

تئوری رژیم و کاربرد آن برای جریان‌های یکنواخت و غیر یکنواخت

حسین افضلی مهر، منوچهر حیدرپور و سید حسین فرشی^۱

چکیده

طراحی مناسب کانال‌ها و بهینه سازی مقاطع رودخانه‌ها به طور قابل توجهی کاهش هزینه اقتصادی و امکان توجیه اجرای پروژه‌ها را فراهم خواهد ساخت. در این راستا تئوری رژیم، امکان بررسی تجربی و نیمه تجربی طراحی کانال‌های پایدار را که در آنها فرسایش و انتقال رسوب در حال تعادل است، فراهم می‌سازد. هدف این تحقیق بررسی و مقایسه تأثیر نوع جریان (یکنواخت و غیر یکنواخت) در پیش‌بینی مشخصات یک کانال پایدار می‌باشد. در بررسی اثر جریان یکنواخت از روابطی که بر اساس معادله‌های تجربی و نیمه تجربی (فرضیه حدی) توسعه یافته‌اند، استفاده به عمل آمده است. برای بررسی تأثیر جریان یکنواخت معادلات تجربی و نیمه تجربی (فرضیه حدی) لیسی، شبیال، کنداب و گارد و چانگ انداخته شدند. مقایسه و برآورد قدرت پیش‌بینی هر یک از معادلات فوق با استفاده از روش‌های ترسیمی (گرافیکی) و آماری و ۲۴ کانال طبیعی واقع در آمریکا که در شرایط رژیم قرار داشتند صورت پذیرفت. به منظور بررسی ساختار جریان غیر یکنواخت روی مشخصات کانال پایدار از ۲۱ نیم‌رخ سرعت اندازه‌گیری شده در رودخانه گاماسیاب استفاده گردید. با کاربرد تئوری لایه مرزی، سرعت برشی برای هر یک از این نیم‌رخ‌های سرعت محاسبه شد. برای جریان غیر یکنواخت، پارامتر شیلدز که در آن تنش برشی به کمک روش لایه مرزی محاسبه می‌گردد، به عنوان مؤثرترین پارامتر پیش‌بینی مشخصات کانال رژیم شناخته شد. در نظر گرفتن هم‌زمان اثر جریان غیر یکنواخت و تئوری لایه مرزی نه تنها خطر همبستگی ساختگی را از بین می‌برد، بلکه دقت پیش‌بینی مشخصات مقطع کانال پایدار را نیز افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تئوری رژیم، مقطع کانال پایدار، لایه مرزی، جریان غیر یکنواخت

مقدمه

مسئله در این راستا فقط مسئله برای شرایط فرضی جریان یکنواخت توسعه یافته است (۱). اگر چه بخش عمده‌ای از مطالعات انجام شده صرفاً تجربی بوده و فقط از روابط آماری شکل گرفته است، ولی بخشی از تحقیقات بر پایه روابط تحلیلی با استفاده از قوانین ترمودینامیک مانند

دست‌یابی به رودخانه و کانال طبیعی که در آن میزان انتقال رسوب و فرسایش در حالت تعادل دینامیکی مناسب باشد، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای شاخه مهندسی رودخانه در یکصد سال گذشته می‌باشد. به دلیل پیچیدگی بیش از حد

۱. به ترتیب استادیاران و دانشجوی سابق کارشناس ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

صورت نمی‌گیرد و تنش وارده بر جدار کanal در تمام سطح مقطع در حد آستانه است. حال اگر این تعریف را به رودخانه‌ها تعیین دهیم، معنای آن به این صورت خواهد بود که رودخانه‌ها در عین انتقال رسوب نمی‌توانند پایدار باشند. از طرف دیگر مشاهدات و مطالعات نشان می‌دهند که پایداری و انتقال رسوب به صورت توأم در رودخانه‌ها وجود دارند. به این مسئله پارادوکس کanal پایدار گفته می‌شود. برای حل این پارادوکس لازم است که تنش برشی بر روی بستر کanal بیشتر از مقدار بحرانی، در روی دیوار کanal کمتر از مقدار بحرانی و در نقطه اتصال بستر و دیواره دارای مقدار بحرانی باشد. یک چنین مقطعی اجازه می‌دهد که در ناحیه بستر انتقال رسوب و در دیوارهای کanal پایداری حفظ شود. بنابراین کanal‌های طبیعی می‌باشد بیشتر دارای بستر متحرك باشند. اگر چه کمی کردن این پارامتر در معادله‌های طراحی نیاز به تحقیق زیادی دارد (۴ و ۵).

روش رژیم در طراحی کanal‌های پایدار به صورت تجربی و نیمه تجربی برای حریان یکنواخت توسعه یافته است (۳) که در زیر به طور مختصر به این روش‌ها اشاره می‌گردد.

الف) روش تجربی

این روش برای اولین بار توسط کندی در سال ۱۸۹۵ بر اساس یک رابطه ساده آماری بین سرعت بحرانی برای فرسایش و حداقل عمق آب در یک کanal توسعه یافت (۱۱). از آنجا که امکان مشخص کردن پایداری کanal صرفاً با یک معادله وجود نداشت در ادامه سایر محققین نظریه لیندلی (۱۱) علاوه بر سرعت بحرانی، عرض کanal را نیز به عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر پایداری (عوامل پایداری عبارت اند از شب، عرض و عمق کanal) معرفی نمودند. افزودن پارامتر عرض کanal اگرچه بسیار مفید به نظر می‌رسید ولی تجارب اجرایی نشان داد که هنوز به پارامتر یا پارامترهای دیگری نیاز است. در این راستا لیسی (۹) برای نخستین بار سه معادله طراحی کanal‌های پایدار را به صورت معادله‌های عرض، عمق و شب کف کanal ارائه

فرضیه حدی (که هنوز برای شرایط صحراوی به طور کامل مورد تصدیق قرار نگرفته است) مورد توجه قرار گرفته است.

ثوری رژیم در واقع یک ثوری نیست زیرا هیچ توضیح فیزیکی در تحلیل آن وجود ندارد (۳). این روش در واقع از تجارب مختلف مهندسین رودخانه شاغل در شبکه های آبیاری، به وجود آمده است. به نظر بوگاردی به سختی می‌توان این ثوری را از مسائل انتقال رسوب جدا ساخت (۳). بنابراین هدف عمده قوانین رژیم، مطالعه رفتار آبراهه‌هایی است که به طور آزادانه مقطع عرضی خود را تعديل می‌کنند تا به تعادل دینامیکی مناسب تحت تنش‌های موجود در محیط عمل خود برسند. هرچند به دلیل ماهیت تجربی ثوری رژیم که براساس داده‌های صحراوی بنا شده است، ضرایب و نمایهای معادله‌های رژیم ارائه شده توسط محققین مختلف، به طور متناوب تا به امروز چار تعديل و تغییر شده‌اند.

