طراحی کانال‌های پایدار در بستر شنی

حسین افضلی‌مهر[1]

چکیده

در چند دهه گذشته، روابط گوناگونی برای تشریح عرض، و شیب رودخانه‌های پایدار با بستر شنی پیشنهاد شده است. در این مقاله، در مرحله نخست با بهره‌گیری از داده‌های موجود برای ۲۸۰ رودخانه با بستر شنی، که در شرایط رژیم (پایداری) واقعند، ۹ معادله گسترش یافته توسط بری، چانگ، هی و تورن، کلرهالز، نیل، پارکر و سایمونز و آلبرتسون، برای هر کدام از ویژگی‌های کانال پایدار، شامل عرض بالای کانال، عمق میانگین جریان و شیب بستر تحلیل آماری گردید. مقایسه انجام شده نشان داد که دبی جریان غالب و قطر میانگین ذره رسوب، برای پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی کانال (عرض، عمق و به ویژه شیب) پارامترهای هیدرولیکی کافی نمی‌باشند. جستجو برای روابط پیچیده‌تر، با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده موجود، نشان داد که هیچ گونه اصلاحی در این زمینه میسر نبوده، و هر نوع بهبودی ناشی از وجود یک هم‌بستگی ساختگی است، که خود به دلیل حضور متغیر مشترک در هر دو سمت معادله گسترش یافته می‌باشد.

در مرحله دوم، اطلاعات ۱۹ کانال آزمایشگاهی که توسط کرونوتو و گراف (۱۳) و سانگ و همکاران (۱۹)، و بر پایهٔ تئوری لا یه مرزی به دست آمده، مورد استفاده قرار گرفت. در واقع، کاربرد این تئوری به این مسئله بنیادی پاسخ خواهد داد که آیا متغیرهای شناخته شدهٔ موجود برای پیش‌بینی مقطع یک کانال پایدار کافی نیستند، و یا روش برآورد آنها مناسب نیست؟ بر پایهٔ پژوهش حاضر، روش برآورد آنهاست که می‌بایست دگرگون شود. داده‌های آزمایشگاهی فوق امکان بهره‌گیری از پارامتر شیلدز را برای پیش‌بینی عمق جریان و شیب کانال فراهم می‌کند. در نتیجه، به کار بردن تئوری لا یه مرزی، برای برآورد پارامتر شیلدز و پیش‌بینی پارامترهای یک کانال پایدار، قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: *کانال پایدار، رودخانه شنی، تئوری لا یه مرزی، پارامتر شیلدز*

مقدمه

پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی کانال‌های پایدار، تحت عنوان «تئوری رژیم» برای بیش از یک‌صد سال مورد توجه قرار گرفته است. این تئوری بر پایهٔ نیاز به پیش‌بینی ابعاد کانال‌های آبرفتی[2]، که در آنها دبی و بار رسوبی معینی حمل می‌شود،

۱. استادیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

2. Alluvial

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

گسترش یافته است. به سخن دیگر، مقطع هیدرولیکی کانال پایدار (کانال بدون رسوب‌گذاری و فرسایش) توسط تئوری رژیم بیان می‌شود. واژه «تئوری» در این جا، به دلیل نداشتن استدلال و پایه فیزیکی، به معنای رایج آن در علوم نیست. در واقع، اساس تئوری رژیم یا «روش رژیم» بر مبنای روش‌های آماری با شمار زیادی از مشاهدات بنا شده است. تمام پژوهش‌های معطوف به تفسیر تئوریک این روابط تجربی، به گونه‌ای اجتناب‌ناپذیر به روابط کلی مشتمل بر انتقال رسوب منتهی شده‌اند. توفیق این تئوری وابسته به تغییرناپذیری مواد بستر و دیواره‌ها، و بار رسوبی در بیشتر کانال‌های مورد بررسی بوده است.

همان‌گونه که هی و هریتاژ (۸) می‌گویند، ضرایب تجربی در معادلات رژیم، که از راه رگرسیون آماری به دست می‌آیند، به نحوی بیانگر متغیرهای اندازه‌گیری نشده مانند پوشش گیاهی و برخی عوامل غیرقابل کمی شدن حوضه‌های آبریز می‌باشند. به این دلیل، این معادلات مشخصاً برای کانالی با ویژگی‌ها و داده‌های همانند آنچه که در توسعه اولیه آن به کار رفته، هماهنگی نشان می‌دهند، و برای مواد بستر و دیواره و بار رسوبی متفاوت با شرایط اولیه، پیش‌بینی معادلات به نتایج نامطلوبی منتهی می‌شود.

از نظر تاریخی، رودخانه‌های با بستر شنی به صورت یک گروه جدا از رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای بررسی شده‌اند، زیرا پژوهش‌های انجام شده نشان داده که مشخصات هندسی این رودخانه‌ها همچون عرض، عمق و شیب بستر، به طور متفاوت از رودخانه‌های ماسه‌ای شکل گرفته و تحول یافته است (۱۸). در طی دهه‌های گذشته، معادلات رژیم بسیاری برای رودخانه‌های با بستر شنی پیشنهاد شده است. از آن جا که بیشتر این معادلات با استفاده از شمار کم داده‌ها، و در مناطق مشخص جغرافیایی توسعه یافته‌اند، بنابراین از آثار جغرافیایی مبرا نیستند و این مسئله مانعی برای همگانی بودن آنها می‌باشد (۲).

هدف از پژوهش حاضر عبارت است از: الف) استفاده از داده‌های موجود برای ۲۸۰ رودخانه با بستر شنی که در شرایط پایداری واقعند، و تحلیل آماری معادلات تعیین ویژگی‌های کانال‌های پایدار، شامل عرض بالای کانال، عمق میانگین جریان و شیب بستر، و ب) کاربرد تئوری لایه مرزی و تعیین پارامتر شیلدز، برای پیش‌بینی عمق میانگین جریان و شیب کانال با بستر شنی، برای ۱۹ داده آزمایشگاهی.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های هیدرولیکی مقاطع کانال‌های پایدار شنی تحت جریان دایمی یک‌نواخت و آبدهی غالب (آبدهی که در آن مقطع پایدار رودخانه، از لحاظ فرایندهای رسوب‌گذاری و فرسایش، در وضع تعادل است) شامل پارامترهای عرض سطح آب در کانال (w)، عمق میانگین جریان (h)، شیب کانال (S)، اندازه میانگین ذره رسوب (d_{50}، قطری که ۵۰٪ مواد از نظر وزنی ریزتر از این اندازه هستند) و سرعت میانگین جریان (u_m) می‌باشد. در صورت نیاز، دیگر پارامترها، مانند لزوجت سینماتیکی (ν)، جرم حجمی سیال (ρ)، جرم حجمی رسوب (ρ_s) و شتاب ثقل (g) مقادیر استاندارد خود را خواهند داشت، یعنی: $\nu = 1\times10^{-6}$ m²/s، g=۹/۸۱ m²/s، ρ_s=۲۶۵۰ kg/m³ و ρ=۱۰۰۰ kg/m³.

