱۰۲۵۳	۸۰۱۵	۶۲۶۰	۴۷۵۳	۳۸۱
محدوده اطمینان ۹۰٪ سنجه رسوب		۸۸۱۵۶	۷۷۴۷۹	۶۶۷۱۹	۵۸۶۱۰	۵۲۲۱۹	۴۰۸۲	۳۱۸۷	۲۴۲۰	۱۹۳۹
		۳۳۹۹	۲۹۸۷	۲۵۷۲	۲۲۶۰	۲۰۱۳	۱۵۷۴	۱۲۲۹	۹۳۳	۷۵

جدول ٥- خطای برآورد بار رسوبی معلق از دو روش برتر در بازه گرژال- بر اساس لایه زیرسطحی

بده جریان Q_w (m^3/s)	بار رسوبی اندازه‌گیری Q_{so} (ton/day)	روش بگنولد (Bagnold., 1966)		روش انشتین (Einstein., 1950)		متوسط برآورد	
		E%*	Q_s (ton/day)	E%*	Q_s (ton/day)	E%*	Q_s (ton/day)
۴۴	۳۸۱	-۹۸	۸	-۸۲	۶۹	-۹۰	۳۹
۳۱۴	۴۷۵۳	-۹۴	۲۸۰	-۷۹	۱۰۰۷	-۸۶	۶۴۴
۴۷۲	۸۰۱۵	-۹۲	۶۴۹	-۷۹	۱۶۴۷	-۸۶	۱۱۴۸
۵۷۲	۱۰۲۵۳	-۹۱	۹۶۳	-۸۰	۲۰۳۹	-۸۵	۱۵۰۱
۶۹۲	۱۳۱۰۰	-۹۰	۱۳۶۸	-۸۱	۲۵۱۴	-۸۵	۱۹۴۱
۷۷۸	۱۵۲۱۳	-۸۹	۱۶۷۸	-۸۲	۲۸۲۲	-۸۵	۲۲۵۰
۸۶۰	۱۷۳۰۹	-۸۸	۲۰۰۳	-۸۲	۳۱۴۶	-۸۵	۲۵۷۵
	متوسط	-۹۲		-۸۱		-۸۶	
	(محدوده)	(-۹۸) تا (-۸۸)		(-۸۲) تا (-۷۹)		(-۹۰) تا (-۸۵)	
	متوسط مطلق	-۹۲		-۸۱		-۸۶	

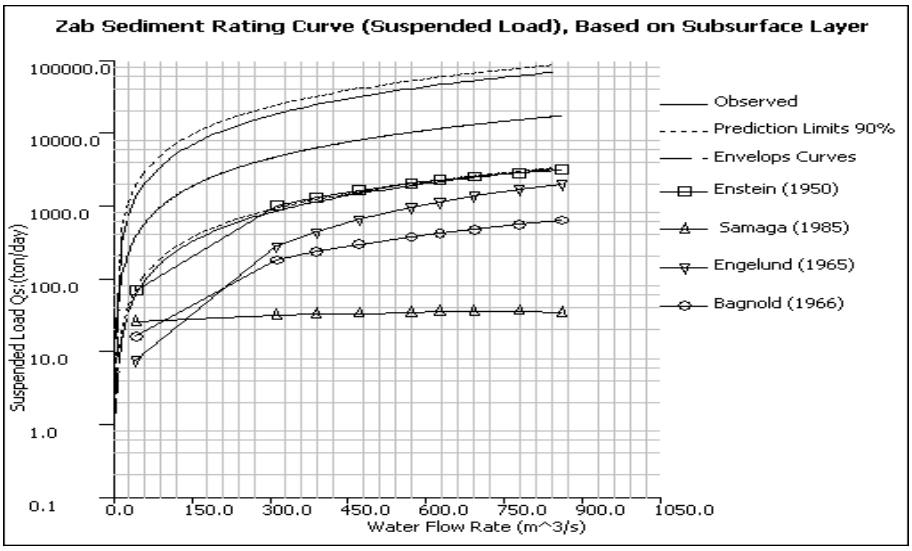
* $E\% = ((Q_s - Q_{so})/ Q_{so})*100$

جدول ٦- متوسط (دامنه) خطای نسبی برآورد بار معلق از رابطه انشتین (Einstein., 1950) در سه بازه مورد مطالعه

