

## مدل تحلیلی تأثیر توأم تنش برشی مازاد و پوشش گیاهی در تعیین ابعاد بهینه رودخانه‌های شنی

مهسا محمودی<sup>1</sup>، محمدرضا مجدزاده طباطبایی<sup>2\*</sup>، سید سعید موسوی ندوشنی<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد مهندسی عمران - رودخانه، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
2- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
3- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

\* m\_majdzadeh@sbu.ac.ir

**چکیده** - مدل‌های فرضیات حدی محدودنشده، در رودخانه‌های کوچک اغلب عرض کانال‌های آبرفتی را کمتر و عمق را بیشتر از مقادیر مشاهداتی تخمین می‌زنند و در رودخانه‌های بزرگ غالباً عکس این موضوع برقرار است. به‌طور کلی نتایج حاصل از مدل فرضیات حدی محدودنشده نشان‌دهنده توافق نسبتاً نامناسب هندسه محاسباتی کانال با هندسه مشاهداتی می‌باشد. یکی از علل پراکندگی داده‌ها در به‌کارگیری این مدل، نبود روابط مناسب برای بررسی پوشش گیاهی کناره‌های کانال است. به همین علت در این تحقیق با هدف افزایش دقت هندسه مدل شده کانال، به اصلاح این مدل از طریق توزیع تنش برشی مرزی در بستر و کناره‌ها، در نظرگیری پایداری کناره‌های کانال و اعمال اثر پوشش گیاهی پرداخته شده است. مدل تحلیلی توسعه‌یافته در این تحقیق با درج فاکتور شکل کانال، اعمال معادلات بار بستر به شکل تنش برشی مازاد و کمی‌سازی تأثیر پوشش گیاهی (به‌وسیله ارتباط آن با زاویه ایستایی خاک کناره) قادر به پیش‌بینی ابعاد بهینه کانال می‌باشد. در انتها، مدل موردنظر بر روی داده‌های 62 رودخانه شنی از کشور انگلستان و چهار رودخانه از ایران مورد واسنجی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده علاوه بر این‌که نقش تأثیر پایداری و پوشش گیاهی کناره در تخمین خصوصیات هندسی مقطع کانال را نشان می‌دهد، مؤید کارایی مدل محدودنشده نسبت به مدل محدودنشده نیز می‌باشد.

**کلیدواژگان:** فرضیات حدی، پوشش گیاهی، تنش برشی مازاد، مدل تحلیلی.

### 1- مقدمه

کانال‌های آبرفتی پایدار بوده، ولی دارای محدودیت کاربرد روابط ارائه شده که عموماً تابع شرایط منطقه‌ای هستند، می‌باشند. در حالی‌که مدل‌های مبتنی بر نگرش تحلیلی، به دلیل بهره‌گیری از اصول فیزیکی حاکم بر سیستم رودخانه، دارای چنین محدودیتی نبوده و دامنه وسیعی از شرایط متنوع هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و رسوبی را در بر می‌گیرند و به‌دلیل فرضیات ساده‌کننده در مدل‌سازی با محدودیت مواجه می‌باشند. از میان مدل‌های تحلیلی مختلف، در چند دهه اخیر فرضیات حدی به‌عنوان یکی از معادلات دخیل در ریخت‌شناسی رودخانه برای پیش‌بینی

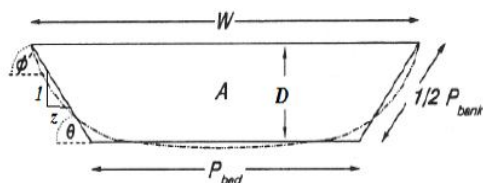
با پیدایش هزاره جدید، پیشرفت‌های بسیاری در علوم مهندسی صورت گرفته است، ولی مسأله پیش‌بینی پاسخ آبراهه‌های آبرفتی به تغییرات زیست‌محیطی و ساخته بشر هنوز در انتظار یک روش منطقی، ساده و قابل فهم می‌باشد. به‌طور کلی دو روش پایه تجربی و تحلیلی برای تعیین ابعاد هندسی پایدار در رودخانه‌های شنی وجود دارد که استفاده از هر یک، برای هدف طراحی کانال با مزایا و معایبی روبه‌رو است. در مقام مقایسه و بررسی می‌توان اظهار نمود که مدل‌های رژیم تجربی فراگیرترین روش برای طراحی

گیاهی کناره در تخمین ابعاد هندسه هیدرولیکی رودخانه‌های شنی به صورت کمی بررسی شده است. مدل موردنظر با توصیف فاکتور شکل کانال (۷) و در نظر گرفتن طیف وسیعی از معادلات انتقال بار بستر به فرم  $q_s \propto \bar{\tau}_{bed}^m (\bar{\tau}_{bed} - \tau_c)^j$  (با تأکید بر نقش آستانه حرکت در تخمین ابعاد مورفولوژیکی کانال)، معادلات مقاومت جریان به فرم  $V \propto R^x S^y D^\alpha$  و درج شکل مقطع دوزنقه‌ای، به ازای متغیرهای مستقل ورودی به مدل، در دو حالت شیب ثابت و شیب متغیر قادر به پیش‌بینی ابعاد بهینه (در حالت پایداری استاتیکی یا دینامیکی در کانال) می‌باشد.

## 2- تئوری

انتخاب متغیرهای مستقل و وابسته، از مسائل مهمی است که در اغلب مدل‌های تحلیلی رودخانه‌ها و کانال‌های آبرفتی مطرح می‌شود. مدل پیشنهادی، بسته به داده‌های موجود در دو حالت شیب ثابت و شیب متغیر قابل استفاده است. در حالت شیب ثابت، دبی ( $Q$ )، شیب طولی کانال ( $S$ )، متوسط اندازه رسوبات بستر و کناره (به ترتیب  $D_{50bed}$  و  $D_{50bank}$ )، زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره ( $\phi'$ ) و ضریب زبری ( $c_r$ )، ورودی‌های مدل را تشکیل می‌دهند و حالت شیب متغیر مشابه حالت شیب ثابت است، با این تفاوت که نرخ انتقال بار بستر ( $Q_s$ ) به‌عنوان متغیر مستقل ورودی به مدل و شیب طولی، به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود (شایان ذکر است که در مبحث واسنجی، مدل در حالت شیب ثابت به‌کار گرفته شده است). در مدل موردنظر مقطع رودخانه، یک مقطع دوزنقه‌ای با شیب کناره‌های  $1:z$  در نظر گرفته شده است ( $\tan \theta = 1/z$ ).

در شکل 1،  $P_{bed}$  محیط بستر یا عرض کف کانال،  $P_{bank}$  محیط کناره‌ها،  $W$  عرض سطح،  $D$  عمق بیشینه،  $z$  شیب جانبی کناره‌ها ( $\theta$  زاویه شیب کناره) و  $\phi'$  زاویه ایستایی اصلاح شده کناره‌ها می‌باشد.



شکل 1 طرح مقطع دوزنقه‌ای کانال

ابعاد کانال به کار گرفته شده‌اند. بدین منظور معادلات انتقال رسوب و مقاومت جریان به همراه یک معادله سوم ترکیب و برای پیش‌بینی ابعاد کانال در حالت پایدار یا رژیم استفاده می‌شوند. این رابطه سوم اغلب برحسب حداکثر یا حداقل یک پارامتر مانند قدرت جریان، نرخ اتلاف انرژی، بار رسوب و ... بیان می‌شود (ASCE, 1998). در ابتدای دهه 1960 میلادی پژوهشگرانی مانند Leopold & Langbein, (1962) برخی مفاهیم مکانیک سیالات مانند نظریه حداقل واریانس<sup>1</sup> (MV) را برای طراحی کانال‌های پایدار به کار گرفتند. Pickup (1976) و Kirkby (1977) فرضیه حداکثر ظرفیت انتقال رسوب<sup>2</sup> (MSTC) را ارائه کردند که براساس آن شرط تعادل دینامیکی یک کانال، انتقال حداکثر رسوب می‌باشد. Yang (1971) با استفاده از اصول ترمودینامیکی و انتقال رسوب روابطی را برای ریخت‌شناسی رودخانه پیشنهاد کرد و مطالعات وی به پیشنهاد تئوری حداقل نرخ اتلاف انرژی<sup>3</sup> (MEDR) به‌عنوان یک نظریه کلی در هیدرولیک رسوب منجر شد. Huang & Nanson, (2000) نشان دادند که کانال‌های طبیعی به یک حالت بهینه می‌رسند که حداکثر بازدهی جریان<sup>4</sup> (MFE) نام دارد و عبارت است از: "نسبت حداکثر ظرفیت انتقال رسوب به هر واحد از توان جریان موجود". آنها با پیشنهاد و استفاده از فاکتور شکل کانال و با فرض شکل مقطع مستطیلی برای رودخانه و استفاده از معادلات رایج جریان و تئوری مذکور، روابط هندسه هیدرولیکی مشابه با اکثر روابط تجربی موجود به‌دست آوردند. Eaton et al. (2004) فرضیه حداکثر ظرفیت انتقال رسوب را با قید پایداری کناره به خدمت گرفتند و نتیجه گرفتند که هندسه کانال به مقاومت مصالح کناره وابسته است. بررسی مطالعات صورت‌گرفته حاکی از آن است که نتایج حاصل از اجرای مدل فرضیات حدی بدون قید پایداری کناره (مدل محدود نشده) نشان‌دهنده توافق نسبتاً نامناسب هندسه محاسباتی کانال با هندسه مشاهداتی، به‌ویژه در رودخانه‌های بزرگ می‌باشد. به همین جهت در این تحقیق یک مدل تحلیلی در جهت تکمیل مدل MSTC محدود- نشده توسعه داده شده که در آن تأثیر پایداری و پوشش

1. Minimum Variance
2. Maximum Sediment Transport Capacity
3. Minimum Energy Dissipation Rate
4. Maximum Flow Efficiency

که در آن،  $c_r$  ضریب زبری آبراهه،  $R$  شعاع هیدرولیکی،  $S$  شیب طولی و  $D$  عمق جریان می‌باشد. روابط مقاومت جریان زیادی بر شکل به کار گرفته شده منطبق می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به روابط Manning (1891)، Lacey (1958)، Chadwick & Morfett (1995) اشاره نمود.

