مجله علمی- پژوهشی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

سال پنجم- شماره ۱۵- تابستان ۱۳۹۰ Vol. 5, No. 15, Summer 2011

ارزیابی نظریه های رژیم در تخمین عرض پایدار رودخانه‌های با بستر شنی

محمدرضا مجدزاده طباطبائی[۱]، احمد طاهرشمسی[۲]، رضا شیرخانی[۳]

تاریخ دریافت: ۸۹/۰٤/۱٦ تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۵/۲۵

چکیده

عرض پایدار رودخانه‌های رژیم یکی از مهمترین شاخص‌ها، در این آبراهه‌ها است که براساس آن اصول طراحی پایه گذاری میشود. محققین به شیوه‌های مختلف به دنبال ارائه روابطی جهت پیش‌بینی عرض پایدار رودخانه بوده‌اند. در این مطالعه ابتدا روش‌های مختلفی که پژوهشگران برای پاسخ به این سوال به کار گرفته‌اند معرفی می شود و سپس با انجام برازش روی ٤٤۰ داده مربوط به رودخانه‌های با بستر شنی در حالت مقطع پر، روابط بی‌بعد با استفاده از روش پارکر و روابط با بعد یک، دو و سه متغیره‌ای با پارامترهای دبی مقطع پر، اندازه متوسط ذرات بستر و شیب کانال استخراج شده است. در نهایت با استفاده از یک مجموعه ۹۵ داده‌ای دیگر روابط توسعه داده شده بابعد و بدون‌بعد برای پیش‌بینی عرض پایدار رودخانه‌های شنی با استفاده از محدوده خطای ۵۰ درصدی مورد بررسی قرار میگیرند. نتایج برازش روی داده‌ها نشان می‌دهد که عرض پایدار رودخانه‌های شنی به هرسه متغیر وابسته است، و بهترین رابطه با این سه پارامتر حاصل میشود. همچنین مقایسه بین روابط نشان میدهد که رابطه با بعد یالین و رابطه بدون بعد آربلاز و همکاران با توجه به معیار محدوده خطای ۵۰ درصدی بهتر از سایر روابط عرض پایدار رودخانه‌های با بستر شنی را پیش‌بینی می‌کنند.

کلمات کلیدی: عرض پایدار، رودخانه بستر شنی،نظریه رژیم، فرضیات حدی، روش نیمه نظری

مقدمه

هندسه هیدرولیکی یک رودخانه، اهمیت اساسی در طراحی، برنامه‌ریزی، مدیریت و ساماندهی رودخانه در علم مهندسی رودخانه دارد. اگرچه بعضی مفاهیم هندسه هیدرولیکی یک آبراهه در انتهای قرن نوزدهم بیان شده‌اند اما نخستین پیشرفت در فرمول‌بندی و ارائه نظریه در پیش‌بینی هندسه هیدرولیکی یک کانال را می‌توان مطالعه لئوپولد و ولمن [۲۷] دانست. تاکنون تعداد زیادی نظریه در این رابطه توسعه داده شده است. تعدادی از این نظریه‌ها به هم وابسته و برخی دیگر نیز دارای اصول به طور کامل متفاوت با سایرین هستند. با این حال فرضیات اساسی در همه‌ی نظریه‌ها ماندگار و یکنواخت بودن جریان و تمایل آبراهه به کسب حالت تعادل یا شبه تعادل میباشد و تفاوت اصلی این نظریه‌ها نیز ناشی از مکانیسم‌های هیدرولیکی به کار گرفته در مدل‌ها برای توضیح نحوه به تعادل رسیدن آبراهه است. رژیم یا حالت پایدار یک کانال بدین معنی است که در یک بازه زمانی یک یا چندین ساله تغییرات زیادی در کانال مشاهده نمی‌شود و کانال به صورت طبیعی میل به حمل رسوب در داخل مرزهای کانال برای دستیابی به یک حالت تعادل دینامیکی دارد [۱٤].

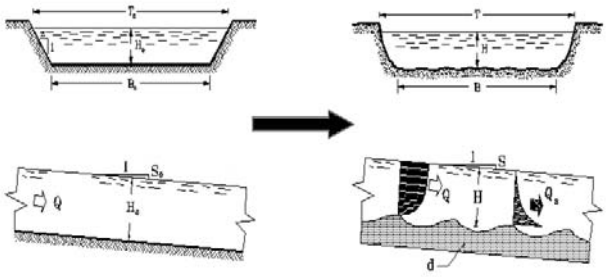
هدف اصلی این نوشتار معرفی نظریه‌های توسعه داده شده توسط پژوهشگران برای تخمین عرض پایدار رودخانه‌ها و بررسی پارامترهای موثر بر عرض پایدار رودخانه ودر نهایت مقایسه روابط پیشنهادی پژوهشگران در پیش‌بینی عرض رودخانه‌های بستر شنی است.

روش پژوهش

۱-۱- هندسه هیدرولیکی پایدار رودخانه

رژیم یک رودخانه آبرفتی به صورت دینامیک است و هرگز به طور کامل یک کانال پایدار نمی‌شود [۳۹]. برای توصیف هندسه هیدرولیکی یک کانال در حالت رژیم، یک کانال به شکل ذوزنقه مطابق شکل (۱) که در مواد آبرفتی ایجاد شده است در نظر می‌گیریم، در ابتدا مرزهای کانال از مصالح موجود در محل کانال ساخته شده است، بعد از مدت زمان زیادی که آب داخل کانال جریان دارد مرزهای کانال مشخصاتی قابل مقایسه با رسوب انتقال یافته توسط جریان را از خود نشان می‌دهند. در طول این فرآیند، سطح صاف بستر کانال تمایل به ایجاد موج پیدا کرده و همچنین کناره کانال نیز به شکل منحنی مانندی پدیدار میشود. این فرآیند در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است.

۱- استادیار دانشگاه صنعت آب و برق،
Email: mrmtabatabai@pwut.ac.ir
۲- نویسنده مسئول و دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تلفن: ٦٤٥٤۳۰۱۳-۰۲۱، فکس: ٦٦٤۱٤۲۱۳-۰۲۱، Email: tshamsi@aut.ac.ir
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Email: shirkhanireza@yahoo.com



شکل ۱- شماتیک هندسه یک کانال، سمت چپ: کانال اولیه، سمت راست: شکل پایدار یا رژیم کانال [۱۲]

سیر تکاملی فرآیندهای اتفاق افتاده در کانال ناشی از فعالیت‌های دینامیکی جریان و فرآیندهای رسوب‌گذاری و فرسایش در کانال است. در صورتیکه طراحی اولیه کانال نتیجه مناسبی نداشته باشد این امکان وجود دارد که فرسایش و ترسیب مصالح رسوبی تا زمانیکه مقطع عرضی و طولی با جریان آب و رسوب انتقال یافته کانال در حالت تعادل قرار گیرند، ادامه داشته باشد [۱۲]. با توجه به مفاهیم بیان شده، می‌توان اینطور بیان کرد که یک آبراهه آبرفتی هنگامی در شرایط پایداری، تعادل دینامیکی و یا رژیم قرار دارد که توانایی انتقال رسوب جریان با نرخ مصالح رسوبی موجود در حال تعادل باشد.