مسئله بنیادی که یک مهندس هیدرولیک با آن روبه‌رو می‌باشد این است که در طراحی کanal‌های پایدار، بستر کanal می‌باشد متحرك باشد یا ثابت؟ پاسخ این سؤال را می‌باشد در دینامیسم تحول مداوم بستر برای حفظ تعادل میان انتقال رسوب و فرسایش یافت. از نظر ثوری، مقطع عرضی کanalی که ذرات آن در آستانه حرکت می‌باشند، بهینه‌ترین شکل برای عبور یک دبی مشخص را داراست، زیرا این مقطع دارای کمترین محیط خیس شده است که یک کanal می‌تواند داشته باشد، بدون آن که در ذرات واقع بر جدار آن فرسایش رخ دهد. هم‌چنین نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که کanal‌های پایدار نیز قابلیت حمل رسوب را دارند. بسیاری از رودخانه‌ها نیز ضمن انتقال مقدار زیادی رسوب، پایداری خود را نیز حفظ می‌کنند. ذکر مطالب فوق شاهدی بر این مدعای است که ثوری کanal آستانه‌ای که در آن تمام ذرات رسوب روی بستر بدون حرکت می‌باشند نمی‌تواند بحث انتقال رسوب در رودخانه‌ها را پوشش دهد. بنابراین مفهوم یک کanal آستانه‌ای با انتقال رسوب سازگار نیست. زیرا هیچ گونه انتقال رسوبی از هیچ بخش آن

شیب در بستر کanal‌های طبیعی و بازه‌های رودخانه‌ای و فقدان متداول‌وژی مناسب برای تخمین بهینه شیب کف کanal اشاره کرد.

ب) روش نیمه تجربی

در ابتدای دهه ۱۹۶۰ برخی محققین همچون لئوپولد و لانگبین (۱۰) برخی مفاهیم مکانیک سیالات و ترمودینامیک مانند تئوری حداقل تلفات انژی را برای طراحی کanal‌های پایدار مطرح کردند. به دنبال این تحقیقات در دهه ۷۰ میلادی سانگ و یانگ (۱۴) مفهوم حداقل توان واحد جریان را ارائه کردند، که براساس آن یک کanal پایدار، سرعت، شیب، زبری و شکل هندسی خود را به نحوی تابع مقدار حداقل توان واحد جریان تعديل می‌کند تا به صورت بهینه انتقال آب و رسوب در آن صورت پذیرد. براساس این تئوری کanal‌های آبرفتی عرض خود را به نحوی تابع سرعت، شیب، زبری و مقطع هندسی تعديل می‌کنند که با حداقل توان واحد جریان، دبی آب و رسوب را انتقال دهند. به دنبال کار دو محقق فوق چانگ (۴) دو فرضیه مهم خود را به نحوی طرح کرد که براساس آن تعادل هندسی یک مقطع جریان در یک کanal آبرفتی تحت تنش‌های موجود می‌باشد به گونه‌ای باشد که با حداقل توان (γQS)، انتقال رسوب و جریان آب صورت پذیرد. از آنجا که مقادیر ۲ (وزن مخصوص آب) و Q (دبی جریان) در جریان دائمی یکنواخت ثابت می‌باشند، بنابراین شرط حداقل توان جریان به شرط حداقل شیب کanal (S) برای ایجاد تعادل دینامیکی کاهش می‌یابد. پس از کار چانگ محققین دیگری مانند وايت و همکاران (۱۶) مفهوم حداکثر انتقال رسوب را ارائه کردند که براساس آن شرط تعادل دینامیکی یک کanal، انتقال حداکثر رسوب تحت تنش‌های موجود می‌باشد. مبانی تئوریک روش‌های محققین فوق، امروزه تحت عنوان فرضیه‌های حدی (External hypotheses) شناخته می‌شود.

این فرضیه در واقع حلقه گمشده یک سیستم دارای دو معادله و سه مجهول می‌باشد. معادله انتقال رسوب برای شیب

کرد. کاربرد معادلات لیسی در کشورهای هند و پاکستان (پس از ۱۹۵۸) نشان داد که سه معادله فوق به خوبی می‌توانند برای مشخص کردن کanal پایدار مناسب باشند. از عمدۀ عوامل موقوفیت روابط لیسی عبارت‌اند از: ۱- پیش‌بینی مقطع پایدار هیچ نیازی به اطلاعات در مورد کمیت رسوب ندارد. ۲- این روابط فقط تابع دبی جریان و قطر ذره رسوب (قطر ذره رسوب در پارامتر F₁ به کار گرفته شده است) می‌باشند. در این حال از نقاط ضعف روابط لیسی می‌توان به منطقه‌ای بودن آنها که تابع شرایط جغرافیایی و مرغولوژیکی خاصی هستند و عدم در نظر گرفتن دبی رسوب، پوشش گیاهی و مشخصات موضعی جریان را ذکر کرد.

روابط شیتال (۵) که در این مطالعه از آن استفاده می‌شود به همان شکل ریاضی روابط لیسی می‌باشند که در ضرایب و توان‌ها کمی با هم تفاوت دارند. لیسی در تجربه خود از فاکتور F₁ که در واقع میان حرکت جریان در بستر رسوبی می‌باشد و بنا بر تجربه وی در تخمین عمق جریان مؤثر است، استفاده می‌کند. این فاکتور به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_1 = \sqrt{d_5 / 16}$$

که در آن

F₁ : فاکتور رسوب

d₅: قطر میانه ذرات رسوب بر حسب میلی‌متر

کنداب و گارد (۸) با استفاده از آنالیز ابعادی و در نظر گرفتن عواملی مانند چگالی رسوب و آب و قطر ذره رسوب در روابط عرض و عمق کanal تلاش کردند تا پیش‌بینی مقطع پایدار را بهبود بخشنند. هر چند روابط آنها قابل کاربرد برای محدوده خاصی از ذرات رسوب ریزدانه < 2 mm d₅ و شرایط خاص جغرافیایی می‌باشند.