مواد رسوبی	بازه «رودخانه»			متوسط (دامنه)
	بریسو «زاب»	گرژال «زاب»	دربکه «لاوین»	
لایه سطحی	-۹۶	-۹۷	-۱۰۰	-۹۸
	(-۹۴,-۹۸)	(-۹۶,-۹۹)	(-۹۹,-۱۰۰)	(-۹۸,-۹۹)
لایه زیرسطحی	-۹۵	-۸۱	-۹۸	-۹۱
	(-۸۲,-۹۷)	(-۷۹,-۸۲)	(-۹۸,-۹۹)	(-۸۶,-۹۳)

ارزیابی بار رسوبی کف

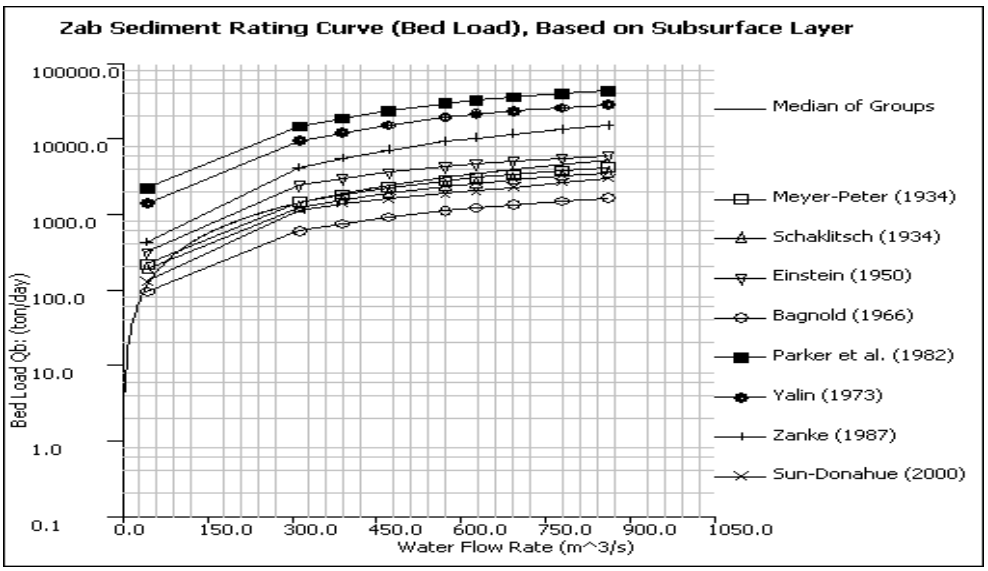
داده‌های بار کف در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه رودخانه لاوین- زاب اندازه‌گیری نشده و تحلیل هیدرومتری آن امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به اهمیت برآورد بار کف در مطالعات رودخانه‌ای، از سیزده روش هیدرولیکی منتخب در جدول ۳ برای سه بازه مورد مطالعه استفاده شده است. نمونه این محاسبات برای بازه گرژال- رود زاب، برای شرایط مختلف جریان و به تفکیک خصوصیات مواد بستری در لایه سطحی و زیرسطحی بستر، در جدول ۷ ارایه شده است. شکل ۴، برای نمونه، نتایج برآورد از هشت روش هیدرولیکی را در بازه گرژال، بر حسب لایه زیرسطحی بستر نشان می‌دهد. مطالعات پیشین نشان داد که در رودخانه‌های بستر درشت‌دانه نسبت بار کف به بار کل رسوبی در دامنه ۴۰٪ تا ۸۰٪ ، و نسبت بار کف به بار معلق در محدوده ۷٪ تا ۴۰۰٪ قرار دارد، که بسیار بیش‌تر از رودخانه‌های بستر ماسه‌ای است (Yasi et al., 2013). در این بررسی، محدوده عمومی نسبت بار کف به بار معلق به‌عنوان دامنه اعتبار برآورد روش‌های هیدرولیکی در نظر گرفته شد.