با کاربرد آنالیز ابعادی و با استفاده از پارامترهای فوق، پارامترهای بدون بعد بسیاری حاصل می‌شود، مانند عدد فرود $Fr = \frac{u_m}{\sqrt{gh}}$ یا $\frac{h}{d_{50}}$، زبری نسبی یا $G = \frac{\rho_s}{\rho}$، چگالی نسبی یا $d_s = d_{50}\left[\frac{\nu}{g(G-1)}\right]^{-\frac{1}{3}}$، پارامتر رسوب یا $P = u_m hS\left[(G-1)\nu\right]$ و پارامتر توان جریان یا d_{50}، که در گسترش معادلات هیدرولیک کانال‌ها و هیدرولیک رسوب کاربرد دارند.

در مرحله اول، از داده‌های موجود برای ۲۸۰ رودخانه با بستر شنی، که در شرایط رژیم (پایداری) واقعند و توسط وارگادالام (۲۱) جمع‌آوری شده، استفاده شد، و ۹ معادله (گسترش یافته توسط بری، چانگ، هی و تورن، کلرهالز، نیل، پارکر، سایمونز و آلبرتسون) مورد تحلیل آماری قرار گرفت.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

معیار گزینش داده‌ها عبارت بود از: ۱. یک‌نواخت یا تقریباً یک‌نواخت بودن شرایط جریان ۲. نداشتن پوشش گیاهی در بستر دیواره‌های رودخانه ۳. در تعادل طبیعی بودن رودخانه‌ها با رژیم جریان و انتقال رسوب در مقاطع اندازه‌گیری ۴. نسبتاً عریض بودن و داشتن شکل هندسی ذوزنقه‌ای مقاطع انتخاب شده ۵. انسجام کافی داده‌ها در هر ایستگاه ۶. فقدان مانع در مقاطع مورد نظر. جدول ۱ دامنه تغییرات داده‌های کلی برای ۲۸۰ رودخانه فوق را نشان می‌دهد.

در مرحله دوم، پارامترهای مستخرج از ۱۹ پروفیل توزیع سرعت مشاهده شده تحت جریان دایمی یک‌نواخت در یک کانال آزمایشگاهی، که توسط سانگ و همکاران (۱۹) و کرونوتو و گراف (۱۳) به دست آمده، مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). جدول ۳ نیز دامنه تغییرات این پارامترها را نشان می‌دهد.

گرچه کاربرد نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی برای وضعیت طبیعی رودخانه‌ها محدودیت دارد، ولی شرایط به دقت کنترل شده در آزمایشگاه، اغلب بهترین محیط را برای آزمایش برخی فرایندهای بنیادی فراهم می‌سازد.

روش به کار رفته در این پژوهش برای تحلیل معادلات، بر پایهٔ روابط آماری و با استفاده از نرم‌افزار SAS می‌باشد. مناسب‌ترین و معنی‌دارترین عوامل مؤثر در پیش‌بینی پارامترهای عرض، عمق و شیب کانال، با استفاده از روش انتخاب مدل R^2-adj شناسایی شد. پس از آن، با استفاده از فرایند گزینش مدل در نرم‌افزار SAS معادلات مناسب هم‌بستگی تعیین گردید. از سوی دیگر، برای برآورد توانایی پیش‌بینی یک معادله خاص، مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده از طریق آماری، با استفاده از معادله هم‌بستگی زیر تحلیل شد:

$$\Gamma = \beta\hat{\Gamma} + \alpha \qquad [1]$$

که در آن:

Γ = پارامتر اندازه‌گیری شده مانند عرض، عمق و شیب کانال

$\hat{\Gamma}$ = مقدار پیش‌بینی شده پارامتر

α = عرض از مبدأ

β = شیب خط رگرسیون

جدول ۱. دامنه داده‌های ۲۸۰ رودخانه با بستر شنی مورد استفاده در پژوهش

متغیر	دامنه داده‌ها
w (m)	۲-۱۲۸
h (m)	۲/۰-۲/۷۴
S	۰/۰۰۰۱-۰/۰۷۵۵
d_{50}(m)	۰/۰۰۲۷-۰/۲۱۰
$Q(m^3s^{-1})$	۰/۵۴-۳۶۷
$u_m(ms^{-1})$	۰/۲۳-۳/۷۶

این رابطه، سه معیار برای انتخاب یک معادله مناسب فراهم می‌کند. β شیب خط، α عرض از مبدأ و R^2 ضریب تشخیص (تبیین) میان مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد. در یک معادله ایده‌آل برای پیش‌بینی β=۱، α=۰ و R^2=۱ خواهد بود.

نتایج و بحث

پیش‌بینی عرض، عمق و شیب کانال‌های پایدار

معادلات رژیم که در شرایط متنوع ژئومورفولوژیک، فیزیوگرافی و جغرافیایی گسترش یافته‌اند در جدول ۴ ارائه شده است. این معادلات را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. دسته اول معادلاتی مانند معادله چانگ (۵) است، که در گسترش آنها از مفاهیم تحلیلی مکانیک سیالات استفاده شده است. دسته دوم، که صرفاً بر پایهٔ محاسبات آماری روی یک سری داده‌ها گسترش یافته‌اند، شامل هشت معادله دیگر جدول ۴ می‌باشد. اگرچه پارکر (۱۵) در زمینه تحلیل کانال‌های پایدار تئوری‌های قابل توجهی را گسترش داده است، ولی معادله ارائه شده او صرفاً یک معادله آماری بر مبنای هم‌بستگی داده‌ها می‌باشد. بنابراین، معادلات دسته دوم فاقد مبنای فیزیکی هستند، و با این فرض شکل گرفته‌اند که متغیرهای مستقل همچون دبی و قطره ذره رسوب، می‌توانند تصویرگر مناسبی برای پارامترهای وابسته یعنی عرض، عمق و شیب کانال باشند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

جدول ۲. خلاصه متغیرهای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مقطع هیدرولیکی کانال‌های با بستر شنی با استفاده از پروفیل سرعت