لازم به ذکر است که به دلیل عدم دقت پیش‌بینی شیب کف کanal برای هر سه روش لیسی، شیتال، کنداب و گارد از ارائه و تحلیل آنها در این بررسی صرف نظر شد. از علل عمدۀ این ضعف می‌توان به عدم شناسایی پارامترهای مناسب مؤثر در پیش‌بینی شیب کanal، نبودن دقت مناسب در اندازه‌گیری‌های

بستر شنی واقع در غرب ایران با قطر میانه $18/9\text{ mm}$ = ۵.۰ استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

در جدول ۱ دامنه دبی جریان یکنواخت بین 42 cfs ($1/22\text{ m}^3/\text{s}$) تا 10.39 cfs ($10/7\text{ m}^3/\text{s}$) می‌باشد. این کanal‌ها دارای مسیر مستقیم بوده و از آثار موانع در مسیر جریان و پوشش گیاهی در آنها صرف نظر شده است.

همچنین مقاطع و بازه‌های (Reaches) مورد مطالعه برای جریان غیر یکنواخت مستقیم بوده و فقد هر نوع انحصاری باشند. همچنین از آثار موانع در مسیر جریان و پوشش گیاهی در آنها نیز صرف نظر شده است.

ب) معادلات انتخابی و تحلیل داده‌ها

همان طور که قبلاً اشاره شد در این مطالعه برای شرایط جریان یکنواخت از معادلات لیسی، شیتال، کنداب و گارد و چانگ به منظور تجزیه و تحلیل و مقایسه قدرت پیش‌بینی کanal‌های ۳ رژیم استفاده می‌شود. معادلات محققین فوق که در جدول ۳ ارائه گردیدند، به طور کلی تابع دبی جریان و قطر ذره رسوب بوده و هیچ اثری از دبی رسوب، پوشش گیاهی و پارامتر شیلدز در آنها ملاحظه نمی‌شود. در این مقاله این معادلات به صورت گرافیکی و آماری مورد مقایسه قرار می‌گیرند. برای این منظور مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سایمونز (۱۳) را در مقابل مقادیر محاسبه شده توسط هر یک از معادلات با خط ایدآل ترسیم شده و حدود اطمینان $\pm 25\%$ مقایسه می‌شوند.

برای بررسی و درک اثر ساختار جریان غیر یکنواخت در پیش‌بینی پایداری یک رودخانه شنی از تئوری لایه مرزی که بر اساس نیم‌رخ سرعت جریان استوار است استفاده گردید. همچنین با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی معادلاتی برای عرض، عمق و شیب مقاطع مختلف در چند بازه رودخانه گاماسیاب ارائه گردید.

کanal، معادله مقاومت جریان برای عمق جریان و فرضیه حدی برای بستن و قابل حل کردن سیستم برای عرض کanal است.

از نقاط قوت این روش به کارگیری مفاهیم تئوریک برای تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی و ارائه جزئیات بیشتر مکانیزم تعديل کanal نسبت به روش تجربی می‌باشد. از نقاط ضعف این روش عدم تطابق نتایج با مبانی تئوریک به ویژه در رودخانه‌ها و محدودیت کاربرد آن در شیب‌های تندر و مواد دانه ریز و چسبنده است (۶، ۲۱).

از طرف دیگر در نظر گرفتن جریان غیر یکنواخت در طراحی کanal‌های پایدار برای نخستین بار در این تحقیق بر اساس تئوری لایه مرزی صورت می‌پذیرد. به دلیل ساختار کاملاً متفاوت جریان غیر یکنواخت از جریان یکنواخت و نوع و شکل توزیع تنش برشی برای این دو جریان، تغییر قابل توجهی در متدولوژی و نتایج پیش‌بینی می‌شود. در واقع هدف از کاربرد جریان غیر یکنواخت و غیر یکنواخت بررسی اثر کاربرد جریان غیر یکنواخت نسبت به جریان یکنواخت در بهبود پیش‌بینی مشخصات کanal‌های پایدار می‌باشد. در این مطالعه با اشاره مختصر به مبانی کاربرد هر یک از این دو جریان در کanal‌های پایدار، نقاط قوت و ضعف آنها را ارائه کرده و تلاش می‌شود تا راهنمایی اولیه در اختیار طراحان و برنامه ریزان قرار داده شود.

مواد و روش‌ها

الف) معرفی داده‌ها

در این مطالعه برای مقایسه روش‌های تجربی و نیمه تجربی در شرایط جریان یکنواخت از پارامترهای هیدرولیکی ۲۴ کanal اندازه‌گیری شده به طور عمده در بسترها ماسه و شن در آمریکا که در جدول ۱ ارائه شده‌اند استفاده گردید (۱۳). برای مطالعه و درک تأثیر جریان غیر یکنواخت در طراحی کanal‌های رژیم در بسترها شنی از ۲۱ نیم‌رخ سرعت اندازه‌گیری شده در بازه‌های مختلف رودخانه گاماسیاب با

