نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۷، مرداد – شهریور ۱۴۰۲، ص. ۵۰۳-۴۹۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 17, Aug.-Sep. 2023, p. 493-503

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی روش‌های محاسبه منحنی دبی-اشل بر اساس روابط مقاومت فرم بستر در ایستگاه هیدرومتری آبلو نکارود مازندران

علی باقری[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸

چکیده

در ایستگاه‌های هیدرومتری عمدتاً به دلیل مشکل اندازه‌گیری دبی در شرایط وقوع سیلاب، منحنی دبی – اشل از روی‌داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به شرایط غیر سیلابی استخراج می‌گردد و برای شرایط سیلابی برونیابی می شود. استفاده از منحنی دبی- اشل برونیابی شده برای محاسبه سیلاب ممکن است مقادیر کمتر یا بیشتری را تخمین بزند. علت این موضوع این است که در شرایط جریان سیلابی ممکن است نوع فرم بستر تشکیل‌شده تغییر یابد و باعث تغییر مقاومت در برابر جریان گردد. بنابراین به‌منظور پیش‌بینی بهتر منحنی دبی – اشل لازم است از روابطی استفاده شود که در آن‌ها مقاومت فرم بستر در نظر گرفته شود. در این تحقیق از روش‌های انیشتین – باربارو سا، شن، وایت، انگلوند و براونلی برای تکمیل قسمت انتهایی منحنی دبی – اشل حاصل از اندازه‌گیری در ایستگاه هیدرومتری آبلو واقع بر رودخانه نکارود و یا ساخت منحنی دبی – اشل در ایستگاه مذکور استفاده گردید. پس از برداشت داده‌های موردنیاز شامل مقاطع عرضی، دبی اندازه‌گیری شده و اشل متناظر با آن و همچنین منحنی دانه‌بندی مواد بستر در این ایستگاه و محاسبه دبی – اشل متناظر با آن توسط روش‌های ذکر شده در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰، مقایسه‌های آماری مختلف بین دبی‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده متناظر انجام گردید. نتایج نشان داد روش انیشتین – باربارو سا دارای کمترین مقدار متوسط خطای مطلق ۶/۹ و متوسط جذر مربعات خطا ۲/۷ نسبت به سایر روش‌ها است.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه هیدرومتری آبلو، فرم بستر، مازندران، منحنی دبی- اشل، نکارود

مقدمه

نقش داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دبی رودخانه‌ها در برنامه‌ریزی منابع آب، کنترل سیلاب، مهندسی رودخانه و اجرای پروژه‌های آبخیزداری برای تمام کارشناسانی که به نحوی با علوم آب سروکار دارند مشخص است (وفاخواه و شجاعی، ۱۳۸۶). رابطهٔ دبی – اشل یک نوع معادلهٔ مقاومت در مقابل جریان است که برای تعیین دبی جریان درصورتی‌که عمق یا شعاع هیدرولیکی، شکل مقطع کانال، شیب، خصوصیات مواد بستر و دما مشخص باشد، به کار می‌رود (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). اندازه‌گیری دائمی دبی رودخانه‌ها حتی در شرایط عادی امری مشکل و هزینه‌بر است چه‌بسا در شرایط سیلابی به دلیل مشکلات اندازه‌گیری و خطرات احتمالی امکان‌پذیر نیست. بنابراین با اندازه‌گیری دائمی اشل که کم‌هزینه است دبی مواقعی را که اندازه‌گیری آن‌ها صورت نگرفته به دست آورد. معمولاً با چندین نوبت اندازه‌گیری هم‌زمان دبی و اشل متناظر در یک ایستگاه هیدرومتری یک رابطه ساده بین دبی رودخانه و رقوم سطح آب دست یافت. رابطه دبی – اشل برای قسمت‌هایی از رودخانه که در آن‌ها ایستگاه اندازه‌گیری وجود دارد، به‌طور تجربی تعیین می‌شود و تنها برای همین مقاطع و در دامنه اندازه‌گیری شده قابل کاربرد است (وفاخواه و شجاعی، ۱۳۸۶). در سیلاب‌های بزرگ اندازه‌گیری مستقیم دبی تقریباً غیرممکن است، لذا ترسیم قسمت انتهایی منحنی تجربی که معرف کمیت دبی‌های سیلابی است، اغلب با استفاده از روش‌های تجربی نظیر معادله مانینگ و با فرض ثابت بودن ضریب زبری انجام می‌گیرد. ازآنجایی‌که شرایط سیلابی در خیلی از رودخانه‌ها باعث تغییر فرم بستر و به‌تبع آن زبری بستر می شود، بنابراین استفاده از روش مذکور با فرض ثابت بودن n در دبی و اشل‌های مختلف که خود باعث

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: ali523b@yahoo.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.3.7.5

تردید است،

به‌منظور محاسبه منحنی دبی – اشل یا تکمیل قسمت‌های انتهایی آن صحیح به نظر نمی‌رسد. تاکنون روش‌های متعددی برای برآورد رابطه دبی – اشل در رودخانه‌های آبرفتی با در نظر گرفتن مقاومت فرم بستر علاوه بر مقاومت ذره ارائه‌شده است که ازجمله آن می‌توان روش‌های انیشتین – باربارو‌سا، شن، وایت و همکاران، انگلوند و براوانلی را نام برد. برای استفاده از روش‌های مذکور نه‌تنها لازم است شکل مقطع رودخانه در محل ایستگاه برداشت گردد بلکه نمودار دانه‌بندی مواد بستر نیز باید مشخص گردد (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۲). در جریان‌های با بستر ماسه‌ای متحرک ممکن است دو عمق جریان اتفاق بیفتد که این خاصیت معرف حالتی است که دبی با سرعت بیشتری نسبت به فرم بستر در حال تغییر است، در این حالت یک نوع تأخیر در تغییر فرم بستر که همواره باید با دبی جدید مطابقت نماید، ایجاد می‌شود. این پدیده باعث ایجاد ناپیوستگی در منحنی دبی – اشل خواهد شد که مقدار آن تابعی از زمان تغییر دبی بوده و مقدار ثابتی ندارد. (Gessler, 1998). برای به دست آوردن یک منحنی دبی– اشل قابل‌اعتماد، داده‌های دبی جریان از پایین‌ترین قسمت اشل تا اشل کامل باید در یک دوره زمانی طولانی در دسترس باشد (Kim and et al., 2016).