شماره آزمایش	h (m)	u_m (m/s)	Q (m^3/s)	S	u_* (m/s)	d_{50} (m)	$\tau_{*\theta}$	پیش‌بینی h معادله ۱۲	پیش‌بینی S معادله ۱۴
۱	۰/۲۸۴	۰/۵۰۳	۰/۰۸۱	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۳۷۱	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴۱	۰/۳۰۳	۰/۰۰۰۴۴
۲	۰/۲۸۴	۰/۵۰۲	۰/۰۸۱	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۳۹۲	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴۵	۰/۲۹۳	۰/۰۰۰۵
۳	۰/۲۸۹	۰/۴۰۵	۰/۰۶۶	۰/۰۰۰۵	۰/۰۳۱۹	۰/۰۲۳	۰/۰۰۳	۰/۲۸۸	۰/۰۰۰۳
۴	۰/۲۸۹	۰/۳۹۶	۰/۰۶۶	۰/۰۰۰۵	۰/۰۳۵۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۳۸	۰/۲۶۸	۰/۰۰۰۴
۵	۰/۱۵۷	۰/۶۳۷	۰/۰۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۵۸۳	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۸۸	۰/۱۵	۰/۰۰۲۹۸
۶	۰/۱۲۴	۰/۵۳۸	۰/۰۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۴۷۴	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۲۴	۰/۱۲۷	۰/۰۰۱۷۷
۷	۰/۱۰۹	۰/۴۷۴	۰/۰۳۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۴۵۹	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۱۶	۰/۱۰۸	۰/۰۰۱۶۳
۸	۰/۱۸۹	۰/۹۷	۰/۱۱	۰/۰۰۵	۰/۰۹۱	۰/۰۱۲۳	۰/۰۴۵۸	۰/۱۷۵	۰/۰۰۹۱۲
۹	۰/۱۷	۰/۸۸۲	۰/۰۹	۰/۰۰۵	۰/۰۷۷۴	۰/۰۱۲۳	۰/۰۳۳۱	۰/۱۶۷	۰/۰۰۶۰۷
۱۰	۰/۱۴۲	۰/۸۲۲	۰/۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۷۵۷	۰/۰۱۲۳	۰/۰۳۱۷	۰/۱۴۲	۰/۰۰۵۷۴
۱۱	۰/۱۱۸	۰/۷۰۶	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۶۸۹	۰/۰۱۲۳	۰/۰۲۶۷	۰/۱۱۸	۰/۰۰۴۵۳
۱۲	۰/۰۸۹	۰/۵۶۲	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۶۷۵	۰/۰۱۲۳	۰/۰۲۵۲	۰/۰۸۲	۰/۰۰۴۳۱
۱۳	۰/۱۲۲	۰/۸۸۸	۰/۰۶۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۸۵	۰/۰۱۲۳	۰/۰۳۹۹	۰/۱۲۴	۰/۰۰۷۶۸
۱۴	۰/۱	۰/۸۳۳	۰/۰۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۱۲۳	۰/۰۳۳۶	۰/۱۰۹	۰/۰۰۶۱۹
۱۵	۰/۱۲۲	۰/۹۵۶	۰/۰۷	۰/۰۰۹	۰/۰۹	۰/۰۱۲۳	۰/۰۴۴۸	۰/۱۲۷	۰/۰۰۸۸۷
۱۶	۰/۱۱۲	۰/۳۹۳	۰/۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۸۸۳	۰/۰۱۲۳	۰/۴۳۱	۰/۱۱۵	۰/۰۰۸۴۵
۱۷	۰/۱۰۵	۰/۸۷۳	۰/۰۵۵	۰/۰۱	۰/۰۹۸	۰/۰۱۲۳	۰/۰۵۳۱	۰/۱۰۱	۰/۰۱۰۹۸
۱۸	۰/۰۹۱	۰/۹۱۶	۰/۰۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۹۸	۰/۰۱۲۳	۰/۰۵۳۱	۰/۰۹۴	۰/۰۱۰۹۸
۱۹	۰/۰۷۷	۰/۸۶۶	۰/۰۴	۰/۰۱۵	۰/۱	۰/۰۱۲۳	۰/۰۵۵۳	۰/۰۷۹	۰/۰۱۱۵۶

جدول ۳. دامنه تغییرات داده‌های موضعی در ۱۹ کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در پژوهش

متغیر	دامنه
w(m)	۰/۶۰
h(m)	۰/۰۷۷-۰/۲۸۹
S	۰/۰۰۰۲۵-۰/۰۱۵۰
d_{50}(m)	۰/۰۱۲۳-۰/۰۲۳۰
$Q(m^3s^{-1})$	۰/۰۳۱-۰/۱۱۰
$u_m(ms^{-1})$	۰/۳۹۶-۰/۹۷۰
$\tau_{*\theta}$	۰/۰۰۳۰-۰/۰۵۵۳

از آن جا که برای یک دبی آب و رسوب مشخص، کانال از طریق سه پارامتر اصلی عرض، عمق و شیب، شکل خود را برای رسیدن به پایداری به طور مداوم تعدیل می‌کند، برای تعیین این سه پارامتر نیاز به سه معادله برای حل سیستم می‌باشد، که تنها معادله انتقال رسوب برای شیب کانال و معادله مقاومت جریان برای عمق جریان در دسترس است. در این جا است که فرضیه حدی[1] وارد عمل می‌شود تا با ایجاد امکان تعریف معادله سوم، بتوان سیستم معادلات را حل کرد.

معادلات گسترش یافته بر پایهٔ فرایند آماری می‌توانند شکل کلی ابعاد کانال‌های پایداری را ارائه کنند. این موضوع مشروط بر

1. Extremal hypothesis

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

جدول ۴. معادلات برگزیده برای رودخانه‌های با بستر شنی

پژوهشگران	S	h	w
سایمونز و آلبرتسون (۷)	$S=0/0062^{-0/24}$	$h=2/85Q^{0/36}$	$w=2/85Q^{0/50}$
کلرهالز (۱۱)[1]	$S=0/0066Q^{0/4}d_{90}^{0/92}$	$h=0/182Q^{0/40}d_{90}^{-0/12}$	$w=3/26Q^{0/50}$
پارکر (۱۵)[2]	$S=0/223Q_e^{-0/41}$	$h=0/253Q_e^{0/415}d_{50}$	$w=4/4Q_e^{0/50}d_{50}$
چانگ (۵)[3]	$S=0/0763Q^{0/51}d_{50}^{0/50}$	$h=C_2Q^{0/42}$	$w=C_1Q^{0/47}$
بری (۴)	$S=0/21Q^{-0/38}d_{50}^{0/94}$	$h=21Q^{0/40}d_{50}^{0/01}$	$w=2/73Q^{0/5}d_{50}^{-0/24}$
بری (۴)[4]	$S=0/06Q^{-0/33}d_{50}^{0/59}$	$h=0/25Q^{0/33}d_{50}^{-0/03}$	$w=3/86Q^{0/53}d_{50}^{-0/07}$
هی و تورن (۹)[4]	$S=0/09Q^{-0/29}d_{50}^{0/69}$	$h=0/22Q^{0/36}d_{50}^{-0/12}$	$w=3/62Q^{0/45}$
هی و تورن (۹)	$S=0/09Q^{-0/28}d_{50}^{0/70}$	$h=0/23Q^{0/41}d_{50}^{-0/03}$	$w=3/27Q^{0/42}d_{50}^{-0/50}$
نیل (۱۴)	$S=0/854Q^{-0/43}d_{50}^{1/29}$	$h=0/058Q^{0/43}d_{50}^{-0/29}$	$w=4/386Q^{0/50}$

۱. در این معادله از d_{50} به جای d_{90} استفاده شد، زیرا d_{90} در دسترس نبود.

۲. در این جا $Q_e=Q\left[(G-1)gd_{50}^5\right]^{-0/5}$

۳. در این جا $C_1=3/101+0/4053\left[\log\left(0/000283d^{1/15}S^{-1}Q^{-0/42}\right)\right]^2$

$C_2=0.2829+0/0569\log\left(0/00009897d^{1/15}S^{-1}Q^{-0/42}\right)$

۴. معادلات به دست آمده از هم‌بستگی پارامترهای ابعادی

آن است که پارامترهای مستقل و وابسته به خوبی شناسایی شده باشند، و تغییرپذیری در داخل و در میان پارامترهای مستقل حداکثر باشد. هر چند، چنین معادلاتی نمی‌توانند توضیح دهند که چرا و چگونه کانال‌ها شکل و ابعاد خود را تعدیل می‌کنند. این معادلات صرفاً مانند جعبه سیاه[1] عمل کرده، و در واقع تنها مربوط به اثر پارامترهای مستقل ورودی بر پارامترهای وابسته خروجی هستند، و هیچ اثری در فرایندهای کنترل کننده ندارند.