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در کانال‌های آبرفتی

d ₅₀ (mm)	w(ft)	h(ft)	S × 10 ⁻²	u(ft/s)	Q(ft ³ /s)	شماره کanal
۰/۵۸۰	۲۷/۰	۲/۹۲	۰/۳۳۰	۲/۴۲	۱۷۷	۱
۰/۲۰۸	۶۲/۰	۵/۸۵	۰/۱۳۰	۲/۴۸	۷۷۳	۲
۰/۲۵۳	۸۰/۰	۸/۲۹	۰/۰۵۸	۱/۷۱	۱۰۳۱	۳
۰/۰۹۶	۴۴/۰	۶/۰۱	۰/۰۶۳	۱/۹۲	۴۴۵	۴
۰/۰۲۸۶	۴۷/۰	۵/۸۱	۰/۰۷۴	۲/۱۰	۵۱۰	۵
۰/۸۰۵	۸۶/۰	۷/۶۶	۰/۰۵۸	۱/۷۹	۹۵۰	۶
۰/۳۱۸	۳۴/۰	۳/۵۱	۰/۱۳۵	۱/۳۶	۱۴۶	۷
۰/۶۱۷	۵۳/۰	۲/۶۳	۰/۲۹۰	۱/۵۸	۱۹۱	۸
۰/۳۹۰	۴۴/۰	۲/۹۳	۰/۱۹۰	۱/۳۹	۱۹۰	۹
۰/۴۶۵	۳۹/۵	۲/۹۱	۰/۲۳۷	۱/۶۷	۱۷۰/۸	۱۰
۰/۰۵۸	۴۶/۰	۲/۸۱	۰/۲۶۸	۱/۶۸	۱۹۸	۱۱
۷	۶۰/۰	۷/۸۸	۰/۱۸۱	۲/۲۶	۸۸۳	۱۲
۷	۶۰/۰	۵/۷۳	۰/۱۸۶	۲/۰۷	۷۵۱	۱۳
۰/۳۱۱	۶۱/۰	۸/۵۰	۰/۱۲۰	۲/۵۱	۱۰۳۹	۱۴
۰/۰۷۵	۵۴/۰	۴/۹۰	۰/۳۶۹	۲/۰۵	۶۰۰	۱۵
۰/۱۷۳	۱۴/۰	۲/۶۱	۰/۲۰۳	۱/۸۴	۰۰	۱۶
۰/۱۶۳	۱۳/۰	۳/۰۱	۰/۳۸۷	۱/۷۸	۰۶	۱۷
۰/۲۲۹	۱۲/۰	۲/۶۴	۰/۲۹۴	۱/۵۶	۴۳	۱۸
۰/۲۱۵	۲۷/۰	۳/۳۱	۰/۳۰۲	۲/۴۲	۱۹۸/۶	۱۹
۰/۳۶۰	۳۰/۰	۵/۲۵	۰/۱۱۴	۱/۹۸	۲۳۶	۲۰
۰/۳۴۹	۲۰/۰	۴/۲۳	۰/۱۱۰	۲/۰۱	۱۱۳	۲۱
۰/۴۴۶	۴۹/۰	۳/۳۳	۰/۲۱۸	۱/۶۵	۲۲۶/۹	۲۲
۰/۴۲۰	۶۹/۰	۲/۹۵	۰/۳۸۸	۱/۹۰	۳۶۳/۳	۲۳
۰/۲۴۶	۲۹/۰	۳/۶۷	۰/۲۱۶	۱/۸۶	۱۸۰/۶	۲۴

جدول ۲. خلاصه متغیرهای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مقاطع هیدرولیکی رودخانه گاماسیاب

S (m)	w (m)	h (m)	τ_{*0}	u* (m/s)	d ₈₄ (m)	Q (m ³ / s)	S (m)	w (m)	h (m)	شماره قطعه
۰/۰۰۷۲۳	۷/۵۹	۰/۲۷۴	۰/۰۱۵۶	۰/۰۹۷۸	۰/۰۳۸	۱/۹۱	۰/۰۰۹۵	۸/۴	۰/۲۷۴	۱
۰/۰۰۶۸۴	۷/۸۷	۰/۲۸۸	۰/۰۱۶۴	۰/۰۹۸۳	۰/۰۳۶۳	۲/۰۲	۰/۰۰۹۵	۸/۱	۰/۲۷۴	۲
۰/۰۰۶۶۴	۷/۲۱	۰/۲۹۰	۰/۰۲۰۷	۰/۱۰۶۳	۰/۰۳۳۸	۱/۸۶	۰/۰۰۹	۸	۰/۳۱۴	۳
۰/۰۰۸۰۶	۶/۳۵	۰/۲۵۹	۰/۰۱۶۶	۰/۱۰۳۶	۰/۰۴	۱/۰۱	۰/۰۰۷۵	۷	۰/۲۴۴	۴
۰/۰۰۸۱۹	۶/۱۵	۰/۲۹۷	۰/۰۲۴۲	۰/۱۱۸۸	۰/۰۳۶	۱/۷۱	۰/۰۰۷۳	۵/۵	۰/۲۷۴	۵
۰/۰۱۰۱۵	۷/۱۸	۰/۳۵۵	۰/۰۲۱۷	۰/۱۱۸۵	۰/۰۴	۲/۰۲	۰/۰۰۸	۶	۰/۳۶۴	۶
۰/۰۰۴۷۹	۹/۲۱	۰/۲۵۲	۰/۰۱۲۷	۰/۰۸۲۴	۰/۰۳۳	۱/۹۰	۰/۰۰۵۶	۷/۵	۰/۲۷۴	۷
۰/۰۰۴۵۴	۸/۹۱	۰/۱۸۱	۰/۰۰۶۴	۰/۰۶۴۴	۰/۰۴	۱/۲۵	۰/۰۰۴	۹	۰/۱۷۴	۸
۰/۰۰۴۴۷	۱۰/۵۵	۰/۲۶۵	۰/۰۱۲۰	۰/۰۷۸۹	۰/۰۳۲	۲/۲۸	۰/۰۰۴۶	۱۱/۳	۰/۲۵۴	۹
۰/۰۰۶۱۶	۸/۸۲	۰/۳۴۴	۰/۰۲۲۵	۰/۱۰۶۳	۰/۰۳۱	۲/۷۱	۰/۰۰۸	۱۰	۰/۳۷۴	۱۰
۰/۰۰۵۳۵	۸/۷۸	۰/۲۰۳	۰/۰۱۲۵	۰/۰۸۴۲	۰/۰۳۵	۱/۸۰	۰/۰۰۴۲	۹	۰/۲۱۴	۱۱
۰/۰۰۴۹۵	۱۰/۷۶	۰/۳۰۱	۰/۰۱۳۷	۰/۰۸۴۳	۰/۰۳۲	۲/۷۱	۰/۰۰۴	۱۲	۰/۲۹۴	۱۲
۰/۰۰۶۶۹	۱۰/۲۱	۰/۳۲۵	۰/۰۱۳۴	۰/۰۸۹۴	۰/۰۳۷	۲/۹۷	۰/۰۰۸۲	۱۰	۰/۳۳۴	۱۳
۰/۰۰۳۵۲	۱۱/۰۳	۰/۲۷۲	۰/۰۱۴۶	۰/۰۸۰۰	۰/۰۲۷	۲/۳۱	۰/۰۰۶	۱۰	۰/۲۵۴	۱۴
۰/۰۰۵۱۹	۱۰/۳۲	۰/۳۳۵	۰/۰۱۴۸	۰/۰۹۴۵	۰/۰۳	۲/۹۶	۰/۰۰۲۳	۱۰/۵	۰/۳۲۴	۱۵
۰/۰۰۰۹۱	۷/۹۲	۰/۲۶۲	۰/۰۱۰۱	۰/۰۹۲۴	۰/۰۳۵	۱/۷۸	۰/۰۰۵	۸	۰/۲۹۴	۱۶
۰/۰۰۴۹۷	۸/۷۱	۰/۲۱۷	۰/۰۰۹۵	۰/۰۷۵۳	۰/۰۳۷	۱/۰۲	۰/۰۰۵	۸/۹	۰/۲۲۴	۱۷
۰/۰۰۴۱	۸/۲۵	۰/۲۰۰	۰/۰۱۰۷	۰/۰۷۰۷	۰/۰۳۳	۱/۲۸	۰/۰۰۳	۹/۴	۰/۲۰۴	۱۸
۰/۰۰۵۰۵	۸/۹۴	۰/۲۲۴	۰/۰۰۹۶	۰/۰۷۰۷	۰/۰۳۷	۱/۶۳	۰/۰۰۷۲	۸/۹	۰/۲۲۴	۱۹
۰/۰۰۵۲۶	۸/۳۵	۰/۲۲۳	۰/۰۱۰۴	۰/۰۷۹۱	۰/۰۳۷	۱/۰۲	۰/۰۰۵۵	۷/۵	۰/۲۵۴	۲۰
۰/۰۰۳۸۳	۹/۱۲	۰/۲۰۴	۰/۰۱۱۰	۰/۰۷۵۸	۰/۰۳۱	۱/۰۲	۰/۰۰۳۲	۸	۰/۲۴۴	۲۱

