

## توسعه مدل تحلیلی اثر پوشش گیاهی در تعیین هندسه پایدار رودخانه های شنی

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

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی رودخانه دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی آب دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

(تاریخ دریافت ۸۶/۹/۲۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۱۲، تاریخ تصویب ۸۸/۷/۵)

### چکیده

در این تحقیق با در نظر گرفتن پوشش گیاهی و کمی سازی تأثیر آن روی پایداری مقطع رودخانه های شنی، تغییرات پارامترهای هندسه هیدرولیکی مقطع مثل عرض، عمق و شیب بررسی شدند. بدین منظور مدلی توسعه داده شده است که در آن مقاطع با شیبهای کناره تند، عمیق و دارای عرض کم هستند، و در مقابل، مقاطع با کناره های با شیب جانبی ملایم، کم عمق و عریض هستند. در واقع حالت اول شبیه وضعیت رودخانه هایی است که در آنها پوشش گیاهی، انبوه است و حالت دوم مشابه رودخانه هایی است که در آنها پوشش گیاهی، پراکنده است. در این مقاله اثر پوشش گیاهی به وسیله ارتباط آن با پایداری خاک کناره (زاویه ایستایی اصلاح شده خاک) بررسی شده و بدین وسیله کمی می شود. در واقع به کمک مدل تأثیر پایداری کناره بر هندسه هیدرولیکی رودخانه به صورت کمی بررسی قرار می گیرد. سپس مدل موردنظر روی داده های ۶۲ رودخانه شنی از کشور انگلستان بررسی و مدل مورد واسنجی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده علاوه بر اینکه تأثیر پایداری کناره در تعیین خصوصیات هندسی مقطع کانال را نشان می دهند، کارایی مدل ارائه شده را نیز ثابت می کنند.

**واژه های کلیدی:** هندسه هیدرولیکی، مقطع پایدار، عرض بهینه، پوشش گیاهی، مدل تحلیلی

### مقدمه

رابطه منطقی بین داده های موجود (از روش برازش منحنی) است. بنابراین اعتبار روش بستگی به کیفیت داده های موجود دارد و مهم ترین محدودیت آن این است که این رابطه باید فقط برای موقعیت های مشابه محل جمع آوری داده ها به کار برده شود [۱]. استفاده از روش تحلیلی: این روش با استفاده از معادلات شناخته شده نظیر روابط انتقال رسوب و یا مقاومت جریان و... از یک سو و نیز معادلات مبتنی بر اصول بهینه سازی از سوی دیگر بین مجهولات مسئله یک رابطه منطقی برقرار می کند. محدودیت آن لزوم وجود معادلات مناسب برای بیان فرایندهای حاکم بر مسئله است [۱].

استفاده از یک مدل تحلیلی تنها در صورتی می تواند مفید باشد که نتایج حاصله از آن با داده های تجربی واسنجی شود. بنابراین بهترین روش قابل تامل و بررسی، استفاده از روش ترکیبی یعنی ترکیب دو روش تحلیلی و تئوری رژیم می باشد [۲،۳]. با توجه به اهمیت موضوع مورد بحث تا کنون چندین مدل تحلیلی در این رابطه ارائه شده است. از نظر استفاده از روابط بهینه سازی برای برقراری ارتباط منطقی

مدل سازی هندسه پایدار رودخانه های شنی از نظر منطبق نبودن نتایج مدل های موجود با داده های تجربی و نیز پیچیدگی مسئله، همواره یکی از مسائل مورد علاقه مهندسان هیدرولیک و هیدرولوژی و کارشناسان مهندسی رودخانه بوده است و تا کنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گرفته و مقالات و تئوری های متعدد در این زمینه ارائه شده اند [۱].

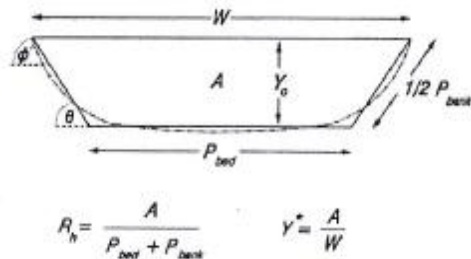
رفتار جریان در کانال های آبرفتی رودخانه ها، به دلیل تأثیرپذیری از عوامل فیزیکی و شرایط صحرایی متعدد، آنچنان پیچیده است که طراحی دقیق کانال غیر ممکن است. به طور کلی روش های ارائه شده برای طراحی کانال های پایدار را می توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱. تئوری رژیم: این روش یک روش کاملاً تجربی است و یک رودخانه زمانی در حالت رژیم است که شیب و سطح مقطع آن در شرایط تعادل قرار داشته باشد، یعنی این که در یک دوره زمانی نرخ فرسایش و رسوب گذاری برابر باشد [۱].

این روش در واقع حاصل یک سری بازدهی های صحرایی و برداشت داده های واقعی و در نهایت برقراری

## تئوری

در تحلیل کانال پایدار، یک فرض اساسی این است که کانال آبرفتی در واکنش به دبی جریان، بار رسوبی و خصوصیات مواد رسوبی که به وسیله رژیم هیدرولوژیکی و زمین شناسی نواحی بالادست تعریف می شود، توسعه پیدا می کند. در این تحلیل هندسه کانال به عنوان تابعی از دبی آب، دبی رسوب و خصوصیات رسوبات (توزیع دانه بندی، چگالی، زاویه اصطکاک و ...) شبیه سازی شده است. بنابراین کانال در راستای رسیدن به تعادل دینامیکی، شیب، عرض، عمق و زبری خود را به نحوی تنظیم می کند که با دبی جریان و خصوصیات بار رسوب ورودی بار دیگر در شرایط رژیم قرار گیرد. مقطع عرضی کانال به صورت یک مقطع ذوزنقه ای مطابق شکل شماره (۱) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: طرح مقطع ذوزنقه ای کانال.

معادلات مورد استفاده برای توسعه هندسه کانال عبارت اند از: مقاومت جریان، پیوستگی جریان، سرعت جریان، تنش برشی متوسط کناره و بستر، پایداری کناره و انتقال رسوب. این در حالی است که در این تحلیل هشت متغیر وابسته اصلی وجود دارد که عبارت اند از: محیط بستر ( $P_{bed}$ )، عمق کانال ( $Y_0$ )، شیب کانال ( $S$ )، فاکتور اصطکاک ( $f$ )، سرعت متوسط جریان ( $V$ )، تنش برشی متوسط بستر ( $\tau_{bed}$ )، تنش برشی متوسط کناره ( $\tau_{bank}$ ) و زاویه کناره ( $\theta$ ). پس در برابر هشت متغیر موجود، تنها هفت معادله وجود دارد. بنابراین برای حل مجهولات، نیاز به یک معادله اضافه احساس می شود. که در این جا از یک فرضیه بهینه سازی به عنوان یک معادله اضافه استفاده شده است. معادلات مورد استفاده در مدل در ادامه تشریح می شوند.