شکل ۳- مقایسه مقادیر برآوردی بار معلق در بازه گرژال بر اساس مواد لایه زیرسطحی بستر

جدول ۷- نتایج محاسبات بار کف (Q_b: ton/day) از روش‌های مختلف هیدرولیکی در بازه گرژال- رودخانه زاب

لایه بستر	روش	بده جریان آب (m^3/s)								
		۹۸۷	۸۸٦	۷۸۰	٦۹۸	٦۳۱	۵۰۸	٤۰۹	۳۲۳	٤٤
سطحی	Schoklitsch (1934)	۱۰۳۵	۹۳۴	۸۳۰	۷۴۸	۶۸۳	۵۵۴	۴۴۸	۳۵۴	۴۸
	Schoklitsch (1943)	۲۴۹۷	۲۲۴۵	۱۹۸۴	۱۷۸۱	۱۶۱۸	۱۲۹۹	۱۰۳۹	۸۰۸	۶۹
	Meyer-Peter-Muller (1948)	۳۵۴۸	۳۱۷۹	۲۷۹۷	۲۵۰۲	۲۲۶۷	۱۸۰۶	۱۴۳۳	۱۱۰۴	۱۰۰
	Einstein (1950)	۴۳۳۰	۳۸۰۱	۳۲۴۵	۲۸۰۳	۲۴۸۵	۱۸۷۴	۱۴۰۵	۹۸۶	۱۴
	Engelund (1965)	۳۵۹۵۹	۳۲۷۲۵	۲۹۳۳۹	۲۶۵۹۸	۲۴۰۲۰	۱۸۸۲۵	۱۴۶۰۵	۱۱۲۶۵	۱۳۷۵
	Bagnold (1966)	۱۶۴۵	۱۴۹۳	۱۳۳۵	۱۲۱۰	۱۱۰۸	۹۱۰	۷۴۶	۵۹۹	۹۵
	Yalin (1977)	۱۶۵۴۷	۱۴۹۲۰	۱۳۲۳۰	۱۱۸۷۳	۱۰۶۰۵	۸۰۷۹	۶۰۶۵	۴۵۱۱	۳۶۹
	Parker et al. (1982)	۲۸۳۰۴	۲۵۴۴۹	۲۲۴۸۴	۲۰۱۰۳	۱۷۸۸۰	۱۳۴۴۹	۹۹۲۴	۷۲۱۶	۳۶۵
	Zanke (1987)	۴۴۹۶	۳۹۸۸	۳۴۷۲	۳۰۷۷	۲۷۵۵	۲۱۳۳	۱۶۴۵	۱۲۴۰	۱۲۷
	parker (1990)	۳۳۷۵۷	۳۰۴۹۸	۲۷۱۰۲	۲۴۳۶۵	۲۱۸۰۱	۱۶۶۶۴	۱۲۵۴۰	۹۳۲۹	۶۷۱
	Sun and Donahue (2000)	۵۲۹	۴۴۸	۳۶۹	۳۱۳	۲۸۲	۲۳۰	۱۹۰	۱۴۳	۵
	Cheng (2002)	۴۸۰۰۹	۴۳۷۷۵	۳۹۳۳۴	۳۵۷۲۹	۳۲۳۲۸	۲۵۴۴۳	۱۹۸۱۰	۱۵۳۱۴	۱۷۳۰
	Wilcock and Crowe (2003)	۲۵۸۰۳	۲۳۲۶۱	۲۰۶۲۴	۱۸۵۰۹	۱۶۵۳۶	۱۲۶۱۰	۹۴۹۰	۷۰۸۵	۶۴۸
زیرسطحی	Schoklitsch (1934)	۳۵۰۰	۳۱۶۴	۲۸۱۵	۲۵۴۴	۲۳۲۴	۱۸۹۲	۱۵۳۹	۱۲۲۴	۱۸۷
	Schoklitsch (1943)	۲۶۸۱	۲۴۲۴	۲۱۵۶	۱۹۴۹	۱۷۸۰	۱۴۵۰	۱۱۷۹	۹۳۸	۱۴۳
	Meyer-Peter-Muller (1948)	۴۱۹۵	۳۷۹۰	۳۳۷۰	۳۰۴۴	۲۷۸۰	۲۲۶۱	۱۸۳۷	۱۴۵۹	۲۱۹
	Einstein (1950)	۵۹۸۴	۵۵۲۳	۵۰۴۸	۴۶۴۴	۴۲۸۴	۳۶۱۳	۲۹۹۶	۲۴۵۴	۳۱۳
	Engelund (1965)	۴۳۷۱۴	۳۹۹۹۵	۳۶۰۸۴	۳۲۹۰۷	۲۹۹۰۶	۲۳۸۲۹	۱۸۸۵۰	۱۴۸۵۷	۲۳۳۹
	Bagnold (1966)	۱۶۴۵	۱۴۹۳	۱۳۳۵	۱۲۱۰	۱۱۰۸	۹۱۰	۷۴۶	۵۹۹	۹۵
	Yalin (1977)	۲۸۱۵۷	۲۵۷۳۲	۲۳۱۸۳	۲۱۱۱۵	۱۹۱۶۲	۱۵۲۱۳	۱۱۹۸۱	۹۳۹۷	۱۴۰۰
	Parker, et al (1982)	۴۲۹۵۹	۳۹۲۹۴	۳۵۴۳۹	۳۲۳۰۸	۲۹۳۵۰	۲۳۳۵۹	۱۸۴۴۹	۱۴۵۱۲	۲۲۰۸
	Zanke (1987)	۱۴۸۹۵	۱۳۲۱۳	۱۱۵۰۳	۱۰۱۹۴	۹۱۲۷	۷۰۶۹	۵۴۵۲	۴۱۰۸	۴۲۳
	parker (1990)	۳۵۹۵۳	۳۲۵۶۸	۲۹۰۳۳	۲۶۱۸۰	۲۳۵۰۱	۱۸۱۲۲	۱۳۷۸۱	۱۰۳۸۰	۸۹۴
	Sun and Donahue (2000)	۲۹۶۵	۲۶۲۸	۲۲۷۹	۲۰۲۵	۱۸۶۸	۱۵۹۶	۱۳۷۷	۱۱۱۹	۱۲۸
	Cheng (2002)	۵۱۳۲۰	۴۷۴۲۵	۴۲۸۴۶	۳۹۱۲۱	۳۵۶۰۱	۲۸۴۶۳	۲۲۶۰۱	۱۷۸۸۶	۲۹۲۳
	Wilcock and Crowe (2003)	۲۹۶۵۱	۲۶۸۱۱	۲۳۸۵۶	۲۱۴۸۰	۱۹۲۵۷	۱۴۸۱۹	۱۱۲۶۸	۸۵۰۸	۸۷۵