### انتقال رسوب

به منظور اجتناب از به کارگیری یک فرمول خاص در این مدل، یک رابطه کلی به فرم تنش برشی مازاد برای دبی بار بستر در نظر گرفته شده است (Huang & Nanson, 2000). شایان ذکر است که اگرچه شماری از دانشمندان هیدرولیک، از جمله Einstein (1950) آستانه حرکت را در معادلات خود وارد نموده‌اند، لیکن برای مهندسان هیدرولیک تعیین حد متوسطی به عنوان شروع حرکت ذره حائز اهمیت است، زیرا چنانچه شرایط هیدرولیکی را در این لحظه بتوان فرموله کرد، می‌توان از آن در حل مسائلی از قبیل: طراحی کانال‌های پایدار (طرح کانال بدون فرسایش)، طراحی اندازه ریپرپ برای جلوگیری از فرسایش بستر و بدنه کانال و محاسبه مقدار رسوب حمل شده توسط جریان در رودخانه‌ها، بهره گرفت (Yang, 1996):

$$q_s = c_s \bar{\tau}_{bed}^m (\bar{\tau}_{bed} - \tau_c)^j \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $q_s$  دبی بار بستر در واحد عرض کانال،  $c_s$  ضریب ثابت مربوط به مشخصات ذرات رسوبی،  $\bar{\tau}_{bed}$  تنش برشی بستر و  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی بستر می‌باشد. لازم به ذکر است که معادلاتی از قبیل Meyer-Peter & Muller (1948)، Van Rijn (1984)، Parker (1979) به شکل ارائه شده به صورت معادله (3) قابل تبدیل می‌باشند.

### معادلات ارزیابی تنش برشی بستر و کناره‌ها

در این تحقیق، روش نایت و نایت و همکاران برای محاسبه توزیع نیروی برشی مرزی مورد استفاده قرار گرفته است (Knight, 1981; Knight et al., 1984). این روش بر اساس توزیع نیروی برشی  $SF_{total}$  در طول محیط کانال قرار دارد:

$$SF_{total} = SF_{bed} + SF_{bank} \quad (4)$$

$SF_{bed}$  و  $SF_{bank}$  سهم بستر و کناره‌ها از نیروی برشی در واحد طول کانال می‌باشد. معادله فوق معادل است با (Knight, 1981; Knight et al., 1984):

$$\bar{\tau} P = \bar{\tau}_{bed} P_{bed} + \bar{\tau}_{bank} P_{bank} \quad (5)$$

که در آن  $\bar{\tau}$  تنش برشی متوسط،  $\bar{\tau}_{bed}$  تنش برشی متوسط

### 1-2- فرضیات مدل

در فرایند توسعه مدل، از فرضیات ساده‌کننده‌ای به شرح زیر استفاده شده است:

- 1- جریان دائمی و یکنواخت در نظر گرفته شده است؛
- 2- مدل ارائه شده در بازه‌های تک‌شاخه مستقیم که بار بستر بر ریخت‌شناسی آنها غالب است، قابل کاربرد می‌باشد؛
- 3- مصالح آبرفتی غیرچسبنده مدنظر است؛
- 4- مقطع عرضی کانال، دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده و بستر رودخانه، متحرک و کناره‌های آن پایدار است؛
- 5- شرایط پایدار و تعادلی مدنظر است، این شرایط متناظر با ارضای تئوری‌های حدی می‌باشد؛
- 6- مقاومت جریان فقط به زبری ذرات وابسته می‌باشد.

### 2-2- معادلات حاکم

معادلات مورد استفاده عبارتند از: مقاومت جریان، پیوستگی، تنش برشی متوسط کناره، تنش برشی متوسط بستر، پایداری کناره و انتقال رسوب. این در حالی است که در این تحلیل، هفت متغیر وابسته وجود دارد که عبارتند از: محیط بستر یا عرض کف کانال ( $P_{bed}$ )، عمق ماکزیمم کانال ( $D$ )، شیب طولی آبراهه ( $S$ ) (در حالت شیب متغیر) و یا دبی بار بستر ( $Q_s$ ) (در حالت شیب ثابت)، سرعت متوسط جریان ( $V$ )، تنش برشی متوسط بستر ( $\bar{\tau}_{bed}$ )، تنش برشی متوسط کناره ( $\bar{\tau}_{bank}$ ) و زاویه کناره ( $\theta$ ). پس در برابر هفت متغیر موجود، تنها شش معادله وجود دارد و برای حل مجهولات، نیاز به یک معادله اضافه می‌باشد که در این جا از یک فرضیه بهینه‌سازی به عنوان معادله هفتم استفاده شده است. معادلات مورد استفاده در مدل در ادامه تشریح شده‌اند.

### پیوستگی جریان

رابطه پیوستگی برای شرایط پایدار به صورت (1) قابل ارائه است (Huang & Nanson, 2000):

$$Q = A \times V \quad (1)$$

که در آن،  $Q$  دبی جریان،  $V$  سرعت متوسط جریان و  $A$  مساحت مقطع عرضی کانال می‌باشد.

### مقاومت جریان

در مدل تحلیلی ارائه شده، شکل کلی زیر برای رابطه مقاومت جریان در نظر گرفته شده است:

$$V = c_r R^x S^y D^\alpha \quad (2)$$

( $\theta$ ) و زاویه ایستایی ( $\phi$ ) معلوم می‌باشد. مقدار زاویه ایستایی برای کناره متشکل از رسوبات شنی غیرچسبنده 40 درجه است (Lane, 1955)، ولی با افزایش پایداری کناره از راه افزایش پوشش گیاهی وابسته به چگالی ریشه‌ها مقدار این زاویه تغییر کرده و دامنه تغییرات آن از 40 درجه تا 90 درجه خواهد بود (Eaton & Millar, 2004). لذا لازم است در معادله (9) مقدار  $\phi$  با مقدار جدید  $\phi'$  اصلاح شود. از آنجا که معادله (9) براساس داده‌های مشاهداتی رودخانه‌های شنی نتایج ضعیفی را به دنبال داشته است، در مدل ارائه شده، پایداری کناره براساس معیار پایداری کناره USBR اصلاح شده به صورت معادله (10)، مورد استفاده قرار گرفته است (Eaton & Millar, 2004):

$$\tau_{cb}^* = \frac{\bar{\tau}_{bank}}{(\gamma_s - \gamma)D_{50bank}} = c \tan \phi' \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi'}} \quad (10)$$

$\phi'$  زاویه ایستایی اصلاح شده (با در نظرگیری اثر پوشش گیاهی) می‌باشد. ضریب  $c$  به خصوصیات رسوبات غیرچسبنده بستگی دارد و نقش پوشش گیاهی در پایداری کناره در مقدار آن تأثیری ندارد و از رابطه هندرسون (Henderson, 1966) به صورت رابطه (11) تعیین می‌شود:

$$c = \tau_c^* / \tan \phi \quad (11)$$

که در آن  $\tau_c^*$  تنش برشی بدون بعد بحرانی برای رسوبات بستر با اندازه مشابه رسوبات کناره (پارامتر شیلدز بحرانی) و  $\phi$  زاویه ایستایی رسوبات است. (Eaton & Millar, 2004) در نظر گرفتن  $\tau_c^* \approx 0.04$  و دامنه تغییرات زاویه ایستایی ( $\phi$ ) در محدوده 25 درجه برای ماسه ریزدانه تا 40 درجه برای شن غیرچسبنده، با استفاده از معادله (11) به این نتیجه رسیدند که مقدار ضریب  $c$  در محدوده 0/086 تا 0/048 تغییر خواهد کرد. لذا در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن رسوبات شنی غیرچسبنده مقدار 0/048 برای  $c$  در نظر گرفته شده است. محدوده تغییرات زاویه ایستایی اصلاح شده ( $\phi'$ ) از  $\phi$  تا 90 درجه می‌باشد، حد پایین ( $\phi' = \phi$ ) برای حالتی است که کناره عاری از هرگونه پوشش گیاهی است و نیز رسوبات چسبنده مابین رسوبات غیرچسبنده کناره را پر نکرده‌اند و حد بالای 90 درجه برای حالتی است که کناره فرسایش‌ناپذیر می‌باشد (Eaton & Millar, 2004). رفتار رابطه (10) به گونه‌ای است که زمانی-

بستر و  $\bar{\tau}_{bank}$  تنش برشی متوسط کناره می‌باشد. البته رابطه Knight et al. (1984) به کانال‌های مستطیلی محدود می‌شود و (Flintham & Carling, 1988) آن را به کانال‌های ذوزنقه‌ای تعمیم داده‌اند. روابط ارائه شده در این روش مربوط به کانال‌های با زبری یکنواخت بستر و کناره‌ها می‌شود. بر این اساس درصد نیروی برشی قابل تحمل به وسیله کناره‌های کانال با زبری یکنواخت بستر و کناره به صورت رابطه (6) قابل ارائه است (Flintham & Carling, 1988):

$$\log \% SF_{bank} = -1.4026 \log \left( \frac{P_{bed}}{P_{bank}} + 1.5 \right) + 2.247 \quad (6)$$

لازم به ذکر است که در کانال ذوزنقه‌ای (شکل 1) رابطه  $P_{bank} = 2D\sqrt{1+z^2}$  برقرار است. تنش برشی بستر و کناره‌ها را از روابط زیر می‌توان محاسبه کرد (Flintham & Carling, 1988):

$$\frac{\bar{\tau}_{bank}}{\gamma DS} = 0.01 \% SF_{bank} \left[ \frac{(W + P_{bed}) \sin \theta}{4D} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\bar{\tau}_{bed}}{\gamma DS} = (1 - 0.01 \% SF_{bank}) \left[ \frac{W}{2P_{bed}} + 0.5 \right] \quad (8)$$

در روابط فوق،  $\gamma$  وزن مخصوص آب،  $D$  عمق بیشینه کانال،  $W$  عرض فوقانی کانال و  $\theta$  زاویه شیب کناره کانال است.