## مقاومت جریان

از بین معادلات موجود، مقاومت جریان معادله

بین مجهولات، تا کنون به دو صورت با مسئله برخورد شده است:

• فرضیه حداقل توان جریان [۴،۵]

• فرضیه حداکثر ظرفیت انتقال بار رسوبی [۶]

هر دو مدل تحلیلی ارائه شده یک رویه بهینه سازی را با در نظر گرفتن حداکثر دبی عبوری از مقطع دنبال می کنند. در هر دو بعد از تست مدل با داده های موجود [۷،۸] در دبی های پایین عرض کانال بیشتر و عمق آن کمتر از اندازه واقعی است و در دبی های بالا عکس این موضوع برقرار است. علت پراکندگی داده ها را می توان به نبود روابط مناسب برای بررسی پایداری دیواره ربط داد.

تورن و همکاران [۹] روش ارائه شده توسط چانگ [۵] را روی مجموعه داده های هی و تورن [۸] بررسی کرد، اختلاف ویژه ای که از نتایج حاصل شد به این علت بود که چانگ یک مقدار ثابت برای زاویه دیواره برای یک کانال داده شده فرض کرد و توجهی به پایداری دیواره نداشت. نتایج تورن و همکاران [۹] نشان داد که عرض مشاهداتی به طور سیستماتیک با افزایش پوشش گیاهی دیواره کاهش می یابد. برای منظور کردن اثر پوشش گیاهی، تورن و همکاران [۹] چهار معادله رگرسیون متناسب با هر نوع پوشش گیاهی را توسعه داد، بنابراین این امکان ایجاد می شود که عرض به دست آمده از مدل چانگ با درج پوشش گیاهی تصحیح شود.

میلار و کوئیک [۳] یک مدل تحلیلی ارائه دادند که در واقع اصلاح مدل های فوق ذکر شده است و شامل روشی است که متوسط تنش های برشی بستر و دیواره را محاسبه کرده و به خوبی پایداری دیواره را ارزیابی می کند. همچنین روش ارائه شده تطابق کیفی مناسبی را با نتایج ایکدا و ایزومی [۱۰] و پیژوتو [۱۱] که به ترتیب اثر پوشش گیاهی دیواره و زاویه اصطکاک رسوبات دیواره را روی هندسه مقاطع عرضی کانال مدل کرده اند، نشان می دهد.

در این تحقیق، با به کارگیری فرضیه بهینه سازی انتقال رسوب ماکزیمم یک مدل تحلیلی توسعه داده شده و ضمن لحاظ کردن تأثیر پوشش گیاهی در معادلات پایداری، تأثیر پایداری کناره در محاسبه هندسه هیدرولیکی رودخانه های شنی به صورت کمی بررسی شدند.

### پیوستگی جریان

رابطه پیوستگی جریان برای شرایط پایدار به این شکل قابل ارائه است [۳]:

$$Q = vR(P_{bed} + P_{bank}) \quad (۴)$$

که در آن:

$Q$ : دبی مقطع پر کانال مدل شده ( $m^3/s$ )

$v$ : سرعت متوسط جریان ( $m/s$ )

$R$ : شعاع هیدرولیکی ( $m$ )

$P_{bed}$ : محیط بستر ( $m$ )

$P_{bank}$ : محیط کناره ها ( $m$ )

### سرعت جریان

سرعت متوسط از رابطه دارسی - وایسباخ محاسبه شده است:

$$v^2 = \frac{8gRS}{f} \quad (۵)$$

$g$ : شتاب ثقل ( $m/s^2$ )

$S$ : شیب کانال

$f$ : عامل اصطکاک دارسی - وایسباخ

### ارزیابی تنش برشی بستر و کناره‌ها

روش نایت [۱۵] و نایت و همکاران [۱۶] برای محاسبه توزیع نیروی برشی مرزی استفاده شده است. این روش بر اساس توزیع نیروی برشی  $SF_{total}$  در طول محیط کانال قرار دارد.

$$SF_{total} = SF_{bed} + SF_{bank} \quad (۶)$$

$SF_{bed}$ : سهم بستر از نیروی برشی در واحد طول کانال ( $N/m$ )

$SF_{bank}$ : سهم کناره‌ها از نیروی برشی در واحد طول کانال ( $N/m$ )

که معادل است با:

$$\bar{\tau} \cdot P = \bar{\tau}_{bed} \cdot P_{bed} + \bar{\tau}_{bank} \cdot P_{bank} \quad (۷)$$

$\bar{\tau}$ : تنش برشی متوسط ( $N/m^2$ )

$\bar{\tau}_{bed}$ : تنش برشی متوسط بستر ( $N/m^2$ )

$\bar{\tau}_{bank}$ : تنش برشی متوسط کناره ( $N/m^2$ )

البته کار نایت محدود به کانال‌های مستطیلی می‌شود. فلاینتام و کارلینگ [۱۷] این روش را به کانال‌های دوزنقه ای نیز تعمیم داده‌اند. روابط ارائه شده در این روش مربوط به کانال‌های با زبری یکنواخت بستر و

لگاریتمی کالبروک - وایت به واسطه پایه تئوری مناسب آن انتخاب شده است. این معادله به شکل زیر قابل ارائه است.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log\left(\frac{aR_h}{k_s}\right) \quad (۱)$$

که در آن:

$a$ : ضریب تجربی که اغلب مقدار ۱۲ به آن نسبت داده می‌شود

$k_s$ : اندازه زبری ( $m$ )

$R_h$ : شعاع هیدرولیکی ( $m$ )

تعدادی از محققان از جمله هی [۱۲] و بری [۱۳]،  $k_s$  را به شکل زیر بیان کرده‌اند:

$$k_s = C_x \cdot D_x \quad (۲)$$

$D_x$ : قطر ذرات لایه سطحی، که  $x\%$  ذرات از آن ریزترند ( $m$ )

$C_x$ : ثابت تجربی که بر حسب قطر ذرات لایه سطحی فرق می‌کند.