جدول ۳. معادلات روش‌های انتخابی برای مقایسه کانال‌های ماسه‌ای

محقق	سال انتشار	عرض کanal	عمق جریان
Lacey	۱۹۵۸	$w = 2/67 Q^{1/5}$	$h = \cdot / 47 \left(\frac{Q}{F_1} \right)^{1/222}$
Chitale	۱۹۶۶	$w = 4/3 Q^{1/523}$	$h = \cdot / 499 (Q)^{1/341}$
Kondap and Garde	۱۹۸۰	$w = \cdot / 212 d_* d^{1/221} \left(\frac{Q}{d^2 \sqrt{\frac{\Delta \gamma_s}{\rho}} d} \right)^{1/548}$	$h = \frac{12d}{d_*^{1/245} \left(\frac{Q}{d^2 \sqrt{\frac{\Delta \gamma_s}{\rho}} d} \right)^{1/204}}$
Chang	۱۹۸۵	$w = \cdot / 17 \left(\frac{S}{d^{1/5}} - \frac{S_c}{d^{1/5}} \right)^{1/0.5} Q^{1/5}$	$h = \cdot / 0.55 \left(\frac{S}{d^{1/5}} - \frac{S_c}{d^{1/5}} \right)^{-1/2} Q^{1/2}$

توجه ۱ : $d_* = \frac{g^{1/2} d^{1/2}}{v}$ که در اینجا d_* قطر ذره بی بعد می‌باشد.

توجه ۲ : $S_c = \frac{0.0228 d^{1/5}}{Q^{1/51}}$ که در اینجا S_c شیب بحرانی کanal می‌باشد.

توجه ۳ : $d = d_5$ و $\Delta \gamma_s = \gamma_s - \gamma$

$v = 1/0.7 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ و $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ ، $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

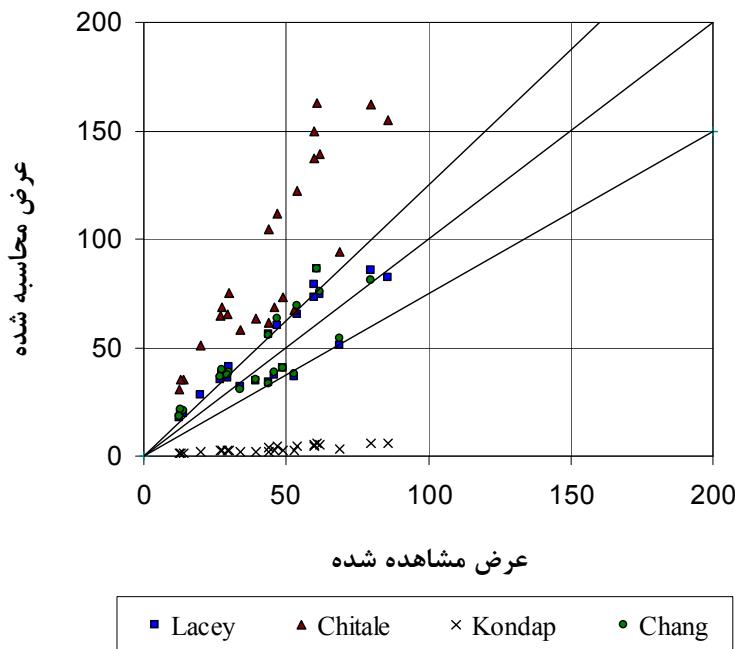
می‌باشند. از طرف دیگر معادله کنداب و گارد به مقدار زیاد عرض کanal را کوچکتر برآورد می‌نماید، به نحوی که تمام ۲۴ عرض محاسبه شده توسط این روش خارج از حد اطمینان ۲۵/- قرار می‌گیرند. همچنین معادلات لاسی و چانگ هر یک ۱۱ مورد عرض کanal را بزرگ‌تر از حد ۲۵٪ برای داده‌های این مطالعه نشان می‌دهند. مقادیر ریشه خطای حداقل مربعات (RMSE) معادلات شیتال و کنداب و گارد به ترتیب با ۵۳/۶۵ و ۴۵/۹۳ نشان می‌دهد که تفاوت قابل ملاحظه بین پیش‌بینی عرض توسط این معادلات و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. مقادیر RMSE معادلات لاسی و چانگ به ترتیب برابر با

نتایج و بحث

۱. جریان یکنواخت

الف) عرض کanal

شکل ۱ برآش مقادیر اندازه‌گیری شده عرض کanal را در مقابل عرض پیش‌بینی شده توسط معادلات جدول ۳ نشان می‌دهد. در این شکل خط برآش ایدآل در وسط و خطوط بالا و پایین این خط حدود اطمینان ۲۵٪ را نشان می‌دهند. با ملاحظه شکل ۱ مشخص می‌شود که معادله شیتال به طور قابل توجهی عرض کanal را بزرگ‌تر پیش‌بینی می‌کند، به نحوی که برای هر ۲۴ کanal مورد مطالعه مقادیر عرض خارج از حد اطمینان ۲۵٪



