مقاومت در برابر جریان در رودخانه‌های با بستر شنی

حسین افضلی‌مهر، منوچهر حیدرپور و سیدحسین فرشی[۱]

چکیده

در این پژوهش با در نظر گرفتن پارامترهای کلی همچون سرعت متوسط جریان در چند سطح مقطع از رودخانه گاماسیاب واقع در اطراف نهاوند، پارامترهای موضعی مانند سرعت متوسط نقطه‌ای در هر نیم‌رخ سرعت جریان و توزیع نیم‌رخ سرعت بر اساس تئوری لایه مرزی، مقاومت در برابر جریان و عوامل مؤثر بر آن، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای جریان‌های یک‌نواخت و غیر یک‌نواخت بررسی شده است.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که هر گونه تغییر در شکل تابع لگاریتمی توزیع جهانی سرعت با منظور کردن فاکتور شکل سطح مقطع رودخانه و یا ضریب تعدیل زبری مواد بستر برای قطر مشخصه رودخانه تأثیری بر پیش‌بینی مقاومت در مقابل جریان ندارد. در حالی که ارائه مقدار ثابت لگاریتمی (عرض از مبدأ) معادله توزیع جهانی سرعت به صورت تابعی از پارامترهای عدد فرود و پارامتر شیلدز می‌تواند تا حدی برآورد مقاومت در برابر جریان را بهبود بخشد. هم‌چنین، در نظر گرفتن فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری در معادلات نمایی، پیش‌بینی مقاومت دربرابر جریان را بهبود نمی‌بخشد. از سوی دیگر، به کارگیری مشخصات لایه مرزی چون ضخامت و اندازه حرکت لایه مرزی در نیم‌رخ سرعت، خطر هم‌بستگی ساختگی را در معادله پیشنهادی برای مقاومت در برابر جریان منتفی می‌سازد. معادله پیشنهادی حاصل از اندازه‌گیری‌های نیم‌رخ سرعت جریان غیر یک‌نواخت در رودخانه گاماسیاب، نشان می‌دهد که عمق جریان آب، حداکثر سرعت جریان واقع در سطح آب و شیب خط انرژی از عوامل مؤثر بر مقاومت در برابر جریان می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: *فاکتور شکل، ضریب تعدیل زبری، ضخامت و اندازه حرکت لایه مرزی، رودخانه‌های شنی*

---

۱. به ترتیب استادیاران و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

مقدمه

از آن جا که معادله‌های حاکم بر هیدرولیک رودخانه بر اساس رودخانه‌های با شیب ملایم بنا شده‌اند، کاربرد این روابط برای رودخانه‌های مناطق کوهستانی که دارای شیب تندی هستند، در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان با خطای زیادی رو به روست. هیدرولیک مناطق کوهستانی از دو جنبه نیاز به بررسی دارد:

۱. تخمین نامناسب مقاومت در برابر جریان توسط روابط موجود، به ویژه در رودخانه‌های با بستر شنی و قلوه سنگی

۲. تخمین با خطای تا ۵۰۰٪ از مقدار دبی سیل توسط روش‌های موجود در مناطق کوهستانی (۵). از سوی دیگر، مدل‌سازی ریاضی جریان‌های یک بعدی در مجاری باز قویاً به دقت برآورد مقاومت در برابر جریان با توجه به نوع جریان (یک‌نواخت و غیر یک‌نواخت)، زبری بستر کانال یا رودخانه و مشخصات هیدرولیکی آنها وابسته است. بنابراین، هر نوع خطا در تخمین مقاومت در برابر آن می‌تواند تصویری غیر واقعی از توانایی‌های پروژه مورد بررسی به دست دهد.

مقاومت در برابر جریان در کانال‌های باز توسط روابط ضریب زبری مانینگ (n)، ضریب زبری شزی (C)، و فاکتور اصطکاک دارسی- ویسباخ (f) توصیف می‌شود. در میان این روابط فقط فاکتور اصطکاک دارسی- ویسباخ از نظر ابعادی صحیح است. بنابراین، در این پژوهش از آن برای بررسی مقاومت در برابر جریان استفاده می‌گردد. فاکتور اصطکاک دارسی- ویسباخ به صورت معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{u_m}{u_*} \qquad [۱]$$

در این رابطه، u_m سرعت متوسط جریان در سطح مقطع رودخانه، u_* سرعت برشی است که به صورت $u_* = \sqrt{ghS_f}$ بوده، در آن g شتاب ثقل، h عمق جریان آب و S_f شیب خط انرژی در کانال می‌باشد.

به نظر هندرسون (۸) برای جریان در کانال‌های باز، تنش درهم (Turbulent shear) و گران‌روی علت نیروی مقاومت در برابر جریان نیستند، بلکه آنها این نیرو را از منشأ خودشان که همان بستر و دیوارهای کانال است انتقال می‌دهند. بنابراین، مقاومت در برابر جریان به همان اندازه که به حضور کف کانال و دیوارهای آن بستگی دارد، به قدرت آشفتگی در آب نیز وابسته است. از آن جا که هدف این پژوهش بررسی رودخانه شنی گاماسیاب واقع در اطراف نهاوند می‌باشد، که در آن عرض رودخانه بسیار بزرگ‌تر از عمق آن است، از عمق جریان به جای شعاع هیدرولیکی برای محاسبه سرعت برشی در معادله توزیع جهانی سرعت استفاده می‌شود و بحث مقاومت در برابر جریان به بستر رودخانه محدود می‌گردد.

به طور کلی، دو نوع معادلهٔ مقاومت در برابر جریان تا کنون ارائه شده است. نوع اول کاملاً تجربی بوده و بر اساس برازش آماری گسترش یافته است. نوع دوم به صورت نیمه تجربی بوده و بر مبنای تئوری لایه مرزی شکل گرفته است (۲). در نوع دوم، با استفاده از طول اختلاط پراندل، فرض تنش برشی ثابت و معادله توزیع جهانی سرعت، معادله‌ای به صورت زیر ارائه می‌شود (۱۲):

$$\frac{u_m}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln\frac{h}{\kappa_s} + B \qquad [۲]$$

که در آن κ ثابت جهانی فون کارمن است و معمولاً ۰/٤ در نظر گرفته می‌شود (۱)، κ_s زبری معادل ذرات رسوب و B ثابت معادله است که به صورت پارامتر تعدیل عمل می‌کند.