مطابق بری [۱۳] در محاسبه زبری مرزی تفاوت زیادی بین استفاده از  $D_{50}$ ،  $D_{65}$  و  $D_{90}$  وجود ندارد. در تحلیل حاضر از  $D_{50}$  به این دلیل که اغلب نتایج صحرائی و روابط مورد استفاده به این مقدار استناد کرده اند، استفاده شده است. با ترکیب دو رابطه (۱) و (۲) و در نظر گیری  $\alpha = a/C_{50}$  می‌توان رابطه (۲) را به این شکل باز نویسی کرد.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log\left(\frac{\alpha \cdot R_h}{D_{50}}\right) \quad (۳)$$

$\alpha$ : ضریب تجربی مقاومت جریان

المان‌های زبری از قبیل اشکال بستر مقدار متغیر  $\alpha$  را افزایش می‌دهند. نتایج تحلیل داده‌های اندروز [۷] و هی و تورن [۸] نشان می‌دهد که مقدار  $\alpha$  بین مقادیر ۰/۴ تا ۱۶ نوسان دارد. این مقادیر یک توزیع لوگ نرمال با مقدار متوسط و انحراف معیار ۲/۴ را نمایش می‌دهند. برای کاهش خطا می‌توان  $\alpha$  را با استفاده از دبی و هندسه کانال مشاهداتی محاسبه، سپس از این مقدار به عنوان ورودی مدل استفاده کرد و در تحلیل های بعدی آن را ثابت نگاه داشت. تغییرات  $\alpha$  از یک کانال به کانال دیگر و به دنبال آن تغییرات زبری، یک مشکل اساسی است که به ندرت بررسی شده اند [۱۴].

ریشه‌ها مقدار این زاویه تغییر کرده و دامنه تغییرات آن از  $40^\circ$  تا  $90^\circ$  است [۳، ۱۹، ۲۰]. بنابراین لازم است که در معادله (۱۱) مقدار  $\phi$  با مقدار جدید  $\phi'$  اصلاح شود.

به این دلیل که معادله (۱۱) بر اساس داده‌های مشاهداتی رودخانه‌های شنی نتایج ضعیفی را به دنبال داشت، پس در مدل ارائه شده پایداری کناره بر اساس معیار پایداری کناره USBR اصلاح و ارزیابی شده است.

$$\tau_{cb}^* = \frac{\bar{\tau}_{bank}}{\gamma(G_S - 1)D_{50bank}} = c \tan \phi' \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi'}} \quad (12)$$

که در آن:

$\tau_{cb}^*$ : مقدار بحرانی پارامتر شیلدز برای رسوبات کناره  
 $\phi'$ : زاویه ایستایی اصلاح شده (با در نظر گیری اثر پوشش گیاهی)

ضریب  $c$  به خصوصیات رسوبات غیر چسبنده بستگی دارد و نقش پوشش گیاهی در پایداری کناره در مقدار آن تأثیری ندارد و با رابطه زیر تعریف می شود:

$$c = \frac{\tau_c^*}{\tan \phi} \quad (13)$$

که در آن:

$\tau_c^*$ : تنش برشی بدون بعد بحرانی برای مواد بستر با اندازه مشابه رسوبات کناره (پارامتر شیلدز بحرانی)  
 $\phi$ : زاویه ایستایی رسوبات

برای مقدار  $c \tan \phi$  که برابر پارامتر شیلدز در آستانه حرکت ذرات رسوبی است، مقادیر متفاوتی پیش بینی شده است. شیلدز [۲۱] این مقدار را  $0.056$  بیان کرد. گسلا [۲۲] دیاگرام شیلدز را برای حالتی که جریان به طور کامل آشفته و بستر زیر باشد، اصلاح کرد و مقدار پارامتر شیلدز را  $0.047$  بیان کرد. وایت [۲۳] مقدار  $0.18 \tan \phi$  را برای پارامتر شیلدز عنوان کرد. کالینسک [۲۴] برای ذرات کروی یکنواخت و با این استدلال که در نزدیکی ذره تنش برشی متناسب است با مجذور سرعت در نزدیکی ذره، مقدار  $0.075 \tan \phi$  را برای پارامتر شیلدز ارائه داد [۲۵]. می توان گفت ضریب  $c$  وابسته به مشخصات رسوبات غیر چسبنده یکنواخت است و برای حالتی است که هنوز مقاومت کناره با اعمال تأثیر پوشش گیاهی کناره اصلاح نشده است.

نظر به عدم اتفاق نظر محققان مختلف در محاسبه تنش برشی بدون بعد و نیز با توجه به وابستگی آن به اندازه دانه بندی رسوبات، با استفاده از داده‌های مشاهداتی

کناره‌ها می شوند. بر این اساس درصد نیروی برشی قابل تحمل به وسیله کناره‌های کانال با زبری یکنواخت بستر و کناره به این صورت ارائه می شود:

$$\log \% SF_{bank} = -1.4026 \log \left( \frac{P_{bed}}{P_{bank}} + 1.5 \right) + 2.247 \quad (8)$$

و در رابطه (۸) می توان تنش برشی بستر و کناره ها را از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\frac{\bar{\tau}_{bank}}{\gamma Y S} = 0.01 \% SF_{bank} \left[ \frac{(W + P_{bed}) \sin \theta}{4Y} \right] \quad (9)$$

$$\frac{\bar{\tau}_{bed}}{\gamma Y S} = 1 - 0.01 \% SF_{bank} \left[ \frac{W}{2P_{bed}} + 0.5 \right] \quad (10)$$

که در آن:

$\gamma$ : وزن مخصوص آب بر حسب  $(N/m^3)$

$Y$ : ارتفاع ماکزیمم کانال  $(m)$

$W$ : عرض فوقانی کانال  $(m)$

$\theta$ : زاویه شیب کناره کانال  $(^\circ)$

## پایداری کناره

معادله پایداری کناره به شکل زیر قابل ارائه است:

$$\frac{\bar{\tau}_{bank}}{\gamma(G_S - 1)D_{50bank}} = 0.056 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}} \quad (11)$$

که در آن:

$\bar{\tau}_{bank}$ : تنش برشی متوسط کناره  $(N/m^2)$

$D_{50bank}$ : قطر متوسط رسوبات کناره  $(m)$

$\theta$ : زاویه شیب کناره

$\phi$ : زاویه ایستایی رسوبات کناره

$G_s$ : جرم مخصوص رسوبات کناره (معادل ۲/۶۵)

$\gamma$ : وزن مخصوص آب (معادل  $9810 N/m^3$ )

معادله (۱۱) بیانگر آن است که زمانی که زاویه کناره کانال  $(\theta)$  به سمت زاویه ایستایی رسوبات کناره  $(\phi)$  میل می کند، عبارت سمت راست معادله به صفر نزدیک شده و می توان گفت تنش برشی قابل تحمل به وسیله کناره کانال به صفر میل می کند و بر عکس؛ هنگامی که  $\theta$  کاهش می یابد، کناره پایدار می تواند تنش برشی بزرگ تری را متحمل شود.