۱-۲- نظریه‌های تخمین عرض پایدار رودخانه

چندین روش برای تحلیل هندسه هیدرولیکی رودخانه با نام‌های روابط تجربی، شیوه‌های نیمه نظری، روش‌های اکسترمال (حدی) و شیوه مکانیکی (منطقی) وجود دارد. با این‌حال، به دلیل کمبود دانش در زمینه فرآیندهای فیزیکی تغییر شکل کانال و ساده‌سازی‌هایی که در فرضیات به کار رفته در این روش‌ها انجام شده است، تاکنون هیچ یک از روش‌ها مورد پذیرش کلی واقع نشده‌اند. در ادامه روش‌های ذکر شده و تلاش‌های پژوهشگران برای ارائه روابط به کمک این روش‌ها جهت پیش‌بینی عرض کانال در حالت مقطع پر ارائه می‌گردد.

۱-۲-۱- روابط تجربی

روابط تجربی کلاسیک‌ترین شیوه طراحی کانال‌های پایداری دارای انتقال رسوب است. نحوه توسعه این شیوه در طول زمان در بعضی مطالعات مانند چانگ [۸] و یالین [٤٦] به تفصیل آمده است. لیسی [۲۲] و لئوپولد و ولمن [۲۷] نخستین افرادی بودند که مفاهیم رژیم رودخانه را بیان کردند. در ادامه با دسته بندی این معادلات تجربی به شرح آنها پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱-الف- روابط تک متغیره

در ساده‌ترین حالت لئوپولد و ولمن [۲۷]روابطی توانی برای تخمین هندسه هیدرولیکی یک کانال با تک متغیر مستقل، دبی مقطع پر پیشنهاد و رابطه (۱) را برای پیش‌بینی عرض ارائه کرده‌اند.

$$W = aQ^b \qquad (۱)$$

در رابطه فوق W عرض کانال، Q دبی مقطع پر، a و b ضریب و توان دبی جریان هستند. پژوهشگران زیادی با انجام مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی برای ضریب و توان دبی مقطع پر جریان در رابطه (۱) مقادیر مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند. جدول (۱) روابط

جدول ۱- ضرائب پیشنهادی رابطه (۱)

نوع مطالعه	b	a	سال	محقق
صحرایی	۰/۵	٤/۸۳۳	۱۹۳۰	لیسی [۲۲]
صحرایی	۰/۵۲۳	٤/۲۳	۱۹٦٦	شیتاله [۹]
صحرایی	۰/۵۱۳	٤/۹۹	۱۹۷٤	محمود [۲۸]
آزمایشگاهی	۰/۵۳	۷/۵٦	۲۰۱۰	شیرخانی [٤۱]

پیشنهادی برخی پژوهشگران را نمایش می‌دهد. پارک [۳۲] معادله پیشنهادی ساده توانی(۱) را بهترین روش برای توصیف عرض کانال‌ها نمی‌داند.

۱-۲-۱-ب- روابط دو و سه متغیره

پژوهشگران بسیاری نیز با انجام رگرسیون بر روی داده‌های مقطع پر رودخانه‌ها روابط دو و سه متغیره‌ای را برای پیش‌بینی عرض مقطع پر کانال ارائه داده‌اند. بدین منظور معمولا از پارامترهای اندازه متوسط ذرات بستر (d_{50})، دبی مقطع پر (Q) و شیب رودخانه به عنوان متغیرهای رابطه بهره گرفته می‌شود. رابطه (۲) شکل کلی این روابط و جدول (۲) نیز ضرائب پیشنهادی محققین را با توجه به رابطه (۲) برای رودخانه‌های با بستر شنی ارائه می‌دهد.

$$W = C_0 Q^{C_1} d_{50}^{C_2} S^{C_3} \qquad (۲)$$

۱-۲-۱-پ- روابط بدون بعد

پارکر [۳٤] روابط رژیم لئوپولد و ولمن [۲۷] را به صورت بدون بعد ارائه کرد، رابطه (۳) معادله بدون بعد رابطه توانی (۱) را نشان می‌دهد.

$$B^* = \alpha_1 Q^{*\beta_1} \qquad (۳)$$

در رابطه ذکرشده عرض بدون بعد (B^*) و دبی بدون بعد (Q^*) به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$B^* = \frac{W}{d_{50}} \qquad (٤)$$

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g d_{50}} d_{50}^2} \qquad (۵)$$

g در رابطه فوق شتاب ثقل زمین است. جدول (۳) ضرائب پیشنهادی برخی محققین را برای رابطه (۳) نشان می‌دهد. شیرخانی [٤۱] با بررسی روابط بدون بعد پیشنهادی، این روابط را برای کانال‌های با بستر ماسه‌ای مناسب نمی‌داند.

۱-۲-۲- شیوه‌های نیمه نظری

روش‌های نیمه نظری معمولا با ترکیب معادلات مقاومت جریان، بار رسوب، و با یک معادله سوم تجربی برای پیش‌بینی عرض کانال منجر به استخراج یک تعداد روابط برای پیش‌بینی هندسه هیدرولیکی کانال می‌گردند [۱۲]. به طور کلی روابطی که برای پیش‌بینی هندسه هیدرولیکی کانال که برای استخراج آنها از معادلات تجربی کمک گرفته می‌شود در این دسته جای می‌گیرند. در ادامه به تعدادی از این روابط و نحوه استخراج آنها به صورت خلاصه اشاره می‌شود. بعضی از روابط ارائه شده برای پیش‌بینی محیط خیس شده، برخی

جدول ۲- روابط دو و سه متغیره پیشنهادی پژوهشگران

تعداد متغیر	متغیرها	پژوهشگر	C_0	C_1	C_2	C_4
دو متغیره	d_{50} ,Q	بری [۵]	۳/۸۳	۰/۵۳	-۰/۰۷	-
		یالین [٤٦]	۱/۵	۰/۵	-۰/۲۵	-
		آربلاز و همکاران [۱]	۱/۳۳۹	۰/۵	۰/۱۸۹	-
سه متغیره	d_{50}, S ,Q	مجیا [۲۹]	۰/۸۲۲	۰/۰۳۱	-۰/۱۳۵	-۰/۱۳۵
		شیرخانی [٤۱]	۰/٤۳۹	۰/٤۲۷	-۰/۰۹۲	۰-/۲۷۹

برای عرض کانال و تعدادی برای پیش‌بینی کل هندسه هیدرولیکی کانال توسعه داده شده‌اند.