#### معادله پایداری کناره

معادله پایداری کناره به صورت زیر قابل ارائه است (Lane, 1955):

$$\frac{\bar{\tau}_{bank}}{\gamma(G_s - 1)D_{50bank}} = \tau_c^* \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}} \quad (9)$$

که در آن،  $\bar{\tau}_{bank}$  تنش برشی متوسط کناره،  $D_{50bank}$  قطر متوسط رسوبات کناره،  $\theta$  زاویه شیب کناره،  $\phi$  زاویه ایستایی رسوبات کناره،  $G_s$  چگالی مخصوص رسوبات و  $\gamma$  وزن مخصوص آب است. ( $\tau_c^* = \tau_c / (\gamma(G_s - 1)D_{50})$ ) که در آن  $D_{50}$  اندازه متوسط رسوبات بستر می‌باشد. معادله (9) معرف آستانه پایداری کناره و بیان‌گر آن است که زمانی که زاویه کناره کانال ( $\theta$ ) به سمت زاویه ایستایی رسوبات کناره ( $\phi$ ) میل می‌کند، عبارت سمت راست معادله به صفر نزدیک شده و می‌توان گفت ذرات بر روی کناره در آستانه حرکت قرار می‌گیرند و بالعکس؛ هنگامی که  $\theta$  کاهش می‌یابد، کناره، پایدار شده و می‌تواند تنش برشی بزرگ‌تری را متحمل شود. به‌طور کلی معادله (9) براساس تجزیه نیروهای وارد بر ذره واقع بر کناره رودخانه با زاویه شیب

جانبی کانال ( $z$ ) و فاکتور شکل ( $\zeta$ ) کافی است نسبت  $(Q/A)$  از رابطه پیوستگی (معادله 1) جایگزین سرعت  $(V)$  در معادله (2) گردد و سپس با معادلات (13) و (15) ترکیب شود. از ترکیب رابطه حاصل (معادله 17) و روابط مربوط به پارامترهای هندسی (معادلات 7 و 8 و نیز 12 تا 15)، رابطه عرض بستر، سرعت متوسط و تنش برشی بستر و کناره‌های کانال نیز با متغیرهای مذکور به دست می‌آید:

$$D = \frac{(\zeta + 2\sqrt{1+z^2})^{x/(x+2+\alpha)} (Q/c_r)^{1/(x+2+\alpha)}}{(\zeta + z)^{(x+1)/(x+2+\alpha)} S^{y/(x+2+\alpha)}} \quad (17)$$

$$P_{bed} (= \zeta D) = \frac{\zeta (\zeta + 2\sqrt{1+z^2})^{x/(x+2+\alpha)} (Q/c_r)^{1/(x+2+\alpha)}}{(\zeta + z)^{(x+1)/(x+2+\alpha)} S^{y/(x+2+\alpha)}} \quad (18)$$

$$V (= Q/A) = \frac{(S^{2y} Q^{(x+\alpha)} c_r^{2y})^{1/(x+2+\alpha)} (\zeta + z)^{(x-\alpha)/(x+2+\alpha)}}{(\zeta + 2\sqrt{1+z^2})^{(2x)/(x+2+\alpha)}} \quad (19)$$

$$\bar{\tau}_{bed} = \gamma DS (1 - 0.01\% SF_{bank}) \left( \frac{\zeta + z}{\zeta} \right) \quad (20)$$

$$\bar{\tau}_{bank} = \gamma DS \times 0.01\% SF_{bank} \left[ \frac{(\zeta + z) \sin \theta}{2} \right] \quad (21)$$

که در روابط (20، 21)،  $D$  از رابطه (17) و  $SF_{bank}$  % از رابطه زیر بر حسب  $\zeta$  و  $z$  قابل محاسبه است:

$$\% SF_{bank} = 10^{2.247} \left( \frac{\zeta}{2\sqrt{1+z^2}} + 1.5 \right)^{-1.4026} \quad (22)$$

اینک به دنبال تعیین ابعاد بهینه کانال، می‌بایست پس از جاگذاری  $(P_{bed})_m$  و  $(\bar{\tau}_{bed})_m$  به ترتیب از معادلات (18) و (20) در رابطه  $Q_s = P_{bed} c_s \bar{\tau}_{bed}^m (\bar{\tau}_{bed} - \tau_c)^j$ ، از  $Q_s$  نسبت به  $\zeta$  مشتق‌گیری نمود و مشتق آن را برابر صفر قرار داد. بدین ترتیب رابطه‌ای که حاصل می‌شود به صورت رابطه (23) خواهد بود.

در رابطه (23)، با در نظر گرفتن  $Q$ ،  $S$ ،  $c_r$  و  $D_{50}$  معلوم (یعنی در حالت شیب ثابت)، فاکتور شکل ( $\zeta$ ) و شیب کناره ( $z$ ) مجهول می‌باشند  $(\tan \theta = 1/z)$ ، لذا نیاز به معادله دومی است که زاویه کناره کانال ( $\theta$ ) از آن تعیین شود. برای این منظور رابطه پایداری کناره USBR اصلاح‌شده (با در- نظر گرفتن اثر پوشش گیاهی کناره‌های کانال) در ترکیب با رابطه تنش برشی متوسط کناره مورد استفاده قرار گرفته است.

که زاویه شیب کناره به بیشینه مقدار خود می‌رسد  $(\theta \rightarrow \phi')$ ، تنش برشی بی‌بعد رسوبات کناره به صفر میل می‌کند  $(\tau_{cb}^* \rightarrow 0)$  و می‌توان گفت ذرات بر روی کناره در آستانه حرکت قرار می‌گیرند. در مقابل زمانی که شیب کناره به کمینه مقدار خود می‌رسد  $(\theta \rightarrow 0)$ ، تنش برشی رسوبات کناره بیشینه می‌شود  $(\tau_{cb}^* \rightarrow \tau_c^* \frac{\tan \phi'}{\tan \phi})$  (Eaton & Millar, 2004).

### تئوری‌های حدی

در این تحقیق از تئوری حداکثر ظرفیت انتقال رسوب بهره گرفته شده است که طبق آن یک آبراهه آبرفتی، شیب و هندسه خود را در راستای بیشینه‌سازی ظرفیت انتقال رسوب تنظیم می‌کند و یا به عبارت دیگر، به ازای دبی و شیب معین، ابعاد آبراهه به گونه‌ای تغییر می‌کند که نرخ انتقال رسوب حداکثر شود.

### 2-3- توسعه مدل تحلیلی

این مدل در ادامه مطالعات (Huang & Nanson 2000) و ترکیب آن با روش ارائه‌شده توسط Eaton & Millar (2004) توسعه یافته است. برای این منظور، ابتدا فاکتور شکل بی‌بعد ( $\zeta$ ) بر اساس پارامترهای هندسی مقطع به صورت زیر تعریف شده است:

$$\zeta = P_{bed} / D \quad (12)$$

که در آن  $P_{bed}$  و  $D$  به ترتیب نشان‌دهنده عرض کف و عمق بیشینه کانال می‌باشند (شکل 1). در ادامه سایر پارامترهای هندسی مقطع بر حسب فاکتور شکل ( $\zeta$ )، عمق ( $D$ ) و شیب جانبی کانال ( $z$ ) بیان می‌گردند. برای مقطع دوزنقه‌ای نتایج به شرح زیر است:

$$A = D^2 (\zeta + z) \quad (13)$$

$$P = P_{bed} + P_{bank} = D (\zeta + 2\sqrt{1+z^2}) \quad (14)$$

$$R = A/P = \frac{(\zeta + z)}{(\zeta + 2\sqrt{1+z^2})} D \quad (15)$$

$$W = P_{bed} + 2zD = D (\zeta + 2z) \quad (16)$$

در روابط فوق،  $A$ ،  $P$ ،  $R$  و  $W$  به ترتیب مساحت مقطع عرضی، محیط ترشده کانال، شعاع هیدرولیکی و عرض سطح مقطع پر می‌باشد. به منظور تعیین رابطه عمق با ضریب زبری ( $c_r$ )، شیب طولی آبراهه ( $S$ )، دبی ( $Q$ )، شیب

$$\bar{\tau}_{bed} = \tau_c K_1 / K_2$$

$$K_1 = (x+1+\alpha)\zeta_m + 2(1+\alpha)\sqrt{1+z^2} + (2+2x+\alpha)z + \frac{(4+2x+2\alpha)z\sqrt{1+z^2}}{\zeta_m} - mK$$

