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 2026-11-28]

[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 2026-11-28]

[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 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

جدول ۱. دامنه پارامترهای اندازه‌گیری شده برای ۱٤۰رودخانه 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} =۳٤/۳mm)در شرایط جریان غیر یک‌نواخت

پارامترها	دامنه تغییرات
$h\,(m)$	۰/۱۸۳–۰/٤۵۳
$u_m\,(m)$	۰/۵۱–۱/۱۹
$W\,(m)$	۵/۵–۱۲
$A\,(m^2)$	۱/۸۵–۳/٦٦
$Q\,(m^3/s)$	۱/۲۵–۳/٦
Fr	۰/۵۱–۰/۷۷
S	۰/۰۱۳۱–۰/۰۱۵۹
S_f	۰/۰۰۱۹۵–۰۰۵٦٤
$u_{max}\,(m/s)$	۰/٦۲–۱/٦۱۵

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:

$$u_* = \frac{(\delta_* - \theta)u_{max}}{4.4\delta_*} \qquad [٤]$$

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

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

$$\theta = \int_0^h \frac{u}{u_{max}} \left(1 - \frac{u}{u_{max}}\right) dy \qquad [٦]$$

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 ۱٤۰ 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 2026-11-28]

[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 2026-11-28]

[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:

$$\sqrt{\frac{1}{f}}=2.03\log\frac{h}{d_{50}}+2.96F_r-0.18\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}-0.79 \qquad (R^2=0.54) \quad [8]$$

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 2026-11-28]

[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 به صورت یک ضریب برای h در معادله‌های نیمه لگاریتمی ارائه می‌شود، بررسی گردد. ضریب تبیین به دست آمده در این حالت هیچ تغییری نسبت به معادله ۸ نشان نداد. هم‌چنین، در نظر گرفتن هم‌زمان فاکتور شکل به صورت ضریب برای h، و مقدار ٦/٨ به عنوان ضریب برای d_{50} در معادله ۸، هیچ تغییری در مقدار ضریب تبیین نشان نداد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری هیچ تأثیری در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان در معادله‌های نیمه لگاریتمی ندارند.

از نظر فیزیکی، عدد فرود مقاومت در برابر جریان را از طریق نوسانات سطح آزاد تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مسئله می‌تواند در رژیم زیر بحرانی و فوق بحرانی ملاحظه شود (٦). برای عدد فرود کمتر از یک در شرایط جریان یک‌نواخت، 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 پارامتر شیلدز به مقدار بحرانی آن ($\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$) در معادله ۲، داده‌ها به چهار دسته به صورت 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، به ترتیب با ضرایب تبیین R^2=۰/۳۸۹ و R^2=۰/۳، چندان نیست. زیرا رودخانه‌های شنی در دامنه Fr < ۰/٦ پایدارتر از دامنه Fr > ۰/٦ می‌باشند (٦). از سوی دیگر، برای دسته سوم (۰/٦ < Fr <۰/۹) مقدار $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ بیشترین تأثیر را در معادله ۸ با ضریب تبیین R^2=۰/٦١٤ نشان می‌دهد. براساس این پژوهش، برای دسته ۰/٦ < Fr <۰/۹، هر قدر $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ بزرگ‌تر باشد، مقاومت در برابر جریان کوچک‌تر خواهد بود. به نظر باترست (٦) این مسئله به این صورت قابل توضیح است که در آستانه حرکت، ذرات رسوب فقط برای پرکردن فضاهای خالی بین یکدیگر جا به جا می‌شوند، تا بتوانند یک سطح نسبتاً هموار را ایجاد کنند. در حالی که پس از آغاز حرکت مواد رسوبی، ذرات شروع به شناور شدن در مسیر جریان آب کرده، در نتیجه برای انتقال به اندازه حرکت بیشتری نسبت به شرایط بسترهای ثابت (Fixed bed) نیاز خواهد بود.