شکل ٤- مقایسه مقادیر برآورد بار کف در بازه گرژال، بر اساس مواد لایه زیرسطحی بستر

از نتایج تحلیل بار رسوبی کف برای سه بازه مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که: ۱- رابطه بگنولد (Bagnold., 1966) و رابطه شاکلینچ (Schoklitsch., 1943) به شرایط مختلف جریان حساس بوده، اما حساسیت کافی به اندازه مواد بستری ندارند؛ ۲- رابطه میر-پیتر-مولر (Meyer-Peter-Muller., 1948) با احتساب لایه سطحی بستر و رابطه شاکلینچ (Schoklitsch, 1934) با احتساب لایه زیرسطحی بستر، نتایج قابل قبولی ارایه می‌کند؛ ۳- رابطه سان و داناهو (Sun and Donahue., 2000) مقدار بار کف را بسیار کم برآورد نموده و حساسیت لازم را به شرایط مختلف جریان نشان نمی‌دهد؛ ۴- رابطه انشتین (Einstein., 1950) نسبت به اندازه مواد بستری و شرایط جریان حساس است؛ ۶- سه رابطه زانک (Zank., 1987)، پارکر (Parker, 1990)، و ویلکوک و کرو (Wilcock and Crowe., 2003) با احتساب لایه زیرسطحی بستر نتایج قابل قبولی ارایه می‌کند؛ ۶- به‌طورکلی احتساب خصوصیات فیزیکی لایه زیرسطحی بستر همبستگی بیش‌تری در محاسبات بار رسوبی کف از رابطه‌های مختلف (به‌جز رابطه میر-پیتر-مولر) دارد؛ ۷- نتایج سه رابطه شاکلینچ، انشتین، و پارکر تطابق بیش‌تری با دامنه اعتبار نسبت بار کف به بار معلق دارد.