$$K_2 = (x+1+\alpha)\zeta_m + 2(1+\alpha)\sqrt{1+z^2} + (2+2x+\alpha)z + \frac{(4+2x+2\alpha)z\sqrt{1+z^2}}{\zeta_m} - (m+j)K$$

$$K = -\left\{ \frac{2\sqrt{1+z^2} \left( \frac{\zeta}{2\sqrt{1+z^2}} + 1.5 \right)^{2.4026} [-\zeta - (2+\alpha)z - 2(1+x)\sqrt{1+z^2} - \frac{2(2+x+\alpha)z\sqrt{1+z^2}}{\zeta}]}{2\sqrt{1+z^2} \left( \frac{\zeta}{2\sqrt{1+z^2}} + 1.5 \right)^{2.4026}} \right\} +$$

$$(0.01 \times 10^{2.247} \times 1.4026 (1 - 0.01\% SF_{bank})^{-1} (\zeta + 2\sqrt{1+z^2})(\zeta + z)(x+2+\alpha)) / (2\sqrt{1+z^2} \left( \frac{\zeta}{2\sqrt{1+z^2}} + 1.5 \right)^{2.4026}) \quad (23)$$

$$\times (\zeta_m + 2\sqrt{1+z^2})^{\frac{x}{(x+2+\alpha-y)}} \quad (26)$$

$$D_m = (Q\gamma^y / (c_r \tau_c^y))^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}} (K_2 / K_1)^{\frac{y}{(x+2+\alpha-y)}} \times$$

$$\frac{((1 - 0.01\% SF_{bank})^y \zeta_m^{-y})^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}}}{(\zeta_m + z)^{\frac{1}{(y-x-1)/(x+2+\alpha-y)}}} \times$$

$$(\zeta_m + 2\sqrt{1+z^2})^{\frac{x}{(x+2+\alpha-y)}} \quad (27)$$

همچنین از جایگذاری معادله (25) در معادله (16)، رابطه عرض سطح بهینه به صورت زیر حاصل می شود:

$$W_m = \left( \frac{Q\gamma^y}{c_r \tau_c^y} \right)^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}} \left( \frac{K_2}{K_1} \right)^{\frac{y}{(x+2+\alpha-y)}} (\zeta_m + 2z) \times \frac{1}{((1 - 0.01\% SF_{bank})^y \zeta_m^{-y} (\zeta_m + 2\sqrt{1+z^2})^x)^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}}} \quad (28)$$

اینک با جایگذاری  $(P_{bed})_m$  و  $(\bar{\tau}_{bed})_m$  به ترتیب از معادلات (26 و 23) در رابطه  $(\bar{\tau}_{bed} - \tau_c)^j = Q_s = P_{bed} c_s (\bar{\tau}_{bed})^m$  پارامتر  $Q_{smax}$  حاصل می شود:

$$Q_s (= Q_{smax}) = j^j c_s \gamma^{\frac{y}{(x+2+\alpha-y)}} \tau_c^{m+j-\frac{y}{(x+2+\alpha-y)}} (Q/c_r)^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}} \times \left[ \frac{(1 - 0.01\% SF_{bank})^y (\zeta_m + 2\sqrt{1+z^2})^x}{(\zeta_m + z)^{(x+y-1)}} \right]^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}} \times \zeta_m^{\frac{x+2+\alpha-2y}{x+2+\alpha-y}} K^j (K_1)^{m-\frac{y}{(x+2+\alpha-y)}} / K_2^{m+j-\frac{y}{(x+2+\alpha-y)}} \quad (29)$$

در معادلات (25) تا (29)،  $K$ ،  $K_1$  و  $K_2$  از معادله (23) قابل محاسبه می باشند. با توجه به این که در کانال در حال تعادل،  $Q_{smax}$  برابر با  $Q_s$  در نظر گرفته می شود، در حالت شیب متغیر، با معلوم بودن مقدار  $Q_s$ ، از حل همزمان دو معادله (24) و (29) می توان مقادیر فاکتور شکل بهینه  $(\zeta_m)$  و زاویه کناره پایدار کانال  $(\theta)$  را به دست آورد. در واقع در

این رابطه برای رسوبات شنی غیرچسبنده با جاگذاری  $\bar{\tau}_{bank}$  برحسب  $\zeta$  و  $\theta$  از معادله (21) در معادله (10) به صورت رابطه (24) قابل ارائه است:

$$DS \times 0.01\% SF_{bank} [(\zeta + z) \sin \theta / 2] = 0.048(G_s - 1)D_{50bank} \tan \phi' \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi'}} \quad (24)$$

که در آن  $D$ ، از معادله (17) قابل محاسبه می باشد. از حل همزمان معادلات (23) و (24)، مقادیر فاکتور شکل بهینه  $(\zeta_m)$  و زاویه کناره پایدار  $(\theta)$  حاصل می شود و به دنبال آن، از جایگذاری مقادیر  $\zeta_m$  و  $\theta$  در معادلات (17) تا (20) به ترتیب  $D_m$ ،  $(P_{bed})_m$ ،  $V_m$ ،  $(\bar{\tau}_{bed})_m$  و به همین صورت دیگر پارامترهای هندسی مقطع بهینه، قابل محاسبه می باشند (اندیس  $m$  نشان دهنده شرایط بهینه در کانال می باشد). با جایگذاری معادله (23) و مقادیر فاکتور شکل بهینه  $(\zeta_m)$  و زاویه کناره پایدار  $(\theta)$  در معادله (20)، شیب بهینه کانال  $(S_m)$  حاصل می شود:

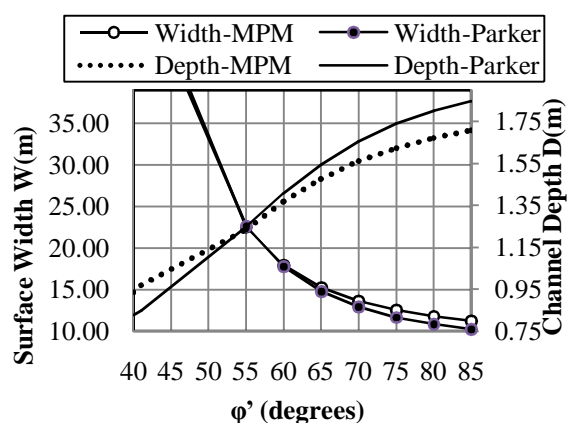
$$S_m = \left( \frac{c_r}{Q} \right) \left( \frac{\tau_c}{\gamma} \right)^{\frac{1}{(x+2+\alpha)}} \left( \frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{(x+2+\alpha)}{(x+2+\alpha-y)}} \times \frac{1}{[(1 - 0.01\% SF_{bank})^{-1} \zeta_m^x]^{\frac{(x+2+\alpha)}{(x+2+\alpha-y)}}} \quad (25)$$

با جایگزین کردن  $S_m$  از معادله (25) در معادلات (17) و (18)، رابطه عرض کف  $(P_{bed})_m$  و عمق  $(D_m)$  در کانال بهینه حاصل می شود (حالت شیب متغیر):

$$(P_{bed})_m = \left( \frac{Q\gamma^y}{c_r \tau_c^y} \right)^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}} (K_2 / K_1)^{\frac{y}{(x+2+\alpha-y)}} \times \frac{((1 - 0.01\% SF_{bank})^y \zeta_m^{x+2+\alpha-2y})^{\frac{1}{(x+2+\alpha-y)}}}{(\zeta_m + z)^{\frac{1}{(y-x-1)/(x+2+\alpha-y)}}}$$

عرض سطح کانال ( $W$ ) و عمق بیشینه ( $D$ )، در شکل 2 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه ایستایی اصلاح‌شده، عرض سطح کاهش و عمق افزایش می‌یابد. بر این اساس می‌توان گفت که با افزایش  $\phi'$  یا به عبارتی افزایش پوشش گیاهی کناره‌ها، مقاومت کناره‌ها افزایش یافته و رسوبات کف نسبت به کناره بیشتر در معرض فرسایش قرار می‌گیرند و لذا پس از مدتی با جدا شدن ذرات رسوبی از بستر، عمق کانال افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با کاهش سرعت جریان در کناره‌ها، رسوب‌گذاری در کناره‌ها افزایش یافته و با گذشت زمان، عرض کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل 2 مشهود است، مقدار زاویه ایستایی اصلاح‌شده، دارای تأثیر به‌سزایی بر هندسه کانال می‌باشد.



شکل 2 اثر زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره بر عرض سطح و عمق کانال

به‌طوری‌که با تغییر  $\phi'$  از 40 درجه تا 60 درجه، بیشترین تغییرات عرض و عمق صورت گرفته و با افزایش  $\phi'$  از 60 درجه تا 90 درجه، از میزان تغییرات عرض و عمق کاسته می‌شود. در حالت کلی آنچه مسلم است این است که معادلات بار بستر مورد استفاده، از عملکرد تقریباً یکسانی نسبت به تغییرات  $\phi'$  برخوردار می‌باشند.

در شکل 3 به ازاء دبی، شیب طولی، اندازه ذرات رسوبی و ضریب زبری معلوم، با فرض چهار مقدار مختلف برای زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره و نیز مدل MSTC محدودنشده، نرخ تغییرات بار بستر محاسباتی از رابطه

این حالت رودخانه، شیب خود را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که بتواند آب و رسوب وارده را منتقل کند.

