

## مطالعه تحلیلی هندسه پایدار پیچان رودها

مژگان شاه‌حسینی<sup>۱\*</sup>، محمد رضا مجدزاده طباطبایی<sup>۲</sup> و سید سعید موسوی ندوشنی<sup>۳</sup>

### چکیده

نقش حیاتی رودخانه‌ها در تمدن بشری و توسعه و بهره‌برداری از آب‌های سطحی و به تبع آن شناخت رفتار رودخانه‌ها از جنبه‌های مختلف امری بدیهی و روشن است. حالت تعادل بین شکل، اندازه مقطع هندسی رودخانه و شیب طولی آن با مشخصات و شرایط هیدرولیکی و رسوبی حاکم بر رودخانه‌ها، از ویژگی‌های رفتاری مورد توجه مهندسان رودخانه محسوب می‌شود. هدف اصلی و نوآوری این پژوهش، به دست آوردن تحلیلی روابط هندسه هیدرولیکی با در نظر گرفتن جریان ثانویه در پیچان رودها تحت سینوسیته  $1/25$  تا  $2/5$  است. برای این منظور کلیاتی از تئوری رژیم و روابط هندسه هیدرولیکی ارائه و با استفاده از چهار معادله پیوستگی، مقاومت جریان، تابع شیلدز و جریان ثانویه به صورت تحلیلی روابط هندسه هیدرولیکی حاصل شد. در ادامه واسنجی مدل صورت گرفته که با داده‌های مشاهده شده از تطابق مناسبی برخوردار بود. با وجود این اختلاف بین نتایج محاسباتی و مشاهداتی می‌تواند به واسطه فرضیات موجود در مدل باشد. برای بررسی حساسیت مدل نسبت به پارامترها نیز با تغییر هر یک از پارامترها و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، حساسیت‌سنجی انجام شد.

**واژه‌های کلیدی:** پیچان رود، تنش برشی شعاعی، جریان ثانویه، هندسه هیدرولیکی.

ارجاع: شاه‌حسینی م. مجدزاده طباطبایی م. ر. و موسوی ندوشنی س. س. ۱۳۹۷. مطالعه تحلیلی هندسه پایدار پیچان رودها. مجله پژوهش آب ایران. ۳۰: ۶۹-۶۱.

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهیدبهشتی.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهیدبهشتی.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهیدبهشتی.

\* نویسنده مسئول: [m.shahosainy@yahoo.com](mailto:m.shahosainy@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: 1395/10/26

تاریخ دریافت: 1395/02/02

## مقدمه

تعیین هندسه و شیب پایدار یک کانال آبرفتی، موضوعی است که بیش از هشتاد سال مورد توجه مهندسان و پژوهشگران مرتبط با رودخانه بوده است. تئوری رژیم و هندسه هیدرولیکی، از مهم‌ترین مدل‌هایی هستند که در ارتباط با مهندسی رودخانه و ریخت‌شناسی رودخانه آبرفتی بیان شده‌اند (هوانگ، ۱۹۹۶).

اولین تحلیل اصولی روی کانال‌های آبیاری در هند توسط کندی (۱۸۹۵) انجام شد که برای کانال پایدار (کانالی که قادر است مقدار معینی آب و رسوب بدون رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی انتقال دهد)، رابطه‌ای را بین عمق و سرعت متوسط جریان به دست آورد (ایتن، ۲۰۱۰). لیندلی (۱۹۱۹) واژه رژیم را به صورت تثبیت طبیعی ابعاد هندسی، عرض، عمق و شیب یک کانال به منظور انتقال مقدار معینی آب و مقدار معینی از رسوب (سیلت) تعریف کرد.

لئوپولد و مادوک (۱۹۵۳) با توجه به روابط رژیم کانال‌ها، ایده‌ای را برای توصیف کانال‌های طبیعی اقتباس و روابط هندسه هیدرولیکی را ارائه کردند. این روابط می‌تواند بیان‌کننده تغییرات هندسه رودخانه با تغییرات دبی در یک مقطع عرضی مشخص باشد که روابط هندسه هیدرولیکی موضعی نامیده می‌شود. همچنین تغییرات هندسه کانال می‌تواند به ازای یک دبی مشخص مانند دبی مقطع پر باشد که هندسه هیدرولیکی بازه‌ای تعریف می‌شود (ایتن، ۲۰۱۰ و سینگ و همکاران، ۲۰۰۳). در این مطالعه منظور از روابط هندسه هیدرولیکی، روابط هندسه هیدرولیکی بازه‌ای است.

برای درک بهتر هندسه هیدرولیکی رودخانه‌ها از چهار رویکرد استفاده می‌شود که شامل رویکرد تجربی، فیزیکی، تشابه و نظریه حدی است (هوانگ، ۱۹۹۶). رویکرد تجربی براساس داده‌های اندازه‌گیری شده و برازش داده‌ها انجام می‌شود (ولمن و براش، ۱۹۶۱ و سینگ، ۲۰۰۳). رویکرد فیزیکی در کنار مکانیزم جریان به مکانیزم رسوب نیز توجه می‌کند (استیبنگنز، ۱۹۶۳ و جکسون و بچتا، ۱۹۸۴). رویکرد تشابه براساس تعادل بین نیروهای محرک و مقاوم در رودخانه است (فاریس و همکاران، ۱۹۹۸). رویکرد نظریه حدی نیز براساس بیشینه یا کمینه کردن متغیرهای معینی مانند حداکثر دبی رسوب، حداقل توان

جریان و ... استوار است (فاریس، ۱۹۹۵ و چانگ، ۱۹۷۹). مطالعه حاضر در رویکرد فیزیکی قرار می‌گیرد.

مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده، اغلب در بازه‌های مستقیم بوده و تاثیر جریان ثانویه در نظر گرفته نشده است. از پژوهشگرانی که تاثیر جریان ثانویه را در نظر گرفته‌اند، جولین و وارگادالام (۱۹۹۵) بوده‌اند که ایده اولیه این پژوهش از آن‌ها گرفته شده است. جنبه جدید این مطالعه لحاظ کردن تاثیر جریان ثانویه در پیچان رودها با به‌کارگیری نسبت تنش برشی شعاعی به مماسی است. برای تنش برشی شعاعی از معادله حسین و اسمیت (۱۹۸۶) استفاده شد و روابط هندسه هیدرولیکی در پیچان رودها با تاثیر جریان ثانویه به صورت تحلیلی به دست آمد.

## مواد و روش‌ها

پارامترهای مختلفی وجود دارند که رودخانه‌ها را کنترل می‌کنند. دبی جریان، از پارامترهای مهم و اصلی در کنترل مقطع هیدرولیکی است که بسیاری از دانشمندان به آن توجه داشته و دبی مقطع پر را به عنوان دبی غالب در نظر گرفته‌اند. همچنین اندازه رسوبات و انتقال بار رسوبی بستر، نقش مهمی را در شکل‌گیری هندسه کانال دارند و با تغییرات هر یک، مقطع هیدرولیکی جدیدی برای تعادل جدید با چهار متغیر هیدرولیکی عمق، عرض، شیب طولی بستر و سرعت شکل می‌گیرد؛ بنابراین می‌توان گفت که عمق، عرض، شیب طولی بستر و سرعت تابعی از دبی جریان، اندازه ذرات رسوبی و دبی رسوب هستند (هی و تورن، ۱۹۸۶):

$$D, W, V, S = f(Q, D_{50}, Q_s) \quad (1)$$

که در آن  $D$  عمق،  $W$  عرض،  $S$  شیب طولی بستر و  $V$  سرعت،  $Q$  دبی جریان،  $D_{50}$  اندازه ذرات رسوبی و  $Q_s$  دبی رسوب می‌باشد.

به این دلیل که اغلب در رودخانه‌ها، اندازه‌گیری شیب طولی بستر از اندازه‌گیری بار رسوبی آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر است و معادلات بار بستر، بار بستر جابه‌جا شده را محاسبه می‌کنند و به‌ناچار توانایی محاسبه دقیق را ندارند (ایتن و میلار، ۲۰۰۴) و توجه به اینکه بار رسوبی متناسب با تابع شیلدز است (هوانگ و نانسون، ۲۰۰۰)، می‌توان تابع (۱) را به صورت زیر باز نویسی کرد:

$$D, W, V, \tau_* = f(Q, D_{50}, S) \quad (2)$$

مقاومت جریان در رودخانه در به دست آوردن روابط هندسه هیدرولیکی بسیار مهم است و معمولاً به یکی از صورت‌های معادله سرعت پرانتل-ون کارمن، معادله ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ، معادله شزی و معادله مانینگ بیان می‌شود. روابط مقاومت جریان را می‌توان به دو صورت نمایی و لگاریتمی نمایش داد (بری و داوار، ۱۹۸۷). حالت لگاریتمی (فرو، ۲۰۰۳ و وانگ و داوای، ۲۰۱۴):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = C_0 \log\left(\frac{R}{C_1 d_s}\right) + C_1 \quad (5)$$

حالت نمایی (لی و همکاران، ۲۰۱۳ و پاول، ۲۰۱۴):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = B\left(\frac{R}{d_s}\right)^m \quad (6)$$

از ترکیب معادله دارسی-ویسباخ ( $f = \frac{8gRS}{V^2}$ ) و معادله (۶) می‌توان معادله مقاومت جریان را به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{8gRS}{V^2}}} = B\left(\frac{R}{d_s}\right)^m \quad (7)$$

$$V = b\sqrt{g}D^{0.5}S^{0.5}\left(\frac{D}{d_s}\right)^m \quad (8)$$

که در آن  $b = B\sqrt{8}$ ،  $g$  شتاب ثقل،  $D$  عمق متوسط جریان،  $S$  شیب طولی بستر و  $d_s$  اندازه ذراتی از مصالح رسوبی که  $S$  درصد مصالح از آن کوچکتر هستند. در این پژوهش مقدار  $m$  و  $B$  ابتدا به صورت تحلیلی با توجه به قانون نمایی و لگاریتمی سرعت به صورت مراحل زیر به دست می‌آید:

$$\frac{u_p}{u_*} = \left(\frac{y}{y_0}\right)^m \quad (9)$$

$$\frac{u_p}{u_*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (10)$$

اگر برای به دست آوردن سرعت میانگین از معادله (۹) و معادله (۱۰) انتگرال گرفته شود، داریم:

$$V = \frac{1}{D} \int_0^D u_p dy = \frac{u_*}{D} \int_0^D \left(\frac{y}{y_0}\right)^m dy = \frac{1}{y_0^m} \frac{u_*}{D} \int_0^D y^{m+1} dy = \frac{1}{D} \frac{1}{m+1} \frac{D^{m+1}}{y_0^m} \rightarrow \frac{V}{u_*} = \frac{1}{m+1} \left(\frac{D}{y_0}\right)^m \quad (11)$$

$$V = \frac{1}{D} \int_0^D u_p dy = \frac{1}{D} \frac{u_*}{K} \int_0^D \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) dy = \frac{u_*}{D} [y \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) - y]_0^D = \frac{1}{K} \frac{u_*}{D} [D \ln\left(\frac{D}{y_0}\right) - D] \rightarrow \frac{V}{u_*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{D}{y_0}\right) - \frac{1}{K} \quad (12)$$