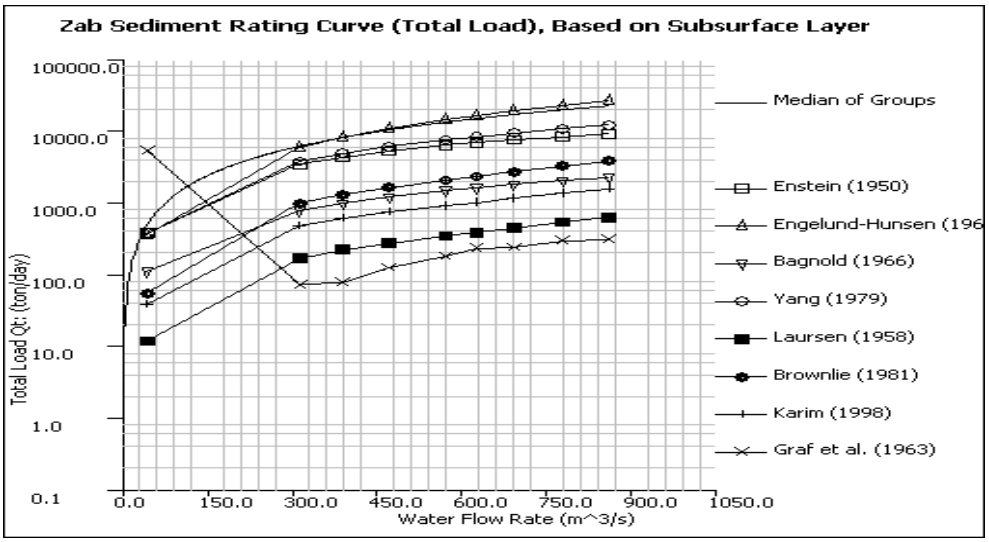
ارزیابی بار رسوبی کل

با نبود داده‌های بار کف، تحلیل هیدرومتری بار رسوبی کل امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این‌رو در این بررسی، از روش غیرمستقیم و با قضاوت کارشناسی استفاده شده است. محدوده عمومی نسبت بار کف به بار کل در رودخانه‌های بستر درشت‌دانه (۴۰٪ تا ۸۰٪) به‌عنوان دامنه اعتبار برآورد روش‌های هیدرولیکی در نظر گرفته شد (یاسی و همکاران، ۱۳۹۱). برآورد هیدرولیکی بار کل از ده روش سازگار با رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه از جدول ۳ انجام یافته است. نمونه این محاسبات برای بازه گرژال- رود زاب، برای شرایط مختلف جریان و به تفکیک خصوصیات مواد بستری در لایه سطحی و زیرسطحی بستر، در جدول ۸ ارایه شده است. شکل ۵، نتایج برآورد از روش های هیدرولیکی را در بازه گرژال، بر حسب لایه زیرسطحی بستر نشان می‌دهد.