کونداپ و گارده [۲۱] از ترکیب معادله مقاومت جریان رانگا راجو، معادله انتقال رسوب انگلند و هانسن (۱۹۷۲)، و یک معادله تجربی عرض کانال استخراج شده از برازش بر روی داده‌های رودخانه‌های هندوستان بدست آمده است. این پژوهشگران با استفاده ازتحلیل ابعادی و در نظر گرفتن عواملی مانند چگالی رسوب و آب و قطر ذره رسوب در روابط عرض و عمق کانال تلاش کردند تا پیش‌بینی مقطع پایدار را بهبود بخشند. مطالعات پژوهشگران نشان میدهد که معادلات ارائه شده توسط کونداپ و گارده [۲۱] عرض کانال‌های ماسه‌ای را بسیار کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند[۸]. رابطه‌ی (٦) برای پیش‌بینی عرض پایدار توسط کونداپ و گارده [۲۱]پیشنهاد شده است.

$$W = 0.212 d_{50} d_*^{0.231} \left[\frac{Q}{d_{50}^2 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\rho} d_{50}}} \right]^{0.548} \qquad (٦)$$

در رابطه فوق d_* قطر بدون بعد ذره است که به صورت $d_*=[g^{0.5}d_{50}^{1.5}]/\upsilon$ محاسبه می‌شود. همچنین این γ_s و γ نیز به ترتیب وزن مخصوص رسوبات و آب است. این معادله برای پیش‌بینی محیط خیس شده کانال ارائه شده ولی در این پژوهش از آن برای پیش‌بینی عرض رودخانه استفاده میشود. با ساده‌سازی رابطه پیشنهادی، نهایتا رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$W_{0,2} = Q^{0.526} d_{50}^{-0.315} \qquad (۷)$$

جولین و واراجادالام [۱۷] مطالعات قبلی خود را که به دنبال حل تحلیلی و تعریف روابطی برای هندسه هیدرولیکی آبراه‌های متعادل در حالت مقطع پر بوده است را توسعه داده‌اند. نوآوری که این پژوهشگران به مطالعات قبلی اضافه کرده‌اند شامل در نظر گرفتن جریان ثانویه در خم کانال و آنالیز سه بعدی حرکت ذرات رسوب غیرچسبنده است. آنالیز صورت گرفته توسط این پژوهشگران منجر به ارائه‌ی یک‌سری روابط برای پیش‌بینی هندسه هیدرولیکی کانال‌ها در حالت مقطع پر شده است. این روابط برای تخمین عرض مقطع پر، عمق متوسط جریان، سرعت متوسط جریان، و شیب سطح جریان به کار می‌روند.

ژولین و واراجادالام [۱۷] روابط هندسه هیدرولیکی درحالت مقطع پر برای کانال‌های آبرفتی تحت جریان‌های هیدرولیکی زبر مغشوش را به وسیله ترکیب چهار معادله اساسی: پیوستگی جریان، مقاومت جریان، انتقال ذرات، و جریان ثانویه بدست آورده‌اند. این چهار معادله با همدیگر ترکیب و سپس برای بدست آوردن عرض جریان (W)، عمق متوسط جریان (h)، سرعت متوسط جریان ((U و شیب سطح جریان (S) و یا پارامتر شیلدز(τ^*) حل و بکار گرفته شده‌اند و نهایتا ٤ معادله توانی براساس دبی مقطع پر ،(Q) اندازه متوسط ذرات بستر ،(d_{50}) شیب سطح جریان (S) و یا پارامتر شیلدز (τ^*)ارائه شده‌اند .این روابط پس از ساده سازی‌های صورت گرفته و برای مسیر مستقیم در نهایت برای پیش‌بینی عرض رودخانه به صورت رابطه (۸) و یا (۹) ارائه می‌شوند.

$$W=1,33\, Q^{(4+2m)/(6+5m)} d_s^{-4m/(6+5m)} S^{-(2+1m)/(6+5m)} \qquad (۸)$$

$$W=0,512 Q^{(2m+1)/(3m+2)} d_s^{(-4m-1)/(6+4m)} \tau^{*-(2+1m)/(6+4m)} \qquad (۹)$$

در رابطه (۹) پارامتر شیلدز $\tau^*=(K\gamma hS)/[(\gamma_s-\gamma)d_{50}]$ به این صورت تعریف ،و در روابط (۸) و ،(۹) توان m به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{12.2h}{d_s}\right)} \qquad (۱۰)$$

با توجه به رابطه (۱۰) با افزایش غوطه‌وری نسبی (h/d_s) مقدار m به سمت صفر میل می‌کند. برای مقادیر میانی نسبت غوطه‌وری نسبی (h/d_s=۲۰۰)مقدار m=۱/٦ بدست آمده از معادله مانینگ-استریکلر با مقدار بدست آمده از معادله لگاریتمی استفاده شده قابل مقایسه خواهد بود .نهایتا با در نظر گرفتن m=۱/٦ رابطه (۸) به صورت زیر برای پیش‌بینی عرض رودخانه در حالت مقطع پر به کار می رود.

$$W_{1,33}=Q^{0,44} d_{50}^{-0,11} S^{-0,22} \qquad (۱۱)$$

نتایج مطالعات لی و ژولین [۲۵]، فاریاس و همکاران [۱۲] و شیرخانی [٤۱] نشان می‌دهد که رابطه (۱۱) برای رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای دارای خطای زیادی است.

لی و ژولین [۲۵] با استفاده از انجام همبستگی بر روی ۱۱۲۵ داده صحرایی معادلات ژولین و واراجادالام [۱۷] را برای انواع رودخانه‌ها توسعه داده‌اند. داده‌های مورد استفاده آنها مربوط به انواع رودخانه‌ها

با نوع مصالح بستر متفاوت (از ماسه ای تا شنی و قلوه‌ای) و همچنین انواع رودخانه‌های مئاندری و شاخه‌ای بوده است. رابطه پیشنهادی این پژوهشگران برای پیش‌بینی عرض رودخانه به شکل رابطه ۱۲ است.

$$W = 3{,}004\, Q^{0.426} d_{50}^{-0.002} S^{-0.153} \qquad (12)$$

لی و ژولین [۲۵] کاربرد روابط خود را در محدوده $1<W<1000$ m، $0.5<h<20$ m، $0.2<V<5$ m/s، $0.00001 < S < 0.1$ و $20 < \tau_* < 0.001$ پیشنهاد کرده‌اند.

۱-۲-۳- شیوه‌های حدی (اکسترمال)

در چند دهه اخیر فرضیات حدی به عنوان یکی از معادلات دخیل در ریخت شناسی برای پیش‌بینی عرض کانال به کار گرفته شده‌اند. بدین منظور معادلات انتقال رسوب و زبری کانال به همراه یک معادله سوم ترکیب و برای پیش‌بینی عرض کانال در حالت پایدار یا رژیم استفاده می شوند. این رابطه سوم اغلب برحسب حداکثر یا حداقل یک پارامتر مثل قدرت جریان، نرخ اتلاف انرژی و بار رسوب بیان می‌شود [۳]. در ابتدای دهه ۱۹۶۰ میلادی پژوهشگرانی مانند لئوپولد و لانگبین [۲۶] برخی مفاهیم مکانیک سیالات مانند نظریه حداقل تلفات انرژی را برای طراحی کانال‌های پایدار به کار گرفتند. لانگبین [۲۴] دریافت که شرایط حدی کنترل تعدیل هندسه هیدرولیکی کانال باید کمترین تغییرات (حداقل واریانس) را داشته باشد. پیکاپ [۳۶] و کرکبی [۲۰] فرضیه حداکثر انتقال رسوب (MSTC) را ارائه کردند که فرآیند انتقال آب و رسوب را در نظر می‌گیرد که براساس آن شرط تعادل دینامیکی یک کانال، انتقال حداکثر رسوب تحت تنش‌های موجود می‌باشد.