بنابراین دبی، اندازه ذرات رسوبی و شیب طولی بستر به عنوان متغیر مستقل و عمق، عرض، سرعت و تابع شیلدز به عنوان متغیر وابسته هستند. روابط هندسه هیدرولیکی را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$D = C_1 Q^{x1} D_{50}^{y1} S^{z1} \quad (3-الف)$$

$$W = C_2 Q^{x2} D_{50}^{y2} S^{z2} \quad (3-ب)$$

$$V = C_3 Q^{x3} D_{50}^{y3} S^{z3} \quad (3-ج)$$

$$\tau_* = C_4 Q^{x4} D_{50}^{y4} S^{z4} \quad (3-د)$$

که در آن  $C_i$  ضرایب ثابت،  $Q$  دبی جریان،  $D$  عمق متوسط،  $D_{50}$  اندازه ذرات رسوبی،  $Q_s$  دبی رسوب،  $W$  عرض،  $V$  سرعت متوسط،  $S$  شیب طولی بستر،  $\tau_*$  تابع شیلدز و  $xi$ ،  $yi$  و  $zi$  مقادیر ثابت است.

برای تعیین این چهار مجهول نیاز به چهار معادله است. دو مورد از این روابط، معادله پیوستگی و مقاومت جریان است. رابطه سوم، معادله انتقال رسوب که تابعی از تابع شیلدز است (هوانگ و نانسون، ۲۰۰۰) و به جای این معادله می‌توان از معادله تابع شیلدز استفاده کرد. معادله چهارم، اثر جریان ثانویه را در معادلات منعکس می‌کند و نسبت تنش برشی شعاعی به تنش برشی طولی است. با توجه به این که این رودخانه‌ها پیچ و خم‌های متعدد دارند، از مختصات استوانه‌ای استفاده می‌شود. در نهایت با ترکیب این معادلات، روابط هندسه هیدرولیکی پیچان‌رودها، با در نظر گرفتن جریان ثانویه به دست می‌آید.

فرضیات زیر برای رسیدن به اهداف مورد نظر برای مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است:

Ø جریان دائمی و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است.

Ø رودخانه عریض فرض شده است.

Ø دبی جریان معادل دبی مقطع پر است.

Ø محدوده تغییرات سینوسیته از ۱/۲۵ تا ۲/۵ است.

همان‌طور که ذکر شد چهار معادله برای به دست آوردن چهار مجهول روابط هندسه هیدرولیکی (عمق، عرض، سرعت و شیب طولی بستر)، نیاز است. اولین معادله، معادله پیوستگی جریان است که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت (سینگ و همکاران، ۲۰۰۳):

$$Q = AV \quad (4)$$

که در آن  $Q$  دبی،  $A$  سطح مقطع عرضی عمود بر جریان و  $V$  سرعت متوسط است.

$S$  شیب طولی بستر است. با توجه به این که اندازه ذرات  $(D_{50})$  در تابع شیلدز نیز موجود است؛ بنابراین می توان گفت که بار رسوبی متناسب با تابع شیلدز است.

چهارمین معادله، تأثیر جریان ثانویه را در معادلات منعکس می کند. برای مطالعه جریان ثانویه در رودخانه های پیچان، یکی از عوامل مهم، تنش برشی شعاعی است. اغلب معادلات تنش برشی شعاعی از معادله ممنوم در جهت شعاعی به دست آمده اند. رزوسکی (۱۹۵۷) با فرض کانال پهن (باعث کوچک بودن مؤلفه  $v_z$  و تغییرات آن نسبت به شعاع می شود)، تنش برشی شعاعی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\tau_r = \varepsilon \frac{\partial v_r}{\partial z} \quad (21)$$

ضریب  $\varepsilon$ ، ضریب ویسکوزیته آشفتگی است.

در این پژوهش از معادله تنش برشی شعاعی حسین و اسمیت (۱۹۸۶) استفاده شده است.

$$\tau_r = \frac{\rho}{D} \left( \varepsilon \frac{\partial v_r}{\partial \eta} \right) = \frac{\rho g \bar{v}_\theta^2 D^2}{D R_c C^2} [b^2 - \alpha \frac{C^2}{g} + \frac{2}{\kappa} \left( \frac{1}{\kappa} - b \right) + a \left( \frac{23}{9\kappa} - \frac{128}{15} b + \frac{1024}{25} a \right)]$$

$$\rightarrow \tau_r = f(C^2) \frac{\rho g}{C^2} \bar{v}_\theta^2 \frac{D}{R_c} \quad (22)$$