از نتایج تحلیل بار رسوبی کل برای سه بازه مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که: ۱- دو رابطه بگنولد (Bagnold., 1966) و یانگ (Yang., 1982) حساسیت لازم را به تغییر اندازه مواد بستری نشان نمی‌دهد؛ ۲- سه رابطه اینشتن (Einstein., 1950)، کریم وکندی (Karim and Kenedy, 1990)، انگلوند و هانسن (Engelund and Hansen., 1967)، و گراف و همکاران (Graf et al., 1963) نسبت به اندازه مواد بستری و شرایط جریان حساس هستند؛ ۳- برخلاف انتظار، دو رابطه گراف و همکاران، و یانگ برای اندازه مواد بستری درشت دانه‌تر در لایه سطحی، بار کل را بیش‌تر از مواد ریزدانه‌تر لایه زیرسطحی برآورد می‌نمایند؛ ۴- برآورد سه رابطه یانگ، انشتین، و گراف و همکاران با احتساب مواد لایه سطحی از روابط دیگر بیش‌تر است؛ ۵- برآورد دو رابطه لارسن (Laursen., 1958) و براونلی (Brownlie., 1981) بر اساس خصوصیات لایه سطحی بستر کم‌ترین مقدار بوده؛ ولی با کاربرد مواد لایه زیرسطحی تعدیل می‌یابند؛ ۶- احتساب خصوصیات فیزیکی لایه زیرسطحی بستر همبستگی بیش‌تری در محاسبات بار رسوبی کل از روش‌های مختلف داشته است؛ ۷- نتایج سه رابطه انگلوند و هانسن، کریم و کندی، و انشتین تطابق بیش‌تری با دامنه اعتبار برآورد بار کل دارد.

جدول ۸- نتایج محاسبات بار کل رسوبی (Q_t: ton/day) از روش‌های مختلف در بازه گرژال ـ رودخانه زاب

لایه بستر	روش	بده جریان آب (m^3/s)							
		۸۶۰	۷۷۸	۶۹۲	۶۲۵	۵۷۲	۴۷۲	۳۸۹	۳۱۴	۴۴
سطحی	Einstein (1950)	۵۰۱۵	۴۳۸۴	۳۷۲۷	۳۲۰۵	۲۸۳۴	۲۱۲۱	۱۵۸۱	۱۱۰۱	۱۵
	Laursen (1958)	۴۳	۳۳	۲۴	۱۷	۱۴	۱۱	۸	۵	۰
	Bagnold (1966)	۱۸۳۶	۱۶۶۰	۱۴۸۷	۱۳۳۶	۱۲۲۱	۹۹۹	۸۱۷	۶۵۴	۱۰۰
	Engelund and Hansen (1967)	۲۳۹۶	۲۰۵۸	۱۷۲۶	۱۴۸۴	۱۳۰۷	۹۸۹	۷۴۷	۵۴۰	۳۲
	Brownlie (1981)	۲۴۹	۲۰۰	۱۵۴	۱۲۳	۱۰۶	۷۸	۵۸	۳۸	۰
	Yang (1982)	۱۶۴۴۰	۱۴۶۸۷	۱۲۸۸۶	۱۱۵۰۲	۱۰۳۹۶	۸۳۵۰	۶۶۹۰	۵۲۱۸	۵۴۰
	Karim and Kenedy (1990)	۲۴۸۵	۲۱۷۴	۱۸۶۰	۱۶۳۳	۱۴۵۲	۱۱۲۴	۸۶۸	۶۴۸	۵۲
	Graf et al. (1963)	۳۰۷۰۴	۲۷۰۵۶	۲۳۳۸۲	۲۰۵۱۴	۱۷۹۰۸	۱۲۹۲۶	۹۲۰۴	۶۵۱۹	۴۷۰
	Karim (1998)	۳۵۱	۳۰۶	۲۶۰	۲۲۸	۲۰۷	۱۷۲	۱۴۴	۱۱۳	۱۱
زیرسطحی	Einstein (1950)	۹۱۲۹	۸۳۴۵	۷۵۶۲	۶۹۰۱	۶۳۲۳	۵۲۵۹	۴۲۹۴	۳۴۶۱	۳۸۲
	Laursen (1958)	۶۲۸	۵۳۷	۴۴۷	۳۸۴	۳۴۴	۲۷۵	۲۲۳	۱۶۹	۱۲
	Bagnold (1966)	۲۲۷۶	۲۰۴۶	۱۸۰۸	۱۶۲۶	۱۴۸۲	۱۲۰۷	۹۸۲	۷۸۰	۱۱۱
	Engelund and Hansen (1967)	۲۶۲۹۹	۲۲۵۹۰	۱۸۹۵۰	۱۶۲۹۶	۱۴۳۵۲	۱۰۸۵۶	۸۱۹۹	۵۹۳۲	۳۵۵
	Brownlie (1981)	۳۸۳۷	۳۲۶۶	۲۷۱۰	۲۳۱۷	۲۰۶۷	۱۶۳۸	۱۳۰۸	۹۷۶	۵۵
	Yang (1982)	۱۲۱۴۲	۱۰۷۹۰	۹۴۰۹	۸۳۶۱	۷۵۵۷	۶۰۷۷	۴۸۸۲	۳۷۹۶	۳۷۹
	Karim and Kenedy (1990)	۵۱۳۲۱	۴۹۷۸۲	۴۸۰۲۲	۴۶۵۲۱	۴۰۶۴۸	۲۸۴۱۸	۱۹۸۴۴	۱۳۴۵۴	۳۱۴
	Graf et al (1963)	۳۰۸	۲۹۹	۲۴۰	۲۳۳	۱۸۰	۱۲۶	۷۸	۷۳	۷۰
	Karim (1998)	۱۵۶۹	۱۳۶۱	۱۱۵۳	۱۰۰۴	۹۰۹	۷۴۴	۶۱۳	۴۷۵	۳۸