شکل ۱. مقایسه عرض اندازه‌گیری شده با عرض محاسبه شده توسط معادلات جدول ۳

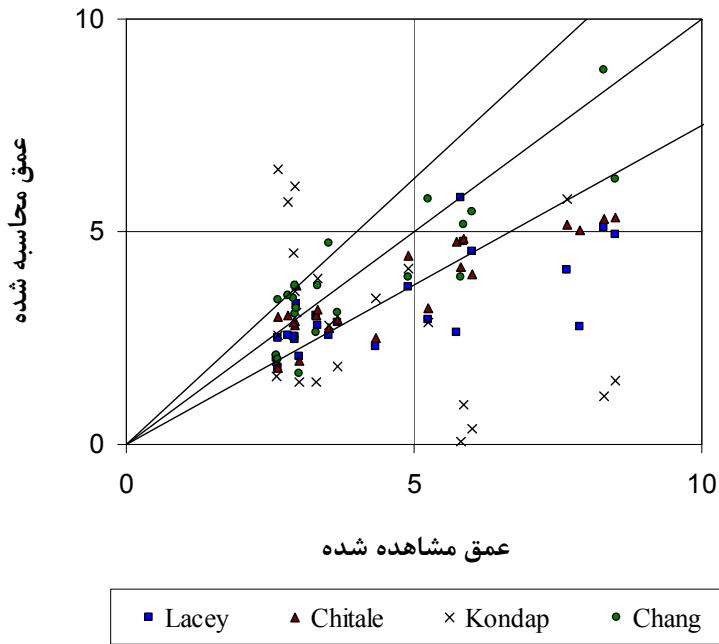
دو کanal شنی ($d = 7^{\text{mm}}$) کاملاً غیر منطقی و بسیار بزرگتر از مقدار اندازه‌گیری شده، تخمین می‌زنند. به دلیل بسیار بزرگ بودن برآورد عرض این دو کanal توسط معادله شیتال، مقادیر آنها از شکل ۱ حذف گردیدند.

ب) عمق جریان

شکل ۲، همانند شکل ۱ برآش مقادیر اندازه‌گیری عمق جریان مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادلات عمق جریان در جدول ۳ را به همراه خط ایدآل و خطوط حدود اطمینان $\pm 25\%$ نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۲، معادله لاسی در هیچ موردی عمق جریان را بزرگ‌تر از حد اطمینان $+25\%$ تخمین نمی‌زنند. اگرچه در 10% مورد عمق جریان را کوچک‌تر از حد اطمینان -25% برآورد می‌نمایید. معادله شیتال در یک مورد تخمین بزرگ‌تر و در 11% مورد عمق جریان را کوچک‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده با حدود اطمینان $\pm 25\%$ برآورد می‌کند. معادله کندپ و گارد نشان می‌دهد که اندازه گیری شده خارج حد اطمینان $+25\%$ و 10% مورد خارج از حد اطمینان -25% نامناسب‌ترین معادله پیش‌بینی

۱۱/۹۴ و ۱۱/۸۱ برآورد مناسب‌تر این معادلات را نسبت به معادلات شیتال و کندپ و گارد نشان می‌دهند.

لازم به ذکر است که معادله عرض چانگ به عواملی مانند S و S_c (شیب و شیب بحرانی) وابسته است که اندازه‌گیری و برآورد دقیق آنها به ویژه در کanal‌های طبیعی بسیار مشکل می‌باشد. بر اساس نتایج این تحقیق کاربرد معادله عرض چانگ در چهار مورد منتهی به شرایطی می‌گردد که در آن $S > S_c$ می‌باشد که نتیجه آن عدم حصول مقدار عددی معین و صحیح برای عرض کanal می‌باشد. از چهار مورد فوق الذکر دو مورد آن مربوط به کanal‌های شنی ($d = 7^{\text{mm}}$) می‌باشد. این موضوع حساسیت معادله چانگ را به اندازه قطر رسوب و شرایط جریان در کanal نشان می‌دهد. هم‌چنین اگر چه معادلات لاسی و شیتال هر دو فقط به دبی جریان به عنوان متغیر مستقل بستگی دارند اما نتایج پیش‌بینی آنها کاملاً متفاوت است، به طوری که معادله شیتال علاوه بر بزرگ‌تر تخمین زدن عرض کanal به طور قابل توجهی به اندازه ذره رسوب حساس می‌باشد. بر این اساس معادله شیتال مقادیر عرض کanal را برای



شکل ۲. مقایسه عمق جریان اندازه‌گیری شده با عمق جریان محاسبه شده توسط معادلات جدول ۳

مانند ρ_6 و ρ_7 به عنوان ورودی استفاده می‌کند ولی نتایج حاصل بسیار ضعیفتر از معادله لاسی است که فقط از دبی جریان به عنوان ورودی استفاده می‌نماید. در واقع نتایج حاصل از مقایسه معادلات عرض و عمق جریان در این پژوهش نشان می‌دهد قدرت پیش‌بینی معادلات بیشتر از آن که به شرایط سیال و رسوب وابسته باشند، به شرایط جغرافیایی و هیدرولوژیکی داده‌های اندازه‌گیری شده بستگی دارند. این شرایط به صورت ضرایب و توان‌ها در معادلات ظاهر می‌شوند به طوری که با وجود یکسان بودن ورودی معادلات لاسی و شیتال (هر دو فقط از دبی جریان استفاده می‌کنند)، نتایج پیش‌بینی آنها کاملاً متفاوت است. مقادیر بزرگ RMSE برای معادلات انتخابی عرض و عمق ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که دبی جریان و قطر ذره پارامترهای ورودی کافی برای داشتن پیش‌بینی مناسب مقطع پایدار نیستند

۲. جریان غیر یکنواخت

این روش توسط افضلی مهر (۱) براساس تئوری لایه مرزی با

عمق جریان در این تحقیق می‌باشد. معادله چانگ با ۳ مورد تخمین بزرگ‌تر و ۲ مورد تخمین کوچک‌تر از حدود اطمینان $\pm 25\%$ مناسب‌ترین معادله پیش‌بینی عمق جریان در این مطالعه می‌باشد. از طرف دیگر مقادیر RMSE چهار معادله انتخابی عمق جریان یعنی لاسی، شیتال، کنداب و گارد و چانگ به ترتیب $1/529$, $1/977$, $34/299$ و $0/960$ می‌باشد. ملاحظه این مقادیر نتایج به دست آمده از مشاهدات گرافیکی شکل ۲ را تأیید می‌نماید.