وفاخواه و شجاعی (۱۳۸۶) در پژوهشی به بررسی مناسب‌ترین رابطه دبی– اشل در ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی زاینده‌رود پرداختند و نتیجه گرفتند مناسب‌ترین رابطه دبی– اشل در این ایستگاه هیدرومتری از نوع توانی است و نشان دادند مناسب‌ترین زمان برای اندازه‌گیری دبی به‌منظور استخراج رابطه دبی– اشل ماه‌های تیر، آذر و اسفند است. اوژن و همکاران (۱۳۸۸) در تحقیقی به مقایسه روش‌های امتداد منحنی سنجه دبی به‌منظور برآورد دبی‌های متناظر با اشل‌های حداکثر در ۱۳ ایستگاه هیدرومتری در حوضه آبریز کرخه در استان لرستان پرداختند و نتیجه گرفتند که روش لگاریتمی دارای دقت بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها است و عمدتاً برای امتداد منحنی در ایستگاه‌های با دبی متوسط پایین مناسب است همچنین روش سرعت – سطح مقطع بعد از روش لگاریتمی مخصوصاً در ایستگاه‌های با دبی متوسط بالا، نتایج خوبی ارائه داد و روش‌های مانینگ و شزی کمترین دقت را داشتند.

شجاعیان و حسین زاده (۱۳۸۹) در تحقیقی به واسنجی روش‌های تجربی در برآورد رابطه دبی–اشل با توجه به فرم بستر (مطالعه موردی ایستگاه هیدرومتری عبدالخان) واقع بر روی رودخانه کرخه پرداختند و نتیجه گرفتند که روش وایت و همکاران در ایستگاه عبدالخان، رابطه دبی–اشل را دقیق‌تر نسبت به روش‌های دیگر برآورد می‌کند. قبادیان و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی پیش‌بینی رابطه دبی – اشل در ایستگاه هیدرومتری قورباغستان کرمانشاه را بر اساس روابط مقاومت فرم بستر موردبرر سی قرار دادند و نتیجه گرفتند که روش انیشتین – باربارو سا دارای کمترین مقدار متو سط خطای مطلق ۰/۳۱ و ۱/۴۶۸ مترمکعب بر ثانیه و متوسط جذر مربعات خطا ۰/۱۱۲ و ۰/۴۶۶ مترمکعب بر ثانیه به ترتیب در دو سال آبی ۸۷–۱۳۸۶ و ۸۸–۱۳۸۷ نسبت به سایر روش‌ها است. سایر روش‌های مذکور به ازای یک اشل ثابت، مقدار دبی جریان را بیش‌ازاندازه پیش‌بینی می‌کنند. مرآتی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی به واسنجی روش‌های استخراج رابطه دبی–اشل در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه رودخانه قره‌سو پرداختند و نتیجه گرفتند که شیب‌خط رگر سیونی بین مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده توسط روش انیشتین –باربارو سا در ایستگاه‌های قورباغ ستان و حسین‌آباد به ترتیب برابر با ۱/۰۲۹ و ۱/۱۸۲ است و توسط روش شن در ایستگاه‌های دوآب مرگ، خرس آباد و سرآسیاب به ترتیب برابر با ۱/۰۸ و ۱/۰۵۴ و ۰/۹۲۶ است. درحالی‌که برای سایر روش‌ها مقدار شیب‌خط رگرسیونی بسیار بیشتر از یک است. هم‌چنین میانگین خطا و مجذور مربعات خطا در روش‌های مناسب مذکور بسیار کمتر از سایر روش‌ها می‌باشد و در ایستگاه‌هایی با مواد بستر در شت‌دانه غالباً روش انیشتین –باربارو سا و در ایستگاه‌هایی با مواد بستر ریزدانه روش شن نسبت به سایر روش‌ها به ازای یک اشل ثابت، مقدار دبی جریان را نزدیک به دبی اندازه‌گیری پیش‌بینی می‌کند.

ملکی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به ارزیابی روش های محاسبه منحنی دبی– اشل در رودخانه‌های با فرم بستر ریپل پرداختند، نتایج حاصل از محاسبه پارامترهای آماری نظیر ریشه دوم میانگین مربعات خطا و متوسط درصد خطا در هر یک از روش‌ها نشان داد که روش شن با کمترین میزان RMSE و درصد خطا همراه بوده، بنابراین این روش منحنی دبی– اشل را با دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها برآورد می‌کند. ضمناً در حالتی که شکل بستر به‌صورت ریپل موازی و پولکی است، ضریب همبستگی به ترتیب حدوداً ۰/۸۷ و ۰/۴۳ به دست آمد. این موارد نشان می‌دهد روش شن در حالت شکل بستر موازی، دارای دقت بیشتری نسبت به حالت پولکی است. نوروزی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی پیش‌بینی رابطه دبی– اشل در رودخانه مند بوشهر با استفاده از هیبرید روش‌های Fuzzy و GMDH پرداختند و نتیجه گرفتند که مدل Fuzzy-GMDH دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی دبی روزانه نسبت به دو روش RBF و ANFIS است.

باتاچاریا و سولوماتین به بررسی ارتباط بین دبی و تراز آب با استفاده از داده‌های ۹ ایستگاه هیدرومتری رودخانه باگیراتی در هند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد بهترین مدل تهیه‌شده در حالت بدون شکل بستر، مدل توانی با ضریب تعیین ۰/۹۸۸ است. اعتبار سنجی مدل نشان داد که مدل تهیه شده دارای درصد خطای نسبی کمی است. چنانچه مقدار قابل‌توجهی از داده‌های اندازه‌گیری دبی– اشل در دسترس باشند با استفاده از مدل‌های شبکه

عصبی مصنوعی می‌توان رابطه بین دبی و رقوم سطح آب برقرار نمود (Bhattacharya and Solomatine, 2000). شاو روش‌های مانینگ و شزی را جهت امتداد منحنی سنجه دبی معرفی می‌کند و روش مانینگ را نسبت به روش شزی در امتداد منحنی دبی- اشل برتر می‌داند (Shaw, 1994). چاباک و مک گین روابط دبی- اشل جریان خروجی از دریاچه کلیر در کانادا را مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که شکل منحنی دبی- اشل رابطه معنی‌داری با هندسه جریان و پارامترهای هیدرولیکی جریان در این دریاچه دارد (Chubak and Mc Ginn, 2002). لی و همکاران اندازه‌گیری‌های دبی سیلابی از راه دور به‌وسیله رادار را با دبی‌های برآوردی به‌وسیله منحنی‌های سنجه دبی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که فن سنجش‌ازدور در اندازه‌گیری دبی رودخانه به‌ویژه رودخانه‌های بزرگ مؤثر بوده و از کارایی بالایی برخوردار است (Lee and et al., 2002).