شکل ۵- مقایسه برآورد بارکل در بازه گرژال- رودخانه زاب، بر اساس مواد لایه زیرسطحی بستر

نتیجه‌گیری

شدت انتقال رسوب در سه بازه شاخص با مواد بستری درشت‌دانه در حوضه رودخانه فرامرزی زاب (دربکه، گرژال، و بریسو)، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که احتساب خصوصیات فیزیکی لایه زیرسطحی بستر در ارزیابی بار رسوبی سبب بهبود همبستگی میان مقادیر مشاهداتی و مقادیر نظیر برآوردی از روش‌های هیدرولیکی می‌گردد. برآورد هیدرولیکی بار رسوبی برای جریان‌های پرآبی و سیلابی قابل اعتمادتر از شرایط کم آبی رودخانه است.

بر اساس جمع‌بندی نتایج در سه بازه مطالعاتی، و با احتساب مواد

لایه زیرسطحی بستر، برآورد بار معلق از رابطه انشتین قابل‌قبول‌تر است. خطای نسبی این روش برای جریان‌های سیلابی در سه بازه دربکه، گرژال و بریسو به ترتیب ۹۸-٪ ، ۸۱-٪ و ۹۵-٪ و متوسط آن ۹۱-٪ است. به عبارت دیگر در بهترین حالت، بار معلق تقریبا ۲ برابر کم‌تر از مقدار واقعی آن برآورد می‌شود. با نبود داده‌های بارکف در حوضه مورد مطالعه، برآورد بار کف و بار کل از روش‌های هیدرولیکی بر اساس دامنه اعتبار نسبت تجربی بار کف به بار کل در رودخانه‌های بستر درشت‌دانه (۴۰٪ تا ۸۰٪) در نظر گرفته شد. با احتساب مواد لایه زیرسطحی بستر، برآورد بار رسوبی کف در این سه بازه به ترتیب از سه رابطه شاکلینچ، انشتین، و پارکر؛ و برآورد بار رسوبی کل به ترتیب از سه رابطه انگلوند و هانسن، کریم و کندی، و انشتین قابل‌قبول‌تر است.

نامطمئنی‌ها در برآورد بار رسوبی را می‌توان به‌صورت عدم احتساب "بار شسته" در محاسبات هیدرولیکی بار معلق؛ خطای بسط و برون‌یابی "منحنی سنجه رسوب" از داده‌های صحرایی (در شرایط کم‌آبی تا متوسط) به شرایط جریانات سیلابی و عدم جامعیت روش-های موجود در شرایط رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه برشمرد.

منابع

حمزه‌پوری،ر. ۱۳۸۳. ارزیابی بار رسوبی در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

یعقوبی،ب. ۱۳۸۰. ارزیابی بار رسوبی در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه (رودخانه نازلو). پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

یاسی،م.، حمزه‌پوری،ر و پیش‌علمی،ا. ۱۳۹۱. مدل رایانه‌ای ارزیابی بار رسوبی در رودخانه‌ها (مدل انتقال رسوب STM). طرح پژوهشی مشترک دانشگاه ارومیه و وزارت نیرو (شرکت سهامی آب منطقه‌ای اردبیل)، ایران.