مقدار زاویه ایستایی برای کناره متشکل از رسوبات شنی غیر چسبنده  $40^\circ$  است [۱۸]. ولی با افزایش پایداری کناره از راه افزایش پوشش گیاهی وابسته به چگالی

داده شده اند. در دو معادله اول از اندازه متوسط ذرات لایه زیرین بستر برای محاسبات استفاده می‌شود و در معادله سوم از اندازه متوسط ذرات لایه سطحی استفاده شده است.

### فرضیه بهینه سازی

در اینجا از فرضیه بهینه سازی ظرفیت انتقال رسوب ماکزیمم [۶] استفاده شده است که طبق آن به ازای یک شیب داده شده کانال عرض خود را به نحوی تنظیم می‌کند که ظرفیت انتقال رسوب ماکزیمم باشد. همچنین می‌توان از فرضیه حداقل توان جریان [۴] استفاده کرد و نتایج مشابهی را استخراج کرد.

برابری این دو فرضیه توسط وایت و همکاران [۶] نشان داده شده است. هنگامی که از فرضیه‌های ذکر شده در رودخانه‌های طبیعی استفاده شود و پارامتر شیب، متغیر وابسته باشد، مدل در جهت شرایط شیب مینیمم همگرا خواهد شد.

### منطق برنامه

حل معادلات ذکر شده و نیز فرضیه بهینه سازی توسط یک برنامه رایانه‌ای انجام می‌گیرد. ورودی‌های برنامه  $Q$  و نرخ انتقال رسوب نهایی ( $G_b$ ) به اضافه  $D_{50bed}$ ،  $D_{50bank}$ ،  $d_{50sub}$ ،  $\phi'$  و  $\alpha$  است که می‌توان آنها را در مطالعات میدانی اندازه گرفت و یا به راحتی آنها را از نتایج اندازه‌گیری‌های صحرائی محاسبه کرد. بنابراین  $G_b$  با استفاده از هندسه کانال مشاهداتی محاسبه شده است. به هر حال ابعاد کانال مدل شده به طور حتم با ابعاد مشاهداتی کانال توافق ندارد و حالات نامحدودی از ابعاد کانال برای مقادیر ورودی معادلات (۱) الی (۱۲) را ارضا خواهند کرد. بنابراین یک راه حل واحد تنها با به کارگیری یک شرط بهینه سازی قابل حصول خواهد بود. در حالتی که شیب به مقدار حداقل خود برسد، تنها یک ترکیب از  $W$ ،  $Y_0$  و  $\theta$  با معادلات (۱) الی (۱۲) سازگار خواهند بود و این حالت معادل ظرفیت انتقال رسوب ماکزیمم است. زمانی که شیب بزرگ‌تر از مقدار حداقل باشد، امکان دو ترکیب از ابعاد کانال وجود دارد و زمانی که شیب از مقدار حداقل کمتر است، هیچ ترکیبی از ابعاد کانال امکان‌پذیر نیست. روند نمای برنامه در حالت شیب متغیر در شکل (۲) نشان داده شده است. در صورت اجرای برنامه

[۸] اقدام به واسنجی مقدار تنش برشی بدون بعد بحرانی شده که در جریان واسنجی مقدار  $0.394/\tau_c^*$  برای  $\tau_c^*$  حاصل شد.

زاویه ایستایی ( $\phi$ ) که به شکل و اندازه رسوبات وابسته است، در محدوده ۲۵ درجه برای ماسه ریزدانه تا ۴۰ درجه برای شن غیرچسبنده تغییر می‌کند. می‌توان گفت مقدار ضریب  $C$  در محدوده  $0.48/0.86$  تا  $0.86/0.48$  تغییر خواهد کرد. محدوده تغییرات زاویه ایستایی اصلاح شده ( $\phi'$ ) از  $\phi$  تا ۹۰ درجه است، حد پایین ( $\phi$ ) برای حالتی است که کناره عاری از هرگونه پوشش گیاهی است و نیز رسوبات چسبنده مابین رسوبات غیر چسبنده کناره را پر نکرده اند و حد بالای ۹۰ درجه برای حالتی است که کناره غیر فرسایش پذیر است [۲،۳].

رفتار رابطه (۱۲) به گونه ای است که زمانی که زاویه شیب کناره به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد ( $\phi' \rightarrow \theta$ )، آستانه حرکت رسوبات کناره به صفر میل می‌کند ( $\tau_{cb}^* \rightarrow 0$ ). و در مقابل زمانی که شیب کناره به مینیمم مقدار خود می‌رسد ( $\theta \rightarrow 0$ )، آستانه حرکت ماکزیمم می‌شود ( $\tau_{cb}^* \rightarrow \tau_c^* \frac{\tan \phi'}{\tan \phi}$ ) که خود می‌تواند بیانگر تأثیر پوشش گیاهی در به تاخیر انداختن آستانه حرکت رسوبات کناره باشد. به طور کلی معادله (۱۲) بر اساس تجزیه نیروهای وارد بر ذره واقع بر کناره رودخانه با زاویه شیب ( $\theta$ ) و زاویه ایستایی ( $\phi$ ) معلوم است [۱۱].

عبارت  $\tau_c^* \frac{\tan \phi'}{\tan \phi}$  آستانه حرکت را زمانی که زاویه شیب ( $\theta$ ) به صفر میل می‌کند، نشان می‌دهد. در حالی که عبارت  $\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi'}}$  افزایش سهم نیروی وزن ذره در آستانه حرکت ذره، زمانی که  $\phi' \rightarrow \theta$  میل می‌کند را نشان می‌دهد.