هدف این پژوهش بررسی مکانیسم تعدیل مقطع کانال پایدار و شیب آن نیست، بلکه هدف، ارائه کمی شکل مناسب پیش‌بینی عرض، عمق و شیب کانال بر پایهٔ داده‌های در دسترس می‌باشد. بدین منظور، توانایی معادلات موجود با استفاده از معیارهای آماری بررسی می‌شود. خواننده علاقه‌مند به مباحث تئوریک طراحی کانال‌های پایدار و مکانیسم تعدیل آنها، می‌تواند به گزارش کمیته کار انجمن مهندسین عمران آمریکا روی رودخانه‌ها (۲)، و مقالات چانگ (۶)، پارکر (۱۵) و جولین و وارگادالام (۱۰) مراجعه کند. لازم به یادآوری است که در جدول ۴ معادلات هی و تورن (۹) و نیز بری (۴)، به دو صورت بی‌بعد و ابعادی ارائه شده است. در واقع به منظور ایجاد همگنی ابعادی برای این معادلات، از شتاب ثقل (g) استفاده گردیده است. برای مثال، بری (۴) برای عرض جریان (w) رابطه زیر را ارائه می‌دهد:

$$\frac{wg^{0/2}}{Q^{0/4}}=4/73\left[\frac{d_{50}g^{0/2}}{Q^{0/4}}\right]^{0/24} \qquad [2]$$

که پس از جای‌گذاری مقدار عددی و مرتب کردن، معادله بی‌بعد عرض کانال حاصل می‌شود (جدول ۴).

1. Black Box

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

تمام معادلات جدول ۴ از قانون توانی به شکل زیر استفاده می‌کنند:

$$\{w, h, S\} = aQ^b d_s^c \qquad [۳]$$

که در آن a، b و c ضریب و توان‌های حاصل از معادله هم‌بستگی هستند که از هر گونه خطر هم‌بستگی ساختگی[1] دور می‌باشند. بیشتر معادلات ارائه شده برای عمق آب در جدول ۴ کاملاً همانند هستند، و تنها تغییرات کوچکی در مقادیر ضرایب و توان‌ها دیده می‌شود. شکل کلی این معادلات نشان می‌دهد که دبی جریان (Q) و میانگین اندازه مواد بستر (d_{50}) در میان عوامل کنترل کننده عمق جریان (h) در کانال‌های پایدار می‌باشند. برعکس، معادلات عرض کانال تفاوت‌های بیشتری دارند، اگرچه از همان پارامترهای مستقل، یعنی دبی جریان و قطر ذره رسوب استفاده شده است. به نظر آندروز (۱) و هی و تورن (۹) علت این امر حضور پوشش گیاهی در طول دیواره‌های کانال می‌باشد، که اثر چشم‌گیری بر عرض کانال دارد. هم‌چنین، معادلات شیب کانال از لحاظ توان‌ها و ضرایب ثابت نیز با یکدیگر اختلاف دارند. این مسئله، به ویژه در مورد معادلات بری (۴) دیده می‌شود. عامل احتمالی برای این اختلاف ممکن است مسئله انتقال رسوب باشد (۹).

جولین و وارگادالام (۱۰) یک رابطه توانی بر پایهٔ ملاحظات تئوریک، و با استفاده از معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و مقاومت جریان به شکل زیر ارائه داده‌اند:

$$\{w, h, S\} = aQ^b d_s^c \tau_{*\theta}^e \qquad [۴]$$

که حرکت ذرات رسوب توسط پارامتر شیلدز $(\tau_{*\theta})$ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\tau_{*\theta} = \frac{\tau_\theta}{[\rho_s - \rho]\ g d_s} \qquad [۵]$$

که τ_θ تنش برشی در کانال است، و برای برآورد آن از مدل تنش برشی با شیب فشار صفر[2] به صورت زیر استفاده می‌گردد.

$$\tau_\theta = \rho g h S \qquad [۶]$$

کاربرد این پارامتر برای تخمین عمق جریان (h) و شیب کانال (S)، با استفاده از پارامترهای کلی[3] (منظور میانگین عمق کانال و شیب عمومی کانال است) توأم با خطر هم‌بستگی ساختگی است، زیرا دو پارامتر S و h هم به صورت پارامترهای مستقل، و هم وابسته عمل می‌کنند (۱۲).

پیش از تعیین قابلیت پیش‌بینی معادلات برگزیده در جدول ۴، بهتر است به ماتریس ضرایب تشخیص (R^2) پارامترهای کلی، که به صورت لگاریتمی در جدول ۵ ارائه شده است، توجه شود. در جدول ۵، استفاده از لگاریتم به منظور ارائه بهتر دامنه تغییرات پارامترها می‌باشد. با در نظر داشتن رابطه ۳، ماتریس ضرایب تشخیص نشان می‌دهد که log(w) و log(h) با log(Q) هم‌بستگی داشته، ولی با $\log(d_{50})$ هم‌بستگی ندارند. متغیر log(S)، نه با log(Q) و نه با $\log(d_{50})$ هم‌بستگی نشان نمی‌دهد. بنابراین، به نظر می‌رسد برای رودخانه‌های شنی برگزیده در این بررسی، میانگین قطر ذره رسوب (d_{50}) نمی‌تواند تغییرات مشاهده شده در عرض کانال، عمق جریان و شیب کانال را توضیح دهد.

هم‌چنین، تغییرات شیب کانال، نمی‌تواند با پارامترهای اندازه‌گیری شدهٔ موجود در رودخانه‌های مورد بررسی توضیح داده شود. عرض کانال بیشتر به عنوان پارامتر اصلی تئوری رژیم تلقی می‌شود (۲و۷)، زیرا چنین گمان می‌رود که عمق جریان و شیب کانال می‌توانند توسط معادلات مقاومت جریان و انتقال رسوب تعیین شوند، اگرچه باید یادآوری کرد که معادلات مقاومت جریان و انتقال رسوب خود دارای ضعف‌های بسیاری در پیش‌بینی ویژگی‌های هندسی کانال‌ها هستند. بنابراین، استفاده از این گونه معادلات برای برآورد پارامترهای دیگر بسیار سؤال برانگیز است.

توانایی پیش‌بینی معادلات برگزیدهٔ جدول ۴ برای عرض کانال، در جدول ۶ نشان داده شده است. بیشتر معادلات دارای ضریب تشخیص یکسانی هستند. استفاده ترکیبی از Q و d_{50} نتایج بهتری را نسبت به استفاده تنها از Q نشان نمی‌دهد. برای

1. Spurious correlation
2. Zero-pressure gradient
3. Bulk parameters

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

جدول ۵. ماتریس ضرایب تشخیص (R^2) برای داده‌های کلی

متغیر	log(w)	log(h)	log(S)	$\log(d_{50})$	log(Q)	$\log(u_m)$
log(w)	۱/۰۰	۰/۳۰	۰/۲۴	۰/۷۰	۰/۶	۰/۰۰
log(h)	۰/۳۰	۱/۰۰	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۷۱	۰/۱۶
log(S)	۰/۲۴	۰/۱۶	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۱۶
$\log(d_{50})$	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱
log(Q)	۰/۶۰	۰/۷۱	۰/۰۶	۰/۰۳	۱/۰۰	۰/۳۶
$\log(u_m)$	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۳۶	۱/۰۰