که  $a$ ،  $b$ ،  $\alpha$  ضرایب ثابت،  $C$  ضریب شزی،  $R_c$  شعاع انحنا و  $\bar{v}_\theta$  سرعت متوسط است. براساس ضرایب، مقدار  $f(C^2)$  در محدوده زیر قرار می گیرد (حسین و اسمیت، ۱۹۸۶):

$$4.6 \leq f(C^2) \leq 6.0$$

توجه به این نکته ضروری است که ذره، زمانی شروع به حرکت می کند که تنش برشی مازاد جریان بر آن بزرگتر از صفر باشد. در رودخانه های پیچان، ذره تحت تأثیر دو تنش قرار دارد: تنش شعاعی و تنش طولی. زاویه ای که تنش برشی برآیند با تنش برشی طولی ایجاد می کنند، حائز اهمیت است. هرچه مقدار این زاویه افزایش یابد مقدار تنش برشی شعاعی افزایش می یابد و تحت تأثیر جریان ثانویه قوی تری قرار می گیرد و هرچه قوس تندتر باشد، ذره تمایل به حرکت از قوس خارجی به سمت قوس داخلی را دارد. هرچه این زاویه کوچکتر شود، تنش برشی طولی افزایش و اثر جریان ثانویه کاهش می یابد و قوس ملایم تر و به حالت بازه مستقیم نزدیک تر می شود. بنابراین برای تأثیر جریان ثانویه در معادلات، می توان از نسبت تنش برشی شعاعی به تنش برشی طولی استفاده کرد (شکل ۱).

$$\tau_0 = \rho g D S \quad (22)$$

چنانچه در روابط (۹) و (۱۰) مقدار عمق از کف ( $v$ ) برابر با عمق متوسط ( $D$ ) قرار داده شود، سرعت نقطه ای ( $u_p$ ) برابر با سرعت ماکزیمم ( $u_{p-max}$ ) می شود. با ترکیب روابط (۱۱) و (۱۲) با روابط (۹) و (۱۰)، روابط زیر حاصل می شوند:

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{m+1} \frac{u_{p-max}}{u_*} \quad (13)$$

$$\frac{V}{u_*} = \frac{u_{p-max}}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \quad (14)$$

حال با تساوی قرار دادن سمت راست روابط (۱۳) و (۱۴) داریم:

$$\frac{m}{m+1} \frac{u_{p-max}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \quad (15)$$

با ترکیب دو معادله (۱۳) و (۱۵):

$$m \frac{V}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \quad (16)$$

با توجه به اینکه  $(\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}})$  بنابراین مقدار  $m$  به دست می آید:

$$m = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (17)$$

مقدار ضریب  $B$  در معادله (۶) با توجه به  $(\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}})$  استفاده از روابط (۱۱) و (۶) به دست می آید:

$$B = \frac{1}{(m+1)\sqrt{8}} \left( \frac{d_s}{y_0} \right)^m \quad (18)$$

که در آن  $\kappa$  ضریب ون-کارمن و حدود  $0.4$  است،  $f$  ضریب دارسی-ویسیاخ و  $y_0$  ارتفاعی است که سرعت تا آن ارتفاع صفر است.

سومین معادله، معادله انتقال رسوب است. معادلات بسیاری برای محاسبه بار بستر وجود دارد که تعدادی از آن ها تابعی از تنش برشی هستند و حالت کلی آن ها را می توان به صورت زیر بیان کرد (هوانگ و نانسون، ۲۰۰۰ و شاه حسینی، ۱۳۹۴):

$$q_s = C_s \tau_0^n (\tau_0 - \tau_*)^s \quad (19)$$

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho - \rho_s) g D_{50}} = \frac{D S}{(G_s - 1) D_{50}} \quad (20)$$

که در آن  $q_s$  دبی بار بستر در واحد عرض کانال،  $C_s$  ضریب ثابت مربوط به مشخصات ذرات رسوبی،  $\tau_0$  تنش برشی بستر،  $\tau_*$  تنش برشی بستر،  $G_s$  چگالی نسبی ذرات رسوبی،  $g$  شتاب ثقل،  $D_{50}$  اندازه ذراتی از مصالح رسوبی که ۵۰ درصد مصالح از آن کوچکتر هستند،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\rho_s$  جرم مخصوص ذرات،  $D$  عمق متوسط و

$$\alpha = \frac{1}{W_R E b \sqrt{\rho_* g}}, \rho_* = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

مطالعات هی و تورن (۱۹۸۶) روی رودخانه‌های شنی در کشور انگلستان حاکی از آن است که مقدار شعاع انحنا ( $R_c$ ) در بسیاری از موارد بزرگ‌تر از عرض ( $W$ ) و عمق متوسط مقطع پر ( $D$ ) است. در این خصوص با بررسی بیشتر، مؤلف به این نتیجه رسید که تغییرات  $W$  و  $D$  بر روی نسبت‌های  $\frac{W}{R_c}$  و  $\frac{D}{R_c}$  تأثیر چندانی ایجاد نمی‌کند و میانگین آن‌ها به ترتیب ۰/۴۵۶ و ۰/۰۴۷ است (شاه‌حسینی، ۱۳۹۴). مقدار  $E$  نیز ثابت است. با توجه به مقدار میانگین  $K$  و مقدار میانگین نسبت  $\frac{D}{R_c}$  مقدار میانگین زاویه  $\lambda$  حدود ۱۶ درجه است؛ بنابراین رودخانه‌های پیچان مورد استفاده برای کالیبراسیون و حساسیت‌سنجی پایدار هستند. مقدار میانگین  $m$  در توان‌ها نیز با توجه به معادله (۱۷) و با توجه به داده‌های هی و تورن (۱۹۸۶) روی رودخانه‌های شنی در کشور انگلستان برابر با ۰/۲۷۹ است. طبق توضیحات ذکر شده، روابط هندسه هیدرولیکی به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$D = 0.5737Q^{0.2996} D_{50}^{0.2511} S^{-0.1498} \quad (۲۶-الف)$$