اشمیت و گارسیا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و مقایسه آن با روش‌های تجربی دبی - اشل، روش‌هایی را برای تعدیل منحنی‌های دبی - اشل و اصلاح آن‌ها به‌منظور سازگاری بیشتر با مقادیر اندازه‌گیری ارائه کردند. آن‌ها اظهار داشتند که علت اختلاف زیاد مقادیر پیش‌بینی توسط منحنی‌های دبی - اشل با مقادیر واقعی در برخی موارد، اعمال فرضیات ساده کننده‌ای است که در هیدرودینامیک جریان در نظر گرفته شده است. لذا با تغییر و تعدیل فرض‌های اصلی ازنظر هیدرودینامیک، روش‌های تصحیح و تعدیل منحنی دبی - اشل در حالت جریان غیریکنواخت و غیرماندگار را مورد بحث قرار دادند و شرایطی که این فرض‌ها باعث ایجاد خطا می‌شوند را تجزیه‌وتحلیل نمودند (Schmidt and et al., 2003). زاکوان و همکاران در تحقیقی به توسعه روابط دبی- اشل با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی پرداختند و نتیجه گرفتند که قابلیت اطمینان دبی پیش‌بینی‌شده از منحنی به دقت روش مورداستفاده در توسعه رابطه دبی - اشل بستگی دارد (Zakwan and et al., 2017).

بیربال و همکاران در پژوهشی به مدل‌سازی پیش‌بینی رابطه دبی- اشل با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) پرداختند، آن‌ها نتایج مدل GEP را با روش سنتی منحنی دبی- اشل (SRC) مقایسه کردند. چهار پارامتر آماری یعنی ضریب همبستگی پیرسون (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای نسبی مطلق (MARE) و کارایی نش - ساتکلیف (NSE) برای ارزیابی عملکرد مدل GEP و روش SRC استفاده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که به‌طورکلی، مدل GEP با R^2 برابر ۰/۹۹، RMSE برابر ۰/۱۰۴، MARE برابر ۰/۰۷۶ و NSE برابر ۰/۹۵۷ بسیار خوب عمل می‌کند (Birbal and et al., 2021). هدف اصلی از این تحقیق ارائه روش مناسب برای تکمیل قسمت انتهایی منحنی دبی- اشل اندازه‌گیری شده مربوط به شرایط سیلابی و محاسبه رابطه دبی - اشل با در نظر گرفتن اثر زبری ناشی از فرم بستر علاوه بر زبری مربوط به ذره در ایستگاه هیدرومتری آبلو نکارود در استان مازندران است.

مواد و روش‌ها

ایستگاه هیدرومتری آبلو بر روی رود خانه نکارود در طول جغرافیایی ′۱۷ °۵۳ شرقی و عرض جغرافیایی ′۳۸ °۳۶ شمالی و ارتفاع ۶۹ متر از سطح دریا قرار گرفته است. رودخانه نکارود ۱۴۵ کیلومتر طول دارد و از ارتفاعات شاه کوه بالا واقع در جنوب غربی استان گلستان سرچشمه می‌گیرد، رژیم این رودخانه در سراب برفی- بارانی و در بخش میانی و پایاب بارانی - برفی تا بارانی است. متوسط درازمدت آبدهی سالانه رودخانه ۱۱۶/۷ میلیون مترمکعب است. تجهیزات این ایستگاه اشل، تله‌فریک و لیمنوگراف است. مساحت حوزه آبخیز نکارود ۱۹۲۲ کیلومترمربع است. منطقه دارای اقلیم مرطوب با تابستان گرم و زمستان کمی سرد است. قسمتی از اطلاعات موردنیاز این تحقیق شامل منحنی دبی- اشل اندازه‌گیری شده و مقطع عرضی رودخانه در محل ایستگاه با مراجعه به سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران تهیه شد. شکل ۱ مقطع عرضی رودخانه را در محل مذکور در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نشان می‌دهد.

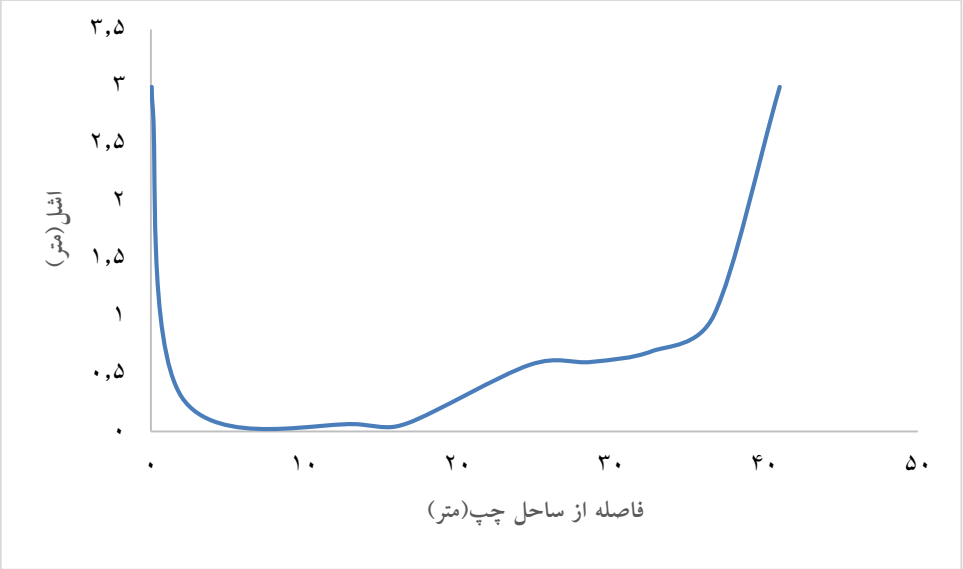
برای ترسیم منحنی دانه‌بندی از مواد بستر رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری با نمونه‌بردار هلی- اسمیت نمونه‌برداری شد و آزمایش دانه‌بندی روی آن‌ها انجام گردید. به‌منظور استخراج داده‌های مربوط به مواد بستر، منحنی دانه‌بندی متوسط از روی نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی ترسیم گردید (شکل ۲). همچنین آزمایش تعیین وزن مخصوص ویژه نشان داد که مواد بستر دارای G_s=۲/۶۵ و σ_g=۱/۶ است. در ادامه روش‌های برآورد رابطه دبی - اشل که در این تحقیق استفاده شد موردبرر سی قرار می‌گیرد. انیشتین و باربارو سا روشی را ارائه نمودند که در آن شعاع هیدرولیکی سطح مقطع جریان به دو بخش، یعنی شعاع هیدرولیکی مربوط به زبری فرم بستر R'' و شعاع هیدرولیکی مربوط به زبری ذره R' تقسیم می‌شود. در این روش ابتدا شعاع هیدرولیکی مربوط به زبری ذره R' برحسب متر فرض می‌شود و سرعت برشی مربوط به زبری ذره محاسبه می‌گردد. از رابطه زیر سرعت جریان محاسبه می‌شود (Einstein and Barbarossa., 1952).