جدول ۶. خلاصه نتایج آماری معادلات برگزیده برای پیش‌بینی عرض کانال

پژوهشگران	پارامترهای آماری		
	α	β	R^2
سایمونز و آلبرتسون (۱۷)	۱/۴۰	۳/۶۸	۰/۵۷
کلرهالز (۱۱)	۱/۲۲	۳/۵۸	۰/۵۷
پارکر (۱۵)	۰/۸۴	۴/۶۳	۰/۵۰
چانگ (۵)	۰/۱۴	۸/۵۴	۰/۳۹
بری (۴)	۰/۷۰	۴/۵۳	۰/۵۰
بری (۴)[1]	۰/۷۲	۴/۷۳	۰/۵۶
هی و تورن (۹)[1]	۱/۴۵	۱/۵۴	۰/۵۷
هی و تورن (۹)	۱/۵۴	-۰/۰۲	۰/۵۶
نیل (۱۴)	۰/۹۱	۳/۶۸	۰/۵۷

۱. معادلات به دست آمده از هم‌بستگی پارامترهای ابعادی

مثال، معادله سایمونز و آلبرتسون (۱۷) و معادله هی و تورن (۹) منتهی به ضرایب تشخیص یکسانی می‌شوند، اگرچه معادله آخری از دو پارامتر مستقل، و اولی از یک پارامتر مستقل برای پیش‌بینی عرض کانال استفاده می‌کند.

جدول ۷ نتایج آماری برای پیش‌بینی عمق میانگین جریان را نشان می‌دهد. در این جا نیز معادلات به مقادیر آماری کم و بیش یکسانی منتهی می‌شوند. باز هم قابل توجه است که معادله سایمونز و آلبرتسون (۱۷)، با آن‌که از هیچ پارامتری بجز دبی (Q) استفاده نمی‌کند، به اندازه دیگر معادلات توانایی پیش‌بینی عمق جریان را دارد.

با ملاحظه نتایج نامطلوب و بسیار ضعیف آماری ارائه شده در جدول ۸، مشخص می‌شود که هیچ یک از معادلات برگزیدهٔ جدول ۲ پیش‌بینی منطقی و مناسبی از شیب کانال ندارند. این مسئله بیانگر آن است که دست‌کم پارامترهای برگزیده و مستقل در شکل ارائه شده در این معادلات، از عوامل مؤثر در مکانیسم تغییر و تحولات شیب کانال نیستند.

در حالت کلی، معادلات برگزیدهٔ رژیم عمق جریان را خوب، عرض کانال را متوسط و شیب کانال را بسیار ضعیف

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

جدول ۷. خلاصه نتایج آماری معادلات برگزیده برای پیش‌بینی عمق میانگین جریان

پژوهشگران	پارامترهای آماری		
	α	β	R^2
	(۲)	(۳)	(۴)
سایمونز و آلبرتسون (۱۷)	۰/۷۷	۰/۱۲	۰/۶۵
کلرهالز (۱۱)	۰/۷۳	۰/۱۹	۰/۶۴
پارکر (۱۵)	۱/۰۹	۰/۲۱	۰/۶۵
چانگ (۵)	۰/۵۴	۰/۴۹	۰/۴۰
بری (۴)	۰/۹۱	۰/۱۹۷	۰/۶۵
بری (۴)[1]	۱/۰۷	۰/۰۴۷	۰/۶۶
هی و تورن (۹)[1]	۰/۷۸	۰/۱۱	۰/۶۴
هی و تورن (۹)	۰/۷۱	۰/۲۱	۰/۶۵
نیل (۱۴)	۱۱/۱	۰/۲۶	۰/۳۲

۱. معادلات به دست آمده از هم‌بستگی پارامترهای ابعادی

جدول ۸. نتایج آماری معادلات برگزیده برای پیش‌بینی شیب کانال

پژوهشگران	پارامترهای آماری		
	α	β	R^2
سایمونز و آلبرتسون (۱۷)	۲/۶۱	-۰/۰۰۲	۰/۱۰۹
کلرهالز (۱۱)	۵/۷۰	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۰۴
پارکر (۱۵)	۰/۱۴	۰/۰۰۵۹	۰/۰۱۷۳
چانگ (۵)	۰/۴۱	۰/۰۰۴۷	۰/۰۴۹۴
بری (۴)	۰/۵۶	۰/۰۰۴۳	۰/۰۳۴۷
بری (۴)[1]	۰/۲۳۱	۰/۰۰۵۷۱	۰/۰۱۸۶
هی و تورن (۹)[1]	۰/۳۷۲	۰/۰۰۴۸	۰/۰۲۳۴
هی و تورن (۹)	۰/۳۶۴	۰/۰۰۴۹	۰/۰۲۱۷
نیل (۱۴)	۰/۰۹۰	۰/۰۰۶۳	۰/۰۱۲۱

۱. معادلات به دست آمده از هم‌بستگی پارامترهای ابعادی

پیش‌بینی می‌کنند. هر چند، برخی از این معادلات ممکن است با به کار گرفته شدن در شرایطی مشابه شرایطی که در آن توسعه یافته‌اند، پیش‌بینی قابل پذیرشی نشان دهند. برای مثال، تورن و همکاران (۲۰) نشان دادند که معادله چانگ (۵) برای رودخانه‌های انگلستان توان پیش‌بینی مناسبی دارد. علت این امر دو برابر بزرگ‌تر در نظر گرفتن پارامتر بحرانی شیلدز، نسبت به مقدار معمول مشاهده شده برای آغاز حرکت، به دلیل افزایش پایداری دیواره کانال، در کانال‌های واقع در انگلستان عنوان شده

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

است (۱۶ و ۲۲). بنابراین، اگر فرض می‌شود که ثابت‌ها و توان‌ها در هر معادله ممکن‌است تحت تأثیر برخی پارامترهای اندازه‌گیری نشده واقع شوند، هنگام استفاده از دامنه وسیعی از داده‌ها که از شرایط جغرافیایی و ژئومورفولوژیک متفاوت به دست آمده است، می‌توان یک چنین پیش‌بینی ضعیفی انتظار داشت.

معادلات پیشنهادی بر پایهٔ پارامترهای کلی

ماتریس ضرایب تشخیص جدول ۵ چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای برای اصلاح قابل توجه پیش‌بینی عرض، عمق و شیب کانال‌های با بستر شنی به دست نمی‌دهد. گسترش هر نوع معادله به شکل رابطه ۴ می‌بایست با احتیاط کامل برای پرهیز از هم‌بستگی ساختگی صورت پذیرد. این موضوع نه تنها در کاربرد پارامترهایی همچون پارامتر شیلدز (معادله ۵)، که در آن از h و S در دو طرف معادله استفاده شده، محتمل است، که در کاربرد پارامترهایی مانند قطر میانگین ذره رسوب (d_{50})، که هم‌بستگی ضعیفی را با h، w و S نشان می‌دهد، نیز ملاحظه می‌شود (۱۲).