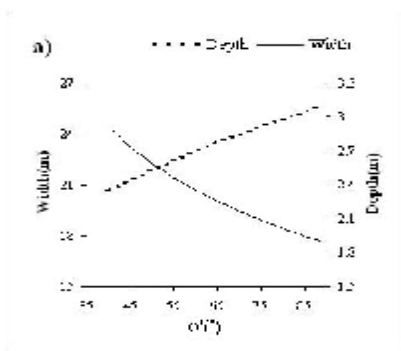
### انتقال رسوب

در مدل ارائه شده از هر سه معادله براون [۲۶]، پارکر، کلاینگمن و مک لین [۲۷] موسوم به معادله PKM و معادله پارکر [۲۸] برای محاسبه ظرفیت انتقال رسوب در حالت مقطع پر استفاده شده است. در این سری از معادلات، انتقال رسوبات محدود به بستر کانال می‌شود و فرض می‌شود کناره‌های کانال در آستانه حرکت توسعه

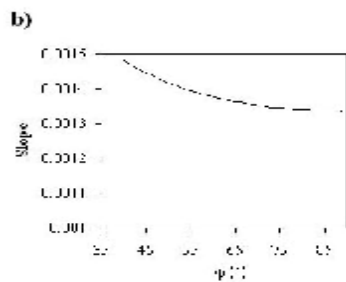
$S$  در شکل (۳ - الف و ب) نشان داده شده است. همان طور که مشهود است مقدار زاویه اصطکاک داخلی اصلاح شده تأثیر بسزایی بر هندسه کانال دارد. به ازای کاهش  $\phi'$  از  $90^\circ$  تا  $40^\circ$ ،  $W$  تا 50% افزایش می یابد،  $Y^*$  تا 33% کاهش می یابد و  $S$  تا 20% افزایش می یابد. این نکته قابل توجه است که معادله (۱۲) شامل  $\tan(\phi')$  است و این در حالی است که  $\tan(90^\circ)$  تعریف نشده است. به هرحال برای از بین بردن این مشکل و نیز کم کردن خطا از یک مقدار بسیار نزدیک  $90^\circ$  استفاده شده است.

### ۲- اندازه رسوبات کناره ( $D_{50bank}$ )

نتایج آنالیز حساسیت تأثیر  $D_{50bank}$  در شکل (۴ - الف و ب) ارائه شده است. نتایج نشان می دهند که هندسه کانال برای مقادیر کوچک  $D_{50bank}$  نسبت به تغییرات آن خیلی حساس است. ولی برای مقادیر بزرگ، تغییرات  $D_{50bank}$  تأثیری روی ابعاد کانال نمی گذارد.



شکل ۳- الف: آنالیز حساسیت زاویه اصطکاک اصلاح شده کانال روی ابعاد هندسی کانال (عرض و عمق متوسط).

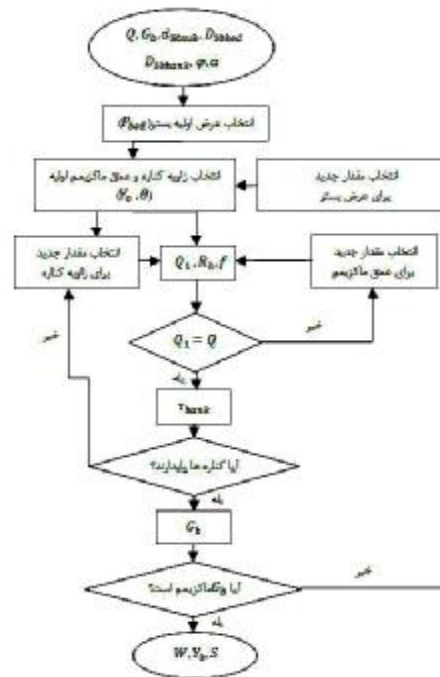


شکل ۳- ب: آنالیز حساسیت زاویه اصطکاک اصلاح شده کانال روی ابعاد هندسی کانال (شیب) (بافرض)

$$Q = 100 m^3/s, d_{50} = 0.025, D_{50} = 0.075$$

$$(G_b = 10 kg/s, D_{50bank} = 0.075)$$

در حالت شیب ثابت متغیرهای مستقل عبارت اند از:  $\alpha, \phi', d_{50sub}, D_{50bank}, D_{50bed}, S, Q$  پارامترهای مستقل تعریف شده در این برنامه عبارت اند از:  $Q$ : دبی جریان ( $m^3/s$ )  
 $G_b$ : نرخ انتقال رسوب نهایی ( $kg/s$ )  
 $d_{50sub}$ : دانه بندی مواد لایه زیرین بستر ( $m$ )  
 $D_{50bed}$ : دانه بندی مواد لایه سطحی بستر ( $m$ )  
 $D_{50bank}$ : دانه بندی مواد کناره ( $m$ )  
 $\phi'$ : زاویه ایستایی اصلاح شده رسوبات کناره ( $^\circ$ )  
 $\alpha$ : ضریب تجربی



شکل ۲: روندنمای برنامه.

### آنالیز حساسیت

هدف از این بخش را می توان بررسی تأثیر متغیرهای مستقل در برآورد پارامترهای هندسی رودخانه عنوان کرد.

#### ۱- زاویه ایستایی اصلاح شده رسوبات کناره ( $\phi'$ )

تأثیر  $\phi'$  روی هندسه هیدرولیکی رودخانه به کمک آنالیز حساسیت بررسی شده است. به جز  $\phi'$ ، سایر متغیرهای ورودی ثابت فرض شده اند و متغیرهای وابسته که در واقع هندسه کانال را تعریف می کنند ( $Y_0, P_{bed}, S$  و  $\theta$ ) تا رسیدن به شرایط تعادل مورد نیاز، آزادانه تغییر می کنند. نتایج تغییرات  $W$ ، عمق متوسط ( $Y^*$ ) و

تقریباً نصف شده است و این در حالی است که برای افزایش دبی از ۱۰۰ تا ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه شیب ثانویه ۰/۸۵ شیب اولیه است (جدول ۱).

جدول ۱: نتایج بررسی افزایش دبی (از ۲۰ تا ۵۰۰ m<sup>3</sup>/s) روی ابعاد هندسی کانال برای پوشش های گیاهی مختلف.

نسبت کاهش شیب (به ازای افزایش دبی از ۱۰۰ تا ۵۰۰ m <sup>3</sup> /s)	نسبت کاهش شیب (به ازای افزایش دبی از ۲۰ تا ۱۰۰ m <sup>3</sup> /s)	φ (°)
۰/۸۵۳	۰/۴۹۰	۴۰
۰/۶۴۸	۰/۴۸۸	۵۰
۰/۶۰۷	۰/۴۷۷	۷۵

نسبت تعمیم	نسبت تعریض	φ (°)
۳/۷۱۸	۳/۶۷۹	۴۰
۵/۶۳۴	۲/۳۲۵	۵۰
۶/۱۷۲	۲/۰۹۵	۷۵

### واسنجی

برای واسنجی مدل از داده های به دست آمده از بازه های ۶۲ رودخانه با بستر شنی به نسبت پایدار از کشور انگلستان استفاده شده است. این داده ها توسط هی و تورن [۸] با شرایط جریان با دبی پایین جمع آوری شده اند. این رودخانه ها به عنوان کانال های تک شاخه پایدار با بستر متحرک توصیف شده اند. کناره رودخانه یا از شن غیر چسبنده تشکیل شده است و یا یک لایه سیلتی چسبنده روی شن غیر چسبنده قرار گرفته است. کناره ها از نظر چگالی پوشش گیاهی طبقه بندی و مشخص شده اند.