با توجه به معادله ۲، هدف اصلی این پژوهش تأثیر فاکتور شکل به عنوان یک ضریب برای h در معادله ۲ است. فاکتور شکل در این مقاله به صورت $\psi = \sqrt{\frac{p}{w}}$ تعریف می‌شود، که در آن p محیط خیس شده رودخانه و w عرض بالای رودخانه می‌باشد. اثر ضریب تعدیل زبری به صورت $\kappa_s=6.8d_{84}$ در معادله ۲، برای بهبود پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان بررسی می‌شود. هدف بعدی این پژوهش بررسی تعدیل عرض از مبدأ یا ثابت B در معادله ۲ به کمک عدد فرود و نسبت پارامتر شیلدز به مقدار بحرانی پارامتر شیلدز در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این پژوهش از دو دسته داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده شده است. دسته اول داده‌های گزارش شده از ۱٤۰ رودخانه شنی واقع در کشورهای کانادا، آمریکا، انگلستان، نیوزیلند، ایرلند شمالی و ایتالیا است (۲). دسته دوم داده‌ها شامل ۲٤ نیم‌رخ سرعت اندازه‌گیری شده در شرایط جریان دائمی غیر یک‌نواخت، در امتداد محور مرکزی چهار بازهٔ ۵۰ متری رودخانه شنی گاماسیاب در اطراف نهاوند می‌باشد (۱).

در دستهٔ اول جریان در رودخانه‌ها یک‌نواخت در نظر گرفته شده است. بنابراین، مشخصات هیدرولیکی همچون سرعت جریان، عرض رودخانه و عمق جریان از یک سطح مقطع به سطح مقطع دیگر رودخانه تغییر نمی‌کند. جدول ۱ دامنه داده‌های اندازه‌گیری شده در ۱٤۰ رودخانه شنی در شرایط جریان یک‌نواخت را نشان می‌دهد. در دستهٔ دوم بازه‌ها در مسیری به طول ۱۲ کیلومتر به صورت پراکنده قرار دارند، که این خود باعث تنوع در بررسی رودخانه می‌باشد. لازم به یادآوری است، رودخانه گاماسیاب یکی از شاخه‌های اصلی رود کرخه است، که دارای بستر شنی با قطر متوسط d_{50}=23.3 mm، شیب تند تا ۰/۰۱۵۹ به صورت دائمی با منشأ چشمه‌ای می‌باشد. جدول ۲ دامنه داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در چهار بازه مورد بررسی در رودخانه گاماسیاب را نشان می‌دهد.

در این پژوهش برای اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای و تعیین نیم‌رخ سرعت، از یک دستگاه مولینه کوچک در عمق‌های مختلف هر یک از ۲٤ سطح مقطع رودخانه استفاده گردید (۵). از آن جا که در یک رودخانه ضخامت لایه مرزی تقریباً برابر عمق جریان است، برای تعیین هر نیم‌رخ سرعت به طور میانگین از ۱۵ سرعت نقطه‌ای از کف رودخانه تا سطح آب در هر مقطع استفاده گردید. هم‌چنین، در طول هر بازه ۵۰ متری شش نیم‌رخ سرعت به فواصل ثابت ده متری در امتداد محور اصلی رودخانه اندازه‌گیری شد. برای برداشت شیب بازه‌ها و سطح مقطع رودخانه یک دستگاه ترازیاب به کار رفت.

اندازه قطر مشخصه مواد رسوبی در رودخانه توسط روش ولمن (۱۳) تعیین گردیده که بر این اساس مقدار d_{84}=36.3 mm است. یادآوری می‌نماید، در بررسی مسئله مقاومت در برابر جریان، وزن ذرات مهم‌ترین اثر را دارد. بنابراین، هرچه قطر ذره بزرگ‌تر باشد، مقدار مقاومت در برابر جریان بیشتر خواهد بود. در این پژوهش به پی‌روی از مراجع هیدرولیک (۷)، قطر d_{84} به عنوان قطر مشخص مواد رسوبی رودخانه گاماسیاب انتخاب گردید. انحراف معیار قطر ذره رسوب برای چهار بازه مورد بررسی در رودخانه گاماسیاب ۰/۲٦ می‌باشد.

برخی از پژوهندگان مانند بری (۷)، استفاده مستقیم از قطر مشخص بستر نظیر d_{50} یا d_{84} را برای بسترهای شنی کافی ندانسته و پیشنهاد کردند که زبری معادل ذرات رسوب (κ_S) در معادله ۲ به صورت $\kappa_S=6.8d_{84}$ تعریف شود، که در آن ٦/۸ ضریب تعدیل زبری بستر است. در این گزارش علاوه بر ٦/۸، تأثیر مقادیر ۱/۵، ۲/۸، ۳/۵ و ۵/۱، که در مراجع هیدرولیک گزارش شده است، تجزیه و تحلیل می‌شود (۷).

در این پژوهش، برای تعیین سرعت برشی، که مهم‌ترین پارامتر در محاسبه مقاومت در برابر جریان است، علاوه بر روش لگاریتمی، از روش جدید ارائه شده توسط افضلی‌مهر و آنکتیل (۳) استفاده شد، که بر اساس آن به جای استفاده از بخشی از نیم‌رخ سرعت ($y/h<$ ۰/۲ که y فاصله از بستر رودخانه است) از تمام نیم‌رخ سرعت استفاده می‌گردد. بنابراین، فاکتور شکل نیم‌رخ سرعت به صورت زیر تعریف می‌شود (۹):

$$H=\frac{\delta_*}{\theta}=\frac{1}{1-C\frac{u_*}{u_{max}}} \qquad [۳]$$

ضریب C، در جریان با گرادیان فشار صفر (یک‌نواخت)، یک ثابت جهانی است، و می‌توان نشان داد که در این حالت $C=\frac{2}{\kappa}$ می‌باشد (κ، ثابت جهانی فون‌کارمن است). مقدار C، در جریان‌های با گرادیان فشار (غیر یک‌نواخت)، یک مقدار ثابت جهانی ندارد، زیرا عمق جریان در جهت جریان اصلی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

جدول ۱. دامنه پارامترهای اندازه‌گیری شده برای ۱۴۰رودخانه شنی خارج از ایران در شرایط جریان یک‌نواخت

پارامترها	دامنه تغییرات
u_m (m/s)	۰/۲۵–۳/۸
W (m)	۳/۰–۷۸
h (m)	۰/۲–۲/۵
d_{50} (mm)	۲/۷–۱۸۰
S	۰/۰۰۰۱–۰/۰۵۲

