

## تعیین هندسه هیدرولیکی پایدار رودخانه‌های شنی با کناره‌های چسبنده

مریم کرمی<sup>۱</sup> و محمدرضا مجدزاده طباطبایی<sup>۲</sup>

۱- نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد عمران مهندسی رودخانه maryam\_4960@yahoo.com

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۱۰

### چکیده

در این تحقیق، یک مدل تحلیلی توسعه داده شده است که با فرض منطبق بودن عرض پایدار بر شرط بهینه‌سازی انتقال رسوب حداکثر، اثر پایداری کناره را در محاسبه عرض و عمق پایدار رودخانه‌های شنی با کناره های چسبنده، محاسبه می‌کند. پایداری کناره‌های کانال از دو منظر فرسایش رودخانه‌ای و گسیختگی توده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارتی تنش برشی کناره و نیز ارتفاع کناره دو پارامتر اساسی در جریان توسعه مدل می‌باشند. تنش برشی بحرانی کناره از واسنجی مدل با استفاده از داده‌های واقعی تخمین زده شده و گسیختگی توده‌ای نیز با استفاده از روش تنش نهایی محاسبه شده است. بر اساس تحلیل داده‌های واقعی، اثر پوشش گیاهی بر پایداری کناره در مقدار تنش برشی بحرانی کناره مؤثر می‌باشد. به طوری که مقدار متوسط تنش برشی بحرانی کناره برای رودخانه‌های پوشیده شده با پوشش گیاهی متراکم، تقریباً سه برابر مقدار آن برای رودخانه‌هایی است که پوشش گیاهی آن‌ها ضعیف می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: هندسه هیدرولیکی، مقطع پایدار، عرض بهینه، پوشش گیاهی، رودخانه شنی.

## Determination of Stable Hydraulic Geometry of Gravel Bed Rivers with Cohesive Banks

M. Karami<sup>1</sup> and M. R. Majdzadeh Tabatabai<sup>2</sup>

1- Expert of River Engineering of Rivers and Coastal Engineering Bureau

2-Assistant Professor, Water Engineering Department, Power and Water University of Technology.

Received: 29.Feb.2012

Accepted: 2.March.2013

### Abstract

In this research, an analytical model is developed to determine the influence of the bank stability on the stable width and depth of alluvial gravel-bed rivers with cohesive banks. The formulation of the model is based on the assumption that the stable width corresponds with an optimum condition that is equivalent to the maximum bed load transporting capacity. The optimum condition develops when the channel banks are at their limiting stability with respect to either mass failure or fluvial erosion. Two basic channel types are identified: bank-height and bank shear constrained. A method for estimating the critical bank shear stress based on model calibration is proposed. Analysis of field data indicates that the effect of the bank vegetation on bank stability can be expressed in terms of the critical bank shear stress. The average critical bank shear stress value calculated for river banks covered by vegetation with well-developed root networks was found to be approximately three times that obtained from rivers with weakly vegetated banks.

**Key words:** Hydraulic geometry, Stable section, Optimum width, Vegetation coverage, Gravel bed river.

## مقدمه

هندسه هیدرولیکی پایدار رودخانه آبرفتی در پاسخ به دبی جریان و بار رسوبی ورودی توسعه پیدا می‌کند. به عبارتی کانال رودخانه در راستای رسیدن به تعادل دینامیک، شیب، عرض، عمق و زبری خود را به نحوی تنظیم می‌کند که با دبی جریان و بار رسوبی ورودی سازگار شود.

تحقیقات و بررسی‌های انجام شده در سال‌های اخیر بیانگر تأثیر شرایط پایداری کناره در پیش بینی هندسه پایدار رودخانه‌های آبرفتی می‌باشد به طوری که رودخانه‌های با کناره‌های فرسایش‌پذیر، نسبت به رودخانه‌های با کناره‌های مقاوم عریض و کم عمق می‌باشند.

روش‌هایی که به صورت منطقی اثر تغییرات پایداری کناره‌ها بر هندسه پایدار کانال را محاسبه می‌کنند، محدود بوده و در مورد رودخانه‌های شنی بیشتر آن‌ها جنس مصالح کناره رودخانه را مشابه بستر و غیر چسبنده در نظر گرفته‌اند (۳، ۴، ۶ و ۱۱). در مورد رودخانه‌های شنی با کناره‌های چسبنده می‌توان به مدل‌های داربی و تورن<sup>۱</sup> (۱۰) و میلار و کوئیک<sup>۲</sup> (۱۶) اشاره نمود.

به طور کلی مکانیسم‌های اصلی فرسایش که روی کناره‌های چسبنده رودخانه‌ها اثر می‌گذارند، می‌توانند در قالب دو فرآیند مورد توجه قرار بگیرند: گسیختگی توده‌ای و فرسایش کناره‌های رودخانه به دلیل عبور از شرایط آستانه (۱۵). در صورتی که ارتفاع کناره عامل کنترل‌کننده باشد، کناره رودخانه‌ها بیشتر در خطر گسیختگی توده‌ای قرار دارد، درحالی که در محدودیت تنش برشی کناره، پایداری کناره رودخانه به وسیله روابط فرسایشی کنترل می‌شود. در اینجا از فرآیندهای تکمیلی و پایه همچون فرسایش زیرسطحی خاک (۲۰ و ۲۱) برای گسیختگی توده‌ای و تورم خاک در اثر یخبندان و ترک‌های خشک (۱۵) که می‌توانند فرسایش رودخانه را تحت تأثیر قرار دهند، صرف نظر شده است.

فرق اساسی کناره رودخانه با سایر عوارض شیبدار این است که کناره رودخانه به صورت دوره‌ای تحت اثر جریان سیل اشباع می‌شود. گسیختگی کناره معمولاً در خلال فروکش سطح آب و کاهش مقاومت کناره به واسطه افزایش وزن واحد خاک اتفاق می‌افتد (۱۰).