در داده های ارائه شده توسط هی و تورن [۸] اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی کناره در ۴ گروه زیر طبقه بندی و مشخص شده اند:

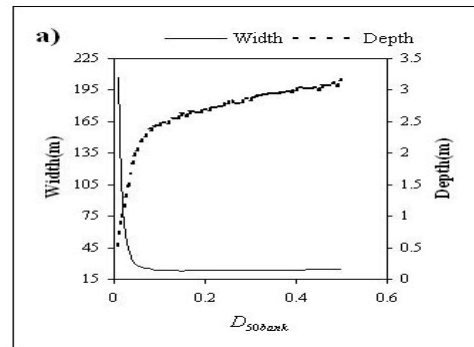
نوع I: پوشش علفی بدون هرگونه درخت و درختچه

نوع II: ۱ تا ۵ درصد پوشش درخت و درختچه

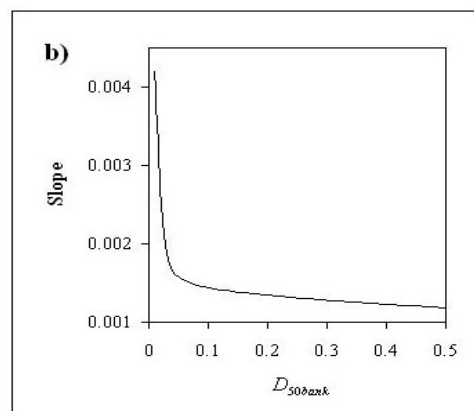
نوع III: ۵ تا ۵۰ درصد پوشش درخت و درختچه

نوع IV: بیش از ۵۰ درصد پوشش درخت و درختچه

دانه بندی رسوبات کناره در داده های مرجع وجود نداشت، بنابراین در این تحلیل  $D_{50bed}$  برابر با  $D_{50bank}$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- الف: آنالیز حساسیت اندازه رسوبات کناره کانال روی ابعاد هندسی کانال (عرض و عمق).

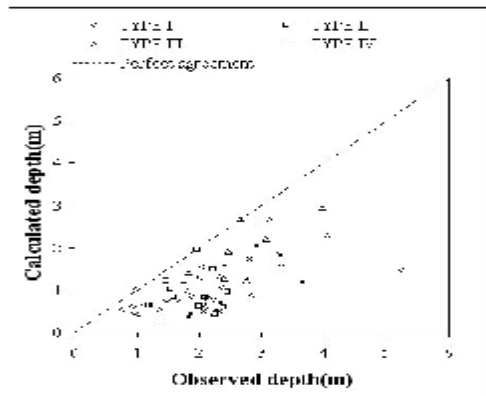


شکل ۴- ب: آنالیز حساسیت اندازه رسوبات کناره کانال روی ابعاد هندسی کانال (شیب) (با فرض  $Q = 100 m^3/s$ ,  $G_b = 10 kg/s$ ,  $\phi' = 40^\circ$ ).

### ۳- دبی

مطابق پیش بینی افزایش دبی با افزایش عرض و عمق و کاهش شیب همراه خواهد بود. که موید روابط مفهومی ارائه شده موجود از جمله لین [۲۹] و شام [۳۰] نیز هست، ولی درصد افزایش عرض و عمق و کاهش شیب به ازای درصد مشخصی از افزایش دبی برای پوشش های گیاهی مختلف یکسان نیست. به عبارتی به ازای افزایش دبی با افزایش پوشش گیاهی درصد تعریض کاهش، درصد تعمیم افزایش و درصد کاهش شیب افزایش می یابد که این خود موید نتایج آنالیز حساسیت سایر پارامترهای مستقل نیز هست. نکته قابل توجه دیگر، روند کاهش شیب می باشد که بیشتر در قسمت اول یعنی در افزایش دبی از ۲۰ تا ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه متمرکز شده است به طوری که برای مثال برای زاویه ایستایی ۴۰ درجه شیب برای دبی ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه ۰/۴۹۰ شیب متناظر با دبی ۲۰ مترمکعب بر ثانیه است؛ یعنی شیب





شکل ۵- ب: مقایسه عمق محاسباتی مدل با عمق مشاهداتی در  $\phi' = 40^\circ$ .

### تخمین تحلیلی زاویه اصطکاک اصلاح شده ( $\phi'$ )

برای بررسی تأثیر افزایش پایداری کناره، مدل برای هر رودخانه برای یکسری از مقادیر  $\phi'$  اجرا شد، تا زمانی که با پذیرش خطای تقریبی  $\pm 1\%$  به حالتی رسید که  $W_{obs}$  (عرض مشاهداتی) با  $W_{mod}$  (عرض محاسباتی) برابر شود. برای مثال برای کانالی که پوشش گیاهی نوع (IV) با عرض مشاهداتی  $10/2$  متر داشت. در حالت  $\phi' = 40^\circ$  عرض  $27/9$  متر توسط مدل ارائه شده بود و به هنگام واسنجی مقدار  $\phi' = 81.9^\circ$  حاصل شد. با انتخاب مقادیر مناسب  $\phi'$  برای نوع پوشش گیاهی و اجرای دوباره برنامه، نتایج بسیار مناسب و ایده آلی حاصل شد. مقادیر  $\phi'$  محاسباتی برای داده ها در جدول (۲) خلاصه شده است. همان طور که مشاهده می شود، مقدار متوسط  $\phi'$ ، سازگار با نوع پوشش گیاهی افزایش می یابد. و بنابراین می توان پیشنهاد کرد که اثر پوشش گیاهی روی هندسه کانال های آبرفتی با افزایش زاویه اصطکاک داخلی در نظر گرفته شود [۱۹].

جدول ۲: خلاصه نتایج مدل برای  $\phi'$  برای داده های ۶۲ رودخانه از سری داده های هی و تورن [۱۸].