لازم به ذکر است که وابستگی معادله عمق جریان چانگ به شیب (S) و شیب بحرانی (S_c) کاربرد آن را محدود و توأم با احتیاط می‌نماید به طوری که هر گاه $S > S_c$ باشد نمی‌توان به مقداری معین برای عمق جریان توسط این معادله دست یافت. نکته قابل توجه در پیش‌بینی‌های انجام شده براساس چهار معادله انتخابی برای عرض و همین طور چهار معادله انتخابی برای عمق عدم تأثیر پیچیدگی ظاهری آنها به دلیل کاربرد متغیرهای بیشتر در بهبود نتایج می‌باشد. به عبارت دیگر اگرچه معادله کنداب و گارد از قطر ذره و مشخصات رسوب و آب

الف) عرض کanal

برای تعیین عوامل موثر در پیش‌بینی عرض کanal با استفاده از آنالیز ابعادی از تمام متغیرهای اندازه‌گیری شده در جدول ۲ استفاده گردید که در نتیجه فقط دبی جریان، پارامتر شیلدز و قطر ذره اثر معنی‌داری بر پیش‌بینی عرض کanal نشان دادند. بنابراین، با استفاده از روش آنالیز رگرسیونی برای ۲۱ نیم‌رخ سرعت اندازه‌گیری شده در این مطالعه معادله زیر برای عرض جریان ارائه می‌گردد:

$$w = 0.74d^{0.75} Q^{0.47} \tau_{*0}^{-0.45} \quad [3]$$

ضریب تعیین ۷۲٪ نشان می‌دهد که عوامل مستقل Q ، τ_{*0} و d_{84} می‌توانند ۷۲٪ توانایی توانند در محدوده اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده عرض کanal ایجاد کنند. در محاسبه τ_{*0} از سرعت برشی به روش کلازر (۱۵) استفاده به عمل آمده که فقط از داده‌های ۲۰٪ نزدیک بستر استفاده می‌کند که خود خطر هم‌بستگی ساختگی را متفقی می‌کند. هم‌چنین نمای دبی در این معادله نزدیک به عدد ۰/۵ می‌باشد که هم‌آهنگی جالبی با معادلات ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد.

ب) عمق کanal

با استفاده از روش هم‌بستگی آماری برای ۲۱ نیم‌رخ سرعت و با در نظر گرفتن فرایند انتخاب مدل در نرم‌افزار SAS، معادله زیر برای عمق متوسط جریان پیشنهاد گردید:

$$h = 0.745 Q^{0.379} \tau_{*0}^{-0.299} \quad [4] \quad (R^2 = 0.85)$$

این معادله نشان می‌دهد که نمای دبی در معادله فوق به طور قابل ملاحظه‌ای متناسب با معادلات انتخابی در جدول ۳ می‌باشد و هم‌چنین عمق جریان به طور معکوس متناسب با پارامتر شیلدز می‌باشد. لازم به ذکر است که در صورت عدم استفاده از روش لایه مرزی برای محاسبه سرعت برشی مبتنی بر داده‌های ناحیه داخلی نیم‌رخ سرعت در برآورد پارامتر شیلدز، تنش برشی به صورت $\tau_0 = ghS$ تعریف می‌گردد که به دلیل کاربرد h و S در طرف راست و چپ معادله‌های ۴ و ۵ ضریب تعیین به طور ساختگی افزایش می‌یافتد.

استفاده از پروفیل سرعت توسعه یافته است. فرضیه بنیادی که از طریق تجربه تأثیر شده آن است که پروفیل سرعت را می‌توان به دو ناحیه داخلی و خارجی تقسیم کرد و برآذش مناسبی از قانون لگاریتمی در ناحیه داخلی که حدود ۲۰٪ عمق جریان در نزدیک بستر را شامل می‌شود به دست آورد (۷). قانون لگاریتمی توزیع سرعت در ناحیه داخلی امکان محاسبه سرعت برشی و در پی آن امکان محاسبه پارامتر شیلدز که از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیک رسوب بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{*0} = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gd_{84}} \quad [2]$$

را فراهم می‌سازد که در آن τ_0 : پارامتر شیلدز، τ : تنش برشی بستر، ρ_s : چگالی رسوب، ρ : چگالی آب، g : شتاب ثقل و d_{84} : قطر مشخصه ذرات رسوب در منحنی دانه بندی است که ۸۴٪ ذرات از آن ریزتر می‌باشند.

پارامتر شیلدز به طور قابل توجهی قابلیت پیش‌بینی مشخصات هندسی مقطع پایدار مانند عمق جریان و توزیع تنش برشی و شبیه کف کanal را بهبود می‌بخشد. علت عدمه این بهبود در نظر گرفتن ساختار میکروسکوپیک (موقعی) جریان در هر مقطع کanal می‌باشد. از طرف دیگر کاربرد فقط ۲۰٪ داده‌های عمق جریان در محاسبه تنش برشی خطر هر نوع هم‌بستگی ساختگی (Spurious correlation) را از بین می‌برد. زیرا در این حالت به جای کاربرد تمام داده‌های نیم‌رخ سرعت مربوط به یک عمق جریان h ، فقط از داده‌های ۲۰٪ عمق جریان نزدیک بستر استفاده می‌شود. در نتیجه برای به دست آوردن یک معادله مانند معادله ۴ در دو طرف از عمق جریان، h استفاده نمی‌شود تا وجود این متغیر مشترک باعث افزایش ساختگی ضریب تعیین معادله گردد.

پارامترهای به دست آمده از تعداد ۲۱ نیم‌رخ سرعت اندازه‌گیری شده تحت جریان دائمی غیر یکنواخت در رودخانه شنی گاماسیاب در جدول ۲ ارائه شده‌اند. نتایج حاصل برای جریان غیر یکنواخت به صورت زیر ارائه می‌شود:

برستند. بنابراین ضرورت ارائه روابط منطقه‌ای به ویژه در ایران اجتناب ناپذیر است.

۳. کاربرد تئوری لایه مرزی و در نظر گرفتن جریان غیر یکنواخت که در پارامتر سرعت برشی u_* برای محاسبه پارامتر شیلدز τ_* در معادلات $3, 4$ و 5 مورد استفاده قرار گرفت به طور قابل ملاحظه‌ای قدرت پیش‌بینی مشخصات مقطع کanal پایدار به ویژه عمق و عرض کanal را افزایش می‌دهد.