برای تحلیل گسیختگی توده‌ای می‌توان از هر دو روش تنش کل و تنش مؤثر استفاده نمود. تحلیل‌های تنش کل بر اساس مقاومت برشی زهکشی نشده قرار دارند. اختلاف بین شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده در شکل (۱) نشان داده شده است. اگر افت سطح آزاد آب نسبت به برقراری جریان آب زیرزمینی در کناره کانال به اندازه کافی سریع باشد شرایط در طول سطح گسیختگی اولیه در کناره اساساً زهکشی نشده خواهد بود و در

هر حال پایداری کناره زهکشی نشده، بدترین شرایط ممکن را ایجاد می‌کند.

برای یک سطح شیبدار به ارتفاع  $H$  ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی توده‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود (نسبت ارتفاع بحرانی به ارتفاع موجود شیب):

$$FS_H = \frac{H_{crit}}{H} = \frac{N_s c_u}{H \gamma_t} \quad (۱)$$

$FS_H$ : ضریب اطمینان در برابر گسیختگی توده‌ای

$H$ : ارتفاع قائم کناره ( $m$ )

$H_{crit}$ : ارتفاع پایدار و بحرانی حداکثر کناره ( $m$ )

$\gamma_t$ : وزن مخصوص اشباع خاک ( $kN/m^3$ )

$c_u$ : چسبندگی خاک متناظر با تنش کل یعنی شرایط بدون زهکشی ( $kpa$ )

$N_s$ : عدد پایداری بدون بعد (این عدد با استفاده از منحنی‌های پایداری کناره محاسبه می‌شود)

در  $FS_H = 1$  کناره‌ها در آستانه پایداری قرار دارند و در  $FS_H > 1$  ناپایدارند.

در محدوده  $90^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ ، می‌توان  $N_s$  را از رابطه زیر تخمین زد (۱۸):

$$N_s = 3.83 + 0.052(90 - \theta) - 0.0001(90 - \theta)^2 \quad (۲)$$

$N_s$ : عدد پایداری بدون بعد

$\theta$ : زاویه کناره ( $^\circ$ )

برای هر ترکیب  $H$ ،  $\theta$ ،  $\gamma_t$  و  $c_u$ ،  $FS_H$  را می‌توان از دو رابطه (۱) و (۲) محاسبه نمود.

عامل تعیین‌کننده پایداری کناره کانال در مقابل فرسایش رودخانه‌ای را می‌توان ضریب اطمینان مربوط به تنش برشی کناره عنوان نمود ( $FS_\tau$ ) که عبارت است از:

$$FS_\tau = \frac{\tau_{crit}}{\tau_{bank}} \quad (۳)$$

$\tau_{bank}$ : تنش برشی متوسط رسوبات کناره ( $kpa$ )

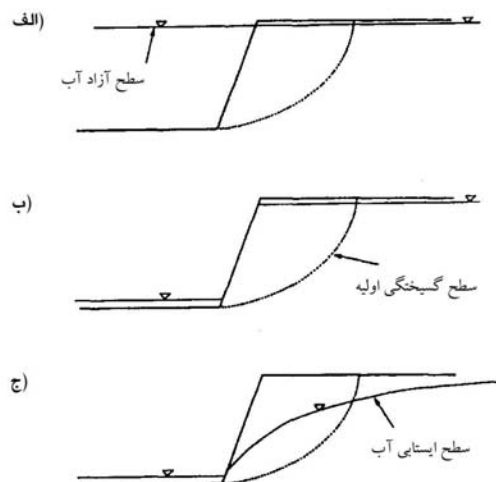
$\tau_{crit}$ : تنش برشی بحرانی رسوبات کناره ( $kpa$ )

می‌توان گفت در  $FS_\tau = 1$  کناره‌ها در آستانه پایداری قرار دارند و در  $FS_\tau < 1$  ناپایدارند. در عمل اندازه‌گیری مستقیم

$\tau_{crit}$  بسیار مشکل می‌باشد و مقدار آن ممکن است با گذشت

1-Darby and Thorne

2-Millar and Quick



شکل ۱- بیان شماتیک شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده. (الف) - کناره در حالت مقطع پر کاملاً در آب غوطه‌ور شده است. ب- شرایط زهکشی نشده به دنبال افت سریع سطح آب. ج - شرایط زهکشی شده (برقراری جریان آب زیر زمینی به داخل رودخانه).

تابع هدف یا فرضیه بهینه‌سازی در اینجا ظرفیت انتقال رسوب حداکثر می‌باشد (۲۱) که مطابق آن برای یک شیب مشخص کانال هندسه خود را به نحوی تنظیم می‌کند که ظرفیت انتقال رسوب حداکثر باشد. همچنین برای محاسبه ظرفیت انتقال رسوب در واحد عرض بستر از رابطه اینشتین-براون استفاده شده است (۱۲).

برای محاسبه ظرفیت انتقال رسوب بستر و نیز پایداری کناره، مقادیر متوسط تنش برشی بستر و کناره مورد نیاز می‌باشد. سهم کناره‌ها از نیروی برشی کل ( $SF_{bank}$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید (۱۳):

$$SF_{bank} = \frac{\tau_{bank} P_{bank}}{\tau.P} \quad (4)$$

$\tau$ : تنش برشی متوسط (kpa)

$\tau_{bank}$ : تنش برشی کناره (kpa)

$P$ : کل محیط تر شده (m)

$P_{bank}$ : محیط تر شده کناره (m)

و در نهایت مقادیر تنش برشی بستر و کناره از روابط زیر به دست خواهند آمد:

$$\frac{\tau_{bank}}{\gamma.Y.S} = SF_{bank} \frac{(W + P_{bed}) \sin \theta}{4Y} \quad (5)$$

$$\frac{\tau_{bed}}{\gamma.Y.S} = (1 - SF_{bank}) \frac{W}{2P_{bed}} + 0.5 \quad (6)$$

زمان ضمن خشک شدن ترک‌ها و نیز فرآیندهای یخ بستن و ذوب شدن متوالی تغییر کند (۱۵).