نکته قابل توجه این است که در شرایطی که در رابطه  $Q_s = P_{bed} c_s \bar{\tau}_{bed}^m (\bar{\tau}_{bed} - \tau_c)^j$  باشد، برای طراحی ابعاد مقطع پایدار،  $\bar{\tau}_{bed}$  برابر  $\tau_c$  و در نتیجه  $Q_s$  برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، در این حالت با فرض برقرار بودن شرایط آستانه حرکت، ابعاد بهینه کانال، توسعه می‌یابد. در این صورت معادله (23) به‌صورت زیر قابل استفاده است:

$$K j = 0 \Rightarrow K = 0 \Rightarrow 0.01 \times 10^{2.247} \times 1.4026 (1 - 0.01\% SF_{bank})^{-1} \times (\zeta_m + 2\sqrt{1+z^2})(\zeta_m + z)(x+2+\alpha) = -2\sqrt{1+z^2} \left( \frac{\zeta_m}{2\sqrt{1+z^2}} + 1.5 \right)^{2.4026} \times [-\zeta_m - (2+\alpha)z - 2(x+1)\sqrt{1+z^2} - 2(x+2+\alpha)(z\sqrt{1+z^2}/\zeta_m)] \quad (30)$$

از طرف دیگر با توجه به معادله (23)، در صورتی که عبارت  $K$  برابر صفر باشد (یعنی برقرار بودن معادله 30)،  $Q_s$  برابر صفر خواهد شد ( $Q_s = 0$ )، که مؤید شرایط آستانه حرکت است. رابطه فوق را در شرایط برقراری پایداری استاتیکی در کانال (شرایطی که جریان می‌تواند با خود رسوب حمل کند ولی قادر به فرسایش مرزهای آبراهه نیست (Knighton, 1998)) می‌توان به‌کار برد.

### 3- آنالیز حساسیت

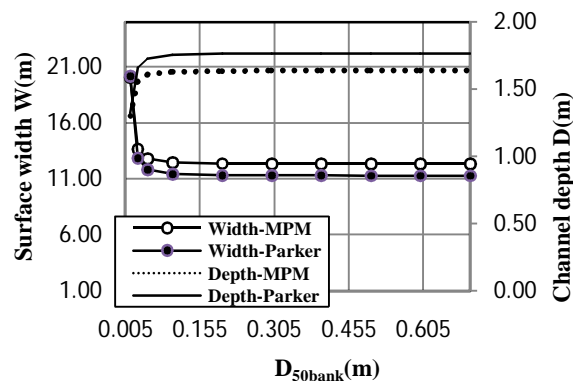
در این بخش، حساسیت مدل نسبت به تعدادی از پارامترهای مؤثر مورد بررسی قرار گرفته است.

#### 3-1- حساسیت مدل نسبت به تغییر زاویه ایستایی

##### اصلاح‌شده رسوبات کناره ( $\phi'$ )

در این قسمت، تأثیر زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره ( $\phi'$ ) روی هندسه رودخانه، با به‌کارگیری معادله مقاومت جریان مانینگ (Manning, 1891) و معادلات بار بستر میپریپتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948) و پارکر (Parker, 1979) بررسی شده است. به جز  $\phi'$ ، سایر متغیرهای ورودی ثابت نگه داشته شده‌اند. نتایج تغییرات

میپریتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948) و پارکر (Parker, 1979)، در شکل 4 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش  $D_{50\text{bank}}$  عرض سطح ( $W$ ) کاهش و عمق ( $D$ ) افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هندسه کانال برای مقادیر کوچک  $D_{50\text{bank}}$  تا حدود 0/05 متر نسبت به تغییرات آن خیلی حساس می‌باشد، ولی به ازاء مقادیر  $D_{50\text{bank}}$  بزرگ‌تر از 0/05 متر، تغییرات  $D_{50\text{bank}}$  تأثیری روی ابعاد کانال نمی‌گذارد. به عبارت دیگر در این حالت، با افزایش  $D_{50\text{bank}}$  بر میزان پایداری کناره‌ها افزوده شده و در نتیجه از میزان افزایش عرض کاسته می‌گردد. همچنین با ادامه فرسایش از کف و پایدار شدن آبراهه و یا رسیدن به بستر مسلح، از میزان افزایش عمق نیز کاسته می‌شود. به‌طور کلی واضح است که تغییرات  $D_{50\text{bank}}$  بیشترین اثر را بر عرض سطح کانال می‌گذارد.

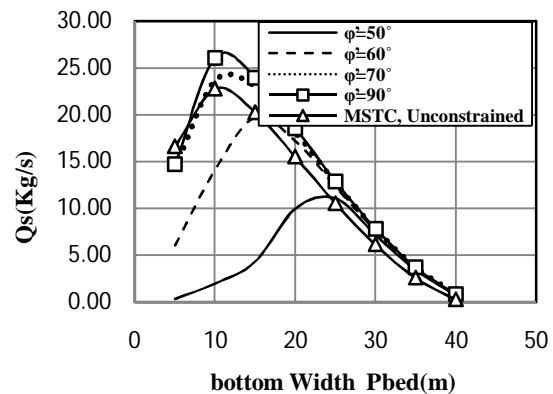


شکل 4 اثر متوسط اندازه رسوبات کناره بر عرض سطح و عمق

#### 4- واسنجی مدل

در تحقیق حاضر، به‌منظور واسنجی مدل، از دو مطالعه موردی به شرح ذیل استفاده شده است: بخش اول: در این قسمت، از داده‌های به‌دست آمده از بازه‌های 62 رودخانه بستر شنی پایدار از کشور انگلستان استفاده شده است. این داده‌ها توسط Hey & Thorne (1986) در شرایط غیر سیلابی جمع‌آوری و توسط Darby (2005) تکمیل شده است. رودخانه‌های موردنظر به‌عنوان کانال‌های تک‌شاخه پایدار با بستر متحرک توصیف شده‌اند. کناره‌ها از نظر چگالی پوشش گیاهی در چهار گروه طبقه‌بندی و مشخص شده‌اند: نوع 1: پوشش علفی بدون هرگونه

میپریتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948)، در مقابل عرض بستر نشان داده شده است.



شکل 3 تغییرات بار رسوبی محاسباتی در مقابل عرض بستر به-ازاء مقادیر مختلف  $\phi'$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره و به عبارتی افزایش پوشش گیاهی و مقاومت کناره‌ها، عرض بستر بهینه کاهش و بیشینه حجم رسوبات انتقالی افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش  $\phi'$  و به عبارتی کاهش پوشش گیاهی در کناره‌ها، احتمال فرسایش در کناره‌های کانال افزایش یافته و در نتیجه عرض بستر بهینه افزایش می‌یابد. با افزایش عرض بستر، دبی در واحد عرض کاهش یافته و این امر به کاهش بار رسوبی منجر می‌شود. نکته مهم دیگری که از شکل 3 قابل استخراج می‌باشد، این است که چنانچه فقط محاسبه عرض بهینه مدنظر باشد، مدل محدودنشده را می‌توان متناظر با مدل با قید پایداری کناره در شرایطی که  $\phi'$  به سمت 90 درجه میل می‌کند، در نظر گرفت. ولی در صورتی که مقدار بار رسوبی هم مدنظر قرار گیرد، مقادیر بار رسوبی بزرگ‌تری توسط مدل MSTC با قید پایداری کناره و  $90^\circ \rightarrow \phi'$ ، در مقایسه با مدل محدودنشده حاصل می‌شود.

#### 3-2- حساسیت مدل نسبت به تغییر متوسط اندازه رسوبات کناره ( $D_{50\text{bank}}$ )

نتایج آنالیز حساسیت تأثیر  $D_{50\text{bank}}$  بر ابعاد هندسه هیدرولیکی کانال با به‌کارگیری معادله مقاومت جریان مانینگ (Manning, 1891) و معادلات انتقال بار بستر



می‌شود، مقدار متوسط  $\phi'$ ، سازگار با نوع پوشش گیاهی افزایش می‌یابد و لذا می‌توان پیشنهاد کرد که اثر پوشش گیاهی روی هندسه کانال‌های آبرفتی با تغییرات زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره، در نظر گرفته شود.

جدول 1 مقادیر  $\phi'$  کالیبره شده به ازای پوشش‌های گیاهی مختلف کناره بر اساس داده‌های Hey & Thorne (1986)

نوع پوشش گیاهی	$\phi'$ (°)		
	کمینه	متوسط	بیشینه
1	28/8	50/3	64/2
2	38/2	53/3	67/6
3	44/4	56/9	75
4	47	63/2	82

#### 4-2- مقایسه نتایج مدل با داده‌های صحرایی

در این قسمت، ابعاد هندسه هیدرولیکی کانال، محاسبه و در برابر ابعاد مشاهداتی ترسیم شده است (شکل 5). نظر به این که مدل ارائه شده براساس فرضیه بهینه‌سازی نرخ انتقال رسوب بیشینه استوار است و از آنجا که بیشتر معادلات بار بستر به صورت آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، نتایج محاسبات آنها دقیقاً بر مقادیر مشاهداتی منطبق نبوده و دارای اختلافاتی با آنها می‌باشد. بنابراین انتخاب معادله بار بستر مناسب در روند محاسبات تأثیر به‌سزایی دارد. به‌منظور انتخاب معادله بار بستر مناسب بر اساس داده‌های Hey & Thorne, (1986) مدل با در نظرگیری پنج معادله بار بستر Meyer-Peter & Muller (1948), Parker (1979), اصلاح شده توسط Huang (2010), DuBoys, (1879) و Van Rijn (1984) اجرا شده است. هدف اصلی از ارائه این بخش ارزیابی و مقایسه ترکیب معادلات مختلف موجود در برآورد ابعاد هندسی رودخانه‌های آبرفتی می‌باشد. لازم به ذکر است که شکل 5 نشان‌دهنده اختلاف هندسه مدل شده رودخانه‌های مورد مطالعه با ابعاد مشاهداتی به ازای معادلات انتقال بار بستر Meyer-Peter & Muller, (1948) و Parker, (1979) می‌باشد (که نسبت به سایر معادلات بار بستر مورد استفاده، با درصد خطای کمتری، ابعاد رودخانه را تخمین زده‌اند) و درصد خطای مدل به ازای سایر ترکیب‌های معادلات مورد استفاده، در جدول 2 ارائه شده

درخت و درختچه، نوع 2: 1 تا 5% پوشش درخت و درختچه، نوع 3: 5 تا 50% پوشش درخت و درختچه، نوع 4: بیش از 50% پوشش درخت و درختچه.