یانگ [۴۷] با استفاده از اصول ترمودینامیکی و انتقال رسوب به همراه ارتفاع (یا انرژی بالقوه) روابطی را برای سیستم ریخت شناسی رودخانه پیشنهاد کرده است. این کار وی منجر به پیشنهاد تئوری حداقل اتلاف انرژی (MEDR) به عنوان یک نظریه کلی در هیدرولیک رسوب شد [۴۸]. با وجود موفقیت در کاربرد فرضیه MEDR به شکل حداقل قدرت واحد جریان در توضیح پروفیل سرعت و غلظت رسوب، یانگ و همکاران [۴۹] نشان داد که MEDR یک نسبت ثابت عرض به عمق ۲ را فقط به دست میدهد و این امر تقریبا هیچوقت در کانال‌های طبیعی اتفاق نمی‌افتد. در سال‌های بعد افرادی مانند سانگ و یانگ [۴۲] نظریه حداقل توان واحد جریان را ارائه کردند که براساس این نظریه یک کانال پایدار، پارامترهای هندسه هیدرولیکی مانند عرض، عمق متوسط، سرعت، شیب، زبری خود را براساس حداقل توان واحد جریان به نحوی تعدیل می‌کند تا به صورت بهینه انتقال آب و رسوب در آن صورت پذیرد. هوانگ و نانسون [۱۵] با استفاده از نظریه حداکثر کارایی جریان (MFE) نشان دادند که با حداقل شدن انرژی بالقوه، انتقال رسوب حداکثر می‌شود. نظریه MFE ظرفیت حداکثر انتقال رسوب را برای هر قدرت جریان در دسترس تعریف می‌کند. ایتون و همکاران [۱۱] فرضیه MTC را با قید پایداری کناره به خدمت گرفتند و نتیجه گرفتند که هندسه کانال وابسته به مقاومت مصالح کناره است و بنابراین مسئله فقط یک جواب ندارد.

از دیگر نظریه‌های حدی می‌توان به نظریه‌های حداقل اکسترمال (حداقل تغییر کانال، حداقل قدرت جریان، حداقل نرخ اتلاف انرژی)، نظریه‌های حداکثر اکسترمال (حداکثر نرخ انتقال دبی رسوب، حداکثر آنتروپی) و نظریه حداقل انرژی- حداکثر آنتروپی اشاره کرد. مبانی این چنین پژوهش‌هایی امروزه تحت عنوان فرضیات حدی شناخته می‌شود. از برتری‌های این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌توان به کارگیری مفاهیم تئوریک برای تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی و ارائه جزئیات بیشتر مکانیزم‌های تعدیل عرض کانال را نام برد. عدم تطابق نتایج با مبانی تئوریک در رودخانه‌ها و محدودیت کاربرد آنها در شیب‌های تند و مصالح ریزدانه و چسبنده از نقاط ضعف این روش‌ها است [۳].

چانگ [۷]براساس مطالعات قبلی خود برای طراحی یک کانال مستقیم آبرفتی با بستر ماسه‌ای که با حداقل شیب قادر به حمل آب و رسوب باشد سه معادله توصیف کننده عمق متوسط، عرض و شیب جریان را براساس نظریه حداقل شیب جریان ارائه داده است. این پژوهشگر حد پایین شیب را برای شروع حرکت بستر (آستانه) به وسیله رابطه (۱۳) معرفی کرده است. این رابطه برای جریان‌های زیربحرانی و بسترهای دارای پوشش دیون و ریپل معتبر است. در این رابطه S_c شیب بحرانی آستانه حرکت ذرات بستر است.

$$\frac{S_c}{\sqrt{d_{50}}} = \frac{0.00238}{Q^{0.251}} \qquad (13)$$

این پژوهشگر رابطه (۱۴) را برای محاسبه عرض پیشنهاد کرده است.

$$W = 4.17\left(\frac{S}{\sqrt{d_{50}}} - \frac{S_c}{\sqrt{d_{50}}}\right)^{0.05} Q^{0.5} \qquad (14)$$

در رابطه فوق شیب بحرانی (S_c) از رابطه (۱۳) محاسبه می شود و با جایگذاری این رابطه داریم:

$$W = 4.17\left(\frac{S}{\sqrt{d_{50}}} - \frac{0.00238}{Q^{0.251}}\right)^{0.05} Q^{0.5} \qquad (15)$$

۱-۲-۴- روش‌های مکانیکی

در شیوه های مکانیکی یا نیروی کششی برای معین کردن هندسه مقطع پایدار کانال قوانین مکانیکی را به خدمت می‌گیرند. این شیوه در اداره اراضی آمریکا در اواخر دهه ۱۹۴۰ برای نخستین بار استفاده و نتیجه آن استخراج شیوه نظریه کانال آستانه بوده است [۱۳, ۲۳]. از ایرادات مهم نظریه گلور و فلوری [۱۳] این است که در این نظریه انتقال رسوب در بستر متضاد با حفظ تعادل در کناره‌ها است و این بدین معنی است که این نظریه اجازه حمل رسوب در بستر را نمی‌دهد در حالی که مطالعات آزمایشگاهی ایکیدا [۱۶] به همراه مطالعات صحرایی کلرهالز [۱۹] و پارکر [۳۳] نشان داد که کانال‌های پایدار می‌توانند انتقال رسوب در بستر داشته باشند. پارکر [۳۳] برای حل این مسئله فرض کرد که

انتشار جانبی مومنتوم ناشی از اغتشاش در جهت پایین دست در مقایسه با توزیع تنش برشی هنگامی که انتشار جانبی مومنتوم نادیده گرفته می‌شود، سبب ایجاد تنش‌های کمتر در ناحیه کناره و تنش‌های بیشتر در ناحیه بستر صاف خواهد شد چنین بازتوزیعی از تنش برشی یک کانال با کناره پایدار و با بستر متحرک را توصیف می‌کند. این پژوهشگر با این فرض خود پارادوکس کانال پایدار را برای رودخانه‌های بستر شنی و یا ماسه سیلتی حل کرده است.

وی با صرف نظر از اثر جریان ثانویه ۳ رابطه رژیم منطقی خود را ارائه داده است. برای محاسبه عرض رودخانه می‌توان از قرار دادن رابطه اول در رابطه دوم رژیم استفاده کرد و با ساده‌سازی رابطه (۱۷) بیانگر عرض رودخانه خواهد بود.

$$W = 3.78Qd_{50}^{-1.5}S^{1.01} \qquad (۱۷)$$

ایکیدا [۱۶] با انجام دادن آزمایش روی یک نیم مقطع با مصالح با قطر متوسط ۰/۸۵ و ۱/۲ میلیمتر و شیرخانی [۴۱] با مصالح به قطر متوسط ۱/۲ میلیمتر به ارزیابی معادلات پارکر پرداخته‌اند. نتایج آزمایشات آنها نشان می‌دهد که فرض پارکر مبنی بر حرکت بستر کانال در حالیکه کناره پایدار است صحیح بوده است.

۱-۳- پارامترهای موثر بر عرض رودخانه و مقایسه روابط

به طور کلی با توجه به مطالعات پژوهشگران عرض رودخانه به پارامترهای مانند دبی جریان، بار رسوبات بستر و معلق، اندازه متوسط ذرات بستر و کناره، پوشش گیاهی کناره، شعاع هیدرولیکی (یا عمق جریان)، شیب جریان، ویسکوزیته سینماتیکی آب، شتاب ثقل زمین، چگالی ذرات رسوب و چگالی آب وابسته است.

در این قسمت با توجه به مجموعه داده‌های در دسترس (داده‌های واسنجی) تعدادی رابطه همبستگی با بعد و بدون بعد استخراج شده و سپس با استفاده از یک مجموعه داده دیگر، روابط پیشنهادی محققین مقایسه می‌شوند است.