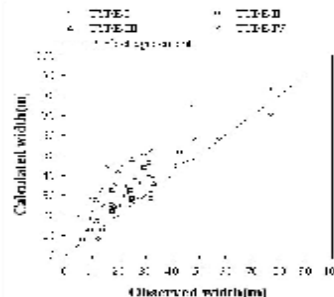
نوع پوشش گیاهی	$\phi' ^\circ$		
	مینیمم	متوسط	ماکزیمم
I	۲۸/۸	۵۰/۳	۶۴/۲
II	۳۸/۲	۵۳/۳	۶۷/۶
III	۴۴/۴	۵۶/۹	۷۵
IV	۴۷	۶۳/۲	۸۲

همان طور که در بخش آنالیز حساسیت مدل نشان داده شده است، مقدار زاویه ایستایی اصلاح شده رسوبات کناره ( $\phi'$ ) یک پارامتر کلیدی کنترل کننده پایداری کناره کانال است، مقدار  $\phi'$  به صورت سیستماتیک و قانونمند بسته به تغییرات چگالی پوشش گیاهی تغییر می کند. از آنجا که در داده های هی و تورن مقدار زاویه ایستایی اصلاح شده داده نشده است، بنابراین در مدل ارائه شده در ابتدا با فرض مقادیر معقول از  $\phi'$ ، مقادیر زاویه ایستایی اصلاح شده رسوبات کناره واسنجی و نتایج سازگار با تحلیل های قبلی حاصل شده است.

### تحلیل با $\phi' = 40^\circ$

نتایج تحلیل در حالتی که  $\phi'$  به اندازه  $40^\circ$  ثابت نگه داشته شده است در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشهود است، پراکندگی یک الگوی مشخص و قانونمند دارد. کانال مدل شده در کل پهن تر و نیز کم عمق تر از کانال مشاهداتی است. پراکندگی بین ابعاد مشاهداتی و محاسباتی در قالب افزایش پایداری کناره در اثر افزایش پوشش گیاهی قابل توجیه است.

در واقع فرض  $\phi' = 40^\circ$  بدین معنی است که از اثر پوشش گیاهی بر هندسه کانال مدل شده صرف نظر شده است. بنابراین اگر خروجی های مدل ارزش درستی داشته، بدین معنی است که چگالی پوشش گیاهی در اطراف کانال رودخانه ناچیز و قابل صرف نظر است به عبارتی برای پوشش گیاهی نوع (I) به طور متوسط  $W_{obs} / W_{mod}$  برابر  $0/96$  و  $Y_{obs}^* / Y_{mod}^*$  برابر  $1/05$  است و بر عکس، اگر خروجی های مدل تطابق ضعیفی با هندسه مشاهداتی کانال داشته باشند، می توان گفت که پوشش گیاهی در اطراف کانال رودخانه مناسب و خوب است.

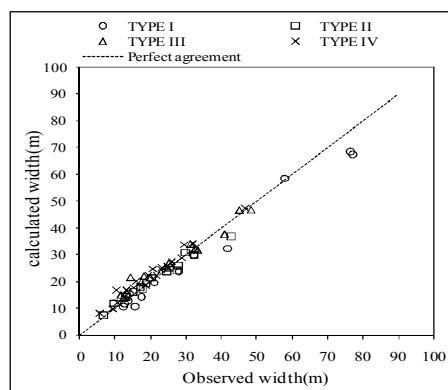


شکل ۵- الف: مقایسه عرض محاسباتی مدل با عرض مشاهداتی در  $\phi' = 40^\circ$ .



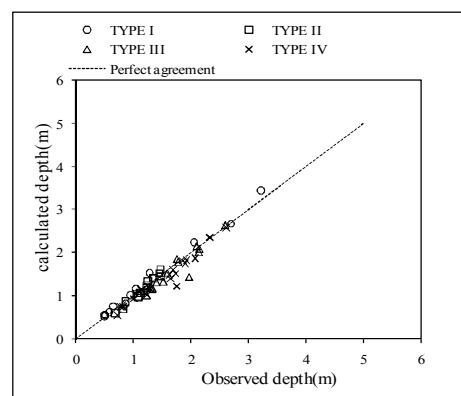
قسمت‌های قبل نیز بیان شد  $\phi'$  اثری قابل توجه در تعادل دینامیک هندسه کانال دارد، به طوری که برای مثال افزایش زاویه ایستایی اصلاح شده منجر به کاهش عرض و شیب کانال و افزایش عمق کانال خواهد شد. تئوری ارائه شده روی داده‌های رودخانه‌های شنی ارائه شده به وسیله هی و تورن [۸] آزمایش شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش پایداری کناره تا حد قابل توجهی کارایی مدل را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج بررسی میزان تأثیر پوشش گیاهی کناره روی عرض کانال با نتایجی که هی و تورن از تحلیل های رژیم خود روی داده‌های صحرایی به دست آورده‌اند، توافق مناسبی را نشان می‌دهد. همچنین توافق کیفی مناسبی با نتایج ایکدا و ایزومی [۱۰] و پیروتو [۱۱] که به ترتیب اثر پوشش گیاهی و زاویه ایستایی رسوبات کناره ( $\phi$ ) روی هندسه مقطع عرضی کانال بررسی کرده اند را نشان می‌دهد. اثر پوشش گیاهی کناره با تثبیت رسوبات کناره سبب می‌شود که کناره‌ها بتوانند تنش برشی بزرگتری را تحمل کنند. و این سبب باریکتر و عمیق تر شدن و کم شدن شیب کانال رودخانه نسبت به زمانی که کناره‌ها هیچ نوع پوشش گیاهی ندارند می‌شود. بیشترین تغییرات در عرض و به دنبال آن در عمق مشاهده می‌شود و شیب کانال کمترین میزان تغییرات را به خود اختصاص می‌دهد. همان طور که در شکل (۵ - الف و ب) مشهود است، با ثابت نگه داشتن مقدار زاویه ایستایی رسوبات و اصلاح نکردن آن پراکندگی قابل توجهی بین هندسه مشاهداتی و محاسباتی بخصوص در رودخانه‌های دارای پوشش گیاهی انبوه کناره مشاهده می‌شود. بنابراین با واسنجی مدل بر اساس داده های مشاهداتی و تعیین مقدار زاویه موافق با هر نوع پوشش گیاهی نسبت به اصلاح مدل اقدام شده است. با انتخاب زاویه ایستایی اصلاح شده مناسب تا حد زیادی از میزان پراکندگی کاسته شد.

بی شک یافته‌های این تحقیق تأثیر بسزایی بر مدیریت جریان بخصوص در حفاظت از کناره رودخانه‌هایی که پوشش گیاهی کناره آنها از بین رفته است، خواهد گذاشت. کاهش پوشش گیاهی سبب افزایش فرسایش و به دنبال آن افزایش قابل توجه در مقادیر عرض و شیب کانال می‌گردد که این فرایند متعاقباً منجر به رسوب‌گذاری و شریانی شدن رودخانه خواهد شد و داده‌های مشاهداتی نیز چنین ناپایداری رخ داده در



شکل ۶ - الف: مقایسه عرض محاسباتی مدل با عرض

مشاهداتی بر اساس نتایج واسنجی.