جدول ۲. دامنه پارامترهای اندازه‌گیری شده در چهار بازه از رودخانه گاماسیاب (d_{84} =۳۴/۳mm)در شرایط جریان غیر یک‌نواخت

پارامترها	دامنه تغییرات
h (m)	۰/۱۸۳–۰/۴۵۳
u_m (m)	۰/۵۱–۱/۱۹
W (m)	۵/۵–۱۲
A (m^2)	۱/۸۵–۳/۶۶
Q (m^3/s)	۱/۲۵–۳/۶
Fr	۰/۵۱–۰/۷۷
S	۰/۰۱۳۱–۰/۰۱۵۹
S_f	۰/۰۰۱۹۵–۰۰۵۶۴
u_{max} (m/s)	۰/۶۲–۱/۶۱۵

تغییر می‌کند. بنابراین، C بستگی به پراکنش داده‌های آزمایشگاهی دارد، که به نوع جریان (تند شونده یا کند شونده) وابسته است (۳). مقدار C، در جریان توسعه یافته متعادل، مستقل از عدد رینولدز و عدد فرود است. بنابراین، سرعت برشی را می‌توان با استفاده از مشخصات لایه مرزی با توجه به رابطه ۳ به صورت زیر تعیین کرد:

$$u_* = \frac{(\delta_* - \theta)u_{max}}{4.4\delta_*} \qquad [۴]$$

که در این جا ضخامت‌های جا به جایی δ_* و اندازه حرکت θ لایه مرزی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\delta_* = \int_0^h \left(1 - \frac{u}{u_{max}}\right) dy \qquad [۵]$$

$$\theta = \int_0^h \frac{u}{u_{max}} \left(1 - \frac{u}{u_{max}}\right) dy \qquad [۶]$$

در این پژوهش فرض می‌شود:

۱. اثر پوشش گیاهی در دیوارهای رودخانه قابل گذشت باشد.

۲. رودخانه‌ها بدون موانع رایج در بستر جریان مانند تخته سنگ‌ها و شکل‌های بستر رودخانه‌های شنی نظیر حوضچه (Pool) و برآمدگی (Riffle) هستند.

۳. رودخانه‌ها و بازه‌های مورد بررسی از لحاظ انتقال رسوب و فرسایش در تعادل می‌باشند. داده‌های اندازه‌گیری شده در ۱۴۰ رودخانه با بستر شنی در کشورهای ذکر شده (۲) در فوق، شامل عمق متوسط جریان، قطر میانه ذره رسوب، سرعت متوسط جریان، شیب رودخانه و عرض رودخانه به همراه پارامترهای هیدرولیکی مانند عدد فرود، پارامتر

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

شیلدز و فاکتور شکل به منظور گسترش و بررسی معادله‌های مقاومت در برابر جریان به کار می‌روند. پارامتر شیلدز به صورت $\tau_* = \tau_0 /[(\gamma_s - \gamma)d_{84}]$ تعریف می‌شود، که در حالت جریان یک‌نواخت تنش برشی بستر برابر $\tau_0 = \gamma hs$ و در جریان غیر یک‌نواخت برابر $\tau_0 = \rho u_*^2$ است. γ وزن مخصوص آب، ρ چگالی آب و ρ_s چگالی رسوب می‌باشد. پارامترهای دیگر قبلاً تعریف شده‌اند. معیار خوبی برازش داده‌ها برای هر معادله مورد بررسی، استفاده از معادله رگرسیون به صورت زیر است:

$$\hat{\Gamma} = b\Gamma + a \qquad [۷]$$

که در آن $\hat{\Gamma}$ مقدار پیش‌بینی شده مقاومت در برابر جریان توسط یک معادله انتخابی، Γ مقدار محاسبه شده مقاومت در برابر جریان توسط معادله ۱، b شیب خط رگرسیون و a عرض از مبدأ معادله رگرسیون است. بدیهی است یک معادله ایده‌آل دارای b=1 ، a=0 و ضریب تبیین $R^2=1$ می‌باشد.

نتایج و بحث

بحث در بارهٔ معادله‌های مقاومت در برابر جریان و متدولوژی توسعه آنها را می‌توان به شکل زیر دسته‌بندی کرد:

۱. مقاومت جریان یک‌نواخت

الف) معادله‌های نمایی

معادله‌هایی که در آنها مقاومت در برابر جریان تنها تابع عمق نسبی جریان یعنی $\frac{h}{\kappa_s}$ است، به صورت قابل توجهی در مراجع ارائه شده است (۲ و ۷). هدف این بخش از پژوهش بررسی توانایی پیش‌بینی معادله‌های نمایی با استفاده از داده‌های ۱۴۰ رودخانه شنی واقع در خارج کشور، با در نظر گرفتن تأثیر حضور و یا عدم حضور فاکتور شکل (ψ) و ضریب تعدیل زبری (۶/۸) می‌باشد. جدول ۳ معادله‌های نمایی مختلف به دست آمده توسط ۱۴۰ رودخانه شنی در این پژوهش را با در نظر گرفتن تأثیر حضور و یا عدم حضور فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری نشان می‌دهد. در معادله ارائه شده در ردیف ۱، اثر فاکتور شکل (ψ) اعمال شده است، در حالی که تأثیر فاکتور تعدیل زبری (۶/۸) در نظر گرفته نشده است. در معادله ارائه شدهٔ ردیف ۲، تأثیر هر دو عامل، یعنی فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری ملحوظ شده است. معادله ردیف ۳ بدون در نظر گرفتن دو عامل فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری بوده، تنها از عمق نسبی ($\frac{h}{\kappa_s}$) برای پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان استفاده می‌کند. سرانجام معادلهٔ ردیف ٤ فقط با اعمال اثر ضریب تعدیل زبری (۶/۸)، بدون در نظر گرفتن فاکتور شکل ارائه شده است.

همان گونه که از نتایج جدول ۳ دریافته می‌شود، در هر چهار معادله ضریب تبیین تقریباً یکسان است، و عرض از مبدأ چهار معادله تفاوت زیادی با یکدیگر نشان نمی‌دهند. اگرچه تأثیر فاکتور شکل در شیب معادله رگرسیون ردیف ۱ بیشتر از تأثیر ضریب تعدیل زبری در معادله ردیف ٤ است (این موضوع می‌تواند به شرایط حوزه آبریز رودخانه مورد نظر و تأثیر برخی عوامل اندازه‌گیری نشده نسبت داده شود)، ولی به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اثر فاکتور شکل (ψ) و ضریب تعدیل زبری (۶/۸) در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان در معادله‌های نمایی قابل گذشت است.