اندازه‌گیری مستقیم  $\tau_{crit}$  با استفاده از روش استوانه دوار انجام می‌شود (۹ و ۱۷)، که البته در آزمایشگاه نمی‌توان شرایط واقعی را فراهم نمود. یک روش غیر مستقیم برای تخمین  $\tau_{crit}$  واسنجی مدل با استفاده از ابعاد هندسه مشاهداتی کانال می‌باشد. هدف اصلی از تحقیق حاضر کمی نمودن اثر پایداری کناره در محاسبه عرض و عمق پایدار رودخانه‌های شنی با کناره‌های چسبنده می‌باشد. در این راستا مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده برای رودخانه‌های شنی با کناره‌های غیر چسبنده (۳) با در نظر گرفتن شرایط پایداری کناره‌های چسبنده بازنویسی شده است.

#### مشخصات مدل

در مدل توسعه داده شده متغیرهای مستقل با مقادیر مشخص شامل دبی مقطع پر ( $Q_{bf}$ )، شیب کانال (S)، قطر متوسط رسوبات بستر ( $D_{50}$ )، زبری کانال ( $k_s$ )، چسبندگی زهکشی نشده کناره ( $C_u$ )، وزن مخصوص اشباع مواد کناره ( $\gamma_t$ ) و تنش برشی بحرانی خاک کناره ( $\tau_{crit}$ ) می‌شوند و خروجی مدل متغیرهای وابسته شامل: محیط بستر ( $P_{bed}$ )، محیط کناره ( $P_{bank}$ ) و زاویه کناره ( $\theta$ ) می‌باشند. از این متغیرهای وابسته اولیه سایر متغیرهای وابسته مانند سرعت متوسط ( $U$ )، شعاع هیدرولیکی ( $R_h$ )، عرض سطح ( $W$ )، ارتفاع جریان در حالت مقطع پر ( $Y$ )، ارتفاع متوسط جریان ( $\bar{Y}$ ) و ارتفاع کناره در حالت عمودی ( $H$ ) قابل محاسبه می‌باشند.

عملیات تصنیف ادامه می‌یابد تا زمانی که همگرایی حاصل شود،  
( $FS_H = 1$ ).

۶ محاسبه  $FS_T$  با استفاده از رابطه (۳). اگر  $FS_T < 1$ ،  
کناره‌ها ناپایدارند و کانال خیلی باریک است. لذا از روش تصنیف  
مقادیر متوسط  $P_{bed}$  محاسبه شده و مجدداً به گام (۴) می‌رویم  
و در غیر این صورت کناره‌ها پایدارند.

۷. محاسبه ظرفیت انتقال بار بستر. اگر مقدار جدید  $P_{bed}$  بر  
ظرفیت انتقال رسوب حداکثر منطبق بود ابعاد بهینه کانال محاسبه  
شده و مقادیر خروجی به صورت  $W$ ،  $Y$  و  $\theta$  نمایش داده  
می‌شوند و در غیر این صورت لازم است که دوباره مقادیر  
حدی  $P_{bed}$  تنظیم شده و به گام (۳) رجوع شود.

علی‌رغم طبیعت غیر خطی محدودیت‌ها و تابع هدف، راه حل  
بهینه‌سازی مدل متأثر از مقادیر اولیه متغیرهای وابسته نمی‌باشد.

### آزمون مدل و تحلیل نتایج

تحلیل مدل بهینه‌سازی بر اساس داده‌های رودخانه‌های شنی  
صورت گرفته است. ۱۴ بازه که دارای کناره‌های مرکب شامل  
ماسه ریزدانه، سیلت یا رس بوده‌اند و مقادیر مقاومت کناره آنها  
داده شده بود برای تحلیل مدل حاضر انتخاب شده‌اند (جدول ۱).  
مقادیر زبری کانال ( $k_s$ ) با استفاده از محاسبات برگشتی برای  
هر بازه با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شده است. مقاومت فشاری  
غیرمحصور مواد کناره ( $q_u$ ) در چند محل در هر بازه اندازه‌گیری  
شده و مقدار متوسط ارائه شده است (۸). فرض شده که نمونه‌های  
مواد کناره در زمان آزمایش اشباع و بنابراین  $c_u = q_u / 2$   
می‌باشد (۱۹). پوشش گیاهی کناره با دو پارامتر  $G$ ، برای کناره‌های  
دارای پوشش گیاهی سبک و یا پوشش علفی و  $T$ ، برای  
کناره‌های پوشیده شده با درختان و پوشش گیاهی که از فرسایش  
کناره جلوگیری می‌کنند، معرفی شده است. به خاطر پوشش  
گیاهی در کناره‌ها امکان ایجاد ترک کششی وجود ندارد (۸).

مقدار  $\tau_{crit}$  برای هیچ یک از بازه‌ها مشخص نیست، لذا هیچ  
اساسی برای فرض مقدار آن وجود ندارد. در ابتدا پایداری کناره  
فقط به ازای گسیختگی توده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.  
هدف اصلی این تحلیل مشخص شدن اختلاف بین محدودیت  
ارتفاع کناره ( $FS_H = 1$ ) و محدودیت تنش برشی کناره  
( $FS_T = 1$ ) کانال‌ها بوده است. سپس مدل بهینه‌سازی در برابر  
ابعاد هندسه هیدرولیکی مشاهداتی کالیبره و از آن برای تخمین  
مقادیر  $\tau_{crit}$  برای محدودیت تنش برشی کناره کانال‌ها استفاده  
شده است.

در راه‌حل بهینه‌سازی مورد استفاده، معادله‌های پیوستگی و  
پایداری کناره دو شرط اصلی محسوب می‌شوند، مطابق شرط  
پیوستگی مقدار دبی کانال معادل دبی مقطع پر در نظر گرفته  
می‌شود و مقدار سرعت متوسط از معادله دارسی-وایسباخ و مقدار  
فاکتور اصطکاک ( $f$ ) از معادله کولگان به دست می‌آید:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log\left(\frac{12.2R_h}{k_s}\right) \quad (7)$$

$k_s$ : زبری معادل (m)

در تحلیل داده‌های صحرائی، مقدار  $k_s$  در جریان محاسبات  
برگشتی با استفاده از داده‌های مشاهداتی محاسبه و در جدول (۱)  
قرار گرفته است. در یک روش دیگر می‌توان مقدار  $k_s$  را از  
روابط موجود که بر اساس مشخصه قطر ذرات بستر تعریف  
شده‌اند، مانند  $D_{84} / 5$  و یا  $D_{50} / 8$  تخمین زد (۷ و ۱۴).