$$W = 0.5520Q^{0.4670} D_{50}^{-0.1674} S^{-0.2335} \quad (۲۶-ب)$$

$$V = 4.8383Q^{0.2335} D_{50}^{-0.0837} S^{0.3833} \quad (۲۶-ج)$$

$$S = 0.3373Q^{0.2996} D_{50}^{-0.7489} S^{0.8502} \quad (۲۶-د)$$

### نتایج و بحث

#### مقایسه روابط هندسه هیدرولیکی این مطالعه با

#### روابط موجود

ابتدا در جدول ۱، مقادیر ضریب و توان‌های موجود در روابط هندسه هیدرولیکی برای مطالعه حاضر با روابط جولین و وارگادالام (۱۹۹۵) مقایسه شد. سپس مقادیر محاسبه شده از روابط هندسه هیدرولیکی این مطالعه و روابط سه متغیره جولین و وارگادالام (۱۹۹۵) با استفاده از داده‌های هی و تورن (۱۹۸۶) برای رودخانه‌های انگلستان در شکل ۲ مقایسه شده است که خطای حاصل از محاسبه پارامترها در این مطالعه کمتر و بیان‌کننده تأثیر جریان ثانویه در پیچان رود در ارتقا روابط هندسه هیدرولیکی است.

$$\tan \lambda = \frac{\tau_r}{\tau_0} = \frac{f(C^2) V^2 D}{C^2 DS R_c} \quad (۲۳)$$



شکل ۱- تنش برشی شعاعی و مماسی

$$= \frac{f(C^2) b^2 g \left(\frac{D}{D_{50}}\right)^{2m} D}{C^2 DS R_c} \rightarrow \tan \lambda = \frac{f(C^2) b^2 g \left(\frac{D}{D_{50}}\right)^{2m} D}{C^2 DS R_c} \quad (۲۳)$$

معادله (۲۳) را می‌توان به صورت زیر نیز بازنویسی کرد:

$$\tan \lambda = K \frac{D}{R_c} \quad (۲۴)$$

برای رودخانه‌های عریض ( $W/D > 10$ ) و  $\frac{c}{\sqrt{g}} \approx 10$  میانگین مقدار  $K$ ، ۵/۳ است (حسین و اسمیت، ۱۹۸۶).

در پیچان‌رودها اثر پایداری ذرات را می‌توان با استفاده از زاویه انحراف  $\lambda$  نیز تخمین زد. زمانی که مقدار زاویه انحراف تقریباً کوچک‌تر از ۱۵ درجه است، پایداری ذرات دیواره خارجی کاهش و پایداری ذرات دیواره داخلی افزایش می‌یابد. زمانی که این زاویه بزرگ‌تر می‌شود و در حدود مقادیر بین ۱۵ و ۵۵ درجه قرار می‌گیرد، ذرات نسبتاً پایدار هستند و بیش‌تر بودن این زاویه از ۵۵ درجه باعث ناپایداری ذرات در تمامی مقطع عرضی می‌شود (جولین، ۱۹۹۰).

بنابراین با ترکیب چهار معادله (۴)، ۸، ۲۰ و ۲۳ چهار پارامتر مجهول به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$D = (\alpha \tan \lambda)^{\frac{2}{6m+5}} Q^{\frac{2}{6m+5}} D_{50}^{\frac{6m}{6m+5}} S^{-\frac{1}{6m+5}} \quad (۲۵-الف)$$

$$W = W_R E \alpha^{\frac{4m+2}{6m+5}} \tan \lambda^{\frac{2m+3}{6m+5}} Q^{\frac{4m+2}{6m+5}} D_{50}^{-\frac{4m}{6m+5}} S^{\frac{2m+1}{6m+5}} \quad (۲۵-ب)$$

$$V = \frac{1}{W_R E} \alpha^{\frac{4m+4}{6m+5}} \tan \lambda^{\frac{2m+1}{6m+5}} Q^{\frac{2m+1}{6m+5}} D_{50}^{-\frac{2m}{6m+5}} S^{\frac{2m+2}{6m+5}} \quad (۲۵-ج)$$

$$\tau_* = \frac{1}{\rho_*} (\alpha \tan \lambda)^{\frac{2}{6m+5}} Q^{\frac{2}{6m+5}} D_{50}^{-\frac{5}{6m+5}} S^{\frac{6m+4}{6m+5}} \quad (۲۵-د)$$

در معادلات داریم:

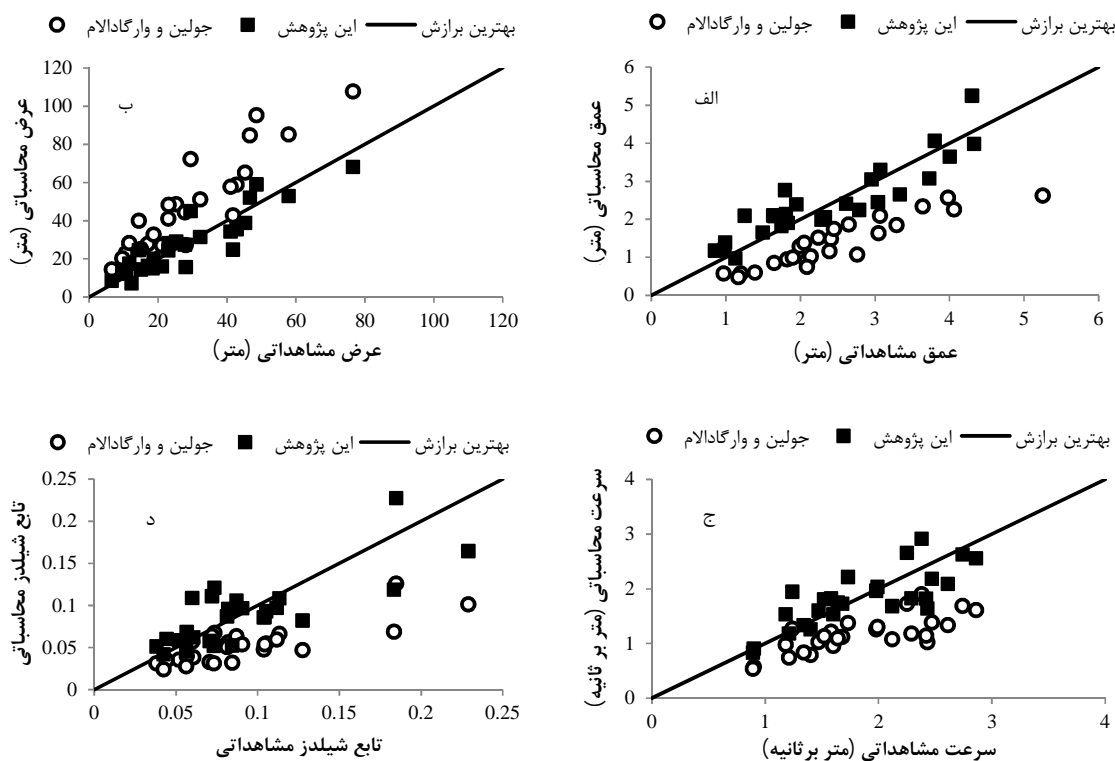
$$W_R = \frac{W}{R_c}, E = f(C^2) \frac{b^2 g}{C^2}, b = B\sqrt{8},$$