در ادامه، تلاش شد معادله‌های نمایی که در آنها افزون بر عمق نسبی ($\frac{h}{\kappa_s}$)، عدد فرود به عنوان پارامتر مستقل وجود دارد، در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان تجزیه و تحلیل گردد. جدول ٤ و نتایج آماری آن نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن عدد فرود به عنوان یک پارامتر مستقل، علاوه بر عمق نسبی، پیشرفت چشم‌گیری در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان ایجاد نمی‌شود. به علاوه، خطر هم‌بستگی ساختگی بین طرف چپ و راست معادله، که هر دو از سرعت متوسط جریان به صورت صریح استفاده می‌کنند، وجود دارد.

ب) معادله‌های نیمه لگاریتمی

معادله‌های توسعه یافتهٔ نیمه لگاریتمی مقاومت در برابر جریان در مهندسی رودخانه شکل کلی معادله ۲ را دارند. در این

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

جدول ۳. معادلات نمایی پیشنهادی برای مقاومت در برابر جریان و ضرایب خوبی برازش آنها

ردیف	R^2	a	b	معادلات
۱	۰/۱۰۳	۰/۵۳	۰/۸۹۳	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 1.563\left[\frac{\psi h}{d_{50}}\right]^{0.182}$
۲	۰/۱۰۳	۰/۵۳	۰/٦۲۹	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2.218\left[\frac{\psi h}{6.8d_{50}}\right]^{0.182}$
۳	۰/۱۰۲	۰/٦۱۷	۰/۸۵۱	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 1.553\left[\frac{h}{d_{50}}\right]^{0.182}$
٤	۰/۱۰۲	۰/٦۱۷	۰/۵۹۳	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2.228\left[\frac{h}{6.8d_{50}}\right]^{0.188}$

جدول ٤. معادلات توانی پیشنهادی برای مقاومت در برابر جریان با در نظر گرفتن عدد فرود و ضرایب خوبی برازش آنها

ردیف	R^2	a	b	معادلات
۱	۰/۲۷٤	۰/۳۱۲	۰/۹۵۲	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2.0\left[\frac{\psi h}{d_{50}}\right]^{0.192} F_r^{0.376}$
۲	۰/۲۷٤	۰/۳۱۲	۰/۹٦۰	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2.864\left[\frac{\psi h}{6.8d_{50}}\right]^{0.192} F_r^{0.376}$
۳	۰/۲۷٦	۰/۳۲۷	۰/۹٤٤	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 1.99\left[\frac{h}{d_{50}}\right]^{0.198} F_r^{0.377}$
٤	۰/۲۷٦	۰/۳۲۷	۰/۹٤۷	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2.9\left[\frac{h}{6.8d_{50}}\right]^{0.198} F_r^{0.377}$

بخش اثر فاکتور شکل، ضریب تعدیل زبری و تعدیل عرض از مبدأ (ثابت تابع لگاریتمی) در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان بررسی می‌شود. همچون معادله‌های نمایی، در این جا نیز چهار معادله با ملاحظه ضریب فون کارمن (κ=0.4) (٤)، و پارامتر شیلدز و مقدار بحرانی آن (τ_{*c}=0.03) در نظر گرفته شد. این مقدار پارامتر شیلدز بحرانی (τ_{*c})، قبلاً توسط کمیته پژوهش انجمن مهندسین عمران آمریکا (ASCE) (۲) تأیید شده است.

با استفاده از معادله ۲ و کاربرد کلیه مقادیر اندازه‌گیری شده در ۱٤۰ رودخانه شنی، به کمک نرم‌افزار SAS مشخص گردید که عدد فرود و نسبت پارامتر شیلدز بر مقدار بحرانی آن، برای پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان در هنگام کاربرد قانون نیمه لگاریتمی مؤثر می‌باشند. بر این اساس، معادله زیر برای جریان یک‌نواخت در رودخانه‌های شنی ارائه گردید:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2.03\log\frac{h}{d_{50}} + 2.96F_r - 0.18\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 0.79 \qquad (R^2=0.54) \qquad [۸]$$

لازم به یادآوری است که مقاومت در برابر جریان را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد، بلکه آن را می‌توان از طریق روابطی مانند معادله ۱ محاسبه نمود. بنابراین، ضریب تبیین R^2=۰/۵٤ نشان دهنده رابطه بین مقاومت در برابر جریان پیش‌بینی شده توسط معادله ۸، و محاسبه شده توسط معادله ۱ است. در حالی که شیب خط رگرسیون (b=۰/۹۹۱) و عرض از مبدأ خط

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

رگرسیون (a=۰/۰۲۹۸) با استفاده از معادله ۷ می‌باشند.

سپس تلاش شد تا اثر فاکتور شکل، که معمولاً بـه صـورت یک ضریب برای h در معادله‌های نیمه لگاریتمی ارائه می‌شـود، بررسی گردد. ضریب تبیین به دست آمده در ایـن حـالت هیـچ تغییری نسبت به معادله ۸ نشان نداد. هم‌چنین، در نظـر گرفتـن هم‌زمان فاکتور شکل به صورت ضریب برای h، و مقدار ٦/٨ به عنوان ضریب بـرای d_{50} در معادلـه ۸، هیـچ تغییـری در مقـدار ضریب تبیین نشان نداد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیـری کـرد کـه فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری هیـچ تـأثیری در پیش‌بینـی مقاومت در برابر جریان در معادله‌های نیمه لگاریتمی ندارند.

از نظر فیزیکی، عدد فـرود مقـاومت در برابـر جریـان را از طریق نوسانات سطح آزاد تحت تأثیر قرار می‌دهـد. ایـن مسـئله می‌تواند در رژیم زیر بحرانی و فوق بحرانی ملاحظه شـود (٦). برای عدد فـرود کمـتر از یـک در شـرایط جریـان یک‌نواخـت، تغییرات مقاومت در برابر جریان می‌تواند ناشی از دامنه تغییرات زبری نسبی کوچک ($\frac{h}{\kappa_s} > ١٥$) و بزرگ ($\frac{h}{\kappa_s} < ٤$) باشد.