حال اگر بخواهیم با اطلاعات و آمار ۲۸۰ رودخانه با بستر شنی، گردآوری شده توسط وارگادالام (۲۱)، معادله‌ای برای عرض کانال ارائه دهیم، خواهیم داشت:

$$w = 5/5 Q^{0/43} \qquad [7]$$

هرگاه معادله هم‌بستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده عرض کانال ۲۸۰ رودخانه را با مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله ۷ به دست آوریم، به نتایج بعدی می‌رسیم: عرض از مبدأ معادله $\alpha=0/54$، شیب معادله هم‌بستگی $\beta=1/08$، و ضریب تشخیص $R^2=0/57$. ضریب تشخیص به دست آمده نشان می‌دهد که معادله ۷ می‌تواند ۵۷٪ پیش‌بینی مناسبی برای رودخانه‌های در دست بررسی نشان دهد، که این معادله نسبت به معادلات برگزیده جدول ۴ هیچ برتری ندارد. اگر افزون بر دبی جریان Q، پارامتر شیلدز نیز در نظر گرفته شود:

$$w = 2Q^{0/44}\tau_{*\theta}^{-0/28} \qquad [8]$$

عوامل معادله هم‌بستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط معادله ۸ به صورت $\alpha=0/41$، $\beta=1/28$ و $R^2=0/7$ می‌باشند. اگرچه کاربرد پارامتر شیلدز در معادله ۸، نسبت به معادله ۷، از نظر ضریب تشخیص به یک پیش‌بینی بهتر منجر می‌شود (معادله ۸ دارای هم‌بستگی ساختگی نیست)، ولی چون استفاده از معادله ۸ نیاز به شناخت قبلی h و S دارد، این پیش‌بینی بهتر، به علت افزایش پیچیدگی کاربرد قابل توجه نیست.

بهترین معادلات حاضر برای پیش‌بینی عمق جریان بر پایهٔ معیارهای آماری به شکل‌های زیر می‌باشند:

$$h = 0/31 Q^{0/32} \qquad [9]$$

که مشخصات آماری آن عبارتند از $\alpha=0/002$، $\beta=1/02$ و $R^2=0/71$. هم‌چنین، با در نظر گرفتن شیب رودخانه افزون بر آبدهی، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$h = 0/19 Q^{0/3} S^{-0/1} \qquad [10]$$

که $\alpha=0/002$، $\beta=1/02$ و $R^2=0/71$ است. چون معادله ۱۰ نیاز به شناخت قبلی S دارد، معادله ساده‌تر ۹ می‌تواند روش بهتری باشد، اگرچه پیش‌بینی بهتری نسبت به استفاده از برخی معادلات جدول ۴ نشان نمی‌دهد. لازم به یادآوری است که در نظر گرفتن پارامتر شیلدز نیز هیچ برتری و تغییری نسبت به معادله ۹ نشان نمی‌دهد.

سرانجام، هیچ معادله مناسبی برای پیش‌بینی شیب کانال‌های با بستر شنی، با داده‌های موجود قابل دسترسی نیست. این به دلیل نداشتن هم‌بستگی با دیگر پارامترهای هیدرولیکی (جدول ۵) می‌باشد. برای مثال، هر تلاشی در به کار بردن پارامتر شیلدز در معادلات، به علت ترکیب S و d_{50} برای محاسبه این پارامتر، منجر به هم‌بستگی ساختگی می‌شود (معادلات ۵ و ۶ را نگاه کنید). مثلاً، معادله:

$$S = 0/09 Q^{-0/229}\tau_{*\theta}^{0/73} \qquad [11]$$

با $\alpha=0/0011$، $\beta=0/96$ و $R^2=0/65$ یک معادله ساختگی است. همان گونه که کنی (۱۲) نشان داده است، وقتی عواملی مانند S و d_{50} با یکدیگر هم‌بستگی ندارند، یک هم‌بستگی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

ساختگی منتهی به یک توان برابر با:

$$\frac{mn}{\frac{\sigma^2_{\log(d_{50})}}{\sigma^2_{\log(S)}}+n^2}=\frac{1}{\frac{0/44}{1/23}}=0/74$$

می‌شود، که در این جا σ^2 واریانس، m و n توان‌های پارامتر S، به ترتیب در طرف راست و چپ این معادله پیش از هم‌بستگی می‌باشند. تمام حالت‌های متصور با استفاده از پارامترهای بدون بعد، که قبلاً در این مقاله به آنها اشاره شده، همچون پارامتر رسوب و پارامتر توان جریان و غیره، به هم‌بستگی ساختگی آشکارتری منجر می‌شوند. به نظر می‌رسد که روش برآورد یا اندازه‌گیری داده‌های موجود، نمی‌تواند معادلاتی را که بر پایهٔ پارامتر شیلدز شکل می‌گیرند تائید کند.

ملاحظات فوق تأییدی است بر نتایج به دست آمده توسط بتیز و همکاران (۳)، که بر پایهٔ آن، تشریح، گسترش و پیش‌بینی عرض کانال، عمق میانگین جریان و شیب کانال نیاز به دانستن توزیع تنش برشی[1] روی بستر و دیواره‌های کانال دارد. در واقع، یک چنین توزیعی که بر پایهٔ تئوری لایه مرزی[2] استوار است، امکان برآورد مستقیم پارامتر شیلدز را، بدون حضور h و S در دو طرف معادله هم‌بستگی، فراهم خواهد ساخت. بنابراین، پیشرفت در زمینه گسترش معادلات پیش‌بینی ویژگی‌های کانال‌های پایدار، به بانک اطلاعاتی بزرگ‌تری نیاز نداشته، بلکه به ارائه روش‌های نو و پارامترهای برآورد شده توسط آنها بستگی دارد.

پارامترهای موضعی[3]

همان گونه که دیده شد، پارامترهای کلی موجود امکان گسترش معادلاتی را که بر پایهٔ رابطه توانی ۴ حاصل می‌شوند ندارند، زیرا پارامترهایی مانند پارامتر شیلدز می‌بایست از مدل شیب فشار صفر (رابطه ۶) برآورد شوند. برای بهبود این وضعیت، نیاز به داده‌هایی است که امکان محاسبه پارامتر شیلدز را بر پایهٔ تئوری لایه مرزی فراهم نماید. در این بخش، اگرچه نتایج حاصل برای شرایط آزمایشگاهی است، ولی موفقیت آنها در پیش بینی می‌تواند رهگشایی در کارهای صحرایی باشد.

در واقع، با در نظر گرفتن پروفیل سرعت و تقسیم آن به ناحیه داخلی (که حدود ۲۰٪ عمق جریان در نزدیک بستر را در برمی‌گیرد) و ناحیه خارجی (که بقیه ۸۰٪ عمق جریان را در نظر می‌گیرد)، می‌توان به یک برآورد واقع گرایانه‌تر نسبت به رابطه ۶، از سرعت مالشی[4] در نتیجه تنش برشی دست یافت. مجموع نواحی داخلی و خارجی پروفیل سرعت، تشکیل لایه مرزی را می‌دهند. سانگ و همکاران (۱۹)، و کرونوتو و گراف (۱۳) نشان دادند که ناحیه داخلی لایه مرزی در جریان کانال‌های باز از قانون لگاریتمی پیروی کرده، و نیز ضریب جهانی فون کارمن برابر ۰/۴ می‌باشد، و براین اساس، سرعت مالشی (U_*) را با استفاده از داده‌های ناحیه داخلی محاسبه کردند. مسلماً چنین برآوردی خطر هر نوع هم‌بستگی را در عمل از بین خواهد برد، و تصویر بهتری از رفتار موضعی جریان ارائه خواهد کرد.