شکل ۶ - ب: مقایسه عمق محاسباتی مدل با عرض مشاهداتی

بر اساس نتایج واسنجی.

### نتایج مدل بعد از واسنجی

بعد از واسنجی، مدل قادر خواهد بود ابعاد کانال را با دقت معقولی محاسبه کند. بر این اساس با در نظر گرفتن نتایج واسنجی مدل و مقادیر  $\phi'$  متناسب با پوشش گیاهی، ابعاد هندسه هیدرولیکی کانال محاسبه و در برابر ابعاد مشاهداتی در شکل (۶) ترسیم شده اند. همان طور که مشاهده می‌شود، کاهش قابل توجهی در مقایسه با حالتی که اثر پوشش گیاهی در پایداری کناره نادیده گرفته شده بود (شکل ۵)، حاصل شده است.

### نتیجه گیری

در این تحقیق برای پیش بینی هندسه پایدار رودخانه‌های شنی آبرفتی یک مدل تحلیلی ارائه شده است. به مدل ارائه شده در تکمیل مدل‌های قبلی [۴،۶] یک تحلیل پایداری کناره نیز اضافه شده است. این اثر از روش پارامتر زاویه ایستایی اصلاح شده رسوبات کناره ( $\phi'$ ) محاسبه و کمی می‌شود. همان‌طور که در

رودخانه‌های آبرفتی را تایید می کند. در واقع در این مقاله مقدار زاویه ایستایی اصلاح شده رسوبات کناره  $(\phi')$ ، به عنوان یک شاخص کمی برای ارزیابی حساسیت تغییرات هندسه هیدرولیکی رودخانه شنی به تغییرات پوشش گیاهی کناره به کار رفته است. همچنین می توان از نتایج مدل برای پیش بینی عرض بهینه رودخانه و نیز طراحی هندسه پایدار رودخانه های شنی سود جست.

## مراجع

- 1 - Hey, R. D. (1978). "Determinate hydraulic geometry of river channels." *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 104, No. 6, PP. 869- 885.
- 2 - Eaton, B. C. and Millar, R. G. (2004). "Optimal alluvial channel width under a bank stability constraint." *Geomorphology*, No. 62, PP. 35-45.
- 3 - Millar, R.G. and Quick, M. C. (1993). "Stable width and depth of gravel-bed rivers with cohesive banks." *J. Hydr.Div. ASCE*, Vol. 124, No.10, PP. 1005-1013.
- 4 - Chang, H. H. (1979). "Minimum stream power and river chanel patterns." *J. Hydrol*, Vol. 41, PP. 303- 327.
- 5 - Chang, H. H. (1980). "Geometry of gravel stream." *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 106, No.9, PP. 1443- 1456.
- 6 - White, W. R., Bettis, R. and Paris, E. (1982). "An analytical approach to river regime." *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 108, No.10, PP. 1179-1193.
- 7 - Andrews, E. D. (1984). "Bed material entrainment and the hydraulic geometry of gravelbed rivers in Colorado." *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 95, PP. 371- 378.
- 8 - Hey, R. D. and Thorne, C. R. (1986). "Stable channels with mobile gravel beds." *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 112, No. 8, PP. 671- 689.
- 9 - Thorne, C. R., Hey, R. D. and Chang, H. H. (1988). "Prediction of hydraulic geometry of gravel-bed streams using the minimum stream power approach". *In International Conference on River Regime*, W.P. White (Ed.). John Wiley and Sons, PP. 29-40.
- 10 - Ikeda, S. and Izumi, N. (1990). "Width and depth of self-formed straight gravel rivers with bank vegetation." *Water Resour.Res.*, Vol. 26, No. 10, PP. 2353-2364.
- 11 - Pizzuto, J. E. (1990). "Numerical simulation of gravel river widening." *Wat. Res. Res.*, Vol. 26, No. 9, PP. 1971-1980.
- 12 - Hey, R. D. (1979). "Flow resistance in gravel-bed rivers." *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 105, No. 4, PP. 356- 379.
- 13 - Bray, D. I. (1982a). *Flow resistance in gravel-bed rivers*. Hey, R.D., Bathurst, J.C., and Thorne, C.R., (Eds.). John Wiley and Sons, PP. 109- 137.
- 14 - Millar, R. G. (1999). "Grain and form resistance in gravel-bed rivers." *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 37, No. 3, PP. 303-312.
- 15 - Knight, D. W. (1981.) "Boundry shear in smooth and rough channel." *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 107, No. 7, PP. 839-851.
- 16 - Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Hamed, M. E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels". *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 110, No. 4, PP. 405- 422.
- 17 - Flintham, T. P. and Carling, P. A. (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, PP. 267- 287.
- 18 - Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan Pub. Co., New York., PP. 522.

- 19 - Karami, M. (2007). *Analytical investigation of stable hydraulic geometry of rivers*. M.S Thesis., Power and water university of technology (PWIT).
- 20 - Eaton, B. C. (2006). "Bank stability analysis for regime models of vegetated gravel bed rivers." *Earth Surface Processes and Landforms*, No.31, PP. 1438-1444.
- 21 - Shields, A. (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement*. California Institute of Technology, Pasadena (translated from German).
- 22 - Gessler, J. (1965). "The beginning of bed load movement of mixtures investigated as natural armouring in channels." *W.M.Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources*, California Institute of Technology, Pasadena.
- 23 - White, C. M. (1940). "The equilibrium of grains on the bed of an alluvial Channel." *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, Vol. 174, PP. 332-338.
- 24 - Kalinske, A. A. (1947). "Movement of sediment as bed load in rivers." *Am. Geoph. UNLON*, Vol. 28, No. 4, PP. 615-620.
- 25 - Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, The Netherlands.
- 26 - Brown, C. B. (1950). "Sediment transportation". In *Engineering Hydraulics*, H.Rouse (Ed.). John Wiley and Sons, Chapt. 12.
- 27 - Parker, G., Kligeman, P. C. and McLean, D. G. (1982). "Bedload and size distribution in paved gravel streams." *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 108, No. 4, PP. 544-571.
- 28 - Parker, G. (1990a). "Surface-based bedload transport relation for gravel rivers." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, PP. 417-436.
- 29 - Lane, E. W. (1955a). "The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering." *Proc. Am. Soc. Civil Engrs.*, Vol. 81, PP. 1-17.
- 30 - Schumm, S. A. (1969). "River metamorphosis". *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol. 95, PP. 255-273.