در این تحقیق یک‌بار از  $D_{50bank}$  ارائه شده توسط داربی (Darby, 2005) استفاده شده و بار دیگر  $D_{50bank}$  برابر با  $D_{50}$  لایه رویی بستر در نظر گرفته شده است. لیکن نتایج مدل با به‌کارگیری  $D_{50bank}$  از مجموعه داده‌های داربی (Darby 2005) نتایج ضعیف و غیرقابل قبولی بود، این در حالی است که با فرض  $D_{50bank} = D_{50}$  نتایج بسیار مناسب-تری حاصل شد. این فرض با توسعه یک لایه محافظ درشت-دانه روی کناره کانال بعد از این که رسوبات ریزدانه در جریان فرسایش کناره شسته شده و اندازه رسوبات کناره تقریباً با رسوبات کف برابر می‌شود، سازگار می‌باشد.

#### 4-1- تخمین زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره ( $\phi'$ )

همان‌طور که در بخش آنالیز حساسیت مدل نشان داده شد، مقدار زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره ( $\phi'$ ) یک پارامتر کلیدی کنترل‌کننده پایداری کناره کانال است، مقدار  $\phi'$  به‌صورت قانونمند بسته به تغییرات چگالی پوشش گیاهی تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که در داده‌های Hey & Thorne (1986)، مقدار زاویه ایستایی اصلاح‌شده داده نشده و از مقادیر زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره ( $\phi'$ ) که توسط کرمی (کرمی و مجدزاده طباطبایی، 1388) با به‌کارگیری معادلات انتقال رسوب اینشتین- براون (Einstein, 1950)، تنش برشی فلاینتام و کارلینگ (Flintham & Carling, 1988)، مقاومت جریان لگاریتمی کالبروک- وایت و معادله دارسی- ویسباخ، کالیبره شده، استفاده شده است (کرمی و مجدزاده طباطبایی، 1388). تخمین زاویه ایستایی اصلاح‌شده ( $\phi'$ ) به این صورت انجام شده است که مدل برای هر رودخانه به ازای یک‌سری از مقادیر  $\phi'$  اجرا شده تا زمانی که با پذیرش خطای تقریبی  $\pm 1\%$  حالتی که  $W_{obs}$  (عرض مشاهداتی) با  $W_{pred}$  (عرض محاسباتی) برابر می‌شود، محقق گردد. مقادیر  $\phi'$  محاسباتی میانگین و نیز محدوده تغییرات  $\phi'$  متناسب با هر نوع پوشش گیاهی بر اساس مجموعه داده‌های Hey & Thorne (1986) در جدول 1 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده

1- علت خطای نسبتاً بالاتر محاسبات مقطع پایدار توسط معادله فن راین (Van Rijn, 1984) را به استفاده از تنش برشی بحرانی بی‌بعد از منحنی شیلدز (Yang, 1996) می‌توان مرتبط دانست. این مقادیر تنش برشی بحرانی بی‌بعد از بررسی شروع حرکت ذرات یکنواخت در شرایط آزمایشگاهی حاصل شده است، این در حالی است که به-کارگیری مقدار  $\tau_c^* = 0.03$  که توسط Parker (1979) با تحلیل شروع حرکت رسوبات شنی غیریکنواخت از اندازه-گیری‌های انتقال بار بستر در رودخانه‌های شنی ارائه شده و نیز مقدار  $\tau_c^* = 0.047$  که توسط میسرپیتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948) به‌عنوان آستانه حرکت رسوبات شنی غیریکنواخت پیشنهاد شده، در رودخانه‌های شنی مورد مطالعه منطقی‌تر به‌نظر می‌رسد.

است. لازم به ذکر است که نتایج مدل تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار لینگو نیز کنترل شده و از تطابق مناسبی برخوردار بوده است (شکل 5).

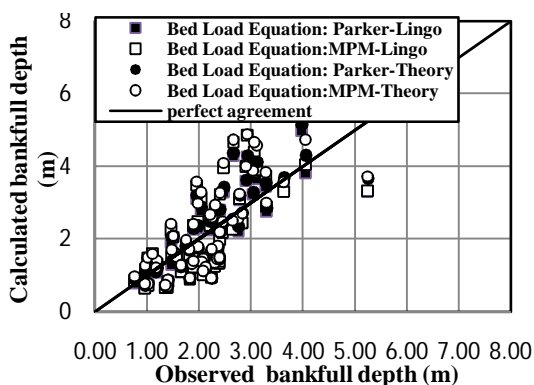
از بررسی نتایج ارائه شده در جدول 2 نکات مهم زیر قابل استخراج است:

1- با توجه به جدول 2 به نظر می‌رسد که معادله انتقال بار بستر Parker, (1979) نسبت به سایر معادلات به‌کار گرفته شده، با درصد خطای کمتر و دقت بالاتری قادر به پیش-بینی هندسه رودخانه‌های آبرفتی انگلستان می‌باشد و علت آن را می‌توان مرتبط با این امر دانست که این معادله از 278 داده صحرائی و آزمایشگاهی با در نظر گرفتن آستانه حرکت برای رسوبات کناره در حالت تعادل، توسعه یافته است و لذا در مدل MSTC با قید پایداری کناره، ابعاد هندسی مقطع پایدار را با دقت مناسب‌تری تخمین می‌زند.

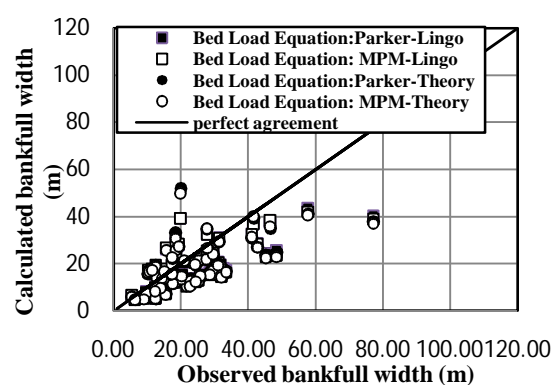
جدول 2 درصد خطای نسبی متوسط محاسبات مدل تحلیلی

مساحت	عمق مقطع پر	عرض مقطع پر	متغیر مورد بررسی	معادله بار بستر
(8/01)	4	(15)		میسر پیتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948)
(7/97)	4/49	(14/71)	درصد خطای نسبی متوسط	میسر پیتر و مولر اصلاح شده (Huang, 2010)
(8/09)	10/67	(14/88)		دوبوی (DuBoys, 1879)
(7/97)	12/25	(14/18)		وان راین (Van Rijn, 1984)
(7/36)	(3/12)	(13/04)		پارکر (Parker, 1979)

علامت ( ) نشان‌دهنده مقادیر منفی (تخمین کمتر از مقادیر مشاهداتی) می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل 5 مقایسه عرض و عمق مقطع پر محاسباتی و مشاهداتی در 62 بازه مطالعاتی در انگلستان (مرجع داده‌ها: Hey & Thorne, 1986)

## 3-4- اثر پوشش گیاهی کناره

هدف از این بخش بررسی اثر پوشش گیاهی در تخمین عرض مقطع پایدار و نیز مقایسه نتایج مدل MSTC محدود شده و مدل MSTC محدود نشده می باشد. عرض های پیش بینی شده با به کارگیری معادله مقاومت جریان مانینگ (Manning, 1891) و معادله انتقال بار بستر پارکر (Parker, 1979) به ازای مدل MSTC محدود نشده (با در نظر گرفتن زاویه کناره 45 درجه (Eaton & Millar, 2004) و مدل MSTC با قید پایداری کناره در مقابل عرض های مشاهداتی برای رودخانه های بستر شنی با در نظر گرفتن دو دسته کانال با پوشش گیاهی پراکنده در کناره ها (پوشش گیاهی نوع 1 و 2) و پوشش گیاهی متراکم در کناره ها (پوشش گیاهی نوع 3 و 4) در شکل 6، ترسیم شده است. مطابق شکل 6- الف، برای کانال هایی که عرض مشاهداتی در آنها کم تر از 30 متر می باشد، داده ها به خوبی از هم مجزا شده اند، به طوری که پوشش گیاهی نوع 3 و 4 به خط توافق نزدیک تر و نوع 1 و 2 از آن دورترند. این طبقه بندی برای کانال های بزرگ تر، واضح و مشخص نمی باشد. به عبارتی زمانی که عرض رودخانه افزایش می یابد، تأثیر پوشش گیاهی روی مقاومت کناره کاهش یافته و پیش بینی مقادیر عرض کانال توسط مدل با خطای بیشتری همراه خواهد بود. هم چنین با توجه به جدول 3، مشاهده می شود که در مدل MSTC بدون قید پایداری کناره، عرض های مشاهداتی ( $W_{obs}$ ) غالباً از عرض های محاسباتی ( $W_{pred}$ ) توسط مدل بزرگ ترند. نسبت  $W_{pred}/W_{obs}$  در مدل MSTC محدود نشده از مقدار 0/45 برای پوشش گیاهی نوع 1، تا 0/75 برای پوشش گیاهی نوع 4 تغییر می کند و با افزایش چگالی پوشش