برای استخراج رابطه بدون بعد از رابطه بدون بعد پارکر [۳۴] استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز رابطه شامل اندازه متوسط ذرات بستر (d_{50}) و دبی مقطع پر کانال (Q) می‌باشد. و همچنین روابط با بعد نیز به صورت یک تا سه متغیره برای پیش‌بینی عرض رودخانه‌های با بستر شنی و قلوه‌ای به صورت جداگانه استخراج شده است. پارامترهای ورودی به این روابط همبستگی عبارتند از دبی مقطع پر رودخانه (Q)، اندازه متوسط ذرات بستر (d_{50}) و شیب جریان (S).

مجموعه داده‌های واسنجی این روابط برای رودخانه‌های شنی ۴۴۰ داده بوده که از کلرهالز و همکاران[۱۹]، چارلتون و همکاران [۶]، اندروز [۲]، باترست [۴]، هی و سرن [۱۴]، وندربرگ [۴۳]، پیتلیک و کرس [۳۷]، پارکر [۳۱]، مک کندلس [۳۰]، رینالدی [۳۸]، هول [۴۴]، کریستیان و همکاران [۱۰] و کالیو [۱۸] انتخاب شده‌اند. همچنین داده‌های صحت‌سنجی و مقایسه روابط پیش‌بینی عرض رودخانه‌های شنی و قلوه‌ای از هول و ویلکاکس [۴۵]، پارولا و همکاران [۳۵]، شرووود و همکاران [۴۰] استفاده شده است. از لحاظ طبقه‌بندی مصالح رودخانه‌های با اندازه متوسط ذرات بستر بیشتر از ۲ میلیمتر، شنی و قلوه‌ای در نظر گرفته شده است. جدول (۴) محدوده داده‌های استفاده شده برای واسنجی روابط و صحت‌سنجی (مقایسه روابط) را نشان می‌دهد.

جدول ۴- محدوده داده‌های واسنجی و صحت سنجی

پارامتر	مجموعه داده های	
	واسنجی رابطه‌های استخراجی	مقایسه روابط (صحت سنجی)
تعداد داده‌ها	۴۴۰	۹۵
W(m)	۱/۲۵-۳۹۰	۲/۲-۱۱۳/۷
h(m)	۰/۱-۶	۰/۲-۳/۷
V(m/s)	۰/۱۷-۸/۶	۰/۱۲-۳/۶
Q (m۳/s)	۰/۱۳۷-۲۹۲۹	۱-۴۱۰
S(-)	۰/۰۰۰۳۴-۰/۱۴۷	۰/۰۰۳-۰/۲
d_{50} (m)	۰/۰۰۲-۰/۴۵	۰/۰۰۴-۰/۴۵
$\tau^*\tau^*_c(-)\tau$	۰/۰۰۰۴-۰/۰۸۶	۰/۰۰۰۶-۰/۰۸۸
h/d_{50}	۱-۱۱۵۸	۱-۳۳۴
Re	-۱۹۵۲۷۴۸۰ ۲۴۲۳۱	-۱۰۱۶۸۲۸۹ ۲۳۷۲۱۵
Fr	۰/۱۱-۴/۷۵	۰/۲-۲/۱۴

با استفاده از مجموعه داده‌های واسنجی و پس از بی‌بعد سازی داده‌ها مطابق روش پارکر [۳۴] رابطه بدون بعد حاصل با ضریب تعیین ۰/۷۸ به شکل زیر حاصل شده است.

$$B^*=22{,}22Q^{*0.368} \qquad (۱۸)$$

شکل (۳) واسنجی رابطه استخراجی را نشان میدهد. در این شکل محور افقی دبی بدون بعد و محور قائم عرض بدون بعد را نشان می‌دهد. این نمودار با توجه به بزرگ بودن اعداد بدون بعد به صورت لگاریتمی رسم شده است. جدول (۵) نتایج مقایسه روابط بدون بعد پیشنهادی توسط سایرپژوهشگران و رابطه استخراجی بدون بعد در این پژوهش و شکل (۳) نیز نتایج خروجی این روابط را با توجه به محدوده خطای ۵۰ درصدی نشان می‌دهد. در شکل (۲) خط چین‌ها محدوده خطای ۵۰ درصدی را نمایش می‌دهند.

جدول ۵- مقایسه روابط بدون بعد

شماره رابطه	نویسنده	رابطه	درصد پیش بینی در محدوده خطای	
			۲۰ درصد	۵۰ درصد
۱	پارکر [۳۴]	$B^*=4{,}87Q^{*0.461}$	۳۸	۶۳
۲	آربلاز و همکاران [۱]	$B^*=9{,}363Q^{*0.358}$	۳۸	۷۷
۳	شیرخانی [۴۱]	$B^*=0{,}402Q^{*0.547}$	۱	۲
۴	این مطالعه	$B^*=22{,}22Q^{*0.368}$	۱۵	۴۰

همانطور که جدول (۵) نشان می‌دهد بهترین رابطه بدون بعد رابطه

آربلاز و همکاران [۱] است که می‌تواند ۷۷ درصد عرض داده‌های صحت‌سنجی را در محدوده ۵۰ درصد خطا، پیش‌بینی کند.

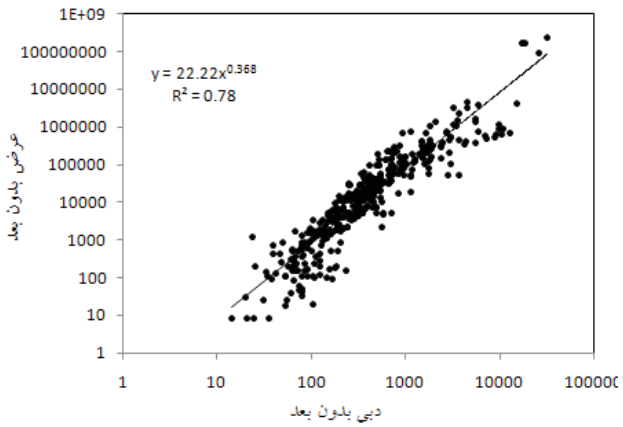
با استفاده از داده‌های واسنجی ٤ رابطه یک تا ۳ متغیره بین پارامترهای اندازه متوسط ذرات بستر، شیب و دبی مقطع پر جریان برازش شده است. در جدول (٦) روابط استخراجی همراه با ضریب تعیین آنها آمده است.

همانگونه که جدول (٦) نشان میدهد بهترین رابطه برازش شده برای پیش‌بینی عرض رودخانه‌های با بستر شنی با توجه به معیار ضریب تعیین (که هر چه به عدد یک نزدیکتر باشد نمایانگر تطابق بهتر داده‌ها با رابطه همبستگی است)، رابطه سه متغیره مابین دبی مقطع پر کانال، اندازه متوسط ذرات بستر و شیب کانال است که نسبت به سایر روابط دارای ضریب تعیین بالاتری است. جهت بهتر معلوم شدن تطابق پیش‌بینی این رابطه با مقدار واقعی عرض رودخانه در شکل (٤) واسنجی این رابطه نشان داده شده است.