سرانجام، برای دسته چهارم (Fr >۰/۹)، تأثیر $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ در معادله ۸ با ضریب تبیین R^2=۰/۲ معلوم نیست. دلیل این موضوع دشوار بودن اندازه‌گیری دقیق و با کیفیت قابل قبول پارامترهای هیدرولیکی در رودخانه‌های شنی با عمق جریان کم و نوسانات زیاد سرعت در شرایط بحرانی و فرا بحرانی است که به طور چشم‌گیری دقت برآورد معادله ۸ را کاهش می‌دهد. نزو و ناکاگاوا (١١) نشان دادند که اختلاف بسیاری بین ساختار تلاطم دسته چهارم و سه دسته دیگر وجود دارد، به گونه‌ای که برای شرایط Fr >۰/۹، نوسانات تلاطم در نزدیکی سطح آب بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از کاربرد تابع جهانی نوسانات قائم سرعت است.

با ملاحظه معادله ۸ وضریب تبیین آن (R^2=۰/٥٤)، مشخص می‌شود که این معادله فقط ٥٤٪ از تغییرات مقاومت در برابر جریان را نشان می‌دهد. علت عدم پیش‌بینی بهتر از ٥٤٪ مقاومت در برابر جریان را می‌توان در عوامل زیر جستجو کرد:

١. در رودخانه‌های با شیب تند (شیب بیشتر از ۰/۰۰۲)، با توجه به داده‌های مورد استفاده، تمام عوامل مؤثر بر تلفات انرژی قابل شناسایی و تبیین نیستند (١٠).
٢. فرض یک‌نواختی جریان در رودخانه‌های با شیب تند در عدد فرود بالا، به دلیل تغییرات زیاد در مقیاس زبری و شرایط جریان قابل دست‌یابی نیست.
٣. روش‌های موجود برای برآورد سرعت متوسط جریان در یک مقطع قائم رودخانه برای شرایط عمق کم و شیب زیاد، که از ویژگی‌های رودخانه‌های کوهستانی درشت دانه است، توسعه نیافته‌اند. بنابراین، کاربرد آنها به طور چشم‌گیری در خطای تخمین و پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان مؤثر است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]

٤. تخمین سرعت برشی با استفاده از روش گرادیان فشار صفر ($u_* = \sqrt{ghS_f}$)، یک منبع بزرگ خطا و انحراف مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت در برابر جریان از مقدارمحاسبه شده آن توسط معادله ۱ است.

با حذف $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ و در نظر گرفتن تنها عدد فرود برای تعدیل ثابت تابع لگاریتمی، توانایی پیش‌بینی معادله مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد. در نتیجه، مناسب‌ترین معادله لگاریتمی برای جریان یک‌نواخت معادله ۸ است، که کاربرد آن برای حدود ۰/٦ < Fr <۰/۹ قابل توصیه می‌باشد.

۲. مقاومت جریان غیر یک‌نواخت

در این بخش با استفاده از نیمرخ‌های سرعت اندازه‌گیری شده در رودخانه گاماسیاب، اثر فاکتور شکل، ضریب تعدیل زبری و روش تخمین سرعت برشی بر مقاومت در برابر جریان بر اساس معادله ۱ بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از این بخش بر پایهٔ ۲٤ نیمرخ سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف رودخانه گاماسیاب استوار است. برای ۱۲ نیمرخ سرعت اندازه‌گیری شده در دسته اول تلاش گردید تا تأثیر ضریب تعدیل زبری بر سرعت برشی، بدون در نظر گرفتن فاکتور شکل، در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان در رابطه لگاریتمی توزیع سرعت، (معادله ۲) ملاحظه گردد. برای این منظور، به جای κ_S در معادله ۲، از مقادیر d_{84} ، $2\,d_{84}$، $2/8\,d_{84}$، $3/3\,d_{84}$ و $5/1\,d_{84}$ استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل (جدول ۵)، با تغییر ضریب تعدیل زبری از $d_{8٤}$ تا $5/1\,d_{8٤}$، هیچ تغییری در محاسبه سرعت برشی ۱۲ نیمرخ سرعت مورد بررسی در دسته اول ایجاد نمی‌شود.