در شرط پایداری کناره نیز  $FS_H$  و  $FS_T$  را می‌توان بر مبنای  
روابط (۱) و (۳) محاسبه نمود. برای این که شرط پایداری برقرار  
شود لازم است که هر دو ضریب اطمینان از یک بزرگتر شوند.

ابعاد هندسی بهینه کانال رودخانه با استفاده از یک برنامه  
کامپیوتری که در یک سری حلقه‌های تکراری سعی و خطا شروط  
ذکر شده در فوق را تا برآورده شدن شرط بهینه‌سازی (ظرفیت  
انتقال رسوب حداکثر) تکرار می‌کند، محاسبه می‌شود. فلوچارت  
برنامه در شکل (۲) ارائه شده است. روش حل در هر حلقه تکرار  
مبتنی بر الگوی خط نیمساز می‌باشد، بدان معنی که برای هر  
متغیر دو کرانه بالا و پایین در نظر گرفته شده و مقدار آن در هر  
بار حد وسط یا میانگین حسابی این دو کرانه در نظر گرفته شده و  
این روند تا برآورده شدن محدودیت‌های حاکم و دقت قابل قبول  
تکرار شده است.

روند محاسبات همان‌طور که در فلوچارت نیز نشان داده شده  
است، به ترتیب زیر می‌باشد:

۱- وارد کردن متغیرهای مستقل ( $Q_{bf}$ ،  $S$ ،  $D_{50}$ ،

$k_s$ ،  $c_u$  و  $\gamma_t$  و  $\tau_{crit}$ )

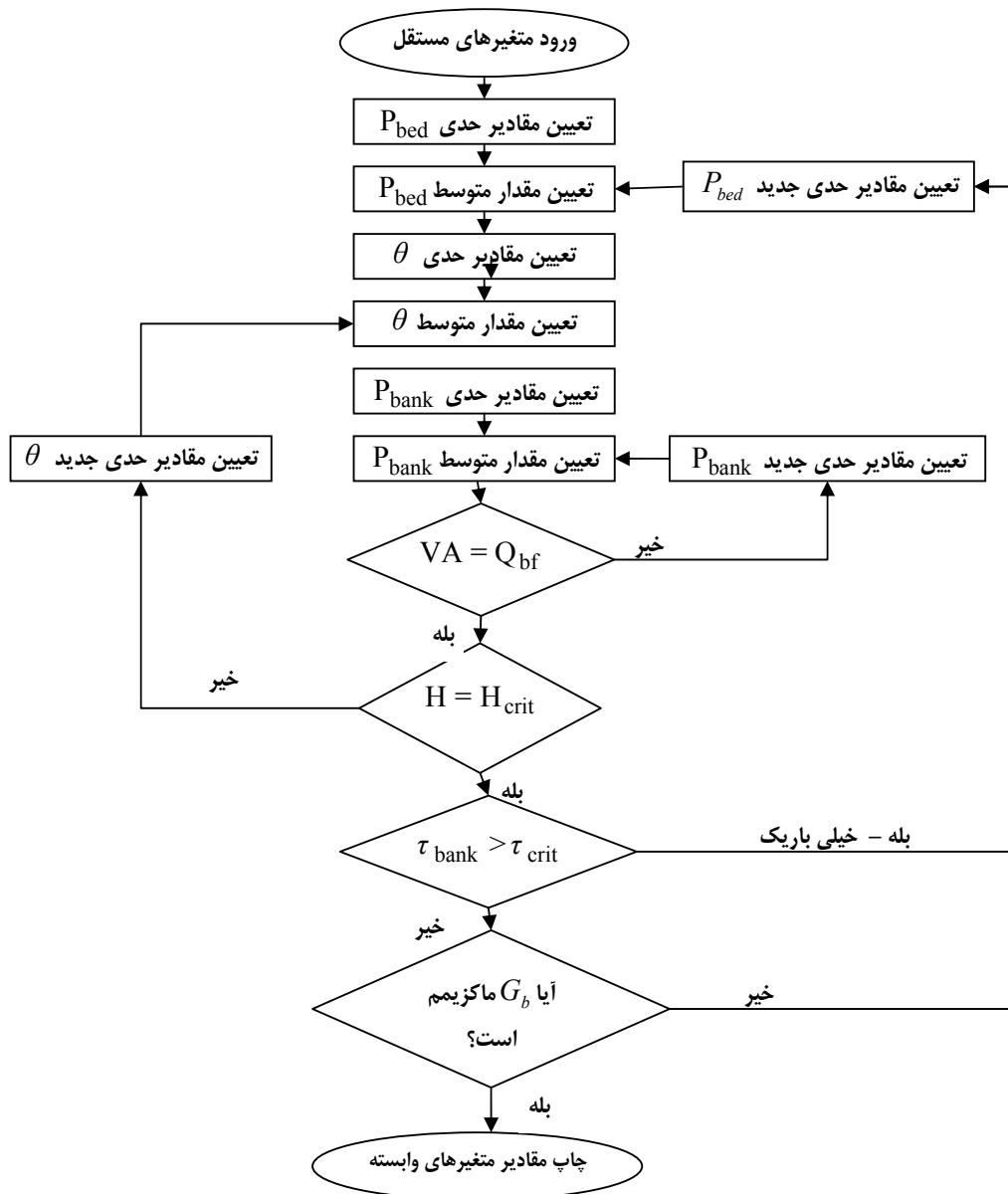
۲- تنظیم کرانه‌های حداکثر و حداقل برای  $P_{bed}$ ،

$P_{bank}$  و  $\theta$ .