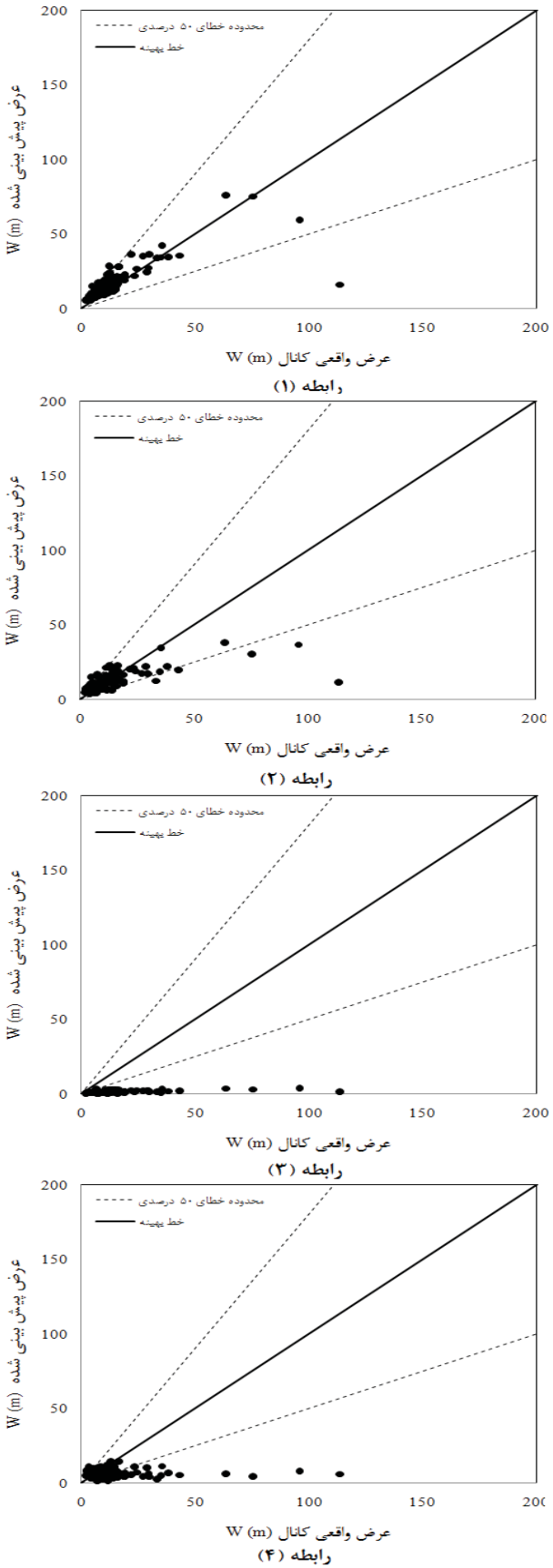
جدول (۷) مقایسه روابط با بعد پیشنهادی پژوهشگران و این رابطه را براساس محدوده خطای ۲۰ و ۵۰ درصدی برای مجموعه داده‌های صحت سنجی نشان میدهد. در این جدول خطا به صورت نسبت اختلاف مقدار پیش بینی شده و واقعی عرض به مقدار واقعی عرض محاسبه شده است. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از روابط براساس محدوده خطای ۵۰ درصدی نشان می‌دهد که رابطه یالین [٤٦] (رابطه ۳) به عنوان بهترین رابطه می‌تواند ۸٦ درصد عرض رودخانه‌های با بستر شنی و قلوه‌ای را در این محدوده خطا پیش‌بینی کند. این رابطه فقط به اندازه متوسط مصالح بستر و دبی مقطع پر وابسته است. علاوه بر این رابطه، رابطه چانگ [۷] (رابطه ۱۱) نیز که براساس فرضیات حدی توسعه یافته نتایج بهتری نسبت به سایر روابط می‌دهد. شکل (۵) نتایج پیش‌بینی روابط را نشان می‌دهد. در این شکل خط‌چین‌ها محدوده خطای ۵۰ درصدی را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

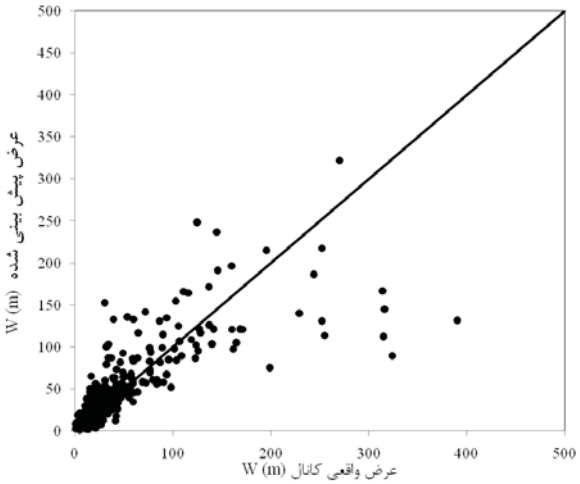
عرض مجاری یکی از مهمترین پارامترها جهت بیان ویژگی‌های مجاری طبیعی و رودخانه‌ها و پیش‌بینی رفتار آنها در آینده است. در این پژوهش با انجام برازش روی ٤٤۰ داده رودخانه‌های بستر



شکل ۳- واسنجی **رابطه استخراجی**



شکل ۲- **نتایج خروجی روابط بدون بعد**



شکل ٤- واسنجی **رابطه منتخب**

شنی درحالت مقطع پر با استفاده از پارامترهای دبی مقطع پر، اندازه متوسط ذرات بستر و شیب رودخانه، روابطی یک، دو و سه متغیره و با استفاده از پارامترهای دبی مقطع پر، اندازه متوسط ذرات بستر رابطه بدون بعد استخراج شده است. بررسی روابط با استفاده از معیار ضریب تعیین نشان میدهد که بهترین رابطه با بعد برای پیش‌بینی عرض مربوط به حالتی است که هر سه پارامتر دبی مقطع پر، اندازه متوسط ذرات بستر و شیب رودخانه در نظر گرفته شوند. همچنین مقایسه رابطه با بعد و بدون بعد استخراجی در این پژوهش