$$\frac{V}{u'_*} = 5.75\ \mathrm{Log}[12.27\left(\frac{R'}{D_{65}}\right)x]) \qquad (۱)$$

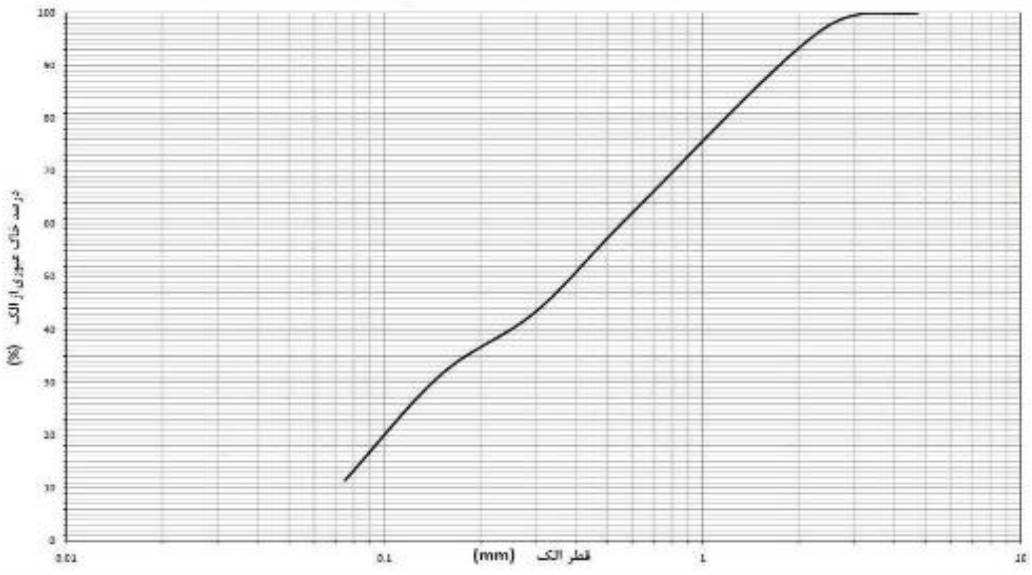
$$u'_* = \sqrt{gR's} \qquad (۲)$$

در این رابطه $u'_* = \sqrt{gR'S}$ سرعت برشی مربوط به زبری ذره است، D_{65} اندازه‌ای است که ۶۵٪ وزنی مواد کوچک‌تر از آن هستند و x فاکتور تصحیح است که بیانگر رژیم جریان است که خود تابعی از D_{65} و ضخامت لایه ورقی مرزی δ است. در این روش زبری مربوط

به فرم بستر"R متناسب است با میزان حمل رسوبات در طول کانال که تابعی از شدت تنش است. تابع شدت تنش که پارامتری بدون بعد است از روابط زیر تعیین می‌گردد.



شکل ۱- مقطع عرضی رودخانه نکارود در محل ایستگاه هیدرومتری آبلو در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مواد بستر در محل ایستگاه هیدرومتری آبلو

$$f(\Psi') = 43.394\Psi'^{-1.1215} \quad \Psi' \le 2.5 \qquad \text{اگر} \quad (۳)$$

$$f(\Psi') = 23.524\Psi'^{-0.4254} \quad \Psi' > 2.5 \qquad \text{اگر} \quad (۴)$$

$$\Psi' = \frac{(G_S-1)D_{35}}{R's} \qquad (۵)$$

پس از تعیین تابع شدت تنش، سرعت برشی مربوط به زبری فرم بستر u_*''و شعاع هیدرولیکی مربوط به زبری فرم بستر "R از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\frac{V}{u_*''} = f(\Psi') \qquad (۶)$$

$$u_*'' = \sqrt{gR''s} \qquad (۷)$$

شعاع هیدرولیکی سطح مقطع جریان برابر است با "R=R'+ R. از روی مشخصات مقطع رودخانه، با معلوم بودن R عمق جریان و سطح مقطع محاسبه می‌شود و نهایتاً دبی جریان از حاصل‌ضرب سطح مقطع در سرعت محاسبه‌شده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. سپس محاسبات فوق با 'R جدید تکرار شود.