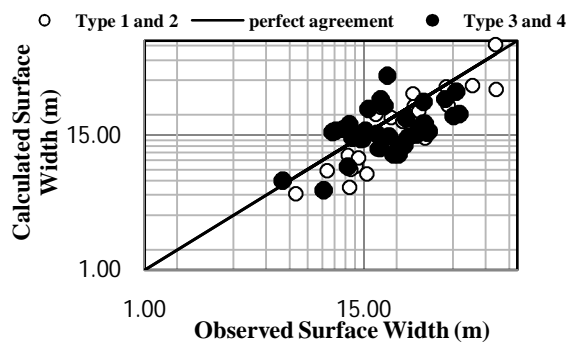
گیاهی، اختلاف بین عرض های مشاهداتی و عرض های محاسباتی کم تر می شود. به عبارت دیگر با توجه به این که از پوشش گیاهی نوع 1 تا نوع 4 (با افزایش چگالی پوشش گیاهی)، مقاومت کناره ها افزایش یافته و به فرض فرسایش - ناپذیر بودن کناره ها در مدل MSTC محدود نشده نزدیک تر می شوند، در پوشش های نوع 3 و 4، مقادیر عرض های مدل شده کانال به عرض های مشاهداتی نزدیک تر خواهد بود.

هم چنین با توجه به جدول 3 و شکل 6 واضح است که با اعمال قید پایداری کناره و پوشش گیاهی در مدل، علاوه بر این که پراکندگی نقاط حول خط بهترین توافق، بهبود می یابد، نسبت  $W_{pred}/W_{obs}$  نیز به ازای تمامی انواع پوشش گیاهی کناره به 1 نزدیک تر شده و دقت مدل در تخمین عرض پایدار افزایش می یابد. این امر نشان دهنده اهمیت تأثیر پوشش گیاهی و پایداری کناره ها در برآورد عرض کانال توسط مدل پیشنهادی می باشد.

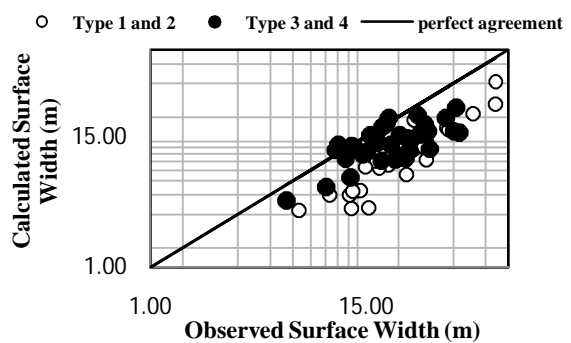
بخش دوم: در این قسمت، از داده های به دست آمده از بازه های چهار رودخانه از کشور ایران (استان خوزستان) استفاده شده است. این داده ها توسط جوهری (جوهری و مجدزاده طباطبایی، 1392) جمع آوری شده و این رودخانه ها نیز به عنوان کانال های پایدار با بستر شنی متحرک توصیف شده اند. ایستگاه های مورد مطالعه در قسمت شمالی و شرقی خوزستان قرار گرفته که مناطقی کوهستانی، در حاشیه رشته کوه زاگرس می باشند. مشخصات و اطلاعات اندازه گیری شده موجود در هر ایستگاه هیدرومتری توسط سازمان آب و برق خوزستان عمدتاً شامل برداشت مقطع عرضی به صورت سالانه، شیب آبراهه و ضریب زبری مانینگ می باشد.

جدول 3 مقایسه نسبت عرض های محاسباتی به عرض های مشاهداتی به ازای پوشش های گیاهی مختلف در کناره

نوع پوشش گیاهی (1)	مشاهداتی		مدل بدون قید پایداری کناره		مدل با در نظر گرفتن قید پایداری کناره	
	$W_{observed}$ (m) (2)	$W_{Predicted}$ (m) (3)	$W_{Pred}/W_{obs}$ (4)	$\phi'$ (degrees) (5)	$W_{Predicted}$ (m) (6)	$W_{Pred}/W_{obs}^*$ (7)
1	32/3	14/4	0/45	50/3	25/8	0/77
2	22/4	11/5	0/54	53/3	17/2	0/79
3	27/0	16/5	0/64	56/9	21/9	0/92
4	20/2	14/0	0/75	63/2	17/4	0/97



(ب) مدل با قید پایداری کناره



(الف) مدل بدون قید پایداری کناره (محدود نشده)

شکل 6 عرض‌های پیش‌بینی شده در مقابل عرض‌های مشاهداتی (مرجع داده‌ها (Hey & Thorne (1986).

جدول 4 مقادیر  $\phi'$  کالیبره شده براساس داده‌های ایران (جوهری و مجدزاده طباطبایی، 1392)

نام رودخانه	نام ایستگاه	$\phi'$ (°)	نوع پوشش گیاهی تخمین زده شده
کارون	سوسن	61/5	4
آب شیرین	خیرآباد	59/8	3
مارون	چمن‌نظام	65/6	4
زال	پل زال	47/9	1

در مرحله بعد مدل با استفاده از معادله مقاومت جریان مانینگ (Manning, 1891) و ترکیب آن با معادلات انتقال بار بستر میسر-پیتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948)، پارکر (Parker, 1979) و میسر-پیتر و مولر اصلاح شده توسط هوانگ (Huang, 2010) و نیز به‌کارگیری مقادیر  $\phi'$  متوسط متناظر با هر نوع پوشش گیاهی براساس جدول 1 و سایر داده‌های ورودی، یکبار با در نظر گرفتن قید پایداری کناره و بار دیگر بدون در نظرگیری قید پایداری کناره به خدمت گرفته شده و درصد خطای مدل در تخمین عرض مقطع پر و عمق متوسط در جدول 5 ارائه شده است. بررسی نتایج به وضوح بهبود عملکرد مدل محدود شده نسبت به مدل محدود نشده را در تخمین ابعاد بهینه کانال در بازه‌های مطالعاتی در خوزستان نشان می‌دهد و نیز گویای آن است که معادله بار بستر میسر-پیتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948) نسبت به سایر معادلات بار بستر مورد استفاده در بازه‌های مطالعاتی در خوزستان از عملکرد بهتری برخوردار بوده است.

متوسط اندازه رسوبات بستر و دبی مقطع پر توسط جوهری (جوهری و مجدزاده طباطبایی، 1392) تعیین شده است. لازم به ذکر است که زاویه کناره ( $\theta$ ) در داده‌های مرجع وجود نداشته و با استفاده از نرم‌افزار اتوکلد و داشتن شکل مقاطع عرضی در دو کناره رودخانه در هر ایستگاه تعیین شده و متوسط آن به‌عنوان داده ورودی به مدل محدود نشده در نظر گرفته شده است. همچنین از آنجا که در مجموعه داده‌های مورد بررسی، بار بستر ( $Q_s$ ) مستقیماً اندازه‌گیری نشده، به‌منظور واسنجی، از مدل در حالت شیب ثابت استفاده شده است. هدف از این بخش بررسی کارایی مدل ارائه شده در رودخانه‌های متفاوت از رودخانه‌هایی است که پارامتر  $\phi'$  مستقیماً با در نظرگیری پوشش گیاهی کناره در آنها کالیبره شده است.

از این روش ارائه شده در بخش (4-1) برای تخمین زاویه  $\phi'$  با به‌کارگیری مدل توسعه یافته در این تحقیق به‌ازاء ترکیب معادلات مانینگ (Manning, 1891) و پارکر (Parker, 1979) مورد استفاده قرار گرفته، مقادیر  $\phi'$  کالیبره شده در چهار بازه مورد مطالعه در ایران محاسبه و در جدول 4 ارائه شده است. سپس با توجه به اینکه مقادیر  $\phi'$  حاصل در چه محدوده‌ای از زاویه ایستائی اصلاح شده کناره‌ها (جدول 1) قرار می‌گیرد و اختلاف آن با  $\phi'$  متوسط تعریف شده در چه نوع پوشش گیاهی کمتر است، نوع پوشش گیاهی کناره تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر بدست آمده برای  $\phi'$ ها با توجه به موقعیت بازه‌های مطالعاتی و بازدیدهای صحرائی صورت گرفته منطقی بنظر می‌رسد.

جدول 5 متوسط درصد خطای نسبی محاسبات مدل

مدل بدون قید پایداری کناره		مدل با قید پایداری کناره		معادله انتقال بار بستر
عرض مقطع پر (%)	عمق متوسط (%)	عرض مقطع پر (%)	عمق متوسط (%)	
23/65	(25/57)	(6/79)	3/12	مییر-پیتر و مولر (Meyer-Peter & Muller, 1948)
28/72	(29/13)	(7/62)	4/95	مییر-پیتر و مولر اصلاح شده (Huang, 2010)
29/57	(29/37)	(8/70)	6/98	پارکر (Parker, 1979)

علامت ( ) نشان‌دهنده مقادیر منفی (تخمین کمتر از مقادیر مشاهداتی) می‌باشد.