۳- تعیین مقادیر متوسط  $P_{bed}$ ،  $P_{bank}$  و  $\theta$ .

۴- محاسبه  $f$  و  $V$  برای مقادیر متوسط به دست آمده از  
مرحله قبل (بدین منظور کرانه‌های حداکثر، حداقل و از آنجا  
متوسط  $P_{bank}$  مشخص می‌شود و عملیات تصنیف ادامه می  
یابد تا زمانی که محدودیت معادله پیوستگی برآورده گردد،  
( $VA = Q_{bf}$ ).

۵. محاسبه  $FS_H$  با استفاده از روابط (۱) و (۲). بدین منظور  
کرانه‌های حداکثر، حداقل و از آنجا متوسط  $\theta$  مشخص می‌شود و



شکل ۲- فلوچارت مدل

جدول ۱- داده‌های هندسه هیدرولیکی رودخانه‌های بسترشنی با کناره‌های چسبنده (A)

شماره بازه	Q (m <sup>3</sup> /s)	W <sub>obs</sub> (m)	H <sub>obs</sub> (m)	S	k <sub>s</sub> (m)	D <sub>50</sub> (m)	γ <sub>t</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	c <sub>u</sub> (kpa)	نوع پوشش گیاهی
۱	۶۴	۱۷/۴	۱/۷۸	۰/۰۰۴۴	۱/۰۹	۰/۰۷۵	۲۰	۱۹/۸	T
۲	۱۰	۱۴	۰/۷۳	۰/۰۰۶۴	۱/۴۲	۰/۱۰۶	۲۰	۱۲/۸	G
۳	۱۰/۷	۹/۸	۰/۷۳	۰/۰۱۳	۱/۲۵	۰/۱۱۳	۲۰	۱۱/۶	T
۴	۲۹/۵	۱۳/۷	۱/۳۴	۰/۰۰۴۵	۱/۱۶	۰/۰۴۱	۲۰	۲۵/۷	T
۵	۶۶	۱۷/۶	۱/۷۹	۰/۰۰۴۸	۱/۲۱	۰/۰۷۱	۲۰	۱۱/۷	T
۶	۶۶	۱۹	۱/۳۶	۰/۰۱۰۵	۱/۰۷	۰/۰۸۲	۲۰	۳۵/۵	T
۷	۶۷	۳۱	۱/۷۷	۰/۰۰۱۸	۱/۳۵	۰/۰۴۳	۲۰	۱۳/۱	G
۸	۸۱	۲۸/۷	۱/۶۳	۰/۰۰۱۴	۰/۱۹	۰/۰۵۵	۲۰	۱۵/۱	T
۹	۱۴/۲	۱۶/۷	۰/۶۹	۰/۰۰۳۲	۰/۲۹	۰/۰۵۷	۲۰	۱۲/۹	G
۱۰	۶۶	۱۹	۲/۴۷	۰/۰۰۱۴	۱/۴۱	۰/۰۵۱	۲۰	۷/۹	T
۱۱	۲/۷	۵/۲	۰/۶۵	۰/۰۰۲۳	۰/۵۶	۰/۰۳۳	۲۰	۱۸/۴	G
۱۲	۱۵۷	۳۹/۳	۲/۶۴	۰/۰۰۰۹	۰/۶	۰/۰۷۲	۲۰	۱۰/۷	G
۱۳	۵۵۰	۵۹/۴	۴/۱۹	۰/۰۰۰۷	۰/۲۸	۰/۰۲۸	۲۰	۸	G
۱۴	۳۸	۱۹/۵	۱/۶۷	۰/۰۰۰۲	۱/۵۴	۰/۰۴	۲۰	۲۰	G

در آخرین ستون پارامتر T، نشان دهنده پوشش گیاهی متراکم و پارامتر G، نشان دهنده پوشش گیاهی ضعیف می باشند.

محاسباتی  $H_{crit}$  می‌باشد و در بازه ۱۳ مقدار  $H_{obs}$  از حداکثر  $H_{crit}$  خیلی بیشتر است.

نتایج را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که، بر پایه پایداری کناره و دو محدودیت ارتفاع کناره و تنش برشی کناره می‌توان کانال‌ها را به دو دسته اصلی تقسیم نمود. در بازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۲ محدودیت ارتفاع کناره حاکم است، به عبارت دیگر هندسه کانال پایدار بر اساس شرط گسیختگی توده‌ای بهینه می‌شود. در بازه‌های ۱ تا ۴، ۶ تا ۹، ۱۱ و ۱۴ محدودیت تنش برشی کناره حاکم می‌باشد به عبارتی در این بازه‌ها، این فرسایش رودخانه‌ای است که ابعاد بهینه کانال را کنترل می‌کند. در مورد بازه شماره ۱۳ که اختلاف مقدار ارتفاع کناره محاسباتی و مشاهداتی خیلی زیاد است، به نظر می‌رسد مقدار  $C_u$  در نظر گرفته مناسب نمی‌باشد، از این رو این بازه از مراحل بعدی تحلیل حذف گردیده است.

داده‌های جدول (۱) به جز بازه ۱۳ به عنوان ورودی برای مدل بهینه‌سازی استفاده شده‌اند. به دلیل اینکه هیچ تخمین معقولی از  $\tau_{crit}$  وجود ندارد، لذا در تحلیل اولیه محدودیت تنش برشی در نظر گرفته نمی‌شود و پایداری رودخانه‌ها تنها با گسیختگی توده‌ای ارزیابی می‌شود. پراکندگی نتایج عرض و عمق متوسط محاسباتی در برابر مقادیر مشاهداتی در شکل‌های (۳-الف و ۳-ب) مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازه‌هایی که در آنها شرط تنش برشی کناره حاکم می‌باشد، تنگ‌تر و عمیق‌تر از مقادیر مشاهداتی می‌باشند. به دلیل اینکه این