روش شن برای محاسبه رابطه دبی – اشل مشابه روش انیشتین – باربروسا است، با این تفاوت که در این روش سرعت برشی مربوط به زبری فرم بستر $u_*^{"}$ برای $\Psi' > 10$ مطابق روابط زیر تعیین می‌شود (Shen., 1962).

$$\frac{u_*^{"}}{V} = 0.03 + 0.111\text{Log}\frac{\Psi'}{\lambda} \quad 1 < \frac{\omega D_{65}}{v} < 10 \qquad (۸)$$ اگر

$$\frac{u_*^{"}}{V} = 0.065 - 0.09\text{Log}\frac{\Psi'}{7.12} \quad \frac{\omega D_{65}}{v} > 100 \qquad (۹)$$ اگر

در روابط بالا $\lambda = \sqrt{\frac{\omega D_{65}}{v}}$ و ω سرعت سقوط D_{65} است. همچنین برای $\Psi' < 10$:

$$\frac{u_*^{"}}{V} = 0.03 - 0.111\text{Log}\frac{\Psi'}{7.12} \qquad (۱۰)$$

وایت و همکاران روابط زیر را برای محاسبه دبی– اشل متناظر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی ارائه کردند (White., 1979).

$$Y_{gr} = \left[\frac{u_*^n}{\sqrt{(G_S - 1)g\, D_{35}}}\right]\left[\frac{V}{5.66\text{Log}(\frac{10R}{D_{35}})}\right]^{1-n} \qquad (۱۱)$$

$$Y_{gr} = (Y_{fg} - Y_{cr})\left(1 - 0.76(1 - e^{-p})\right) + Y_{cr} \qquad (۱۲)$$

در روابط بالا Y_{gr} پارامتر حرکت است. Y_{fg} از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Y_{fg} = \left[\frac{u_*}{\sqrt{(G_S - 1)g\, D_{35}}}\right] \qquad (۱۳)$$

مقادیر n و Y_{cr} به‌صورت زیر تعیین می‌گردد. برای حالتی که $1 < D_* < 60$ باشد داریم.

$$n = 1 - 0.56\text{Log}D_* \qquad (۱۴)$$

$$Y_{cr} = \frac{0.23}{\sqrt{D_*}} + 0.14 \qquad (۱۵)$$

و برای حالتی که $D_* \geq 60$ باشد مقادیر n و Y_{cr} به ترتیب صفر و ۰/۱۷ است. مقدار D_* و P از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$D_* = D_{35}\left[\frac{(G_s - 1)g}{\vartheta^2}\right]^{1/3} \qquad (۱۶)$$

$$P = [\log(D_*)]^{1.7} \qquad (۱۷)$$

انگلوند با تقسیم شیب خط انرژی به دو قسمت، یکی مربوط به زبری ذره و دیگری مربوط به زبری فرم بستر، رابطهٔ دبی – اشل در رودخانه‌های آبرفتی را به دست آورد. در این روش، ابتدا شعاع هیدرولیکی مربوط به زبری ذره 'R فرض می شود و مقدار θ' (پارامتر شیلدز مربوط به زبری ذره) محاسبه می‌گردد. برای محاسبه پارامتر شیلدز θ از روابط زیر استفاده می‌شود (Engelund., 1966).

$$\theta' = \frac{R'S}{(G_s - 1)D_{50}} \qquad (۱۸)$$

با توجه به مقدار θ' مقدار θ به‌صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$\theta = 1.581(\theta' - 0.06)^{0.5} \qquad \theta' < 0.55 \qquad (۱۹)$$

$$\theta = \theta' \qquad 0.55 < \theta' < 1 \qquad (۲۰)$$

برای $\theta' > 1$ رابطه زیر توسط براونلی پیشنهاد شده است (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷).

$$\theta = [1.425\theta'^{-1.8} - 0.425]^{-0.555} \qquad (۲۱)$$

با معلوم شدن θ شعاع هیدرولیکی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{\theta(G_s - 1)D_{50}}{S} \qquad (۲۲)$$

با معلوم بودن شعاع هیدرولیکی، عمق جریان و سطح مقطع جریان از روی مشخصات مقطع تعیین می‌گردد. همچنین سرعت جریان از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{V}{\sqrt{gR'S}} = 6 + 2.5\text{Ln}\frac{R'}{2.5D_{50}} \qquad (۲۳)$$

نهایتاً با معلوم بودن سرعت و عمق جریان دبی محاسبه می‌شود. روش براوانلی برای تعیین زبری رودخانه‌های آبرفتی در دو رابطهٔ زیر خلاصه می‌شود (Brownlie., 1983).

$$\frac{R}{D_{50}} = 0.3724q_*^{0.6539}\, S^{-0.2542}\, \sigma_g^{0.105} \qquad (۲۴)$$

$$\frac{R}{D_{50}} = 0.2836q_*^{0.6248}\, S^{-0.2877}\, \sigma_g^{0.08013} \qquad (۲۵)$$

در روابط بالا $q*$ از رابطه ۲۶ به دست می‌آید.

$$q* = \frac{q}{\sqrt{gD_{50}^3}} \quad (۲۶)$$

رابطهٔ ۲۴ برای رژیم جریان پائینی و رابطهٔ ۲۵ برای رژیم جریان بالایی کاربرد دارند. در این روش، پارامتری که رژیم‌های جریان را از هم متمایز می‌کند پارامتر بی‌بعد عدد فرود ذره است.

$$F_g = \frac{V}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} \quad (۲۷)$$

چنانچه شیب رودخانه از ۰/۰۰۶ بزرگ‌تر باشد رژیم جریان بالایی است، در غیر این صورت اگر رابطه ۲۸ برقرار باشد رژیم جریان بالایی و در صورت کوچک‌تر بودن رژیم جریان پایینی است.

$$F_g > 1.74\, S^{-\frac{1}{3}} \quad (۲۸)$$

در این تحقیق به‌منظور بررسی بیشتر و مقایسه دقیق‌تر روش‌های برآورد رابطه دبی- اشل، از پارامترهای آماری به شرح زیر استفاده شده است.

۱. R^2 و α که به ترتیب عبارت هستند از مجذور ضریب همبستگی (که از طریق رگرسیون خطی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و واقعی به دست می‌آید) و شیب خط رگرسیون، زمانی که عرض از مبدأ آن صفر باشد. دقت هر روش به پارامترهای فوق بستگی دارد. بدین‌صورت که هرچه R^2 و α به یک نزدیک‌تر باشند روش مذکور بهتر می‌تواند مقادیر دبی اندازه‌گیری شده را تخمین بزند.