از سوی دیگر، برای ۱۲ نیمرخ سرعت در دسته دوم، تلاش شد تا اثر ضریب تعدیل زبری بر سرعت برشی، همزمان با در نظر گرفتن فاکتور شکل ψ در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان در رابطه لگاریتمی سرعت (معادله ۲) بررسی شود. در این حالت، علاوه بر در نظر گرفتن مقادیر d_{84} تا $5/1\,d_{84}$ به جای k_S در معادله ۲، تأثیر فاکتور شکل نیز به عنوان یک ضریب برای h در رابطه ۲، به طور همزمان در برآورد سرعت برشی بررسی گردید. نتایج (جدول ۵) نشان داد که در نظر گرفتن همزمان فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری در معادله ۲، تأثیری در پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان ندارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر فاکتور شکل و ضریب تعدیل زبری در بررسی موضعی مقاومت در برابر جریان غیر یک‌نواخت، که بر اساس نیمرخ سرعت جریان بنا شده است، قابل گذشت بوده، حذف آنها اثری در توانایی پیش‌بینی مقاومت در برابر جریان نخواهد داشت.

با به کار گرفتن روش مشخصات لایه مرزی و روش لگاریتمی، سرعت برشی ۲٤ نیمرخ سرعت اندازه‌گیری شده در رودخانه گاماسیاب تعیین شد. اختلاف مقادیر سرعت برشی دو روش فوق در تمام موارد کمتر از ۳۰٪ است (جدول ٦). مقایسه دو روش فوق نشان داد که در روش لگاریتمی، سرعت برشی به مقدار جا به جایی خط بستر فرضی، یعنی جایی که $y = 0$ در نظر گرفته می‌شود، حساس است. در این پژوهش خط بستر فرضی $0/25\,d_{84}$ در زیر تاج ذرات رسوب در نظر گرفته شده است. این انتخاب بر پایهٔ برازش لگاریتمی داده‌های سرعت در ناحیه داخلی لایه مرزی صورت می‌پذیرد. با تغییر ضریب ۰/۲۵ به ۰/۱ یا ۰/۲، تغییرات چشم‌گیری در سرعت برشی حاصل از روش لگاریتمی دیده می‌شود. از سوی دیگر، روش مشخصات لایه مرزی برای محاسبه سرعت برشی به مقدار جا به جایی خط بستر فرضی چندان حساس نیست و هر تغییری در ضریب قطر ذره، تغییر محسوسی در سرعت برشی ایجاد نمی‌کند. به نظر می‌رسد یک چنین تخمین موضعی از تنش برشی بستر، در مقایسه با روش‌های متداول در کتب هیدرولیک، به طور چشم‌گیری در بهبود پیش‌بینی پدیده‌هایی مانند مقاومت در برابر جریان و انتقال رسوب مفید واقع شود و هزینه اقتصادی پروژه را توجیه نماید.

بر پایهٔ نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده سرعت در محور رودخانه گاماسیاب، و با استفاده از فرایند انتخاب مدل بهینه در نرم‌افزار SAS، عدد فرود و نسبت $\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ (نسبت پارامتر شیلدز

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[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
٥	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	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥
۱۰	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥
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	۰/۰٥۹	۰/۰٥۹	۰/۰٥۹	۰/۰٥۹	۰/۰٥۹
۱٥	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦	۰/۱۱٦
۱٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦
۱۷	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥	۰/۰٥٥
۱۸	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱
۱۹	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳	۰/۰٦۳
۲۰	۰/۰٥۲	۰/۰٥۲	۰/۰٥۲	۰/۰٥۲	۰/۰٥۲
۲۱	۰/۰٥۰	۰/۰٥۰	۰/۰٥۰	۰/۰٥۰	۰/۰٥۰
۲۲	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷	۰/۰٦۷
۲۳	۰/۰٥٦	۰/۰٥٦	۰/۰٥٦	۰/۰٥٦	۰/۰٥٦
۲٤	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥	۰/۰٤٥

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[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:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{\kappa}\ln\frac{h}{d_{84}} + 6.894Fr - 4.837\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} + 2.248 \qquad [٩]$$

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:

$$\tau_* = \frac{hS_f}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)d_{84}} \qquad [١٠]$$

$$Fr = \frac{u_{max}}{\sqrt{gh}} \qquad [١١]$$

در معادله ١١، 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 ٩ استفاده از متغیرهای کلی در سمت راست، برای تعیین پارامترهای موضعی سمت چپ است. یادآوری می‌نماید که کاربرد معادله ٩ محدود به دامنه داده‌های اندازه‌گیری شده در جدول ٢ می‌باشد. بنابراین، برای استفاده از آن در خارج از این دامنه لازم است معادله ٩ توسط مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده دیگری واسنجی شود.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[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 2026-11-28]

[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 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.1.2.1]