جدول ٦- روابط برازش شده

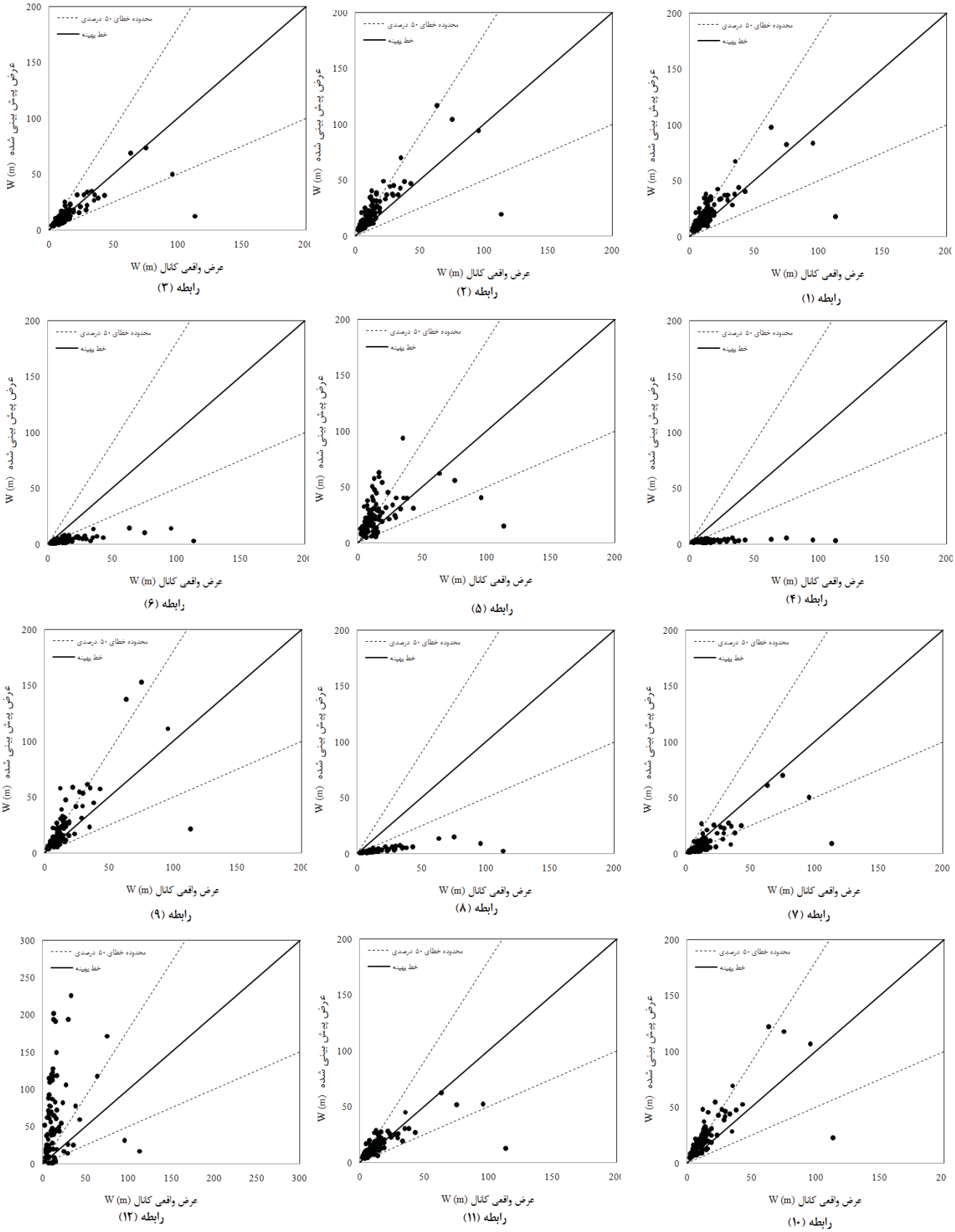
نوع رابطه	متغیرها	رابطه	ضریب تعیین
تک متغیره	Q	$W=5{,}401Q^{0.474}$	۰/٤٨٧
دو متغیره	Q, d_{50}	$W=3{,}205Q^{0.467}d_{50}^{-0.186}$	۰/٥١٢
	Q, S	$W=14{,}844Q^{0.558}S^{0.256}$	۰/٥٤٣
سه متغیره	Q, d_{50}, S	$W = 8{,}480Q^{0.577}d_{50}^{-0.355}S^{0.356}$	۰/٦٢٠

نشان می‌دهد که رابطه استخراجی بدون بعد دارای ضریب تعیین بهتری بوده و همچنین نتایج بهتری نیز در پیش‌بینی عرض پایدار رودخانه‌های با بستر شنی دارد.

ارزیابی روابط بدون بعد موجود توسط داده‌های صحت‌سنجی، نتایج رابطه آربلاز و همکاران [۱] را بهتر از سایر روابط معرفی کرد. و مقایسه رابطه بابعد منتخب این پژوهش و ۱۱ رابطه با بعد پیشنهادی سایر پژوهشگران بر مبنای پیش‌بینی در محدوده خطای ۵۰ درصدی نشان داد که رابطه با بعد یالین [٤٦] نسبت به سایر روابط می‌تواند عرض پایدار رودخانه‌های بستر شنی را با دقت بهتری پیش‌بینی کند. این رابطه فقط دارای پارامترهای دبی مقطع پر جریان و اندازه متوسط ذرات بستر است. از اینرو با توجه به اینکه فقط این دو پارامتر برای استفاده از این رابطه لازم هستند، رابطه‌ای بسیار مناسب برای طراحی کانال‌های بستر شنی نیز می‌تواند محسوب شود. محدوده کاربردی استفاده از معادلات استخراجی با

جدول ۷- خلاصه نتایج مقایسه روابط در پیش بینی عرض رودخانه های بستر شنی و قلوه ای

نوع رابطه	شماره رابطه	نویسنده	رابطه	درصد پیش بینی در محدوده خطای	
				۲۰ درصد	۵۰ درصد
تجربی	۱	لیسی [۱]	$W=4{,}833Q^{0.5}$	۲۵	۵۲
	۲	بری [۵]	$W=3{,}83Q^{0.53}d_{50}^{-0.07}$	۲۰	٤۱
	۳	یالین [٤٦]	$W=1{,}5Q^{0.50}d_{50}^{-0.25}$	۳٦	۸٦
	٤	مجیا [۲۹]	$W=0{,}822Q^{0.031}d_{50}^{-0.135}S^{-0.135}$	۱	۱۲
	٥	آربلاز [۱]	$W=1{,}339Q^{0.50}d_{50}^{0.189}$	۱	۱٤
	٦	این مطالعه	$W = 8{,}480Q^{0.577}d_{50}^{-0.355}S^{0.356}$	۱۳	۳٥
	۷	شیرخانی [٤۱]	$W = 0{,}439Q^{0.427}d_{50}^{-0.092}S^{-0.279}$	۱۸	٦٤
نیمه نظریه	۸	کنداپ و گارده [۲۱]	$W= 0{,}2Q^{0.526}d_{50}^{-0.315}$	۰	۰
	۹	ژولین و واراجادالام[۱۷]	$W=1{,}33Q^{0.44}\ d_{50}^{-0.11}\ S^{-0.22}$	۱۸	٥۳
	۱۰	لی و ژولین [۲٥]	$W=3{,}004Q^{0.426}d_{50}^{-0.002}S^{-0.153}$	۱۹	۳۷
فرضیات حدی	۱۱	چانگ [۷]	$W = 4.17\left(\frac{S}{\sqrt{d_{50}}}-\frac{0.00238}{Q^{0.251}}\right)^{0.05} Q^{0.5}$	٤۳	۷٥
مکانیکی	۱۲	پارکر [۳۳]	$W=3{,}78Qd_{50}^{-1.5}S^{1.01}$	۱٥	۲٤



شکل ۵- مقایسه نتایج روابط

بعد و بدون بعد پیشنهادی در این پژوهش در پارامترهای هیدرولیکی ۰.۰۰۳< S<۰.۲ و ۰,۰۰٤< d۵۰ <۰,۵ m پیشنهاد می‌شود.

منابع

1- Arbeláez, A.C., Guevara, M.E., Posada, L., González, L.J., Gallardo, C.A. 2007. Hydrology Days Conference, pp. 177-188

2- Andrews, E. D. 1984. Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado, Bull. G. Soc., 95, pp. 371–378.

3- ASCE Task Committee on Hydraulics. 1998. Bank Mechanics and modeling of river width adjustment, 1: processes and mechanisms. J. Hydraul. Eng. ASCE 124 (9), pp. 881-902.

4- Bathurst, J. C. 1985. Flow resistance estimation in mountain rivers, J. Hydraul. Eng., 111(4), pp. 625–643.