۴. کاربرد داده‌های در دسترس نشان داد معادله شیب چانگ نیز تخمین مناسبی از این پارامتر به دست نمی‌دهد بنابراین در این مقاله از روش تحلیلی چانگ صرفاً برای تجزیه و تحلیل عرض و عمق جریان استفاده گردید و از ارائه نتایج شیب صرف نظر شد.

۵. معادلات مورد مطالعه برای جریان یکنواخت در این تحقیق و سایر پژوهش‌ها از دبی جریان و قطر ذره به عنوان عوامل اصلی پیش‌بینی مقطع کanal پایدار استفاده می‌کنند. برای بهبود قدرت پیش‌بینی مقطع کanal پایدار لازم است سایر عوامل و پارامترهای هیدرولیکی مانند پوشش گیاهی کanal و دبی رسوب در مطالعات بعدی مورد توجه قرار گیرند. در این راستا مطالعه توزیع تنش برشی بستر می‌تواند کمک قابل توجهی به درک مکانیزم تعدل و بهبود پیش‌بینی طراحی کanal‌های پایدار نماید.

۶. دانش موجود برای مکانیزم تعدل و پیش‌بینی شیب کanal پایدار هنوز کافی و مناسب نیست. تحقیق در این زمینه برای کاهش هزینه نگهداری کanal پایدار بسیار ضروری و اجتناب ناپذیر است.

ج) شیب کف کanal

بدون کاربرد تئوری لایه مرزی امکان ارائه یک معادله مناسب برای شیب کف کanal وجود ندارد و در بهترین شرایط برای داده‌های 280 رودخانه در نقاط مختلف جهان $R^2 = 0.06$ می‌باشد (۱). ولی کاربرد این تئوری که امکان تخمین مناسبی از تنش برشی بستر و در پی آن پارامتر شیلدز را فراهم می‌کند افزایش قابل توجهی را در ضریب تعیین ایجاد می‌کند که اگر چه هنوز مطلوب نیست ولی نسبت به وضع موجود معادلات شیب (۱) به طور قابل توجهی دارای پیش‌بینی بهتری می‌باشد. معادله شیب کف براساس داده‌های رودخانه گاماسیاب به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$S = 65 / 54 d^{2/0.84} \tau_*^{0.575} Q^{0.149} [5]$$

این معادله نشان می‌دهد که در نظر گرفتن پارامتر شیلدز در تخمین شیب کanal نه تنها می‌تواند قدرت پیش‌بینی مشخصات مقطع کanal پایدار را افزایش دهد، بلکه قادر است به دلیل کاربرد روش لایه مرزی در تخمین آن، اثر ساختار توزیع تنش برشی در امتداد قائم (τ_0) برای جریان غیر یکنواخت را که متمایز از جریان یکنواخت در محاسبه سرعت برشی بستر می‌باشد در غالب ضریب و نمای حاصل از معادله هم‌بستگی تصویر کند.

نتیجه‌گیری

بر اساس این تحقیق می‌توان نتایج زیر را استنتاج نمود:
۱. معادلات مطالعه شده در این مقاله براساس تئوری رژیم برای طراحی کanal‌های پایدار با جریان یکنواخت قادر به پیش‌بینی مناسب برای تمام پارامترهای مقطع پایدار شامل عرض و عمق و شیب نیستند.

۲. هر دو روش تجربی و نیمه تجربی قادر به توضیح فرایند ایجاد مقطع پایدار نیستند. اگر چه هر دو روش می‌توانند به نتایج نسبتاً مناسب منطقه‌ای بدون توضیح فرایند تئوریک

منابع مورد استفاده

۱. افضلی مهر، ح. ۱۳۸۰. طراحی کانال‌های پایدار در بستر شنی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۳(۵): ۱۷-۳۱.
۲. ASCE Task Committee on Hydraulics. 1998. Bank Mechanics and modeling of river width adjustment.1: processes and mechanisms. J. Hydraul. Eng. ASCE 124 (9): 881-902.
۳. Bogardi, J. 1974. Sediment Transport in Alluvial Streams. Akademiai Kiado, Budapest.
۴. Chang, H. H. 1985. Design of stable alluvial canals in a system. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE 111(1): 36-43.
۵. Chitale, S. V. 1966. Hydraulic of stable channels. New Delhi, India Ministry of irrigation of government of India, 275-323.
۶. Julien, P. Y. and J. Wargadalam. 1995. Alluvial channel geometry: Theory and applications. J. Hydraul. Eng. ASCE 121(4): 312-325.
۷. Kironoto, B. and W. H. Graf. 1994. Turbulence characteristics in rough uniform open - channel flow. Proc. Inst. Civ. Eng., Wat, Marit. & Energy 106: 333-344 GB.
۸. Kondap, D. M. and R. J. Garde. 1980. Application of optimization principles in the study of stable channels. Proceedings Inter. Workshop on Alluvial River Problems, University of Roorkee, Roorkee, India.
۹. Lacey, G. 1958. Flow in alluvial channels with sand mobile beds. Proc. Inst. Civ. Eng., London, 9, Discussion 11.
۱۰. Leopold, L. B. and W. B. Langbein. 1962. The concept of entropy in landscape evolution. U. S. Geol. Survey, Prof. paper 500-A.
۱۱. Lindley, E. S. 1919. Regime channels. Proc. Punjab Eng. Congress. Vol. VII, India.
۱۲. Millar, R. G. and M. C. Quick. 1998. Stable width and depth of gravel-bed rivers with Cohesive banks. J. Hydraul. Eng. ASCE 124 (10): 1005-1013.
۱۳. Simons, D.B. 1957. Theory and design of stable channels in alluvial materials. Ph.D. Thesis, Colorado State University.
۱۴. Song, C.S.S. and C. T. Yang. 1980. Minimum stream power: theory. J. Hydraul. Eng. ASCE 106(9): 1477-1488.
۱۵. Song, T., W. H. Graf and U. Lemmin. 1994. Uniform flow in open channels with movable gravel bed. J. Hydraul. Res. 32(6): 861-876.
۱۶. White, W. R., R. Bettess and E. Paris. 1982. Analytical approach to river regime. J. Hydraul. Eng. ASCE 108(10): 1179-1193.