### 5- نتیجه‌گیری

کناره‌ها) باشد. لذا با استناد بر نتایج تحلیلی بدست آمده، با افزایش  $\phi'$  بر مقاومت کناره‌ها افزوده شده و به عبارت دیگر سواحل رودخانه در مقابل فرسایش کناره‌ها مقاوم‌تر می‌شوند که نتایج حاصل از مدل عددی محمد تقی دستورانی و فاطمه رجبی محمدی (دستورانی و رجبی محمدی، 1391) نیز مؤید این امر است.

- تحلیل نتایج حاکی از آن است که عرض‌های پیش‌بینی شده کانال با استفاده از مدل MSTC محدود نشده فقط در کانال‌های آبرفتی با مرزهای بسیار مقاوم و کناره‌های فرسایش‌ناپذیر معتبر می‌باشد و لذا شرایط کناره‌های فرسایش‌پذیر و یا فاقد پوشش گیاهی کناره براساس مدل مذکور، نتایج مطلوبی به همراه ندارد. همان‌طور که در جدولهای 3 و 5 مشهود است، لحاظ کردن پایداری کناره در مدل فوق، تا حد قابل قبولی دقت تخمین ابعاد پایدار کانال را افزایش می‌دهد.

### 6- فهرست علائم

$A$	مساحت مقطع عرضی
$c_r$	ضریب زبری در رابطه مقاومت جریان
$c_s$	ضریب ثابت مربوط به مشخصات ذرات رسوبی
$D$	عمق بیشینه جریان
$D_{50bank}$	قطر متوسط رسوبات کناره
$D_{50}, D_{50bed}$	قطر متوسط رسوبات بستر
$G_s$	چگالی مخصوص رسوبات کناره (معادل 2/65)
$j$	توان
$K$	ضریب
$K_2, K_1$	ضرایب
$m$	توان
$P$	محیط ترشده
$P_{bank}$	محیط کناره‌ها
$P_{bed}$	محیط بستر
$Q$	دبی جریان
$Q_s$	دبی بار بستر
$q_s$	دبی بار بستر در واحد عرض کانال
$Q_{smax}$	بیشترین ظرفیت انتقال رسوب
$R$	شعاع هیدرولیکی کانال
$S$	شیب طولی کانال
$SF_{total}$	نیروی برشی وارد بر کل محیط ترشده
$S_m, (P_{bed})_m$	شیب طولی، محیط بستر، عمق، سرعت

- مدل پیشنهادی از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است، به‌طوری که در آن امکان استفاده از معادلات مقاومت جریان و معادلات بار بستر مختلف وجود دارد که با استفاده از داده‌های موجود برای هر مسأله خاص، می‌توان کارایی این ترکیب را افزایش داد.

- مدل پیشنهادی را می‌توان در تحقیقات صحرایی برای کالیبره کردن پارامترهای پایداری کناره (مانند  $\phi'$ ) که اندازه‌گیری آنها دشوار است، به‌کار برد.

- یکی از عوامل ایجاد خطا در پیش‌بینی هندسه مقطع پایدار، به‌کارگیری زاویه ایستایی اصلاح‌شده رسوبات کناره‌ای ( $\phi'$ ) است که توسط کرمی (کرمی و مجدزاده طباطبایی، 1388) کالیبره شده است و در این شرایط تعیین مشخصات هندسه مقطع پایدار با درصدی از خطا همراه خواهد بود.

- در تحقیق حاضر اثر پوشش گیاهی در افزایش مقاومت کناره‌ها در قالب کاهش سرعت جریان در نزدیکی کناره و پیوند و اتصال رسوبات به‌وسیله ریشه گیاهان تأیید می‌شود. به عبارت دیگر پارامتر  $\phi'$  می‌تواند منعکس‌کننده عامل پایداری کناره (پوشش گیاهی و یا چسبندگی خاک

- دوره 43، شماره 1، ص.ص. 105 - 115.
- ASCE Task Committee on Hydraulics, (1998), "Bank mechanics and modeling of river width adjustment, 1: processes and mechanisms". J. Hydraul. Eng. ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 881-902.
- Chadwick, A. J. and Morfett, J. C., (1995), *Hydraulics in civil and environmental engineering*. Chapman & Hall.
- Darby, S. E., (2005), "Refined hydraulic geometry data for british gravel-bed rivers", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 1, pp. 60-64.
- DuBoys, P., (1879), Le Rhone et les rivieres a lit affouillable, Annales des Ponts et Chaussees, Vol. 18, pp. 141-195.
- Eaton, B. C. and Millar, R. G., (2004), "Optimal alluvial channel width under a bank stability constraint", Geomorphology, No. 62, pp. 35-45.
- Eaton, B. C., Church, M., and Millar, R. G., (2004), "Rational regime model of alluvial channel morphology and response", Earth Surf. Processes Landforms, Vol. 29, pp. 511 - 529.
- Einstein, H. A., (1950), "The Bed-load function for sediment transportation in open channel flows", U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin no. 1026.
- Flintham, T.P. and Carling, P.A., (1988), "The prediction of mean bed and wall boundary shear in uniform and compositely rough channels", in White, W. P. (Editor): River Regime, John Wiley and Sons, pp. 267- 287.
- Henderson, F. M., (1966), *Open Channel Flow*, Macmillan Pub. Co., New York. 522.
- Hey, R. D. and Thorne, C. R., (1986), "Stable channels with mobile gravel beds", Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 8, 671-689.
- Huang, H. Q., (2010), "Reformulation of the bed load equation of Meyer-Peter and Müller in light of the linearity theory for alluvial channel flow", Water Resources Research, Vol. 46, No. 9, pp. 1-11.
- 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, Vol. 25, pp. 1-16.
- Kirkby, M. J., (1977), "Maximum sediment efficiency as a criterion for alluvial channels. In River Channel Changes", Gregory KJ (ed.).Wiley: Chichester; pp. 429-442.
- Knight, D. W., (1981), Boundry shear in smooth and متوسط و عرض سطح در مقطع بهینه  $D_m, V_m, W_m$
- به ترتیب نیروی برشی بستر و کناره ها در  $SF_{bed}, SF_{bank}$
- واحد طول کانال  $SF_{total}$
- درصد نیروی برشی قابل تحمل به وسیله کناره ها  $\%$
- سرعت متوسط جریان  $V$
- عرض سطح مشاهداتی جریان در مقطع پر  $W_{obs}$
- عرض سطح محاسباتی جریان در مقطع پر  $W_{pred}$
- عرض سطح کانال  $W$
- توان ها  $x, y, \alpha$
- شیب کناره کانال  $z$
- وزن مخصوص آب (معادل  $9810 \text{ N/m}^3$ )  $\gamma$
- زاویه شیب کناره نسبت به افق  $\theta$
- فاکتور شکل بی بعد کانال  $\zeta$
- تنش برشی بحرانی بستر  $\tau_c$
- تنش برشی متوسط کناره  $\bar{\tau}_{bank}$
- تنش برشی بحرانی بی بعد بستر  $\tau_c^*$
- تنش برشی مرزی متوسط  $\bar{\tau}$
- تنش برشی بی بعد جریان  $\tau_0^*$
- تنش برشی متوسط بستر  $\bar{\tau}_{bed}$
- پارامتر شیلدز بحرانی برای رسوبات کناره  $\tau_{cb}^*$
- زاویه ایستایی رسوبات کناره  $\phi$
- زاویه ایستایی اصلاح شده رسوبات کناره  $\phi'$

## 7- منابع

- جوهری، ر. و مجدزاده طباطبایی، م. ر؛ (1392). مطالعه صحرایی تغییرات مکانی ضریب مسلح شدگی و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.
- دستورانی، م. ت. و رجبی محمدی، ف. (1391). "تعیین اثرات مکانیکی و هیدرولوژیکی گیاهان کنار رودخانه بر پایداری کناره رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه حنا)"، سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی.
- کرمی، م. و مجدزاده طباطبایی، م. ر. (1388). "توسعه مدل تحلیلی اثر پوشش گیاهی در تعیین هندسه پایدار رودخانه های شنی"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی،

- Meyer-Peter, E. and Muller, R., (1948), "Formulas for bed load transport", In Proceedings of the 3rd Meeting of IAHR Stockholm, pp. 39-46.
- Parker, G., (1979), "Hydraulic geometry of active gravel rivers", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 105, pp. 1185-1201.
- Pickup, G., (1976), "Adjustment of stream channel shape to hydrologic regime". Journal of Hydrology, Vol. 30, pp. 365-373.
- Van Rijn, L. C., (1984), Sediment transport, part I-bed load transport. Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 10, pp.1431-1456.
- Yang, C. T., (1971a), "Potential energy and stream morphology", Water Resources Research Vol. 7, pp. 311-322.
- Yang, C. T., (1996), *Sediment transport: theory and practice*, McGraw-Hill.
- rough channel, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, No. 7, pp.839-851.
- Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Hamed, M. E., (1984), "Boundary shear in smooth rectangular channels, Journal of the Hydraulic Engineering", ASCE, Vol. 101, No. 4, pp. 405-422.
- Knighton, A. D., (1998), *Fluvial Forms and Processes*, Edward Arnold: London.
- Lacey, G., (1958), "Flow in alluvial channels with sandy mobile beds", Proceedings of the Institute of Civil Engineers, London, 9, Discussion, Vol. 11, pp. 145-164.
- Lane, E. W., (1955b), "The design of stable channels", Trans, ASCE, Vol. 120, No. 2776, pp. 1234-1279.
- Leopold, L. B. and Langbein, W. B., (1962), "The concept of entropy in landscape evolution". U. S. Geol. Survey, Prof. paper 500-A.
- Manning, R., (1891), "On the flow of water in open channels and pipes", Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland, Vol. 20, pp. 161-207.