۲. متوسط خطای مطلق (AME)

$$AME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}|Q_m - Q_c| \quad (۲۹)$$

جدول ۱- مقادیر دبی - اشل اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده با روش‌های مختلف در سال اندازه‌گیری

اشل (m)	دبی اندازه‌گیری شده (m^3/s)	انیشتین-باربروسا	شن	وایت	انگلوند	براونلی
۰,۲	۰,۶	۰,۵	۰,۳	۲,۵	۸,۸	۰,۲۵
۰,۳	۱,۶	۱,۵	۱,۳	۳	۱۰	۰,۵
۰,۴	۳	۲,۷	۲,۲	۴,۵	۱۹,۵	۰,۸۵
۰,۵	۵	۴,۸	۴,۵	۶,۲	۲۱,۱۶	۱,۸
۰,۶	۸	۷,۵	۷	۸	۲۲,۵	۲,۴
۰,۷	۱۲,۵	۱۰,۵	۷,۵	۹	۲۶	۲,۸
۰,۸	۱۷	۱۱,۲	۸	۹,۶۵	۳۴	۳,۵
۰,۹	۲۰	۱۴,۳۳	۱۱	۱۰,۵	۴۱	۴,۲
۱	۲۵	۱۷	۱۳	۱۱,۳	۵۱	۵,۵
۱,۲	۴۰	۲۹	۱۶	۱۲,۸۷	۶۵	۹,۵
۱,۴	۶۲	۴۵	۱۸	۱۹	۸۹	۱۱,۶
۱,۶	۸۸	۶۰	۲۰	۲۱,۵	۱۰۰	۱۵,۵۲
۱,۸	۱۱۰	۸۵	۲۱	۲۳	۱۱۲,۸	۲۱,۴
۲	۱۳۰	۱۲۵,۵۷	۲۲	۳۰	۱۳۹,۶	۲۷
۲,۲	۱۶۰	۱۴۸,۴۱	۲۵	۳۲	۱۶۸,۳۳	۳۱
۲,۴	۱۸۴	۱۸۰,۷۴	۳۰	۳۵	۱۸۵	۳۴,۷
۲,۶	۱۹۰	۱۸۷,۸	۳۱	۳۸	۲۱۲,۱۱	۴۵

در رابطه بالا Q_m دبی اندازه‌گیری شده و Q_c دبی محاسبه‌شده متناظر با آن است.

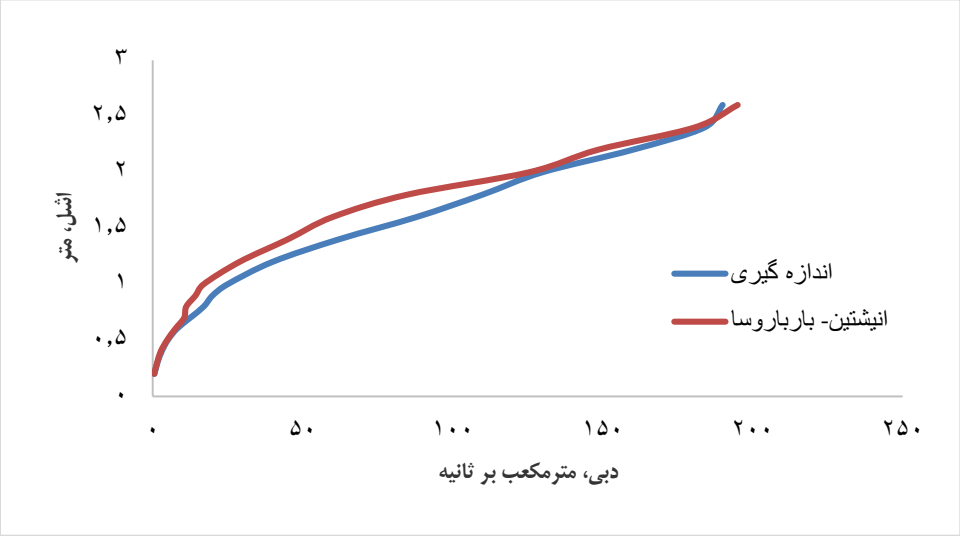
۳. متوسط جذر مربعات خطا (RMSE)

$$RMSE = \frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_m - Q_c)^2} \qquad (۳۰)$$

در هر روش هراندازه مقادیر محاسبه‌شده AME و RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد دقت روش برای تخمین رابطه دبی – اشل اندازه‌گیری شده بالاتر است.

نتایج و بحث

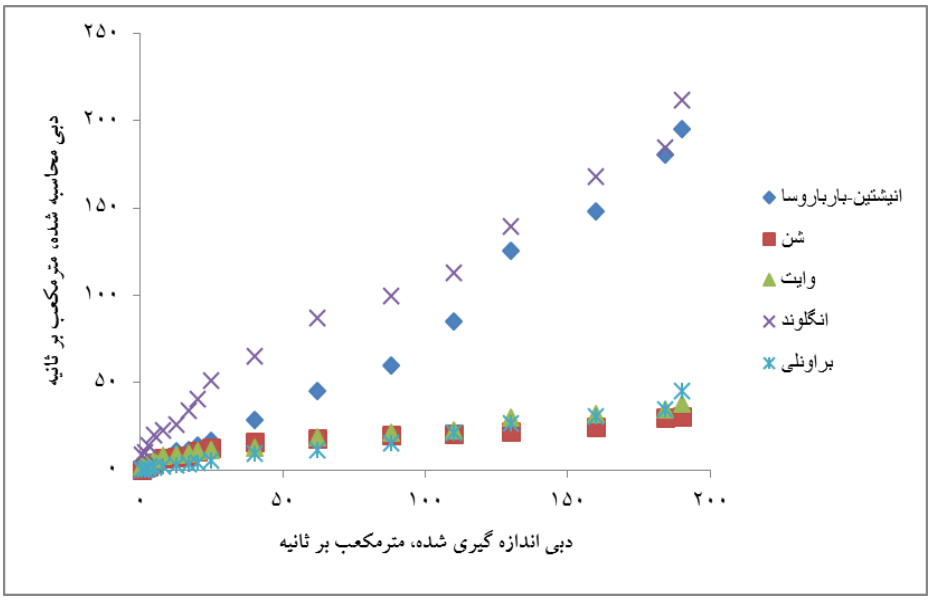
در جدول ۱ مقادیر دبی – اشل اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده با روش‌های مختلف در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ ارائه شده است. مقادیر جدول ۱ نشان می‌دهند که روش‌های شن و براونلی به ازای یک اشل مشخص مقادیر دبی را خیلی کمتر محاسبه کرده‌اند. همچنین روش انگلوند به ازای یک اشل مشخص مقادیر دبی را بیشتر محاسبه کرده و روش وایت به ازای یک اشل مشخص، در اشل‌های پایین مقادیر دبی را بیشتر و در اشل‌های بالا مقادیر دبی را کمتر محاسبه کرده است. برای نمونه در شکل ۳ مقادیر دبی – اشل اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر محاسبه شده به روش انیشتین – باربارو سا نشان داده شده است. روش انیشتین – باربارو سا مطابق شکل ۳، منحنی دبی – اشل را نسبتاً خوب پیش‌بینی می‌کند. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان داد که بر اساس روش پیشنهادی عطاالله رژیم جریان در این مقطع از رودخانه در محدوده رژیم پایینی قرار می‌گیرد (Athaaullah, 1968). عدم مشاهده ناپیوستگی در رابطه دبی– اشل به این دلیل است که تغییر رژیم جریان از پایینی به بالایی در این رودخانه اتفاق نمی‌افتد. به عبارتی، تغییر فرم بستر که باعث عدم پیوستگی رابطه دبی– اشل می شود چندان قابل‌ملاحظه نیست. در رژیم جریان پایینی، مقاومت در مقابل جریان زیاد است و افزایش مقاومت بیشتر ناشی از زبری مربوط به فرم بستر می‌باشد. روش انیشتین – باربارو سا نتایج قابل قبولی برای حالتیکه بستر رودخانه دارای فرم تلماسه یا بستر صاف باشد، می‌دهد که در این تحقیق نیز این موضوع مورد تأیید قرار گرفت. ازآنجایی‌که اندازهٔ ذرات مواد بستر رودخانه نکارود در محل ایستگاه آبلو در دامنه اندازه ذرات مواد رسوبی مورداستفاده در رابطهٔ براونلی (۰٫۸۸ تا ۲٫۸ میلی‌متر) قرار نمی‌گیرد، این روش نتایج نسبتاً خوبی را ارائه نمی‌دهد.