از سوی دیگر، برای بررسی تأثیر عدد فرود و نسبت پـارامتر شیلدز به مقدار بحرانی آن ($\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$) در معادله ۲، داده‌ها به چـهار دسته بـه صـورت Fr <۰/۳، ۰/۳ < Fr <۰/٦، ۰/٦ < Fr <۰/۹ و Fr >۰/۹ تقسیم گردیدند. برای دسته‌های اول و دوم، تأثیر $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ بر مقاومت در برابر جریان در معادله ۸، بـه ترتیـب بـا ضرایـب تبیین R^2=۰/۳۸۹ و R^2=۰/۳، چندان نیست. زیـرا رودخانـه‌های شنی در دامنه Fr < ۰/٦ پـایدارتر از دامنـه Fr > ۰/٦ می‌باشـند (٦). از سوی دیگر، برای دسـته سـوم (۰/٦ < Fr <۰/۹) مقـدار $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ بیشترین تأثیر را در معادله ۸ با ضریـب تبییـن R^2=۰/٦١٤ نشـان می‌دهـد. براسـاس ایـن پژوهـش، بـرای دسـته ۰/٦ < Fr <۰/۹، هر قدر $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ بزرگ‌تر باشد، مقاومت در برابـر جریان کوچک‌تر خواهد بود. به نظر باترست (٦) این مسئله بـه این صورت قابل توضیـح اسـت کـه در آسـتانه حرکـت، ذرات رسوب فقط برای پرکردن فضاهای خالی بین یکدیگر جا به جـا می‌شوند، تا بتوانند یک سطح نسـبتاً همـوار را ایجـاد کننـد. در حالی که پس از آغـاز حرکـت مـواد رسـوبی، ذرات شـروع بـه شناور شدن در مسیر جریان آب کرده، در نتیجه برای انتقـال بـه انـدازه حرکـت بیشـتری نسـبت بـه شـرایط بسـترهای ثـابت (Fixed bed) نیاز خواهد بود.

سـرانـجـام، برای دسته چهارم (Fr >۰/۹)، تـأثیر $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ در معادله ۸ بـا ضریـب تبییـن R^2=۰/۲ معلـوم نیسـت. دلیـل ایـن موضوع دشوار بودن اندازه‌گیری دقیق و بـا کیفیـت قـابل قبـول پارامترهای هیدرولیکی در رودخانه‌های شنی با عمق جریان کـم و نوسانات زیاد سرعت در شرایط بحرانی و فرا بحرانـی اسـت که به طور چشم‌گیری دقت برآورد معادله ۸ را کاهش می‌دهـد. نزو و ناکاگاوا (١١) نشان دادند که اختلاف بسیاری بین سـاختار تلاطم دسته چهارم و سه دسته دیگر وجود دارد، به گونه‌ای کـه برای شرایط Fr >۰/۹، نوسانات تلاطـم در نزدیکـی سـطح آب بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از کاربرد تابع جـهانی نوسـانات قـائم سرعت است.

با ملاحظه معادله ۸ وضریب تبیین آن (R^2=۰/٥٤)، مشخص می‌شود که این معادله فقط ٥٤٪ از تغیـیرات مقـاومت در برابـر جریـان را نشـان می‌دهـد. علـت عـدم پیش‌بینـی بـهتر از ٥٤٪ مقاومت در برابر جریان را می‌توان در عوامل زیر جستجو کرد:

١. در رودخانه‌های با شیب تند (شـیب بیشـتر از ۰/۰۰۲)، بـا توجه به داده‌های مورد استفاده، تمام عوامل مؤثر بر تلفـات انرژی قابل شناسایی و تبیین نیستند (١٠).
٢. فرض یک‌نواختی جریان در رودخانه‌های با شـیب تنـد در عدد فرود بالا، به دلیل تغیـیرات زیـاد در مقیـاس زبـری و شرایط جریان قابل دست‌یابی نیست.
٣. روش‌های موجود برای برآورد سرعت متوسـط جریـان در یک مقطع قائم رودخانه بـرای شـرایط عمـق کـم و شـیب زیاد، که از ویژگی‌های رودخانه‌های کوهستانی درشت دانه اسـت، توسـعه نیافتـه‌اند. بنـابراین، کـاربرد آنـها بـه طـور چشم‌گیری در خطای تخمین و پیش‌بینی مقاومت در برابـر جریان مؤثر است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

٤. تخمین سرعت برشی بـا اسـتفاده از روش گرادیـان فشـار صفر ($u_* = \sqrt{ghS_f}$)، یک منبع بـزرگ خطـا و انحـراف مقـادیر پیش‌بینـی شـده مقـاومت در برابـر جریـان از مقدارمحاسبه شده آن توسط معادله ۱ است.

با حذف $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ و در نظر گرفتن تنها عدد فرود بـرای تعدیـل ثابت تابع لگاریتمی، توانایی پیش‌بینی معادله مقـاومت در برابـر جریان کاهش می‌یابد. در نتیجه، مناسب‌ترین معادلـه لگاریتمـی برای جریان یک‌نواخت معادلـه ۸ اسـت، کـه کـاربرد آن بـرای حدود ۰/٦ < Fr <۰/۹ قابل توصیه می‌باشد.

۲. مقاومت جریان غیر یک‌نواخت

در این بخش با استفاده از نیم‌رخ‌های سرعت اندازه‌گیـری شـده در رودخانه گاماسیاب، اثر فاکتور شکل، ضریب تعدیل زبـری و روش تخمین سرعت برشـی بـر مقـاومت در برابـر جریـان بـر اساس معادله ۱ بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از این بخـش بـر پایهٔ ٢٤ نیم‌رخ سـرعت انـدازه‌گیـری شـده در مقـاطع مختلـف رودخانـه گاماسـیاب اسـتوار اسـت. بـرای ۱۲ نیـم‌رخ سـرعت اندازه‌گیری شده در دسته اول تـلاش گردیـد تـا تـأثیر ضریـب تعدیل زبری بر سـرعت برشـی، بـدون در نظـر گرفتـن فـاکتور شکل، در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان در رابطه لگاریتمـی توزیع سرعت، (معادله ۲) ملاحظه گردد. برای ایـن منظـور، بـه جای κ_s در معادله ۲، از مقادیر d_{84} ، ۲ d_{84}، ۲/۸ d_{84}، ۳/۳ d_{84} و ۵/۱ d_{84} استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل (جدول ۵)، با تغییر ضریـب تعدیـل زبـری از $d_{٨٤}$ تـا $d_{٨٤}$ ۵/۱، هیـچ تغیـیری در محاسبه سرعت برشی ۱۲ نیم‌رخ سرعت مورد بررسی در دسـته اول ایجاد نمی‌شود.