جدول ۱- مقایسه ضریب و توان در معادله عمق، عرض، سرعت و تابع شیلدز

	$D = CQ^x D_{50}^y S^z$				$W = CQ^x D_{50}^y S^z$			
	C	x	y	z	C	x	y	z
این مطالعه	۰/۵۷۴	۰/۲۹۷	۰/۲۵۱	-۰/۱۵۰	۰/۵۲۲	۰/۴۶۷	-۰/۱۶۷	-۰/۲۳۴
جولین و وارگادالام	۰/۲	۰/۳۳	۰/۱۷	-۰/۱۷	۱/۳۳	۰/۴۴	-۰/۱۱	-۰/۲۲

	$V = CQ^x D_{50}^y S^z$				$\tau_* = CQ^x D_{50}^y S^z$			
	C	x	y	z	C	x	y	z
این مطالعه	۴/۸۳۸	-۰/۲۳۴	-۰/۰۸۴	۰/۳۸۲	۰/۳۳۷	۰/۳۰۰	-۰/۷۵۰	۰/۸۵۰
جولین و وارگادالام	۳/۷۶	۰/۲۲	-۰/۰۵	۰/۳۹	۰/۱۲۱	۰/۳۳	-۰/۸۳	-۰/۸۳



شکل ۲- مقایسه مقادیر (الف) عمق، (ب) عرض، (ج) سرعت و (د) شیلدز محاسباتی حاصل از روابط مختلف

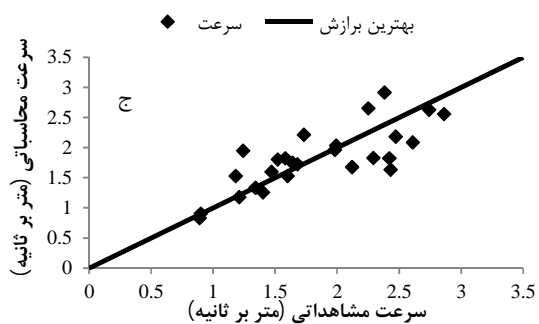
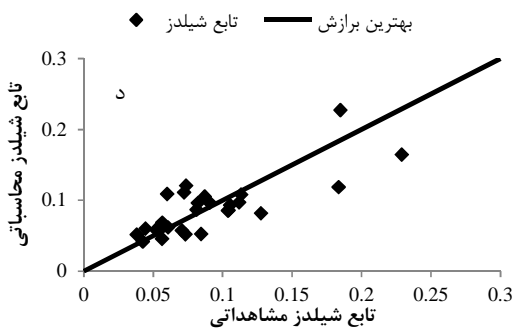
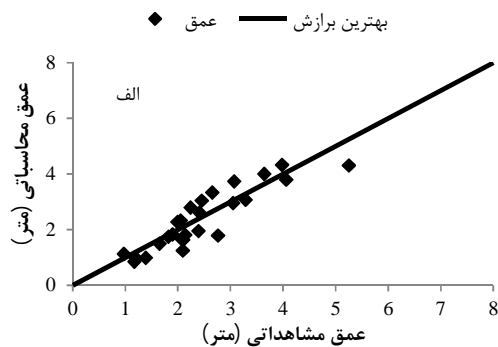
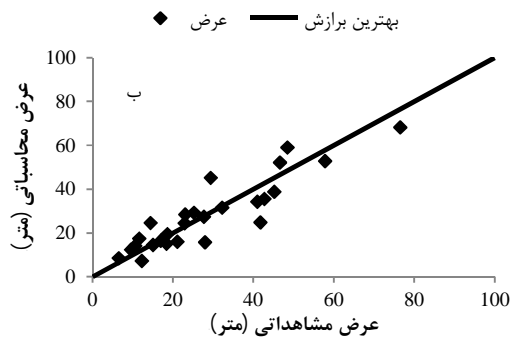
### واسنجی مدل