شکل ۳- مقایسه دبی – اشل اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده به روش انیشتین – باربارو سا

همان‌گونه که در بالا اشاره شد اعداد و ارقام جدول ۱ و شکل ۳ نشان داد که روش انیشتین– باربارو سا بهتر از سایر روش‌ها رابطه دبی– اشل را پیش‌بینی می‌نماید بااین‌وجود به‌منظور بررسی بیشتر و مقایسه دقیق‌تر، مقایسه‌های آماری بین روش‌های برآورد رابطه دبی– اشل انجام شد. برای به دست آوردن مقادیر R^2 و α در نرم‌افزار اکسل تغییرات مقادیر دبی اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر محاسبه شده با هر روش محاسباتی به ازای یک اشل یکسان مطابق شکل ۴ ترسیم شدند. خلاصه نتایج آماری همراه با ذکر هر روش در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود همه روش‌ها تقریباً R^2 بالایی دارند. بااین‌وجود، سایر پارامترهای آماری نشان می‌دهند که در

روش انیشتین – باربا روسا متوسط خطای مطلق و متوسط جذر مربعات خطا از بقیه روش‌ها کمتر ا ست. همچنین شیب خط رگر سیون بین مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده با روش انیشتین –باربا روسا نزدیک به یک است.



شکل ٤- تغییرات مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده به روش‌های مختلف

جدول ۲- مقایسه روش‌های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری در سال اندازه‌گیری

روش محاسبه	R^2	α	RMSE	AME
انیشتین–باربا روسا	۰,۹۸۲	۰,۹۶	۲,۷	۶,۹
شن	۰,۹۰۷	۰,۱۸	۱۸	۴۸,۱
وایت	۰,۹۷۷	۰,۲۱	۱۷,۳	۴۶,۶
انگلوند	۰,۹۸۷	۰,۹۴	۴	۱۴,۶
براونلی	۰,۹۸۰	۰,۲	۱۷,۴	۴۹,۳

نتیجه‌گیری

رابطه دبی – اشـل ازجمله اطلاعات پایه‌ای برای محاسـبات گوناگون هیدرولوژیک، هیدرولیکی و ر سوب رودخانه‌ها و کانال‌های با بستر خاکی است که غالباً به‌طور تجربی در ایستگاه‌های هیدرومتری و تنها با در نظر گرفتن زبری ذره و بدون در نظر گرفتن اطلا عات ر سوب، در شرایط غیر سیلابی تعیین می‌شود. در این تحقیق به‌منظور ارائه یک روش منا سب برای پیش‌بینی رابطه دبی – ا شل و تکمیل رابطه مذکور برای شرایط سیلابی در ایستگاه آبلو واقع بر روی رودخانه نکارود پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به دانه‌بندی، خصـوصـیات مواد بسـتر، داده‌های دبی – اشـل اندازه‌گیری شـده و شـکل مقطع برداشت شده رودخانه در سال آبی ۱۴۰۱–۱۴۰۰ از روش‌های انیشتین –باربا رو سا، شن، وایت، انگلوند و براونلی ا ستفاده شد. مقایسه‌های آماری مختلف نشـان داد که شـیب خط رگرسـیونی بین مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده توسط روش انیشتین–باربا روسا ۰,۹۶ و روش انگلوند ۰,۹۴ است. در حالیکه برای سایر روش‌های موردمطالعه در این تحقیق مقدار شـیب خط رگرسـیونی کمتر از ۰,۲۱ اسـت. همچنین میانگین خطا و مجذور مربعات خطا در روش انیشـتین – باربا رو سا کمتر از سایر روش‌ها ا ست. هرچند همه روش‌ها ضریب همب ستگی خوبی را ارائه می‌دهند، اما روش انی شتین – باربا رو سا با

دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های موردنظر این تحقیق برای محاسبه و یا تکمیل رابطه دبی – اشل در شرایط سیلابی در ایستگاه هیدرومتری آبلو نکارود کاربرد دارد.

منابع

وفاخواه، م. و شجاعی، غ. ۱۳۸۶. تعیین مناسب‌ترین رابطه دبی– اشل در ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی زاینده‌رود. مجله علوم و فنون کشاورزی. ۱۱(۴۲): ۳۲۲ – ۳۱۵.