از سوی دیگر، برای ۱۲ نیم‌رخ سرعت در دسته دوم، تـلاش شد تا اثر ضریب تعدیل زبری بر سرعت برشی، هم‌زمـان بـا در نظر گرفتن فاکتور شکل ψ در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان در رابطه لگاریتمی سـرعت (معادلـه ۲) بررسـی شـود. در ایـن حالت، علاوه بر در نظر گرفتن مقادیر d_{84} تـا d_{84} ۵/۱ بـه جـای k_s در معادله ۲، تأثیر فاکتور شکل نـیز بـه عنـوان یـک ضریـب برای h در رابطه ۲، به طور هم‌زمان در بـرآورد سرعـت برشـی بررسی گردید. نتایج (جدول ۵) نشـان داد کـه در نظـر گرفتـن هم‌زمان فـاکتور شـکل و ضریـب تعدیـل زبـری در معادلـه ۲، تأثیری در پیش‌بینی مقاومت در برابـر جریـان نـدارد. بنـابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر فـاکتور شـکل و ضریـب تعدیـل زبـری در بررسـی موضعـی مقـاومت در برابـر جریـان غـیر یک‌نواخت، که بر اساس نیم‌رخ سرعت جریان بنـا شـده اسـت، قابل گذشت بوده، حذف آنها اثری در توانایی پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان نخواهد داشت.

بـا بـه کـار گرفتـن روش مشـخصات لایـه مـرزی و روش لگاریتمی، سرعت برشی ٢٤ نیم‌رخ سرعت اندازه‌گیری شـده در رودخانه گاماسیاب تعیین شد. اختلاف مقـادیر سـرعت برشـی دو روش فوق در تمام مـوارد کمـتر از ۳۰٪ اسـت (جـدول ٦). مقایسه دو روش فوق نشان داد که در روش لگاریتمی، سـرعت برشی به مقدار جا به جایی خط بستر فرضی، یعنـی جـایی کـه $y = 0$ در نظر گرفته می‌شود، حساس اسـت. در ایـن پژوهـش خط بستر فرضـی $0.25\,d_{84}$ در زیر تاج ذرات رسوب در نظـر گرفته شده است. این انتخاب بر پایهٔ برازش لگاریتمی داده‌هـای سرعت در ناحیه داخلی لایه مرزی صورت می‌پذیـرد. بـا تغییـر ضریب ۰/۲۵ به ۰/۱ یا ۰/۲، تغیـیرات چشـم‌گیـری در سـرعت برشی حاصل از روش لگاریتمی دیده می‌شود. از سـوی دیـگر، روش مشخصات لایه مرزی بـرای محاسـبه سـرعت برشـی بـه مقدار جا به جایی خط بستر فرضی چندان حساس نیست و هـر تغییری در ضریب قطر ذره، تغییر محسوسی در سـرعت برشـی ایجاد نمی‌کند. به نظر می‌رسد یـک چنیـن تخمیـن موضعـی از تنش برشی بسـتر، در مقایسـه بـا روش‌هـای متـداول در کتـب هیدرولیک، به طور چشـم‌گیـری در بهبود پیش‌بینی پدیده‌هـایی مانند مقاومت در برابر جریان و انتقال رسوب مفید واقع شـود و هزینه اقتصادی پروژه را توجیه نماید.

بر پایـهٔ نیم‌رخ‌هـای انـدازه‌گیـری شـده سـرعت در محـور رودخانه گاماسیاب، و با استفاده از فرایند انتخاب مدل بهینـه در نرم‌افزار SAS، عدد فرود و نسبت $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ (نسبت پارامتر شیلـدز

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

جدول ۵. اثر ضریب تعدیل زبری بر سرعت برشی (برحسب متر بر ثانیه) بدون در نظر گرفتن فاکتور شکل (نیم‌رخ‌های ۱ تا ۱۲) و با در نظر گرفتن فاکتور شکل (نیم‌رخ‌های ۱۳ تا ۲٤)

نیم‌رخ	$5/1d_{84}$	$3/3d_{84}$	$2/8d_{84}$	$2d_{84}$	d_{84}
۱	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲
۲	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷
۳	۰/۰۸۸	۰/۰۸۸	۰/۰۸۸	۰/۰۸۸	۰/۰۸۸
٤	۰/۰۹٤	۰/۰۹٤	۰/۰۹٤	۰/۰۹٤	۰/۰۹٤
۵	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸
٦	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹
۷	۰/۰٦٤	۰/۰٦٤	۰/۰٦٤	۰/۰٦٤	۰/۰٦٤
۸	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰
۹	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵
۱۰	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵
۱۱	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷
۱۲	۰/۰٤۷	۰/۰٤۷	۰/۰٤۷	۰/۰٤۷	۰/۰٤۷
۱۳	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
۱٤	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹
۱۵	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦
۱٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦
۱۷	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵
۱۸	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱
۱۹	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳
۲۰	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲
۲۱	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰
۲۲	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷
۲۳	۰/۰۵٦	۰/۰۵٦	۰/۰۵٦	۰/۰۵٦	۰/۰۵٦
۲٤	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

جدول ٦. ویژگی‌های پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری و محاسبه شده در رودخانه گاماسیاب