5- Bray, D.I. 1982. Regime equations for gravel-bed rivers. In Hey, R.D., Bathurst, J.C. and Thorne, C.R. (eds) Gravel Bed Rivers: Fluvial Processes, Eng. and Manag., pp. 517-541

6- Charlton, F. G., Brown, P. M. and Benson, R. W. 1978. The hydraulic geometry of some gravel rivers in Britain, Report INT 180, Hydraulics Research Station, Wallingford, England, 48 p.

7- Chang, H.H., 1980, Geometry of gravel stream. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, No HY9, pp. 1443-1456.

8- Chang, H.H. 1988. Fluvial Processes in River Eng. John Wiley & Sons, New York.

9- Chitale, S.V. 1966. Design of Alluvial Channels, 6th. Congress of the Intl. Com. on Irrigation and Drainage (ICID), New Delhi, India, Report 17, Question 20.

10- Christiane I., Mulvihill, C.I., Filopowicz, Amy, Coleman, Arthur, and Baldigo, B P. 2007. Regionalized Equations for Bankfull Discharge and Channel Characteristics of Streams in New York State Hydrologic Regions 1 and 2: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5189, 18 p., online only

11- Eaton, B. C., M. Church, and R. G. Millar. 2004. Rational regime model of alluvial channel morphology and response, Earth Surf. Processes Landforms, 29, pp. 511 – 529.

12- Farias, H. D., Pilan, M. T., Mattar, M. T., Pece, F. J. 1998. Regime Width of Alluvial Channels: Conciliation of Several Approaches Parallel Session (parallel45), Basics of Sediment Transport and Scouring

13- Glover, R. E., and Florey, Q. L. 1951. Stable channel profiles. U.S. Bureau of Reclamation, Washington, D.C.

14- Hey, R. D., and Thorne, C. R. 1986. Stable channels with mobile gravel beds, J. Hydraul. Eng., Vol. 112(8), pp. 671–689.

15- Huang, H. Q. and Nason, G. C. 2000. Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action. Earth Surface Proces. And Landf., Vol. 25, pp. 1-16.

16- Ikeda, S. 1981. Self-formed straight channels in sandy beds, Hydr. Div., ASCE, 107(4), pp. 389-406.

17- Julien, P. Y., and Wargadalam, J. 1995. Alluvial channel geometry: Theory and applications, J. Hydraul. Eng., 1214, pp. 312–325.

18- Kallio, B.S.S.E. 2010. Determining the Bankfull Discharge Exceedance Potential of Agricultural Ditches in Ohio. MS.c. dissertation, Ohio State University, Ohio, USA

19- Kellerhals, R., Neill, C. R. and Bray, D. I. 1972. Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta, River Engineering and Surface Hydrology Report, Research Council of Alberta, Canada, No. 721.

20- Kirkby MJ. 1977. Maximum sediment efficiency as a criterion for alluvial channels. In River Channel Changes, Gregory KJ (ed.).Wiley: Chichester; pp. 429-442.

21- Kondap, D. M. and R. J. Garde. 1980. Application of optimization principles in the study of stable channels. Proceedings Inter. Workshop on Alluvial River Problems, University of Roorkee, Roorkee, India.

22- Lacey, G. 1930. Stable channels in alluvium, Minutes of the Proc, Inst, of Civ. Engrs., London, England, 229, pp. 259-292.

23- Lane, E. W. 1955. Design of stable canals.

Transactions, ASCE, Vol. 120, pp. 1234-1260.

24- Langbein, W.B. 1964. Geometry of river channels. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 90, No. HY2, pp. 301-311.

25- Lee, J. S. and Julien, P. Y. 2006. Downstream Hydraulic Geometry of Alluvial Channels, Jour. of Hydra. Eng., Vol. 132, No. 12

26- Leopold, L. B. and W. B. Langbein. 1962. The concept of entropy in landscape evolution. U. S. Geol. Survey, Prof. paper 500-A.

27- Leopold LB, Maddock T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. US Geological Survey Professional Paper 252.

28- Mahmood, K. 1974. Variation of Regime Coefficients in Pakistan Canals, Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engrg. Div., ASCE, Vol.100, No.WW2, pp. 1318-1338.

29- Mejía, G. 2001. Aplicabilidad de las ecuaciones del régimen a las corrientes de la zona andina tropical. Master Thesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. (In Spanish)

30- McCandless, T. L. 2003. Maryland stream survey: bankfull discharge and channel characteristics of streams in the Allegheny Plateau, Report No. CBFO-S03-01, U.S. Fish and Wildlife Service Chesapeake Bay Field Office, 33 p.

31- Parker, G. 2004. 1D Sediment Transport Morphodynamics with Applications to Rivers and Turbidity Currents, National Center for Earth Surface Dynamics.

32- Park, C. C., 1977. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: An analysis and some observations. Journal of Hydrology, Vol. 33, pp. 133-146.

33- Parker, G. 1978. Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 1. The gravel river, Fluid Mech.,89(1), pp. 109-146.

34- Parker, G., Toro-Escobar, C. M., Ramey, M. and Beck S., 2003. The effect of floodwater extraction on the morphology of mountain streams, Journal of Hydra. Engig., 129(11)

35- Parola, A.C., Skinner, K., Curini, A.L.W., Vesely, W.S., Hansen, C., Jones, M.S. 2005. Report No #C9994861-99, University of Louisville and Kentucky Environmental and public Protection Cabinet, P. 39

36- Pickup G. 1976. Adjustment of stream channel shape to hydrologic regime. Journal of Hydrology 30, pp. 365-373.

37- Pitlick, J. and Cress, R. 2002, Downstream changes in the channel of a large gravel bed river. Water Resources Research 38(10), 12

38- Rinaldi, M. 2003. Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, central Italy, Earth Surf. Process. Land. 28, pp. 58

39- Savenije, H. H. G. 2003. The width of a bankfull channel; Lacey's formula explained Journal of Hydrology 276 , pp. 176–183

40- Sherwood, J.M., Huitger, C.A. 2005. Bankfull charachtristics of Ohio streams and their relation to peak stream-flow: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5153, 38 p.

41- Shirkhani, R. 2010. An experimental study of effect of flow variation on river bank erosion M.Sc. Dissertation, Dept. of Civ. Eng., Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (in Persian)

42- Song, C .S .S. and C. T. Yang. 1980. Minimum stream power: theory. J. Hydraul. Eng. ASCE 106(9): pp. 1477-1488.

43- Van den Berg, J. H. 1995. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers Geomorphology 12, pp. 259-279

44- Wohl, E. 2004. Reach-Scale Channel Geometry of a Mountain River, Earth Surf. Process. Landforms Vol. 29, pp. 969–981

45- Wohl E. E., Wilcox A. 2005. Channel geometry of mountain streams in New Zealand Journal of Hydrology, Vol. 300, pp. 252–266

46- Yalin, M. S. 1992. River mechanics, Pergamon Press, New York, N.Y.

47- Yang CT. 1971a. Potential energy and stream morphology. Water Resources Research Vol. 7, pp. 311-322

48- Yang CT and Molinas A. 1982. Sediment transport and unit stream power function. Journal of the Hydra. Division, ASCE 108, pp. 774-793.

49- Yang CT, Song CCS and Woldenberg MJ. 1981. Hydraulic geometry and minimum rate of energy dissipation. Water Resources Research, Vol. 17, pp. 1014-1018.