شجاعیان، ز. و حسین زاده، ع. ۱۳۸۹. وا سنجی روش‌های تجربی در برآورد رابطه دبی – ا شل با توجه به فرم بستر (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری عبدالخان)، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت. مشهد. ایران

شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۷. هیدرولیک رسوب. چاپ اول، ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۱۹۹ – ۱۶۱.

قبادیان، ر. مرآتی، ا. و تیزرو، ع. ۱۳۹۲. پیش‌بینی رابطه دبی – اشل در ایستگاه هیدرومتری قورباغستان کرمانشاه بر اساس روابط مقاومت فرم بستر. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۷(۶۳): ۷۰ – ۶۱.

اوژن، م. مهدوی، م. خلیقی، ش. و حقی آبی، ا. ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های امتداد منحنی سنجه دبی به‌منظور برآورد دبی‌های متناظر با اشل‌های حداکثر. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۴(۵۴): ۲۵ – ۱۷.

مرآتی، ا. قبادیان، ر. و تیزرو، ع. ۱۳۹۲. وا سنجی روش‌های ا ستخراج رابطه دبی–اشل در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه رودخانه قره سو. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع غذایی). ۲۷(۶): ۱۲۲۴ – ۱۲۱۶.

ملکی، پ. کتابداری، م. صمدی، ح. و ملکی، د. ۱۳۹۴. ارز یابی روش‌های محاسبه منحنی دبی – اشل در رودخانه‌های با فرم بستر ریپل. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۹(۴): ۸۱۹ – ۸۱۰.

–نوروزی، گ. محمدپور، ر. والی‌پور، ع. ترابی، ع. و احمدی، م. ۱۳۹۴. پیش‌بینی رابطه دبی – اشل در رودخانه مند بو شهر با استفاده از هیبرید روش‌های Fuzzy و GMDH. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۶(۵۹): ۵۲ – ۴۴.

Athaaullah, M. 1968. Prediction of Bed Forms in Erodable Channels. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Eng., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.

Bhattacharya, B. and Solomatine, D.P. 2000. Application of artificial neural network in stage-dicharge relationship. 4th International conference on Hydroinformatics. Iowa city, USA.

Birbal, P., Azamathulla, H., Leon, L., Kumar, V. and Hosein J. 2021. Predictive modelling of the stage–discharge relationship using Gene-Expression Programming. Journal of Water Supply. 21(7): 3503–3514.

Brownlie, W. R. 1983. Flow depth in sand–bed channels. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 109(7): 959-990.

Chubak, N. J. J. and Mc Ginn, R. A. 2002. Evaluating outlet flow for Clear Lake, Riding Mountain National Park, Manitoba: A rating curve based on lake levels. Annual Meeting of the Canadian Association of Geographers, Toronto, Ontario.

Einstein, H. A. and Barbarossa, N. L. 1952. River channel roughness. Trans. ASCE 117: 1121-1132.

Engelund, F. 1966. Hydraulic resistance of alluvial stream. Journal of Hydraulic Division. ASCE 92: 315-326.

Gessler, D., Gessler, J. and Watson, C. 1998. Prediction of Discontinuity in Stage- Discharge Rating Curves. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 124(3): 243-252.

Kim, S. E., Shin, J., Seo, I.W. and Lyu S. 2016. Development of stage-discharge rating curve using hydraulic performance graph model. Procedia Engineering. Elsevier. 154, 334–339.

Lee, M.C., Leu, J. M., Lai, C. J., Plant, W. J., Keller, W.C. and Hayes K. 2002. Non-contact flood discharge measurements using X-band pulse radar (II) Improvements and applications. J. Flow Measurement and Instrum. 13: 271–276.

Schmidt, A. R. and Garcia, M. H. 2003. Theoretical Examination of Historical Shifts and Adjustments to Stage-Discharge Rating Curve. World water & environmental resources congress. Pennsylvania, USA: 223-233.

Shen, H.W. 1962. Development of Bed roughness in Alluvial Channels. Journal of Hydraulic Division. ASCE 88: 275-289.

Shaw, E. M. 1994. Hydrology in Practice. 3rd ed., T. J. Press, London.

White, W., Paris, E. and Bettess R. 1979. A New General Method for Prediction the Frictional Characteristics of Alluvial Streams. Wallingford, Rebort No, 187, Engeland.

Zakwan, M., Muzzammil, M. and Alam J. 2017.

Developing stage-discharge relations using optimization techniques. Aquademia: water. Environment and Technology 1 (2), 05.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 17, Aug.-Sep. 2023, p. 493-503

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۷، مرداد - شهریور ۱۴۰۲، ص. ۵۰۳-۴۹۳

Assessment of Estimation Methods of Stage – Discharge Rating Curve According to Bed Form Resistance Equations in Nekarud Ablo Hydrometry Station, Mazandaran

A. bagheri[1]*

Recived: Dec.22, 2022 Accepted: Mar.09, 2023

Abstract

Stage – discharge rating curve is mainly developed from measured data in any hydrometry station. Measured data usually obtain in low to medium flow discharge, because in most cases it is very difficult to measure the flow discharge during flood. Therefore, the stage–discharge is extrapolated beyond the measured data to compute the flood which may estimate low or higher value. This is because during the high flow, the bed form is developed which causes the flow resistance to change. In order to establish a better stage – discharge rating curve, it is important to apply methods which consider the bed form resistance. In this research, Einstein-Barbarossa, Shen, White, Engelund and Brownlie methods were used to complete the final part of the Stage – discharge rating curve obtained from the measurement at the Ablo hydrometry station located on the Nekarud River or to construct the Stage – discharge rating curve at the mentioned station. After collecting the required data including river cross section, discharge and related stage and bed material gradation in this station and calculating the corresponding Stage – discharge using the mentioned methods in the water year 2021-2022, various statistical comparisons were made between calculated and measured discharges. The results showed that the Einstein-Barbarossa method has the lowest absolute mean error of 6.9 and minimum root mean square error of 2.7 compared to other methods.

Keywords: Ablo hydrometry station,, Bed form, Nekarud, Mazandaran, Stage-discharge rating curve

1 -Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran
(*-Corresponding Author Email: ali523b@yahoo.com)