شماره نیم‌رخ	u_{max}	S_f	S	u_* (m/s) لگاریتمی	u_* (m/s) لایه‌مرزی	u_* (m/s) سهمی	θ	δ*	Fr	Q (m^3/s)	A (m^2)	W (m)	u_m (m/s)	h (m)
١	١/٠٩٦	٠/٠٠٣٦٩	٠/٠٠٣٦٩	٠/٠٧٢	٠/٠٩٨	٠/٠٧١	٠/٠٢٩	٠/٠٤٨	٠/٦٦	١/٩١	٢/١٠	٨/٤	٠/٩١	٠/٢٨٣
٢	١/٠٨٢	٠/٠٠٤٠١	٠/٠٠٦٧٨	٠/٠٦٨	٠/٠٩٨	٠/٠٧٠	٠/٠٢٥	٠/٠٤٢	٠/٦٥	٢/٠٢	٢/١٩	٨/١	٠/٩٢	٠/٢٨٣
٣	١/١٣١	٠/٠٠٣٩٩	−٠/٠٠١٢	٠/٠٨٨	٠/١٠٦	٠/٠٨٦	٠/٠٣٦	٠/٠٦١	٠/٦٤	١/٨٦	٢/٠٣	٨	٠/٩٢	٠/٣٢٣
٤	٠/٩٠٢	٠/٠٠٥٢٥	٠/٠٠٧٦٨	٠/٠٩٤	٠/١٠٤	٠/٠٩٣	٠/٠٢٢	٠/٠٤٥	٠/٥٧	١/٥١	٢/٢٢	٧	٠/٦٨	٠/٢٥٣
٥	١/١٨٤	٠/٠٠٥٦٤	٠/٠١١٨٧	٠/١٠٨	٠/١١٩	٠/١٠٢	٠/٠٣٥	٠/٠٦٢	٠/٧١	١/٧١	١/٨٥	٥/٥	٠/٩٢	٠/٢٨٣
٦	١/٢٥٦	٠/٠٠٣٣٣	٠/٠١٠٠٨	٠/٠٨٩	٠/١١٨	٠/٠٨٧	٠/٠٥٨	٠/٠٩٨	٠/٦٦	٢/٥٣	٢/٦٥	٦	٠/٩٦	٠/٣٧٣
٧	٠/٩٧٣	٠/٠٠٢٩٩	٠/٠١٥٩	٠/٠٦٤	٠/٠٨٢	٠/٠٥٩	٠/٠٣٦	٠/٠٥٧	٠/٥٨	١/٩٠	١/٣٢	٧/٥	٠/٨٢	٠/٢٨٣
٨	١/٦١٥	٠/٠٠٥٣١	−٠/٠١٣١	٠/١٣٠	٠/١٦٣	٠/١٣٥	٠/٠٦٦	٠/١١٩	٠/٧٧	٣/٢٤	٢/٧٢	٨/٥	١/١٩	٠/٤٥٣
٩	٠/٦٢١	٠/٠٠٢٧٤	٠/٠٠٩٥٧	٠/٠٤٥	٠/٠٦٤	٠/٠٤٧	٠/٠١٧	٠/٠٣٢	٠/٤٦	١/٢٥	٢/٤٤	٩	٠/٥١	٠/١٨٣
١٠	٠/٨٨٤	٠/٠٠٢٦١	٠/٠١٢١٣	٠/٠٥٥	٠/٠٧٩	٠/٠٦٢	٠/٠٢٨	٠/٠٤٦	٠/٥٥	٢/٢٨	٣/١٣	١١/٣	٠/٧٣	٠/٢٦٣
١١	١/٣٠٨	٠/٠٠٢٥٦	−٠/٠٠٨٩	٠/٠٨٧	٠/١٠٦	٠/٠٨٩	٠/٠٣٥	٠/٠٥٧	٠/٦٢	٢/٧١	٢/٦٤	١٠	١/٠٣	٠/٣٨٣
١٢	٠/٨١٩	٠/٠٠٢٥٨	−٠/٠١٠١	٠/٠٥٩	٠/٠٨٤	٠/٠٦٤	٠/٠١٥	٠/٠٢٨	٠/٥٥	١/٨٥	٢/٧٤	٩	٠/٦٨	٠/٢٣٣
١٣	١/٢٨٧	٠/٠٠٢٩٩	−٠/٠٠١٨	٠/١٠٠	٠/١١٥	٠/٠٩٠	٠/٠٣٦	٠/٠٦٠	٠/٦٧	٣/٦٦	٣/٣٩	١١	١/٠٨	٠/٣٧٣
١٤	٠/٩٨٤	٠/٠٠٢٧٩	٠/٠١٠٥٤	٠/٠٥٩	٠/٠٨٤	٠/٠٦١	٠/٠٣٢	٠/٠٥١	٠/٥٧	٢/٧١	٣/٣١	١٢	٠/٨٢	٠/٣٠٣
١٥	١/٣٧٣	٠/٠٠٣٣٥	−٠/٠٠٠٧	٠/١١٦	٠/١٢٤	٠/١٠٩	٠/٠٤١	٠/٠٦٨	٠/٦٩	٣/٦٠	٣/١٦	١١	١/١٤	٠/٤٠٣
١٦	١/٠٤٣	٠/٠٠١٩٥	−٠/٠٠٤٢	٠/٠٧٦	٠/٠٨٩	٠/٠٧٠	٠/٠٣٦	٠/٠٥٩	٠/٥٧	٢/٩٧	٣/٣٤	١٠	٠/٨٩	٠/٣٤٣
١٧	٠/٨٧٦	٠/٠٠٢٠٢	٠/٠٠٧٥٢	٠/٠٥٥	٠/٠٨٠	٠/٠٥٩	٠/٠٢٤	٠/٠٤٠	٠/٥٥	٢/٣١	٣/١١	١٠	٠/٧٤	٠/٢٦٣
١٨	١/٠٨٣	٠/٠٠٣٤١	٠/٠٠٨٥٩	٠/٠٧١	٠/٠٩٥	٠/٠٧٤	٠/٠٣١	٠/٠٥٠	٠/٦٠	٢/٩٦	٣/٢١	١٠/٥	٠/٩٢	٠/٣٣٣
١٩	١/٠٢٦	٠/٠٠٢٣٨	−٠/٠٠٢٨	٠/٠٦٤	٠/٠٩٢	٠/٠٧٠	٠/٠٢٧	٠/٠٤٥	٠/٦٠	١/٧٨	٢/٠٤	٨	٠/٨٧	٠/٣٠٣
٢٠	٠/٨٠١	٠/٠٠٢٨٣	٠/٠٠١٢٣	٠/٠٥٢	٠/٠٧٥	٠/٠٥٤	٠/٠٢٢	٠/٠٣٨	٠/٥٣	١/٥٢	٢/٢٨	٨/٩	٠/٦٧	٠/٢٣٣
٢١	٠/٧٨٦	٠/٠٠٢٩٤	٠/٠٠٤٥٣	٠/٠٥٤	٠/٠٧٦	٠/٠٥٥	٠/٠٢٠	٠/٠٣٥	٠/٥٤	١/٢٨	١/٩٤	٩/٤	٠/٦٦	٠/٢١٣
٢٢	٠/٨٩٣	٠/٠٠٢٨٨	٠/٠٠٥١٧	٠/٠٦٧	٠/٠٧٦	٠/٠٦١	٠/٠٢٥	٠/٠٤٠	٠/٥٩	١/٦٣	٢/٢١	٨/٩	٠/٧٤	٠/٢٣٣
٢٣	٠/٨٦٧	٠/٠٠٢٨١	٠/٠٠٢٠٢	٠/٠٥٦	٠/٠٧٩	٠/٠٥٦	٠/٠٢٦	٠/٠٤٣	٠/٥٤	١/٥٣	٢/١١	٧/٥	٠/٧٣	٠/٢٦٣
٢٤	٠/٨٠٨	٠/٠٠٢٧٣	٠/٠٠١٩٣	٠/٠٥٦	٠/٠٧٦	٠/٠٥٥	٠/٠١٩	٠/٠٣٣	٠/٥١	١/٥٢	٢/١٦	٨	٠/٧٠	٠/٢٥٣