اولین گام تحلیل، محاسبه ارتفاع بحرانی کناره ( $H_{crit}$ ) و

مقایسه مقدار آن با ارتفاع مشاهداتی ( $H_{obs}$ ) می‌باشد.  $H_{crit}$  با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شده است. مقادیر  $\theta$  در تحقیق چارلتون و همکاران (۸) داده نشده بود، با توجه به آن که زاویه ایستایی ماسه خشک برابر  $30^\circ$  و زاویه کناره رودخانه در بدترین حالت برابر زاویه ایستایی رسوبات کناره می‌باشد، لذا دامنه تغییرات آن می‌تواند بین  $30^\circ$  تا  $90^\circ$  باشد. همچنین بعضی از مقادیر نسبت داده شده به  $C_u$  نیز قابل اعتماد نمی‌باشند (۸). از این رو فرض شده است که مقدار  $C_u$ ، در محدوده  $\pm 25\%$  مقادیر ارائه شده قرار می‌گیرد. به خاطر اینکه عدم اطمینان در انتخاب مقادیر  $C_u$  و  $\theta$  در مقدار  $H_{crit}$  نیز تأثیر می‌گذارد، لذا از مقادیر محتمل  $C_u$ ، مقادیر ارائه شده و  $\theta = 60^\circ$  استفاده شده است. حداکثر مقدار محتمل  $H_{crit}$  با استفاده از  $1/25 C_u$  و  $\theta = 30^\circ$  و حداقل مقدار محتمل آن به ازای  $0/75 C_u$  و  $\theta = 90^\circ$  حاصل می‌شود. نتایج در جدول (۲) خلاصه شده‌اند. مقادیر  $H_{obs}$  برای بازه‌های ۵ - ۱۰ و ۱۲ در محدوده مقادیر حداقل و حداکثر محاسباتی  $H_{crit}$  قرار می‌گیرد. برای بازه‌های ۱ تا ۴ - ۶ تا ۹ - ۱۱ و ۱۴ مقدار  $H_{obs}$  کوچک‌تر از حداقل

جدول ۲- مقایسه ارتفاع مشاهداتی ( $H_{obs}$ ) با ارتفاع محاسباتی کناره ( $H_{crit}$ ).

محدودیت (۶)	$H_{crit}$ (متر)			$H_{obs}$ (m) (۲)	شماره بازه (۱)
	حداکثر (۵)	محتمل (۴)	حداقل (۳)		
BS	۸/۱۳	۵/۲۳	۲/۸۴	۱/۷۸	۱
BS	۵/۲۷	۳/۳۹	۱/۸۴	۰/۷۳	۲
BS	۴/۷۸	۳/۰۷	۱/۶۷	۰/۷۳	۳
BS	۱۰/۵۹	۶/۸۱	۳/۶۹	۱/۳۴	۴
BH	۴/۸	۳/۰۹	۱/۶۷	۱/۷۹	۵
BS	۱۴/۶	۹/۳۹	۵/۰۹	۱/۳۶	۶
BS	۵/۳۷	۳/۴۶	۱/۸۷	۱/۷۷	۷
BS	۶/۲	۳/۹۹	۲/۱۶	۱/۶۳	۸
BS	۵/۳۱	۳/۴۲	۱/۸۵	۰/۶۹	۹
BH	۳/۲۳	۲/۰۸	۱/۱۳	۲/۴۷	۱۰
BS	۷/۵۶	۴/۸۶	۲/۶۴	۰/۶۵	۱۱
BH	۴/۳۹	۲/۸۲	۱/۵۳	۲/۶۴	۱۲
BH	۳/۳	۲/۱۲	۱/۱۵	۴/۱۹	۱۳
BS	۸/۲۲	۵/۲۹	۲/۸۷	۱/۶۷	۱۴

(پارامتر BS در ستون ششم نشانه محدودیت تنش برشی کناره و پارامتر BH نشانه محدودیت ارتفاع کناره می‌باشد).

نیز پنج تا است مقدار متوسط آن ۵۳/۱ پاسکال با انحراف معیار ۲۸/۹ پاسکال می‌باشد. این نشان می‌دهد که مقدار  $\tau_{crit}$  به طرز محسوسی با افزایش پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. لذا مدل بهینه‌سازی را می‌توان به طرز مؤثری برای ارزیابی اثر از بین بردن پوشش گیاهی بر روی عرض پایدار کانال مورد استفاده قرار داد. برای مثال کاشت درخت در طول کناره‌های بازه (۲) می‌تواند  $\tau_{crit}$  را از ۲۸/۲ تا ۵۰ پاسکال افزایش دهد و به عبارتی تأثیر کاهش عرض پایدار تا حدود ۵۰ درصد از ۱۴ متر تا ۶/۷ متر خواهد بود.