پارامترهای مستخرج از ۱۹ پروفیل مشاهده شده سرعت تحت جریان دایمی یک‌نواخت در کانال آزمایشگاهی، که توسط سانگ و همکاران (۱۹) و کرونوتو و گراف (۱۳) به دست آمده، در جدول ۲ ارائه شده است. چون عرض کانال آزمایشگاهی ثابت بود (w=۰/۶ m) هیچ معادله‌ای برای عرض کانال پیشنهاد نشد. هم‌چنین، چون قطر ذره رسوب مورد نیاز برای داده‌های سانگ و همکاران (۱۹) برابر d_{50} = ۱۲/۳ میلی‌متر، و برای داده‌های کرونوتو و گراف (۱۳) برابر d_{50} = ۲۳ میلی‌متر می‌باشد، از این پارامتر نیز استفاده نشد.

امتیاز دسته دوم داده‌ها نسبت به دسته اول آن است که تنش برشی بستر از پروفیل سرعت و داده‌های بخش درونی لایه مرزی $\left[\frac{y}{h}<0/2\right]$ برآورد می‌شود، که در آن y فاصله تا بستر کانال می‌باشد. بنابراین، یک چنین برآوردی خطر هم‌بستگی ساختگی را هنگام استفاده از قوانین توانی مانند معادله ۴ از بین

1. Shear stress 2. Boundary layer theory 3. Local parameters 4. Shear velocity

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

خواهد برد.

دامنه تغییرات متغیرهای موضعی در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه میان داده‌های مربوط به رودخانه‌ها (جدول ۱) و داده‌های موضعی (جدول ۳)، نشان می‌دهد که ابعاد کانال‌های آزمایشگاهی به طور چشم‌گیری محدودیت دامنه عمق جریان، عرض کانال و دبی را در مقایسه با رودخانه‌ها و کانال‌های طبیعی آشکار می‌سازند. هر چند دامنه سرعت‌های به دست آمده (جدول ۳) کاملاً واقع گرایانه می‌باشد.

با در نظر داشتن روابط توانی ۳ و ۴، ماتریس ضرایب تشخیص پارامترهای موضعی، شامل عمق جریان، شیب، دبی و پارامتر شیلدز بررسی گردید (جدول ۹). برابر این جدول، بیشتر این پارامترها با یکدیگر هم‌بستگی دارند. از سوی دیگر، شیب کانال و دبی با یکدیگر هم‌بستگی ضعیفی دارند، که این نتیجه همانند نتیجه حاصل از پارامترهای کلی (جدول ۵) است. شایان توجه است که پارامتر شیلدز نیز با دبی جریان هم‌بستگی نشان نمی‌دهد، زیرا تنها $\frac{1}{5}$ داده‌های پروفیل سرعت، که در ناحیه نزدیک بستر هستند، در تعیین این پارامتر استفاده می‌شود.

بررسی معادلات برگزیده

در این بخش، معادلات برگزیدهٔ جدول ۴، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی عمق جریان و شیب کانال به کار رفته و ضرایب تشخیص پارامترها، تعیین گردید (جدول ۱۰). برای عمق جریان، به استثنای معادله چانگ (۵)، دیگر معادلات برگزیده نامناسب‌تر از حالتی هستند که پارامترهای کلی مورد استفاده قرار گرفته بود. به نظر می‌رسد که شرایط آزمایشگاهی انتخابی، هم‌خوانی بیشتری با شرایط داده‌های مورد استفاده چانگ (۵) نشان می‌دهند. از سوی دیگر، تمام معادلات با کمی اصلاح در ضریب تشخیص مربوط به شیب کانال، در مقایسه با کاربرد پارامترهای کلی جدول ۵، منتهی شده‌اند. این اصلاح می‌بایست به قطر میانگین ذره رسوب مربوط باشد، زیرا شیب کانال و دبی جریان با یکدیگر هم‌بستگی ندارند.

معادلات پیشنهادی بر پایهٔ تئوری لایه مرزی

چنانچه پیش‌تر گفته شد، دبی جریان و پارامتر شیلدز از معنی‌دارترین و مؤثرترین عوامل پیش‌بینی ویژگی‌های یک کانال پایدار با بستر شنی می‌باشند. پارامترهای دیگری که از طریق آماری بررسی شد تأثیر کمتری بر عمق جریان و شیب کانال داشتند. بنابراین، پس از آن تنها اثر دبی جریان و پارامتر شیلدز بر عمق جریان و شیب کانال با بستر شنی بررسی گردید.

با بهره‌گیری از روش هم‌بستگی آماری و داده‌های پارامترهای موضعی، معادله زیر برای عمق جریان پیشنهاد می‌شود:

$$h = 0/32Q^{0/727}\tau_{*\theta}^{-0/3} \qquad [12]$$

که $\alpha=0/0$، $\beta=0/98$ و $R^2=0/98$ است. ضریب هم‌بستگی بسیار زیاد نشان می‌دهد که دو پارامتر مستقل سمت راست معادله به خوبی عمق میانگین جریان را پیش‌بینی می‌کنند. معادله ۱۲ نشان می‌دهد که عمق جریان به طور معکوس متناسب با پارامتر شیلدز، و به طور مستقیم متناسب با دبی جریان است. توان دبی در معادله ۱۲ به‌گونه‌ای چشم‌گیر بزرگ‌تر از توان دبی در معادلات برگزیدهٔ جدول ۴ (حدود ۰/۴) است. نتایج پیش‌بینی h، با استفاده از معادله ۱۲، در جدول ۲ آورده شده است.

برای شیب کانال، بهترین معادله به صورت زیر به دست آمد:

$$S = 0/439\tau_{*\theta}^{1/256} \qquad [13]$$

که $\alpha=0/0$، $\beta=1/0$ و $R^2=0/92$ است. ضریب هم‌بستگی تأکید می‌کند که شیب کانال مستقیماً متناسب با پارامتر شیلدز است.

هم‌چنین، تلاش شد دبی جریان به عنوان یک پارامتر مستقل، افزون بر پارامتر شیلدز، برای پیش‌بینی شیب کانال در نظر گرفته شود. بر این پایه، معادله زیر به دست آمد:

$$S = 0/053Q^{0/703}\tau_{*\theta}^{1/22} \qquad [14]$$

که در آن $\alpha=0/0$، $\beta=1/0$ و $R^2=0/96$ است. این معادله نشان می‌دهد که با افزودن دبی به عنوان پارامتر مستقل به سمت

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

جدول ۹. ماتریس ضرایب تشخیص (R^2) برای پارامترهای موضعی

متغیر	log(h)	log(S)	log(Q)	$\log(\tau_{*\theta})$
log(h)	۱/۰۰	۰/۷۹	۰/۴۵	۰/۶۶
log(S)	۰/۷۹	۱/۰۰	۰/۰۹	۰/۹۰
log(Q)	۰/۴۵	۰/۰۹	۱/۰۰	۰/۰۱
$\log(\tau_{*\theta})$	۰/۶۶	۰/۹۳	۰/۰۱	۱/۰۰

جدول ۱۰. ضرایب هم‌بستگی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده عمق جریان (h) و شیب کانال (S)، با بهره‌گیری از داده‌های موضعی و معادلات برگزیده در جدول ۴

پژوهشگران	h	S
سایمونز و آلبرتسون (۱۷)	۰/۳۶	۰/۰۵
کلرهالز (۱۱)	۰/۱۵	۰/۳۲
پارکر (۱۵)	۰/۲۹	۰/۳۴
چانگ (۵)	۰/۶۱	۰/۰۷
بری (۴)	۰/۳۸	۰/۲۵
بری (۴)[1]	۰/۲۹	۰/۳۴
هی و تورن (۹)[1]	۰/۱۴	۰/۳۲
هی و تورن (۹)	۰/۳۰	۰/۳۳
نیل (۱۴)	۰/۰۱	۰/۳۷

۱. معادلات به دست آمده از هم‌بستگی پارامترهای ابعادی

راست آن، تنها می‌توان درصد پیش‌بینی را بهبود بخشید.