به مقدار بحرانی آن) از عوامل مؤثر بر عرض از مبدأ مقاومت در برابر جریان می‌باشند. با در نظر گرفتن این ملاحظات، معادله مقاومت در برابر جریان غیر یک‌نواخت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{\kappa}\ln\frac{h}{d_{84}} + 6.894Fr - 4.837\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} + 2.248 \qquad [۹]$$

ضریب تبیین این معادله R^2=٠/٧٠ است. لازم به یادآوری است برای جلوگیری از خطر هم‌بستگی ساختگی بین طرف چپ و راست معادله فوق، مقادیر τ_* و Fr به ترتیب به صورت زیر تعریف شد:

$$\tau_* = \frac{hS_f}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)d_{84}} \qquad [۱۰]$$

$$Fr = \frac{u_{max}}{\sqrt{gh}} \qquad [۱۱]$$

در معادله ۱۱، u_{max} سرعت حداکثر جریان واقع در سطح آب و g شتاب ثقل می‌باشد. هم‌چنین مقدار سرعت برشی u_* در طرف چپ معادله فوق از طریق روش مشخصات لایه مرزی تعیین شده است. ویژگی اصیل معادله ۹ استفاده از متغیرهای کلی در سمت راست، برای تعیین پارامترهای موضعی سمت چپ است. یادآوری می‌نماید که کاربرد معادله ۹ محدود به دامنه داده‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۲ می‌باشد. بنابراین، برای استفاده از آن در خارج از این دامنه لازم است معادله ۹ توسط مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده دیگری واسنجی شود.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

هم‌چنین، بررسی آماری تأثیر عوامل $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ و Fr در معادله ۹ نشان می‌دهد که حذف آنها پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان را بسیار تحت تأثیر قرار خواهد داد. هرگونه تحلیل بیشتر در زمینه کارایی معادله ۹ و اثر $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ و Fr، نیازمند داده‌های صحرایی بیشتر و اندازه‌گیری در شرایط فوق بحرانی است، که در حال حاضر با توجه به نبود ابزارهای پژوهشی پیش‌رفته در زمینه اندازه‌گیری توربولانس عملی نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

۱. معادله‌های پیشنهادی مقاومت در برابر جریان یک‌نواخت (۸) و غیریکنواخت (۹) نشان می‌دهند که نیازی به تعدیل عبارت داخل لگاریتم معادله توزیع جهانی سرعت توسط فاکتور شکل و یا ضریب تعدیل زبری نیست.

۲. عدد فرود و نسبت پارامتر شیلدز به مقدار بحرانی آن از پارامترهای مؤثر تعدیل ثابت لگاریتمی توزیع سرعت، معادله ۸ و معادله ۹ می‌باشند.

۳. معادله‌های نمایی توانایی لازم را برای پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان ندارند، و این ضعف نمی‌تواند با کاربرد فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری بهبود یابد.

٤. بر اساس بررسی موضعی توزیع سرعت جریان غیر یک‌نواخت با استفاده از تئوری لایه مرزی، تأثیر فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری در محاسبه سرعت برشی، و در نتیجه مقاومت در برابر جریان قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

۵. تعیین سرعت برشی با استفاده از مشخصات لایه مرزی، به دلیل وابستگی نداشتن به سطح مرجع، مناسب‌تر از روش لگاریتمی است.

٦. پیش‌بینی نامناسب مقاومت در برابر جریان توسط معادله‌های نمایی و نیمه لگاریتمی در وضع موجود، توجه بیشتر به پژوهش برای شناخت پارامترهای مؤثر در رودخانه‌های شنی را می‌طلبد.

منابع مورد استفاده

۱. فرشی، س. ح. ۱۳۸۰. برآورد مقاومت جریان غیر یک‌نواخت در رودخانه با بستر شنی حالت خاص: رودخانه گاماسیاب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

2. Afzalimehr, H. and F. Anctil. 1998. Estimation of gravel bed river flow resistance. J. Hydraul. Eng., ASCE 124(10): 1054-1058.
3. Afzalimehr, H. and F. Anctil. 2000. Accelerating shear velocity in gravel-bed channels. J. Hydrol. Sci., IAHS 45 (1): 113-124.
4. Afzalimehr, H. and F. Anctil. 2001. Vitesse de frottement associee a une ecoulement non-uniform et une rugosite relative intermediaire. J. Hydraul. Res., IAHR 39(2): 181-186.
5. Afzalimehr, H. and B. Levesque. 1999. Friction slope in depth average flow. J. Hydraul. Eng., ASCE 125(5): 549-550.
6. Bathurst, J. C. 1978. Flow resistance of large scale roughness. J. Hydraul. Eng., ASCE 104(12): 1587-1603.
7. Bray, D. I. 1991. Resistance to flow in gravel-bed rivers, Rep. HTD-91-1, CSCE, Montreal, Canada.
8. Henderson, F. M. 1966. Open Channel Flow. Macmillan Co., New York.
9. Hinze, J.O. 1975. Turbulence. 2nd Ed., Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, New York.
10. Jarrett, R. D. 1991. Hydaulics of mountain rivers, channel flow resistance. PP. 287-298. *In*: B. C. Yen (Ed.), Centennial of Manning's Formula. Water Resources Publ., Littleton, Colo., USA.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

11. Nezu, I. and H. Nakagawa. 1993. Turbulence in Open Channel Flows. IAHR, Monograph, A. A. Balkema Publ., Rotterdam, The Netherlands.
12. Schlichting, H. 1949. Boundary Layer Theory. McGraw-Hill, New York.
13. Wolman, M. G. 1954. A method of sampling coarse river bed materials. Trans. Am. Geophys. Union 33 (6), Port 1.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-05-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]