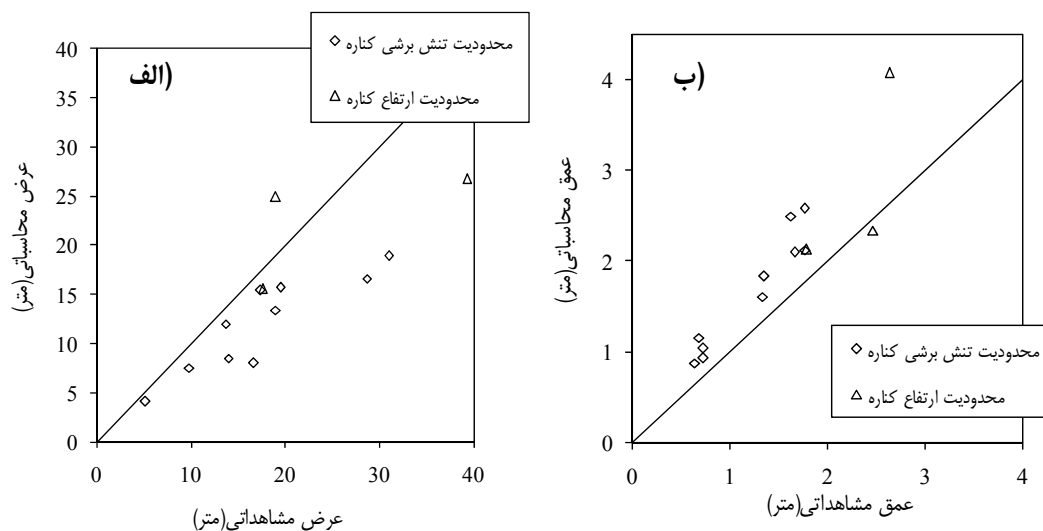
### نتیجه‌گیری

در مقایسه با تحلیل پایداری شیب در یک مکان مشخص که هدف بسیاری از بررسی‌های زمین‌شناسی می‌باشد، در اینجا هدف محاسبه پایداری متوسط یک بازه رودخانه است و اینکه آیا در این بازه شرط تنش برشی کناره حاکم شده است یا ارتفاع کناره. تخمین  $FS_H$  با استفاده از روابط (۱) و (۲) تنها باید به عنوان یک تقریب به کار برده شود. می‌توان گفت مقادیر  $FS_H < 1/25$  مشخص کننده کانال‌هایی است که تحت تأثیر محدودیت پایداری گسیختگی توده‌ای قرار دارند و بنابراین کانال با شرط ارتفاع کناره

کانال‌ها با محدودیت ارتفاع کناره محدود نشده‌اند، عرض پایدار آنها تنها تا برآورده شدن محدودیت فرسایش رودخانه‌ای توسعه می‌یابد. با در نظر گرفتن ( $FS_T = 1$  یا  $\tau_{bank} = \tau_{crit}$ ) می‌توان مدل بهینه‌سازی را در برابر داده‌های صحرائی کالیبره کرده و مقدار  $\tau_{crit}$  را تخمین زد.

برای ۱۰ کانالی که محدودیت تنش برشی کناره حاکم بود، یکسری از مقادیر  $\tau_{crit}$  به صورت سعی و خطا به مدل وارد شده و این روند تا زمانی که عرض مشاهداتی و محاسباتی با هم برابر شوند ادامه یافته است. مقادیر کالیبره شده  $\tau_{crit}$  در جدول (۳) ارائه شده است. مقادیر  $FS_T$  محاسبه شده برای این کانال‌ها برابر یک می‌باشد و همان‌طور که در جدول (۳) نیز نشان داده شده است، مقادیر  $FS_H$  برای این کانال‌ها تا حد زیادی بزرگ‌تر از یک می‌باشد و این نشان می‌دهد که هندسه پایدار کانال‌هایی که با شرط تنش برشی کناره محدود شده‌اند متأثر از خصوصیات گسیختگی توده‌ای کناره نمی‌باشد. بنابراین هر گونه خطایی در مقادیر  $C_u$ ، هیچ تأثیری روی  $\tau_{crit}$  به دست آمده از کالیبراسیون مدل نخواهد گذاشت.

بدون شک مقدار  $\tau_{crit}$  با پوشش گیاهی رابطه مستقیم دارد. کانال‌های با پوشش گیاهی سبک که تعداد آنها پنج تا است دارای مقدار متوسط  $\tau_{crit}$ ، برابر با ۱۸/۷ پاسکال با انحراف معیار ۲/۷ پاسکال می‌باشند و برای کانال‌های با پوشش درختی که تعداد آنها



شکل ۳- الف و ب: مقایسه عرض و عمق‌های مشاهده‌ای و محاسباتی بازه‌های مورد مطالعه

جدول ۳- داده‌های هندسه هیدرولیکی رودخانه‌های بسترشنی با کناره‌های چسبنده (۸)

شماره بازه	$\tau_{crit}$ (pa)	$FS_H$	نوع پوشش گیاهی
۱	۴۹/۲۲	۲/۱۳	T
۲	۲۶/۵۷	۳/۳۶	G
۳	۵۷/۵۷	۳/۰۴	T
۴	۳۷/۷۶	۳/۶۷	T
۶	۸۶/۱۱	۵	T
۷	۱۸/۴۶	۱/۴۲	G
۸	۱۳/۲۱	۱/۷۷	T
۹	۱۱/۹۰	۳/۵۸	G
۱۱	۹/۴۸	۵/۴۲	G
۱۴		۲/۲۹	G

در آخرین ستون پارامتر T، نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم و پارامتر G، نشان‌دهنده پوشش گیاهی ضعیف می‌باشند.

قبول‌تری برای  $C_{II}$  در بازه مورد مطالعه به‌دست می‌آید. اثر پوشش گیاهی روی پایداری در مقابل گسیختگی توده‌ای، نظیر کاری که توسط آبرنتی و رادرفورد (۵) انجام شده است را می‌توان با اصلاح مقدار  $C_{II}$  در محدودیت پایداری کناره موجود وارد نمود. می‌توان منحنی‌های پایداری را براساس مکانیسم‌های گسیختگی دیگر نیز توسعه داده و به جای رابطه (۲) مورد استفاده قرارداد. شاید بتوان اثر ناهمگنی خاک و پوشش گیاهی ناهمگن را به سادگی با تغییر مقدار  $C_{II}$  در نظر گرفت.

محدود شده است. برای کانال‌های با مقادیر  $FS_H > 1/25$ ، احتمالاً شرط تنش برشی کناره حاکم می‌باشد.

یکی از مشکلات اساسی در این مطالعات، تعیین مقدار متوسط  $C_{II}$  برای بازه‌ها می‌باشد. بر حسب نوع خاک می‌توان  $C_{II}$  را از روش‌هایی نظیر برش پره و یا روش نفوذسنج یا آزمایش‌هایی نظیر آزمایش تراکم محدود نشده یا آزمایش سه محوری تحکیم زهکشی‌نشده سریع تخمین زد (۱۹). مزیت اصلی تحلیل تنش نهایی در مقایسه با تحلیل تنش مؤثر در آن است که برای آن هزینه آزمایشگاهی خیلی کمتر است. این مسئله به ما امکان آزمایش نمونه‌های بیشتر را می‌دهد و بنابراین مقدار قابل



چسبنده از طریق توسعه ترک کششی و وقوع گسیختگی توده‌ای محتمل است که از آن جمله می‌توان فرسایش‌های رخ داده در سواحل رودخانه‌های کرج، کردان و کارون را نام برد (۲). البته محدودیت موجود در این زمینه فقدان راهنماهای کمی روش‌های پایدارسازی کناره با استفاده از پوشش گیاهی می‌باشد. در این راستا به‌عنوان یک راه‌حل می‌توان استفاده از مدل ارائه شده را از طریق محاسبات برگشتی برای محاسبه اثر کمی پوشش گیاهی در پایداری به‌واسطه کالیبراسیون مقدار  $\tau_{crit}$  پیشنهاد نمود. همچنین می‌توان از نتایج مدل جهت پیش‌بینی عرض بهینه رودخانه و نیز طراحی هندسه پایدار رودخانه‌های شنی با کناره‌های چسبنده سود جست.