Almedeij,J.H and Diplas,P. 2003. Bed load transport in gravel bed streams with unimodal sediment. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 129.11: 896-904.

Habersack,H.M and Laronne,J.B. 2002. Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on Helly-Smith sampling in an Alpine gravel bed. Journal of Hydraulic Engineering. 128.5:484-98.

Hey,R.D., Bathurst,J.C and Thorne,C.R. 1985. Gravel-bed rivers: Fluvial processes, Engineering and Management. Wiley Publication, New York 875 p.

Przedwojski,B., Blazejewski,R and Pilarczyk,K.W. 1995. River training techniques: Fundamental, design and application. A.A. Balkema, Rotterdam, N.L., 625 p.

van Rijn,L.C. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. AQUA Publication, N.L., 360 p.

Vanoni,V.A. 2006. Sedimentation Engineering .ASCE, Manual No. 54, Reston Publication, Virginia, 627p.

Yang,C.T. 1996. Sediment transport: Theory and practice. Mc. Graw – Hill Co., New York, 190 p.

Yang,C.T. 2006. Erosion and Sedimentation Manual. United States of Beurea of Reclamation, Denver, Colorado.

Yang,Sh.Q and Lim,S.Y. 2003. Total Load Transport Formula For Flow in Alluvial Channels. Journal of Hydraulic Engineering. 129.1: 68-72.

Yang,C.T., Marsooli,R. 2010. Recovery factor for non-equilibrium sedimentation processes, Journal of Hydraulic Research. IAHR. 48.3: 409-413.

Yasi,M., Hamzepouri,R and Yasi,A. 2013. Uncertainties in the Evaluation of Sediment Transport Rates in typical Coarse-Bed Rivers in Iran. Journal of Water Sciences Research. 5.2:1-12.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 11, Feb.-Mar. 2018, p. 1100-1110

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶ جلد ۱۱، بهمن - اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۱۱۰-۱۱۰۰

Evaluation of Sediment Transport Capacity in Rivers with Coarse-bed Material (Zab Transboundary Basin)

H. Bazian[1], M. Yasi[2]*

Recived: Jul.15, 2017 Accepted: Agu.19, 2017

Abstract

The main characteristic of the flow in coarse-bed rivers are the development of an armor layer during low to mean flow and the increase of channel instability and sediment load during flood flows. Hence, the process of flow and sediment transport is different and more complex in coarse-bed rivers than in sand-bed rivers. The main aim of the present study is to evaluate different mode of sediment transport (i.e. bed load, suspended load, and total load) from hydrometric and hydraulic methods, in coarse-bed river reaches. Three river reaches in the Zab transboundary river basin (Drebkeh,Gerjal, and Briso) were selected as representatives of coarse-bed rivers. In each of these reaches, river survey and characteristics of surface and subsurface layers were determined. A sediment transport model (STM) was used to compute sediment load from different relationships. The flow characteristics were determined from the calibrated HEC-RAS flow model, as input to STM model. The sensitivity and reliability of the estimated sediment loads are examined under different flows and physical properties of bed materials. The results indicated that the sediment transport capacity is well predicted when the characteristics of the sub-surface bed layer are introduced. The relationship of Einstein (1950) is the best fitted for the calculation of suspended loads with an average error of -91% in the three river reaches. With the lack of bed-load data, the order of 40% to 80% for the ratio of bed load to total load in coarse-bed rivers is considered. For the prediction of bed load, the methods of Schoklitsch (1934), Einstein (1950), and Parker (1990); and for total sediment load, the relationships of Engelund and Hansen (1967), Karim and Kenedy (1990), and Einstein (1950) are found to be more reliable, respectively.

Keyword: Coarse-bed river, Lavin River, Sediment transport, STM model, Zab River

1- Former M.Sc. Student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, University of Urmia, Iran
2- Associate Professor of River Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Karaj Campus,University of Tehran, Iran
(*-Corresponding Author Email: m.yasi@ut.ac.ir)