پس از به دست آوردن روابط هندسه هیدرولیکی، با استفاده از داده‌های هی و تورن (۱۹۸۶) برای رودخانه‌های انگلستان، برای چهار مجهول عمق، عرض، سرعت و تابع شیلدز مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای در یک دستگاه مختصات ترسیم و در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، پراکندگی عمق و عرض و سرعت قرینه است و با افزایش مقدار عمق و عرض و سرعت، میزان خطا تفاوت قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند؛ اما برای تابع شیلدز باید دقت کرد که در مقادیر کوچک‌تر،

مدل جواب دقیق‌تری می‌دهد و هرچه مقدار تابع شیلدز افزایش می‌یابد، میزان خطا نیز بیشتر می‌شود. این مدل برای مقادیر تابع شیلدز کمتر از مقدار ۰/۱۳ جواب دقیق‌تری می‌دهد. علت این امر را می‌توان این گونه توضیح داد که با توجه به اینکه رودخانه عریض فرض شده است و به‌صورت تقریبی شعاع هیدرولیکی (نسبت سطح مقطع عرضی عمود بر جریان به محیط تر شده) و عمق با هم برابر هستند؛ بنابراین به جای شعاع هیدرولیکی از عمق متوسط استفاده شده است. از طرفی تابع شیلدز با شیب رابطه مستقیم دارد و با افزایش مقدار تابع شیلدز

عریض بودن در مقادیر بالای تابع شیلدز با خطای بیش‌تری مواجه می‌شود.

مقدار شیب نیز افزایش می‌یابد و با افزایش شیب طولی بستر، نسبت عرض به عمق کوچک‌تر می‌شود و فرض

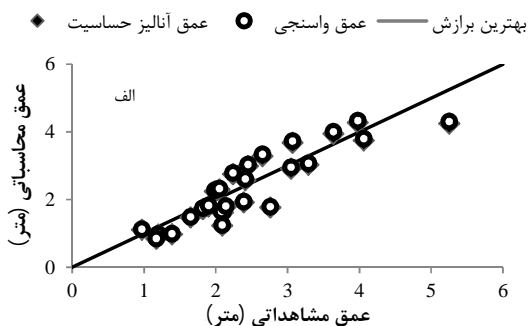
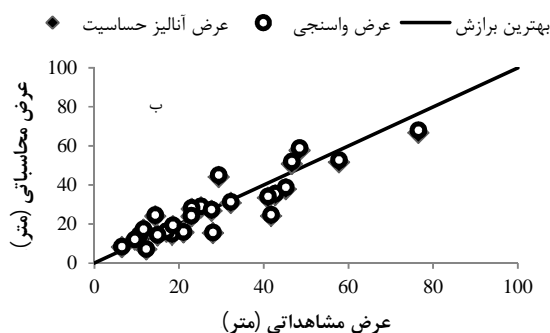


شکل ۳- مقایسه مقادیر (الف) عمق، (ب) عرض، (ج) سرعت و (د) شیلدز مشاهداتی و محاسباتی

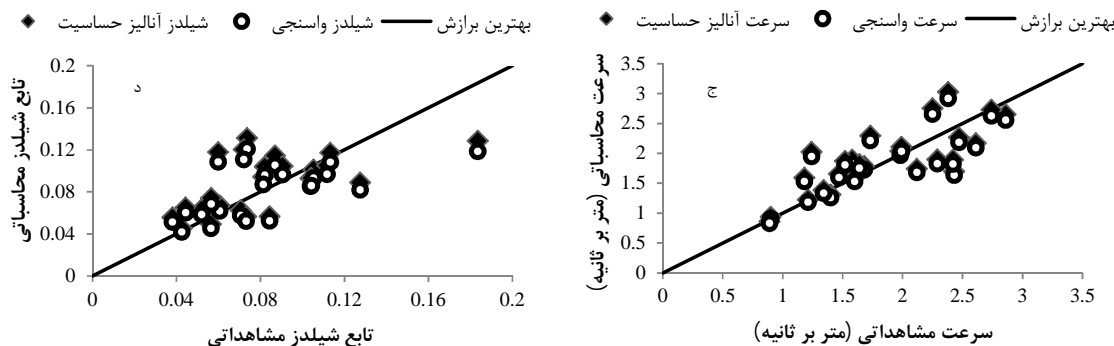
این اساس، مدل نسبت به سه متغیر دبی جریان، اندازه ذرات رسوبی و شیب طولی بستر به صورت قابل ملاحظه حساس نیست؛ با وجود این، با توجه به شکل ۴- د با تغییر شیب طولی بستر تغییر خطای محاسبه تابع شیلدز از بین باقی پارامترها کمی بیش‌تر است و دلیل آن را نیز می‌توان رابطه مستقیم شیب طولی بستر و تابع شیلدز دانست.

### حساسیت‌سنجی مدل

در آنالیز حساسیت هر بار با ثابت نگه داشتن دو پارامتر و تغییر یک پارامتر دیگر از سه پارامتر دبی جریان، اندازه ذرات رسوبی و شیب طولی بستر چهار مجهول عمق، عرض، سرعت و تنش برشی بدون بعد (تابع شیلدز) به دست می‌آید و با مقایسه این مقادیر با مقادیر واسنجی می‌توان به حساسیت مدل پی برد. به دلیل محدودیت صفحات، حساسیت نسبت به شیب آورده شد (شکل ۴). بر