اثر پوشش گیاهی کناره بر پایداری آن و در نتیجه عرض پایدار کانال غیر قابل انکار می‌باشد. مطابق نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، پوشش گیاهی کناره با کاهش فرسایش‌پذیری و تحکیم خاک کناره به‌واسطه ریشه گیاهان سبب کاهش سرعت و در نتیجه  $\tau_{bank}$  در نزدیکی کناره می‌شود. از این رو روش تحکیم کناره با کاشت گیاهان مناسب به‌عنوان یک روش منطبق بر معیارهای زیست‌محیطی با اقبال زیادی روبرو شده است و بی‌شک یافته‌های این تحقیق تأثیر به‌سزایی بر مدیریت جریان به خصوص در حفاظت از کناره رودخانه‌هایی که پوشش گیاهی کناره آنها از بین رفته است، خواهد گذاشت. کاهش پوشش گیاهی سبب افزایش فرسایش و به‌دنبال آن افزایش قابل توجه در مقادیر عرض و شیب کانال می‌گردد که این فرآیند در رودخانه‌های با کناره‌های

### منابع

- ۱- سلامت روندی، ه.، مجدزاده طباطبایی، م.، خرازی فرد، م. و س. قربان‌بیگی. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی تأثیر دانه‌بندی و وجود سازه‌های متقاطع بر عمق چاله‌ی آبستگنی کناره رودخانه‌ها ناشی از فرسایش نشتی. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد سی و پنجم، شماره سه، صفحات ۹۳-۸۳.
- ۲- صمدی، ا.، امیری تکلدانی، ا. و ح. رحیمی. ۱۳۸۴. فرسایش توده‌ای ساحل رودخانه، تخریب اراضی و پیامدهای آن. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، تهران، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، صفحات ۸۰-۷۶.
- ۳- کرمی، م. ۱۳۸۶. بررسی تحلیلی مقطع پایداررودخانه‌ها. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).
- ۴- کرمی، م. و م. مجدزاده طباطبایی. ۱۳۸۸. توسعه مدل تحلیلی اثر پوشش گیاهی در تعیین هندسه پایدار رودخانه‌های شنی. نشریه دانشکده فنی، جلد چهل و سوم، شماره چهار، صفحات ۴۴۹-۴۳۹.
- 5- Abernethy, B. and I. D. Rutherford. 1998. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilize stream banks? *Geo-morphology*, 23: 55-75.
- 6- Allmendinger, N. E., Pizzuto, J. E., Potter, N. Jr., Johnson, T. E. and E. C. Hession. 2005. The influence of riparian vegetation on stream width, eastern Pennsylvania, U.S.A., *Geological Society of America Bulletin*, 117: 229-243.
- 7- Bray, D. I. 1980. Evaluation of effective boundary roughness for gravel-bed Rivers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 7 (2): 392-397.
- 8- Charlton, F. G., Brown, P. M. and R. W. Benson. 1978. The hydraulic geometry of some gravel rivers in Britain. Report INT 180, Hydraulics Research Station, Wallingford, England, 48 p.
- 9- Chapuis, R. P. and T. Gatién. 1986. An improved rotation cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 23 (1): 83-87.
- 10- Darby, S. E. and C. R. Thorne. 1996. Numerical simulation of widening and bed deformation of straight, sand bed rivers in model development. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 122 (4): 184-193.
- 11- Eaton B. C. T. R. Giles. 2009. Assessing the effect of vegetation-related bank strength on channel morphology and stability in gravel bed streams using numerical models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 712-713.
- 12- Einstein, H. A. 1942. Formulas for the transportation of bed load. *Transactions ASCE*, 107: 561-597.
- 13- Flinham, T. P. and P. A. Carling. 1988. The prediction of mean bed and wall boundary shear in uniform and compositely roughened channels. *International Conference on River Regime*. W.P. White (Ed.). John Wiley and Sons, 267- 287.

- 14- Hey, R. D. 1979. Flow resistance in gravel-bed Rivers. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 105 (4): 356-379.
- 15- Lawler, D. M. 1992. Process dominance in bank erosion. Lowland floodplain rivers. Edited by P. A. Carling and G. E. Petts. John Wiley and Sons. Inc., Chichester, England.
- 16- Millar, R. G. and M. C. Quick. 1993. Stable width and depth of gravel-bed rivers with cohesive banks. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 124 (10): 1005-1013.
- 17- Moore, W. L. and F. D. Masch. 1962. Experiments on the scour resistance of cohesive sediment. Journal of Geophysical Research, 67 (4): 1437-1449.
- 18- Moscote, N. Y. 2002. A visual model for predicting stream response of alluvial gravel bed rivers. M.Sc. thesis, The University of British Columbia.
- 19- Spangler, M. G. and R. L. Handy. 1982. Soil engineering. 4th Ed., Harper and Row Publishers Inc., New York, 816 p.
- 20- Ullrich, C. R., Hagery, D. G. and R. W. Holmberg. 1986. Surficial failures of alluvial stream banks. Canadian Geotechnical Journal, 23 (3): 304-316.
- 21- White, W. R., Bettes, R. and E. Paris. 1982. An analytical approach to river regime. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 108 (10): 1179-1193.