از سوی دیگر، دیده می‌شود که توان‌های پارامتر شیلدز در روابط ۱۳ و ۱۴ تفاوت چندانی ندارند. بنابراین، آشکار می‌شود که پارامتر شیلدز از عوامل اصلی و تعیین کنندهٔ پارامترهای هیدرولیکی و هندسی کانال‌های پایدار با بستر شنی است، و برآورد این پارامتر می‌بایست بر پایهٔ پروفیل توزیع سرعت، و با در نظر گرفتن تئوری لایه مرزی صورت پذیرد. نتایج پیش‌بینی S، با استفاده از معادله ۱۴، در جدول ۲ آورده شده است.

نتیجه‌گیری

با بهره‌گیری از داده‌های ۲۸۰ رودخانه با بستر شنی در مناطق گوناگون جهان، شماری از رایج‌ترین معادلات موجود برای پیش‌بینی عرض، عمق و شیب کانال‌های پایدار مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی، معادلات رژیم که بر پایهٔ پارامترهای کلی گسترش یافته‌اند، پیش‌بینی مناسبی را، به ویژه برای شیب، نشان نمی‌دهند. از آن جا که هم‌بستگی بسیار ضعیفی میان میانگین قطر ذره رسوب (d_{50}) و پارامترهای عرض، عمق و شیب کانال وجود دارد، کاربرد این پارامتر افزون بر دبی جریان، نسبت به معادلاتی که تنها از دبی جریان استفاده می‌کنند، بهبودی حاصل نمی‌کند.

بر پایه پژوهش حاضر، کاربرد پارامترهای پیچیده (پارامتر شیلدز) همراه با هم‌بستگی ساختگی است، که بدون هر گونه پیش‌بینی و اصلاح وضع موجود می‌باشد. بنابراین، پیشرفت بیشتر در این زمینه بستگی به افزایش شمار داده‌ها نداشته، بلکه

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

نیاز به ارائه روش‌ها و پارامترهای تازه دارد. بر پایهٔ یافته‌های تئوریک جولین و وارگادالام (۱۰)، پارامتر شیلدز اثر چشم‌گیری بر طراحی یک مقطع پایدار دارد. در این باره، با وجود بهره‌گیری از پارامتر شیلدز، نتایج نشان داد که هیچ بهبودی برای پیش‌بینی عمق جریان و شیب کانال حاصل نشد. از سویی، چون محاسبه پارامتر شیلدز در روش شیب فشار صفر نیاز به دانستن عمق جریان و شیب کانال دارد، کاربرد این پارامتر برای پیش‌بینی عامل سوم، یعنی عرض کانال مناسب نیست. بهره‌گیری از تئوری لایه مرزی برای برآورد پارامتر شیلدز، افزایش توان پیش‌بینی پارامترهای یک مقطع پایدار (کانال یا رودخانه) را به همراه دارد، و قابل توجیه و توصیه می‌باشد. پارامترهای مستخرج از ۱۹ پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده و به‌کار رفته در این پژوهش نشان داد که می‌توان پیش‌بینی عمق جریان و شیب کانال را به طور شایسته‌ای بهبود بخشید.

سپاسگزاری

از جناب آقای دکتر سیدفرهاد موسوی استاد محترم دانشگاه صنعتی اصفهان، که در ویرایش متن به نویسنده یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

1. Andrews, E. D. 1984. Bed material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado. Geol. Soc. Am. Bull. 95: 371-378.
2. ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment. 1998. River adjustment. 1. Processes and mechanisms. ASCE, J. Hyd. Eng. 124(9):
3. Bettees, R., W. R. White and C. E. Reeve. 1988. On the Width of Regime Channels. Proc. Int. Conf. River Regime, John Wiley & Sons, New York.
4. Bray, D. L. 1982. Regime equations for gravel-bed rivers. PP. 242-245. *In*: R. D. Hey, J. C. Bathurst and C. R. Thorne (Eds.), Gravel-bed Rivers. John Wiley & Sons, New York.
5. Chang, H. H. 1980. Stable alluvial canal design. ASCE, J. Hyd. Eng. 106(5): 873-891.
6. Chang, H. H. 1992. Fluvial Processes in River Engineering. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA.
7. Ferguson, R. I. 1986. Hydraulics and Hydraulic Geometry. Progress in Physical Geography, No. 10, PP. 1-31.
8. Hey, R. D. and G. L. Heritage. 1988. Dimensional and dimensionless regime equations for gravel-bed rivers. Proc. Int. Conf. River Regime, John Wiley & Sons, New York.
9. Hey, R. D. and D. B. Thorne. 1986. Stable channels with mobile gravel-beds. ASCE, J. Hyd. Eng. 112(8): 671-689.
10. Julien, P. Y. and J. Wargadalam. 1995. Alluvial channel geometry: Theory and application. ASCE, J. Hyd. Eng. 121(4): 312-325.
11. Kellerhals, R. 1967. Stable channels with gravel-paved beds. ASCE, J. Waterways Harb. 93(1): 63-84.
12. Kenney, B. C. 1993. On the validity of empirical power laws. Stochastic Hyd. and Hydraulics 7: 179-194.
13. Kironoto, B. and W. H. Graf. 1994. Turbulence characteristics in rough uniform open channel flow. Proc. Instn. Civ. Engrs., Water, Marit. & Energy 106: 333-344.
14. Neill, C. R. 1988. Discussion on "Stable channels with mobile gravel-beds", by Hey and Thorne. ASCE, J. Hyd. Eng. 114(3): 339-341.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]

15. Parker, G. 1979. Hydraulic geometry of active gravel rivers. ASCE, J. Hyd. Div. 105(9): 1185-1201.
16. Parker, G. 1982. Discussion on the regime equations for gravel-bed rivers. PP. 542-551. *In:* R. D. Hey, J. C. Bathurst and C. R. Thorne (Eds.), Gravel-bed Rivers. John Wiley & Sons, New York.
17. Simons, D. B. and M. L. Albertson. 1963. Uniform water conveyance channels in alluvial materials. Trans. ASCE 128(1): 165-167.
18. Simons, D. B. and R. K. Simons 1987. Differences between gravel-bed and sand-bed rivers. PP. 1-15. *In*: C. R. Thorne, J. C. Bathurst and R. D. Hey (Eds.), Sediment Transport in Gravel-bed Rivers. John Wiley & Sons, New York.
19. Song, T., W. H. Graf and U. Lemmin. 1994. Uniform flow in open channels with movable gravel bed. J. Hyd. Res. 32(6): 861-876.
20. Thorne, C. R., H. H. Chang and R. D. Hey. 1988. Prediction of hydraulic geometry of gravel-bed streams using the minimum stream power concept. Proc. Int. Conf. River Regime, John Wiley & Sons, New York.
21. Wargadalam, J. 1993. Hydraulic geometry equations of alluvial channels. Ph. D. Dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
22. Wilson, K. C. 1988. Regime relations based on dispersive-force concentration profiles. Proc. Int. Conf. River Regime, John Wiley & Sons, New York.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1380.5.3.3.2]