شکل ۴- آنالیز حساسیت اثر شیب طولی بستر بر (الف) عمق، (ب) عرض



ادامه شکل ۴- آنالیز حساسیت اثر شیب طولی بستر بر ج(سرعت و د) شیلدز

### منابع

1. شاه‌حسینی م. ۱۳۹۴. بررسی تحلیلی نقش جریان‌های ثانویه در روابط هندسه هیدرولیکی در پیچان رودها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی. ۱۰۷ ص.
2. Bray D. L. and Davar K. S. 1987. Resistance to flow in gravel-bed rivers. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 14(1): 77-86.
3. Chang H. H. 1979. Minimum stream power and river channel patterns. *Journal of Hydrology*. 41(3): 303-327.
4. Eaton B. C. 2010. Hydraulic geometry: empirical investigations and theoretical approaches. Preprint submitted to *Treatise on Fluvial Geomorphology*. 50 p.
5. Eaton B. C. and Millar R. G. 2004. Optimal alluvial channel width under a bank stability constraint. *Journal of Geomorphology*. 62: 35-45.
6. Farias H. D. 1995. Physical and mathematical modeling of alluvial channels in regime. In *Proceedings of the XXVth Congress of the International Association for Hydraulic Research*. 1: 384-353.
7. Faris H. D. Pilian M. T. Matter M. T. and Pece F. J. 1998. Regime width of alluvial channel. *ICHE, Cottbus*. 1-21.
8. Ferro V. 2003. Flow resistance in gravel-bed channels with large-scale roughness. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28: 1325-1339.
9. Hey R. D. and Thorne C. R. 1986. Stable channels with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 112: 671-686.
10. Huang H. Q. 1996. Multivariate controls of alluvial channel geometry: model development and applications. Ph.D. thesis, University of Wollongong. 239 p.

### نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه روابط هندسه هیدرولیکی، اغلب در رودخانه‌هایی با بازه‌های مستقیم یا ترکیبی از بازه‌های مختلف بوده، در این پژوهش روابط هندسه هیدرولیکی برای رودخانه‌های پیچان به دست آمده است. در ادامه، واسنجی مدل صورت گرفت و مقادیر محاسباتی و مشاهداتی مقایسه و مشخص شد که در مقادیر تابع شیلدز کوچک‌تر، میزان خطاها کم‌تر می‌باشد؛ زیرا در هنگام به دست آوردن روابط هندسه هیدرولیکی فرض گردیده رودخانه عریض، و به جای شعاع هیدرولیکی از عمق متوسط استفاده شده است؛ در حالیکه با افزایش تابع شیلدز، شیب نیز افزایش و در نتیجه نسبت عرض به عمق کاهش می‌یابد. بنابراین میزان خطا نیز افزایش می‌یابد.

آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که مدل نسبت به سه متغیر دبی جریان، اندازه ذرات رسوبی و شیب با طولی بستر به‌صورت قابل ملاحظه حساس نیست. با وجود این با تغییر شیب طولی بستر، تغییر خطای ناشی از محاسبه تابع شیلدز از بین باقی پارامترها کمی بیش‌تر است. دلیل آن را نیز می‌توان رابطه مستقیم شیب طولی بستر و تابع شیلدز دانست. در انتها پیشنهاد می‌شود در صورتی که اندازه‌گیری شیب طولی بستر امکان‌پذیر و آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر باشد، روابط حاصل را به کار برد.

بنابراین طبق مطالعه حاضر نقش جریان ثانویه در استخراج روابط هندسه هیدرولیکی می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تری شود و تاکنون معادلات حاضر این نقش را به طور مستقیم مدنظر قرار نداده‌اند.



stream channels in coarse non-cohesive sands. US Geological Survey, Washington DC. 26 p.

11. Huang H. Q. and Nanson G. C. 2000. Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action. *Earth Surface Processes and Landforms*. 25: 1-16.
12. Hussein A. S. A. and Smith K. V. H. 1986. Flow and bed deviation angle in curved open channels. *Journal of Hydraulic Research*. 24: 93-108.
13. Jackson W. L. and Beschta R. L. 1984. Influences of increased sand delivery on the morphology of sand and gravel channel. *Water resources Bulletin*. 20(4): 527-533.
14. Julien P. Y. 1990. Downstream hydraulic geometry of alluvial channels. tech. rep., Engineering Research Center. Colorado State University. 31 p.
15. Julien P. Y. and Wargadalam J. 1995. Alluvial channel geometry: Theory and applications. *Journal of hydraulic engineering*. 121(4): 312-325.
16. Kennedy R. G. 1895. The prevention of silting in irrigation canals. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, London*. 281-290.
17. Lee H. E. Lee C. Kim Y. J. Kim J. S. and Kim W. 2013. Power Law Exponents for Vertical Velocity Distributions in Natural Rivers. *Scientific Research*. 5: 933-942.
18. Leopold L. B. and Maddock T. J. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implication. *U. S. Geological Survey professional*. 57 p.
19. Lindley E. S. 1919. Regime channels. *Minutes of Proceedings, Punjab Engineering Congress, Lahore, India*. 63-74.
20. Powell D. M. 2014. Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. *Earth-Science Reviews*. 136: 301-338.
21. Rozovskii I. L. 1957. Flow of water in bends of open channels. *Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Israel Program for Scientific Translations*. 240 p.
22. Singh V. P. 2003. On the theories of hydraulic geometry. *International Journal of Sediment Research*. 18(3): 196-218.
23. Singh V. P. Yang C. T. and Deng Z. Q. 2003. Downstream hydraulic geometry relations: 1.Theoretical development. *Water resources research*. 39(12): 1-15.
24. Stebbings J. 1963. The shape of self-formed model alluvial channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 25(4): 485-510.
25. Wang W. C. and Dawdy D. R. 2014. Flow resistance of gravel bed channels. *International Journal of Sediment Research*. 29: 126-132.
26. Wolman M. G. and Brush Jr L. M. 1961. Factors controlling the size and shape of

